

ISSN 2302 – 5182



TEKNIK DESAIN MEKANIKA

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 10 • Nomor 2 • APRIL • 2021 • Hal. 1279-1412

**Program Studi Teknik Mesin – Fakultas Teknik
Universitas Udayana**



Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik, Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80362
Telp./Fax.: +62 361 703321
<http://www.mesin.unud.ac.id>



JITM-TDM

Volume 10

Nomor 2

Hal. 1279-1412

Badung, April 2021

ISSN 2302-5182

TEKNIK DESAIN MEKANIKA
Jurnal Ilmiah Teknik Mesin



Volume 10, Nomor 2, April 2021, Hal. 1279 – 1412

Penanggung Jawab

Koordinator Program Studi Teknik Mesin UNUD

Ketua Dewan Redaksi

Ir. I Nengah Suarnadwipa, M.T.

Redaksi Pelaksana/Tim Validasi

I Gede Teddy Prananda Surya, S.T., M.T.

I Made Astika, ST., M.Erg, MT

Ir. A. A Adhi Suryawan, MT

I Gede Putu Agus Suryawan, S.T, M.T.

Dr. Ir. I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa, MT

Dr. Ir. I Ketut Suarsana, MT

Ir. I Made Suarda, M. Eng.

Editor Ahli

Dosen-dosen di Program Studi Teknik Mesin
Universitas Udayana

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin **TEKNIK DESAIN MEKANIKA** diterbitkan oleh Program Studi Teknik Mesin - Universitas Udayana empat kali dalam setahun pada bulan Januari, April, Juli dan Oktober, berisi artikel hasil penelitian dan kajian teoritis-analitis di bidang Teknik Mesin. Dewan redaksi menerima tulisan yang belum pernah serta tidak sedang dipertimbangkan untuk diterbitkan atau dipublikasikan dalam media lain. Naskah diketik dalam Bahasa Indonesia atau bahasa Inggris dengan mengikuti pedoman yang dapat diunduh di halaman website Teknik Mesin UNUD atau web JITM-TDM.

Alamat Redaksi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana

Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali 80362

Telp. / Fax.: 62 361 703321

E-mail: jitm_tdm@me.unud.ac.id; t_desain_mekanika@yahoo.co.id

Info JITM-TDM: www.mesin.unud.ac.id

Kata Pengantar

Puji syukur tercurahkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas terbitnya Jurnal Ilmiah Teknik Mesin – TEKNIK DESAIN MEKANIKA, Universitas Udayana volume 10 Nomor 2 April 2021 ini. Penerbitan jurnal ini bertujuan menyediakan media publikasi untuk hasil-hasil penelitian maupun kajian aplikasi di bidang Teknik Mesin, baik untuk peneliti di kalangan internal maupun eksternal kampus Universitas Udayana, baik dari kalangan mahasiswa maupun dosen.

Dewan redaksi mengucapkan terima kasih atas dukungan dan motivasi dari rekan-rekan di kampus serta pimpinan program studi dalam merealisasikan terbitnya jurnal ini. Dewan redaksi juga menyampaikan terima kasih atas partisipasi rekan-rekan peneliti yang mengirimkan naskahnya untuk dipublikasikan via Jurnal Teknik Mesin Universitas Udayana.

Dalam penerbitan JITM TEKNIK DESAIN MEKANIKA Volume 10 Nomor 2 ini, disajikan 24 artikel, dalam berbagai topik meliputi gasifikasi/biogas, transmisi, studi numerik uji tarik, material, pompa, pembakaran, kolektor surya, pompa kalor dan komposit.

Akhirnya, Dewan redaksi berharap semoga artikel-artikel dalam jurnal ini bermanfaat bagi pembaca dan memperkuat semangat untuk ikut dalam pengembangan ilmu dan teknologi terutama di bidang Teknik Mesin. Kami tunggu naskah-naskah untuk penerbitan berikutnya.

Dewan Redaksi

TEKNIK DESAIN MEKANIKA

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 10 • Nomor 2 • April 2021 • Hal. 1279 – 1412

Daftar Isi

Pengaruh Peningkatan Temperatur Karbonisasi Terhadap Karakteristik Struktur Pori Pada Bambu Betung Jeremia Romualdo Winner Napitu, I Nyoman Suprpta Winaya, Hendra Wijaksana	1279- 1282
Kincir Angin Tipe Vertikal Dengan Menggunakan Natural Convection Ruang Pengering Sebagai Penggerak Gabrielle Titania Hindra, I. G. B. Wijaya Kusuma, Suarnadwipa	1283 - 1288
Studi Laju Pembakaran Pada Insinerator Sampah Residu Javents Lumbantobing, I Nyoman Suprpta Winaya, I Gede Putu Agus Suryawan	1289 – 1292
Uji Variasi Kadar Air (<i>Moisture Content</i>) Sampah Residu Terhadap Performansi Insinerator Rio Sua Geralta Ginting, I Nyoman Suprpta Winaya, I Gede Putu Agus Suryawan	1293 – 1297
Pengaruh <i> Holding Time </i> Terhadap Kekerasan Material Bilah Gangsa Gamelan Bali Simon Paskah Aprian Damanik, I Gusti Ngruah Priambadi, Wayan Nata Septiadi	1297- 1303
Perancangan Sistem Kontrol Kecerdasan Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink Dadang Yuda Saputra, I Wayan Widhiada, I Ketut Adi Atmika	1304- 1311
Perancangan Sistem Kontrol Pid Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink Anak Agung Bagus Sutasoma, I wayan Widhiada, I Ketut Adi Atmika	1312 – 1317
Perancangan Sistem Kontrol Hybrid Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink I Made Mahatma Tantra Nagendra, I Wayan Widhiada, dan I Ketut Adi Atmika	1318 – 1323
Pengaruh Orientasi Sudut Anyaman Serat Terhadap Kekuatan Tarik Komposit Poliester Diperkuat Serat Basal Muhamad Arsyi Alfatin, Ngakan Putu Gede Suardana, I Gede Putu Agus Suryawan	1324 - 1328
Analisa Karakteristik Solar Dengan Kondensat Dari Campuran Plastik dan Pasir Pembentuk <i>Paving Block</i> Melalui Uji Bom Kalorimeter dan <i>Gas Analyzer</i> I Gede Wahyu Dian Krisnanda, Ngakan Putu Gede Suardana, dan I Wayan Bandem Adnyana	1328 – 1333
Karakteristik Mekanik Papan Partikel Komposit Serbuk Kayu Jati Matriks Resin Polyester dengan Variasi Fraksi Massa I Nengah Kariana, C.I.P.K Kencanawati, D.N.K Putra Negara	1334 - 1340
Analisa Karakteristik Solar Dengan Kondensat Campuran Plastik Pasir Pembentuk	1341 - 1346

<i>Paving Block Melalui Uji Proximate dan Ultimate</i> I Wayan Sidhi Adnyana, Ngakan Putu Gede Suardana dan I Wayan Bandem Adnyana	
Audit dan Analisis Energi Listrik di Hotel Bali Dinasty Resort I Gede Yogi Iswara , I.G.B Wijaya Kusuma , I Made Dwi Budiana Penindra	1347 - 1352
Analisa Kinerja Mesin Pembangkit Listrik Tenaga Gas Unit 1 Blok 1 di PT. Indonesia Power Grati POMU A.A.N. Putra Damara A.W., I.G.B. Wijaya Kusuma, A.A.I.A. Sri Komaladewi Dedy Rony Putra Nadapdap, Made Suarda, Made Sucipta	1353 - 1359
Pengaruh Kecepatan Angin dan Kecepatan Kendaraan Terhadap Gaya Skid Pada Mobil Chevrolet Camaro Arantxa Rama Syamsudin, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, Suarnadwipa	1360 - 1366
Karakterisasi Limbah Medis dan Bed Material Pasir Alumina Pada Pembakaran Fluidized Bed Claudia Elsha Alvince, I Nyoman Suprapta Winaya, I Putu Lokantara	1367 - 1370
Karakterisasi Limbah Medis dan Bed Material Pasir Silika pada Fluidized Bed Combustion Olan Rexcy Sanderan, I Nyoman Suprapta Winaya, I Putu Lokantara	1371 - 1374
Analisa External Flow Pada Mobil Tesla Model S Saat Melaju di Tikungan Alief Fadil Djanuarno, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, N. Suarnadwipa	1375 - 1382
Pengaruh Temperatur Karbonisasi Bambu Betung Terhadap Wettability Dan Kekasaran Permukaan Material Wildan Akhsan, I Wayan Bandem Adnyana, Hendra Wijaksana	1383 - 1386
Studi Eksperimental Perpindahan Kalor dan Pengamatan Temperatur pada Mesin dan Radiator Kendaraan Adrian Utomo Nugroho, Wayan Nata Septiadi, Ketut Astawa	1387 - 1393
Studi Eksperimental Karakteristik Permeabilitas Pada Arang Dan Karbon Aktif Bambu Betung Rere Septire Elifere, I Ketut Gede Wirawan, Hendra Wijaksana	1394 - 1398
Analisa Unjuk Kerja Heat Recovery Steam Generator Pada Blok 1 Unit 1 Pt. Indonesia Power Grati Pomu Gede Ferdy Wardiana, I.G.B. Wijaya Kusuma, A.A.I.A. Sri Komaladewi	1399 - 1404
Auto Tuning PID Kontrol Pada Inkubator Bayi I Putu Pasek Pradipta Rezkyasa, A.A.Adhi Suryawan, dan I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa	1405 - 1408
Studi Efisiensi Pembakaran Pada Pembakaran Fluidized Bed Limbah Medis Febyoga Pratama Ginting, I Nyoman Suprapta Winaya, I Putu Lokantara	1409 – 1412

Pengaruh Peningkatan Temperatur Karbonisasi Terhadap Karakteristik Struktur Pori Pada Bambu Betung

Jeremia Romualdo Winner Napitu, I Nyoman Suprpta Winaya,
Hendra Wijaksana
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Dalam usaha mendapatkan tingkat kenyamanan, digunakan sistem air conditioning (AC) yang berbasis kompresor yang memerlukan jumlah energi listrik yang sangat besar dan dapat meningkatkan pemanasan global. Maka dari itu, diperlukan sistem pendingin yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Salah satu sistem pendingin alternatif tersebut adalah sistem *direct evaporative cooling*. Dalam sistem *direct evaporative cooling*, efek pendinginan diberikan oleh proses penguapan yang terjadi pada material pad yang telah terbasahi oleh air. Material pad itu sendiri digunakan untuk aplikasi sistem pendingin evaporative, sebagai media pendingin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh peningkatan temperatur karbonisasi terhadap karakteristik struktur pori, porositas dan tegangan permukaan fluida pada bambu betung. Sebagai bahan baku, bambu dapat menghasilkan arang berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang tinggi. Digunakan temperatur karbonisasi 500°C (T1), 600°C (T2), 700°C (T3), dan 800°C (T4). Hasil dari seluruh pengujian menunjukkan bahwa spesimen T4 (800°C) memiliki potensi yang sangat besar untuk dijadikan material pad baru pada sistem *direct evaporative cooling*. Dengan karakteristik sebagai berikut: spesimen T4 memiliki jari-jari pori, 36.97 µm dengan jumlah 134 pori dan relatif lebih homogen.

Kata kunci: Direct evaporative cooling, bambu betung, karbonisasi, dan struktur pori.

Abstract

In an effort to get a level of comfort, a compressor-based air conditioning (AC) system is used that requires a very large amount of electrical energy and can increase global warming. Therefore, a more energy efficient and environmentally friendly cooling system is needed. One such alternative cooling system is *direct evaporative cooling* system. In *direct evaporative cooling* system, cooling effect is given by evaporation process that occurs in pad material that has been moistened by water. The pad material itself is used for evaporative cooling system application, as cooling media. This study aims to analyze the effect of increasing carbonization temperature on pore structure characteristics, porosity and fluid surface tension in betung bamboo. As a raw material, bamboo can produce porous charcoal with a high specific surface area and high porosity. Used carbonization temperatures of 500°C (T1), 600°C (T2), 700°C (T3), and 800°C (T4). The results of all tests indicate that the T4 specimen (800°C) has a very large potential to be used as a new pad material in the *direct evaporative cooling* system. With the following characteristics: the T4 specimen has a pore radius of 36.97 µm with a total of 134 pores and is relatively more homogeneous.

Keywords: Direct evaporative cooling, betung bamboo, carbonization, and pore structure.

1. Pendahuluan

Dalam usaha menjamin ketersediaan air pada material pad maka perlu dilakukan peningkatan tekanan kapiler (*capillary force*) material tersebut. *Capillary force* suatu material dipengaruhi oleh tegangan permukaan fluida, sudut kontak, dan jari-jari pori. Maka dari itu, peningkatan *capillary force* pada material pad sistem *direct evaporative cooling* dapat dilakukan dengan peningkatan struktur pori material pad melalui proses karbonisasi. Proses karbonisasi akan merubah material menjadi *carbonized material* berupa arang (*charcoal*) yang diikuti dengan perubahan struktur pori termasuk didalamnya jari-jari pori, distribusi pori, luas permukaan pori dan juga volume pori. Ukuran pori yang dihasilkan akan tergantung dari temperatur karbonisasi dan aktivasi karbon yang diberikan, semakin tinggi temperatur karbonisasi, semakin besar

ukuran pori yang dihasilkan. Proses karbonisasi dilakukan dalam oven secara normal dengan aliran N₂ pada temperatur lebih dari 800-1200°C pada waktu yang lebih lama. Namun arang bambu juga dapat diproduksi pada suhu yang lebih rendah (500-900°C) dengan kualitas yang berbeda [1]. Proses karbonisasi akan menjadikan material memiliki struktur pori dengan ukuran pori yang secara umum masih lebih besar dari ukuran pori nano.

Sebagai bahan baku, bambu dapat menghasilkan arang berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang tinggi. Bambu tumbuh dengan cepat dan bisa dipanen setiap empat tahun. Mengganti kayu dengan bambu untuk pembuatan arang berpori dapat mengurangi emisi karbondioksida [2].

Dalam hal ini maka ada beberapa permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

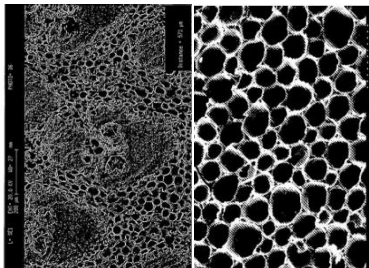
1. Bagaimana pengaruh peningkatan temperatur karbonisasi terhadap karakteristik struktur pori bambu betung sebagai *material pad* sistem *direct evaporative cooling*?

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Material yang digunakan adalah bambu betung lokal Bali.
2. Pengujian karbonisasi dilakukan pada temperatur kamar (*indoor*)
3. Reaktor karbonisasi dalam lingkungan bebas oksigen (*inert atmosphere*)

2. Dasar Teori

Karbonisasi adalah proses pirolisis material organik dalam kondisi bebas oksigen (*inert atmosphere*) yang menghasilkan residu solid yang memiliki kandungan elemen karbon yang tinggi. Temperatur karbonisasi sangat menentukan derajat karbonisasi dan kandungan elemen karbon pada residu [3]. Tujuan dari proses karbonisasi adalah memperkaya kandungan karbon dan menghasilkan porositas awal material. Ukuran pori yang dihasilkan akan tergantung dari temperatur karbonisasi dan aktivasi karbon yang diberikan, semakin tinggi temperatur karbonisasi, semakin besar ukuran pori yang dihasilkan. Sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 1, struktur pori yang terbentuk pada bambu setelah proses karbonisasi.



Gambar 1. Struktur pori arang bambu moso.

Karakteristik struktur pori dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut:

$$r_p = \left(\frac{L_{pp}}{4\pi} \right)^{0.5} \quad (1)$$

r_p = Jari-jari pori (μm)

L_{pp} = Total luas permukaan pori (μm^2)

$$V_{pw} = M_a \times V_s \quad (2)$$

V_{pw} = Volume pori yang terbentuk (mm^3)

M_a = Massa air yang terserap (gr)

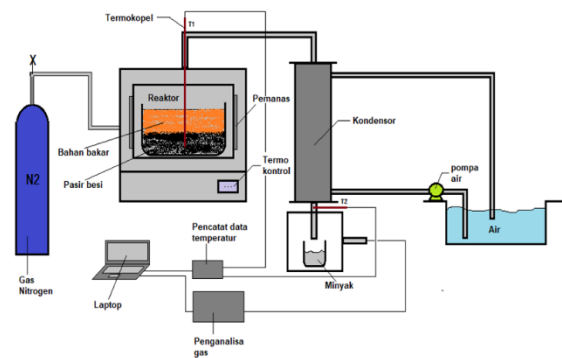
V_s = Volume spesifik air (mm^3/gr)

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan peralatan dan bahan sebagai berikut:

1. Bambu betung (*Dendrocalamus Asper*)
2. Gerinda & *cutter*
3. Image J
4. Timbangan
5. Aluminium foil & cawan
6. Peralatan pengujian karbonisasi

7. Peralatan pengujian *scanning electron microscope* (SEM)



Gambar 2. Peralatan pengujian karbonisasi.

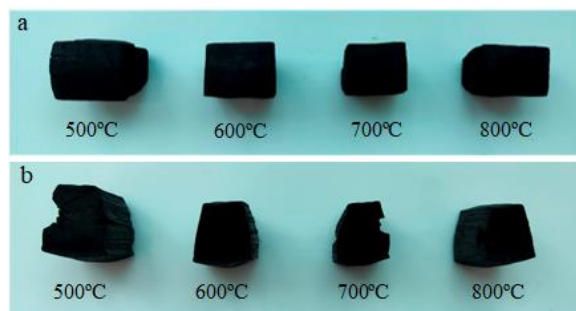


Gambar 3. Peralatan pengujian *scanning electron microscope* (SEM).

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karbonisasi

Dari pengujian karbonisasi maka dihasilkan arang bambu betung. Pada penelitian ini, diharapkan struktur pori yang dihasilkan dari spesimen bambu betung yang telah dikarbonisasi mempunyai jari-jari pori yang relatif kecil dengan jumlah yang banyak dan homogen, agar spesimen bambu betung yang telah dikarbonisasi mempunyai nilai porositas yang tinggi dan tekanan kapiler (*capillary force*) yang tinggi. Gambar 4, menunjukkan hasil pengujian karbonisasi berupa arang bambu betung.



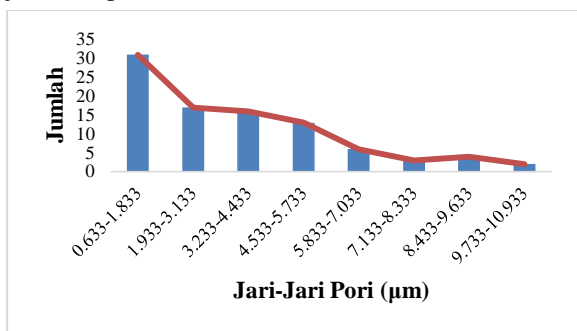
Gambar 4. Arang bambu betung. a) Permukaan kulit pada arang bambu betung. b) Permukaan pori pada arang bambu betung

4.2. Karakteristik Struktur Pori

Struktur pori terdiri dari jari-jari pori, distribusi pori, luas permukaan pori, dan volume pori. Struktur pori pada bambu betung dapat diketahui melalui

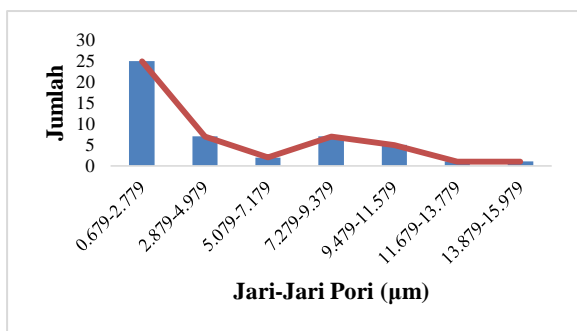
pengujian *scanning electron microscope* (SEM) dan analisis menggunakan aplikasi Image J.

Gambar 5, menunjukkan grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T1 (500°C). Berdasarkan grafik tersebut, terdapat total 92 pori. Dimana frekuensi jari-jari pori terbesar terdapat pada interval kelas 0.633-1.833 (μm) dengan jumlah 31 pori. Sementara frekuensi jari-jari pori terkecil terdapat pada interval kelas 9.733-10.933 (μm) dengan jumlah 2 pori



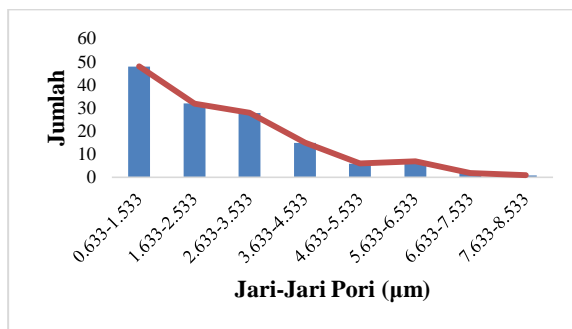
Gambar 5. Grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T1 (500°C).

Gambar 6, menunjukkan grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T2 (600°C). Berdasarkan grafik tersebut, terdapat total 48 pori. Dimana frekuensi jari-jari pori terbesar terdapat pada interval kelas 0.679-2.779 (μm) dengan jumlah 25 pori. Sementara frekuensi jari-jari pori terkecil terdapat pada interval kelas 11.679-13.779 (μm) dan 13.879-15.979 (μm) dengan jumlah 1 pori.



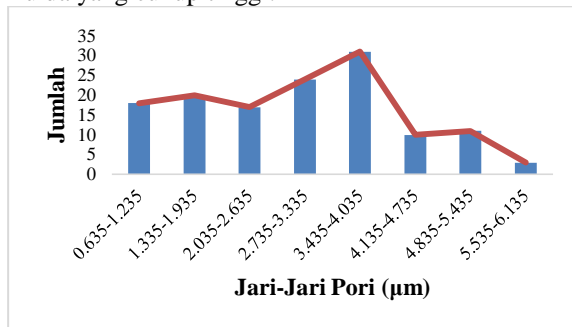
Gambar 6. Grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T2 (600°C).

Gambar 7, menunjukkan grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T3 (700°C). Berdasarkan grafik tersebut, terdapat total 139 pori. Dimana pada spesimen T3 (700°C) memiliki lebih banyak jumlah pori jika dibandingkan dengan spesimen T1 (500°C), T2 (600°C), dan T4 (800°C). Dengan frekuensi jari-jari pori terbesar terdapat pada interval kelas 0.633-1.533 (μm) dengan jumlah 48 pori. Sementara frekuensi jari-jari pori terkecil terdapat pada interval kelas 7.633-8.533 (μm) dengan jumlah 1 pori.



Gambar 7. Grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T3 (700°C).

Gambar 8, menunjukkan grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T4 (800°C). Berdasarkan grafik tersebut, terdapat total 134 pori. Dimana frekuensi jari-jari pori terbesar terdapat pada interval kelas 3.435-4.035 (μm) dengan jumlah 31 pori. Sementara frekuensi jari-jari pori terkecil terdapat pada interval kelas 5.535-6.135 (μm) dengan jumlah 3 pori. Dengan ukuran jari-jari pori yang kecil dan relatif lebih homogen jika dibandingkan dengan spesimen T1 (500°C), T2 (600°C), dan T3 (700°C) sehingga spesimen T4 (800°C) memiliki daya serap fluida yang cukup tinggi.



Gambar 8. Grafik distribusi jari-jari pori pada spesimen T4 (800°C).

Berdasarkan Gambar 5, 6, 7, dan 8, diketahui bahwa ukuran jari-jari pori pada spesimen bambu betung memiliki ukuran *macropore* ($>50\text{nm}$) Dimana material yang memiliki ukuran *macropore* termasuk kedalam material penyerap fluida (cair) yang baik [4]. Kemampuan menyerap air yang baik merupakan salah satu persyaratan utama untuk bambu betung menjadi *material pad* baru pada sistem *direct evaporative cooling*. Dengan demikian proses evaporasi dapat terus berlangsung untuk menghasilkan efek pendinginan udara.

Tabel 1, menunjukkan hasil pengolahan data karakteristik struktur pori pada bambu betung. Berdasarkan tabel tersebut, spesimen T1 (500°C) memiliki ukuran jari-jari pori tertinggi, 41.37 μm , jika dibandingkan dengan spesimen T2 (600°C), T3 (700°C), dan T4 (800°C). Hal ini dikarenakan, semakin tinggi temperatur karbonisasi yang diberikan, semakin besar ukuran pori yang dihasilkan. Data yang ditampilkan pada tabel 1, berdasarkan struktur pori yang telah dianalisis

dengan pengujian *scanning electron microscope* (SEM) dan aplikasi Image J.

Tabel 1 Hasil Pengolahan Data Struktur Pori Pada Bambu Betung.

Nama Spesimen	Jari-Jari Pori (μm)	Luas Permukaan Pori (μm^2)	Volume Pori (mm^3)
Karbonisasi			
T1 (500°C)	41.37	21492.34	3.3757×10^3
T2 (600°C)	40.04	20131.8	3.0145×10^3
T3 (700°C)	35.25	15602.29	2.4738×10^3
T4 (800°C)	36.97	17164.02	2.2434×10^3



Jeremia Romualdo Winner Napitu menyelesaikan studi program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2017 sampai 2021. Ia menyelesaikan program sarjana dengan topik penelitian: karakterisasi *carbonized betung bamboo* sebagai *material pad* baru pada sistem *direct evaporative cooling*.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan termodinamika, perpindahan panas, dan pendingin *evaporative*.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh peningkatan temperatur karbonisasi terhadap karakteristik struktur pori, dapat disimpulkan beberapa hal antara lain:

1. Spesimen T4 (800°C) memiliki ukuran jari-jari pori yang kecil, 36.97 μm dengan jumlah 134 pori dan relatif lebih homogen jika dibandingkan dengan spesimen T1 (500°C), T2 (600°C), dan T3 (700°C) sehingga memiliki daya serap fluida yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan, ukuran pori, jumlah pori, dan distribusi pori sangat dipengaruhi oleh temperatur karbonisasi yang diberikan. Semakin tinggi temperatur karbonisasi yang diberikan, semakin baik struktur pori yang dihasilkan untuk *material pad* pada sistem *direct evaporative cooling*.

Daftar Pustaka

- [1] Isa, S.S.M., Ramli, M.M., Hambali, N.A.M.A., Kasjoo, S.R., Isa, M.M., Nor, N.I.M., Ahmad, N., 2016, *Adsorption Properties and Potential Applications of Bamboo Charcoal: A Review*. MATEC Web of Conferences, 78, 01097.
- [2] Huang, Pei-Hsing., Jhan, Jhih-Wei., Cheng, Yi-Ming., Cheng, Hau-Hsein, 2014, *Effect of Carbonization Parameters of Moso-Bamboo Based Porous Charcoal on Capturing Carbon Dioxide*, Scientific World Journal.
- [3] Fitzer, E., Köchling, K.-H., Boehm, H. P., Marsh, H., 1995, *IUPAC Recommendations*, Pure & Appl. Chem. 67(3), pp. 473-506.
- [4] Setyaningsih, H., 1995, *Pengolahan Limbah Batik Dalam Proses Kimia Dan Adsorpsi Karbon Aktif*, Tesis, Tidak Dipublikasikan Program Pascasarjana, Jakarta: Universitas Indonesia.

Kincir Angin Tipe Vertikal Dengan Menggunakan Natural Convection Ruang Pengereng Sebagai Penggerak

Gabrielle Titania Hindra, I. G. B. Wijaya Kusuma, Suarnadwipa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Indonesia terletak di garis katulistiwa, sehingga Indonesia mempunyai sumber energi surya yang berlimpah. Untuk memanfaatkan energi surya kita bisa menggunakan berbagai macam cara salah satunya dengan menggunakan konveksi alamiah. Konveksi alamiah (natural convection) atau konveksi bebas (free convection), terjadi karena fluida yang mengalami perbedaan suhu mengalir secara alami tanpa ada nya pengaruh atau bantuan dari sekitar. Penelitian ini dilakukan secara simulasi menggunakan aplikasi Autodesk CFD yang akan di variasikan 3 kondisi yaitu cuaca panas yang mempunyai temperature 40°C intensitas matahari $987,64 \text{ watt/m}^2$ lalu cuaca mendung yang mempunyai temperature 36°C intensitas matahari $756,50 \text{ watt/m}^2$, dan cuaca hujan yang mempunyai temperature 26°C intensitas matahari $390,90 \text{ watt/m}^2$. Dilakukan juga pengujian 3 tipe airfoil yaitu NACA 0012, 0018, dan 4418 dengan menggunakan aplikasi AeroFoil 3.2 input pada aplikasi tersebut adalah kecepatan angin sebesar $1,1 \text{ m/s}^2$ dan panjang chord $0,2 \text{ m}$. Hasil dari penelitian kali ini didapat bahwa perpindahan panas natural dapat menghasilkan aliran kecepatan fluida. Kecepatan aliran fluida yang dihasilkan paling tinggi terdapat pada cuaca panas yaitu sebesar $2,49 \text{ m/s}^2$ lalu yang paling rendah dihasilkan oleh cuaca hujan sebesar $1,13 \text{ m/s}^2$ dan secara teoritis sebesar $1,3573 \text{ m/s}^2$ lalu tipe NACA yang paling baik untuk digunakan sebagai airfoil pada kincir angin tipe vertikal adalah NACA 4418 yang mempunyai koefisien drag dan lift yang paling tinggi lalu menghasilkan gaya drag sebesar 0.027509214 N , gaya lift sebesar 0.012210356 N , dan mempunyai gaya thrust sebesar $0,3 \text{ N}$.

Kata kunci: : Konveksi alami, CFD, aerofoil, airfoil

Abstract

Indonesia is located on the equator, so Indonesia has an abundant source of solar energy. To take advantage of solar energy, we can use various ways, one of which is by using natural convection. Natural convection (natural convection) or free convection (free convection), occurs because fluids that experience a temperature difference flow naturally without any influence or assistance from the surroundings. This research was carried out in a simulation using the Autodesk CFD application which will vary 3 conditions, namely hot weather which has a temperature of 40°C , sun intensity 987.64 watt/m^2 , then cloudy weather which has a temperature of 36°C solar intensity 756.50 watt/m^2 . and rainy weather which has a temperature of 26°C , sun intensity 390.90 watt/m^2 . Also conducted testing of 3 types of airfoils, namely NACA 0012, 0018 and 4418 using the AeroFoil 3.2 application, the input in these applications is a wind speed of 1.1 m/s^2 and a chord length of 0.2 m . The results of this research show that natural heat transfer can produce fluid velocity flow. The highest velocity of fluid flow produced is found in hot weather, namely 2.49 m/s^2 , then the lowest is produced by rainy weather at 1.13 m/s^2 and theoretically at 1.22 m/s^2 then the best NACA type to be used as an airfoil in vertikal type windmills is NACA 4418 which has the highest drag and lift coefficient then produces a drag force of 0.027509214 N , a lift force of 0.012210356 N , and has a thrust force of 0.3 N at a cross-sectional area of 151.51 m^2 .

Keywords: Natural convection, CFD, aerofoil, airfoil

1. Pendahuluan

Indonesia menduduki negara terpadat penduduk ke-4 berdasarkan data dari the spectator index, kebutuhan pangan selalu menjadi masalah bagi negara ini. Untuk memenuhi kebutuhan pangan yang tinggi maka permasalahan di bidang industri pangan yang mencakup pertanian dan perikanan di Indonesia perlu di perbaiki. Salah satunya adalah masalah pengeringan hasil panen. Selama ini hasil panen tersebut dikeringkan dengan cara menjemur dipinggir jalan seringkali dengan kondisi angin yang kencang , sehingga kotoran yang terbawa angin akan tercampur mengakibatkan hasil panen memiliki nilai dan kualitas yang rendah, , di sisi lain Indonesia terletak di garis katulistiwa, sehingga Indonesia mempunyai

sumber energi matahari yang kuat dengan intensitas matahari rata-rata sekitar $4,8 \text{ kWh/m}^2$ per hari di seluruh wilayahnya [1]. Oleh sebab itu energi panas surya ini sangat cocok digunakan untuk pengeringan apalagi Indonesia sangat banyak produk pertanian dan perkebunan. Pemanfaatan energi matahari dapat dilakukan dengan berbagai cara salah satunya dengan memanfaatkan fenomena perpindahan panas dengan konveksi alami . Konveksi alamiah terjadi karena fluida yang mengalami perbedaan suhu mengalir secara alami tanpa ada nya pengaruh atau bantuan dari sekitar [2]. Dengan kondisi tersebut, dibuat alat pengering yang berbentuk seperti ruang agar hasil panen dapat dimasukkan kedalamnya dan tidak tercampur dengan kotoran dari luar. Selain untuk mengeringkan produk pertanian temperature di ruang

pengeriing yang tinggi tersebut dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan kincir angin. Kincir angin bekerja dengan memanfaatkan energi panas atau pertukaran kalor secara konveksi alamiah.

2. Dasar Teori

2.1. Natural Convection

Konveksi alami atau biasa dikenal sebagai konveksi bebas terjadi karena fluida yang mengalami perbedaan suhu mengalir secara alami tanpa ada nya pengaruh atau bantuan dari sekitar. Bagian fluida yang mengalami pemanasan memuai dan densitasnya menjadi lebih kecil sehingga bergerak ke atas. Tempatnya semula digantikan oleh bagian fluida yang dingin yang memiliki densitas lebih tinggi. Radiator panas yang digunakan untuk memanaskan ruang merupakan suatu contoh peranti praktis yang memindahkan kalor dengan konveksi bebas [3]. Dalam medan gravitasi, ada gaya total yang mendorong fluida ringan yang ditempatkan pada fluida yang lebih berat ke atas. Gaya ini disebut gaya apung (buoyancy force) besarnya gaya apung adalah berat fluida yang dipindahkan oleh tubuh objek. Bilangan Grashof adalah grup tanpa dimensi. Ini mewakili rasio gaya apung untuk gaya viskos yang bekerja pada fluida, dinyatakan sebagai:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (1)$$

Dimana :

g = percepatan gravitasi, m/s^2

β = koefisien ekspansi volume, $1/K$

L = panjang permukaan plat, m

ν = viskositas kinematika fluida, m^2/s

Dalam natural convection korelasi dengan kecepatan fluida dapat dirumuskan menggunakan persamaan nusselt seperti berikut:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

$$Nu = C \cdot \left[\frac{\rho \nu L}{\mu} \right]^m \cdot Pr^n$$

$$V = \sqrt[m]{\frac{Nu}{C} \frac{\mu}{\rho L}} \quad (2)$$

Dimana :

Nu = Nusselt number

C = Konstanta

ρ = Massa jenis

ν = Kecepatan

L = Panjang Plat

μ = Viskositas Dinamis

di mana konstanta C dan n bergantung pada geometri permukaan dan aliran.

Nusselt number dan Prandtl Number sendiri dapat dicari menggunakan persamaan:

$$Nu = c \cdot Ra^n \quad (3)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (4)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5)$$

Dimana :

Nu = Nusselt number

Ra = Rayleigh number

Pr = Prandtl number

2.2. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu sistem simulasi analisis berbasis komputer yang meliputi perpindahan panas, aliran fluida, dan fenomena lainnya.

CFD mengandung tiga tahapan, yaitu:

- 1) Pre-processor, yang merupakan tahapan awal dimana membangun rancangan yang akan kita buat
- 2) Solver Proses pada solver adalah proses pemevahan secara matematika menggunakan analisis numerik dengan pemisalan variabel ke fungsi yang lebih sederhana
- 3) Post-processor. Pada tahapan ini adalah menampilkan seluruh hasil yang dibuat dalam tahapan sebelumnya [4].

2.3. Kincir Angin Vertikal (Vertikal)

Kincir angin sumbu vertikal/tegak memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus sejajar dengan sudu kincir dan mampu bergerak dari berbagai macam arah angin. Kincir angin vertikal tipe vertikal menggunakan sudu dengan cara memotong silinder Flettner menjadi 2 paruhan sepanjang garis pusat dan kemudian memposisikan 2 paruhan tersebut membentuk seperti huruf "S" yang diletakan pada lingkaran batas sudu. Jumlah blade pada kincir angin ini adalah 3 buah.

Airfoil adalah bentuk suatu penampang yang dapat menghasilkan efek aerodinamika ketika dilewati fluida. Airfoil pada penelitian kali ini digunakan sebagai blade kincir angin tersebut. Penentuan jenis airfoil di sesuaikan dengan kecepatan angin dan tipe kincir angin.

NACA adalah bentuk airfoil yang di kembangkan oleh National Advisory Committee for Aeronautics. Pengaruh efek kelengkungan dan persebaran ketebalan/thickness dilakukan pada bilangan reynold. Pada NACA seri empat digit pertama yaitu maksimum chamber pada chord. Digit kedua yaitu dari leading edge menuju persepulu posisi maksimum chamber pada chord, lalu pada digit terakhir yaitu ketebalan airfoil terhadap chord [5].

2.4. Aerodinamika Pada Kincir Angin

Salah satu aspek dalam design kincir adalah aerodinamika. Gaya aerodinamika pada kincir ini adalah gaya drag (gaya hambat), gaya lift (gaya angkat), gaya thrust (gaya dorong).

Gaya hambat adalah gaya tahanan yang disebabkan oleh gerakan benda melalui fluida, seperti air atau udara. Persamaan gaya hambat yang diberikan pada benda yang bergerak melalui fluida adalah:

$$Fd = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 \quad (6)$$

Dimana :

Fd = gaya drag (N)

C_d = Koefisien hambatan, yang dapat bervariasi seiring dengan kecepatan benda. Tetapi nilai tipikal berkisar dari 0,4 hingga 1,0 untuk fluida yang berbeda (seperti udara dan air)

ρ = Massa jenis fluida yang dilalui benda bergerak (kg/m^3)

a = Luas penampang drag (m^2)

v = Kecepatan benda relatif terhadap fluida (m/s)

Gaya lift adalah gaya yang mengangkat suatu benda keatas yang terjadi karena tekanan dibawah benda lebih besar daripada tekanan diatas benda. Persamaan gaya angkat adalah :

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \rho a v^2 \quad (7)$$

Dimana:

F_l = gaya lift (N)

C_l = Koefisien lift

ρ = Massa jenis fluida yang dilalui benda bergerak (kg/m^3)

a = Luas penampang drag (m^2)

v = Kecepatan benda relatif terhadap fluida (m/s)

Gaya dorong adalah kebalikan dari gaya hambat, dalam hal ini reaksi dari udara kecepatan tinggi di ruang pengering yang keluar akan menghasilkan gaya dorong kedepan gaya dorong sendiri adalah resultan dari drag dan lift, untuk mengetahui daya yang dihasilkan pada kincir ini dapat menggunakan persamaan:

$$P = F_{thrust} \cdot V \quad (8)$$

Dimana :

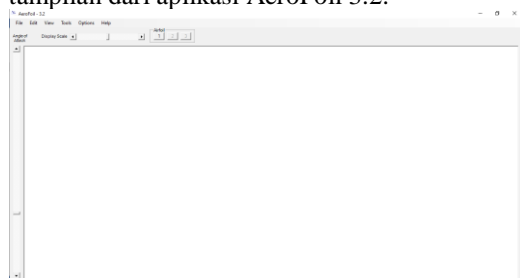
P = Daya thrust (Watt)

F_{thrust} = resultan dari drag dan lift (N)

V = kecepatan benda relatif terhadap fluida (m/s)

2.5. Aerofoil 3.2.

Aplikasi AeroFoil 3.2. yang akan digunakan dalam penelitian kali ini berfungsi untuk mendapatkan koefisien drag (C_d) dan koefisien lift (C_l) pada airfoil yang ditentukan dengan input kecepatan fluida yang dihasilkan ruang pengering tersebut dan panjang chord airfoil. Berikut adalah tampilan dari aplikasi AeroFoil 3.2.



Gambar 1 . Tampilan Aplikasi

3. Metode Penelitian

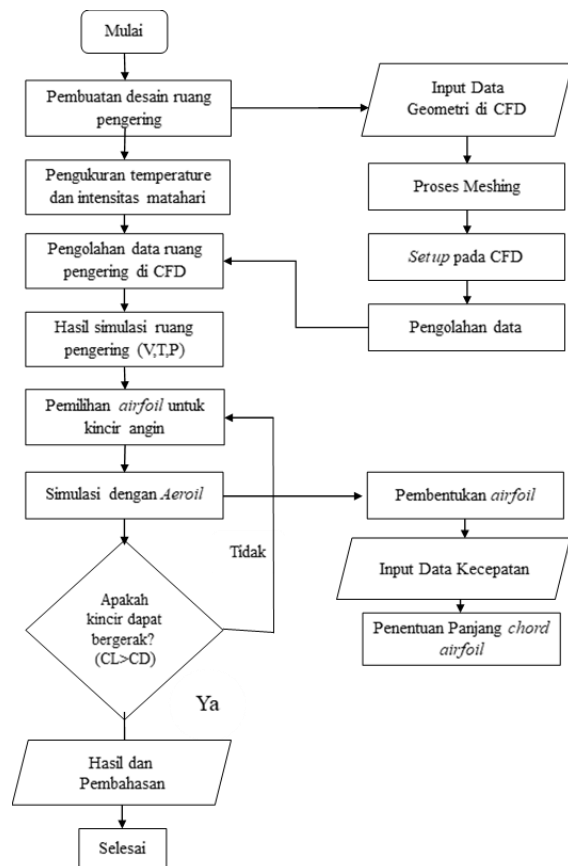
3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan studi eksperimental atau percobaan dengan tujuan untuk mencari korelasi antara satu variable dengan variable lainnya dengan batasan – batasan yang ada.

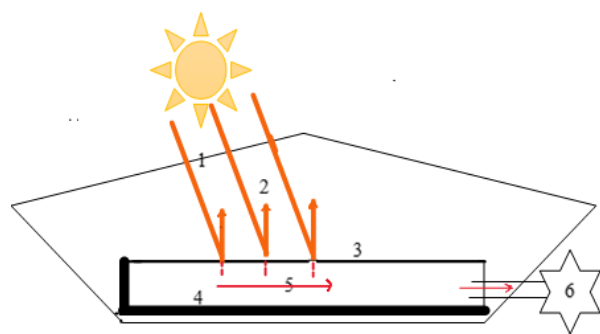
Adapun pendekatan secara eksperimental ini dikerjakan sesuai dengan tujuan pelaksanaan

penelitian yaitu untuk mengetahui kecepatan aliran fluida pada ruang pengering akibat perpindahan panas natural yang dihasilkan pada ruang pengering dan menganalisa tipe naca yang paling bagus untuk kincir angin sesuai hasil simulasi.

3.2. Tahapan penelitian



3.3. Skematik penelitian



Gambar 2. Eksperimental Setup

Keterangan:

1. Sinar matahari
2. Sinar matahari yang di pantulkan
3. Plat pertama
4. Plat kedua yang diberikan isolator
5. Aliran panas fluida
6. Kincir angin

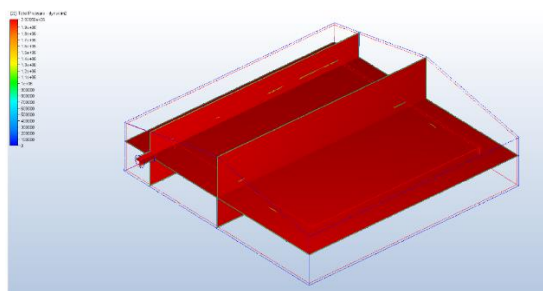
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Aplikasi CFD

Adapula data penelitian dapat digolongkan adalah :

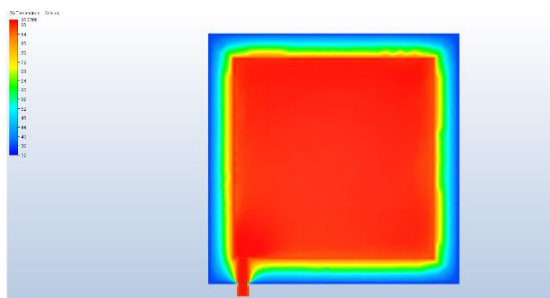
1. Cuaca panas:
 - Temperature max : 40°C
 - Heatflux max : 987.64 Watt/m²
2. Cuaca mendung:
 - Temperature max : 36°C
 - Heatflux max : 756.50 Watt/m²
3. Cuaca hujan :
 - Temperature max : 26°C
 - Heatflux max : 390.90 Watt/m²

4.1.1. Tekanan



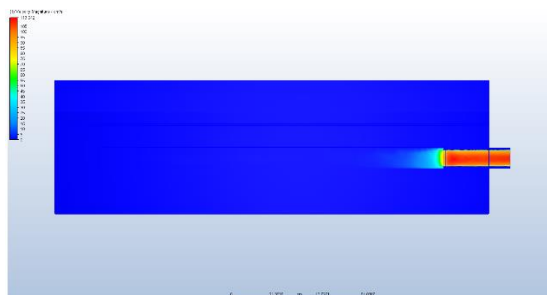
Gambar 3. Persebaran Tekanan Pada Cuaca Panas, Mendung, Hujan

4.1.2. Temperature



Gambar 4. Persebaran Temperature Pada Cuaca Panas, Mendung, Hujan

4.1.3. Kecepatan Fluida



Gambar 5. Persebaran Kecepatan Pada Cuaca Panas, Mendung, Hujan

Data hasil simulasi didapatkan seperti tabel di bawah ini :

Tabel 1 . Hasil Simulasi CFD

	Tekanan	Temperature	Kecepatan
Cuaca Panas	2.202656 x 10 ⁵ pa	90,2 °C	2,49 m/s ²
Cuaca Mendung	2.02653 x 10 ⁵ pa	82,22 °C	1,93 m/s ²
Cuaca Hujan	2.202651 x 10 ⁵ pa	73,2 °C	1,13 m/s ²

Berdasarkan tabel diatas dapat disimpulkan bahwa perpindahan panas natural pada ruang pengering dapat menghasilkan kecepatan aliran fluida yang akan dimanfaatkan untuk menggerakkan kincir. Semakin besar input temperature dan intensitas matahari maka akan semakin tinggi juga output kecepatan aliran fluida yang dihasilkan. Kecepatan aliran fluida yang dihasilkan paling tinggi terdapat pada cuaca panas yaitu sebesar 2,49 m/s² lalu yang paling rendah dihasilkan oleh cuaca hujan sebesar 1,13 m/s² dan secara teoritis sebesar 1,22 m/s² pada cuaca hujan.

4.1.4. Perhitungan Secara Teoritis

- Menghitung Grashof Number :

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

$$= \frac{9,8 (1 / ((73,2+26)+273)(73,275-26) 0,4^3}{(1,816 \times 10^{-6})^2}$$

$$= 1,86 \times 10^9$$

- Menghitung Rayleigh Number :

$$Ra = Gr \times Pr$$

$$= 1,86 \times 10^9 \times 0,7$$

$$= 1,32 \times 10^9$$

- Menghitung bilangan Nusselt dan Kecepatan Aliran Fluida:

$$Nu = Ra^{1/3} = Re^{0,8} \times Pr^{0,4}$$

$$1,320 \times 10^9 = \left(\frac{\rho v d}{\mu}\right)^{0,8} \times Pr^{0,4}$$

$$1097,09 = \left(\frac{\rho v d}{\mu}\right)^{0,8} \times 0,7^{0,4}$$

$$\left(\frac{1097,09}{0,8670}\right)^{1/0,8} = \left(\frac{1,086 \text{ kg/m}^3 \cdot v \cdot 0,1 \text{ m}}{195,33 \times 10^{-7} \text{ kg/m} \cdot \text{s}}\right)$$

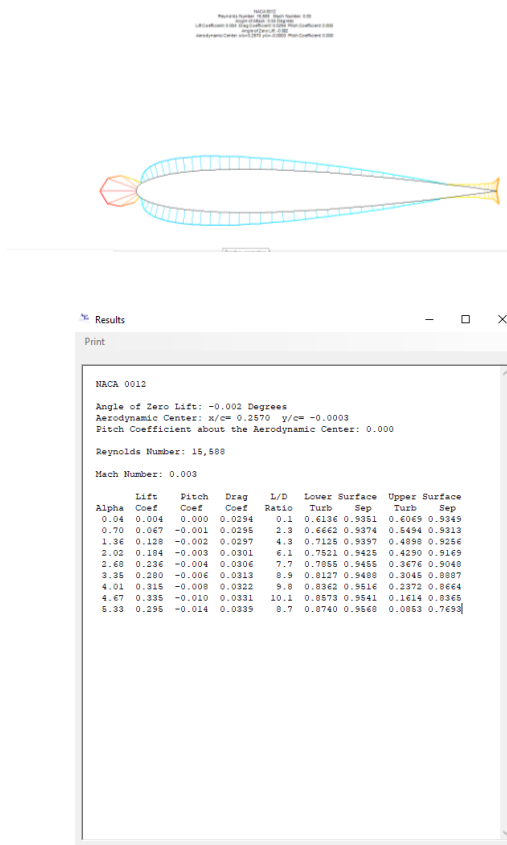
$$= 1,3573$$

4.2. Simulasi Aerofoil 3.2.

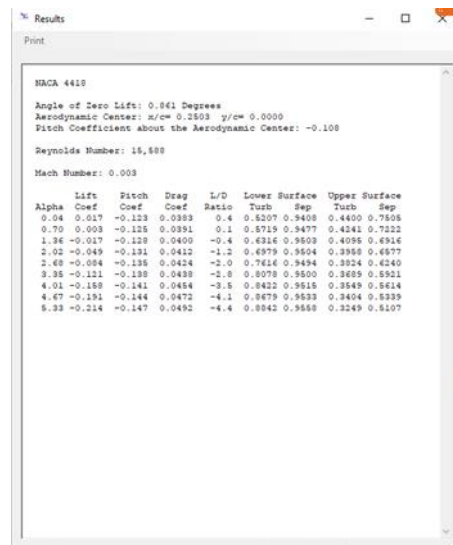
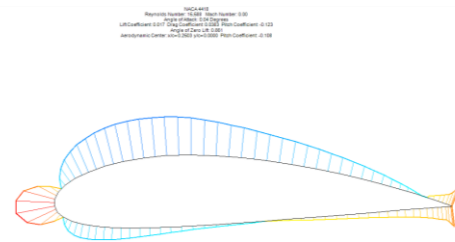
Setelah mendapat hasil simulasi berupa kecepatan fluida yang dihasilkan di ruang pengering, maka kecepatan yang paling kecil yaitu 1,13 m/s dan panjang chord 0,2 m akan menjadi input pada simulasi aerofoil. NACA yang dipilih adalah 0012, 0018, 4418 .

4.2.1. NACA 0012

4.2.3. NACA 4418.

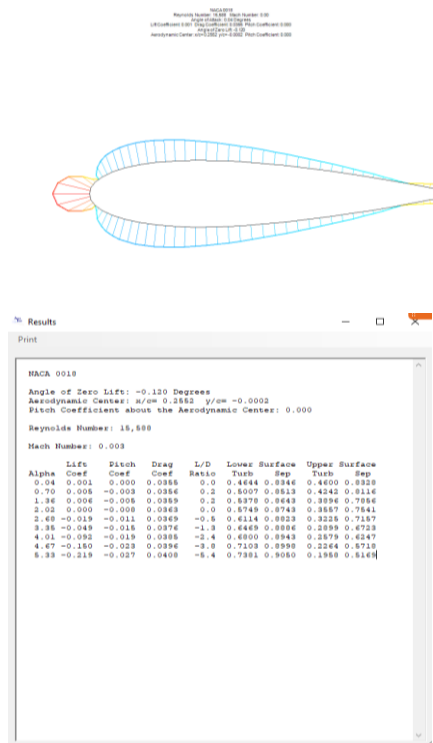


Gambar 5. Geometri dan Nilai Koefisien Drag dan Lift NACA 0012.



Gambar 7. Geometri dan Nilai Koefisien Drag dan Lift NACA 4418.

4.2.2. NACA 0018



Gambar 6. Geometri dan Nilai Koefisien Drag dan Lift NACA 0018.

Data hasil simulasi didapatkan seperti tabel dibawah ini:

Tabel 2. Hasil Simulasi Aerofoil

	Koefisien Drag	Koefisien Lift
NACA 0012	0,0294	0,004
NACA 0018	0,0355	0,001
NACA 4418	0,0383	0,017

Berdasarkan tabel 2 dapat dilihat bahwa tipe NACA mempengaruhi koefisien drag dan lift. NACA 4418 mempunyai koefisien drag tertinggi yaitu sebesar 0,0383 lalu koefisien lift sebesar 0,017 .

4.2.4. Perhitungan Aerodinamika Kincir NACA 4418.

- $$Fd = \frac{1}{2} Cdpav^2$$

$$= \frac{1}{2} x 0,0383 x 1,125 x 1,13^2$$

$$= 0.027509214 N$$
- $$Fl = \frac{1}{2} Clpav^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 0,017 \times 1,125 \times 1,13^2$$

$$= 0.012210356 \text{ N}$$

- F_{thrust}

$$= \sqrt{(0.027509214)^2 + (0.012210356)^2}$$

$$= 0,3 \text{ N}$$

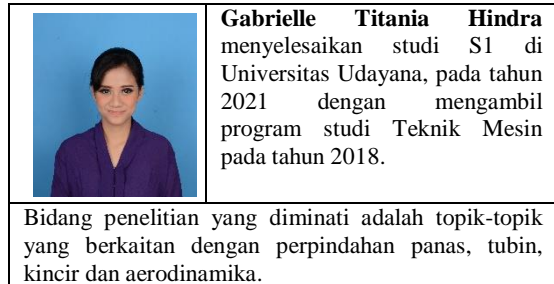
Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa kincir angin dengan tipe NACA 4418 mempunyai koefisien drag dan lift yang paling besar. Berdasarkan perhitungan gaya thrust pada kincir tersebut sebar 0,3 N pada luas penampang 151,51 m².

5. Kesimpulan

1. Perpindahan panas natural pada ruang pengering dapat menghasilkan kecepatan aliran fluida yang akan dimanfaatkan untuk menggerakkan kincir. Semakin besar input temperature dan intensitas matahari maka akan semakin tinggi juga output kecepatan aliran fluida yang dihasilkan. Pada penelitian kali ini kecepatan aliran fluida yang dihasilkan paling tinggi terdapat pada cuaca panas yaitu sebesar 2,49 m/s² lalu yang paling rendah dihasilkan oleh cuaca hujan sebesar 1,13 m/s² dan secara teoritis sebesar 1,22 m/s² pada cuaca hujan.
2. Tipe NACA yang paling baik untuk digunakan sebagai airfoil pada kincir angin tipe vertikal adalah NACA 4418 yang menghasilkan koefisien drag dan lift yang paling tinggi lalu mempunyai gaya drag sebesar 0.027509214 N, gaya lift sebesar 0.012210356 N, dan mempunyai gaya thrust sebesar 0,3 N pada luas penampang 1,3573

Daftar Pustaka

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), 2010, *Indonesia Energy Outlook*, Jakarta.
- [2] Vries Dkk., 2011, *Energi yang Terbarukan.*, Jakarta.
- [3] Departemen teknik kimia universitas Indonesia, 2012, *Perpindahan Kalor Pemicu III: Konveksi Alami.*
- [4] Versteeg, 1995, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.* New York.
- [4] Hidayat, fajri, 2014, *Analisa Aerodinamika Airfoil NACA 0012 Dengan Ansys Fluent.* Jakarta: Fakultas Teknik Universitas 17 Agustus 1945



Studi Laju Pembakaran Pada Insinerator Sampah Residu

Javents Lumbantobing, I Nyoman Suprpta Winaya, I Gede Putu Agus
Suryawan

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Sampah sudah menjadi masalah besar di dunia, termasuk untuk Bali. Mulai dari masalah tercemarnya lingkungan, kesehatan, hingga berpengaruh pada pariwisata. Penelitian ini bertujuan untuk memusnahkan timbunan sampah residu melalui teknologi thermal yaitu insinerator. Insinerator merupakan teknologi yang mampu mengkonversi materi padat (sampah) menjadi gas dan abu (bottom ash dan fly ash). Suhu operasi menjadi salah satu indikator dalam laju pembakaran insinerator karena menentukan kualitas pembakaran di dalam reaktor. Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan studi eksperimental yang bertujuan untuk mencari pengaruh suhu operasi insinerasi terhadap laju pembakaran pada insinerator sampah residu. Suhu operasi insinerator yang divariasikan yaitu 300^oC, 400^oC, 500^oC, dan 600^oC. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu operasi yang digunakan semakin tinggi laju pembakaran. Laju pembakaran terbaik terdapat pada suhu operasi 600^oC, yakni sebesar 15,8 kg/jam.

Kata kunci: Insinerator, Laju Pembakaran, Sampah Residu, Suhu Operasi

Abstract

Waste has become a world problem, including for Bali. Starting from problems of environmental pollution, health, to affecting tourism. This research aims to destroy the pile of residual waste through thermal technology, namely incinerator. Incinerator is a technology capable of converting solid matter (waste) into gas and ash (bottom ash and fly ash). The operating temperature is an indicator in incinerator burning rate because it determines the quality of combustion in the reactor. This research was conducted by applying an experimental study that aims to determine the effect of incineration operating temperature on the burning rate of residual waste incinerator. The incinerator operating temperatures are varied, namely 300^oC, 400^oC, 500^oC, and 600^oC. The results of this study indicate that the higher the operating temperature is used, the higher burning rate is obtained. The best of combustion rate occurs at an operating temperature of 600^oC, ie 15.8 kg/h.

Keywords: Incinerator, Burning Rate, Residual Waste, Operating Temperature

1. Pendahuluan

Insinerator merupakan teknologi yang dapat mereduksi massa dan volume sampah, membunuh bakteri dan virus, mereduksi materi kimia toksik, serta memudahkan penanganan limbah selanjutnya. Hal ini menjadi penting ditengah masalah sampah yang semakin memburuk [1]. Utamanya masalah tentang penanganan sampah yang sangat menumpuk dan menimbulkan masalah lain seperti tercemarnya lingkungan dan kesehatan. Penelitian-penelitian terbaru mengenai insinerator telah dilakukan untuk mengukur kualitas gas buang dari hasil pembakaran.

Dari beberapa metode pengelolaan sampah yang dapat dipilih, metode insinerasi menjadi opsi yang dapat diandalkan saat ini. Kekurangan pada metode kompos adalah tidak semua jenis sampah dapat diolah menjadi kompos. Sehingga sampah yang tidak dapat diolah terpaksa kembali menjadi sampah. Sedangkan untuk metode landfill, metode ini membutuhkan lahan yang cukup besar untuk menampung sampah dengan jumlah yang dihasilkan setiap harinya di Bali. Selain itu, metode ini juga bisa merusak tanah dan berakibat buruk pada lingkungan di sekitarnya [2].

Penelitian-penelitian sebelumnya berfokus pada ukuran sampah yang direduksi tanpa mengontrol suhu operasi yang digunakan [3]. Suhu operasi salah satu bagian penting dalam kinerja insinerator. Ini dikarenakan suhu operasional berpengaruh terhadap

laju pembakaran, fungsi pembakaran, dan efektivitas pemanasan ruang bakar. Pembakaran yang optimal menjadi penentu dalam penghancuran komponen polutan dalam gas buang. Semakin baik pembakaran yang terjadi, semakin cepat pula laju pembakaran yang terjadi dalam proses insinerasi.

Untuk itu permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh suhu operasi terhadap laju pembakaran pada insinerator sampah residu. Berikut dibatasi dengan penentuan suhu operasi yaitu, 300^oC, 400^oC, 500^oC, dan 600^oC. Adapun sampah residu yang digunakan, terlebih dahulu dicacah dan dikeringkan.

2. Dasar Teori

2.1. Insinerator

Insinerator merupakan teknologi yang digunakan untuk mengkonversi sampah (padat) ke dalam bentuk gas dan abu melalui pembakaran di dalam sistem yang terkontrol dan terisolasi dari lingkungan. Kelebihan insinerator adalah dalam mereduksi volume hingga 85% - 95% dan mereduksi berat sampah hingga 70%-80% [4],[5].

Pada insinerator terdapat dua ruang bakar, yakni *Primary Chamber* dan *Secondary Chamber*.

a. *Primary chamber* berguna sebagai tempat pembakaran utama. Pemanasan dalam

primary chamber dibantu oleh energi dari burner dan energi pembakaran yang berasal dari bahan bakar sampah itu sendiri. Udara untuk pembakaran disuplai oleh *blower* dalam jumlah yang dapat dikontrol.

b. *Secondary chamber* kemudian berguna untuk membakar ulang gas hasil pembakaran maupun pirolisa dari *primary chamber* yang belum terbakar secara maksimal.

2.2. Komponen-komponen Insinerator

Dalam sebuah alat insinerator terdapat beberapa bagian yang menjadi komponen utama. Komponen-komponen ini pula yang menentukan bagaimana kualitas pembakaran dalam proses insinerasi. Dalam upaya peningkatan kualitas pembakaran, kerap kali terjadi perubahan komponen dari insinerator. Akan tetapi sebagai komponen utama, insinerator memiliki sistem penerima sampah, ruang bakar, dan sistem penangan gas buang.

Sistem penerimaan sampah bertujuan menerima bahan bakar sampah untuk penanganan pertama. Pada sistem ini terdapat *overhead crane* atau sistem serupa yang bertugas melakukan homogenisasi sampah. Sistem ini juga memungkinkan untuk ditambah pencacah atau pengeringan sampah.

Ruang bakar merupakan tempat terjadinya proses pembakaran sampah (*mass-burning*) atau proses insinerasi pada suhu tinggi sehingga mengoksidasi sampah menjadi *flue gas*, partikulat, dan abu. Pada ruang bakar juga kerap kali ditambahkan ruang bakar kedua untuk memaksimalkan proses pembakaran.

Air pollution control atau sistem penanganan gas buang merupakan bagian yang mengatur kondisi gas buang sedemikian rupa agar dapat keluar ke atmosfer di bawah batas emisi yang diizinkan.

2.3. Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan proses terjadinya oksidasi bahan bakar dengan cepat yang disertai serta memproduksi panas dan cahaya. Unsur yang mudah terbakar di dalam bahan bakar adalah karbon, hidrogen, dan sulfur.

Pembakaran sempurna terjadi apabila di dalam sebuah pembakaran terdapat pasokan oksigen yang cukup. Adapun tujuan pembakaran sempurna adalah untuk melepas seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar [6].

Proses pembakaran yang aktual dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya :

- Pencampuran udara dan bahan bakar
- Kebutuhan udara untuk proses pembakaran
- Suhu pembakaran
- Lamanya waktu pembakaran
- Berat jenis bahan bakar

2.4. Parameter Unjuk Kerja Insinerator

Dalam pengujian unjuk kerja insinerator berikut beberapa faktor yang menjadi parameter [7]:

- Laju pembakaran

- Rendaman abu
- Kandungan abu hasil pembakaran

Diperlukan pula pengukuran laju pembakaran untuk mengetahui unjuk kerja dari insinerator sampah residu. Laju Pembakaran merupakan parameter yang diukur untuk mendapatkan laju pembakaran adalah perbandingan bobot limbah dan lama pembakaran.

$$B_{bt} = \frac{m}{t} \quad (1)$$

B_{bt} = laju pembakaran (kg/jam)

m = berat limbah (kg)

t = waktu pembakaran (jam)

u

3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan studi eksperimental atau percobaan dengan maksud mencari korelasi antara suhu operasi dengan performansi insinerator sampah residu dengan batasan-batasan yang ada.

Rancangan penelitian eksperimental ini dilakukan meliputi langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Perumusan masalah
- b. Menentukan perlakuan yang dibutuhkan dan dampak yang ingin dihasilkan
- c. Menentukan objek yang akan diberikan perlakuan tertentu
- d. Membangun instrumentasi dalam hal ini pengukuran untuk mendapatkan data
- e. Melakukan mekanisme penelitian atas pengumpulan suatu data
- f. Pengolahan dan analisa data hasil pengujian
- g. Merumuskan kesimpulan

Adapun variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang diberi perlakuan agar mendapatkan hasil yang dikehendaki. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel bebas adalah suhu operasi proses insinerasi. Adapun variabel suhunya adalah :

- a. Suhu 300°C
- b. Suhu 400°C
- c. Suhu 500°C
- d. Suhu 600°C

2. Variabel terikat

Variabel terikat adalah faktor-faktor yang diobservasi akibat mendapatkan pengaruh dari variabel bebas. Adapun yang menjadi variabel terikat dalam penelitian ini adalah laju pembakaran.

Penelitian dan pengujian performansi insinerator ini mempergunakan peralatan dan bahan sebagai berikut:

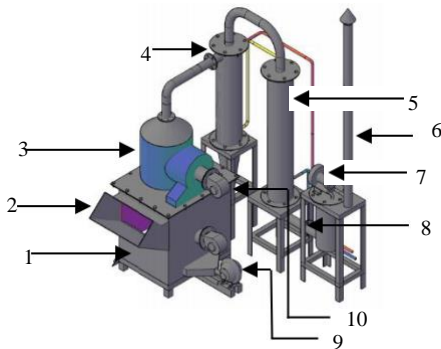
1-Insinerator Sampah Residu

2-Burner 3-Blower

4-ID Fan 5- Gas Analyzer, 6- Timbangan

7-Pompa Air

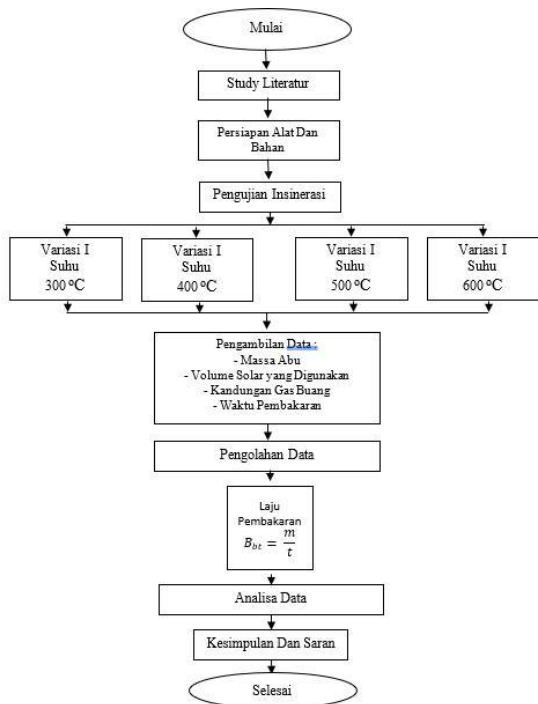
Pada Gambar 1 ditampilkan skematik alata yang digunakan dalam penelitian ini beserta dengan



Gambar 1. Skematik Insinerator Sampah Residu

keterangannya. Selanjutnya pada Gambar 2 ditampilkan diagram alir pada proses penelitian ini. Keterangan:

1. Primary Chamber
2. Fuel Feeder
3. Secondary Chamber
4. Cyclone
5. Alat Penukar Panas
6. Cerobong Asap
7. ID Fan
8. Tabung Arang Aktif
9. Blower 1
10. Blower 2



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Laju Pembakaran

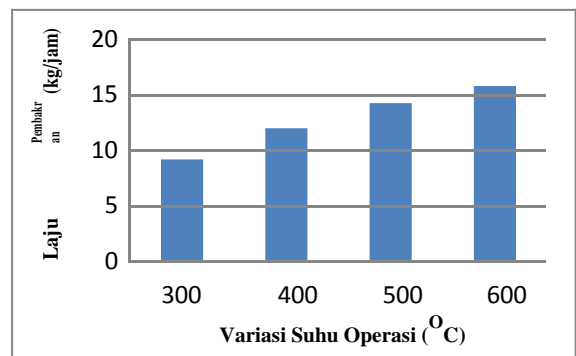
Setelah dilakukan pengujian dengan masing-masing suhu operasi yang terdapat dalam variasi

bebas, didapatkan data berupa waktu dan massa bahan bakar sampah residu yang terbakar/habis. Data tersebut kemudian ditampilkan sebagai berikut :

Tabel 1. Hasil Pengujian Insinerator

Variasi Suhu Operasi (°C)	Berat Sampah Residu (kg)	Berat Abu (kg)	Waktu Pembakaran (jam)
300	10	2,955	0,766
400	10	2,210	0,650
500	10	2,150	0,550
600	10	2,100	0,500

Dari data yang didapat sesuai dengan Tabel 1, kemudian diolah dengan persamaan (1), maka didapatkan hasil berupa laju pembakaran pada masing-masing penelitian. Hasil pengolahan data tersebut kemudian dapat ditampilkan sebagai berikut :



Gambar 2. Diagram Laju Pembakaran

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada Gambar 4, besaran laju pembakaran pada masing-masing suhu operasi yang digunakan dalam pengujian. Secara berurutan besar laju pembakaran setiap suhu operasi adalah 9,197 kg/jam, 11,984 kg/jam, 14,272 kg/jam dan 15,8 kg/jam.

Dapat diketahui terjadi peningkatan laju pembakaran yang signifikan seiring dengan peningkatan suhu operasi yang digunakan. Dengan demikian peningkatan suhu operasi pada insinerator sampah residu berpengaruh terhadap peningkatan laju pembakaran pada proses insinerasi. Semakin tinggi suhu operasi yang digunakan semakin besar pula massa bahan bakar sampah residu yang direduksi. Hal ini disebabkan oleh suhu operasi yang berperan dalam menentukan kualitas pembakaran didalam sebuah reaktor.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada pengaruh variasi suhu operasi terhadap performansi insinerasi sampah residu, dapat disimpulkan bahwa :

- Suhu operasi berpengaruh dalam menentukan laju pembakaran pada sebuah insinerator sampah residu. Semakin tinggi suhu operasi yang digunakan semakin tinggi juga laju pembakaran yang terjadi.

- Berdasarkan penelitian ini ditemukan laju pembakaran terbaik terjadi pada suhu operasi 600⁰C yakni sebesar 15,8 kg/jam.

•
Daftar Pustaka

- [1] W. Widyowati, A. R. Syaputri, and D. Febrianto, 2018, *Kebijakan Pemerintah Kota Denpasar Terhadap Upaya Pencegahan Pencemaran Lingkungan Hidup di Kota Denpasar*, Reformasi Huk., vol. 1, no. 2, pp. 45–50.
- [2] Rosmaini, 2014, *Rancang Bangun Alat Incinerator untuk Pembakaran Limbah Infeksius Menggunakan Metode Primary and Secondary Chamber*, vol. 53, no. 9.
- [3] Hermansyah, 2017, *Solusi Mengatasi Polusi Udara Pada Pembakaran Sampah*.
- [4] T. Bagus P., 2002, *Pengelolaan dan Pemanfaatan Sampah Menggunakan Teknologi Incenerator*, pp. 17–23, 2002.
- [5] A. N. G. Pradipta, 2011, *Desain dan Uji Kinerja Alat Pembakar Sampah (Incinerator) Tipe Batch untuk Perkotaan Dilengkapi dengan Pemanas Air*.

- [6] G. Wicaksono, 2017, *Prototype Pulverizer Coal Burner Ditinjau dari Variasi Campuran Bahan Bakar Sekam Padi dan Batubara Terhadap Temperatur Api, Panjang Api, dan Neraca Masa*.
- [7] A. D. Prasetiono, 2016, *Pengujian Alat Incinerator Untuk Pengolahan Limbah Padat Rumah Sakit Tanpa Menggunakan Bahan Bakar Minyak dan Gas*, Dk, vol. 53, no.9,2016,doi:10.1017/CBO9781107415324.004.



Uji Variasi Kadar Air (*Moisture Content*) Sampah Residu Terhadap Performansi Insinerator

Rio Sua Geralta Ginting, I Nyoman Suprapta Winaya, I Gede Putu Agus Suryawan

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Kandungan air merupakan komponen yang selalu terbawa dalam sampah. Pengaruh dari kandungan air adalah terjadinya penurunan nilai kalor dari bahan bakar sampah yang mempengaruhi efisiensi insinerator. Kadar air yang tinggi akan menurunkan nilai kalor sampah dan menghambat pembakaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kadar air sampah (*moisture content*) terhadap performansi insinerator yang dilihat berdasarkan laju pembakaran, dan kapasitas *thermal* pembakaran. Dengan metode studi eksperimental, ditetapkan variasi *moisture content* sampah melalui proses pengeringan terlebih dahulu yang akan diteliti untuk dicari pengaruhnya terhadap performansi insinerator, yaitu ; *moisture content* dari sampah pengeringan 1 hari, *moisture content* dari sampah pengeringan 2 hari, *moisture content* dari sampah pengeringan 3 hari, dan *moisture content* dari sampah yang tidak dikeringkan. Hasil dari studi eksperimental yang dilakukan menunjukkan: 1) Insinerasi pengeringan sampah 3 hari memberikan hasil terbaik pada laju pembakaran, yaitu 189,375 gr/menit; 2) Insinerasi pengeringan sampah 3 hari memberikan hasil terbaik pada kapasitas *thermal* pembakaran, yaitu 457,204 MJ/jam;

Kata kunci: Insinerator, Sampah Residu, Variasi Moisture Content Sampah, Performansi.

Abstract

Water content is a component that usually carried away in waste. The effect of this water content is a decrease on caloric value of waste fuel which is affect the incinerator efficiency. High water content will decrease caloric value of waste and inhibit the combustion. This research aim is to determine the waste moisture content effect of incinerator performance, based on combustion rate, and combustion thermal capacity. With the experimental study method, the set of waste moisture content variation to be examined was determined to find its effect on the incinerator performance, that is: moisture content of 1 day drying waste, moisture content of 2 days drying waste, moisture content of 3 days drying waste, and moisture content of undried waste. The results of experimental studies showed that: 1) The highest rate of combustion system occurs in 3 days of dry waste incineration, namely 189.375 gr/minute; 2) The highest combustion thermal capacity occurred in the incineration of waste that was dried for 3 days, namely 457.204 MJ/h;

Keywords: Incinerator, Residual Waste, Waste Moisture Content Variation, Performance.

1. Pendahuluan

Sistem kelola sampah perkotaan di Republik Indonesia kini menjadi sebuah permasalahan nyata disertai dengan tingkat pertumbuhan penduduk yang semakin tinggi dan secara tidak langsung sangat berdampak pada jumlah sampah yang diproduksi dan sistem kelola sampah [1]. Disebutkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) bahwasanya timbulan sampah yang ada di Republik Indonesia jumlahnya sudah mencapai 175.000 ton/hari dan jika disetarakan, maka jumlah timbulan sampah ini setara 64 juta ton/tahun dengan beberapa sistem kelola seperti berikut; diangkut dan ditumpuk di TPA sebanyak 69%, dikubur sebanyak 10%, dijadikan kompos dan didaur ulang sebanyak 7%, dibakar sebanyak 5%, dan sisa dari sampah tersebut tidak dikelola sebanyak 7%. Dilihat dari data yang tertera, pada masa ini sistem kelola sampah di Republik Indonesia masih dikonsentrasikan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah dan tidak terlebih

dahulu melewati proses *Reduce, Recycle, dan Reuse* (3R) dari sumber sampah yang seharusnya melibatkan peran dan partisipasi masyarakat. Inilah yang sebenarnya menjadi faktor umum beban pengelolaan di TPA semakin berat dan umur penggunaan TPA semakin singkat [2]. Ada beberapa metode pengelolaan sampah yang dapat diterapkan sebagai alternatif pemecahan masalah sampah di TPA. Pemadatan (*bail press*), lahan urugan terbuka (*open dumping*), lahan urugan terkendali, lahan urugan saniter (*sanitary landfill*), pembakaran (*incinerating*), dan pengkomposan (*composting*). Namun metode tersebut memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing [3]. Insinerasi adalah suatu proses yang terjadi pada teknologi insinerator yang bertujuan untuk mengubah/mengkonversi materi padat (pada kasus ini adalah sampah) menjadi materi gas (gas buang dari pembakaran), serta menjadi materi padat yang sulit untuk terbakar, seperti abu (*bottom ash*) dan debu (*fly ash*). Kalor yang tercipta dari proses insinerasi ini bisa

juga dimanfaatkan untuk mengubah/mengkonversi suatu materi menjadi materi lain dan energi, seperti untuk pembangkit listrik dan atau sebagai sumber air panas. Insinerasi dapat mengurangi volume buangan padat domestik sampai 85%-95% dan pengurangan berat sampai 70%-80% [4]. Teknologi insinerator adalah sebuah tungku pembakaran yang digunakan sebagai pengolah limbah padat, yang mengubah atau mengkonversi materi padat (sampah) menjadi materi gas, dan menjadi abu (*bottom ash dan fly ash*). Insinerasi adalah sebuah perlakuan pengolahan thermal limbah padat dengan menggunakan proses pembakaran pada alat thermal insinerator agar mengurangi volume sampah yang mudah terbakar (*combustible*) yang sudah tidak dapat di daur ulang, membunuh bakteri, virus dan kimia toksik [5]. Kandungan air merupakan komponen yang selalu terbawa dalam sampah. Pengaruh dari kandungan air adalah terjadinya penurunan nilai kalor dari bahan bakar sampah yang mempengaruhi efisiensi incinerator [6]. Kadar air yang tinggi akan menurunkan nilai kalor sampah dan menghambat pembakaran [7].

Adapun permasalahan yang diambil pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi kadar air (*moisture content*) sampah residu rumah tangga terhadap performansi insinerator yang dilihat berdasarkan laju pembakaran dan kapasitas thermal pembakaran.

2. Dasar Teori

2.1. Sampah

Sampah merupakan limbah yang berbentuk padat yang didalamnya terdapat sampah yang dapat terurai (sampah organik), sampah yang tidak dapat terurai (sampah anorganik), serta sampah yang mengandung zat-zat kimia berbahaya (sampah B3) yang sudah tidak berguna sama sekali dan wajib diolah kembali agar tidak berbahaya bagi lingkungan sekitar [8].

Karakteristik sampah adalah sifat-sifat sampah yang meliputi sifat fisik, sifat kimiawi, dan sifat biologis sampah. Sifat-sifat ini sangat penting untuk perencanaan dan pengelolaan sampah kota secara terpadu, diantaranya adalah sifat fisik yang meliputi berat spesifik sampah, kelembaban sampah, permeabilitas sampah, dan *field capacity*; sifat kimia; dan sifat biologis yang meliputi *biodegradability*, dan bau [9].

2.2. Insinerasi

Insinerasi merupakan suatu teknologi pengolahan limbah padat dengan cara membakar limbah pada temperatur tinggi dengan tujuan untuk mereduksi sampah mudah terbakar (*combustible*) yang sudah tidak dapat didaur ulang lagi, membunuh bakteri, virus dan kimia toksik. Sedangkan pada limbah B3 yaitu untuk mengurangi sifat-sifat berbahaya seperti racun dan radiasi. Insinerator dapat digunakan terhadap berbagai macam limbah organik, termasuk minyak, pelarut, bahan farmasi, dan pestisida. [10]

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi proses insinerasi, faktor tersebut adalah komposisi atau jenis limbah, waktu insinerasi, suhu, dan berat limbah. [11]

2.3. Insinerator

Insinerator adalah tungku pembakaran yang digunakan untuk mengolah limbah padat menjadi materi gas dan abu (*bottom ash dan fly ash*). Pengolahan sampah dengan insinerasi dapat mengurangi volume dan massa serta mengurangi sifat berbahaya dari sampah infeksius. Faktor yang memegang peranan penting dalam insinerasi adalah temperatur pembakaran dan waktu pembakaran sampah tersebut. Pemanfaatan energi panas insinerasi identik dengan combustion, yaitu dapat menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan. Faktor penting yang harus diperhatikan adalah kuantitas dan kontinuitas limbah yang akan dipasok. Kuantitas harus cukup untuk menghasilkan energi secara continue agar suplai energi tidak terputus. [10]

2.4. Moisture Content

Kandungan air (*moisture content*), akan menjadi acuan massa ekivalen timbulan sampah. Massa ekivalen sampah setelah dikurangi kandungan air, nilai kalor HHV rerata, dan rentang waktu akan menjadi faktor dalam perhitungan potensi energi dari timbulan sampah yang ada. Kandungan air (*moisture content*) pada sampah rumah tangga mencapai hingga 50-80 % yang didapat dari cairan yang melekat pada sampah dapur atau hujan ketika proses pengumpulan dan pengangkutan. Kadar air yang tinggi akan menurunkan nilai kalor sampah dan menghambat pembakaran. Sampah yang memiliki nilai kalor rendah akan menurunkan temperatur rata-rata ruang bakar dan stabilitas pembakaran yang berakibat pada meningkatnya jumlah waktu yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna [7].

Persentase kadar air (*moisture content*) yang terkandung di dalam sampah dapat dihitung dengan menggunakan standar ASTM D-3173-03 dengan persamaan sebagai berikut [12]:

$$MC = \frac{(a-b)}{a} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

MC : *Moisture Content* (%)

a : Massa Sampah Sebelum Dipanaskan (gram)

b : Massa Sampah Setelah Dipanaskan (gram)

2.5. Parameter Proses Kinerja Insinerator

Untuk melakukan pengukuran performansi dari proses pembakaran pada insinerator dapat dilakukan dengan beberapa parameter pengukuran sesuai dengan perumusan masalah yang sudah dibuat, diantaranya adalah:

a. Kapasitas Thermal Pembakaran

$$C = B_{bt} \times LHV_{bb}$$

Dimana:

C = Kapasitas Thermal (MJ/jam)

B_{bt} = Laju Pembakaran (kg/jam)

b. Laju Pembakaran

$$B_{bt} = \frac{m_0 - m_1}{t}$$

Dimana:

- B_{bt} = Laju Pembakaran (kg/jam)
- m_0 = Massa Sampah (kg)
- m_1 = Massa Sisa Pembakaran (kg)

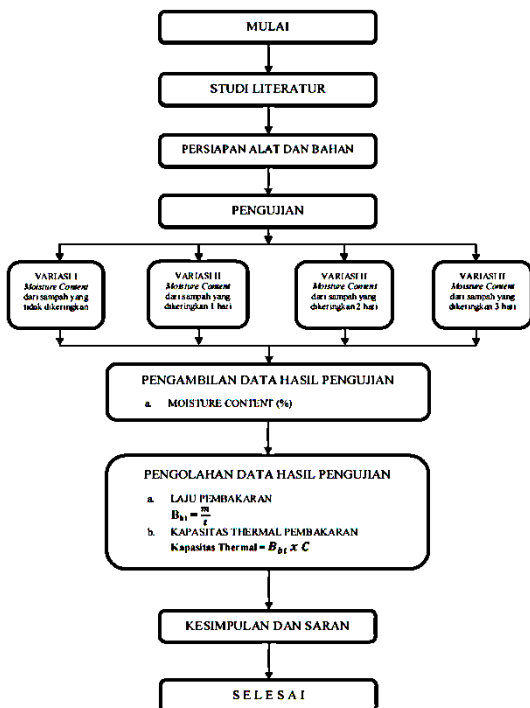
3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan studi eksperimental yang dimana kontrol penelitian dilakukan secara ketat untuk mencari pengaruh variabel tertentu terhadap variabel yang lainnya. Data yang didapatkan dari studi eksperimental ini bersifat sistematis dan logis sehingga hasil dari penelitian ini memiliki kemampuan pembuktian yang lebih kuat dibandingkan dengan jenis penelitian dengan metode yang lainnya.

Metode pendekatan secara eksperimental ini dilakukan sesuai dengan tujuan pelaksanaan penelitian yaitu dilakukan pengujian untuk mengetahui pengaruh variasi kadar air (*moisture content*) sampah residu terhadap performansi insinerator yang dilihat berdasarkan laju pembakaran, dan kapasitas thermal pembakaran; dengan temperatur yang telah ditentukan serta dengan waktu pembakaran yang telah ditentukan.

Adapun alat-alat yang digunakan dalam studi eksperimental ini adalah:

- Insinerator Sampah Residu : 1 Unit
- Blower : 2 Unit
- Thermokopel : 4 Unit
- Blower Sentrifugal/ ID Fan : 1 Unit
- Gas Analyzer Set : 1 Unit
- Oven : 1 Unit
- Timbangan : 2 Unit



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data *Moisture Content* Sampah

Proses pengambilan data *moisture content* dilakukan sesuai dengan ASTM D-3173-03, antara lain sebagai berikut.

- Setiap variabel sampah diletakkan ke cawan dengan massa 20 gram.
- Setiap variabel sampah dipanggang di dalam oven dengan temperature 105°C-110°C selama 6 jam.
- Sebelum proses pemanggangan dilakukan, catat data yang ada lalu di hitung dengan menggunakan rumus.
- Tunggu hingga 6 jam, setelah itu segera ambil data *moisture content*.

Berikut adalah proses perhitungan pengambilan data *moisture content*:

a) Sampah pengeringan 0 hari

$$MC = \frac{(20-5)}{20} \times 100\%$$

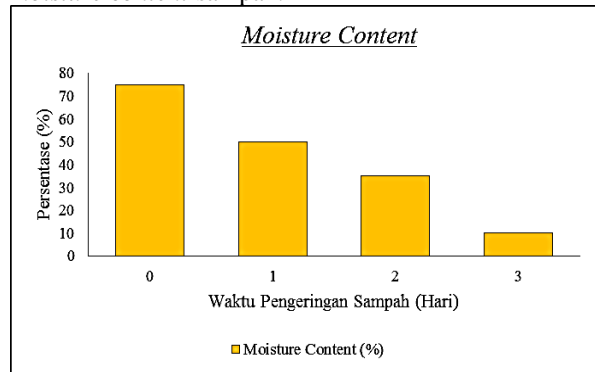
$$MC = 75\%$$

Berikut adalah data hasil dari pengujian *moisture content* sampah.

Tabel 1. Data *Moisture Content* Sampah

Variabel Pengeringan (Hari)	Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Moisture Content (%)
0	20	5	75
1	20	10	50
2	20	13	35
3	20	18	10

Berikut adalah grafik data hasil dari pengujian *moisture content* sampah.



Gambar 2. Grafik Data *Moisture Content*

Dari beberapa data hasil pengujian tersebut dapat dilihat perbedaan *moisture content* sampah yang berbeda-beda per-variabel pengujian. Berdasarkan data pada sampah pengeringan 3 hari, *moisture content* yang terkandung di dalam sampah dengan variabel pengeringan tersebut hanya 10%, sedikit berbeda jauh dengan penurunan kadar *moisture content* dari sampel sampah sebelumnya. Hal ini membuktikan bahwa semakin lama sampah dijemur,

maka proses penguapan kadar *moisture content* yang terdapat pada sampah semakin besar sehingga sampah menjadi lebih kering dibandingkan dengan sampah yang hanya dikeringkan selama 1 hari, 2 hari, atau yang tidak dikeringkan.

4.2 Pengolahan Data Laju Pembakaran

Pengolahan data laju pembakaran dilakukan untuk mengetahui berapa laju pembakaran per satuan menit yang terjadi pada proses insinerasi sampah residu rumah tangga per-sampel sampah. Hasil dari pengolahan data ini berkaitan dengan pengolahan data yang selanjutnya sehingga pada akhirnya dapat diketahui performansi dari insinerator.

Berikut adalah proses perhitungan pengambilan data laju pembakaran yang terjadi pada insinerasi setiap sampel sampah.

- a) Sampah ber*moisture content* 75%

$$B_{bt} = \frac{10000 \text{ gr} - 2955 \text{ gr}}{40 \text{ menit}}$$

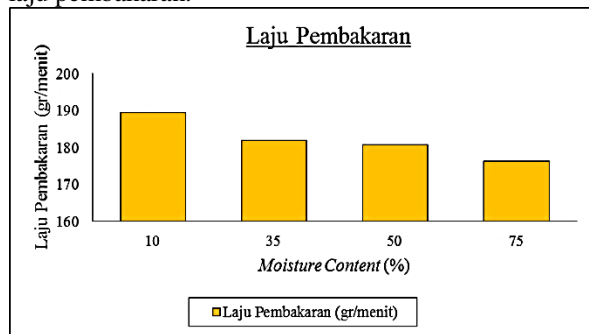
$$B_{bt} = 176,125 \text{ gr/menit}$$

Berikut adalah data hasil dari pengolahan data laju pembakaran.

Tabel 2. Pengolahan Data Laju Pembakaran

Moisture Content (%)	M ₀ (kg)	M ₁ (kg)	t (menit)	Laju Pembakaran (gr/menit)
75	10	2,955	40	176,125
50	10	2,77	40	180,75
35	10	2,275	40	181,875
10	10	2,425	40	189,375

Berikut adalah grafik data hasil pengolahan data laju pembakaran.



Gambar 3. Grafik Data Laju Pembakaran

Berdasarkan hasil perhitungan pengolahan data laju pembakaran tersebut dapat diartikan semakin kering sampah yang diinsinerasi, maka laju pembakarannya semakin tinggi. Menurut Bagus (2002), kadar air pada sampah akan mempengaruhi kualitas pembakaran, sehingga dari jurnal ini, dapat membuktikan bahwa perbedaan laju pembakaran pada proses insinerasi setiap sampel sampah di akibatkan oleh *moisture content* yang ada pada setiap sampel sampah. Pada sampah ber*moisture content* 75%, laju pembakaran yang terjadi adalah 176,125 gr/menit. Pada sampah ber*moisture content* 50%, laju pembakaran yang terjadi adalah 180,75 gr/menit.

Pada sampah ber*moisture content* 35%, laju pembakaran yang terjadi adalah 181,875 gr/menit. Sampah ber*moisture content* 10% menjadi variabel yang paling tinggi laju pembakarannya pada proses insinerasinya, yaitu 189,375 gr/menit.

4.3 Pengolahan Data Kapasitas Thermal Pembakaran

Pengolahan data kapasitas thermal pembakaran dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kapasitas thermal yang terjadi di dalam ruang bakar selama proses insinerasi per-sampel sampah sedang berlangsung. Hal ini dilakukan agar nantinya dapat dilakukan penetapan sampel sampah mana yang paling tinggi kapasitas thermal per pembakarannya.

Berikut adalah proses perhitungan pengambilan data kapasitas thermal pembakaran yang terjadi pada insinerasi setiap sampel sampah.

- a) Sampah ber*moisture content* 75%

$$C = 10,5675 \text{ kg/jam} \times 40,238 \text{ MJ/kg}$$

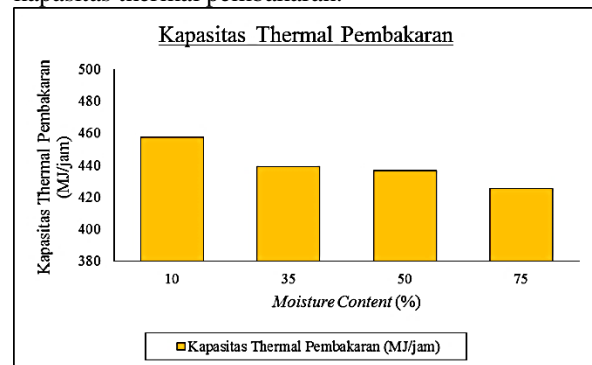
$$C = 425,215 \text{ MJ/jam}$$

Berikut adalah data hasil dari pengolahan data kapasitas thermal pembakaran.

Tabel 3. Pengolahan Data Kapasitas Thermal Pembakaran

Moisture Content (%)	Laju Pembakaran (kg/jam)	LHV _{bb} (MJ/kg)	Kapasitas Thermal Pembakaran (MJ/jam)
75	10,567	40,238	425,215
50	10,845	40,238	436,381
35	10,9125	40,238	439,097
10	11,3625	40,238	457,204

Berikut adalah grafik data hasil pengolahan data kapasitas thermal pembakaran.



Gambar 4. Grafik Data Kapasitas Thermal Pembakaran

Dari hasil perhitungan tersebut dapat dilihat bahwa pada sampah ber*moisture content* 10%, kapasitas thermal yang terjadi pada proses insinerasinya menjadi yang paling tinggi yaitu 457,204 MJ/jam. Diikuti sampah ber*moisture content* 35% yaitu 439,097 MJ/jam. Pada proses insinerasi sampah ber*moisture content* 50%, kapasitas thermal

yang terjadi yaitu 436,381 MJ/jam. Sedangkan sampah bermoisture content 75% menjadi sampel sampah yang paling kecil kapasitas thermalnya pada saat proses insinerasi yaitu 425,215 MJ/jam. Hal ini terjadi dikarenakan adanya perbedaan *moisture content* pada setiap sampel sampah. Sampel sampah yang paling keringlah yang kapasitas thermal pembakarannya paling tinggi. Menurut Bagus (2002), kadar air yang terkandung dalam sampah dapat mempengaruhi nilai kalor sampah itu sendiri, sehingga dari pernyataan tersebut membuktikan bahwa *moisture content* yang terdapat pada sampel sampahlah yang mempengaruhi kapasitas thermal pembakarannya pada saat diinsinerasi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan dari seluruh pengujian yang sudah dilakukan, dapat diambil kesimpulan yang didasari oleh pengujian yang sudah dilakukan.

Sampah bermoisture content 10% adalah sampel sampah yang paling baik hasilnya ketika diinsinerasi dan berpengaruh baik terhadap performansi dari insinerator. Hal ini terjadi diakibatkan oleh rendahnya kadar *moisture content* yang terkandung di dalam sampel sampah ini; sehingga laju pembakaran, dan kapasitas thermal pembakarannya baik.

Daftar Pustaka

- [1] Mahyudin, R. P., 2017, *Kajian Permasalahan Pengelolaan Sampah dan Dampak Lingkungan Di TPA (Tempat Pemrosesan Akhir)*, Jurnal Teknik Lingkungan, Vol.3, No.1, pp. 66-74.
- [2] Nugraha, A., S. H. Sutjahjo, dan A. A. Amin, 2018, *Persepsi dan Partisipasi Masyarakat Terhadap Pengelolaan Sampah Rumah Tangga Melalui Bank Sampah Di Jakarta Selatan*, Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan, Vol., No. 1, pp. 7-14.
- [3] Ratih, S. Y., 2011, *Evaluasi Metode Pengelolaan Sampah Untuk Umur Layan Di TPA Putri Cempo*, Jurnal Penelitian. Vol. No.2, pp. 41-51.
- [4] Wasilah, A. Hildayanti, dan M. Z. Suradin, 2017, *Inovasi Gedung Pengolahan Sampah Berbasis Insinerasi Yang Ramah Lingkungan*, Prosiding Temu Ilmiah IPLBI.
- [5] Abdullah, I., Y. N. Manik, Barita, Jufrizal, Supriatno, Zainuddin, dan Eswanto, 2019, *Desain Insinerator Menggunakan Bahan Bakar Cangkang Kelapa Sawit*, Jurnal Rekayasa Material, Vol. 2, No. 1, pp. 34-43.
- [6] Bagus, P. T., 2002, *Pengelolaan dan Pemanfaatan Sampah Menggunakan*

Teknologi Incenerator, Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol. 3, No. 1, pp. 17-23.

- [7] Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia, 2018, *Teknologi Termal WtE Berbasis Proses Pembakaran (Insinerasi) Indonesia*.
- [8] Anggraini, D., M. B. Pertiwi, dan D. Bahrin, 2012, *Pengaruh Jenis Sampah, Komposisi Masukan dan Waktu Tinggal Terhadap Komposisi Biogas Dari Sampah Organik.*, Jurnal Teknik Kimia, Vol. 1, No. 18, pp. 17-23.
- [9] Hariastuti, N. P., 2013, *Pemodelan Sistem Normatif Pengelolaan Sampah Kota*, Jurnal IPTEK., Vol.17 No.1, pp. 61-72.
- [10] Utami, R. D., D. G. Okayadnya, dan M. Mirwan, 2015, *Meningkatkan Kinerja Incenerator Pada Pemusnahan Limbah Medis RSUD Dr. Soetomo Surabaya*, Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan, Vol.7 No. 2, pp. 115-123.
- [11] Hidayah, E. N., 2007, *Uji Kemampuan Pengoperasian Insinerator Untuk Mereduksi Limbah Klinis Rumah Sakit Umum Haji Surabaya*, Jurnal Rekayasa Perencanaan., Vol.4 No. 1, pp. 1-9.
- [12] Rania, M. F., I. G. E. Lesmana, dan E. Maulana, 2019, *Analisis Potensi Refuse Derived Fuel (RDF) Dari Sampah Pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Di Kabupaten Tegal Sebagai Bahan Bakar Incinerator Pirolisis*, Jurnal Sintek, Vol.13 No.1 pp. 51-59.

	<p>Rio Sua Geralta Ginting menyelesaikan studi S1 di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana pada tahun 2021.</p>
<p>Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi adalah topik pembahasan konversi energi.</p>	

Pengaruh *Holding Time* Terhadap Kekerasan Material Bilah Gangsa Gamelan Bali

Simon Paskah Aprian Damanik, I Gusti Ngruah Priambadi, Wayan Nata Septiadi

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Pemilihan material musik harus memperimbangkan sifat mekanis dan akustik dari bahannya. Pada umumnya material yang digunakan sebagai bahan gamelan adalah perunggu timah putih, maka penelitian ini menggunakan paduan 80%Cu – 22%Sn. Pembuatan spesimen dilakukan dengan cara persiapan bahan, proses peleburan, proses penuangan, proses pendinginan dan proses pengecoran. Untuk mengetahui pengaruh *holding time* terhadap sifat mekanis kekerasan material dilakukan dengan menggunakan metode uji kekerasan Vickers. Hasil uji menunjukkan bahwa perlakuan temperatur *holding time* berpengaruh terhadap sifat mekanis pada spesimen paduan. Hasil tertinggi pada titik tengah spesimen dengan jarak 1,5 m dengan nilai 37,343 VHN. Semakin lama spesimen mengalami waktu penahanan dan temperatur yang meningkat, maka semakin berkurang nilai kekerasannya.

Kata kunci: gamelan Bali, waktu tahan, perunggu timah putih, kekerasan vickers

Abstract

The choice of musical material must take into account the mechanical and acoustic properties of the material. The material commonly used for gamelan is tin bronze, so this study used an alloy of 80% Cu - 22% Sn. Specimen making is done by means of material preparation, smelting process, pouring process, cooling process and casting process. To determine the effect of *holding time* on the mechanical properties of material hardness, the Vickers hardness test method was used. The test results show that the *holding time* temperature treatment affects the mechanical properties of the alloy specimens. The highest yield was at the midpoint of the specimen with a distance of 1.5 m with a value of 37,343 VHN. The longer the specimen experiences a *holding time* and the temperature increases, the less its hardness value will be.

Keywords: Balinese gamelan, holding time, tin bronze, vickers hardness

1. Pendahuluan

Bali memiliki kultur yang beragam dan berjalan bersama di kehidupan masyarakat pendukungnya yang didasari dengan konsep *desa kala patra* , artinya budaya yang hidup dalam ruang, dan kondisi. Sebagaimana keberadaan kesenian pada umumnya gamelan juga memiliki fungsi dan arti yang cukup penting di kehidupan masyarakat umumnya dalam kegiatan upacara agama.

Industri gamelan Bali berbahan perunggu timah putih cukup banyak tumbuh di Bali khususnya di Desa Tihingan, Kabupaten Klungkung. Alunan tabuh yang dimainkan menggunakan gamelan mampu membangkitkan suasana harmonis dan mistis di dalam pelaksanaan suatu upacara *yadnya* [1]. Karena khususnya material yang di pakai gamelan banyak mendapat perlakuan pukulan, maka pemilihan material musik harus memperhitungkan sifat mekanis dan akustik dari bahannya. Sifat mekanis menimbang pada sifat kekerasan material tersebut.

Paduan *Tin Bronze* (perunggu, timah) memiliki sifat mekanis dan akustik yang baik, dalam temperatur ruang dengan kondisi stabil, yaitu dapat

menghasilkan suara yang bergema (*low damping vibration*) [2].

Penelitian ini menggunakan paduan 80%Cu – 22%Sn dengan temperatur peleburan dengan varian waktu tahan (*holding time*) terhadap sifat mekanis material bilah gangsa gamelan Bali yang dihasilkan. Untuk mengetahui sifat mekanis kekerasan material dilakukan dengan metode pengujian kekerasan Vickers.

2. Dasar teori

2.1 Bahan Gamelan

Dalam pembuatan gamelan dipakai paduan perunggu, kuningan dan besi. Bahan perunggu merupakan perpaduan antara tembaga dan timah putih (Cu-Zn), matrik tembaga mempunyai beberapa keunggulan yaitu mempunyai keuletan yang tinggi, konduktor panas dan listrik yang baik [3]. Tembaga mempunyai sifat keuletan dan memiliki kekuatan yang rendah, tetapi bila di padukan dengan unsur logam lain seperti Berilium (Be), Seng (Zn), Timah Putih (Sn) maka kekuatannya akan bertambah. Baik dalam keadaan tmeperatur tinggi dan temperatur rendah, tembaga sangat lentur

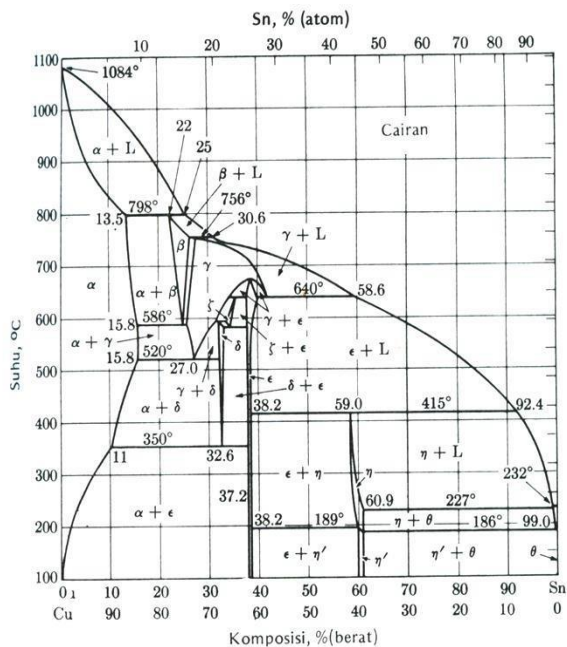
diregangkan, digiling, dan dimartil. Pemberian bentuk dalam keadaan panas harus berlangsung diatas sekitar 650°C.

Timah putih mempunyai sifat akustik yang bagus, dan bisa memberikan nada yang bergema dengan waktu yang berdegang lebih lama, akan tetapi paduan ini bersifat getas. Timah putih dapat dengan mudah dituang dan dapat dibentuk dengan baik dalam keadaan dingin. Timah putih adalah logam *post-transition* keperakan dan salah satu logam pemuaduan yang penting sebagai pelindung permukaan untuk mencegah karat.

2.2 Holding Time (Waktu Tahan)

Holding Time adalah waktu tahan yang dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimal dari suatu bahan padat pada proses *hardening* dengan menahan pada suhu pengerasan untuk memperoleh pemanasan yang *homogeny* sehingga struktur *austenite*-nya *homogeny* atau terjadi kelarutan karbida ke dalam *austenite* dan difusi karbon ke unsur paduannya [4]. Paduan perunggu diberikan perlakuan panas untuk mendapatkan sifat ketangguhan yang maksimal dengan beberapa tahap proses yaitu: awal pemanasan, lanjutan pemanasan, waktu tahan suhu stabil, dan pendinginan.

2.3 Diagram Fase Paduan Tembaga dan Timah



Putih

Gambar 1. Diagram Fase Cu-Sn

Nilai *modulus Young* dan elemen lainnya menurut beberapa sumber pada perunggu timah cukup bervariasi antara 0.96 – 1.2E+5 MPa dan densitas 7400-8900 kg/m³. Densitas perunggu timah putih

cukup dipengaruhi oleh besar porositasnya. Menambah timah terhadap tembaga sangat berpengaruh terhadap titik peleburannya.

Gambar diatas dapat dilihat bahwa kemampuan untuk melarutkan timah putih dengan prosentase diatas 13,5% selama terjadi proses pembekuan dimana akan terbentuk fase α (*alfa*), pada temperatur dibawah akan terbentuk fase $\alpha + \delta$ (*eutektoid phase*) akan terjadi. Pada paduan ini fase α yang terbentuk merupakan fase yang larut pada kondisi padat tetapi lebih lunak.

Penambahan komposisi timah akan menaikkan viskositas yang dapat menurunkan mampu alir dan menurunkan panjang fluiditas. Batas daerah pembekuan pada $\alpha + L$ lebih panjang sementara batas daerah pembekuan $\beta + L$ lebih pendek. Transisi *intermetallic* fase α dan β ini akan mengakibatkan peningkatan viskositas paduan mulai pada 10% Sn dan maksimum 25% Sn. Penamabahan 20-3-% Sn akan mempengaruhi viskositas pada phase β dan γ *intermetallic* [5].

2.4 Uji Kekerasan (Vickers)

Kekerasan suatu material menunjukkan ketangguhan material tersebut dalam menahan deformasi plastis. Pengujian kekerasan dengan metode *vickers* komposisi logam bertujuan untuk mengetahui angka kerasnya logam tersebut.

Pada pengujian yang dilakukan, pengujian kekerasana ini menggunakan alat *Vickers Hardness Tester*. Lama waktu penjejakan berlangsung selama 15 detik dan dapat menghasilkan ketelitian antara 2-4 mikro millimeter. Panjang diagonal dapat diukur pada arah horizontal ditandai dengan d_1 begitu sebaliknya vertikal ditandai dengan d_2 untuk mendapatkan nilai rata-rata d , panjang diagonal jejakan.

Kekerasan *Vickers* atau *hardness Vickers* (HV) merupakan hasil bagi yang didapatkan dari pembagian beban $P = 100$ Kg dengan kurva luas permukaan indentasi (mm^2) dimana kurva permukaan tersebut dianggap sebagai bagian dari kerucut yang diagonalnya d (mm) tadi.

Nilai kekerasan bisa dijumlahkan dengan rumus *Vickers* sebagai berikut [6] :

$$\text{VHN} = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.854 P}{d^2} \quad (1)$$

Dimana:

- VHN = *Vickers Hardness Test* (Kg/mm²)
- P = Beban yang diberikan (100 Kg)
- θ = Sudut antara permukaan intan 136°
- d = Panjang diagonal rerata indetasi (mm)

3. Metode Penelitian

3.1 Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Proses pembuatan bahan perunggu yang nantinya diaplikasikan sebagai material dasar 80%Cu – 20%Sn. Variasi waktu *holding time* ditentukan berdasarkan variasi jarak melalui koi peleburan menuju proses penuangan ke dalam cetakan. Variasi waktu *holding time* dihitung menggunakan *stopwatch* dengan ketentuan variasi jarak 1 meter, 1.5 meter dan 2 meter, 2,5 meter.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel bebas pada penelitian adalah ini adalah *holding time*. Sedangkan yang menjadi variabel terikat adalah sifat mekanis kekerasan material paduan. Selain itu terdapat juga variabel control yakni, temperatur peleburan dan temperature penahanan, komposisi material, dimensi, dan ukuran benda uji.

3.3 Peralatan Pengujian

Adapun peralatan utama yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah tungku atau dapur pemanas. Selain itu butuh beberapa alat ukur dan peralatan tambahan lainnya berupa *stopwatch*, jangka sorong, amplas, autosol, mesin gerinda potong, computer, dan mesin uji kekerasan.

3.4 Tahapan Pelaksanaan

Adapun tahapan pembuatan adalah dengan meleburkan logam murninya di dalam satu tungku, kemudian dituangkan kedalam cetakan. Setelah spesimen selesai dibuat kemudian spesimen dimasukkan kedalam cetakan dengan waktu penahanan. Selanjutnya potongan bilah ditandai sesuai sampel dengan kode sampel untuk pengujian kekerasan. Setelah melakukan pemanasan, bilah gamelan yang sudah dipanaskan dibiarkan mendingin dengan media pendingin dari udara sekitar.

1. Pemotongan Spesimen

Spesimen pengujian yang sudah di *forging* dengan panjang 24 cm dipotong dengan ukuran: 6 cm x 2,8 cm x 1 cm. Pemotongan spesimen menggunakan gergaji mesin.

2. Pengukuran Spesimen

Spesimen yang sudah dipotong diukur menggunakan jangka sorong agar presisi sesuai dengan ketentuan.

3. Pengamplasan

Pengamplasan bertujuan untuk meratakan dan

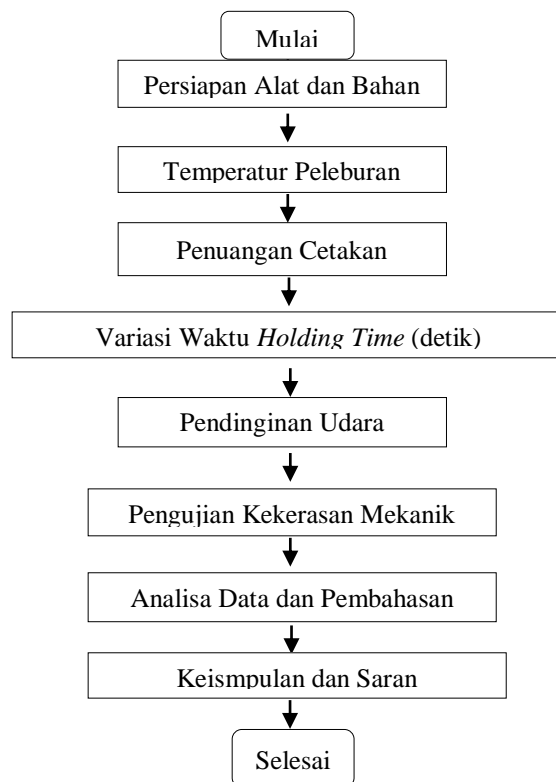
4 Hasil dan Pembahasan

memperhalus permukaan spesimen menggunakan amplas dengan ukuran kekasaran: 500, 1000, 1500 dan 2000 dengan waktu pengamplasan yang sama.

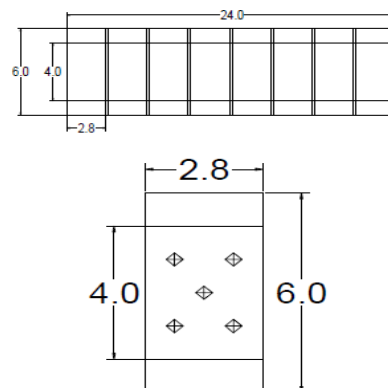
4. Pemolesan

Pemolesan dilakukan dengan autosol. Proses ini bertujuan untuk membersihkan permukaan sebelum melakukan pengujian sehingga mempermudah pengujian kekerasan.

3.5 Diagram Alir Penelitian



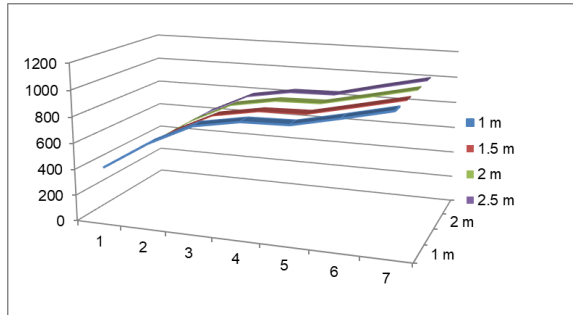
Gambar 2. Diagram Alir Penelitian



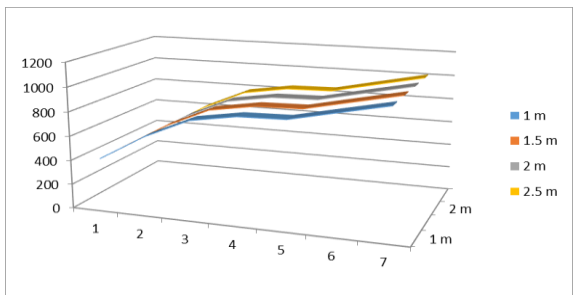
Gambar 3. Dimensi Spesimen Uji

4.1 Holding Time (Waktu Tahan)

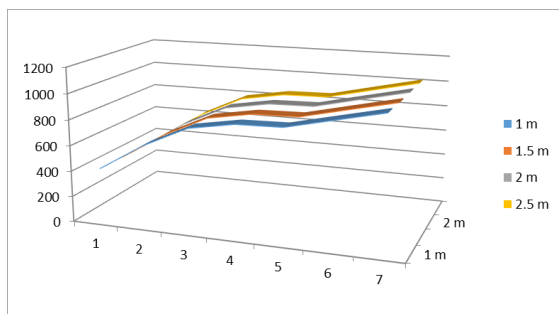
Proses perlakuan panas yang dilakukan dengan temperatur pemanasan terhadap jarak dari tungku. Maka didapatkan hasil temperatur pemanasan dengan menggunakan Termokopel 4 channel *National Instrument NI USB-9211/9211A*.



Gambar 4. Grafik Temperatur Peleburan



Gambar 5. Grafik Temperatur Peleburan



Gambar 6. Grafik Temperatur Peleburan

Naiknya temperatur dapat menyebabkan kurangnya tegangan permukaan antara logam cair dengan dinding cetakan dan viskositas, sehingga menambah kecepatan pengisian. Peleburan paduan perunggu memberikan manfaat pada penurunan

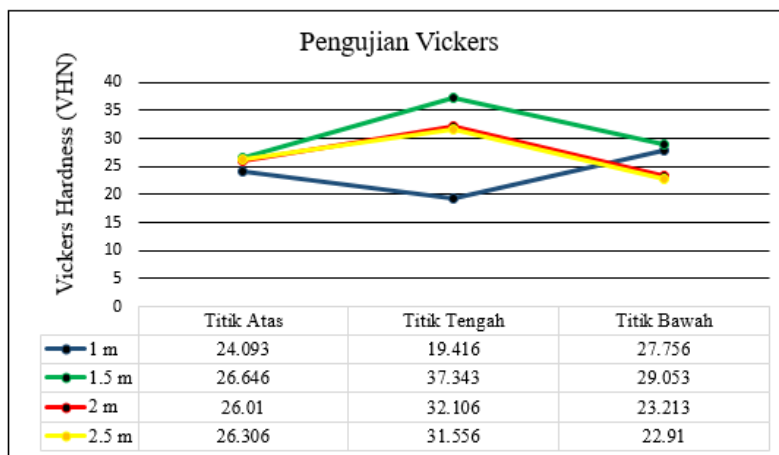
terhadap penggunaan bahan bakar, sehingga pembakaran menjadi lebih sempurna dan temperatur yang dihasilkan semakin tinggi. Setelah diberikan *holding time* atau penahanan waktu yang berbeda, maka bentuk butir berubah menjadi membesar. Perlakuan temperatur *holding time* berpengaruh terhadap ukuran dan bentuk strukturmikro pada material specimen. Strukturmikro sangat berpengaruh pada proses pembentukan besarnya butiran dan luas batasan butir tersebut.

4.2 Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan yang dilakukan adalah dengan proses pengujian untuk mengetahui tingkat kekerasan material dengan menggunakan alat uji kekerasan mikro *Vickers* standar ASTM E92-82 (2003) dengan pembebanan 10 kg. Data hasil pengujian menunjukkan keras-lunak permukaan suatu material logam di setiap lokasi penjeakan berbeda-beda, hal ini ditunjukkan dengan panjang diagonal indentasi yang berbeda-beda karena faktor kehalusan permukaan, porositas, jenis perlakuan, dan unsur-unsur paduan. Diagonal yang lebih panjang memberikan pengertian bahwa nilai kekerasan material rendah, sebaliknya diagonal yang lebih pendek memberikan pengertian bahwa nilai kekerasan material tinggi.

Semakin lama spesimen mengalami waktu penahanan dan temperatur yang meningkat, maka semakin berkurang nilai kekerasannya. Perbedaan nilai tersebut diakibatkan oleh pengaruh lama waktu spesimen mengalami perlakuan panas sehingga menyebabkan nilai kekerasan menjadi turun. Dan juga *holding time* menyebabkan struktur mikro spesimen menjadi ikut berubah [7].

Dapat diketahui bahwa laju pendinginan yang tinggi pasti menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada laju pendinginan rendah, karena kekerasan perunggu juga sangat dipengaruhi oleh kemunculan porositas dan retak. Kondisi ini terjadi dilihat dari komposisi tembaga yang mempunyai kekuatan mekanis material yang tinggi dan bersifat ulet, yang struktur atom yang membentuk sampel termampatkan sehingga material akan menjadi lebih keras [8].



Gambar 7. Hasil Pengujian Kekerasan Vicker

Berdasarkan gambar di atas bahwa hasil tertinggi pengujian mekanis kekerasan *Vickers* berada pada titik tengah sampel dengan jarak 1,5 m dari tungku dengan nilai 37.343 VHN dan terendah pada titik tengah sampel jarak 1 m dengan nilai sebesar 19.416 VHN. Hal ini disebabkan lama waktu pembekuan akibat temperatur, sehingga laju pembekuan yang rendah menghasilkan struktur yang kasar [9]. Porositas adalah salah satu karakteristik dari benda coran, berupa lubang-lubang kecil yang terbentuk akibat terdapat gelembung gas hidrogen pada logam cair yang tidak sempat terbebaskan pada saat logam cair membeku, letak porositas dapat menyebar atau berkumpul didaerah tertentu. Porositas yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan, jika laju pendinginan lambat, maka porositas yang terbentuk berukuran besar namun jarang [10].

5. Kesimpulan

Perlakuan temperatur *holding time* berpengaruh terhadap sifat mekanis pada spesimen paduan. Hasil tertinggi pada titik tengah spesimen dengan jarak 1,5 m dengan nilai 37.343 VHN. Kekerasan paduan perunggu pada titik atas dan titik tengah cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya jarak dari tungku ke pengecoran dan menurun pada jarak 2,5 m dari tungku. Dan semakin lama spesimen mengalami waktu penahanan dan temperatur yang meningkat, maka semakin berkurang nilai kekerasannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pratama, W. G., Sudana, A. A. K. O. And W, A. A. K. A. C., 2016, *Pemodelan Sistem Informasi Gamelan Bali Menggunakan Tree Diagram*, Jurnal Ilmiah Merpati (Menara Penelitian Akademika Teknologi Informasi), 2(2), Pp. 246–252.
- [2] Sugita, I. And Astawa, K., 2016, *Studi Dendrite Arm Spacing (Das) Dan Akustik*

Pada Pengecoran Perunggu 20% Sn Sebagai Bahan Gamelan, Jurnal Udayana Mengabdi, 15(1), Pp. 44–49.

- [3] Himawan, Arisantoso, A. S., 2017, *“Fakultas Teknik – Universitas Muria Kudus 153,” Prosiding Snatif Ke-4 Tahun 2017*, Pp. 783–790. Doi: 10.2298/Pan0903301g.
- [4] Anggraini, A. R. And Oliver, J., 2019, *Journal Of Chemical Information And Modeling*, 53(9), Pp. 1689 – 1699. Doi: 10.1017/Cbo9781107415324.004.
- [5] Grafika, J. And Yogyakarta, N., 2017), *Fluiditas Paduan Perunggu Timah Melalui Investment Casting*, Pp. 655–660.
- [6] I Ketut Rimpung, 2017, *Analisis Perubahan Kekerasan Permukaan Baja (St . 42) Metode Vickers Di Laboratorium Uji Bahan*, Jurnal Logic, 17(1), Pp. 67–72.
- [7] Luhur P, H. A., Hadi, E. S. And Amiruddin, W., 2017, *Jurnal Teknik Perkapalan*, Teknik Perkapalan, 5(2), Pp. 421–430.
- [8] Putri Kusuma, C. K. And Nitya Santhiarsa, I., 2009, *Pengaruh Proses Forging Terhadap Sifat Ketangguhan Retak Dan Kekerasan Material Perunggu Sebagai Bahan Gamelan,* Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakram, 3(2), Pp. 93–97.
- [9] Surya, K. Et Al., 2018, *Pengaruh Perlakuan Panas Pada Perubahan Frekuensi Natural Dan Struktur Mikro*

Bilah Gamelan Gangsa, 7(4), Pp. 302–306.

- [10] Alian, H., 2013, *Kajian Eksperimental Pengaruh Paduan Timah Aki (10 %, 15 %, 20 %, 25 %) Pada Coran Tembaga Pipa Ac (Air Conditioner) Bekas Terhadap Sifat Mekanik,*” 13(1), Pp. 35–53.



Simon Paskah Aprian Damanik menyelesaikan studi program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2013 sampai 2020. Menyelesaikan studi program sarjana dengan topik penelitian Pengaruh *Holding Time* Terhadap Kekerasan Material Bilah Gangsa Gamelan Bali.

Perancangan Sistem Kontrol Kecerdasan Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink

Dadang Yuda Saputra, I Wayan Widhiada, I Ketut Adi Atmika
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Segway adalah alat transportasi listrik yang fleksibel dan mudah diendarai. Segway juga merupakan kendaraan hemat daya sehingga dapat menjadi alternatif transportasi jarak dekat yang ramah lingkungan. Pada penelitian kali ini segway akan di buat hanya bisa seimbang dalam keadaan statis dengan menggunakan kontrol kecerdasan Fuzzy Logic Control yang akan seimbang ketika segway dimiringkan dengan sudut dan membaca kemiringan sudut dengan sudut maksimum 15° kedepan maupun kebelakang. Segway menggunakan sensor MPU6050 berbasis mikrokontroler arduino dengan membuat kontrol menggunakan software MATLAB dan simulink. Sensor membaca perubahan sudut jadi ketika sudut terbaca mengalami perubahan sudut maksimal 15° maka motor DC akan bergerak sebaliknya dan Fuzzy Logic Control berupaya menyeimbangkannya dengan sinyal respon minimal maximum overshoot $\leq 5\%$, error signal $\leq 5\%$ dan settling time kurang dari 5 detik sebagai standar robotika. Fuzzy logic control menggunakan rule yang sudah dibuat sedemikian rupa agar bisa menyeimbangkan segway. Dan didapatkan pada kemiringan maksimal 15° maximum overshoot 3%, persentase error 4.7% dan settling time 4 detik kemudian pada kemiringan -15° maximum overshoot 26.6%, persentase error 2.8% dan settling time 2 detik..

Kata Kunci: Segway, Arduino, Robot Keseimbangan, Logika Fuzzy, Matlab

Abstract

Segway is a means of electric transportation that is flexible and easy to ride. The Segway is also a power-efficient vehicle so it can be an environmentally friendly alternative to short-distance transportation. In this research, the segway will only be balanced in a static state by using intelligent Fuzzy Logic Control which will balance when the segway is tilted at an angle and reads the tilt angle with a maximum angle of 15° forward and back. Segway uses the MPU6050 sensor based on the Arduino microcontroller with make control using MATLAB and simulink software. The sensor reads the change in angle so when the reading angle changes to a maximum angle of 15° the DC motor will move the other way around and Fuzzy Logic Control tries to balance it with a minimum response signal of maximum overshoot $< 5\%$, error signal $< 5\%$ and settling time less than 5 seconds as standard robotics. Fuzzy logic control uses rules that have been made in such a way as to balance the segway. And obtained at a maximum slope of 15° maximum overshoot 3%, error percentage 4.7% and settling time 4 seconds then on a slope -15° maximum overshoot 26.6%, percentage error 2.8% and settling time 2 seconds.

Keywords: Segway, Arduino, Balancing Robot, Fuzzy Logic, Matlab

1. Pendahuluan

Pada zaman teknologi dan revolusi industri 4.0 seperti ini alat transportasi dan *manufacturing* dari transportasi pun sangat berkembang pesat. Disini diketahui bahwa otomatisasi sangat dibutuhkan bagi beberapa perusahaan, manusia sangat terbantu akan kehadiran robot - robot dan mesin - mesin yang menunjang aktifitas produksi. Transportasi merupakan salah satu yang paling diunggulkan karena transportasi merupakan penunjang kegiatan manusia untuk mencapai ke titik tertentu.

Banyak sekali macam - macam alat transportasi listrik yang sudah ada dalam kehidupan kita sehari - hari karena saat ini kendaraan listrik merupakan moda transportasi yang paling efisien dalam menghadapi emisi gas yang membuat

pencemaran udara. Dan juga penggunaan kendaraan listrik lebih praktis dan efisien.

Dari bermacam - macam kendaraan listrik yang ada saat ini seperti sepeda listrik, scooter listrik dll. Segway memiliki mobilitas tinggi. Kehadiran segway membuat manusia sangat terbantu karena segway memiliki dimensi yang ramping sehingga manusia pun ingin mencapai suatu titik tertentu dalam jarak dekat seperti di perkantoran, lingkungan sekolah dan dirumah pun menjadi sangat mudah. Untuk mencapai itu Dean Kamen, dkk membuat sebuah penelitian tentang alat menggunakan sensor giroskopik lalu terciptalah *segway* seperti sekarang ini[1].

Segway menerapkan sistem inverted pendulum dimana sistem memiliki bandul dan tongkat pendulum yang di pasang terbalik

Dengan mengacu dari sistem inverted pendulum maka segway pun dapat seimbang [2].

Dari beberapa penelitian yang sudah di jabarkan diketahui pengontrolan segway yang merupakan implementasi dari inverted pendulum yaitu mengontrol bagaimana pendulum segway dapat seimbang atau kembali ke posisi sudut semula dengan segway bergerak secara statis tegak berdiri seimbang diatas cart yang memiliki dua roda kanan dan kiri.

Penelitian ini menggunakan mikrokontroler arduino, sensor MPU6050, motor dc, driver motor BTS 7960 dan komponen lainnya. Segway akan bergerak secara statis dan diberi gaya sebesar kemiringan 15° lalu dilepas dan memperhatikan sinyal respon yang dihasilkan. Kontrol yang digunakan yaitu *fuzzy Logic Control*.

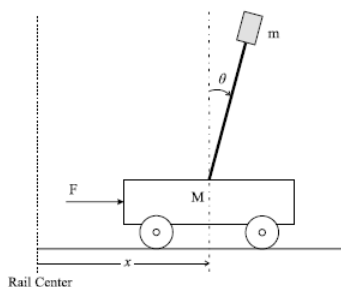
Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan respon sinyal sesuai standar robotika yaitu maximum overshoot $\leq 5\%$, error signal $\leq 5\%$ dan settling time secepatnya. Jika sudah tercapai maka segway sudah sesuai standar robotika yang akan di ujikan. Batas batas tersebut merupakan syarat mutlak dari pengendali otomatis agar suatu sistem bisa menjaga performanya saat mulai /atau start awal tidak terjadi sentakan sehingga kenyamanan akan berkurang. Penggunaan dari sistem kontrol ini di harapkan mampu mengurangi sentakan awal dari *Segway* yang akan di rancang.

2. Dasar Teori

2.1 Inverted Pendulum

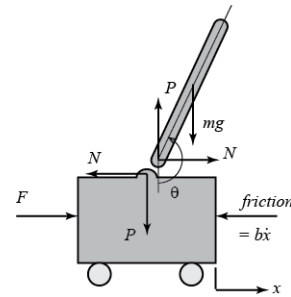
Sistem ini sangat banyak ada di berbagai macam sumber literatur sistem kontrol. Karena inverted pendulum merupakan suatu sistem pengontrolan *cart* yang ada di bawah pendulum dan digerakkan ke arah x agar pendulum yang diatasnya dapat seimbang.

Sistem yang bergerak secara non linier ini menggunakan pengontrolan yang membuat pendulum di atasnya tetap tegak tanpa jatuh sedikitpun. Sistem ini biasa di terapkan pada *balancing robot*, *hover board* dan *segway*.



Gambar 1. Inverted pendulum

2.2 Pemodelan Matematika



Gambar 2. Free Body Diagram Inverted Pendulum

Dengan menjumlahkan gaya dalam *free-body diagram*, *cart* dalam arah horizontal, maka mendapatkan persamaan gerak berikut.

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \quad (1)$$

Menjumlahkan gaya dalam *free-body diagram* dari *pendulum* dalam arah horizontal, maka mendapatkan persamaan berikut untuk gaya reaksi N .

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (2)$$

Jika mengganti persamaan ini menjadi persamaan pertama, maka mendapatkan salah satu dari dua persamaan yang mengatur untuk sistem ini.

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (3)$$

Untuk mendapatkan persamaan gerak kedua untuk sistem ini, jumlahkan gaya tegak lurus terhadap pendulum. maka harus mendapatkan persamaan berikut.

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta = -ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos \theta \quad (4)$$

Untuk menghilangkan istilah P dan N dalam persamaan di atas, jumlahkan momen tentang pusat massa *pendulum* untuk mendapatkan persamaan berikut.

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta = I\ddot{\theta} \quad (5)$$

Menggabungkan dua persamaan terakhir ini, maka mendapatkan persamaan perintah kedua [3].

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -ml\ddot{x} \cos \theta \quad (6)$$

2.3 Sistem Kontrol

Sistem kontrol adalah suatu rangkaian yang terpusat mengendalikan suatu sistem yang sebelumnya terkonepsi dengan sedemikian rupa melalui tahap perhitungan yang pasti. Terdapat dua macam sistem kontrol yaitu :

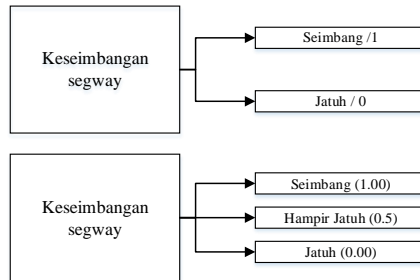
1. sistem kontrol loop tertutup
2. kontrol loop terbuka

2.4 Fuzzy Logic Control

Fuzzy Logic Control merupakan suatu sistem kontrol kecerdasan manusia yang memiliki banyak kemungkinan terjadi atau

menuju ketidakpastian dalam pengambilan keputusan.

Banyak sekali kemungkinan - kemungkinan yang terjadi karena fuzzy logic mengambil sebuah keputusan yang rentang kemungkinannya menjadi beberapa bagian.



Gambar 3. Konsep Fuzzy Logic

Dalam *Fuzzy Logic Control* terdapat beberapa tahap pengambilan keputusan yaitu diantaranya :

1. Basis Pengetahuan
2. Fuzifikasi
3. Logika pengambilan keputusan
4. Defuzifikasi

Basis pengetahuan merupakan bahan acuan atau dasar pengetahuan dari tahapan - tahapan *Fuzzy Logic Control* lalu di lanjutkan fuzifikasi sebagai pengubah nilai pasti pada sebuah data menjadi nilai linguistik agar bisa diolah oleh logika pengambilan keputusan yang keluarannya akan di defuzifikasi untuk mengubah variabel linguistik tadi menjadi nilai pasti[4].

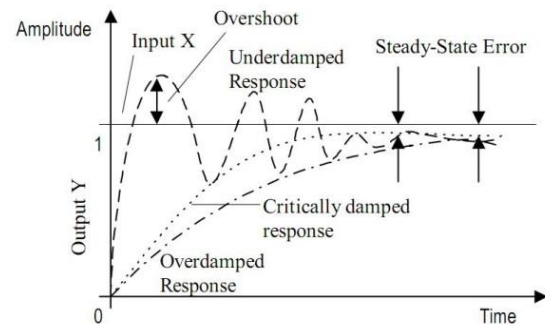
2.5 Respon Tanggapan Sistem

Setelah menciptakan suatu sistem kontrol yang sudah terkonsep, kita harus tahu nilai *output* yang dihasilkan agar dapat di analisis nantinya. Cara untuk melihatnya adalah dengan menganalisis tanggapan respon dari suatu sistem kontrol tersebut. Respon sistem adalah perubahan *output* terhadap sinyal *input*. Respon sistem nantinya akan berupa kurva akan menjadi acuan untuk menganalisis karakteristik sistem kontrol selain menggunakan persamaan/model matematika. Bentuk kurva respon tanggapan sistem dapat diketahui setelah menghasilkan sinyal *input*. Sinyal *input* yang diberikan untuk mengetahui karakteristik sistem disebut sinyal test. Ada 3 jenis *input* sinyal test yang digunakan untuk menganalisis sistem dari kurva response yaitu:

- a. *Impulse Signal*
- b. *Step Signal*
- c. *Ramp Signal*

Karakteristik respon sistem dapat di kategorikan menjadi 2 jenis, yaitu respon waktu (*Time Respons*) dan respon frekuensi

(*Frequency Respons*). Respon waktu adalah karakteristik sinyal respon yang spesifikasi performanya mengacu pada analisa kurva respon *output* sistem terhadap berubahnya waktu. Sedangkan respon frekuensi adalah karakteristik respon yang spesifikasi performanya didasarkan analisa magnitudo dan sudut fase dari penguatan sinyal *output* atau *input*. Disini menggunakan sinyal respon transient sebagai bahan analisa data karena sinyal respon transien merupakan sinyal dari perubahan tiba tiba yang di alami suatu sistem yang mengacu pada fungsi dari sistem tersebut



Gambar 4. Sinyal respon transient

2.6 Matlab/Simulink

Matlab merupakan sebuah software dengan bahasa komputasi yang sangat tinggi yang bertujuan mengintegrasikan suatu sistem yang sudah memiliki konsep secara matematis dan akan melalui proses pemrograman secara *interface* dan di olah di matlab untuk menjadikan sistem itu menjadi sistem yang sudah kompleks secara matematis [5].

Simulink adalah salah satu fitur paket perangkat lunak yang terintegrasi dengan Matlab untuk melakukan simulasi sistem dinamik dengan metode grafis. Dengan Simulink, suatu masalah teknikal atau sains matematis yang di sederhanakan dalam diagram blok dan panah-panah yang menggambarkan aliran sinyal dan fungsi-fungsi yang terlibat dalam suatu sistem dinamik.

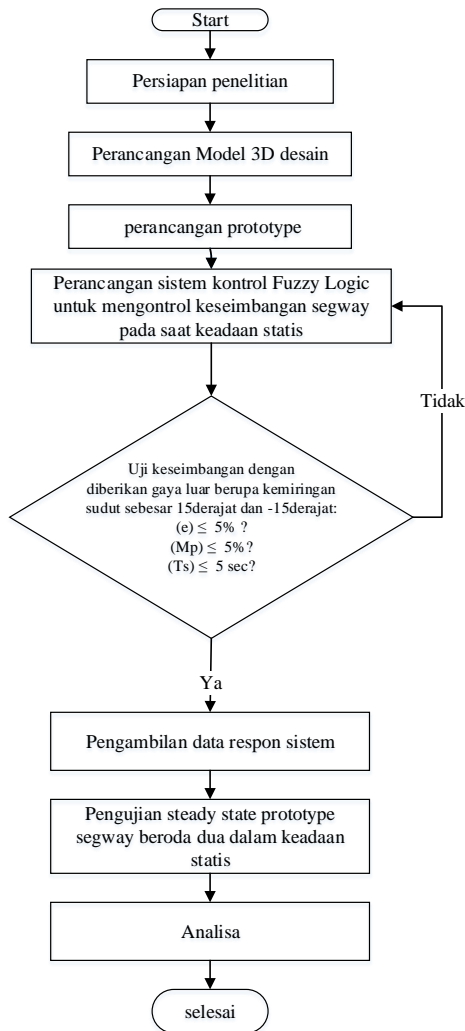
3. Metode Penelitian

3.1 Deskripsi penelitian

Dalam penelitian kali ini tentang inverted pendulum menggunakan cart kendaraan beroda dua yang membentuk *Segway*. *Segway* bergerak berdasarkan dinamika sistem pendulum terbalik. Alat ini dapat bergerak maju dan mundur untuk mempertahankan keseimbangan. *Segway* memiliki dua roda yang terhubung dalam konfigurasi paralel [6].

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah perancangan sistem kecerdasan dengan menggunakan fuzzy logic Control dimana peneliti membuat visualisasi pemodelan dan pengujian hipotesis. Sebab akibat melalui pemanipulasian variabel bebas. Adapun variabel bebas yang digunakan adalah Input referensinya adalah sudut (θ) dan perubahan sudut (ω) dan terikatnya adalah output dari Actual outputnya adalah Sudut pendulum (θ).

3.2 Diagram alir



3.3 Alat penunjang penelitian

Pada penelitian kali ini di perlukan alat penunjang yaitu :

1. Komputer atau laptop dengan software *autodesk inventor*, MATLAB[®] simulink dan perancangan sistem kontrol fuzzy logic.
2. Rangkaian chasis berbahan dasar Logam besi yaitu Hollow dengan ukuran 5 cm x 5 cm
3. Motor Dc MY 1016
4. Arduino Uno R3

5. Sensor MPU 6050
6. Kabel jumper
7. Breadboard
8. Motor driver BTS 7960
9. Aki Panasonic power supply
10. Ban ukuran 16"
11. Rantai dan gear ukuran diameter 14 cm

3.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian sebagai berikut:

1. Mendesain model prototype *self balancing robot Segway* dengan menggunakan *autodesk inventor*
2. Diagram block simulink, dari desain 3D yang di hasilkan akan di export ke simulink dan terbentuklah diagram blocknya yang merupakan rangkaian dari sistem *self balancing robot Segway*
3. Membuat model matematis untuk dimasukkan ke *fuzzy logic Control* dan perancangan *fuzzy Rule* sehingga dapat diukur outputnya sehingga di temukan *error signal, maximum overshoot*, dan *settling time*.

3.5 Analisa data

Metode yang lakukan pada penelitian ini adalah metode dengan simulasi dan eksperimen, yang berarti peneliti membuat visualisasi pemodelan 3D dan menguji hipotesis sebab dan akibat melalui memanipulasi variabel bebas. Visualisasi pemodelan *Segway* menggunakan software Autodesk Inventor dan pengujian sistem Fuzzy logic dan simulasi menggunakan software MATLAB. Variable bebas merupakan input dari sistem kontrol Fuzzy Logic yaitu sudut referensi dengan pemodelan matematika yang telah di buat dan variabel terikat merupakan output berupa gerak aktual prototype dan respon tanggapan sistem yaitu keseimbangan dan respon sinyal yang di dapat. Data yang di dapat berupa grafik respon transien gerak self balancing robot dan dibuat pembahasan dari data sehingga di dapat kesimpulan dari penelitian perancangan dan implementasi sistem kontrol Fuzzy Logic pada prototype *Segway*.

4. hasil dan pembahasan

4.1 Pembuatan sistem prototype segway

Dalam pembuatan *segway* melalui beberapa tahap pembuatan yaitu tahap pembuatan sistem mekanis dan sistem elektronika.

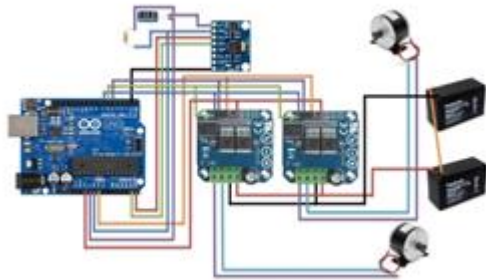
4.1.1 Pembuatan sistem mekanis prototype segway

Pembuatan sistem mekanis diawali dengan pembuatan pemodelan 3D terlebih dahulu. Dengan memperhitungkan secara matematis dan menggunakan peralatan seperti

gerinda , bor dll. Peneliti membuat rangkan dan beberapa komponen mekanis lainnya sendiri. Pemodelan 3D menggunakan software *Inventor* dengan komponen komponen lengkap.



Gambar 5. Pemodelan 3D prototype segway
4.1.2 Pembuatan sistem elektronika prototype segway



Gambar 6. Rangkaian Kelistrikan Prototype Segway

Konfigurasi pin rangkaian komponen listrik :

- a. Arduino UNO – Sensor MPU6050
 - 5V disambungkan ke VCC
 - GND disambungkan ke GND
 - A5 disambungkan ke SCL
 - A4 disambungkan ke SDL
 - TX 1 disambungkan ke INT
- b. Arduino UNO – Motor Driver
 - Pin 7 disambungkan ke LPWM
 - ~6 disambungkan ke RPWM
 - ~5 disambungkan ke PWM
 - GND disambungkan ke GND
 - 3.3V disambungkan ke 5V
- c. Motor Driver – AKI
 - B+ disambungkan ke +
 - B- disambungkan ke -
- d. Motor Driver – Motor DC
 - M+ disambungkan ke + motor
 - M- disambungkan ke - motor
- e. AKI Panasonic
 - + disambungkan ke posisi -
- f. Motor DC
 - + disambungkan ke M+
 - - di sambungkan ke M-

4.1.3 Perancangan elemen mesin

Menghitung Torsi Motor :

$$T = \frac{p \cdot 60}{2\pi n}$$

$$T = \frac{300 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 2650}$$

$$T = 1.08 Nm$$

T = Torsi (Nm)

P = Daya motor (watt)

N = putaran motor (RPM)

Menghitung daya maksimum motor

$$P = T \times \omega$$

$$P = 1.08 \times 277,5073$$

$$P = 299,707 watt$$

P = Daya motor (watt)

T = Torsi (Nm)

ω = Putaran motor (Rad/s)

Putaran roda setelah di reduksi transmisi

$$T_2 = T_1 \frac{n_1}{n_2}$$

$$68 = 11 \frac{2650}{n_2}$$

$$n_2 = 429 Rpm$$

T₁ = Jumlah gigi kecil (T)

T₂ = jumlah gigi besar (T)

N₁ = Putaran motor sebelum di reduksi (RPM)

N₂ = Putaran motor sesudah di reduksi (RPM)

Lama pemakaian

$$T = \frac{I_a}{I_m}$$

$$T = \frac{7.5}{16.5}$$

$$T = 0.6 jam$$

T = lama pemakaian (Jam)

L_a = Arus (Ah)

L_m = Arus yang dibutuhkan motor (a)

Kecepatan putaran motor seimbang

$$\frac{Pwm}{Pwm \max} \times \frac{RPM}{Perbandingan \ trannisi} = RPM$$

$$\frac{40}{255} \times \frac{2650}{6.19} = 67.2 RPM$$

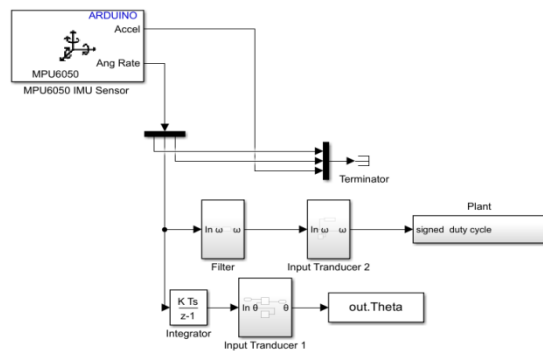
$$2 \times \pi \times Rpm = Rad/s$$

$$2 \times 3.14 \times 67.2 = Rad/s$$

$$677.2 Rad/s$$

4.2 Pemodelan diagram blok simulink

4.2.1 Diagram blok tanpa kontrol



Gambar 7. Diagram blok simulink tanpa kontrol

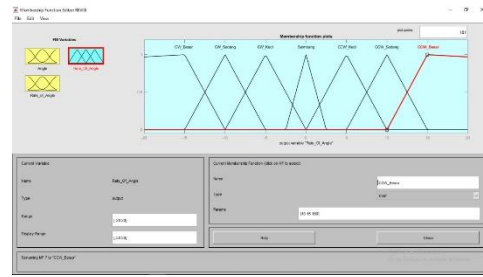
Setelah tahapan pembuatan *prototype* selesai, selanjutnya akan dibuatkan pemodelan dari sistem kontrol untuk mikrokontrolernya. Dalam penelitian kali ini sistem kontrol hanya menggunakan 1 DoF (*Degree of Freedom*).

Range=[-20 20]	Range=[-20 20]
'CW_Besar': 'trimf',	'CW_Besar': 'trimf',
[-180 -15 -10]	[-180 -15 -10]
'CW_Sedang': 'trimf',	'CW_Sedang': 'trimf',
[-15 -10 -5]	[-15 -10 -5]
'CW_Kecil': 'trimf',	'CW_Kecil': 'trimf',
[-0.5 0 0.5]	[-10 -5 0]
'Seimbang': 'trimf',	'Seimbang': 'trimf',
[-10 -5 0]	[-2.5 0 2.5]
'CCW_Kecil': 'trimf',	'CCW_Kecil': 'trimf',
[0 5 10]	[0 5 10]
'CCW_Sedang': 'trimf',	'CCW_Sedang': 'trimf',
[5 10 15]	[5 10 15]
'CCW_Besar': 'trimf',	'CCW_Besar': 'trimf',
[10 15 180]	[10 15 180]

Pemodelan sistem tanpa kontrol dengan simulink ini dijadikan acuan dasar yang nantinya akan sebagai referensi sistem kontrol *fuzzy logic control*. Dalam gambar 4.5 diketahui bahwa sinyal dari sensor MPU 6050 merupakan input yang akan masuk ke filter yang fungsinya menyaring frekuensi sinyal paling maksimum menggunakan highpass filter dan low pass filter.

4.2.2 Diagram blok dengan fuzzy logic control

Putaran motor DC akan diatur dengan sinyal digital yang diterima arduino dari sudut yang terbaca pada sensor MPU6050.

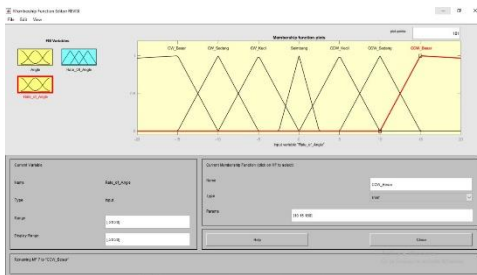


Gambar 10. Output Fuzzy Logic angle dan angle rate Output yang dibuat berdasarkan input dan sudut referensi.

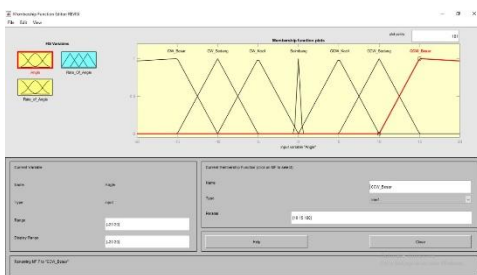
Parameter Fuzzy Logic Control prototype Segway

Range=[-20 20]	CW_Besar
'CW_Besar': 'trimf',	CW_Sedang
[-180 -15 -10]	CW_Kecil
'CW_Sedang': 'trimf',	Seimbang
[-15 -10 -5]	CCW_Kecil
'CW_Kecil': 'trimf',	CCW_Sedang
[-10 -5 0]	CCW_Besar
'Seimbang': 'trimf',	
[-2.5 0 2.5]	
'CCW_Kecil': 'trimf',	
[0 5 10]	
'CCW_Sedang': 'trimf',	
[5 10 15]	
'CCW_Besar': 'trimf',	
[10 15 180]	

Adapun sistem kontrol menggunakan fuzzy logic system yang dibuat sebagai berikut:

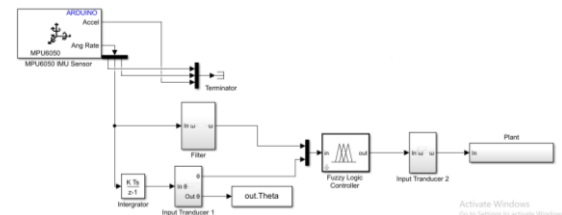


Gambar 8. Input sudut fuzzy Logic Control



Gambar 9. Input perubahan sudut Fuzzy Logic Control

Input yang dimasukkan ke dalam Fuzzy Logic designer yaitu sudut dan perubahan sudut. Dengan sudut maksimal yaitu 15°.

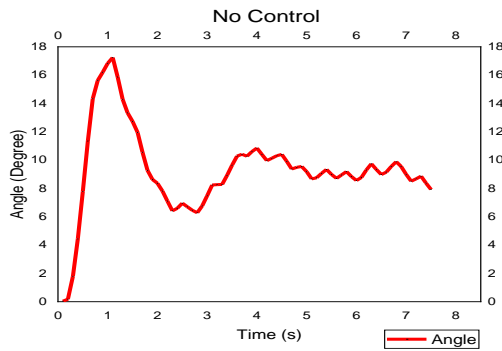


Gambar 11. Diagram blok dengan Fuzzy Logic Control

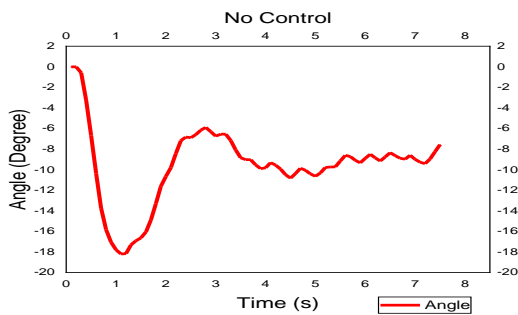
Gambar 11. menunjukkan Penambahan fuzzy logic control dilakukan sebelum input transducer 2 dan data yang masuk ke fuzzy logic control adalah output sudut yang terbaca pada sensor MPU 6050.

4.3 Pengambilan data dan analisa

Pengambilan data dan analisa dilakukan dengan cara mengambil hasil yang diperoleh dari Arduino UNO yang hasilnya diperoleh dari simulink yang sudah di rancang data yang didapat berupa masing-masing data dari pemodelan sistem kontrol yang telah dibuat yaitu grafik respon transien. Pada grafik respon gerak didapat nilai *Settle time*, *overshoot*, dan kestabilan sistem.

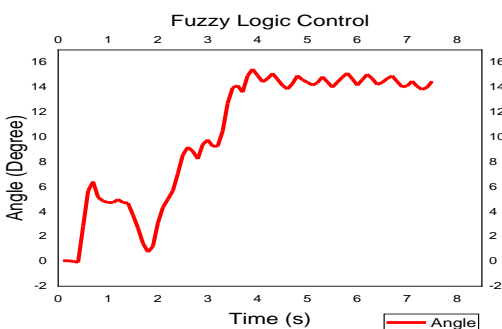


Gambar 12. Sinyal respon transient tanpa control kemiringan 15°

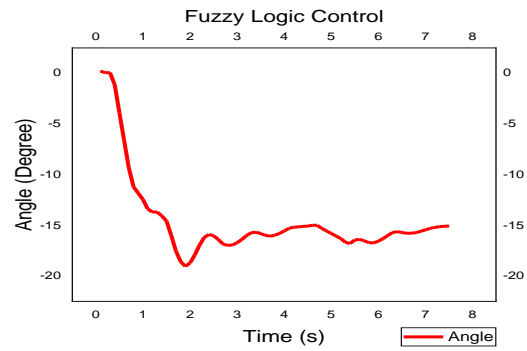


Gambar 13. Sinyal respon transient tanpa control kemiringan -15°

Gambar 12 dan gambar 13 menunjukkan bagaimana respon sinyal pada saat *segway* dimiringkan dengan kemiringan maksimal 15° ke depan dan -15° ke belakang. Disini diketahui kontrol tanpa fuzzy logic tidak ada kestabilan. Grafik diatas menunjukkan bahwa gerak motor DC sistem kontrol ini memiliki osilasi yang besar dan tidak stabil.



Gambar 14. Sinyal Respon Transient dengan Fuzzy Logic Control kemiringan 15°



Gambar 15. Sinyal Respon Transient dengan Fuzzy Logic Control kemiringan -15°

Diketahui dari tabel diatas hasil dari respon tanggapan sistem perancangan prototype *segway* dengan menggunakan *Fuzzy logic Control* dan tanpa kontrol.

5. Kesimpulan

Maximum Overshoot yang di dihasilkan oleh sistem kontrol ini yaitu pada kemiringan 15° sebesar 3 % dan pada kemiringan -15° sebesar 26.6% Error yang dihasilkan yaitu pada kemiringan 15° sebesar 4.7% dan pada kemiringan -15° sebesar 2.8% Lalu *Settle time* yang di dihasilkan yaitu pada kemiringan 15° sebesar 4 detik dan - 15° sebesar 2 detik.

Daftar Pustaka

- [1] Y. R. G. Shirsath, M. Holkar, and M. Amle, 2015, *Designing the Self – Balancing Platform (Segway)*, Int. J. Sci. Eng. Technol. Res. (IJSETR), vol. 4, no. 9, pp. 3033–3038.
- [2] R. A. Saputra, A. Rusdinar, D. Ph, and C. Ekaputri, 2007, *Pengendalian motor satu roda dengan pid - fuzzy control one wheeled motor with pid - fuzzy*, vol. 4, no. 2, pp. 1588–1595.
- [3] B. Messner, D. Tilbury, R. Hill, and J. D. Taylor, 2011, *Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Inverted Pendulum: System Modeling*, The University of Michigan.
- [4] B. Indra, E. Susanto, and C. Ekaputri, 2016, *Fuzzy Logic Controller Universitas Telkom Prototype of Two Wheels Self Balancing Vehicle Using Fuzzy Logic Controller*, vol. 3, no. 3, pp. 1–8.
- [5] R. Kumar, R. B. Singh, and J. Das, 2013, *Modeling and Simulation of Inverted Pendulum System Using Matlab: Overview*, Int. J. Mech. Prod.

Tabel 1. Hasil analisa data

No	Parameter	Sistem Kontrol tanpa fuzzy logic		Fuzzy Logic	
		15°	-15°	15°	-15°
1	Maximum overshoot (%)	21.3%	14.9%	3%	26.6%
2	Error (%)	37.86%	35.94%	4.7%	2.8%
3	Settle time (s)	Tidak tercapai	Tidak tercapai	4 detik	2 detik

Eng., no. 14, pp. 2320–2092.

- [6] S. Kwak and B.-J. Choi, 2015, *Design of Fuzzy Logic Control System for Segway Type Mobile Robots*, Int. J. Fuzzy Log. Intell. Syst., vol. 15, no. 2, pp. 126–131,.



Dadang Yuda Saputra menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana, pada tahun 2021, Bidang konsentrasi yang diminati adalah rekayasa manufaktur.

Topik yang diangkat dalam tugas akhir/ skripsi adalah perancangan robotika berupa segway dengan sistem kontrol fuzzy logic.

Perancangan Sistem Kontrol Pid Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink

Anak Agung Bagus Sutasoma, I wayan Widhiada, I Ketut Adi Atmika
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Segway merupakan alat transportasi bertenaga listrik yang ramah lingkungan, dapat digunakan dalam ruangan maupun luar ruangan, dikarenakan tidak adanya pembuangan gas yang berbahaya. Pada penelitian ini bagaimana menyederhanakan konsep robotika pada Segway dan mencoba bagaimana respon gerak statis Segway ketika diberikan kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative). Pada pengujian ini, dilakukan dengan aplikasi Matlab/Simulink pada prototype segway menggunakan sistem kontrol PID dengan waktu 15s pada sudut referensi 15° dan -15°. Berbagai parameter PID yang sudah ditrial-error pada percobaan gerak statis pada Segway. Didapatkan nilai terbaik yaitu $K_p = 10$ KP, $K_i = 40$ KI dan $K_d = 0$ KD. Data gerak yang didapatkan berupa nilai Overshoot, persentase error dan settle time. overshoot adalah peak tertinggi dari garis referensi, Error merupakan perbandingan antara input dan output, dan settle time merupakan waktu untuk mencapai steady state. Maka hasil yang didapat dari penggunaan kontrol PID yaitu overshoot senilai 37.43%, error 5.06%, dan untuk settle time 1.9s pada posisi 15°. Pada posisi -15° didapat overshoot senilai 11.95%, error 7.66% dan untuk settle time 4.6s.

Kata kunci: Prototype, Sistem Kontrol, Respon Gerak.

Abstract

Segway is an environmentally friendly electric powered transportation, can be used indoors or outdoors, because there is no exhaust of harmful gases. In this research, how to simplify the concept of robotics on the Segway and try how to respond to the static motion of the Segway when given PID (Proportional - Integral - Derivative) control. In this test, it was carried out with the Matlab / Simulink application on the segway prototype using a PID control system with a time of 15s at a reference angle of 15 ° and - 15 °. Various PID parameters that have been trial-error in static motion experiments on the Segway. The best values were obtained, namely $K_p = 10$ KP, $K_i = 40$ KI and $K_d = 0$ KD. The motion data obtained are in the form of overshoot value, error percentage and settle time. overshoot is the highest peak of the reference line, error is the ratio between input and output, and settle time is the time to reach steady state. Then the results obtained from using PID control are 37.43% overshoot, 5.06% error, and 1.9s settle time at 15 °. At position - 15 °, you get 11.95% overshoot, 7.66% error and 4.6s for settle time.

Keywords: Prototype, Control System, Motion Response

1. Pendahuluan

Transportasi adalah berpindahnya manusia atau barang dari suatu tempat ke tempat yang lainnya dengan menggunakan sebuah alat yang digerakkan oleh manusia atau mesin. Transportasi digunakan untuk memudahkan manusia dalam melakukan aktivitas dan mempersingkat waktu tempuh. Di beberapa negara maju, biasanya menggunakan kereta bawah tanah (subway) atau taksi. Penduduk di sana jarang yang mempunyai kendaraan pribadi karena mereka sebagian besar menggunakan angkutan umum sebagai transportasi mereka. Transportasi sendiri dibagi 3 yaitu, transportasi darat, laut, dan udara.

Beberapa negara maju sudah mengembangkan teknologi berupa alat/kendaraan yang diciptakan untuk mempersingkat waktu jarak tempuh yang diperlukan saat melakukan perpindahan dari satu tempat ke tempat lainnya. Salah satu contoh kendaraan tersebut adalah segway.

Segway merupakan kendaraan beroda dua bertenaga listrik yang memiliki stang sebagai

pegangannya. Segway dapat bergerak maju dan mundur sesuai dengan keinginan pengendara. Segway menerapkan sistem *inverted pendulum* dimana sistem memiliki bandul dan tongkat yang terpasang terbalik. Dengan mengacu dari sistem *inverted pendulum* maka Segway pun dapat seimbang [1]. Di Indonesia segway digunakan sebagai kendaraan bandara agar petugas bandara dapat lebih cepat berpindah karena luasnya bandara tersebut.

Segway merupakan transportasi yang dapat digunakan dalam ruangan maupun di luar ruangan karena menggunakan penggerak motor listrik sehingga tidak memiliki emisi gas buang yang berdampak buruk bagi lingkungan atau orang sekitar. Segway dapat mempertahankan posisi seimbang dan tetap dalam keadaan berdiri pada saat kendaraan diam tidak bergerak. Mikrokontroler pada Segway sebagai inti sistem kendali. Mikrokontroler digunakan untuk mengendalikan kecepatan putar motor. Tidak hanya didukung dengan mikrokontroler, sistem ini juga menggunakan PID (Proportional-Integral-

Derivative controller) sebagai pengendali yang dapat diatur sesuai dengan keinginan pengendara.

Perancangan ini diharapkan dengan penggunaan kontrol *PID*, mampu mengurangi *overshoot* yang terjadi dan mampu menghasilkan respon sistem yang lebih bagus. Jika *error* yang dihasilkan rendah, maka gerak Segway akan semakin bagus terlihat. Tujuan utama dari pengaplikasian sistem kontrol *PID* pada *segway* ini adalah untuk menguji pergerakan *Segway* agar dapat bergerak statis ke posisi *steady state* (seimbang) setelah diberikan gaya dari luar atau kemiringan sebesar 15° dan -15° dengan waktu seminim mungkin, melalui aplikasi *Matlab/Simulink*.

Dala hal ini didapatkan beberapa permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

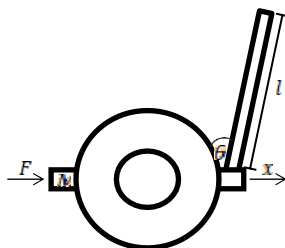
1. Bagaimana merancang sistem *PID* kontrol pada *segway* dengan *output error signal* (e) $\leq 5\%$ pada sistem?
2. Bagaimana merancang sistem *PID* kontrol pada *segway* dengan *maximum overshoot* (M_p) $\leq 5\%$ pada sistem?
3. Bagaimana merancang sistem *PID* kontrol pada *segway* dengan *output settling time* (T_s) secepatnya pada sistem?

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Pengendalian keseimbangan dengan menggunakan *PID Control*.
2. *Prototype* dapat digerakan dengan pengaplikasian *MATLAB*.
3. Dengan penggunaan sistem kontrol *PID Segway* dapat ke posisi *steady state* dengan posisi statis dan tanpa beban.

2. Dasar Teori

2.1 Pendulum Terbalik (*Inverted Pendulum*)



Gambar 1. *Inverted Pendulum Segway*

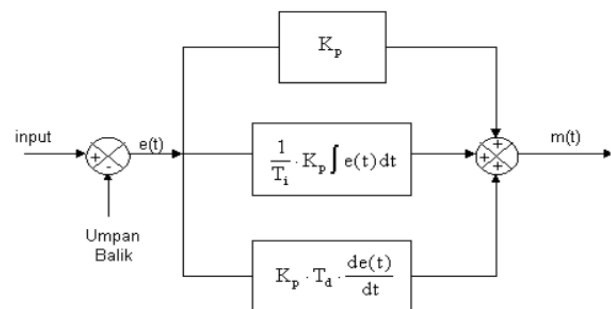
Keterangan :

- M : Massa Kereta.
 m : Massa Pendulum.
 b : Gesekan kereta.
 l : Panjang Pendulum pada pusat massa.
 I : Inersia Pendulum.
 F : Gaya yang diberikan pada kereta.
 x : Posisi koordinat kereta.
 θ : Sudut vertikal pendulum.

Prinsip kerja *Segway* diambil dari konsep pendulum terbalik. Pendulum terbalik (*inverted pendulum*) adalah pendulum yang terengsel pada kereta beroda yang bisa bergerak maju dan mundur pada bidang horizontal pada sepanjang lintasan [2]. Pendulum terbalik dasarnya hanya berupa batang stik berdiri yang akan jatuh akibat gaya tarik bumi jika tidak ada gaya luar lain yang mengimbangnya. Pendulum akan jatuh bisa kebagian kiri ataupun kanan. Dalam kehidupan nyata, pendulum terbalik ini dapat dilihat pengaplikasiannya dalam pengendalian posisi antenna radar dan pengendalian lengan robot yang bergerak. Kereta dengan pendulum terbalik, ditampilkan dibawah ini dengan gaya F. Persamaan gerak untuk dinamika sistem dan linearitas tentang sudut pendulum adalah $\theta = P$ i atau dengan kata lain, pendulum diasumsikan tidak bergerak lebih dari beberapa derajat dari sumbu vertikal yang berada pada sudut θ .

2.2 Sistem Kontrol *PID*

Keseimbangan *Segway* akan lebih bagus lagi jika menggunakan sistem kontrol. Sistem kontrol yang banyak digunakan pada *Segway* merupakan sistem kontrol *PID*. *PID* (*Proportional-Integral-Derivative controller*) merupakan kontroler yang menentukan presisi suatu sistem dengan cara melihat karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut (*Feed back*). Kecepatan sudut dari giroskop akan dikirim ke *PID* sebagai respons umpan balik dari sistem *loop* tertutup. Mengingat *segway* adalah sebuah sistem yang membutuhkan presisi tersebut maka penggunaan kontrol *PID* sangat dibutuhkan agar aksi yang dilakukan lebih presisi, sehingga *segway* dapat diminimalisir kecepatan dan arah yang dilakukan sesuai dengan error sudut *segway*.



Gambar 2. Blok diagram kontroler *PID*

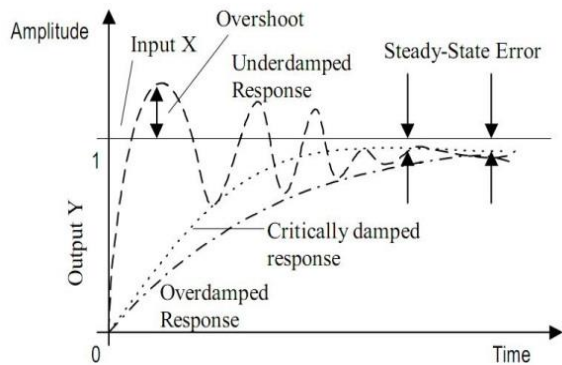
Bentuk persamaan dari kontrol *PID* dalam domain waktu:

$$K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) = u(t) \quad (1)$$

Karakteristik dari kontroler *PID* ini sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , K_i dan K_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat disetting lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

2.3 Respon Tanggapan Sistem

Dalam menganalisis tanggapan sistem, terdapat respon output orde I dan orde II yang dapat digunakan untuk pendekatan terhadap sistem. Dalam penelitian kali ini menggunakan orde II karena tolok ukur yang ada lebih kompleks dan respon sistem yang menjadi tolok ukur ialah domain waktu. Grafik sistem diamati dari mulai keadaan transien hingga mencapai tahap steady state.



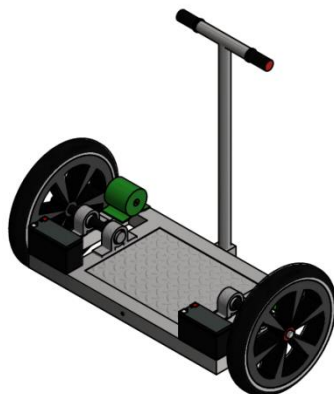
Gambar 3. Bentuk sinyal respon [].

Pada Gambar 3. merupakan bentuk kurva yang dihasilkan oleh aplikasi MATLAB®. Kurva yang dihasilkan sudah memuat otomatis nilai-nilai yang harus dicari seperti *maximum overshoot*, jumlah *error* yang dihasilkan, hingga *settling time* dari sistem.

3. Metode Penelitian

3.1 Deskripsi Penelitian

Metode penelitian ini merupakan metode eksperimental, dimana peneliti membuat visualisasi pemodelan dan menguji hipotesis sebab-akibat melalui pemanipulasian variabel bebas. Visualisasi pemodelan 3D *Segway* menggunakan aplikasi inventor dan pengujian gerak dengan sistem kontrol PID menggunakan *software* MATLAB.



Gambar 4. Pemodelan 3D *prototype Segway*

Variabel bebas berupa *input* sistem kontrol *PID* dan variabel terikat merupakan *output* berupa gerak *prototype*. Data yang didapat berupa grafik respon gerak statis pada *Segway*. Karena *Segway* dan teknologinya relatif baru, secara logis masih ada banyak ruang untuk dilakukan penyempurnaan.

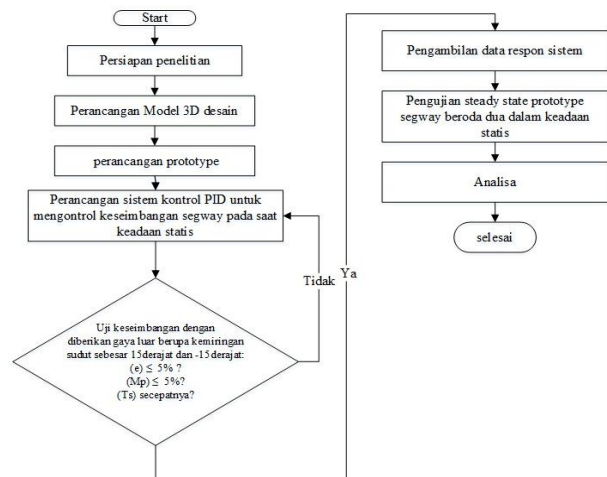
Prototype *Segway* menggunakan beberapa komponen berupa *Motor DC MY1016*, *Arduino UNO*, *BTS 7960 Motor driver*, *sensor MPU 6050* dan Aki *Panasonic 12V*. Prototype *Segway* dibuat dengan mengikuti struktur yang sama dengan *Segway* yang sudah ada. Motor DC yang telah dipasang dihubungkan dengan *BTS 7960 Motor driver* yang disambungkan pada *Arduino UNO* dan Aki. *Arduino UNO* berfungsi sebagai mikrokontroler untuk mengatur kecepatan putaran dari motor DC. *BTS 7960 Motor driver* digunakan agar motor DC dapat diatur layaknya motor servo. *Sensor MPU 6050* disambungkan pada *Arduino UNO* sebagai input. *Sensor MPU 6050* digunakan sebagai pembaca sudut kemiringan *prototype Segway*.

3.2 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur dari penelitian ini, sebagai berikut :

1. Perancangan model, menggunakan *software* Autodesk Inventor untuk mendesain visualisasi model 3D *Segway*.
2. Merancang sistem kontrol *PID* hingga mendapatkan *output* gerak yang diinginkan berupa parameter seperti *error*, *maximum overshoot*, *rise time* dan *steady state* sesuai pada kriteria penelitian ini.
3. Perancangan alat *Segway* dengan menggunakan bahan-bahan sesuai dengan kebutuhan dan desain yang telah dibuat.
4. Pengujian *Segway* serta menganalisa pergerakan yang telah didapat dari pengujian gerak.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

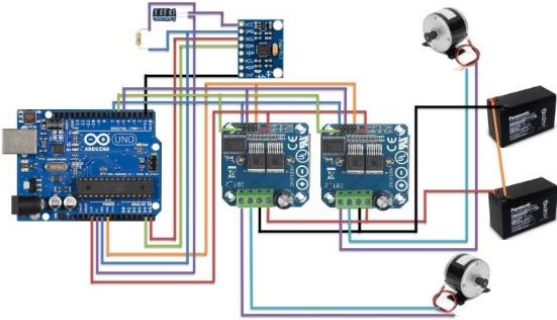
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pembuatan Prototype Segway

Dalam pembuatan *Prototype Segway* diawali dengan pembuatan desain 3D melalui aplikasi *Inventor*. kemudian dilakukan pengerjaan rangka *Segway* dan perakitan komponen kelistrikan. Setelah itu akan dilakukan program dengan aplikasi *MATLAB* terdapat fungsi *Tuning* kontroler untuk

menentukan parameter kontroler *PID* dengan tujuan agar sistem memenuhi kriteria performansi yang diinginkan, tetapi peneliti tidak menggunakan *tuning* dikarenakan hasil yang dikeluarkan tidak bagus untuk pergerakan *Segway*. Maka dari itu peneliti menggunakan *trial-error*.

4.2 Komponen Kelistrikan



Gambar 6. Rangkaian Kelistrikan

Gambar 6 merupakan Rangkaian yang digunakan agar *Segway* dapat bergerak sesuai dengan standar robotika dan tidak terjadi konsleting atau kesalahan saat gerakan.

4.3 Perancangan Elemen mesin

Perhitungan Torsi Motor *Segway* :

$$T = \frac{p \cdot 60}{2\pi n}$$

$$T = \frac{300 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 2650}$$

$$T = 1,08 \text{ Nm}$$

T = Torsi (Nm)

P = Daya motor (watt)

N = putaran motor (RPM)

Perhitungan daya maksimum motor *Segway* :

$$P = T \times \omega$$

$$P = 1,08 \times 277,5073$$

$$P = 299,707 \text{ watt}$$

P = Daya motor (watt)

T = Torsi (Nm)

ω = Putaran motor (Rad/s)

Putaran roda setelah di reduksi transmisi :

$$T_2 = T_1 \frac{n_1}{n_2}$$

$$68 = 11 \frac{2650}{n_2}$$

$n_2 = 429 \text{ Rpm}$

T_1 = Jumlah gigi kecil (T)

T_2 = jumlah gigi besar (T)

N_1 = Putaran motor sebelum di reduksi (RPM)

N_2 = Putaran motor sesudah di reduksi (RPM)

Lama waktu pemakaian :

$$T = \frac{I_a}{I_m}$$

$$T = \frac{7,5}{16,5}$$

T = 0.6 jam

T = lama pemakaian (Jam)

L_a = Arus (Ah)

L_m = Arus yang dibutuhkan motor (a)

Kecepatan putaran motor untuk seimbang :

$$\frac{Pwm}{Pwm \text{ max}} \times \frac{RPM}{\text{Perbandingan transmisi}} = \text{RPM}$$

$$\frac{40}{255} \times \frac{2650}{6,19} = 67,2 \text{ RPM}$$

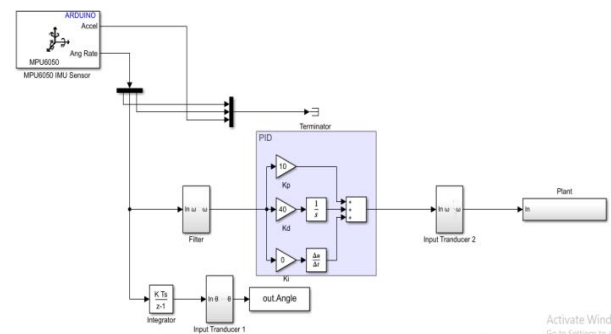
$$2 \times \pi \times Rpm = \text{Rad/s}$$

$$2 \times 3,14 \times 67,2 = \text{Rad/s}$$

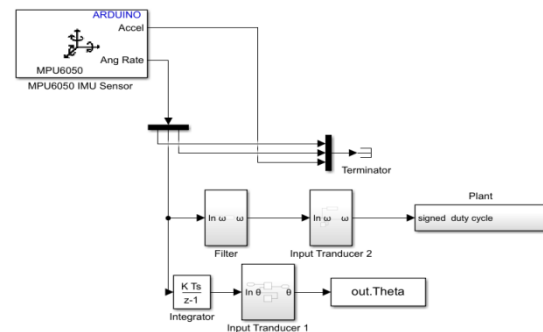
$$677,2 \text{ Rad/s}$$

4.4 Pemodelan Sistem Kontrol

Parameter yang didapatkan untuk sistem kontrol *PID* $K_p = 10$ KP, $K_i = 40$ KI dan $K_d = 0$ KD, Nilai parameter yang telah didapatkan diinput pada sistem kontrol aktual. Sebagai perbandingan respon gerak *Segway* dilakukan pengujian juga tanpa kontrol *PID*.



Gambar 7. Diagram blok menggunakan Kontrol PID



Gambar 8. Diagram blok sistem kontrol tanpa PID



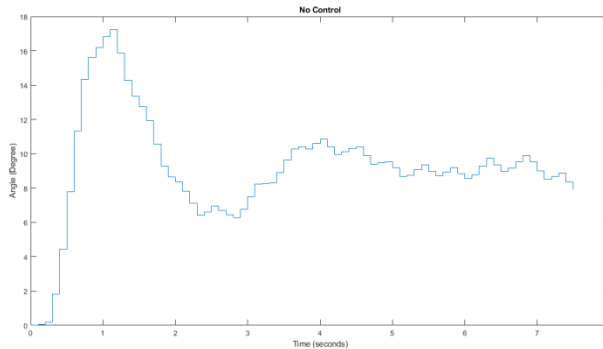
Gambar 9. Pemodelan Sudut Referensi *Prototype Segway*

Pengujian dan pengambilan data dilakukan dengan melakukan *interface* dengan Matlab/Simulink pada *prototype* dengan menggunakan sistem kontrol sederhana, PI, PD dan PID dengan waktu 15s pada sudut referensi 15° dan -15° . Hasil yang didapatkan

berupa respon gerak *prototype Segway* untuk mendapatkan parameter *error signal* dan *maximum overshoot* kurang dari 5% dan settle time secepat mungkin.

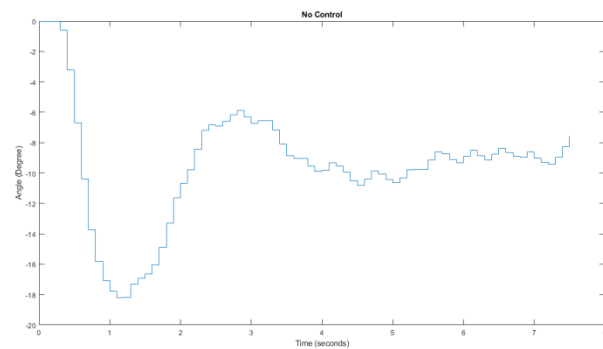
Pemodelan diagram blok yang sudah dibuat dalam aplikasi MATLAB didapatkan hasil pengujian berupa grafik dari sudut referensi yang sudah ditentukan.

4.4.1 Sistem Tanpa Kontrol PID



Gambar 10. Grafik Respon Gerak Sistem tanpa Kontrol 15 °

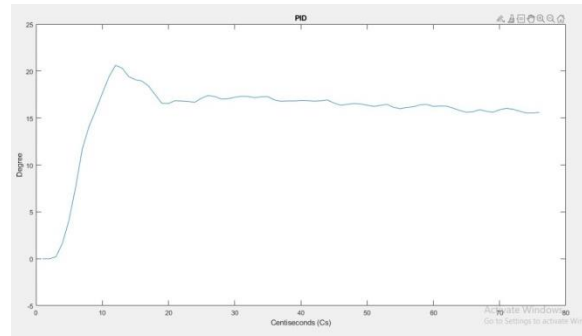
Pada Gambar 10. Menunjukkan respon gerak prototyper pada sudut uji 15°. Dapat dilihat pada grafik, gerak Segway tnpa kontrol memiliki osilasi yang besar dan tidak stabil. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya pengaturan gerak motor yang dapat menurunkan osilasi. Waktu yang dibutuhkan mencapai sudut uji adalah 1.2s dan max overshoot yang didapatkan senilai 14.93%. nilai error yang terjadi 4.04% sehingga performa prototype tidak bagus dan menghasilkan gerak yang tidak halus.



Gambar 11. Grafik Respon Gerak Sistem tanpa Kontrol -15 °

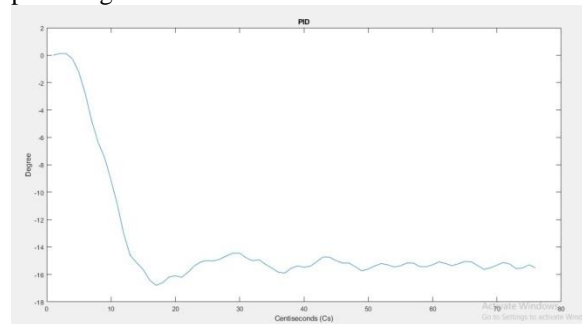
Pada Gambar 11. Menunjukkan respon gerak prototyper pada sudut uji -15°. Dapat dilihat pada grafik, gerak Segway tnpa kontrol memiliki osilasi yang besar dan tidak stabil. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya pengaturan gerak motor yang dapat menurunkan osilasi. Waktu yang dibutuhkan mencapai sudut uji adalah 1.1s dan max overshoot yang didapatkan senilai 26.1%. nilai error yang terjadi 4.95% sehingga performa prototype tidak bagus dan menghasilkan gerak yang tidak halus.

4.4.2 Sistem dengan Kontrol PID



Gambar 12. Grafik Gerak Respon Sistem kontrol PID 15 °

Pada Gambar 12 menunjukkan respon gerak *prototype* pada sudut referensi 0 ° ke sudut uji 15 °. Dapat dilihat pada grafik, gerak *Segway* dengan sistem kontrol *PID* masih memiliki *osilasi*, *Segway* tetap memiliki osilasi karena adanya *disturbance* yang mengganggu pergerakan *Segway*. tetapi respon gerak dengan kontrol *PID* jauh lebih stabil dibandingkan dengan yang tanpa kontrol. Karena fungsi kontrol *PID* yang dapat menghilangkan *error* dan mempercepat untuk mencapai *steady state*. Waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state* adalah 1.9s, dengan besar overshoot yang didapat 37.43% dan nilai *error* yang didapat dari perhitungan melalui Microsoft Excel adalah 5.06%.



Gambar 13. Grafik Gerak Respon Sistem kontrol PID -15 °

Pada Gambar 13 menunjukkan respon gerak *prototype* pada sudut referensi 0 ° ke sudut uji -15 °. Pada grafik, gerak *Segway* dengan sistem kontrol *PID* tetap memiliki *osilasi* karena gangguan dari *disturbance*. Tetapi dengan penggunaan sistem kontrol *PID*, *osilasi* yang besar dalam percobaan tanpa kontrol dapat berkurang, karena fungsi *PID* yang dapat memperbaiki respon gerak sistem. Waktu yang diperlukan untuk hampir mencapai sudut diinginkan adalah 4.6s, dengan nilai *maximum overshoot* yang didapat sebesar 11.95% dan nilai *error* yang didapat dari perhitungan melalui Microsoft Excel sebesar 7.66%.

Berdasarkan tabel 1, Gerak *prototype Segway* dengan sistem kontrol *PID* memiliki *Maximum Overshoot* yang lumayan tinggi diawal pergerakannya. Sedangkan *error* yang terjadi jauh menurun dibandingkan dengan tanpa kontrol. Gerak statis *prototype* lebih akurat dibandingkan dengan menggunakan sistem kontrol tanpa *PID*. Hal ini

disebabkan karena fungsi parameter K_p , K_i dan K_d yang saling berkaitan.

Tabel 1. Hasil Pengujian Perbandingan Tanpa PID dan dengan PID

No.	Parameter	Tanpa PID		PID	
		15°	-15°	15°	-15°
1.	Maximum Overshoot(%)	21.3%	14.9%	37.43%	11.95%
2.	Error(%)	37.86%	35.94%	5.06%	7.66%
3.	Settle time (s)	Tidak Tercapai	Tidak Tercapai	1.9 s	4.6 s

Parameter K_p yang berlaku sebagai penguat (gain) yang memberi pengaruh langsung. Parameter K_i berfungsi untuk memperbaiki *steady-state* sehingga grafik respon transien dengan sistem kontrol PID lebih baik. Parameter K_d berfungsi untuk mengatur kecepatan atau rate dari *error*, dimana umpan balik yang diberikan sebanding dengan kecepatan perubahan *error* terhadap waktu.

5. Kesimpulan

Dari Kesimpulan yang didapat, parameter yang didapat dari Segway berbasis Matlab/Simulink sebagai berikut.

- Parameter yang didapat dari sistem kontrol PID pada Segway adalah $K_p = 10$ KP, $K_i = 40$ KI dan $K_d = 0$ KD
- segway dengan sistem kontrol PID, pada kemiringan 15° didapat *Overshoot* 37.43%, sedangkan -15° didapat *Overshoot* 11.95%. *Error* dengan kemiringan 15° didapat 5.06% dan pada -15° 7.66%. Untuk *Settle time* dicapai dengan waktu 1.9 s pada kemiringan 15° sedangkan di -15° waktunya 4.6 s.
- Segway kontrol PID dapat bergerak statis kembali keposisi *steady state* (seimbang) dengan bantuan kontrol PID, dapat mengurangi *error* dan dapat mempercepat waktu menuju stabil. Tetapi overshoot yang dihasilkan masih terlalu tinggi, sehingga jika digunakan akan terjadi hentakan saat awal digerakkan. Butuh kontroler yang lebih baik agar tidak adanya disturbance. Penggunaan filter sebagai penyaring sinyal masuk pun juga berperan penting karena sinyal yang keluar dari sensor sangatlah sensitif sehingga penggunaan *highpass filter* dan *lowpas filter* sangatlah berpengaruh.

Adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian ini yaitu:

- Penggunaan kontrol PID sebenarnya cukup untuk prototype Segway, tetapi jika ingin mencari kenyamanan saat digunakan, disarankan agar menggunakan kontroler lainnya. Karena kontrol PID memiliki disturbance yang tidak dapat dihilangkan, maka hentakan akan tetap terjadi.

- Pemilihan komponen harus yang lebih bagus dan tahan lama, driver motor DC harus menggunakan driver motor yang bisa tahan dengan arus yang lebih tinggi.
- Osilasi tinggi dipengaruhi oleh getaran pada Segway yang besar sehingga sensor pun membaca getaran tersebut sebagai perubahan sudut. Hal tersebut juga terjadi dikarenakan *sensor MPU6050* yang sangat sensitif

Daftar Pustaka

- R. A. Saputra, A. Rusdinar, D. Ph, and C. Ekaputri, 2017, *Pengendalian Motor Satu Roda Dengan Pid - Fuzzy*, vol. 4, no. 2, pp. 1588–1595.
- Bimarta, Rizka, Agfianto Eko Putra, and Andi Dharmawan, 2015, *Balancing Robot Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral Derivatif*, Vol.5, No.1, pp.89–98.
- Rifai, Isnain Nur, Panji Saka, Gilab Asa, 2014, *Penerapan Algoritma Kendali Proporsional Integral Derivative Pada Sistem Real Time Untuk Mempelajari Tanggapan Transien*, Vol.6, No.1, pp.37–41, 2014.

	<p>Anak Agung Bagus Sutasoma Menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana tahun 2016, dan menyelesaikannya pada tahun 2021.</p>
<p>Bidang penelitian yang diangkat dalam tugas akhir/skripsi adalah perancangan robotika berupa Segway dengan sistem kontrol PID.</p>	

Perancangan Sistem Kontrol Hybrid Pada Segway Beroda Dua Berbasis Matlab/Simulink

I Made Mahatma Tantra Nagendra, I Wayan Widhiada, dan I Ketut Adi Atmika

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Segway adalah alat transportasi sederhana dengan sumber daya listrik sehingga lebih ramah lingkungan dan lebih hemat daya. Segway didesain sedemikian rupa untuk mempermudah mobilitas pada transportasi jarak dekat baik diluar ruangan maupun dalam ruangan. Sehingga prototype yang dirancang pada penelitian ini, dengan menggunakan teori *inverted pendulum* dan pemodelan sistem kontrol. Penelitian ini hanya sebatas menyeimbangkan *prototype* Segway secara statis dengan diberikan gaya luar berupa sudut referensi sebesar 15° dan -15° dengan menggunakan sistem kontrol hybrid. Dimana sistem kontrol hybrid adalah kombinasi antara sistem kontrol PID dan Fuzzy Logic yang dirancang menggunakan *software* matlab/Simulink. Dengan tujuan untuk mendapatkan *overshoot*, $error \leq 5\%$ dan *settling time* seminim mungkin.

Kata Kunci: Segway, Balancing robot, Control, Matlab

Abstract

Segway is simple transport equipment with electricity power source that is more environmentally friendly and more power efficient. Segway is designed in such a way as to facilitate mobility in short distance transportation both outdoors and indoors. So that the prototype designed in this study, using inverted pendulum theory and control system modeling. This research is only limited to balancing the Segway prototype statically with an external force in the form of a reference angle of 15° and -15° using a hybrid control system. Where the hybrid control system is a combination of PID control system and Fuzzy Logic which is designed using the matlab / Simulink software. In purpose of getting *overshoot*, error under 5% and minimal *settling time*.

Keywords: Segway, Balancing robot, Control, Matlab

1. Pendahuluan

Manusia modern zaman sekarang dapat dikatakan masih hidup secara berpindah tempat, namun dalam artian lain. Berpindah yang dimaksud adalah berpindah dari satu tempat menuju tempat lain seperti, merantau, melakukan aktifitas sehari-hari, atau melakukan sebuah perjalanan. Dalam melakukan sebuah perjalanan diperlukan sebuah media bernama transportasi.

Transportasi adalah berpindahnya manusia atau barang dari satu tempat ke tempat lainnya dengan menggunakan sebuah kendaraan yang digerakan manusia atau mesin. Kini transportasi telah dirancang dengan pengaplikasian sebuah kecerdasan buatan yang canggih. Salah satu contoh alat transportasi yang menggunakan kecerdasan buatan adalah *segway*.

Segway merupakan alat transportasi baru yang dikembangkan oleh manusia dan juga ramah lingkungan karena tanpa menggunakan bahan bakar sehingga dampak pemanasan global akibat kendaraan berbahan bakar [1]. *Segway* adalah pengembangan dari model pendulum terbalik (*inverted pendulum*) yang diletakan diatas sebuah kereta beroda. Komponen yang mendukung kecerdasan buatan tersebut adalah mikrokontroler yang berfungsi sebagai otak dari sistem kontrol. Mikrokontroler yang umum digunakan adalah Arduino, yang menawarkan berbagai jenis mikrokontroler sesuai dengan kebutuhan. Dengan

mengadopsi mikrokontroler dan model *inverted pendulum*, kendaraan ini mampu melintasi suatu medan dengan beban secara seimbang [2].

Untuk menyeimbangkan *segway* dapat diatur dengan implementasi kontrol atau alat untuk memerintah, mengendalikan, dan mengatur keadaan dari suatu sistem agar gerak lebih optimal. Ada beberapa macam aksi kontrol. Diantaranya PID Control atau Proporsional, Integral, Derivatif kontrol. Dimana masing-masing kontrol tersebut memiliki keunggulan. Lalu pengembangan teknologi untuk mendapatkan suatu hasil yang diinginkan dengan menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengendalikan sesuatu, yaitu dalam bentuk aturan berupa *If – Then Rules* (Jika – maka). Sehingga proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik. Sistem ini disebut dengan sistem kendali logika fuzzy [3].

Pemakaian kontrol PID masih dianggap kurang memuaskan karena jika menggunakan aksi kendali PID didapatkan jika suatu kontroler di set sangat sensitif, maka *overshot/undershot* yang dihasilkan akan semakin peka. Sehingga osilasi yang ditimbulkan akan semakin tinggi. Apabila sebaliknya, maka waktu yang dibutuhkan akan semakin lama [3]. Maka dari itu penelitian ini akan mencoba menggabungkan sistem kontrol PID dan logika fuzzy atau yang bisa disebut sistem kontrol *Hybrid*.

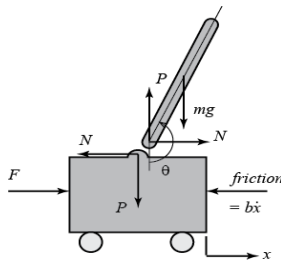
Dalam penelitian ini, sistem kendali utama adalah logika *fuzzy* yang berfungsi untuk meminimalkan *recovery time* dari respon sistem sedangkan kontrol PID bekerja untuk meminimalkan *overshot/undershot* yang terjadi. Dari desain sistem kontrol *hybrid* antara logika *fuzzy* dengan kontrol PID ini hanya diuji pada gerak statis yang diharapkan sistem kendali dapat menghasilkan respon sistem yang lebih baik. Tujuan utama dari pengaplikasian sistem kontrol pada *segway* ini adalah untuk menguji alat agar bergerak ke posisi *steady state* (seimbang) setelah diberikan gaya dari luar atau sudut kemiringan waktu seminim mungkin. Sudut kemiringan tersebut dibatasi sebesar 15° kearah depan dan -15° kearah belakang karena rangka dari prototype *Segway* sudah menyentuh permukaan tanah saat diberikan gaya luar.

2. Dasar Teori

2.1. Inverted Pendulum

Inverted pendulum atau pendulum terbalik adalah pendulum yang mempunyai titik berat diatas titik tumpunya. Dimana tumpuan berupa kereta beroda yang bergerak maju dan mundur pada bidang horizontal [4].

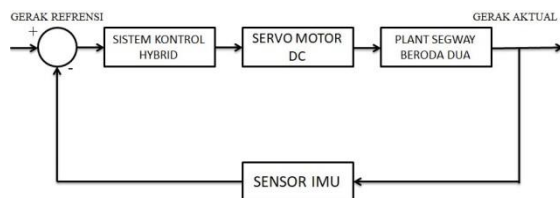
Sistem dalam contoh ini terdiri dari pendulum terbalik yang dipasang pada kereta (*Cart*) bermotor. Sistem ini diketahui tidak stabil tanpa kontrol jadi, Tujuan dari sistem kontrol adalah untuk menyeimbangkan pendulum terbalik dengan menerapkan gaya pada gerobak tempat pendulum terpasang [5].



Gambar 1. Prinsip *Segway* beroda dua

2.2. Sistem Kontrol

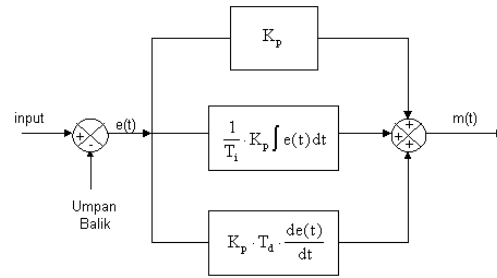
Sistem kontrol merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk mengendalikan sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses.



Gambar 2. Sistem kontrol

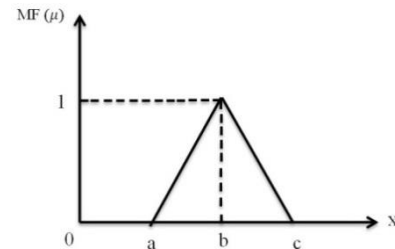
Penggunaan Sistem kontrol PID kebanyakan dilakukan dengan metode coba-coba atau *trial & error*. Karena parameter K_p , T_i , dan T_d tidak *independent*. Elemen-elemen controller P, I dan D

masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar [6].



Gambar 3. Blok Diagram PID

Logika *fuzzy* merupakan sebuah logika yang memiliki derajat keanggotaan diantara 0 dan 1. Dengan demikian, variabel dalam logika *fuzzy* dideskripsikan dalam bentuk himpunan *fuzzy*. bentuk himpunan *fuzzy*, diantaranya dalam bentuk segitiga, trapezoidal, Gaussian, Gaussian-bell dan sigmoid [7].

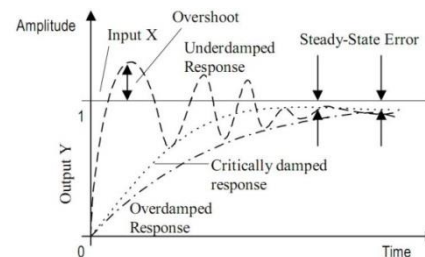


Gambar 4. Himpunan Fuzzy Segitiga

Pada penelitian ini, kontroler yang digunakan adalah gabungan antara kontrol PID dengan logika *fuzzy* atau *Hybrid*. Kombinasi kontrol ini akan menunjukkan seberapa baik kontrol dalam memperoleh sinyal, meminimal *error steady state*, *settling time*, dan *maximum overshoot* dibanding menggunakan salah satu dari kontrol [3].

2.3 Respon Tanggap Sistem

Setelah membuat sistem kontrol yang sesuai, untuk mengetahui nilai *output* yang dihasilkan oleh sistem yang akan di operasikan dengan analisis tanggapan dari suatu sistem. Respon sistem yang diamati mulai saat terjadinya perubahan sinyal input/gangguan/beban sampai respon masuk dalam keadaan *steady state*.



Gambar 5. Bentuk sinyal Respon Transien Respon *steady state* adalah respon sistem yang diamati mulai saat respon masuk dalam keadaan *steady state* sampai waktu tak terbatas.

3. Metode penelitian

Adapun alat dan bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1. Alat dan Bahan

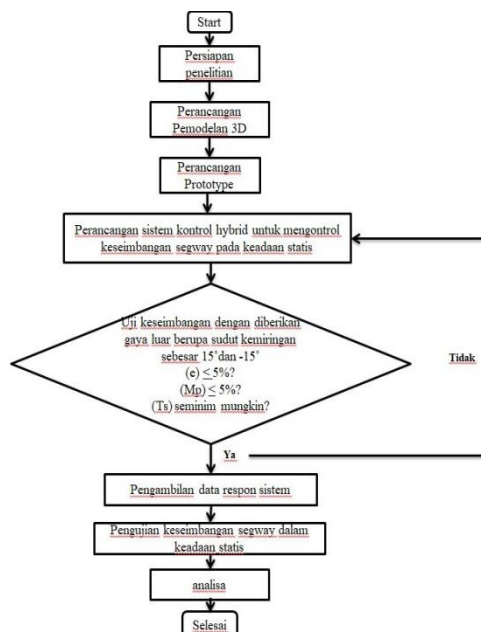
1. Komputer atau Laptop.
2. Besi hollow
3. DC Motor MY1016
4. Mikrokontroler Arduino UNO
5. Sensor MPU 6050
6. Motor Driver BTS7960
7. Aki

3.2. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan sebagai berikut.

1. Mendesign model prototype dengan menggunakan komputer/laptop pada *software* Autodesk Inventor dengan *student lisence*.
2. Membuat pemodelan sistem kontrol menggunakan *software* matlab/simulink.
3. Pemodelan dibuat menjadi 2 bagian yaitu pemodelan sederhana, dan dengan menggunakan sistem kontrol hybrid.
4. Mengatur fungsi pada sistem kontrol hybrid sehingga menghasilkan output sinyal.
5. Output sinyal dianalisa untuk mengetahui seberapa mampu sistem kontrol untuk meminimalisir *overshoot*, *error*, dan *settle time*.
6. Merancang dan menguji prototype Segway.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 6. Diagram alir penelitian

3.3. Analisa Data

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental, dimana peneliti menguji hipotesis sebab-akibat

melalui pemanipulasian variabel bebas. Variabel bebas merupakan *input* dari sistem kontrol *Hybrid* dan variabel terikat merupakan *output* berupa gerak actual *prototype*. Data yang di dapat berupa grafik respon transien gerak sistem *Segway* beroda dua dan dibuat pembahasan dari data sehingga di dapat kesimpulan dari penelitian ini.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Pembuatan Prototype Segway

Setelah mendesign prototype Segway, terdapat 2 langkah yang perlu dilakukan yaitu pembuatan rangka dan pemasangan komponen kelistrikan.



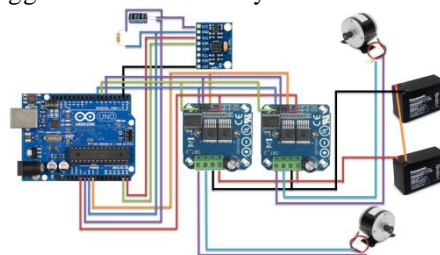
Gambar 7. Design Prototype Segway

4.1.2. Pembuatan Rangka Prototype

Pembuatan rangka mengikuti ukuran sesuai dengan design 3D. adapun penggunaan peralatan tambahan seperti bor, gerinda, penggaris, dll dengan tujuan mempermudah dalam pembuatan rangka.

4.1.3. Pemasangan Komponen Kelistrikan

Rangkaian kelistrikan *prototype Segway* dibuat untuk menyambungkan komponen-komponen agar Segway mampu bergerak menggunakan sumber daya listrik.



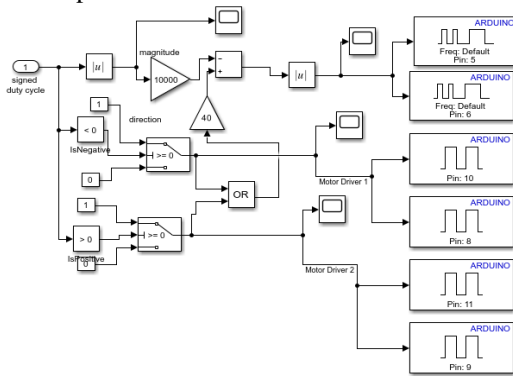
Gambar 8. Rangkaian kelistrikan

4.2. Pemodelan Sistem Kontrol

Setelah tahapan pembuatan prototype Segway selesai, tahap berikutnya adalah dibuatkan pemodelan dari sistem kontrol untuk mikrokontroler.

Gambar dibawah menunjukkan sinyal input yang masuk kedalam plant logic, sinyal disini merupakan sinyal keluaran dari input referensi yang berupa sudut. jika sinyal nilainya positif maka motor akan bergerak kearah negatif begitu juga sebaliknya jika

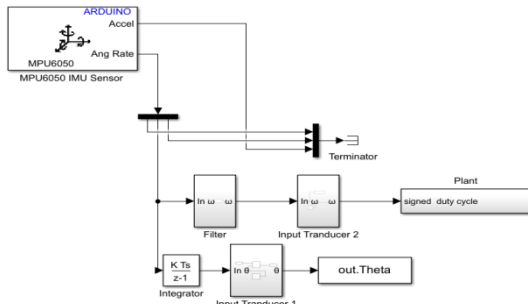
nilai sudut negatif maka motor akan bergerak kearah positif.



Gambar 9. Diagram blok gabungan antara Plant Logic dan PWM Logic

4.3. Sistem Kontrol Sederhana

Pemodelan sistem kontrol sederhana dibuat sebagai referensi perbandingan antara pemodelan sistem dengan ditambahkan sistem kontrol *hybrid*.



Gambar 10. Diagram blok Simulink sederhana tanpa kontrol

Sinyal dari sensor MPU 6050 merupakan sinyal input yang akan masuk ke filter dimana fungsinya untuk menstabilkan sinyal input dari MPU 6050 dengan menyaring frekuensi sinyal yang terlalu tinggi dan rendah dengan menggunakan low dan high pass menjadi sinyal yang dibutuhkan plant.

4.4. Pemodelan Sistem Kontrol Fuzzy

Putaran motor DC akan diatur dengan sinyal digital yang diterima arduino dari sudut yang terbaca pada sensor MPU6050. Dengan mengikuti parameter sebagai berikut:

Parameter Input :	Membership Function:
Range=[-20 20] 'CW_Besar':trimf,[-180-15-10] 'CW_Sedang':trimf,[-15-10-5] 'CW_Kecil':trimf,[-0.5 0 0.5] 'Seimbang':trimf,[-10-5 0] 'CCW_Kecil':trimf,[0 5 10] 'CCW_Sedang':trimf,[5 10 15] 'CCW_Besar':trimf,[10 15 180]	Range=[-20 20] 'CW_Besar':trimf,[-180-15-10] 'CW_Sedang':trimf,[-15-10-5] 'CW_Kecil':trimf,[-10-5 0] 'Seimbang':trimf,[-2.5 0 2.5] 'CCW_Kecil':trimf,[0 5 10] 'CCW_Sedang':trimf,[5 10 15] 'CCW_Besar':trimf,[10 15 180]
Parameter Output :	
Range=[-20 20] 'CW_Besar':trimf,[-180-15-10] 'CW_Sedang':trimf,[-15-10-5] 'CW_Kecil':trimf,[-10-5 0] 'Seimbang':trimf,[-2.5 0 2.5] 'CCW_Kecil':trimf,[0 5 10] 'CCW_Sedang':trimf,[5 10 15] 'CCW_Besar':trimf,[10 15 180]	CW_Besar CW_Sedang CW_Kecil Seimbang CCW_Kecil CCW_Sedang CCW_Besar

Gambar 11. Parameter yang digunakan pada fuzzy logic

Adapun Rule/Aturan yang digunakan:

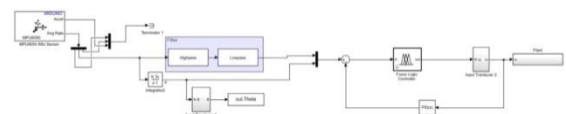
1. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CW_Besar) (1)
2. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CW_Besar) (1)
3. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
4. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
5. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
6. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
7. If (Angle is CW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
8. If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
9. If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Sedang) (1)
10. If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
11. If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
12. If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
13. If (Angle is CW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
14. If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
15. If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is CW_Kecil) (1)
16. If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
17. If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
18. If (Angle is CW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
19. If (Angle is Seimbang) and (Rate_of_Angle is Seimbang) then (Rate_Of_Angle is Seimbang) (1)
20. If (Angle is Seimbang) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
21. If (Angle is Seimbang) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
22. If (Angle is Seimbang) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
23. If (Angle is CCW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Kecil) then (Rate_Of_Angle is CCW_Kecil) (1)
24. If (Angle is CCW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
25. If (Angle is CCW_Kecil) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
26. If (Angle is CCW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Sedang) then (Rate_Of_Angle is CCW_Sedang) (1)
27. If (Angle is CCW_Sedang) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Besar) (1)
28. If (Angle is CCW_Besar) and (Rate_of_Angle is CCW_Besar) then (Rate_Of_Angle is CCW_Besar) (1)
26. If (Angle is PM) and (Rate_of_Angle is PM) then (Angle is PM) (1)

Gambar 12. Rule/Aturan fuzzy logic.

4.5. Pemodelan Sistem Kontrol PID

Sistem kontrol PID dibuat dengan menentukan nilai Kp, Kd, dan Ki dengan cara melakukan *trial-error* pada *simulink*. Setelah melakukan *trial-error* beberapa kali, parameter yang didapat antara lain Kp = 2, Ki = 0 dan Kd = 0. Nilai parameter yang telah didapatkan diinput pada sistem kontrol.

4.6. Pemodelan Sistem Kontrol Hybrid



Gambar 13. Diagram Blok menggunakan Sistem Kontrol Hybrid

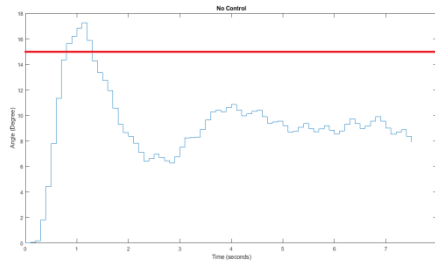
Pemodelan sistem kontrol *hybrid* dibuat dengan menggabungkan sistem kontrol *Fuzzy* dan PID yang telah dibuat, sehingga mendapatkan Skema blok diagram Sebagai berikut.

4.7. Pengambilan Data dan Analisa

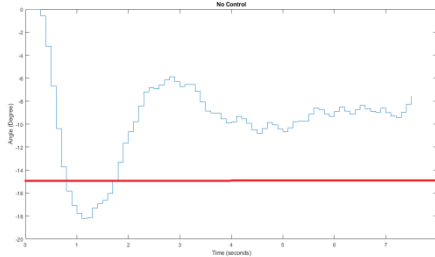
Pengambilan data dan analisa dilakukan dengan cara mengimplementasikan pemodelan kontrol sederhana dan *hybrid* pada Arduino UNO.

Pertama, pengujian dilakukan dengan mengambil data pada sistem kontrol sederhana. Pemodelan dilakukan *running*

pada *software* sehingga didapatkan grafik respon transien sebagai berikut.

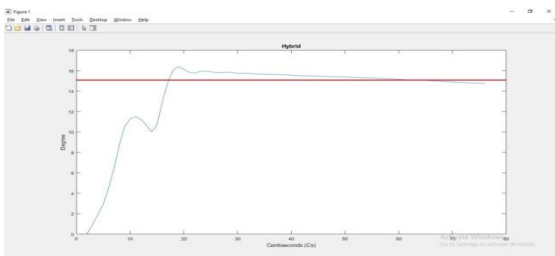


Gambar 14. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan 15°



Gambar 15. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan -15°

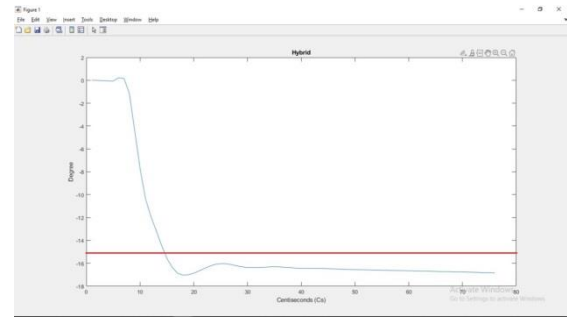
Grafik diatas menunjukkan bagaimana respon sinyal terhadap *prototype* dengan diberikan gaya luar berupa kemiringan sudut maksimal 15° ke depan dan -15° ke belakang. diketahui bahwa respon sinyal pada sistem kontrol mencapai *peak overshoot* yang tinggi melewati garis referensi (garis merah) dan memiliki osilasi yang besar dengan keadaan tidak stabil yang menyebabkan tidak mendapat *settle time* karena tidak mencapai posisi *steady state*. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya pengatur gerakan motor atau kontrol yang dapat menurunkan osilasi, sehingga gerakan *Segway* tidak stabil. Osilasi besar diakibatkan karena sinyal yang dihasilkan oleh sensor sangatlah sensitif sehingga sensor memberikan banyak data.



Gambar 16. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan 15°

Pengujian selanjutnya menggunakan sistem kontrol *hybrid*. Pemodelan Sistem yang sudah dibuat dilakukan running

sehingga mendapatkan grafik transien respon sebagai berikut.



Gambar 17. Grafik Respon Sinyal dengan sudut kemiringan -15°

Grafik respon sinyal diatas menunjukkan bahwa sinyal masuk pada sistem kontrol *hybrid* mengalami ketidak normalan. Dimana sinyal masuk mengalami penurunan setelah mencapai posisi *steady state* yang berbeda dari keadaan riil nya ketika diberikan gaya dari luar berupa kemiringan sudut sebesar 15°

Beginitupun pada sudut -15° mengalami ketidak normalan juga. Dimana sinyal respon mencapai posisi *steady state* diatas garis referensi. Walaupun demikian dibandingkan dengan kontrol sederhana, kontrol *hybrid* mencapai *peak overshoot* yang lebih rendah dibandingkan kontrol sederhana. Serta osilasi yang lebih rendah dan tercapainya *settle time* untuk mencapai posisi *steady state*.

Tabel 1. Tabel Data Pengujian

time	tanpa control		hybrid	
	15	-15	15	-15
0	0	0	0	0
0.1	0.03328	-0.0015	-0.03904	-0.01373
0.2	0.17666	-0.0037	0.163048	-0.03983
0.3	1.79184	-0.5852	3.157616	-0.05699
0.4	4.43442	-3.2267	5.635483	-0.07004
0.5	7.79206	-6.693	9.011261	0.2211
0.6	11.3472	-10.382	11.51439	0.163422
0.7	14.3391	-13.739	13.28725	-1.10756
0.8	15.6306	-15.838	13.24591	-4.39728
0.9	16.2008	-17.056	13.17702	-7.69249
1	16.8346	-17.794	13.11042	-10.3409
1.1	17.2436	-18.206	13.08286	-11.8865
1.2	15.8731	-18.169	13.06908	-13.1396
1.3	14.2897	-17.315	13.04153	-14.4209
1.4	13.3387	-16.921	13.00249	-15.5704
1.5	12.7272	-16.631	14.53192	-16.3799
1.6	11.9529	-16.053	17.09476	-16.875
1.7	10.5546	-14.895	17.08098	-17.0357
1.8	9.27557	-13.291	17.09246	-17.0075
1.9	8.63549	-11.619	17.05342	-16.8674
2	8.3641	-10.664	17.02816	-16.6656
2.1	7.81364	-9.7997	16.99831	-16.4465
2.2	7.10846	-8.438	16.9386	-16.2515
2.3	6.41792	-7.182	16.89956	-16.1018
2.4	6.59604	-6.832	16.85593	-16.0352
2.5	6.95741	-6.8949	16.8054	-16.0428
2.6	6.70065	-6.5964	16.75488	-16.1204
2.7	6.45596	-6.1634	16.69977	-16.2275
2.8	6.28259	-5.8909	16.6148	-16.3147
2.9	6.76648	-6.3023	16.60102	-16.3689
3	7.48848	-6.7456	16.58495	-16.3847
3.1	8.24048	-6.5565	16.52524	-16.3689
3.2	8.26754	-6.5485	16.47931	-16.3504
3.3	8.28144	-7.1641	16.44486	-16.3209
3.4	8.91895	-8.0759	16.40582	-16.3092
3.5	9.63876	-8.8506	16.36449	-16.3202
3.6	10.284	-9.0312	16.291	-16.3552
3.7	10.4087	-9.0323	16.29559	-16.3889
3.8	10.2726	-9.5378	16.26115	-16.4239
3.9	10.5981	-9.905	16.21751	-16.4424
4	10.8487	-9.8286	16.18996	-16.4438
4.1	10.3966	-9.3246	16.10958	-16.4438
4.2	9.96319	-9.5543	16.07284	-16.4465

4.3	10.1303	-9.9442	16.00854	-16.4561
4.4	10.3077	-10.49	15.9649	-16.474
4.5	10.4014	-10.827	15.93964	-16.4898
4.6	9.90576	-10.379	15.88683	-16.5104
4.7	9.37139	-9.867	15.84549	-16.5303
4.8	9.48953	-10.066	15.82712	-16.5468
4.9	9.55135	-10.411	15.76282	-16.5557
5	9.18266	-10.651	15.74215	-16.5646
5.1	8.67317	-10.322	15.7077	-16.5729
5.2	8.74998	-9.7916	15.65029	-16.5873
5.3	9.06782	-9.7404	15.59747	-16.5983
5.4	9.3436	-9.7364	15.54695	-16.6113
5.5	8.98369	-9.1534	15.53777	-16.6257
5.6	8.70974	-8.6081	15.49413	-16.6374
5.7	8.94968	-8.7302	15.41605	-16.6422
5.8	9.18815	-9.096	15.37472	-16.6477
5.9	8.84288	-9.3399	15.31731	-16.6566
6	8.55869	-8.8988	15.28056	-16.6615
6.1	8.77412	-8.5027	15.25301	-16.6862
6.2	9.30007	-8.8564	15.18641	-16.6992
6.3	9.73715	-9.16	15.15426	-16.7054
6.4	9.34799	-8.7683	15.15885	-16.7164
6.5	8.97784	-8.3517	15.10374	-16.7287
6.6	9.14975	-8.6443	15.0647	-16.7315
6.7	9.54659	-8.897	15.06929	-16.7329
6.8	9.88565	-8.9852	15.01418	-16.7535
6.9	9.54988	-8.6026	14.97743	-16.7693
7	8.99723	-9.0016	14.9338	-16.7802
7.1	8.50858	-9.2789	14.89017	-16.7919
7.2	8.67573	-9.4244	14.88787	-16.7974
7.3	8.86299	-8.9639	14.85802	-16.8214
7.4	8.37617	-8.2566	14.81438	-16.8317
7.5	7.9241	-7.5686	14.77764	-16.8496

Dari pengujian gerak *prototype* yang didapat pada hasil diatas, disimpulkan beberapa data melalui tabel berikut.

Tabel 2. Hasil dan Analisa

No	Parameter	Simple Control System		Hybrid	
		15°	-15°	15°	-15°
1	Maximum overshoot (%)	21.3%	14.9%	9.17%	13.5%
2	Error (%)	37.86%	35.94%	7.7%	3.3%
3	Settle time (s)	Tidak Tercapai	Tidak Tercapai	2 dtk	3 dtk

Berdasarkan tabel 2, ditunjukkan hasil dengan 4 pengujian yaitu pengujian *segway* sistem kontrol sederhana, pengujian *Segway* dengan ditambahkan sistem kontrol *hybrid*. didapat maksimum *overshoot* sebesar 21.3% dan 14.9%, *error* sebesar 37.86% dan 35.94% dan tidak mencapai *settle time* di kedua sudut kemiringan selama pengujian berlangsung. Sedangkan dengan kontrol *hybrid* pada kemiringan sudut 15° dan -15°, didapat *overshoot* sebesar 9.17% dan 13.5%, *error* sebesar 7.7% dan 3.3%, dan *settle time* pada masing – masing pengujian sebesar 2 detik dan 3 detik.

5. Kesimpulan

Penggunaan sistem kontrol *hybrid* belum mampu meminimalisir *overshoot* dan *error* $\leq 5\%$ pada sistem, akan tetapi telah mencapai *settle time* seminim mungkin. Dibandingkan dengan sistem kontrol sederhana, kontrol *hybrid* dapat mengurangi maksimum *overshoot*, *error* pada sistem, osilasi selama waktu pengujian dan *settle time* untuk mencapai posisi *steady state*.

- [1] S. Rafiuddin, 2015, *Rancang bangun self balancing motor sebagai moda transportasi*, Jurnal Mekanikal, Vol. 6 No. 1: Januari 2015: 522-531
- [2] Fahmizal., G. Setyawan, M. Arrofiq, A. Mayub. 2017, *Logika fuzzy pada robot inverted pendulum beroda dua*, Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIIK), Vol. 4, No. 4, pp. 247-252
- [3] H. S. Bachri M., 2004, *Sistem kendali hybrid PID-logika fuzzy pada pengaturan kecepatan motor DC*, Makara, Teknologi, Vol. 8, No. 1, pp. 25-34
- [4] R. Bimarta, A. Eko Putra., A. Dharmawan, 2015, *Balancing robot menggunakan metode kendali proporsional integral derivatif*, IJEIS, Vol. 5, No. 1, pp. 89-98.
- [5] B. Messner, D. Tilbury, R. Hill, and J. Taylor, 2011, *Control Tutorials for Matlab and Simulink – Inverted Pendulum : System Modeling*, University of Michigan.
- [6] Gunterus, Frans. 1994, *Falsafah Dasar : Sistem Pengendalian Dasar*, Jakarta: PT Elex Media Komputindo, Jakarta.
- [7] F. Wahab, A. Sumardiono, A. R. A. Tahtawi, A. F. A. Mulyari, 2017, *Desain dan purwarupa fuzzy logic control untuk pengendalian suhu ruangan*, Jurnal Teknologi Rekayasa. Vol. 2, No. 1, pp. 1-8.



I Made Mahatma Tantra Nagendra menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana, pada tahun 2021, Bidang konsentrasi yang diminati adalah rekayasa manufaktur.

Topik yang diangkat dalam tugas akhir/ skripsi berupa perancangan robotika berupa Segway dengan sistem kontrol hybrid.

Pengaruh Orientasi Sudut Anyaman Serat Terhadap Kekuatan Tarik Komposit Poliester Diperkuat Serat Basal

Muhamad Arsyi Alfatin, Ngakan Putu Gede Suardana,
I Gede Putu Agus Suryawan

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Banyak dilakukan penelitian untuk menciptakan komposit dengan bahan yang berasal dari alam, sehingga tidak memberikan dampak negatif pada lingkungan. Seperti contohnya serat basal yang ramah lingkungan, yang membuat penggunaannya sangat menarik. Secara orientasi sudut jika menggunakan dua arah maka secara longitudinal akan kuat pada arah tersebut, namun kekuatan yang berbeda akan dihasilkan jika ditarik kearah lain yang cenderung lebih lemah. dalam kata lain tidak kuat secara transversal. Maka dari itu, peneliti memvariasikan anyaman serat basal untuk membuat komposit diperkuat serat basal dengan orientasi sudut anyaman 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° , 90° ; dan spesimen dipotong ke arah sudut 0° , 10° , 30° , 45° , 50° , 60° . Kemudian dilakukan pengujian komposit tersebut dengan uji tarik. Uji ini perlu dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik spesimen yang telah dibuat. Tujuan daripada penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana sifat kekuatan tarik dari pada spesimen yang telah dibuat dan struktur perpatahan serat. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa spesimen dengan sudut potong 0° memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan spesimen lainnya yang telah dibuat. Kekuatan tariknya mencapai 180,922MPa, dengan pertambahan panjang 4,055%, dan modulus elastisitasnya sebesar 4,552GPa. Sedangkan kekuatan yang paling lemah dialami oleh spesimen dengan sudut potong 45° dengan kekuatan tarik 126,531MPa, pertambahan panjang 3,417%, dan modulus elastisitasnya sebesar 3,89GPa.

Kata Kunci: Arah Serat, Komposit, Serat Basal, Uji Tarik

Abstract

Many researchers have been done to create composites with materials of natural origin, so as not to have a negative impact on the environment. For example, basalt fiber is environmentally friendly, which makes its use very attractive. In terms of angular orientation, if you use two directions, it will be longitudinally strong in that direction, but a different strength will be generated if it is pulled in another direction which tends to be weaker. in other words, it is not transversely strong. Therefore, the researchers varied the basalt webbing to make basalt fiber reinforced composites with a woven angle orientation of 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° , 90° ; and the specimens were cut at an angle of 0° , 10° , 30° , 45° , 50° , 60° . Then the composite testing was carried out with a tensile test. This test needs to be done to determine the tensile strength of the specimens that have been made. This study aims to determine the properties of the tensile strength of the specimens that have been made and the fiber fracture structure. The results of the test show that the specimen with a cut angle of 0° has a very high tensile strength when compared to other specimens that have been made. The tensile strength reaches 180,922MPa, with a length increase of 4.055%, and the modulus of elasticity is 4.552GPa. While the weakest strength was experienced by specimens with a cutting angle of 45° with a tensile strength of 126.531MPa, an increase in length of 3.417%, and a modulus of elasticity of 3.89GPa.

Keywords: Direction of fiber, Composite, Basalt Fiber, Impact Test

1. Pendahuluan

Komposit terjadi di alam, misalnya kayu yang terdiri dari selat selulosa bercampur dengan lignin, atau tulang manusia adalah campuran kolagen organik, kristal non-organik, dan bahan lainnya [1].

Banyak dilakukan penelitian untuk menciptakan komposit dengan bahan yang berasal dari alam, sehingga tidak memberikan dampak negative pada lingkungan. Seperti contohnya serat basal ramah lingkungan, yang membuat penggunaannya sangat menarik. Tidak seperti serat kaca, serat basal tidak membutuhkan bahan aditif dalam

produksinya. Saat ini teknologi untuk memproduksi serat basal sangat mirip dengan yang digunakan dalam produksi serat kaca. Perbedaan utama antara serat basal dan serat kaca adalah bahan baku yang digunakan. Serat kaca diproduksi dari berbagai komponen, sedangkan serat basal dibuat dengan batuan basal tanpa bahan tambahan lain. Penggantian serat kaca dengan serat basal dapat mengurangi resiko pencemaran lingkungan dengan logam dan oksida yang beracun, yang dihasilkan dalam produksi serat kaca [2].

Secara orientasi sudut jika kita menggunakan dua arah maka secara

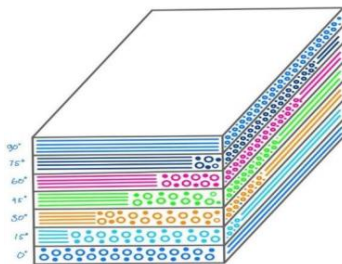
longitudinal akan kuat pada arah tersebut, namun kekuatan yang berbeda akan dihasilkan jika ditarik ke arah lain yang cenderung lebih lemah. Dalam kata lain tidak kuat secara transversal. Maka dari itu, pada kesempatan ini penulis berfokus kepada penelitian yang membahas pengaruh orientasi sudut anyaman komposit diperkuat serat basal. Peneliti memvariasikan anyaman serat untuk pembuatan komposit, arah serat diantaranya 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°; dan spesimen dipotong kearah sudut 0°, 10°, 30°, 45°, 50°, 60°. Kemudian dilakukan pengujian komposit tersebut dengan uji tarik. Uji ini perlu dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik spesimen yang telah dibuat.

Tujuan dari pada penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana sifat kekuatan tarik dari komposit poliester basal laminet dengan orientasi sudut anyaman yang telah dibuat.

2. Dasar Teori

2.1 Teori Laminasi

Geometri yang banyak digunakan untuk komposit serat kontinu adalah laminasi. Laminasi terbuat dari lapisan yang semua sertanya sering kali memiliki arah yang sama. Serat biasanya jauh lebih kuat dan lebih kaku daripada matriks sehingga lapisan lebih kaku dan lebih kuat dalam arah serat - ini adalah anisotropi [3,4]. Sebuah laminasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Komposit Laminasi

2.2 Serat Basal

Serat Basalt, terbuat dari mineral bebatuan gunung berapi bernama basal. Serat basal memiliki banyak keunggulan, diantaranya dan yang paling utama adalah ringan dan tahan terhadap api, tahan terhadap suhu tinggi, dan paparan sinar biru (ultra violet).

Serat basal bisa digunakan sebagai bahan konstruksi bangunan, atau dibuat tipis dan lentur untuk bahan kain, atau sebagai bahan pelapis benda-benda yang harus tahan panas dan api. Proses pembuatan serat basal

tergolong aman bagi ekologi karena tidak melibatkan proses kimia [5].

3. Metode penelitian

Penggunaan alat-alat dalam penelitian ini dapat dikelompokkan menjadi lima yaitu sebagai berikut:

1. Alat uji: Tensilon RTG-1250.
2. Alat cetak: kaca dan kuas.
3. Alat potong: gunting dan gerinda.
4. Alat Ukur: jangka sorong dan timbangan digital.
5. Alat K3: masker, sarung tangan karet.

Dalam penelitian ini bahan yang digunakan adalah serat basal sebagai penguat. Lalu polyester resin sebagai matriksnya.



Gambar 2. Alat Uji Tarik

Tegangan yang terjadi dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

σ = tegangan tarik (MPa)

A_0 = luas penampang spesimen mula-mula (mm^2)

P = beban (N)

Pada saat bersamaan spesimen juga mengalami regangan tarik yang dihitung dengan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

ε = regangan (%)

L = panjang spesimen saat menerima beban (mm)

L_0 = panjang spesimen mula-mula (mm)

Modulus elastisitas dihitung dengan persamaan:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (3)$$

E = modulus elastisitas (MPa)

$\Delta \varepsilon$ = selisih regangan di daerah elastis

$\Delta \sigma$ = selisih tegangan tarik di daerah elastis (MPa)

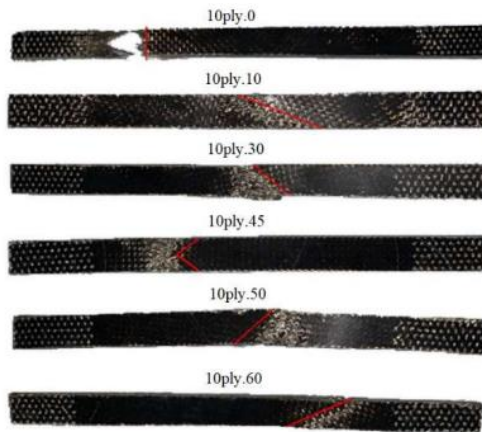
4. Hasil dan Pembahasan

Dibawah ini adalah spesimen uji tarik komposit poliester diperkuat serat basal

sebelum dan sesudah spesimen diuji. Berikut ditampilkan pada gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Spesimen sebelum (atas) dan sesudah (bawah) diuji



Gambar 4. Patahan spesimen pada setiap sudut potong

Tabel 1. Data ukuran spesimen dan hasil uji tarik komposit poliester diperkuat serat basal serta sudut potongannya

10PLY							
Sudut Potong	p (mm)	l (mm)	t (mm)	σ (MPa)	ϵ (%)	E(GPa)	
0°	1	150	2,48	10,28	181,188	4,134	4,467
	2	150	2,6	10,4	185,062	4,254	4,471
	3	150	2,46	10	170,342	3,656	4,790
	4	150	2,48	10,05	187,094	4,174	4,481
	Rata-rata	150	2,51	10,18	180,922	4,055	4,552
10°	1	150	2,26	11,58	168,613	3,948	4,444
	2	150	2,24	10,2	166,817	3,723	4,586
	3	150	2,4	10,8	160,156	3,537	4,620
	4	150	2,4	11	161,337	3,789	4,432
	Rata-rata	150	2,33	10,9	164,231	3,749	4,520
30°	1	150	2,44	10	145,982	3,723	4,113
	2	150	2,5	10,2	145,295	3,669	4,152
	3	150	2,5	9,4	143,982	3,643	4,006
	4	150	2,5	10,4	145,521	3,683	4,115
	Rata-rata	150	2,49	10	145,195	3,680	4,096
45°	1	150	2,5	10,9	126,367	3,364	3,895
	2	150	2,5	10,8	125,963	3,417	3,919
	3	150	2,5	11	126,275	3,364	3,905
	4	150	2,6	10,6	127,517	3,523	3,839
	Rata-rata	150	2,53	10,83	126,531	3,417	3,890
50°	1	150	2,6	10,5	131,681	3,497	3,923
	2	150	2,56	10,5	133,020	3,749	3,826
	3	150	2,6	10,3	132,589	3,576	3,873
	4	150	2,58	10,4	131,735	3,962	3,680
	Rata-rata	150	2,59	10,43	132,256	3,696	3,825
60°	1	150	2,4	9,4	135,903	3,391	4,163
	2	150	2,4	9,2	139,289	3,112	4,532
	3	150	2,48	10,2	142,433	3,364	4,309
	4	150	2,4	10	140,164	3,231	4,457
	Rata-rata	150	2,42	9,7	139,447	3,275	4,365
acak	1. 20°	150	2,6	10,6	151,178	3,736	4,177
	2. 40°	150	2,6	10	134,973	3,231	4,24
	3. 70°	150	2,64	10,7	131,890	2,992	4,292
	Rata-rata	150	2,61	10,43	134,221	3,454	4,231

$$P = 4619,278 N$$

$$A_o = l \times t = 10,28mm \times 2,48mm = 25,49 mm^2$$

$$\Delta L = 6,201 mm$$

$$L_o = 150 mm$$

$$\sigma = \frac{P}{A_o} = \frac{4619,278N}{25,49mm^2}$$

$$= 181,188 MPa$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{6,201mm}{150mm}$$

$$= 0,04134$$

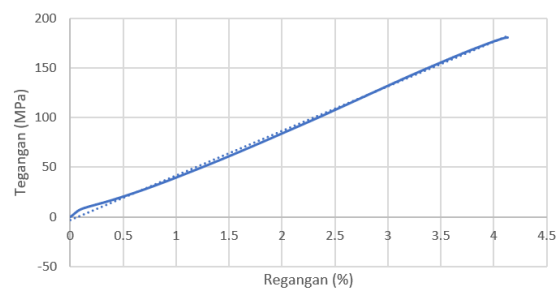
$$= 4,134\%$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{181,188MPa}{0,04134}$$

$$= 4382,873 MPa$$

$$= 4,467 GPa$$

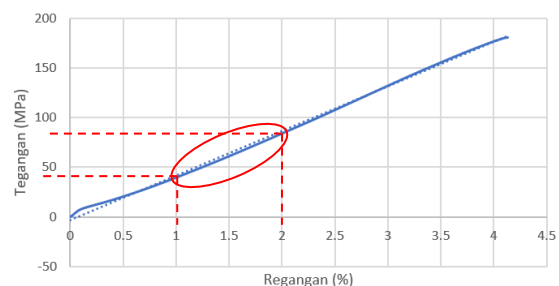
Tegangan dan Regangan Spesimen 10ply.1_0



Gambar 5. Grafik tegangan dan regangan spesimen 10 lapis uji coba 1 dengan sudut potong 0°

Untuk menghitung modulus elastisitas yang tepat dengan melihat grafik stress and strain daripada spesimen yang akan di hitung. Selanjutnya perhatikan bagian garis yang lurus tanpa lengkungan, dapat dilihat pada gambar:

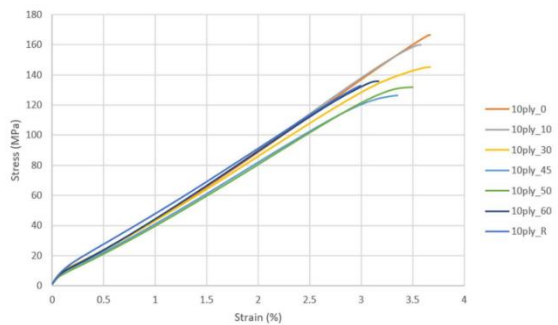
Tegangan dan Regangan Spesimen 10ply.1_0



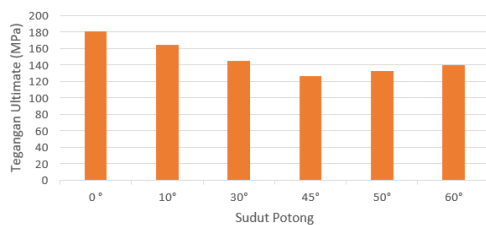
Gambar 6. Garis lurus pada grafik dilingkari warna merah

Lalu tarik garis lurus sejajar kearah Stress (MPa) atau Strain (%) mana yang lebih dekat. Hal selanjutnya lihat pada data grafik dan hitung Modulus elastisitasnya

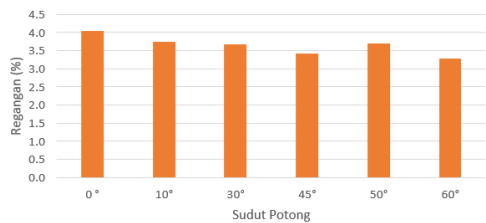
Berdasarkan hasil data pada Tabel 1, terdapat grafik hubungan antara tegangan tarik, regangan tarik, dan modulus elastisitas dengan variasi orientasi sudut potong serat serta sudut potong spesimen sebagai berikut:



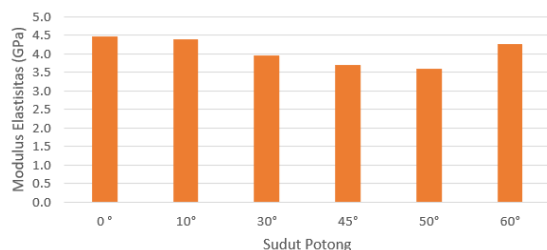
Gambar 6. Grafik tegangan dan regangan spesimen 10 lapis berdasarkan sudut potongnya



Gambar 7. Grafik tegangan maksimum terhadap sudut potong spesimen



Gambar 8. Grafik regangan terhadap sudut potong spesimen



Gambar 9. Grafik modulus elastisitas terhadap sudut potong spesimen

Berdasarkan Tabel 1 dan gambar 7 menunjukkan kekuatan tarik menurun seiring bertambah besar sudut potong spesimen atau sudut potong spesimen menjauhi sudut potong 0°. Hal ini dikarenakan sudut potong 0° memiliki dua serat kontinu, yaitu serat dengan potongan 0° dan 90°. Hal ini

dikarenakan tipe serat yang dipakai adalah *woven fiber*. Untuk lebih detil efisiensi potongan serat akan dijabarkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sudut serat sebelum dan sesudah dipotong

10 plies:	0°	10°	30°	45°	50°	60°
90	0	10	30	45	50	60
10	10	20	40	55	60	70
40	40	50	70	85	0	10
50	50	60	80	5	10	20
80	80	0	20	35	40	50
70	70	80	10	25	30	40
60	60	70	0	15	20	30
30	30	40	60	75	80	0
20	20	30	50	65	70	80
0	0	10	30	45	50	60

Indikasi warna yang cerah menyatakan kualitas kekuatan sudut serat yang kuat (sudut 0°), begitu juga sebaliknya. Semakin gelap warnanya maka kekuatannya pun menurun (sudut 45°). Dari data tabel diatas juga dapat dilihat bahwa sudut potong 45° memiliki susunan sudut serat yang kekuatannya rendah. Dapat dilihat, kekuatan tarik kembali meningkat setelah sudut potong 45°. Sehingga Tabel 2 dapat menjelaskan Gambar 7.

Menurut Nakazato, kekuatan tarik dari sudut potong 0° adalah yang terkuat jika dibandingkan dengan sudut potong lainnya[6]. Data dapat ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Massa jenis, fraksi volume serat dan sifat mekanik komposit Silicon Carbide (SiC) yang dibuat dengan orientasi sudut serat yang berbeda pada penelitiannya

Data	0°	30°	45°	60°
Angle (°)	0	30	45	60
Fiber volume fraction (%)	46	46	46	46
Elastic Modulus (GPa)	289	231	194	170
Ultimate tensile Strength (MPa)	210	90	66	31
Strain (%)	7,3	4,1	3,6	1,9

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diuraikan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa kekuatan tarik tertinggi dimiliki oleh spesimen dengan sudut potong 0° dengan rata-rata kekuatan tarik mencapai 180,922MPa. Sedangkan kekuatan tarik yang paling rendah ada pada spesimen dengan sudut potong 45° dengan kekuatan rata-rata kekuatan tariknya yang mencapai 126,531MPa.

Daftar Pustaka

- [1] T.D. Ngo., 2020, *Fiber Composites- Introduction to Composites Material*, Intech open 91285, London.

- [2] Colombo, C., 2014, *Static and Fatigue Characterization of New Basalt Fiber Reinforced Composites*. Composite Structures.
- [3] Shokrieh, M.M, Kamali, S.M. Shahri, 2014, *Residual Stress in Composite Materials*. Iran University of Science and Technology, Iran. pp 173-193.
- [4] Hyer, Michael W., 200, *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*. DEStech Publications, Inc. 439 North Duke Street. Lancaster, Pennsylvania 17602 U.S.A.
- [5] Shanidar, Hannan, 2014, *Inovasi Terbaru Properti Materia*, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- [6] Nakazato, N. Kohyama, A. Kishimoto, H., 2016, *Evaluation of Strength Anisotropy and Fracture Behavior of Uni Direction NITE-Sic/Sic Composites with Various Fiber Orientations*, AIMS Materials Science.



Muhamad Arsyi Alfatn menempuh studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali pada tahun 2017 dan menyelesaikan studi pada tahun 2021. Ia menyelesaikan program sarjana dengan topik penelitian: Pengaruh Orientasi Sudut Anyaman Serat Terhadap Sifat Isotropik Komposit Poliester/Basal

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan rekayasa msnufaktur, komposit, dan karakteristik material.

Analisa Karakteristik Solar Dengan Kondensat Dari Campuran Plastik dan Pasir Pembentuk *Paving Block* Melalui Uji Bom Kalorimeter dan *Gas Analyzer*

I Gede Wahyu Dian Krisnanda, Ngakan Putu Gede Suardana, dan I Wayan Bandem Adnyana

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Saat ini, meningkatnya penggunaan plastik di masyarakat karena mempunyai keunggulan lebih dari bahan lain. Namun disisi lain, plastik juga memiliki kerugian karena bahan baku pembuatan plastik berasal dari penyulingan minyak bumi yang menyebabkan menipisnya cadangan minyak bumi, beberapa solusi untuk menanggulangnya antara lain, dapat diolah menjadi aspal, beton, paving block serta limbah plastik dapat diolah menjadi BBM. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan produk BBM dari kondensat hasil kondensasi gas hasil pemanasan pada pembuatan paving block berbahan plastik jenis LDPE yang dicampur pasir sungai dengan variasi campuran 1:5 dan 1:7 suhu pemanasan 200°C selama 30 menit yang diuji dengan alat gas analyzer untuk mengetahui kandungan CO, CO₂, HC dan alat bom kalorimeter untuk mengetahui pengaruh kondensat terhadap nilai kalor solar. Dari penelitian ini, semakin sedikit jumlah pasir yang digunakan pada proses pembuatan paving block maka kandungan CO, CO₂, HC dan nilai kalor semakin tinggi.

Kata Kunci : plastik LDPE, BBM, nilai kalor

Abstract

Currently, the increasing use of plastics in society because it has advantages over other materials. But on the other hand, plastic also has disadvantages because the raw material for making plastic comes from petroleum refining which causes depletion of petroleum reserves, several solutions to overcome this include processing it into asphalt, concrete, paving blocks and plastic waste can be processed into fuel oil.

This research aims to produce fuel oil products from the condensate resulting from heating gas condensation in the manufacture of paving blocks with plastics LDPE mixed with river sand a variation mixture of 1:5 and 1:7 with a heating temperature of 200°C for 30 minutes tested with a gas analyzer to determine the content of CO, CO₂, HC and a bomb calorimeter to determine the effect of condensate on the heating value of diesel fuel. From this research, the smaller the amount of sand used in the paving block manufacturing process, the higher the CO, CO₂, HC and heating value.

Keywords: LDPE plastic, BBM (Fuel oil), heating value

1. Pendahuluan

Plastik banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, karena mempunyai keunggulan lebih dari bahan lain. Akan tetapi plastik yang telah menjadi sampah, jika tidak ditangani secara efektif akan berdampak negatif terhadap alam dan dapat berbalik menghancurkan kehidupan di sekitarnya [1]. Saat ini, sampah merupakan permasalahan utama yang sedang dihadapi di Indonesia khususnya di provinsi Bali, penumpukan sampah plastik semakin meningkat seiring dengan pertambahan jumlah penduduk. Masalah lain yang ditimbulkan dari plastik yaitu menyebabkan menipisnya cadangan minyak bumi, dimana plastik adalah senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah Karbon dan Hidrogen. Dengan salah satu bahan baku yang sering dipakai adalah Naphta yang dihasilkan dari penyulingan minyak bumi.

Penanganan limbah plastik yang saat ini banyak dikembangkan adalah mengubah limbah plastik menjadi BBM. Dengan ini dua permasalahan bisa diatasi, yaitu menumpuknya sampah kantong plastik dan diperolehnya kembali BBM yang merupakan bahan baku pembuatan plastik. Penelitian yang dilakukan [2], yaitu dengan mengolah kembali limbah plastik jenis LDPE tersebut dengan cara proses pencacahan, proses pencairan dan pencampuran limbah plastik jenis LDPE dengan penguatnya yaitu pasir dengan jenis pasir sungai dengan ukuran butir pasir 2-3mm untuk pembuatan paving block. Pengolahan plastik jenis LDPE menjadi bahan campuran paving block merupakan salah satu pengembangan ilmu pengetahuan yang memberikan manfaat positif untuk mengurangi limbah plastik.

Pada penelitian ini dilakukan suatu alternatif dengan mengkondensasikan gas hasil pemanasan pada pembuatan paving block

berbahan plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dengan penguatnya yaitu pasir dengan jenis pasir sungai dengan ukuran butir pasir 2-3mm dengan waktu operasi selama 30 menit pada suhu 200°C dan dilakukannya pengujian nilai kalor pada kondensat ini bertujuan untuk mengetahui perubahan energi dalam bentuk nilai kalor serta yang dihasilkan kondensat dari proses pembuatan *paving block*. Berdasarkan permasalahan diatas, maka rumusan masalah yang dapat diambil antara lain:

1. Bagaimanakah pengaruh kondensat dari proses pembuatan *paving block* berbahan dasar campuran plastik pasir terhadap nilai kalor dari solar?
2. Bagaimana kandungan gas hasil pemanasan dari proses pembuatan *paving block* berbahan dasar campuran plastik pasir?

Beberapa batasan ditetapkan pada penelitian ini antara lain:

1. Temperatur pemanasan pada tungku dengan suhu 200°C.
2. Perbandingan campuran pasir dan plastik adalah (1:5 dan 1:7).
3. Sampah plastik yang digunakan adalah jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dari TPS Suwung Serangan.
4. Pasir yang digunakan adalah pasir sungai dari sungai unda dengan butiran pasir yang berukuran 2-3mm.
5. Alat kondensasi yang digunakan dianggap terisolasi sempurna.
6. Proses kondensasi menggunakan air keran biasa.
7. Pengukuran kandungan gas hasil pemanasan menggunakan alat *gas analyzer* dengan kandungan yaitu CO, CO₂, dan HC.
8. Pencampuran solar dan kondensat hanya dilakukan pada pengujian bom kalorimeter.

2. Dasar Teori

2.1. BB (Bahan bakarr)

BB merupakan suatu materi yang bisa diubah menjadi energi.

2.2. Plastik

merupakan salah satu jenis makromolekul yang terbentuk dari proses poliimerisasi. Dimana Poliimerisasi merupakan proses mengabungkan beberapa molekul sederhana yang melalui proses kimia menjadi molekul besar. Penyusun utama plastik adalah Karbon dan Hidrogenn dengan salah satu bahan baku yaitu Neptha.

2.3. Pasir

Merupakan salah satu material dengan bentuk butiran. Umumnya dengan ukuran

antara 0,0625-2mm. Dengan unsur pembentuknya silikon dioksida, tapi di beberapa pantai subtropics dan tropics dibentuk dari batu kapur.

3. Metode penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

3.1. Alat

Penggunaan alat-alatt dalam penelitian ini yaitu, Mesin Pencacah Limbah Plastik, Ayakan Pasir, Oven, Alat Pencair Plastik Dan Pencampur Dengan Pasir, Kondensor, Botol Kaca, *Infrared thermometer*, Timbangan Digital, Alat Uji Bom Kalorimeter, Alat Uji *Gas Analyzer*.

3.2. Bahan

Adapun bahan yang digunakan yaitu, Limbah Plastik jenis LDPE yang dicacah menjadii serpihan kecil, Pasir dengan ukuran butiran 2-3 mm, dan Solar yang dihasilkan dari proses penyulingan tingkat menengah dengan memasak minyak mentah pada suhu 180-360°C. Dimana pada pengujian ini solar akan ditambahkan dengan kondensat dengan variasi 1:5 dan 1:7.

3.3. Langkah pengujian

Berikut langkah-langkah proses pengujian dalam penelitian ini antara lain :

1. Pencacahan plastik agar menjadi potongan kecil untuk memudahkan proses pengadukan agar plastik dan pasir tercampur merata pada saat proses pemanasan.
2. Oven pasir selama 24 jampada suhu 200°C untuk mengurangi kadar air pada pasir dan diayak dengan ukuran 2-3mm sebelum proses pemanasan.
3. Proses pencampuran plastik dan pasir dengan perbandingan plastik dan pasir (1:5 dan 1:7) kemudian dipanaskan pada temperatur 200°C selamaa 30 menit.
4. Pendeteksian gas hasil pemanasan dilakukan pada saat 25 menit setelah plastik dan pasir tercampur pada tungku pengaduk dan dilakukan dua kali pendeteksian yaitu pada saat gas hasil pemanasan sebelum kondensasi dan setelah kondensasi.
5. Selama proses pemanasan dilakukan akan menimbulkan asap. Asap ini kemudian dialirkan ke kondensor untuk dikondensasi. Selama proses kondensasi, air dialirkan di tabung kondensor sebagai media pendingin. Asap yang didinginkan akan berubah menjadi cairan yang disebut kondensat, kondensat ini kemudian ditampung di dalam botol dan ditutup untuk mengurangi kemungkinan

terjadinya kondensasi secara alami oleh udara.

6. Disiapkan cairan kondensat dan solar untuk pengujian di lab. dengan proses pengujian yaitu pengujian bom kalorimeter.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil Pengujian Nilai Kalor

Pengujian bom kalorimeter dilakukan di Lab. Analisa Bahan Universitas Udayana. Alat yang digunakan yaitu *Oxygen Bomb Calorimeter*.



Gambar 1. Alat Bom Kalorimeter

Hasil setelah dilakukan pengujian nilai kalor dari lima variasi spesimen, yaitu kondensat plastik dan pasir dengan campuran 1:5 dan 1:7, solar murni (solar 100%), campuran solar (90%) dengan kondensat plastik dan pasir dengan campuran 1:5 (10%), serta campuran solar (90%) dengan kondensat plastik dan pasir dengan campuran 1:7 (10%). Sebelum pengambilan data dilakukan pengujian dengan menggunakan benzoid acid untuk mengetahui jumlah panas yang digunakan untuk menaikkan suhu sebesar 1°C. Standarisasi benzoid acid dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Standarisasi Benzoid Acid

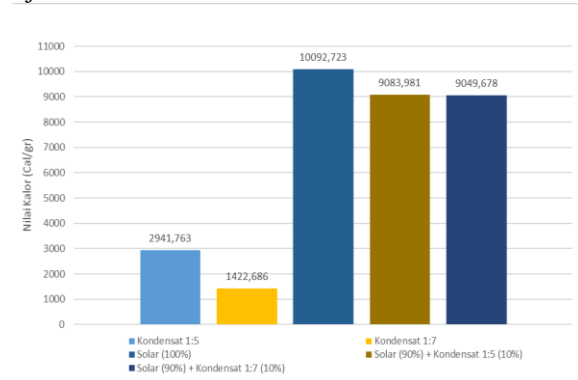
BA (Benzoid Acid)	Massa (gr)	Delta T (°C)		Standarisasi (cal/°C)	Rata-rata (cal/°C)
		T ₁	T ₂		
6318	1,01022	26,619	29,840	1941,659	1921,344
6318	1,00044	27,578	30,9	1901,030	

Padaa tabel 1, rata-rata dari standarisasi benzoid acid adalah 1921,344 cal/°C dan hasil rata-rata standarisasi pada benzoid acid akan menjadi nilai standarisasi dari pengujian nilai kalor pada lima variasi sampel uji.

Tabel 2. Hasil Pengujian Nilai Kalor

Sampel	Kondensat 1:5	Kondensat 1:7	Solar (100%)	Solar (90%) + Kondensat 1:5 (10%)	Solar (90%) + Kondensat 1:7 (10%)
Nilai standarisasi (cal/°C)	1921,344	1921,344	1921,344	1921,344	1921,344
Massa Sampel (gr)	BA (Bensoic Acid)	1,02959	1,01518	-	-
	Sampel Uji	2,09007	2,00685	2,00021	2,00426
T ₁	30,995	28,673	27,714	30,614	29,309
T ₂	34,195	30,159	38,221	40,090	38,730
delta T (°C)	3,2	1,486	10,507	9,476	9,421
m H ₂ O (gr H ₂ O)	2,0729	1,9954	2,33808	2,29311	2,24178
Panas laten H ₂ O (cal gr H ₂ O)	542,4	542,4	542,4	542,4	542,4
Energi H ₂ O (Cal)	1124,358	1082,311	1268,175	1243,783	1215,941
HHV (cal/gr)	2941,763	1422,686	10092,723	9083,981	9049,678
LHV (cal/gr)	1817,405	340,375	8824,548	7840,198	7833,737

Hasil data hasil pada tabel 2 diplot kedalam bentuk grafik batang untuk menggambarkan HHV dan LHV dari sampel uji.



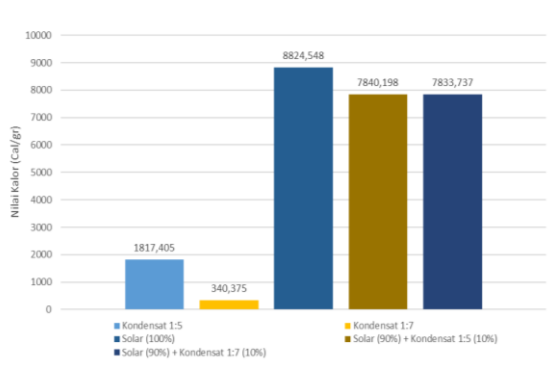
Gambar 2. Grafik HHV (High Heating Value)

Berdasarkan grafik pada gambar 2, menunjukkan bahwa nilai kalor pada solar murni (solar 100%) atau HHV dari solar murni sebesar 10092,723 cal/gr, pada kondensat 1:5 sebesar 2941,763 cal/gr, pada kondensat 1:7 1422,686 cal/gr. Dan dari tiga pengujian HHV tersebut menunjukkan perbedaan angka HHV yang signifikan.

Dilakukan juga percobaan dengan menambahkan kondensat terhadap solar, dimana dengan 90% solar murni dan 10% dari setiap kondensat. Dan didapatkan hasil HHV dari 90% solar murni dan 10% kondensat 1:5 sebesar 9083,981 cal/gr dengan selisih sebesar 1008,742 cal/gr dari HHV solar murni, dan pada 90% solar murni dan 10% kondensat 1:7 di dapat hasil HHV sebesar 9049,678 cal/gr dengan selisih sebesar 1043,045 cal/gr dari HHV solar murni.

Penelitian yang dilakukan oleh [3], tentang karakterisasi bahan bakar dari sampah plastik jenis HDPE dan LDPE melalui proses pirolisis dengan bahan baku 1 kg dalam waktu pirolisis selama 60 menit dan suhu pirolisis adalah 400°C, 420°C, 440°C, 460°C, 480°C. Hasil nilai kalor yang di dapatkan minyak HDPE sebesar 10.814,829 kcal/kg dan 10.674,728 kcal/kg untuk minyak LDPE.

Jika di bandingkan dengan data pada gambar 2 dapat dikatakan bahwa, cairan kondensat ini menunjukkan angka HHV yg kecil jika dibandingkan dengan hasil penelitian oleh [3], yang disebabkan temp. pemanasan yang kecil yaitu 200°C selama 30 menit, sehingga cairan kondensat hasil kondensasi dari pembuatan *paving block* ini belum bisa digunakan sebagai bahan bakar yg digunakan secara langsung tetapi masih bisa digunakan sebagai bahan baku bahan bakar.



Gambar 3. Grafik LHV (Low Heating Value)

Pada gambar 3 menunjukkan nilai LHV pada kondensat campuran 1:5 dan 1:7, solar murni (solar 100%), campuran solar (90%) dengan kondensat 1:5 (10%), serta campuran solar (90%) dengan kondensat 1:7 (10%).

Berdasarkan data pada gambar 3 menunjukkan LHV pada solar murni (solar 100%) sebesar 8824,548 cal/gr, pada kondensat 1:5 sebesar 1817,405 cal/gr, pada kondensat 1:7 sebesar 340,375 cal/gr. Dilakukan juga percobaan penambahan kondensat terhadap solar, dimana dengan perbandingan 90% solar murni dan 10% dari setiap kondensat. Dan didapatkan hasil sebesar 7840,198 cal/gr LHV dari perbandingan 90% solar murni dan 10% kondensat 1:5, pada perbandingan 90% solar murni dan 10% kondensat 1:7 sebesar 7833,737 cal/gr.

4.2. Hasil Pengujian Gas Hasil Pemanasan

Pada pengujian gas hasil pemanasan plastik dan pasir pada pembuatan paving block digunakan alat uji gas analyzer tecnotest stargas 898.



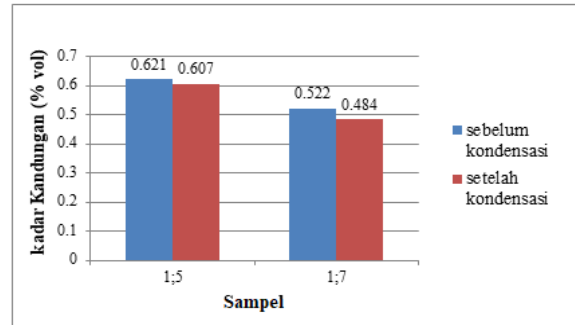
Gambar 4. Alat Uji Gas Analyzer

Beberapa parameter gas dapat diuji dengan menggunakan alat ini yaitu, CO, CO₂, dan HC. Berikut ini adalah hasil kandungan gas hasil pemanasan dari variasi campuran plastik dan pasir pada proses pembuatan paving block dapat dilihat pada tabel 3.

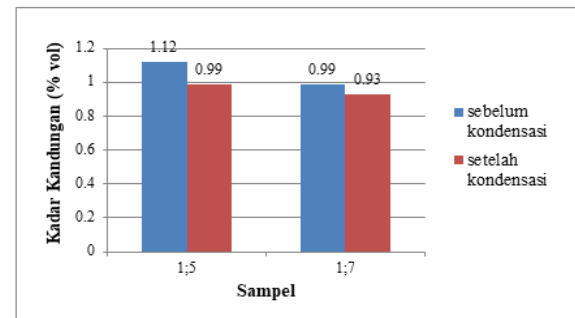
Tabel 3. Hasil Pengujian Gas Hasil Pemanasan

No	Campuran Plastik dan Pasir (kg)	Kandungan Sebelum Kondensasi			Kandungan Setelah Kondensasi		
		CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	HC (ppm vol)	CO (% vol)	CO ₂ (% vol)	HC (ppm vol)
1	1:5	0,621	1,12	14823	0,607	0,99	14621
2	1:7	0,522	0,99	11235	0,484	0,93	10988

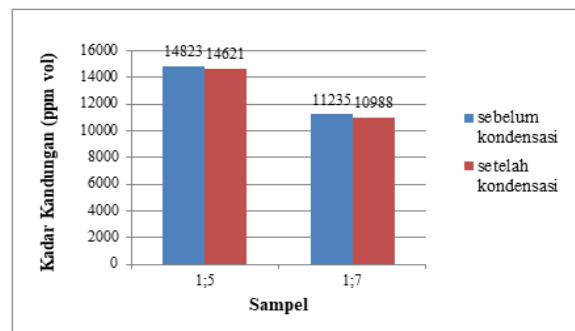
Hasil data pada tabel 3 diplotkan kedalam bentuk grafik batang sesuai dengan kadar kandungan CO, CO₂, dan HC dari proses pemanasan sebagai berikut:



Gambar 5. Grafik Kadar Kandungan CO



Gambar 6. Grafik Kadar Kandungan CO₂



Gambar 7. Grafik Kadar Kandungan HC

Data hasil pengujian menunjukkan bahwa kandungan sebelum kondensasi lebih besar dari pada setelah kondensasi yang disebabkan karena adanya perubahan fase fluida dari uap menjadi cairan yang terjadi didalam tabung kondensor. Selisih dari variasi campuran 1:5 dan 1:7 yaitu, CO sebesar 0,014 % vol, CO₂ sebesar 0,13 % vol, dan HC sebesar 3588 ppm vol. Dan selisih setelah kondensasi yaitu, CO sebesar 0,123 % vol, CO₂ sebesar 0,06 % vol, dan HC sebesar 3633 ppm vol.

5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Setelah dilakukann pengujian nilai kalor dengan penambahan kondensat pada solar murni, dimana HHV awal pada solar murni (solar 100%) sebesar 10092,723 cal/gr dan LHV awal sebesar 8824,548

cal/gr. Penurunann terkecil terjadi pada campuran solar (90%) dengan kondensat 1:5 (10%) dngan selisih HHV sebesar 1008,742 cal/gr dan LHV sebesar 984,35 cal/gr. Jadii dapat dikatakan bahwa penambahan kndensat pada solar menurunkan nilai kalor dri solar murni.

2. Setelah dilakukan pengujian kandungan gas hasil pemanasan pada proses pembuatann *paving blockk* menunjukkan kandungan CO, CO₂, dan HC yang paling tinggi didapat pada saat gas hasil pemanasan sebelum masuk ke kondensor yaitu pada campuran 1:5. Dimana kadar kandungan yang dihasilkan CO sebesar 0,621 %vol, CO₂ sebesar 1,12 %vol, dan HC sebesar 14.823 ppm vol. Setelah gas hasil pemanasan terkondensasi terjadi penurunan sebesar CO sebesar 0,014 %vol, CO₂ sebesar 0,13 %vol, dan HC sebesar 202 ppmvol.

Daftar pustaka

- [1] Sarker, M., M. M. Rashid, M. S. Rahman, and M. Molla, 2012, *Fractional Distillation Process Utilized to Produce Light Fractional Fuel*, The Open Fuels & Energy Science Journal, Vol 5, pp.39-46.
- [2] Susila. I. M., Suardana. N. P. G., Kencanawati. C. I. P. K., Thanaya. I. N. A., & Adnyana. I. W. B., 2019, *The Effect of Composition of Plastic Waste Low Density Polyethylene (LDPE) with Sand to Pressure Strength and Density of Sand/LDPE Composite*, International Conference on Design, Energy, Materials and Manufacture, Vol. 539, No. 1, pp.1-7.
- [3] Kurniawan, Eddy, and Nasrun., 2014, *Karakterisasi Bahan Bakar Dari Sampah Plastik Jenis High Density Polyethelene (HDPE) Dan Low Density Polyethelene (LDPE)*, Jurnal Teknologi Kimia Unimal, Vol 3, No. 2, pp. 41-52.



I Gede Wahyu Dian Krisnanda menyelesaikan studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana pada tahun 2015, dan menyelesaikannya pada tahun 2021.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan konversi energi.

Karakteristik Mekanik Papan Partikel Komposit Serbuk Kayu Jati Matriks Resin Polyester dengan Variasi Fraksi Massa

I Nengah Kariana, C.I.P.K Kencanawati, D.N.K Putra Negara
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Kebutuhan masyarakat akan kayu semakin sulit dipenuhi karena potensi dan ketersediaan tebangan di hutan alam semakin berkurang. Jenis limbah yang dihasilkan dari industri penggerajin kayu adalah limbah gergajian kayu. Limbah gergajian kayu jati yang berupa serbuk dapat dimanfaatkan kembali sehingga memiliki nilai lebih yaitu dengan dipadukan resin polyester yang nantinya akan menghasilkan papan partikel komposit. Penelitian ini bertujuan mengetahui karakteristik fisik papan partikel komposit serbuk kayujati matriks resin polyester dengan variasi fraksi massa. Pengujian yang dilakukan adalah uji bending (ASTM D790-03), uji impact (ASTM E23-16), uji daya serap air (D570-98), dan uji SEM. Hasil uji kekuatan bending tertinggi papan partikel komposit serbuk kayu jati matriks resin polyester terjadi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai 67,948 MPa dan yang terendah 24,929 MPa pada fraksi massa 15% : 85%. Regangan bending tertinggi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai 0,016 dan modulus elastisitas tertinggi terjadi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai 5,36 GPa. Hasil uji impact fraksi massa 5% : 95% memiliki kekuatan impact tertinggi dengan nilai 0,0013 Nm/mm². Daya serap air papan partikel komposit serbuk kayu jati matriks resin polyester didapatkan nilai serapan terendah pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai 5.83 %. Hasil uji SEM menunjukkan ikatan antara penguat dan matriks.

Kata kunci: serbuk kayu jati, papan partikel, uji lentur, uji impact, uji serap air, uji sem, komposit, poliester

Abstract

The community's need for wood is increasingly difficult to fulfill because the potential and availability of felling in natural forests is decreasing. The type of waste generated from the woodworking industry is sawn timber waste. Waste of teak sawn in the form of powder can be reused so that it has an added value, namely by combining it with polyester resin which will produce composite particle board. This study aims to determine the physical characteristics of wood powder composite particle board polyester resin matrix with variations in mass fraction. The tests carried out are the bending test (ASTM D790-03), the impact test (ASTM E23- 16), the water absorption test (D570-98), and the SEM test. The highest bending strength test results for the composite particle board of teak wood powder with polyester resin matrix occurred at a mass fraction of 5%: 95% with a value of 67,948 MPa and the lowest was 24,929 MPa at a mass fraction of 15%: 85%. The highest bending strain was at the mass fraction of 5%: 95% with a value of 0.016 and the highest modulus of elasticity occurred at the mass fraction of 5%: 95% with a value of 5,36 GPa. The results of the mass fraction 5%: 95% impact test have the highest impact strength with a value of 0,0013 Nm/mm². The water absorption capacity of teak wood powder composite particle board with polyester resin matrix obtained the lowest absorption value at the mass fraction of 5%: 95% with a value of 5.83%. SEM test results show the bond between the amplifier and the matrix.

Keyword : Teak Wood Powder, Particle Board, Bending Test, Impact Test, Water Absorption, Composite, Polyester

1. Pendahuluan

Kebutuhan masyarakat akan kayu semakin sulit dipenuhi karena potensi dan ketersediaan tebangan di hutan alam semakin berkurang. Bahan utama kayu umumnya digunakan menjadi berbagai macam keperluan seperti konstruksi rumah, mebel, panel, papan dan *furniture*. Konsumsi kayu yang terus mengalami peningkatan akan berdampak pada hutan alam, oelh karena itu harus ada upaya mengurangi konsumsi kayu dengan mencari bahan alternatif lain pengganti kayu. Salah satu sumber material pengganti yang mudah didapatkan dan juga ketersediaannya cukup banyak adalah serbuk kayu. Serbuk kayu jati memiliki potensi untuk digunakan sebagai papan partikel komposit yang diharapkan mampu menjadi bahan pengganti kayu khususnya dalam pengaplikasian untuk *furniture*.

Serbuk kayu biasanya dihasilkan dari industri penggergajian kayu. Serbuk gergajian kayu mengandung komponen utama selulosa, lignin,

hemiselulosa dan zat ekstraktif kayu. Serbuk gergajian kayu memiliki pori sehingga air mudah terserap dan mengisi pori-pori tersebut [1].

Resin *polyester* adalah salah satu resin termoset yang terbilang mudah untuk didapatkan dan umum digunakan oleh masyarakat maupun industri skala kecil ataupun skala besar. Resin *polyester* memiliki kemampuan terikat dengan serat alam tanpa menimbulkan reaksi dan gas dan tahan terhadap asam kecuali asam pengoksidasi. Resin *polyester* memiliki ciri transparan dan dapat diwarnai, dapat dibuat kaku dan fleksible. Jenis resin *polyester* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe tidak yang dapat mengalami pengerasan dari fasa cair menjadi fasa padat saat mendapatkan perlakuan yang tepat.

Serbuk gergaji kayu jati ini dipadukan dengan resin *polyester* yang nantinya menghasilkan papan papan partikel komposit. Penelitian ini sangat penting dilakukan untuk mengembangkan potensi limbah serbuk gergajian kayu jati yang berpotensi sebagai

bahan baku pembuatan material *furniture* berupa papan partikel yang diharapkan dapat mengurangi pemakaian kayu. Pada Penelitian ini dilakukan pengujian bending untuk mengetahui karakteristik fisik, pengujian *impact* untuk mengetahui kekuatan dari papan saat menerima beban kejut, pengujian day serap air, serta pengamatan SEM (*scanning electron microscope*) untuk melihat permukaan fisik dari komposit serbuk kayu jati dengan matriks resin *polyester* sebagai papan partikel.

2. Landasan Teori

2.1 Komposit

Komposit merupakan material yang terbentuk dari kombinasi dari dua atau lebih material. Pembuatannya melalui pencampuran yang tidak homogen sehingga kekuatan dari material tersebut dapat direncanakan. Komposit terbagi menjadi tiga yaitu komposit partikel, komposit serat dan komposit laminat.

2.2 Serbuk Kayu Jati

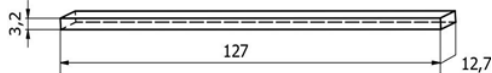
Serbuk kayu merupakan hasil yang didapat dari penggergajian atau proses penghalusan kayu. Biasanya serbuk gergaji langsung dibuang begitu saja, namun ternyata serbuk hasil gergajian ataupun penghalusan kayu memiliki manfaat dengan digunakan sebagai penguat dalam pembuatan papan partikel karena memiliki kualitas yang baik.

2.3 Resin Polyester

Resin *polyester* merupakan resin termoset yang memiliki viskositas cukup rendah. Resin *polyester* mengandung monomer stiren yang banyak sehingga suhu deformasi termal lebih rendah dibandingkan resin termoset lainnya. Resin *polyester* juga memiliki ketahanan terhadap panas jangka panjang yang cukup baik yaitu 110°C - 140°C. Jenis resin *polyester* yang digunakan dalam penelitian ini adalah resin *polyester* tidak jenuh tipe 3314NC.

2.4 Uji Bending

Uji bending merupakan proses pengujian material untuk mengetahui kekuatan material saat menerima pembebanan. Pengujian bending dilakukan dengan metode *three point bending* menurut standar ASTM D790-03 [2].



Gambar 1. Dimensi spesimen uji bending

Tegangan bending merupakan gaya yang diberikan dari luar sehingga material mengalami reaksi yang menyebabkan terjadinya deformasi.

Rumus tegangan bending adalah sebagai berikut:

$$\sigma_L = \frac{3P.L}{2b.d^2} \quad (1)$$

Keterangan rumus:

σ_L = Tegangan bending (MPa)

P = Beban (N)

L = Panjang span (mm)

b = Lebar spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

Regangan bending merupakan perbandingan pertambahan panjang spesimen dikurangi awal spesimen dibagi panjang awal spesimen. Rumus regangan bending yaitu sebagai berikut:

$$\epsilon_L = \frac{6\delta \cdot d}{L^2} \quad (2)$$

Keterangan rumus:

ϵ_L = Regangan bending

L = Panjang span (mm)

δ = Defleksi spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

Modulus elastisitas bending adalah perbandingan tegangan dan regangan dalam deformasi elastis. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$E_L = \frac{L^3 \cdot m}{4b \cdot d^3} \quad (3)$$

Keterangan rumus:

E_L = Modulus elastisitas bending (GPa)

L = Panjang span (mm)

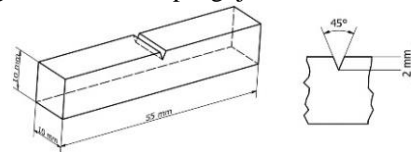
b = Lebar spesimen (mm)

d = Tebal spesimen (mm)

m = Tangen garis lurus (N/mm)

2.5 Uji Impact

Pengujian *impact charpy* merupakan standar pengujian laju regangan tinggi untuk menentukan jumlah energi yang dapat diserap bahan saat terjadi patahan. Pada perhitungan kekuatan *impact* menggunakan standar pengujian ASTM E23-16 [3].



Gambar 2. Dimensi spesimen uji impact

Untuk rumus yang digunakan pada uji *impact* adalah sebagai berikut:

Energi awal

$$E_0 = W \cdot l (1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

Energi Akhir

$$E_1 = W \cdot l (1 - \cos \beta) \quad (5)$$

Untuk jumlah energi yang diserap adalah :

$$\Delta E = E_0 - E_1 \quad (6)$$

Keterangan Rumus:

W = Berat pendulum (N)

α = Sudut awal (°)

β = Sudut Akhir (°)

l = Lengan bandul (m)

Untuk kekuatan *impact* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$I_s = \frac{\Delta E}{t \times l} \quad (7)$$

Keterangan :

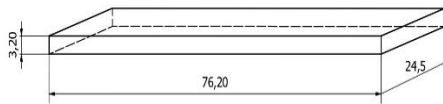
I_s = Kekuatan *impact* (J/mm²)

t = Tebal spesimen (m)

l = Lebar spesimen (m)

2.6 Uji Daya Serap Air

Uji daya serap air merupakan kemampuan material menyerap air dalam kurun waktu tertentu. Jumlah serapan air pada papan partikel dilakukan dengan mengukur selisih berat sebelum dan setelah melakukan perendaman. Penujian daya serap air mengacu pada ASTM D570-98 [4].



Gambar 3. Dimensi spesimen uji daya serap air

Daya serap air pada papan partikel dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Wabs (\%) = \frac{W_a - W_o}{W_o} \times 100 \quad (8)$$

Keterangan Rumus:

Wabs = Daya serap air (%)

W_a = Massa basah spesimen (gram)

W_o = massa kering spesimen (gram)

2.7 Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Scanning electron microscope (SEM) adalah salah satu dari jenis mikroskop elektron yang mampu menggambarkan bentuk permukaan dari sampel yang dianalisis. SEM memfokuskan sinar elektron di permukaan objek untuk mengambil gambar, sinar elektron mampu mencapai resolusi hingga 0.1 – 0.2 nm.

3. Metode Penelitian

3.1 Alat Penelitian

1. Timbangan digital digunakan memiliki akurasi 0,001 gram.
2. Gelas ukur digunakan untuk mengukur bahan penelitian
3. Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi benda atau spesimen
4. Cetakan specimen yang dari kayu dengan ukuran sesuai standar ASTM dan dilapisi aluminium foil.
5. Alat bantu

3.2 Bahan

1. Serbuk kayu jati digunakan sebagai penguat.
2. Resin *polyester* digunakan sebagai matriks.
3. Katalis digunakan sebagai campuran pada resin.
4. Aquades digunakan untuk mencuci serbuk kayu jati sebelum dikeringkan dan juga digunakan pada pengujian *water absorption*.

3.3 Massa Jenis Bahan Penelitian

Massa jenis atau densitas diartikan sebagai pengukuran massa setiap satuan volume benda. Serbuk kayu jati memiliki massa jenis dengan 0,67 g/cm³ dan resin *polyester* memiliki massa jenis 1,10 g/m³.

3.4 Proses Pembuatan Spesimen Uji

1. Ayak serbuk kayu jati yang masih basah dengan ukuran 40–10 mesh. Setelah didapatkan ukuran 40–10 mesh selanjutnya cuci serbuk menggunakan aquades hingga bersih.
2. Keringkan serbuk kayu jati yang telah dicuci aquades dengan cara menjemur di bawah terik sinar matahari.
3. Setelah serbuk kering dilakukan penyaringan yang kedua agar serbuk yang akan digunakan pada pembuatan spesimen benar-benar sesuai ukuran.
4. Menyiapkan cetakan spesimen yang terbuat dari kayu dan dilapisi aluminium foil dengan ukuran sesuai ASTM.

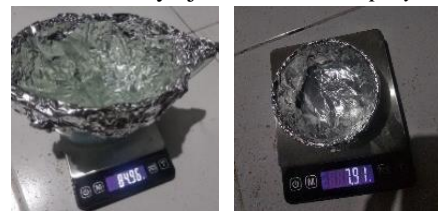
- | | | |
|------------|------------------|-------------------|
| a. Bending | b. <i>Impact</i> | c. Daya Serap Air |
| P= 127 mm | P = 55 mm | P = 76,2 mm |
| L= 12,7 mm | L = 10 mm | L = 24,5 mm |
| T= 3,2 mm | T = 10 mm | T = 3,2 mm |



Gambar 4. Cetakan spesimen

5. Selanjutnya melakukan penakaran serbuk kayu jati, resin *polyester* dengan perbandingan serbuk dan resin adalah sebagai berikut:

- 5% serbuk kayu jati : 95% resin *polyester*
- 10% serbuk kayu jati : 90% resin *polyester*
- 15% serbuk kayu jati : 85% resin *polyester*



(a)

(b)

Gambar 5. (a) Penakaran resin *polyester* (b) Penakaran katalis



Gambar 6. Penakaran serbuk kayu jati

6. Lakukan proses pencampuran serbuk gergaji kayu jati dengan resin *polyester* yang telah dicampur dengan katalis.



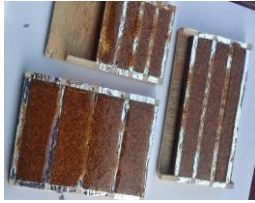
Gambar 7. Penakaran serbuk kayu jati

Aduk hingga merata lalu tuangkan campuran tersebut ke dalam cetakan kayu yang telah dilapisi aluminium foil.



Gambar 8. Pengadukan Resin dan Partikel

7. Tunggu hingga spesimen kering, jika telah kering selanjutnya keluarkan spesimen dari cetakan.



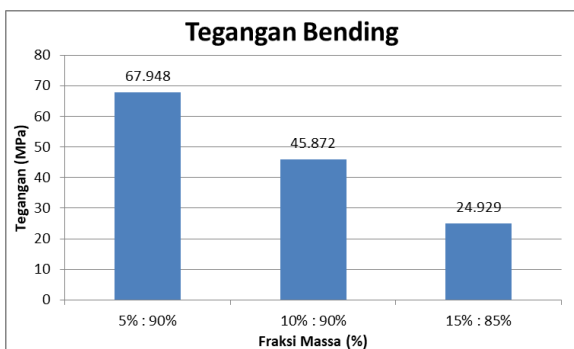
Gambar 9. Campuran Dalam Cetakan

8. Lakukan pengulangan pada perbandingan fraksi massa yang lain dan spesimen yang lain dengan proses yang sama. Khusus untuk spesimen *impact* takikan dibuat setelah spesimen jadi.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Uji Bending

Hasil dari pengujian bending papan partikel komposit serbuk kayu jati matriks resin *polyester*.

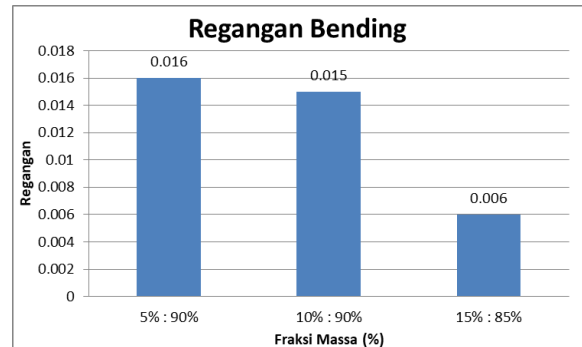


Gambar 10. Grafik Tegangan Bending

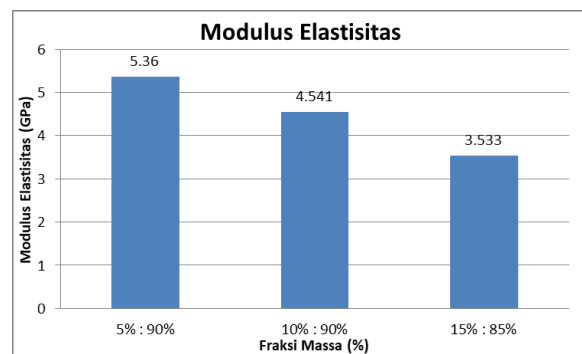
Dari grafik tegangan diatas menunjukkan hasil tegangan bending tertinggi terjadi pada komposit dengan fraksi massa 5%:95% dengan nilai tegangan rata-rata 67,948 MPa, fraksi massa 10%:90% memiliki nilai tegangan rata-rata sebesar 45,872 MPa, sedangkan pada komposit dengan fraksi massa 15%:85 memiliki nilai tegangan bending terendah dengan nilai rata-rata 24,929 MPa. Nilai teangan yang relatif rendah ini disebabkan karena penambahan partikel kayu jati lebih banyak namun resin *polyester* lebih sedikit yang mengakibatkan lemahnya ikatan antara resin *polyester* dan pasrtikel kayu jati. Tegagan bending terbesar pada komposit fraksi massa 5%:95% ini karena partikel terikat baik dengan resin polyester. Hal ini yang mengakibatkan tegangan bending tinggi karena ikatan mampu menerima beban lebih merata. Peningkatan kekuatan bending tidak melebihi nilai kekuatan lentur resin murni dikarenakan komposisi tanpa penguat mampu mendistribusikan beban secara maksimal [5]. Dari penjelasan tersebut sesuai dengan hasil pengujian kekuatan bending diatas dimana semakin ditambahkan penguat kekuatan bending semakin menurun.

Berdasarkan grafik regangan bending diatas hasil rata-rata perhitungan regangan bending didapatkan hasil tertinggi pada komposit dengan fraksi massa 5%:95% dengan nilai regangan rata-rata 0,016, untuk komposit dengan fraksi massa 10%:90% memiliki nilai regangan bending rata-rata sebesar 0,015, sedangkan pada komposit dengan

fraksi massa 15%:85% memiliki nilai regangan rata-rata yang relatif rendah dibandingkan fraksi massa sebelumnya yaitu 0,006.



Gambar 11. Grafik Regangan Bending

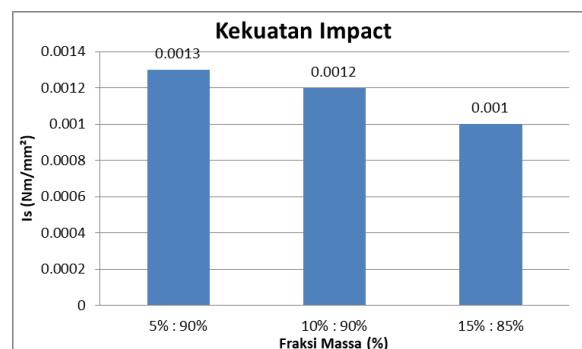


Gambar 12. Modul Elastisitas Bending

Grafik modulus elastisitas diatas menunjukkan bahwa nilai modulus tertinggi terdapat pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai 5,36 GPa, pada fraksi massa 10% : 90% yang memiliki nilai rata-rata 4,541 GPa, pada fraksi massa 15% : 85% nilai rata-rata modulus elastisitas bending mengalami peningkatan dengan nilai sebesar 3,533 GPa.

4.2 Hasil Uji Impact

Pengujian *impact* menggunakan tiga spesimen setiap fraksi massa. Standar uji *impact* yang digunakan pada pengujian ini adalah ASTM E23-16.



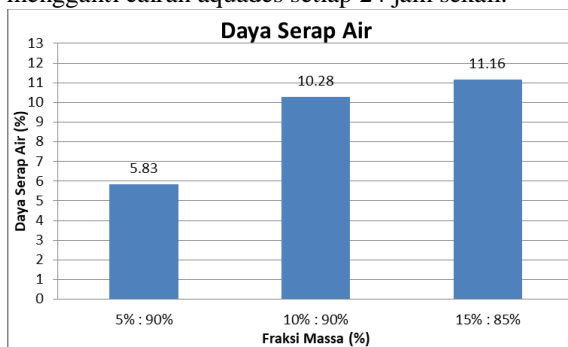
Gambar 13. Grafik Kekuatan Impact

Dari pengujian *impact* tersebut didapatkan nilai kekuatan *impact* tertinggi pada fraksi massa 5%:95% dengan nilai rata-rata 0,0013 Nm/mm². Pada komposit dengan fraksi massa 10%:90% memiliki kekuatan *impact* 0,0012 Nm/mm². Nilai kekuatan *impact* terendah terjadi pada fraksi massa 15%:95% dengan nilai rata-rata 0,001 Nm/mm². Nilai kekuatan

impact yang lebih tinggi terjadi karena ikatan yang baik antara penguat dan matriks sehingga matriks mampu meneruskan beban ke penguat dengan baik yang berarti lebih banyak energi yang dapat diserap sehingga kemampuan menerima beban kejut lebih tinggi. Komposit dengan fraksi massa 15%:85% memiliki nilai kekuatan *impact* terendah dengan nilai rata-rata Nm/mm^2 . Rendahnya nilai kekuatan *impact* tersebut dikarenakan ikatan antara matriks dan penguat kurang baik yang mengakibatkan terjadinya rongga-rongga pada spesimen sehingga energi yang diterima matriks tidak dapat diteruskan secara merata ke penguat sehingga hanya membutuhkan sedikit energi untuk membuat spesimen tersebut patah. Selain ikatan yang kurang baik rendahnya nilai kekuatan *impact* juga bisa disebabkan pada proses pencampuran antara resin polyester dan partikel kayu jati kurang baik yang menyebabkan munculnya void pada komposit sehingga melemahkan kekuatan *impact* dari komposit tersebut.

4.3 Hasil Uji Daya Serap Air

Pengujian dilakukan dengan merendam spesimen selama 14 hari dengan aquades dan menimbang massa dari spesimen sekaligus mengganti cairan aquades setiap 24 jam sekali.



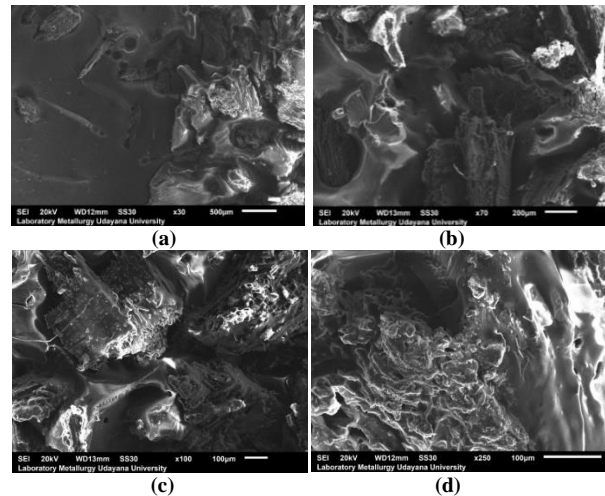
Gambar 14. Grafik Daya Serap Air

Berdasarkan data pengujian daya serap air tersebut diatas dapat dilihat pada papan partikel dengan fraksi massa 5%:95% memiliki nilai rata-rata daya serap air sebesar 5,83 % . Papan partikel dengan fraksi massa 10%:90% memiliki nilai daya serap air rata-rata 10,28 % dan nilai daya serap air tertinggi terdapat pada papan partikel komposit dengan fraksi massa 15%:85% dengan nilai 11,16 % . Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada papan partikel komposit dengan fraksi massa 15%:85% memiliki nilai daya serap air lebih tinggi dibandingkan dengan komposit dengan fraksi massa 5%:95% dan 10%:90%. Nilai daya serap air dipengaruhi oleh banyaknya matriks atau resin yang digunakan pada pembuatan papan partikel ini, semakin banyak resin yang ditambahkan pada partikel kayu jati maka semakin banyak rongga yang dapat di isi oleh resin yang mengakibatkan tingkat kerapatannya semakin tinggi, semakin tinggi kerapatannya maka akan semakin sedikit rongga yang dapat terisi air.

4.4 Hasil Uji SEM

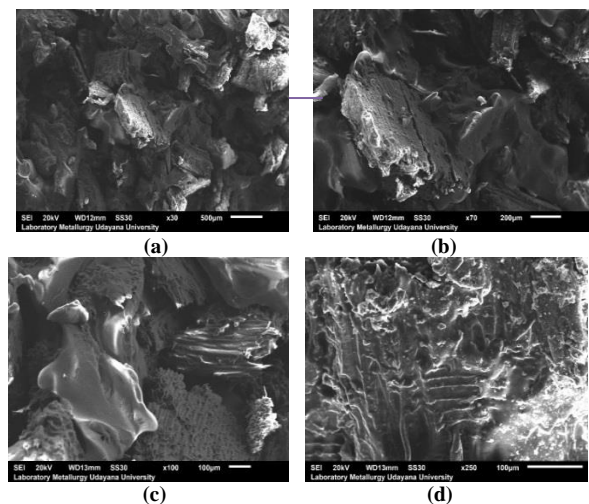
Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan untuk melihat kondisi permukaan atau

morfologi dari komposit serbuk kayu jati matriks resin *polyester*. Pengujian SEM menggunakan spesimen yang telah diuji bending.



Gambar 15. Hasil Uji SEM Komposit Fraksi Massa 5%:95%

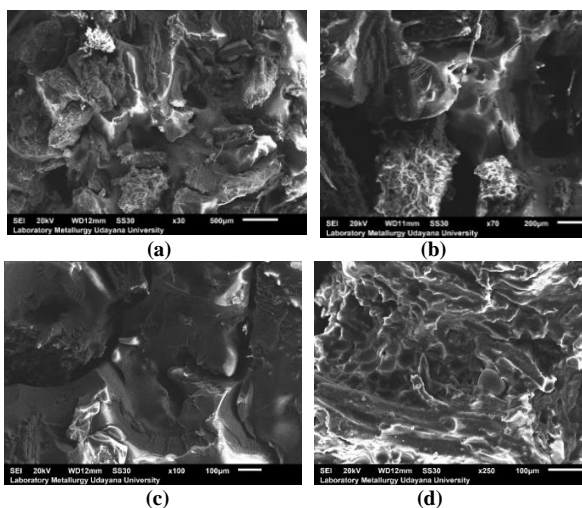
Pada gambar 15b merupakan bentuk permukaan patahan spesimen uji bending dengan pembesaran $70\times$ tidak terlihat adanya retakan atau *crack*, tetapi pada gambar 15a dengan pembesaran $30\times$ terlihat adanya void. Timbulnya void disebabkan oleh masuknya udara pada saat pencampuran partikel kayu jati dengan resin *polyester*. Gambar 15c dengan pembesaran $100\times$ menunjukkan komposit didominasi resin *polyester* dan terlihat resin mengikat serbuk kayu jati dengan cukup baik dan pada gambar 15d dengan pembesaran $250\times$ terjadi penggumpalan pada komposit papan partikel serbuk kayu jati matriks resin *polyester* dikarenakan campuran yang kurang merata antara resin *polyester* dan katalis.



Gambar 16. Hasil Uji SEM Komposit Fraksi Massa 10%:90%

Hasil uji SEM yang terlihat pada gambar 14a dengan pembesaran $30\times$ terlihat partikel kayu jati tersebar dengan merata dan pada gambar 16b pembesaran $70\times$ terlihat retakan atau *crack* pada partikel kayu jati. Gambar 16c dengan pembesaran

100× menunjukkan adanya gumpalan resin *polyester* dan terlihat juga adanya partikel kayu jati yang terlapis resin *polyester*. Pada gambar 16d dengan pembesaran 250× terlihat resin *polyester* mengikat partikel kayu jati dengan sangat baik. Ikatan ini terjadi karena distribusi partikel yang merata dan juga jumlah resin yang tepat sehingga penguat dan matriks mampu menyerap beban lebih banyak dibandingkan dengan spesimen dengan fraksi massa 5%:95% dan 15%:85%, data tersebut dapat dilihat dari hasil uji bending yang menunjukkan pada fraksi massa 10%:90% memiliki nilai tegangan, regangan, dan modulus elastisitas lebih tinggi



Gambar 17. Hasil Uji SEM Komposit Fraksi Massa 15%:85%

Pada gambar 17c dengan pembesaran 100× fraksi massa 15:85% dapat dilihat adanya retakan akibat pembebanan pada saat uji bending, retakan tersebut memiliki mekanisme merambat namun dapat dibelakkan dengan adanya partikel kayu jati. Penambahan partikel kayu jati pada gambar 17a pembesaran 30× terlihat adanya himpitan antara partikel satu dengan yang lainnya, himpitan tersebut mengakibatkan adanya rongga-rongga. Penyebaran partikel kayu jati yang berlebihan menyebabkan resin *polyester* tidak dapat mengikat partikel kayu jati dengan baik, maka ikatan antara penguat dan matriks menjadi lemah. Gambar 17b dengan pembesaran 100× menunjukkan adanya *void* dan pada gambar 17d dengan pembesaran 250× menunjukkan permukaan resin *polyester* saat partikel kayu jati yang masih terlihat adanya *void*.

5. Penutup

5.1 Kesimpulan

1. Dari hasil pengujian bending yang telah dilakukan didapatkan nilai tegangan bending tertinggi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata 67,948 MPa dan nilai tegangan bending terendah pada fraksi massa 15% : 85% dengan nilai rata-rata sebesar 24,929 MPa. Regangan bending tertinggi terjadi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata 0,016 dan nilai

regangan bending terendah terjadi pada fraksi massa 15% : 85% dengan nilai rata-rata 0,006 mm. modulus elastisitas bending tertinggi terjadi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata sebesar 5,360 GPa dan nilai modulus elastisitas terendah terjadi pada fraksi massa 10% : 90% dengan nilai rata sebesar 3,533 GPa.

2. Hasil uji *impact* menunjukkan nilai kekuatan *impact* tertinggi terjadi pada fraksi masa 5% : 95% dengan nilai rata-rata sebesar 0,0013 Nm/mm² pada fraksi massa 10% : 90% memiliki nilai kekuatan *impact* sebesar 0,0012 Nm/mm². Sedangkan nilai kekuatan *impact* terendah terjadi pada fraksi massa 15% : 85% dengan nilai rata-rata sebesar 0,001 Nm/mm².
3. Pengujian daya serap air menunjukkan pada fraksi massa 5% : 95% memiliki nilai serapan air terendah dengan nilai rata-rata sebesar 5,83 % dan pada fraksi massa 15% : 85% memiliki nilai daya serap air tertinggi sebesar 11,16 %.
4. Hasil uji SEM menunjukkan ikatan dan juga kerapatan pada fraksi massa 10% : 90% lebih baik dibandingkan fraksi massa 5% : 95% dan 15% : 85% yang dilihat dengan pembesaran 30×, 70×, 100×, dan 250×.

Daftar Pustaka

- [1] Wulandari, F. I., 2011, *Pengaruh Penambahan Serbuk Gergaji Kayu Jati (Tectona Grandits L.f), Pada Paduan Tanah Liat dan Abu Sampah Terhadap Kualitas Batu Bata Merah di Kabupaten Karanganyar*, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret.
- [2] Annual Book of ASTM Standards, 1998, ASTM D790-03, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, United States: ASTM International.
- [3] Annual Book of ASTM Standards, 2016, ASTM E23-16, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, United States: ASTM International.
- [4] Annual Book of ASTM Standards, 2010, ASTM D570-98, *Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*, United States: ASTM International.
- [5] Suryawan, I. G. P. A., Suardana, N. P. G., Suarsana, I. K., Lokantara, I. P., Lagawa, I. K. J., 2019, *Kekuatan Tarik dan Lentur pada Material Komposit Berpenguat Serat Jelatang*, Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Vol. 12, No. 1, ISSN: 2302-5255 (p), ISSN: 2541-5328 (e).



I Nengah Kariana

menyelesaikan studi S1 di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali dari tahun 2017 sampai 2021.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan komposit dan karakteristik dari suatu material.

Analisa Karakteristik Solar Dengan Kondensat Campuran Plastik Pasir Pembentuk *Paving Block* Melalui Uji Proximate dan *Ultimate*

I Wayan Sidhi Adnyana, Ngakan Putu Gede Suardana dan I Wayan Bandem Adnyana

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Bali mempunyai masalah yang belum terpecahkan yaitu sampah. Sampah yang sering ditemukan adalah jenis plastik kantong kresek. Plastik mempunyai keunggulan dibanding material yang lain diantaranya kuat, ringan, fleksibel, tahan karat, tidak mudah pecah, mudah diberi warna, mudah dibentuk, serta isolator panas dan listrik yang baik. Plastik terbuat dari minyak bumi, sehingga jika dipanaskan memungkinkan untuk menghasilkan BBM alternatif. Selain itu juga plastik dapat digunakan sebagai bahan pembuat paving block. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan kondensat hasil pembuatan paving block berbahan plastik jenis LDPE dengan pasir sungai (1:5 dan 1:7 massa) sebagai penguat pada suhu 200°C selama 30 menit pemanasan, serta pengaruhnya terhadap bahan bakar solar melalui uji proximate dan uji ultimate. Pada uji proximate kandungan moisture, fixed karbon, dan ash dari kondensat 1:5 lebih tinggi dari kondensat 1:7 sedangkan kandungan volatilenya lebih rendah. kondensat menyebabkan peningkatan jumlah moisture, fixed karbon, dan ash tetapi menyebabkan penurunan jumlah volatile pada solar. Pada uji ultimate kandungan karbon, nitrogen, oksigen, dan sulfur kondensat 1:5 lebih rendah dari kondensat 1:7 namun jumlah hidrogennya lebih tinggi. Kondensat 1:5 dan 1:7 menyebabkan perubahan yang bervariasi pada kandungan hidrogen, nitrogen, dan oksigen pada solar.

Kata kunci : plastik, BBM, proximate, ultimate

Abstract

There's an unresolved issue in Bali namely garbage. Trash that is often found is a type of plastic bag. Plastics have advantages over other materials, such as solid, lightweight, versatile, resistant to corrosion, not easily damaged, easy to paint, easy to mold, and good heat and electrical insulators. Plastics are made from petroleum, making it possible to produce alternative fuels when heated. Besides that, plastic can also be used as a material for making paving blocks. This research aims to determine the condensate content of the LDPE type plastic paving block with river sand (1:5 and 1:7 mass) as reinforcement at 200°C for 30 minutes of heating, and its effect on diesel fuel through proximate test and ultimate test. In the proximate test the moisture, fixed carbon, and ash content of 1: 5 condensate was higher than 1: 7 condensate, while the volatile content was lower. Condensate causes increase in the amount of moisture, fixed carbon, and ash but causes decrease in the amount of volatile diesel. In the ultimate test, carbon, nitrogen, oxygen, and sulfur content of 1: 5 condensate was lower than 1: 7 condensate but the amount of hydrogen was higher. The 1: 5 and 1: 7 condensates cause varying changes in the hydrogen, nitrogen and oxygen content of diesel fuel.

Keyword : plastic, Fuel, proximate, ultimate

1. Pendahuluan

Menjadi daerah yang mengalami kenaikan penduduk setiap tahunnya, Bali mempunyai masalah yang belum terpecahkan yaitu sampah. Seiring dengan kanikan penduduk dan wisatawan di Bali semakin lama sampah yang ada di Bali juga semakin meningkat, baik itu sampah organik maupun anorganik. Tiap tahun volume dari sampah yang tertimbun terus meningkat, ini disebabkan oleh tidak sebandingnya pengolahan sampah dengan sampah yang di hasilkan. Dari banyaknya sampah yang tertimbun di penampungan, sebagian besarnya adalah sampah anorganik, terutama jenis plastik, ini juga tidak terlepas dari kebiasaan masyarakat yang menggunakan kantong plastik hampir di setiap aktifitasnya sehingga diperlukan upaya untuk mengurangi penimbunan sampah ini. Berbeda dengan sampah organik yang akan terurai oleh tanah, sampah jenis anorganik terutama sampah plastik

sangat sulit untuk terurai sehingga mengakibatkan pencemaran lingkungan. Plastik yang sudah menjadi sampah akan berdampak negatif terhadap lingkungan karena tidak dapat terurai dengan cepat dan dapat menurunkan kesuburan tanah. Sampah plastik yang dibuang sembarangan juga dapat menyumbat saluran drainase, selokan dan sungai sehingga bisa menyebabkan banjir. Sampah plastik yang dibakar bisa mengeluarkan zat-zat yang berbahaya bagi kesehatan juga dapat menyebabkan penyakit pada saluran pernafasan dan kanker Surono[1].

Pengembangan penanganan sampah plastik yang banyak dilakukan saat ini adalah dengan mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar minyak (BBM). Penanganan ini memungkinkan untuk menyelesaikan dua permasalahan yang dihadapi yaitu penumpukan sampah plastik dan mendapatkan bahan bakar minyak (BBM) alternatif. Beberapa penelitian tentang pengolahan sampah plastik untuk

mendapatkan BBM telah dilakukan, salah satunya dilakukan oleh Untoro, 2013, melakukan penelitian berbagai metode konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak. Susila dkk, melakukan penelitian dengan mengolah kembali limbah plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) tersebut dengan cara proses pencacahan, proses pencairan dan pencampuran limbah plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dengan penguatnya yaitu pasir jenis pasir sungai dengan ukuran butir pasir 2-3mm untuk pembuatan salah satu bahan baru yaitu *paving block*. Pengolahan sampah plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) menjadi bahan campuran *paving* merupakan salah satu pengembangan dari ilmu pengetahuan yang memberikan manfaat positif untuk mengurangi masalah pada lingkungan Susila[2].

Pada penelitian ini dilakukan suatu alternatif dengan mengkondensasikan gas hasil pemanasan pada pembuatan *paving block* berbahan plastik jenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dengan penguatnya yaitu pasir jenis pasir sungai dengan ukuran butir pasir 2-3mm dengan waktu operasi selama 30 menit pada suhu 200°C. Pengolahan sampah plastik berjenis LDPE dengan mengkondensasikan gas yang dihasilkan saat proses pembuatan *paving block* sangat efektif untuk mengurangi sampah plastik dan juga diharapkan bahwa hasil kondensasi yang didapatkan dapat menjadi salah satu sumber energi alternatif. Setelah mendapatkan hasil kondensasi kemudian akan diuji dengan pengujian proximate dan juga uji ultimate untuk mengetahui kandungannya dan juga akan di campurkan dengan solar untuk mengetahui pengaruh yang akan terjadi pada solar.

Dalam penelitian ini ada beberapa rumusan masalah yang akan di kaji :

1. Bagaimana kandungan kondensasi gas pada pembuatan *paving block* tersebut pada uji *proximate* dan *ultimate*?
2. Bagaimana pengaruh kondensasi gas hasil pemanasan tersebut terhadap bahan bakar solar pada uji *proximate* dan *ultimate*?

Adapun beberapa batasan masalah yang membatasi penelitian ini antara lain:

1. Pada penelitian ini penulis menggunakan sampah plastik jenis LDPE yang di dapatkan dari TPA Suwung Serangan.
2. Pasir yang digunakan adalah jesin pasir sungai.
3. Ukuran butiran pasir yang di gunakan adalah 2-3 mm.
4. Perbandingan campuran plastik dan pasir adalah (1:5, 1:7).
5. Suhu pemanasan pada tungku adalah 200°C.

2. Dasar Teori

2.1 Pemilihan Bahan dan Proses Pengolahan

Bahan yang digunakan dalam pembuatan *paving block* terdiri dari dua bahan yaitu pasir dan plastik. Sebelum digunakan untuk membuat *paving block*,

pasir dan plastik diolah terlebih dahulu sehingga siap untuk digunakan.

1. Pengolahan Plastik

Plastik yang dipilih dalam pembuatan *paving block* adalah plastik yang berjenis LDPE, yaitu plastik yang menjadi bahan dasar pembuatan kantong kresek, selain itu jenis plastik LDPE memiliki titik transisi yang relatif rendah. Menurut Surono[3] titik transisi plastik jenis LDPE berada pada suhu 115 °C sehingga bisa diolah untuk menjadi bahan perekat dalam pembuatan *paving block* menggantikan semen. Sebelum digunakan menjadi bahan dasar perekat limbah kantong kresek di cuci bersih beberapa kali untuk membersihkan limbah kantong kresek dari zat – zat yang menempel kemudian dikeringkan. Setelah kering, kantong kresek yang telah bersih dicacah pada mesin pencacah agar menjadi potongan kecil sehingga mudah merekatkan pasir saat di panaskan bersamaan dengan pasir.

2. Pengolahan Pasir

Pasir yang digunakan sebagai bahan pembuatan *paving block* adalah pasir sungai, karena memiliki sifat yang relatif kuat dan harganya dipasaran cukup murah sehingga pasir sungai sangat cocok digunakan sebagai bahan baku pembuatan *paving block*. Pasir sungai yang akan digunakan dicuci bersih untuk menghilangkan kotoran yang menempel, setelah pasir bersih dari bahan lain, pasir kemudian diayak sehingga mendapatkan butiran pasir antara 2-3 mm. Setelah itu pasir dikeringkan lagi dengan oven untuk mengurangi sebanyak mungkin kandungan airnya. Setelah proses pengeringan dengan oven selama 24 jam, pasir siap digunakan untuk membuat *paving block*.

3. Waktu dan Temperatur Pencampuran

Waktu yang diberikan untuk mencampur plastik dan pasir adalah 30 menit pada suhu 200° C, pada kondisi ini plastik akan mulai meleleh namun tidak hangus terbakar dan memiliki waktu yang cukup untuk mengikat pasir sehingga pasir dan plastik akan bercampur dengan baik dan menghasilkan *paving block* yang bagus. Proses pencampuran tidak boleh terlalu singkat ataupun terlalu lama dan temperatur pada tungku pencampuran juga tidak boleh terlalu tinggi, karena plastik membutuhkan waktu untuk meleleh dan merekat pada pasir. Jika waktu pencampuran plastik pasir terlalu singkat, plastik tidak akan merekat dengan baik pada pasir sehingga *paving block* tidak akan menjadi kuat. Namun jika pencampuran dilakukan terlalu lama, plastik akan hangus dan kehilangan daya rekatnya, sehingga plastik tidak akan bisa mengikat pasir dan pencampuran tidak bisa dilakukan.

2.2 Uji Proximate

Pengujian proximate dilakukan terhadap sampel material untuk menentukan kandungan air (moisture), zat terbang (volatile matter), abu serta karbon tetap (fixed carbon).

2.3 Uji Ultimate

Pengujian ultimate merupakan pengujian untuk menentukan berbagai macam kandungan unsur – unsur kimia seperti karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur pada suatu material Ekayuliana[4].

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat dan bahan, diantaranya sebagai berikut:

3.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi limbah plastik berjenis LDPE (*Low Density Polyethylene*) dan pasir sungai sebagai bahan dasar pembuatan paving block, serta solar yang akan dicampurkan dengan kondensat.

3.2 Alat Penelitian

1. Alat uji : Alat uji proximate menggunakan tipe 701 leco dan alat uji ultimate menggunakan tipe Leco 628.
2. Alat pemanas plastik dan pencampur dengan pasir yang digunakan untuk membuat paving block dan kondensor untuk mengkondensasi gas yang dihasilkan selama proses pemanasan.
3. Alat ukur : *Infrared thermometer*, timbangan digital
4. Alat bantu : mesin pencacah limbah plastik, ayakan pasir, botol, oven.

3.3 Langkah Penelitian

1. Pencacahan Plastik

Plastik yang akan digunakan untuk penelitian dicacah agar menjadi potongan kecil yang bertujuan memudahkan proses pengadukan agar plastik dapat bercampur dengan pasir secara merata pada saat proses pemanasan dilakukan.

2. Pengeringan Pasir

Pasir diayak dengan ukuran butiran 3 mm, setelah proses pengayakan selesai pasir kemudian dicuci terlebih dahulu untuk menghilangkan kandungan debu dan material lain yang menempel pada pasir, setelah dicuci hingga bersih, pasir kemudian dikeringkan dengan menggunakan oven pasir selama 24 jam untuk mengurangi kadar air di dalam pasir sebelum digunakan untuk pembentukan *paving block*.

3. Proses Pencampuran Plastik dan Pasir

Plastik yang sudah berukuran kecil kemudian dicampur dengan pasir dengan perbandingan plastik dan pasir 1:5 dan 1:7 kemudian dipanaskan dengan suhu 200° C sehingga plastik dapat meleleh dan merekat pada pasir. Proses pemanasan ini dilakukan selama 30 menit.

4. Mendapatkan Cairan Kondensat

Selama proses pemanasan dilakukan akan menimbulkan gas. Gas ini kemudian dialirkan ke kondensor untuk dilakukan kondensasi. selama proses kondensasi gas ini terjadi, air dialirkan di tabung kondensor sebagai media pendingin. Setelah beberapa saat pendinginan, gas yang didinginkan akan berubah menjadi cairan yang disebut kondensat, kondensat ini kemudian ditampung di dalam botol.

5. Campuran Solar dan Kondensat

Setelah didapatkan cairan kondensat, tahap selanjutnya adalah mencampurkan cairan kondensat tersebut dengan solar. Pencampuran dilakukan dengan menambahkan 90 % solar ke dalam masing – masing kondensat sehingga didapatkan dua macam pencampuran yaitu 90 % solar dengan 10% kandungan kondensat 1:5 dan 90% solar dengan 10% kandungan kondensat 1:7.

6. Persiapan Pengujian

Cairan kondensat dan juga campuran kondensat dan solar kemudian disiapkan untuk pengujian di laboratorium dengan dua proses pengujian yaitu pengujian *Proximate Analysis* dan uji *Ultimate Analysis*.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Uji Proximate

Pengujian proximate dilakukan terhadap sampel material untuk menentukan kandungan air (moisture), zat terbang (volatile matter), abu (ash) serta karbon tetap (fixed carbon).



Gambar 1. Alat uji Proximate

Setelah melakukan uji di laboratorium, data yang di dapatkan pada masing - masing unsur moisture, volatile, fixed karbon, dan ash diolah kedalam bentuk grafik untuk membantu membaca perbandingan jumlah kandungan unsurnya.

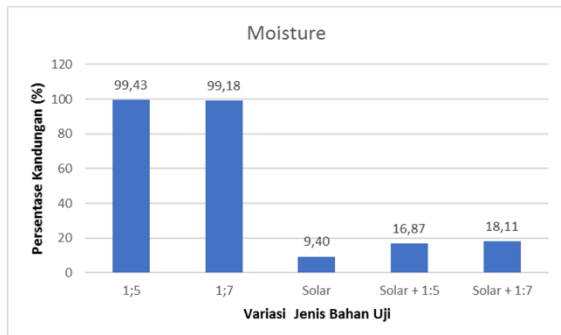
Tabel 1. Hasil Uji Proximate

Uji Proximate	Cairan Kondensat Plastik Dengan Pasir		Campuran Kondensat Dengan Solar		
	1 : 5	1 : 7	Solar	Solar + 10% 1:5	Solar + 10% 1:7
Moisture (%)	99,43	99,18	9,40	16,87	18,11
Volatile (%)	0,66	1,04	90,69	82,97	81,65
Fixed Karbon (%)	0,05	0,01	0,22	0,25	0,29
Ash (%)	-	-	-	-	-

1. Moisture

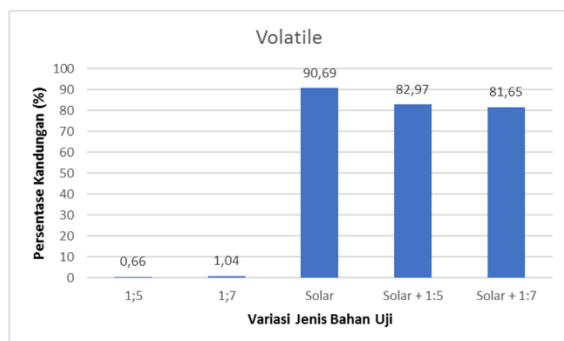
Variasi bahan uji kondensat 1:5 dan 1 :7 memiliki jumlah moisture yang sangat tinggi yaitu hingga 99 % dari berat yang diuji, ini menandakan bahwa kondensat yang didapatkan masih berupa air karena memiliki jumlah kandungan moisture yang tinggi, kandungan moisture didapatkan saat fase awal dilakukannya pengujian yaitu saat suhu pada alat naik hingga 100 °C dan menguapkan kandungan air didalam bahan uji tersebut. Pada pengujian bahan bakar solar, persentase moisturenya naik saat

ditambahkan dengan kondensat. Ini menandakan bahwa kondensat 1:5 dan kondensat 1:7 menyebabkan meningkatnya jumlah kandungan moisture yang terkandung pada solar, ini terjadi karena jumlah kandungan moisture pada kondensat yang tinggi menguap saat pengujian berlangsung sehingga persentase berat yang hilang saat pengujian moisture juga meningkat.



Gambar 2. Grafik Unsur Moisture

2. Volatile

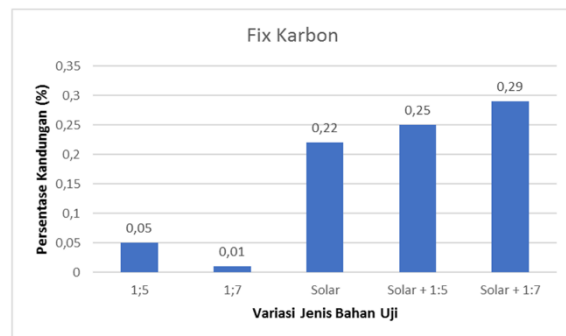


Gambar 3. Grafik Unsur Volatile

kondensat 1:5 dan 1:7 kandungan volatile sangat kecil yaitu dibawah 1.5% . Ini disebabkan karena sejumlah besar beratnya sudah menguap pada fase moisture yang menyisakan 1% kandungan yang kemudian bereaksi pada saat fase volatile ini. Namun pada variasi uji solar maupun solar dengan kondensat, jumlah volatilinya tinggi yang disebabkan karena bereaksinya bahan uji dengan suhu tinggi sehingga menyebabkan terjadinya pembakaran. Kondensat yang dicampurkan kedalam solar menyebabkan penurunan jumlah kandungan volatile pada solar hingga 9%.

3. Fixed Carbon

Fixed carbon yang terkandung pada kondensat maupun solar serta solar dengan campuran kondensat sangat kecil namun, pada solar yang telah dicampurkan dengan kondensat terlihat jumlah fixed karbonnya meningkat Ini disebabkan karena fixed karbon adalah unsur yang didapatkan setelah selesai melewati fase volatile, sehingga pada fase fixed karbon ini tersisa berat dari bahan uji yang tidak habis bereaksi pada fase volatile direaksikan kembali untuk mendapatkan jumlah karbon yang ada didalam bahan uji tersebut.



Gambar 4. Grafik Unsur Fixed Carbon

4. Ash

Ash adalah abu sisa pembakaran pada proses akhir sebelum proses pengujian Proximate selesai. Pada saat pengujian tidak didapatkan hasil ash karena bahan uji yang digunakan adalah cairan sehingga selama proses pengujian proximate ini berlangsung bahan uji habis bereaksi dan tidak meninggalkan sisa abu saat pengujian berakhir.

4.2 Uji Ultimate

Pengujian ultimate merupakan pengujian untuk menentukan berbagai macam kandungan unsur – unsur kimia seperti karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan sulfur.



Gambar 5. Alat Uji Ultimate

Uji ultimate meliputi uji kandungan karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sulfur. Data yang didapatkan setelah dilakukan pengujian diolah kedalam bentuk grafik untuk membantu membaca perbandingan jumlah kandungan unsurnya.

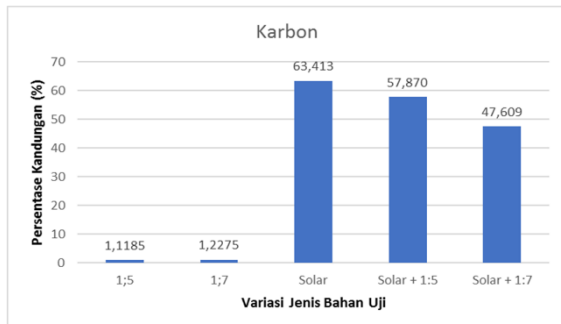
Tabel 2. Hasil Uji Ultimate

Uji Ultimate	Cairan Kondensat Plastik Dengan Pasir		Campuran Kondensat Dengan Solar		
	1 : 5	1 : 7	Solar	Solar + 10% 1:5	Solar + 10% 1:7
Karbon (%)	1,1185	1,2275	63,413	57,870	47,609
Hidrogen (%)	10,814	10,795	10,029	10,246	9,5661
Nitrogen (%)	-	-	-	-	-
Oksigen (%)	-	-	25,0668	20,5863	34,804
Sulfur (%)	-	-	0,3419	0,2190	0,1729

1. Karbon

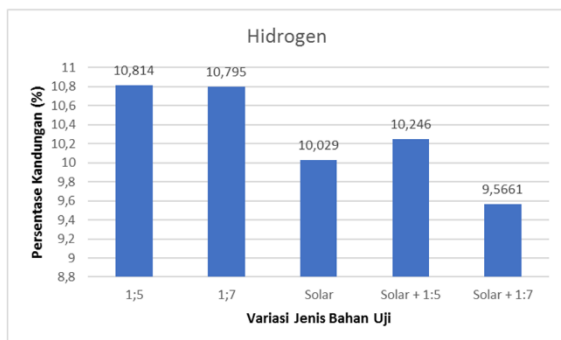
Unsur karbon adalah unsur yang berpengaruh dan penting untuk pada bahan bakar, karena unsur karbon adalah penentu apakah suatu material dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pembakaran atau tidak. Semakin banyak unsur karbon didalam suatu material semakin baik material tersebut dapat terbakar. Dilihat dari data yang didapatkan pada saat pengujian, bahan bakar solar memiliki nilai karbon yang tinggi sedangkan kondensat memiliki nilai

karbon yang rendah namun tetap terdeteksi. Kemudian pada solar yang telah dicampurkan dengan kondensat, kandungan unsur karbonnya menurun. Ini berarti pada kondensat yang didapatkan belum memungkinkan untuk dijadikan sebagai bahan bakar, tetapi masih memungkinkan digunakan sebagai bahan baku bahan bakar karena kondensat memiliki unsur karbon yang menjadi salah satu unsur utama pembentuk bahan bakar.



Gambar 6. Grafik Unsur Karbon

2. Hidrogen



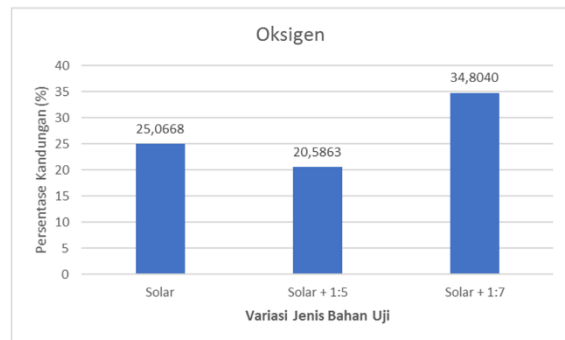
Gambar 7. Grafik Unsur Hidrogen

Jumlah unsur hidrogen pada kondensat 1:5 lebih tinggi dari pada kondensat 1:7, sedangkan pada campuran solar dengan kondensat, kondensat membuat perubahan yang bervariasi. Jumlah unsur hidrogen setiap bahan uji berkisar pada 9% hingga 10%. unsur hidrogen juga berpengaruh pada bahan bakar, karena suatu material dapat dikatakan menjadi bahan bakar bila memiliki paling tidak unsur C (karbon) dan H (hidrogen). Selama proses pembakaran, unsur hidrogen akan bereaksi dengan unsur oksigen dan akan menghasilkan H₂O. Unsur hidrogen digunakan sebagai parameter untuk menghitung nilai kalor dan juga *moisture content*.

3. Nitrogen

Pada pengujian kandungan unsur nitrogen, bahan uji kondensat maupun solar yang telah dicampur dengan kondensat tidak terdeteksi adanya unsur nitrogen. Hal ini dapat dikatakan baik karena pada saat proses pembakaran berlangsung, unsur nitrogen akan bereaksi dengan udara sekitar menjadi NO_x yang akan menjadi polutan untuk lingkungan. Tidak terdeteksinya unsur nitrogen menandakan bahwa bahan uji ramah lingkungan atau minim dengan polusi.

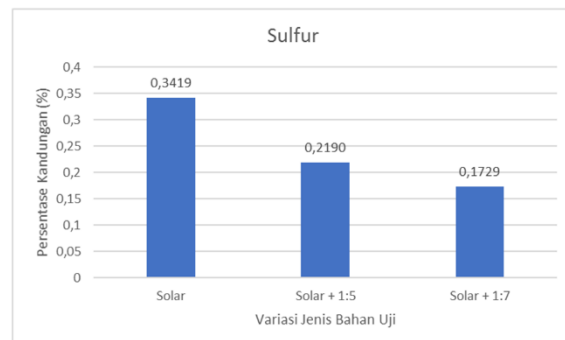
4. Oksigen



Gambar 8. Grafik Unsur Oksigen

Pada kondensat 1:5 dan 1:7 tidak terdeteksi adanya unsur oksigen yang terkandung, sedangkan pada solar unsur oksigennya terdeteksi hingga 25% dan solar yang telah dicampur dengan kondensat terdeteksi adanya kandungan oksigen yaitu berkisar 20% hingga 34%. Unsur oksigen pada bahan bakar mengindikasikan jumlah oksigen yang terkandung dalam bahan bakar tersebut, hal ini digunakan sebagai indikasi mudah atau tidaknya bahan bakar dinyalakan karena semakin tinggi kandungan oksigen pada suatu bahan bakar maka bahan bakar tidak memerlukan banyak tambahan oksigen untuk proses pembakaran.

5. Sulfur



Gambar 9. Grafik Unsur Sulfur

Pada kondensat 1:5 dan 1:7 tidak terdeteksi adanya kandungan unsur sulfur sedangkan pada solar unsur sulfurnya terdeteksi 0,3419% dan solar yang telah dicampur dengan kondensat terdeteksi adanya kandungan sulfur yaitu sebesar 0,2190% dan 0,1729%. Ini menandakan bahwa campuran kondensat kedalam solar menyebabkan penurunan jumlah kandungan sulfur pada solar, sama halnya dengan nitrogen, sulfur juga merupakan polutan yang ditimbulkan selama proses pembakaran berlangsung, dan akan menjadi SO_x saat bereaksi dengan udara sekitar. Penurunan yang dihasilkan oleh kondensat terhadap jumlah sulfur pada solar bisa menjadi indikasi kondensat yang didapatkan dapat digunakan sebagai bahan dasar atau bahan pencampur untuk mendapatkan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dan mengurangi polusi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan data dan analisa penelitian uji Proxymate dan Ultimate dengan lima variasi bahan uji. Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan yaitu:

1. Pada uji proximate kandungan moisture dan fixed karbon dari kondensat 1:5 lebih tinggi dari kondensat 1:7 sedangkan kandungan volatilenya lebih rendah dan tidak terdeteksi adanya kandungan ash. sedangkan Pada uji ultimate kandungan karbon kondensat 1:5 lebih rendah dari kondensat 1:7 namun jumlah hidrogennya lebih tinggi pada pengujian tidak terdeteksi adanya kandungan nitrogen, oksigen, dan juga sulfur pada kondensat.
2. Pada uji proximate kondensat menyebabkan peningkatan jumlah moisture dan fixed karbon tetapi menyebabkan penurunan jumlah volatile pada solar. Sedangkan pada uji ultimate Kondensat 1:5 dan 1:7 menyebabkan penurunan jumlah kandungan pada karbon dan sulfur serta menyebabkan perubahan yang bervariasi pada kandungan hidrogen dan oksigen pada solar.

Daftar Pustaka

- [1] Surono, Untoro Budi, and Ismanto, 2016, *Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP, PET dan PE Menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya*, J. Mek. Sist. Termal, vol.1, no. 1, pp 32-37.
- [2] Susila, I Made, Ngakan Putu Gede Suardana, Cok Istri Putri Kusuma Kencanawati, I Nyoman Arya Thanaya, and I Wayan Bandem Adnyana, 2019, *The Effect Of Composition Of Plastic Waste Low Density Polyethylene (LDPE) With Sand To Pressure Strength And Density Of Sand/LDPE Composites*, International Conference on Design, Energy, Materials and Manufacture, pp. 1-7.
- [3] Surono, Untoro Budi, 2013, *Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak*, Jurnal Teknik vol.3, no. 1, pp. 32-40.
- [4] Ekayuliana, Arifia, dan Noor Hidayati, 2020, *Analisis Nilai Kalor dan Nilai Ultimate Briket Sampah Organik Dengan Bubur Kertas*, Jurnal Mekanik Terapan, Vol. 01, no 02, pp.107-115.



Audit dan Analisis Energi Listrik di Hotel Bali Dynasty Resort

I Gede Yogi Iswara , I.G.B Wijaya Kusuma , I Made Dwi Budiana Penindra
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk melaksanakan kegiatan audit energi serta dilakukan perhitungan untuk nilai Intensitas Konsumsi Energi (IKE) di Hotel Bali Dynasty Resort. Dengan observasi langsung dilapangan serta wawancara dengan pihak hotel yang dilakukan untuk metode pengumpulan data maka seluruh data untuk proses audit dan perhitungan IKE bisa di dapatkan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di Hotel Bali Dynasty Resort maka dapat diambil kesimpulan (1) Kegiatan audit energi yang dilakukan untuk mengidentifikasi banyaknya energi yang digunakan oleh Hotel Bali Dynasty Resort, kemudian melakukan perhitungan Intensitas Konsumsi Energi (IKE) untuk menentukan boros atau hematnya penggunaan energinya (2) Tingkat konsumsi energi di Hotel Bali Dynasty Resort setiap bulannya berbeda-beda. Nilai IKE yang telah diketahui antara lain gedung NPW sebesar 9,18 kWh/m²/bulan, gedung NGW sebesar 11,12 kWh/m²/bulan, gedung SPW sebesar 7,79 kWh/m²/bulan, gedung SGW sebesar 8,15 kWh/m²/bulan, dan gedung BW sebesar 10,20 kWh/m²/bulan. Dengan nilai IKE seperti hasil perhitungan untuk 5 gedung tersebut dapat dikategorikan penggunaan energinya “efisien”. Adapun saran yang bisa di berikan yaitu (1) Mengganti alat elektronik yang banyak mengkonsumsi energi baik secara satuan maupun dalam jumlah banyak untuk tetap menjaga penggunaan energi listrik efisien (2) Mensosialisasikan tentang perilaku hemat listrik kepada semua pihak dalam aspek tidak mengurangi kenyamanan (3) Melakukan audit bulanan sebagai acuan apakah hotel berhasil mengefisienkan konsumsi energi setiap bulannya, sehingga dapat diambil tindakan atau untuk terus meningkatkan efisiensi penggunaan energi tanpa mengurangi kenyamanan yang diberikan pihak hotel kepada tamu pengunjung.

Kata Kunci : **Audit Energi, IKE**

Abstract

This study aims to carry out energy audit activities and perform calculations for the value of Energy Consumption Intensity (IKE) at the Bali Dynasty Resort Hotel. With direct field observations and interviews with the hotel for the data collection method, all data for the audit process and IKE calculations can be obtained. Based on the research that has been carried out at the Bali Dynasty Resort Hotel, conclusions can be drawn (1) The energy audit activity is carried out to identify the amount of energy used by the Bali Dynasty Resort Hotel, then calculates the Energy Consumption Intensity (IKE) to determine the wasteful or economical use of its energy. (2) The level of energy consumption at Bali Dynasty Resort Hotel varies every month. The known IKE values include the NPW building of 9.18 kWh / m² / month, the NGW building of 11.12 kWh / m² / month, the SPW building of 7.79 kWh / m² / month, the SGW building of 8.15 kWh / m² / month, and building BW of 10.20 kWh / m² / month. With the IKE value as calculated for the 5 buildings, the energy use can be categorized as “efficient”. As for the suggestions that can be given, namely (1) Replacing electronic devices that consume a lot of energy both individually and in large quantities to maintain efficient use of electrical energy (2) Socializing about electricity-saving behavior to all parties in the aspect of not reducing comfort (3) Conduct monthly audits as a reference for whether the hotel is successful in reducing energy consumption each month, so that action can be taken or to continue to improve energy efficiency without reducing the comfort provided by the hotel to guest visitors.

Keywords: Energy Audit, IKE

1. Pendahuluan

Seiring berjalannya waktu perkembangan ilmu dan teknologi dapat kita rasakan semakin pesat. Dimana semakin banyak kegiatan masyarakat makin terbantu dengan adanya kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi. Adanya perkembangan teknologi mengakibatkan alat elektronik menjadi dominan digunakan oleh masyarakat dalam membantu menyelesaikan pekerjaan, bahkan dalam standar gengsi kehidupan masa kini. Banyaknya penggunaan alat elektronik berpengaruh pada konsumsi energi listrik yang diperlukan, karena banyak penggunaan akan berbanding lurus dengan energi yang dibutuhkan. Penggunaan energi listrik adalah salah satu penunjang penting di segala sektor untuk perkembangan masa kini [1]. Menghadapi masa

pandemic covid-19 banyak sector yang terkena dampaknya, salah satunya yaitu sektor pariwisata. Banyak upaya pemerintah provinsi Bali dalam upaya menggalakkan kembali pariwisata di Bali seperti mempersiapkan sarana dan prasarana yang dapat menunjang kedatangan para wisatawan ke Bali. Salah satu sarana penunjangnya ialah Hotel, dimana Hotel Bali Dynasty adalah salah satu hotel yang menjadi penunjang pariwisata untuk wisatawan yang datang ke Bali. Hotel Bali Dynasty Resort merupakan hotel berbintang 5 yang memiliki konsep bangunan tersendiri yang menarik perhatian wisatawan. Hal tersebut didukung dengan adanya pangsa pasarnya yang tidak berubah yaitu wisatawan nusantara, dimana tingkat rata-rata hunian pertahunnya kisaran 67%. Tetapi seiring berjalannya waktu terjadi peningkatan biaya tarif listrik yang disertai dengan

munculnya pandemic ini sehingga berdampak menurunnya jumlah wisatawan nusantara yang datang ke Bali. Oleh karena itu diperlukan kegiatan Analisis dan Audit terhadap pemakaian energi listrik agar operasional hotel tetap berjalan tanpa ada penambahan beban hotel atau menaikkan tarif untuk harga sewa kamar untuk para wisatawan.

2. Dasar Teori

2.1 Audit Energi

Dapat diartikan sebagai sesuatu kegiatan mengidentifikasi energi yang disertai dengan Langkah dan tahapan untuk tercapainya suatu konservasi energi [2].

2.2 IKE (Intensitas Konsumsi Energi)

Sebuah nilai yang didapat dari hasil perbandingan antara konsumsi energi dengan luas bangunan dalam kurun waktu tertentu. Rumus untuk perhitungan IKE yakni [3].

$$IKE = \frac{\text{total konsumsi energi (kWh)}}{\text{luas lantai total (m}^2\text{)}} \quad (1)$$

3. Metode Penelitian

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Desember 2020 sampai dengan Januari 2021. Dengan lokasi penelitian bertempat di Hotel Bali Dynasty Resort.

3.2 Metode Pengumpulan Data

1. Mengobservasi gedung untuk menghitung nilai IKE
2. Mengobservasi untuk memperoleh data beban terpasang pada bangunan hotel
3. Wawancara Bersama pihak hotel, manajemen, serta teknisi hotel untuk memperoleh data penguat hitungan seperti luas kamar, beban listrik pada setiap kamar, dan data kondisi dari lingkungan sekitar dengan kurun waktu 2 tahun terakhir
4. Dokumentasi untuk data penggunaan energi listrik, tagihan biaya listrik, denah bangunan gedung dan arsip bukti penelitian

3.3 Variabel Penelitian dan Metode Pengumpulan Data

Variabel dalam penelitian ini ialah tingkat konsumsi energi listrik, luas bangunan gedung hotel, dan nilai IKE. Untuk data konsumsi energi listriknya menggunakan data dari 2 tahun terakhir, dengan memperoleh data konsumsi energi serta luas bangunan gedung maka dari perbandingan tersebut didapatkan nilai dari IKE. Setelah menemukan nilai IKE, kemudian mengidentifikasi peluang efisiensinya dengan nilai IKE yang standar yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Permen ESDM No 13/2012 dan Pergub DKI No. 156/2012 yang mengacu pada ASEAN USAID 1987 tentang Standar IKE yaitu 240Kwh/m²/tahun pada gedung komersial.

Jika nilai IKE yang didapat melalui perhitungan dengan nilai IKE standar maka gedung hotel dapat dikatakan efisien dalam penggunaan energi listrik. Dengan keadaan seperti itu harus dipertahankan agar tahun berikutnya tidak mengalami peningkatan konsumsi energi. Namun jika nilai IKE hasil perhitungan lebih besar dari nilai IKE standar maka gedung hotel tersebut dapat dikatakan boros, sehingga perlu analisis dan dievaluasi untuk penggunaan energi listriknya.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil Perhitungan

4.1.1 Perhitungan Intensitas Konsumsi Energi

Dalam penelitian ini menggunakan data konsumsi energi di tahun 2019 dan juga luas bangunan gedung di Hotel Bali Dynasty Resort. Berikut data-data yang digunakan.

Tabel 1. Data konsumsi energi tahun 2019

	NPW (kWh)	NGW (kWh)	SPW (kWh)	SGW (kWh)	BW (kWh)
Jan	37.772	44.557,6	34.340	39.904	32.283,4
Feb	34.236,8	40.494,4	21.410	17.784	22.068,2
Mar	35.126	42.189	24.120	23.098	21.838
Apr	37.303,60	41.978,6	30.810	33.080,46	29.043,6
Mei	35.766	40.546	28.590	29.955,1	25.805
Jun	31.263,60	37.170	27.670	30.809,4	25.751,4
Jul	29.395,40	34.394	27.070	30.141	24.009,6
Aug	27.997	33.078,8	26.910	30.556,4	22.784,4
Sep	28.712	34.784,6	25.700	28.842	22.432,4
Okt	35.068,80	40.254,8	32.470	35.520,60	27.552,8
Nov	33.746,8	36.625,8	31.040	33.408,8	25.279,6
Des	36.385,40	42.180,6	35.200	38.856,2	28.347,6
total	402.773,4	468.254,2	345.330	371.956	307.196
Rata-rata	33.564,45	39.021,18	28.777,50	30.996,33	25.599,67

(sumber : Pihak Hotel Bali Dynasty)

Tabel 2. Data Luas Bangunan Gedung

Gedung	Luas (m ²)
NPW	3.656,25
NGW	3.510
SPW	3.698,4
SGW	3.802,5
BW	2.511

Keterangan :

- NPW = North Pool Wing
- NGW = North Garden Wing
- SPW = South Pool Wing
- SGW = South Garden Wing
- BW = Banyan Wing

Dari kedua variabel data diatas bisa dihitung untuk Intensitas Konsumsi Energinya dengan rumus perhitungan IKE. Nilai IKE yang diperoleh sebagai berikut.

Tabel 3. Data Nilai IKE Gedung NPW

	Konsumsi Energi (kWh)	IKE (kWh/m ² /bulan)
Jan	37.772	10,33
Feb	34.236,8	9,36
Mar	35.126	9,61
Apr	37.303,60	10,20
Mei	35.766	9,78
Jun	31.263,60	8,55
Jul	29.395,40	8,04
Aug	27.997	7,66
Sep	28.712	7,85
Okt	35.068,80	9,59
Nov	33.746,8	9,22
Des	36.385,40	9,95
Rata-rata	33.564,45	9,18

Tabel 6. Data Nilai IKE Gedung SGW

	Konsumsi Energi (kWh)	IKE (kWh/m ² /bulan)
Jan	39.904	10,49
Feb	17.784	4,68
Mar	23.098	6,07
Apr	33.080,46	8,70
Mei	29.955,1	7,88
Jun	30.809,4	8,10
Jul	30.141	7,93
Aug	30.556,4	8,05
Sep	28.842	7,59
Okt	35.520,60	9,34
Nov	33.408,8	8,79
Des	38.856,2	10,22
Rata-rata	30.996,33	8,15

Tabel 4. Data Nilai IKE Gedung NGW

	Konsumsi Energi (kWh)	IKE (kWh/m ² /bulan)
Jan	44.557,6	12,69
Feb	40.494,4	11,54
Mar	42.189	12,02
Apr	41.978,6	11,96
Mei	40.546	11,55
Jun	37.170	10,59
Jul	34.394	9,79
Aug	33.078,8	9,42
Sep	34.784,6	9,91
Okt	40.254,8	11,47
Nov	36.625,8	10,43
Des	42.180,6	12,02
Rata-rata	39.021,18	11,12

Tabel 7. Data Nilai IKE Gedung BW

	Konsumsi Energi (kWh)	IKE (kWh/m ² /bulan)
Jan	32.283,4	12,86
Feb	22.068,2	8,79
Mar	21.838	8,69
Apr	29.043,6	11,57
Mei	25.805	10,28
Jun	25.751,4	10,26
Jul	24.009,6	9,56
Aug	22.784,4	9,07
Sep	22.432,4	8,93
Okt	27.552,8	10,97
Nov	25.279,6	10,06
Des	28.347,6	11,29
Rata-rata	25.599,67	10,20

Tabel 5. Data Nilai IKE Gedung SPW

	Konsumsi Energi (kWh)	IKE (kWh/m ² /bulan)
Jan	34.340	9,28
Feb	21.410	5,79
Mar	24.120	6,52
Apr	30.810	8,33
Mei	28.590	7,73
Jun	27.670	7,48
Jul	27.070	7,31
Aug	26.910	7,28
Sep	25.700	6,95
Okt	32.470	8,78
Nov	31.040	8,39
Des	35.200	9,52
Rata-rata	28.777,50	7,79

4.2. Pembahasan

4.2.1 Audit Energi

Kegiatan audit energi yang dilaksanakan berdasarkan atas permintaan pihak hotel, yang dimana memiliki perencanaan kedepan untuk memasang AC untuk semua kamar menjadi 2 PK. Sedangkan untuk kondisi terkini AC yang terpasang belum semua 2 PK. Sesuai permintaan hotel maka kegiatan audit energi awal dimulai dari mengumpulkan data konsumsi energi selama 1 tahun di tahun 2019 dengan periode Januari sampai dengan Desember, karena menurut data tingkat hunian di tahun 2019 merupakan tahun dengan tingkat hunian tertinggi dari tahun sebelumnya.

Dengan seperti yang tercantum pada tabel diatas, dapat dilihat bahwa tingkat konsumsi energi di Hotel Bali Dynasty Resort setiap bulannya berbeda-beda dari masing-masing gedung. Untuk gedung NPW dengan konsumsi energi rata-rata pertahunnya sebesar 33.564,45 kWh/bulan dan nilai IKE sebesar 9,18 kWh/m²/bulan. Kemudian gedung NGW tingkat

konsumsi energi rata-ratanya pertahun sebesar 39.021,18 kWh/bulan dengan nilai IKE sebesar 11,12 kWh/m²/bulan. Selanjutnya gedung SPW konsumsi energi rata-rata pertahunnya sebesar 28.777,50 kWh/bulan dan nilai IKE sebesar 7,79 kWh/m²/bulan. Lalu gedung SGW memiliki tingkat konsumsi energi rata-rata pertahun sebesar 30.996,33 kWh/bulan dengan nilai IKE sebesar 10,22 kWh/m²/bulan. gedung BW memiliki tingkat konsumsi energi rata-rata pertahun sebesar 25.599,67 kWh/bulan dan nilai IKE sebesar 10,20 kWh/m²/bulan

Namun tidak hanya data di tahun 2019, audit dan analisa dilakukan juga menggunakan data di tahun 2020. Untuk mengetahui apakah selama pandemi tingkat konsumsi energi di Hotel Bali Dinasty Resort tetap efisien. Seperti yang terjadi di lapangan selama pandemi bali sempat mengalami kondisi *lockdown*, jadi tidak ada kunjungan wisatawan dan dibuka kembali ketika memasuki masa new normal. Berikut data konsumsi energi ditahun 2020.

Tabel 8. Data konsumsi energi tahun 2020

	NPW (kWh)	NGW (kWh)	SPW (kWh)	SGW (kWh)	BW (kWh)
Jan	40.447,4	38.985,6	35.820,0	39.583,6	28.736,4
Feb	20.860	16.781,2	30.600,0	31.115,4	18.205,2
Mar	19.279,6	5.102,0	26.670,0	19.031,0	6.572,0
Apr	272,40	884,40	1.300,00	478,00	849,60
Mei	332,2	451,6	4.270,0	599,8	1.424,8
Jun	1.041,40	375,20	3.640,00	559,40	1.059,20
Jul	541,40	688,00	4.950,00	310,80	530,80
Aug	921,6	330,4	9.670,00	1.895,8	1.985,2
Sep	3.286,8	2.573,6	7.120,0	5.110,6	4.216,8
Okt	11.887,00	5.052,80	450,00	171,20	631,20
Nov	22.204,4	14.704,4	5.070,0	4.384,4	1.966,0
Des	24.971,20	17.085,20	11.470,00	9.713,40	7.446,40
Total	146.046,4	103.014,4	141.030,0	112.952,4	73.623,6
Rata-rata	12.170,53	8.584,53	11.752,50	9.412,70	6.135,30

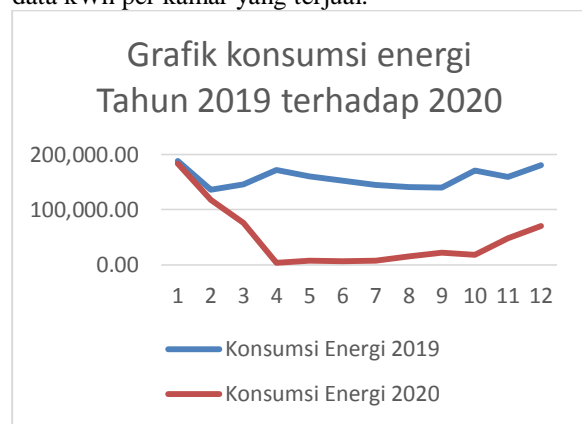
Dengan diketahui data konsumsi energi ditahun 2020 maka bisa juga dihitung untuk nilai IKE. Untuk perhitungan nilai IKE sama seperti perhitungan IKE di tahun 2019 seperti di atas. Untuk nilai IKE setiap Gedung ditahun 2020 sebagai berikut.

Tabel 9. Data nilai IKE tahun 2020

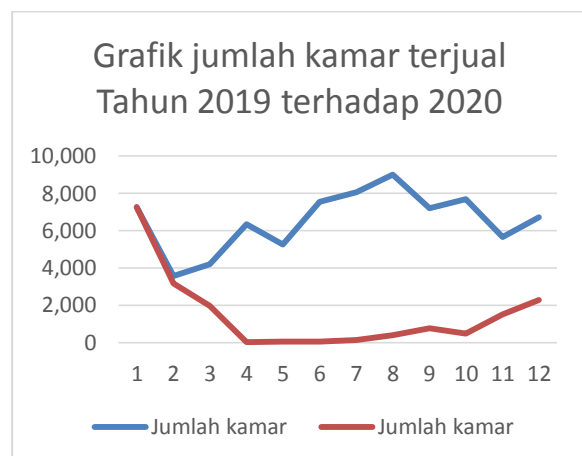
	(NPW) kWh/m ² /bulan	(NGW) kWh/m ² /bulan	(SPW) kWh/m ² /bulan	(SGW) kWh/m ² /bulan	(BW) kWh/m ² /bulan
Jan	11,06	11,11	9,69	10,41	11,44
Feb	5,70	4,78	8,27	8,18	7,25
Mar	5,27	1,45	7,21	5,0	2,62
Apr	0,08	0,25	0,35	0,13	0,34
Mei	0,1	0,13	1,15	0,16	0,57
Jun	0,28	0,11	0,98	0,15	0,42

Jul	0,15	0,2	1,34	0,08	0,21
Aug	0,25	0,09	2,61	0,5	0,79
Sep	0,9	0,73	1,93	1,34	1,68
Okt	3,25	1,44	0,12	0,05	0,25
Nov	6,07	4,2	1,37	1,15	0,78
Des	6,83	4,88	3,10	2,55	2,97
Rata-rata	3,33	2,45	3,18	2,48	2,44

Dalam melakukan analisis data, dapat ditemukan bahwa tidak hanya IKE yang menjadi variable penentu tingkat efisiensi dari penggunaan energi. Beberapa variabel lain seperti data kWh per kamar juga bisa digunakan sebagai salah satu variabel pertimbangan. Perhitungan untuk data kWh per kamar yang terjual dapat dilihat dan dianalisis bagaimana tingkat konsumsi energi untuk bagian yang lebih detail yakni kamar dalam Gedung. Berikut data kWh per kamar yang terjual.



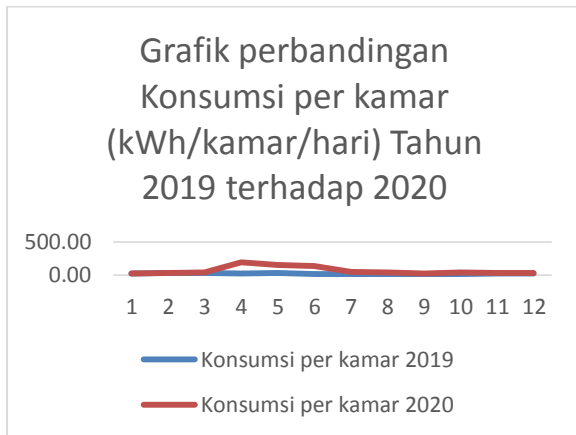
Gambar 1. Grafik Konsumsi Energi Tahun 2019 terhadap 2020



Gambar 2. Grafik Jumlah Kamar Terjual Tahun 2019 terhadap 2020

Data yang telah diperoleh dimasukkan menjadi bentuk grafik. Pada grafik ini ditemukan suatu permasalahan. Seperti yang dapat dilihat konsumsi energi ditahun 2019 dengan grafik penjualan kamar ditahun 2019. Ketika penjualan kamar meningkat namun pada grafik konsumsi energi malah menurun, khususnya memasuki bulan juni dimana kamar terjual meningkat hingga di puncak tertinggi dibulan

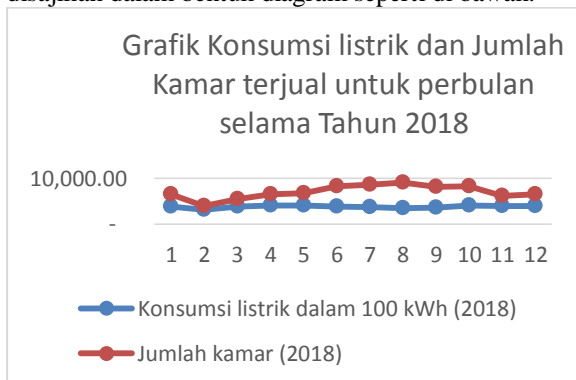
agustus. Hal ini bertolak belakang dengan grafik konsumsi energi ditahun 2019. Sehingga perlu dianalisa dan diteliti hubungan jumlah kamar yang terjual dengan konsumsi energi untuk di tahun 2019.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Konsumsi perkamar

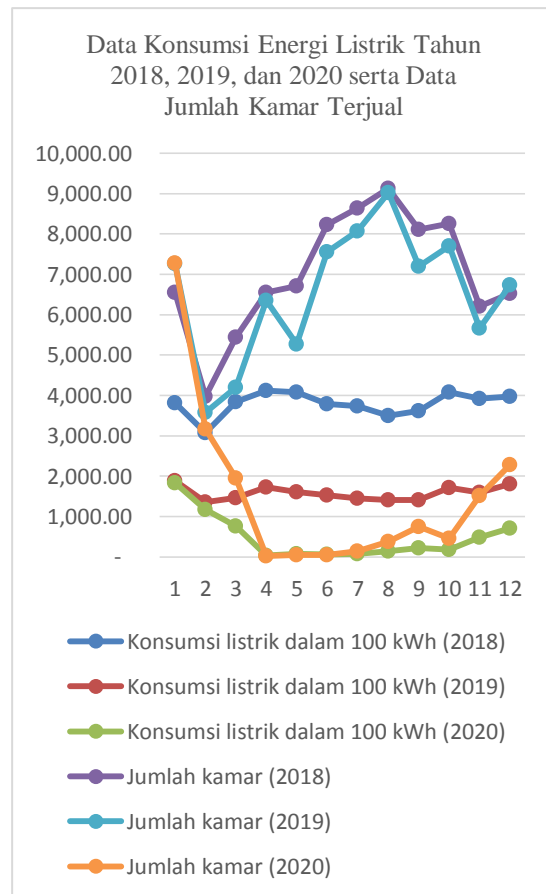
Permasalahannya ialah memasuki bulan April tingkat konsumsi per kamarnya meningkat keras, padahal yang terjadi di lapangan ialah keadaan pandemi. Pemerintah mulai menetapkan *lockdown* terhitung mulai di awal bulan April, oleh karena itu seharusnya tidak ada kunjungan dari wisatawan untuk menginap di hotel. Namun yang setelah data diolah dan dianalisis dalam bentuk grafik dapat kita lihat bagaimana konsumsi energi per kamarnya. Hal ini bisa saja dikarenakan pihak Hotel Bali Dynasty Resort belum siap dengan *set up* kondisi pandemi covid 19.

Data ditahun 2018 dapat juga digunakan sebagai perhitungan pertimbangan lainnya. Baik dari segi kWh untuk kamar yang terjual dan konsumsi energi untuk gedungnya. Untuk data di tahun 2018 akan disajikan dalam bentuk diagram seperti di bawah.



Gambar 4. Grafik Konsumsi Listrik dan Jumlah Kamar Terjual untuk Perbulan Selama Tahun 2018

Setelah mengolah dan menganalisa data di tahun 2018, 2019, dan 2020 dapat dijadikan pertimbangan oleh pihak management hotel untuk mengetahui tingkat efisiensi dalam penggunaan energi yang telah berlangsung 3 tahun terakhir. Berikut adalah data konsumsi energi dari tahun 2018 sampai dengan 2020 dengan tampilan grafik.



Gambar 5. Data Konsumsi Energi Listrik Tahun 2018, 2019, dan 2020 serta Data Jumlah Kamar Terjual

Pada gambar 5 dapat dilihat bahwa perilaku konsumsi energi yang terjadi di tahun 2018 mengalami penurunan sedangkan jika dilihat untuk data kamar terjualnya justru meningkat, hal ini bisa dilihat di gambar yang tepatnya terjadi pada bulan Juni hingga bulan Agustus yang menjadi puncak kunjungan ke hotel. Seharusnya antara konsumsi energi dan jumlah kamar yang terjual grafiknya berbanding lurus. Pada tahun 2019 terjadi hal yang sama untuk perilaku konsumsinya juga, dimana kenaikan jumlah kamar yang terjual ternyata diikuti penurunan konsumsi energi. Penemuan ini perlu diteliti dan analisis lebih lanjut untuk memastikan kebenarannya. Mengenai hubungan antara kamar yang terjual dengan konsumsi energi yang seharusnya kenaikan kurva kamar yang terjual diikuti dengan kenaikan dari konsumsi energi, bahkan secara logika pun dapat diperhitungkan mengenai hal itu. Pada tahun 2020 seperti yang kita ketahui bahwa ditahun ini mulainya masa pandemic, dimana mengakibatkan menurunnya tingkat kedatangan tamu baik internasional maupun tamu lokal ke Bali. Dilihat dari grafik untuk 2020 konsumsi energi dengan jumlah kamar yang terjual tidak terpaut jauh yakni sama-sama menurun seperti yang terlihat dalam kurva, namun dari segi kWh per kamar masih ditemukan hal yang tak sesuai. Seperti di gambar 4.5 dimana keadaan dari bulan April

situasi Bali sedang *lockdown*, namun sepertinya dalam temuan tersebut terlihat kWh untuk kamar masih tinggi. Hal ini bisa saja disebabkan karena pihak hotel belum ada persiapan untuk menghadapi keadaan masa pandemi, oleh karena itu ruangan masih ter set up seperti keadaan biasa dengan asumsi akan adanya kedatangan tamu. Pihak hotel pasti juga menggunakan *set up* yang sama dengan tahun-tahun sebelumnya, karena seperti biasa untuk acuan yang ada ditahun 2019 sebagai resolusi ditahun 2020 sehingga pihak hotel tidak salah jika men *set up* keadaan hotel sama seperti tahun sebelumnya. Adanya temuan ini memerlukan audit, analisis, serta penelitian lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana keadaan itu terjadi sehingga pihak hotel bisa lebih matang dengan persiapan ditahun-tahun mendatang selama pandemi maupun nanti berakhirnya masa pandemi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan mengenai analisis dan audit energi listrik di Hotel Bali Dinasty Resort, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:Kegiatan audit energi yang dilakukan untuk mengidentifikasi banyaknya energi yang digunakan oleh Hotel Bali Dinasty Resort, kemudian melakukan perhitungan Intensitas Konsumsi Energi (IKE) untuk menentukan boros atau hematnya penggunaan energinya. Jadi karena Hotel Bali Dinasty Resort adalah hotel dengan bangunan ber AC maka dengan nilai IKE yang telah diketahui antara lain gedung NPW sebesar 9,18 kWh/m²/bulan, gedung NGW sebesar 11,12 kWh/m²/bulan, gedung SPW sebesar 7,79 kWh/m²/bulan, gedung SGW sebesar 8,15 kWh/m²/bulan, dan gedung BW sebesar 10,20 kWh/m²/bulan. Dengan nilai IKE seperti hasil perhitungan untuk 5 gedung tersebut dapat dikategorikan penggunaan energinya “efisien”. Namun IKE bukanlah satu-satunya variabel penentu mutlak untuk mengukur tingkat efisiensi konsumsi energi untuk bangunan hotel. Data seperti kWh per kamar terjual dan data jumlah kamar yang terjual dapat digunakan sebagai bahan analisa untuk hasil audit berdasarkan data yang telah diolah

Daftar Pustaka

- [1] Wahid, Junaidi, & Arsyad, 2014, *Analisa Kapasitas dan Kebutuhan Daya Listrik Untuk Menghemat Penggunaan Energi Listrik di Fakultas Teknik Tanjungpura*. Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura. Pontianak
- [2] Bernadikso & Hamzah, 2016, *Analisa Evaluasi Intensitas Konsumsi Energi melalui Audit Energi Listrik di Gedung Rektorat Universitas Riau*. Jurnal Teknik Elektro Universitas Riau, Pekanbaru, hal. 2

- [3] Hasannah dkk, 2014, *Perangkat Lunak Audit Sebagai Alat Bantu Sistem Pendukung Keputusan untuk Upaya Konservasi Energi*, Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Malang, hal. 2

	I Gede Yogi Iswara menyelesaikan Pendidikan di SMA Negeri 1 Tabanan, pada tahun 2017. Kemudian melanjutkan studi program sarjana di jurusan Teknik mesin Universitas Udayanapada tahun 2017 dan menyelesaikannya pada tahun 2021. Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan audit energi dan manajemen energi.
--	--

Analisa Kinerja Mesin Pembangkit Listrik Tenaga Gas Unit 1 Blok 1 di PT. Indonesia Power Grati POMU

A.A.N. Putra Damara A.W., I.G.B. Wijaya Kusuma, A.A.I.A. Sri Komaladewi
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

PLTG PT. Indonesia Power Grati POMU merupakan salah satu pembangkit listrik yang tersambung dengan sistem interkoneksi Jawa-Bali. Mesin pembangkit Blok 1 Unit 1 menggunakan turbin gas yang diproduksi oleh Mitsubishi Heavy Industries Jepang pada tahun 1995 dan mulai di operasikan pada tahun 1997. Mesin pembangkit tersebut beroperasi menggunakan bahan bakar berupa gas alam. Berdasarkan kondisi tersebut, pada penelitian ini akan dilakukan analisa perbandingan kapasitas terpasang dengan kapasitas aktual serta penyusutan daya pembangkit setelah 23 tahun beroperasi. Analisa dilaksanakan dengan melakukan perhitungan terhadap parameter-parameter kinerja mesin pembangkit. Parameter yang dimaksud adalah kerja kompresor, kerja turbin, kerja netto, kalor masuk, efisiensi termal, daya netto, specific fuel consumption, harga pembangkitan, serta penyusutan daya yang terjadi. Setelah 23 tahun beroperasi terjadi kenaikan kerja kompresor sebesar 237,16 kJ/kg, kenaikan kerja turbin sebesar 103,13 kJ/kg, penurunan kerja netto sebesar 20,36 kJ/kg, kenaikan kalor masuk sebesar 30,99 kJ/kg, penurunan efisiensi sebesar 3,74 %, dan kenaikan specific fuel consumption sebesar 0,0093 kg/kWh. Sedangkan penyusutan daya yang terjadi sebesar 2.592,28 kW atau sebesar 2,87 %. Akibat dari penyusutan daya terbangkitkan tersebut perusahaan mengalami kerugian sebesar Rp. 32.799.901.053,57 /tahun. Salah satu penyebab terjadinya penurunan kinerja mesin pembangkit adalah degradasi material.

Kata Kunci : Analisa, Kinerja, Turbin Gas

Abstract

PLTG PT. Indonesia Power Grati POMU is a power plant connected to the Java-Bali interconnection system. The Block 1 Unit 1 power plant engine uses a gas turbine produced by Mitsubishi Heavy Industries Japan in 1995 and began operation in 1997. The power plant engine operates using fuel in the form of natural gas. Based on these conditions, this research will analyze the comparison of installed capacity with actual capacity as well as shrinkage of power generation after 23 years of operation. The analysis is carried out by calculating the performance parameters of the power plant engine. The parameters referred to are compressor work, turbine work, net work, heat intake, thermal efficiency, net power, specific fuel consumption, generation price, and the resulting power depreciation. After 23 years of operation there was an increase in compressor work of 237.16 kJ/kg, an increase in turbine work of 103.13 kJ/kg, a decrease in net work of 20.36 kJ/kg, an increase in heat intake of 30.99 kJ/kg, a decrease in efficiency of 3.74 %, and an increase in specific fuel consumption by 0.0093 kg/kWh. While the power depreciation that occurred was 2,592.28 kW or 2.87 %. As a result of the reduced power generated, the company suffered a loss of Rp. 32.799.901.053,57 /year. One of the causes of the decrease in the performance of the power plant engine is material degradation.

Keywords : Analysis, Performance, Gas Turbines

1. Pendahuluan

Peningkatan permintaan energi listrik setiap tahunnya selalu lebih tinggi dibandingkan dengan jenis energi yang lain. Kebutuhan energi listrik meningkat rata-rata 7% per tahun, hingga pada tahun 2050 dibutuhkan produksi listrik 9 kali lipat lebih besar dibandingkan tahun 2018, yaitu sebesar 2.562 TWh [1]. Kondisi tersebut mendorong berbagai upaya untuk meningkatkan atau mempertahankan kinerja dari setiap unit pembangkit mengingat bahan bakar yang digunakan masih menggunakan bahan bakar fosil yang suatu saat nanti akan mengalami kondisi krisis.

PT. Indonesia Power Grati Power Generation O&M and Maintenance Unit (POMU) merupakan salah satu unit pembangkit listrik yang tersambung dengan sistem interkoneksi Jawa-Bali. PT. Indonesia Power Grati POMU mengoperasikan 9 unit mesin Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) serta 2 unit mesin Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan

akan ada penambahan mesin pembangkit listrik tenaga uap sebanyak 1 unit. Total kapasitas daya terpasang dari PT. Indonesia Power Grati POMU sebesar 1.314,2 MW.

PT. Indonesia Power Grati POMU pada unit 1 blok 1 menggunakan mesin PLTG yang di produksi oleh Mitsubishi Heavy Industries Jepang pada tahun 1995 dan mulai dioperasikan pada tahun 1997. Hingga pada tahun 2020 mesin pembangkit tersebut sudah beroperasi selama 23 tahun. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan dilapangan, mesin pembangkit yang sudah dioperasikan selama puluhan tahun akan mengalami penyusutan daya terbangkitkan.

Meningkat semakin meningkatnya permintaan energi listrik di Indonesia setiap tahunnya, semakin berkurangnya cadangan bahan bakar fosil untuk pengoperasian mesin pembangkit, serta penyusutan daya yang terjadi pada mesin pembangkit, maka unit pembangkit listrik yang sudah ada harus dioperasikan

secara optimal. Untuk mengoptimalkan pengoperasian pembangkit listrik, hal pertama yang harus dilakukan adalah analisa mengenai kinerja mesin pembangkit listrik tersebut. Analisa mesin pembangkit listrik merupakan kegiatan penelitian pemanfaatan energi guna mengidentifikasi peluang-peluang penghematan energi untuk meningkatkan efisiensi perusahaan [2].

Oleh karena itu dalam penelitian ini penulis akan melakukan analisa mesin Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Unit 1 Blok 1 di PT. Indonesia Power Grati POMU. Sehingga dapat diketahui performa dan perbandingan kapasitas pada desain dengan kapasitas aktual dari mesin pembangkit, serta pemborosan yang terjadi pada Unit 1 Blok 1 setelah 23 tahun beroperasi yang nantinya hasil dari analisa ini dapat dijadikan acuan dalam melakukan upaya-upaya penghematan energi.

2. Dasar Teori

2.1 Heat and Mass Balance Pembangkit

Heat and mass balance pada pembangkit listrik merupakan suatu data perancangan berbentuk diagram dari sistem pembangkit tersebut yang merupakan hasil perhitungan secara teoritis yang mendasari perancangan dan pembangunan suatu pembangkit listrik. *Heat and mass balance* diterbitkan oleh manufaktur pembuat mesin pembangkit dalam bentuk *manual design* dan diterbitkan pada beberapa kondisi operasi.

2.2 Pengertian Turbin Gas

Turbin gas merupakan mesin penggerak mula yang menggunakan fluida kerja berupa flue gas. Prinsip dasar pengoperasian turbin gas adalah merubah energi kinetis berupa aliran gas panas berkecepatan tinggi menjadi energi mekanis berupa putaran poros yang digunakan menggerakkan generator.

2.3 Komponen Utama PLTG

Untuk menjalankan suatu siklus PLTG diperlukan komponen-komponen utama yang digabungkan menjadi satu kesatuan. PLTG memiliki beberapa komponen utama atau *main engine* yang terdiri dari:

1. Kompresor berfungsi sebagai tempat terjadinya kompresi udara lingkungan.
2. Ruang bakar berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran dan pembakaran antara udara dengan bahan bakar.
3. Turbin berfungsi sebagai tempat terjadinya proses ekspansi fluida kerja hasil pembakaran.
4. Generator yang berfungsi untuk merubah energi mekanis berupa putaran poros menjadi energi listrik.

2.4 Gas Alam

Gas alam yang digunakan sebagai bahan bakar pada PLTG Grati merupakan gas alam yang disimpan dalam bentuk *Compressed Natural Gas* (CNG) pada tekanan 250 bar [3]. Gas alam yang digunakan memiliki kandungan berupa Metana (CH_4) sekitar 95,21% sedangkan sisanya berupa campuran gas

Propana 1,354%, Etana 0,97%, Butana 0,44%, CO_2 0,909%, dan N 0,367%.

2.5 PLTG Grati

PT Indonesia Power Grati POMU merupakan salah satu unit pembangkit yang dimiliki PT Indonesia Power yang dulunya bernama PT Indonesia Power UPJP Perak Grati. Daya yang dihasilkan oleh PLTGU Grati disalurkan ke jaringan interkoneksi Jawa – Bali melalui SUTT 150 KV dan SUTET 500 KV. PLTGU Grati memiliki tiga konfigurasi blok dengan total daya terpasang 1.314,42 MW [4].

Blok 1 beroperasi sejak tahun 1997, sedangkan blok 2 mulai beroperasi tahun 2000, dan blok 3 baru diresmikan tahun 2019, PLTGU Grati dibangun oleh tiga kontraktor, antara lain:

1. Turbin Gas dan Turbin Uap oleh Mitsubishi Heavy Industries, Jepang.
2. *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) oleh Cockeril Mechanical Industries (CMI), Belgia.
3. Generator dan perlengkapan listrik oleh Siemens, Jerman.

2.6 Spesifikasi Mesin Pembangkit

Mesin pembangkit listrik tenaga gas yang digunakan di PT. Indonesia Power Grati POMU memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Kompresor

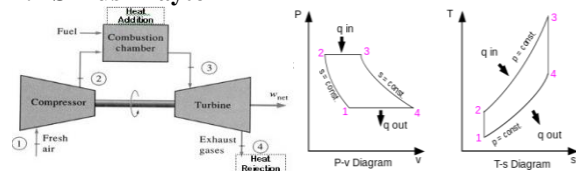
Tipe	: Aliran Aksial
Jumlah tingkat	: 19 tingkat
2. Ruang bakar

Tipe	: Can Annular
Jumlah pembakar	: 18 pembakar
3. Turbin

Tipe	: Turbin Reaksi
Jumlah tingkat	: 4 tingkat
4. Mesin pembangkit

Merk	: Mitsubishi Heavy
Tipe	: MW-701D
Daya	: 134.1 MW
Putaran	: 3000 rpm
Tahun produksi	: 1995
Tahun operasional	: 1997

2.7 Siklus Brayton



Gambar 1. Siklus Brayton Ideal [5]

Siklus Brayton merupakan teori yang mendasari dari pengoperasian mesin PLTG. Siklus Brayton menjelaskan setiap proses yang terjadi secara termodinamika pada setiap tingkat keadaan. Siklus Brayton terdiri dari 2 proses isentropik dan 2 proses isobarik. Proses isentropik terjadi pada proses kompresi (1-2) dan proses ekspansi (3-4), sedangkan proses isobarik terjadi pada proses pembakaran (2-3) dan proses resirkulasi gas buang (4-1) [6].

2.8 Parameter Kinerja Mesin Pembangkit

1. Entalpi (h)

$$\frac{T_X - T_B}{T_A - T_B} = \frac{h_X - h_B}{h_A - h_B} \quad (1)$$

Keterangan:

T_X = temperatur yang telah ditentukan

T_A = temperatur T_X

T_B = temperatur dibawah T_X

h_x = entalpi yang dicari

h_A = entalpi pada temperatur T_A

h_B = entalpi pada temperatur T_B

2. Kerja kompresor (W_k)

$$W_k = (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Keterangan:

h_2 = entalpi udara keluar kompresor

h_1 = entalpi udara masuk kompresor

3. Kerja turbin (W_t)

$$W_t = (h_3 - h_4) \quad (3)$$

Keterangan:

h_4 = entalpi udara keluar turbin

h_3 = entalpi udara masuk turbin

4. Kerja netto (W_{net})

$$W_{net} = W_t - W_k \quad (4)$$

5. Kalor masuk (q_{in})

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad (5)$$

Keterangan:

h_3 = entalpi udara keluar ruang bakar

h_2 = entalpi udara masuk ruang bakar

6. Efisiensi termal (η_{th})

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

7. Daya netto (N_{net})

$$N_{net} = (\dot{m}_{ud} + \dot{m}_{bb}) W_{net} \quad (7)$$

Keterangan:

\dot{m}_{ud} = laju aliran massa udara

\dot{m}_{bb} = laju aliran massa bahan bakar

8. Specific fuel consumption (SFC)

$$SFC = \frac{\dot{m}_{bb}}{N_{teoritis}} \quad (8)$$

9. Harga pembangkitan (BPP)

$$\text{Harga listrik per kWh} = SFC \times \text{harga BBM} \quad (9)$$

10. Penyusutan daya pembangkit

$$\text{Penyusutan} = N_{perencanaan} - N_{aktual} \quad (10)$$

11. Pemborosan mesin pembangkit

$$\text{Pemborosan} = 1 - \frac{N_{aktual}}{N_{desain}} \quad (11)$$

3. Metode Penelitian

3.1 Deskripsi Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa mengenai kinerja mesin pembangkit PT. Indonesia Power Grati POMU. Analisa dilaksanakan dengan melakukan perhitungan terhadap parameter-parameter kinerja mesin pembangkit.

3.2 Variabel Penelitian

1. Variabel bebas

Terdiri dari temperatur fluida kerja turbin gas (T_1, T_2, T_3, T_4) serta laju aliran massa bahan bakar dan udara ($\dot{m}_{bb} + \dot{m}_{ud}$).

2. Variabel terikat

Terdiri dari kerja turbin (W_t), kerja kompresor (W_k), efisiensi termal (η_{th}), dan kalor masuk (q_{in}).

3.3 Data Penelitian

1. Data Primer

Data primer yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari Central Control Room (CCR) PLTGU Grati dan dokumen *heat balance* PLTGU Grati.

2. Data Sekunder

Data sekunder merupakan kumpulan data teoritis yang diperoleh berdasarkan studi literatur, jurnal ilmiah, artikel, maupun laporan yang berkaitan dengan materi penelitian.

3.4 Prosedur Penelitian

1. Pengambilan data lapangan
2. Proses perhitungan
3. Analisa hasil perhitungan
4. Rekomendasi dan kesimpulan

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Data Hasil Pengamatan

Tabel 1. Hasil Pengamatan Data Desain

Temperatur (K)				Tekanan (kPa)		Laju Aliran Massa (Kg/s)	
T1	T2	T3	T4	P1 = P4	P2 = P3	\dot{m}_{ud}	\dot{m}_{bb}
305.15	538.25	1397.15	752.35	100.8124	990.4717	173.9539	4.6574

Tabel 2. Hasil Pengamatan Data Operasi

Jam (WIB)	Temperature (K)			Tekanan (kPa)		\dot{m}_{bb} (kg/s)
	T1	T2	T4	P1=P4	P2=P3	
0:00	299.65	636.15	795.38	101.303	894.366	4.2656
1:00	299.55	636.15	800.07	101.303	899.270	4.3125
2:00	299.45	636.05	800.59	101.303	897.308	4.3069
3:00	299.75	636.65	801.45	101.303	897.308	4.3031
4:00	299.25	635.85	800.77	101.303	898.289	4.3350
5:00	299.25	635.85	800.72	101.303	897.308	4.3256
6:00	299.45	636.55	802.21	101.303	900.250	4.3444
7:00	300.85	639.05	804.86	101.303	897.308	4.3350
8:00	303.45	642.65	808.41	101.303	896.328	4.3163
9:00	303.95	643.25	810.49	101.303	895.347	4.3631
10:00	304.95	645.15	809.60	101.303	900.250	4.3650
11:00	305.25	646.75	806.32	101.303	910.057	4.4063
12:00	305.65	645.35	798.36	101.303	885.540	4.1850
13:00	306.65	645.25	799.43	101.303	881.618	4.1775
14:00	307.25	647.05	801.17	101.303	882.599	4.1831
15:00	307.35	646.95	801.30	101.303	882.599	4.1644
16:00	306.45	679.05	758.73	101.303	1147.378	4.9575
17:00	305.95	678.55	756.09	101.303	1149.339	5.0269
18:00	304.95	689.75	798.28	101.303	1221.909	5.8406
19:00	303.75	688.15	795.65	101.303	1231.715	5.8688
20:00	304.65	689.65	796.85	101.303	1233.677	5.8875
21:00	304.05	688.45	796.18	101.303	1231.715	5.8744
22:00	303.95	684.75	784.96	101.303	1197.392	5.2556
23:00	303.55	643.25	810.62	101.303	900.250	4.4044

Data spesifikasi bahan bakar

Jenis bahan bakar: Gas Alam / CNG

LHV : 9.660 kcal/Nm³

SG : 0,657 kg/m³

Harga : US\$ 6 per MMBTU

: Rp. 4.772,289 /kg

4.2 Perhitungan Parameter-Parameter Kinerja Mesin Pembangkit

Contoh perhitungan menggunakan data pada jam 00.00 WIB dan yang lainnya akan disajikan pada tabel hasil perhitungan.

1. Mencari temperatur fluida hasil pembakaran (T_3)

$$T_3 = T_4 \times \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\left(\frac{k-1}{k} \right)}$$

$$T_3 = 795,38 \text{ K} \times \left(\frac{894,3665 \text{ kPa}}{101,3027 \text{ kPa}} \right)^{\frac{(1,4-1)}{1,4}}$$

$$T_3 = 1481,893 \text{ K}$$

2. Mencari laju aliran massa udara aktual (\dot{m}_{ud})

$$A/F = \frac{\dot{m}_{udara}}{\dot{m}_{bb}}$$

$$\dot{m}_{udara} = (A/F) \times \dot{m}_{bb}$$

$$\dot{m}_{udara} = 37,35 \times 4,265625 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{udara} = 159,3211 \text{ kg/s}$$

Tabel 3. Hasil Perhitungan T3 dan \dot{m}_{ud}

Jam (WIB)	T3 (K)	A/F	Laju aliran massa (kg/s)	
			\dot{m}_{ud}	\dot{m}_{bb}
0:00	1481.893	37.35	159.3211	4.2656
1:00	1492.961	37.35	161.0719	4.3125
2:00	1493.000	37.35	160.8618	4.3069
3:00	1494.603	37.35	160.7217	4.3031
4:00	1493.801	37.35	161.9123	4.3350
5:00	1493.242	37.35	161.5621	4.3256
6:00	1497.420	37.35	162.2624	4.3444
7:00	1500.963	37.35	161.9123	4.3350
8:00	1507.112	37.35	161.2119	4.3163
9:00	1510.517	37.35	162.9627	4.3631
10:00	1511.215	37.35	163.0328	4.3650
11:00	1509.758	37.35	164.5734	4.4063
12:00	1483.236	37.35	156.3098	4.1850
13:00	1483.341	37.35	156.0296	4.1775
14:00	1487.042	37.35	156.2397	4.1831
15:00	1487.284	37.35	155.5394	4.1644
16:00	1517.887	37.35	185.1626	4.9575
17:00	1513.344	37.35	187.7538	5.0269
18:00	1625.984	37.35	218.1473	5.8406
19:00	1624.333	37.35	219.1978	5.8688
20:00	1627.522	37.35	219.8981	5.8875
21:00	1625.415	37.35	219.4079	5.8744
22:00	1589.622	37.35	196.2976	5.2556
23:00	1513.119	37.35	164.5034	4.4044

3. Menghitung entalpi (h)

Perhitungan entalpi menggunakan contoh perhitungan entalpi 1 (h_1). Dari tabel Properties A-17 (*Ideal Gas Properties of Air*) didapat:

$$h_B = 298,18 \text{ kJ/kg}$$

$$h_A = 300,19 \text{ kJ/kg}$$

$$T_B = 298 \text{ K}$$

$$T_A = 300 \text{ K}$$

$$\frac{T_1 - T_B}{T_A - T_B} = \frac{h_1 - h_B}{h_A - h_B}$$

$$h_1 = \left(\frac{(T_1 - T_B) \times (h_A - h_B)}{(T_A - T_B)} \right) + h_B$$

$$h_1 = \left(\frac{(299,65 \text{ K} - 298 \text{ K}) \times (300,19 \text{ kJ/kg} - 298,18 \text{ kJ/kg})}{(300 \text{ K} - 298 \text{ K})} \right) + 298,18 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = 299,8383 \text{ kJ/kg}$$

Tabel 4. Hasil Perhitungan Entalpi

Data Desain GT1.1				
	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_3 (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)
	305.37	542.54	1512.00	769.85
Data Operasi GT1.1				
Jam (WIB)	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_3 (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)
0:00	299.84	645.14	1614.08	816.89
1:00	299.74	645.14	1627.46	822.03
2:00	299.64	645.04	1627.51	822.60
3:00	299.94	645.67	1629.45	823.55
4:00	299.44	644.83	1628.48	822.80
5:00	299.44	644.83	1627.80	822.74
6:00	299.64	645.57	1632.85	824.38
7:00	301.05	648.21	1637.14	827.30
8:00	303.66	652.04	1644.60	831.21
9:00	304.16	652.68	1648.73	833.50
10:00	305.17	654.70	1649.57	832.52

11:00	305.47	656.40	1647.81	828.91
12:00	305.87	654.91	1615.70	820.15
13:00	306.88	654.81	1615.83	821.33
14:00	307.48	656.72	1620.30	823.24
15:00	307.58	656.61	1620.60	823.38
16:00	306.68	690.81	1657.67	776.80
17:00	306.17	690.27	1652.16	778.12
18:00	305.17	702.25	1789.32	820.06
19:00	303.96	700.54	1787.30	817.18
20:00	304.87	702.15	1791.20	818.50
21:00	304.26	700.86	1788.62	817.76
22:00	304.16	696.90	1744.91	805.47
23:00	303.76	652.68	1651.88	833.65

4. Menghitung kerja kompresor (W_k)

$$W_k = h_2 - h_1$$

$$W_k = 645,1429 \text{ kJ/kg} - 299,8383 \text{ kJ/kg}$$

$$W_k = 345,3046 \text{ kJ/kg}$$

5. Menghitung kerja turbin (W_t)

$$W_t = h_3 - h_4$$

$$W_t = 1614,078 \text{ kJ/kg} - 816,8865 \text{ kJ/kg}$$

$$W_t = 797,1917 \text{ kJ/kg}$$

6. Menghitung kerja netto (W_{net})

$$W_{net} = W_t - W_k$$

$$W_{net} = 797,1917 \text{ kJ/kg} - 345,3046 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{net} = 451,8871 \text{ kJ/kg}$$

7. Menghitung kalor masuk (q_{in})

$$q_{in} = h_3 - h_2$$

$$q_{in} = 1614,078 \text{ kJ/kg} - 645,1429 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{in} = 968,9353 \text{ kJ/kg}$$

8. Menghitung efisiensi termal (η_{th})

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = \frac{451,8871 \text{ kJ/kg}}{968,9353 \text{ kJ/kg}} \times 100\%$$

$$\eta_{th} = 46,63749 \%$$

Tabel 5. Hasil Perhitungan W , q_{in} , dan η_{th}

Data Desain GT1.1					
	Kerja (kJ/kg)			q_{in} (kJ/kg)	η_{th} (%)
	W_k	W_t	W_{net}		
	237.16	742.15	504.99	969.47	52.09
Data Operasi GT1.1					
Jam (WIB)	Kerja (kJ/kg)			q_{in} (kJ/kg)	η_{th} (%)
0:00	345.30	797.19	451.89	968.94	46.64
1:00	345.41	805.43	460.03	982.32	46.83
2:00	345.40	804.91	459.51	982.47	46.77
3:00	345.73	805.90	460.16	983.77	46.78
4:00	345.39	805.68	460.29	983.65	46.79
5:00	345.39	805.06	459.67	982.97	46.76
6:00	345.93	808.47	462.54	987.28	46.85
7:00	347.17	809.83	462.67	988.92	46.78
8:00	348.38	813.38	465.00	992.56	46.85
9:00	348.51	815.22	466.71	996.05	46.86
10:00	349.53	817.05	467.52	994.87	46.99
11:00	350.93	818.90	467.96	991.40	47.20
12:00	349.04	795.55	446.51	960.79	46.47
13:00	347.93	794.50	446.58	961.02	46.47
14:00	349.24	797.07	447.82	963.58	46.47
15:00	349.04	797.21	448.18	963.98	46.49
16:00	384.13	880.87	496.74	966.86	51.38
17:00	384.10	874.03	489.93	961.88	50.93
18:00	397.08	969.25	572.17	1087.07	52.63
19:00	396.58	970.12	573.54	1086.76	52.78
20:00	397.28	972.70	575.42	1089.05	52.84
21:00	396.60	970.86	574.26	1087.76	52.79
22:00	392.74	939.44	546.70	1048.01	52.17
23:00	348.92	818.24	469.32	999.21	46.97

9. Menghitung daya netto (N_{net})

$$N_{net} = (\dot{m}_{ud} + \dot{m}_{gas}) \times W_{net}$$

$$N_{\text{net}} = (159.3211 \text{ kg/s} + 4,265625 \text{ kg/s}) \times 451,8871 \text{ kJ/kg}$$

$$N_{\text{net}} = 73.922,72 \text{ kW}$$

10. Menghitung *specific fuel consumption* (SFC)

$$SFC = \frac{\dot{m}_{\text{gas}}}{N_{\text{net}}} = \frac{4,265625 \text{ kg/s} \times 3600 \text{ s}}{73.922,72 \text{ kW}}$$

$$SFC = 0,207734 \text{ kg/kWh}$$

11. Menghitung harga pembangkitan (BPP)

$$BPP = SFC \times \text{harga BBG}$$

$$BPP = 0,207734 \text{ kg/kWh} \times \text{Rp. } 4.722,289 / \text{kg}$$

$$BPP = \text{Rp. } 911,3658 / \text{kWh}$$

Tabel 6. Hasil Perhitungan N_{net} , SFC, dan BPP

Data Desain GT1.1				
	N_{net} (kW)	SFC (kg/kWh)	Harga bb (Rp/kg)	BPP (Rp/kWh)
	90,196,7451	0,1859	4772,2890	887,1191
Data Operasi GT1.1				
Jam (WIB)	N_{net} (kW)	SFC (kg/kWh)	Harga bb (Rp/kg)	BPP (Rp/kWh)
0:00	73,922,7239	0,2077	4772,2890	991,3658
1:00	76,081,3710	0,2041	4772,2890	973,8230
2:00	75,896,1523	0,2043	4772,2890	974,9262
3:00	75,938,6219	0,2040	4772,2890	973,5326
4:00	76,521,7585	0,2039	4772,2890	973,2701
5:00	76,253,2259	0,2042	4772,2890	974,5854
6:00	77,061,9381	0,2030	4772,2890	968,5379
7:00	76,916,8786	0,2029	4772,2890	968,2705
8:00	76,971,3366	0,2019	4772,2890	963,4004
9:00	78,092,3827	0,2011	4772,2890	959,8828
10:00	78,261,6663	0,2008	4772,2890	958,2182
11:00	79,076,4685	0,2006	4772,2890	957,3067
12:00	71,662,5316	0,2102	4772,2890	1003,3040
13:00	71,544,5124	0,2102	4772,2890	1003,1581
14:00	71,841,0552	0,2096	4772,2890	1000,3624
15:00	71,575,7893	0,2095	4772,2890	999,5693
16:00	94,440,3828	0,1890	4772,2890	901,8498
17:00	94,449,9259	0,1916	4772,2890	914,3779
18:00	128,159,3889	0,1641	4772,2890	782,9574
19:00	129,084,2935	0,1637	4772,2890	781,0907
20:00	129,922,5207	0,1631	4772,2890	778,5307
21:00	129,370,9430	0,1635	4772,2890	780,1070
22:00	110,189,8054	0,1717	4772,2890	819,4306
23:00	79,271,5276	0,2000	4772,2890	954,5448

12. Menghitung penyusutan daya pembangkit

Untuk menghitung penyusutan menggunakan data N_{net} operasi rata-rata dan N_{net} desain.

$$\text{Penyusutan} = N_{\text{desain}} - N_{\text{aktual}} \quad (23)$$

$$\text{Penyusutan} = 90,196,7451 \text{ kW} - 87,604,4667 \text{ kW}$$

$$\text{Penyusutan} = 2,592,2784 \text{ kW}$$

13. Menghitung presentase pemborosan pembangkit

$$\text{Pemborosan} = 1 - \frac{N_{\text{aktual}}}{N_{\text{desain}}} \quad (24)$$

$$\text{Pemborosan} = 1 - \frac{87,604,4667 \text{ kW}}{90,196,7451 \text{ kW}}$$

$$\text{Pemborosan} = 1 - 0,9713$$

$$\text{Pemborosan} = 0,0287$$

$$\text{Pemborosan} = 2,87 \%$$

Tabel 7. Perbandingan Hasil Perhitungan Desain dan Operasi

No	Parameter Kinerja Mesin	Satuan	Hasil Perhitungan	
			Data Desain	Data Operasi
1	Kerja Kompresor (W_k)	kJ/kg	237,1647	360,6558
2	Kerja Turbin (W_t)	kJ/kg	742,1537	845,2858
3	Kerja Netto (W_{net})	kJ/kg	504,9891	484,6301
4	Kalor Masuk (q_{in})	kJ/kg	969,4676	1.000,4662

5	Efisiensi Termal (η_{th})	%	52,09	48,35
6	Daya Netto (N_{net})	kW	90,196,7451	87,604,4667
7	<i>Specific Fuel Consumption</i>	kg/kWh	0,1859	0,1952
8	Harga Pembangkitan	Rp/kWh	887,1191	931,5168
9	Penyusutan Daya	kW		2,592,2784
10	Pemborosan Pembangkit	%		2,87

Tabel 8. Selisih Hasil Perhitungan Desain dan Operasi

No	Parameter Kinerja Mesin	Selisih		Ket.
		Angka	Pres.	
1	Kerja Kompresor (W_k)	123,4911 kJ/kg	52,07 %	Meningkat
2	Kerja Turbin (W_t)	103,1321 kJ/kg	13,89 %	Meningkat
3	Kerja Netto (W_{net})	20,359 kJ/kg	4,03 %	Menurun
4	Kalor Masuk (q_{in})	30,9986 kJ/kg	3,19 %	Meningkat
5	Efisiensi Termal (η_{th})	3,73 %	7,16 %	Menurun
6	Daya Netto (N_{net})	2,592,2784 kW	2,87 %	Menurun
7	<i>Specific Fuel Consumption</i>	0,0093 kg/kWh	5,0 %	Meningkat
8	Harga Pembangkitan	44,3995 Rp/kWh	5,0 %	Meningkat

4.3 Analisa dan Pembahasan Kinerja Mesin Pembangkit

1. Entalpi pada setiap tingkat keadaan (h)

Entalpi (h) dari tingkat keadaan 1 sampai 4 merupakan nilai-nilai yang didasarkan dengan mengasumsikan bahwa fluida kerja adalah gas ideal. Entalpi adalah suatu nilai yang menunjukkan total kandungan energi dalam yang terkandung pada suatu benda atau fluida kerja pada temperatur tertentu.

2. Kerja kompresor (W_k)

Terjadi peningkatan W_k sebesar 123,4911 kJ/kg atau 52,07 %. Hal tersebut dikarenakan T1 aktual lebih rendah dari T1 desain dan T2 aktual lebih tinggi dari T2 desain yang dikarenakan adanya kebocoran kalor dari ruang bakar menuju casing kompresor. W_k dapat diturunkan dengan cara menaikan T1. Menaikan T1 dapat dilakukan dengan cara pemanasan awal menggunakan gas buang turbin.

3. Kerja turbin (W_t)

W_t mengalami peningkatan 103,1321 kJ/kg atau 13,89 %. Namun peningkatan W_t tidak dapat mengimbangi peningkatan W_k sehingga berdampak pada meningkatnya BWR dan menurunnya W_{net} . W_t dapat ditingkatkan dengan cara menurunkan W_k , menaikan T3, dan menurunkan T4.

4. Kerja netto (W_{net})

W_{net} merupakan selisih antara W_t dengan W_k . terjadi penurunan W_{net} sebesar 20,359 kJ/kg atau 4,03 %. W_{net} dapat ditingkatkan dengan cara menurunkan W_k atau dengan menaikan W_t .

5. Kalor masuk (q_{in})

Terjadi peningkatan q_{in} sebesar 30,9986 kJ/kg atau 3,19 %. q_{in} dapat ditingkatkan tanpa meningkatkan konsumsi gas, yaitu dengan cara penambahan regenerator. Sehingga kalor gas buang turbin dapat digunakan lagi untuk meningkatkan q_{in} .

6. Efisiensi termal (η_{th})

Terjadi penurunan η_{th} sebesar 3,73 % yang dikarenakan oleh adanya peningkatan q_{in} dan penurunan W_{net} . η_{th} dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan W_{net} atau menurunkan q_{in} .

7. Daya netto (N_{net})

Terjadi penurunan N_{net} sebesar 2.592,2784 kW yang diakibatkan dari menurunnya W_{net} . N_{net} dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan W_{net} atau dengan cara meningkatkan total laju aliran massa fluida kerja.

8. Specific fuel consumption (SFC)

SFC menunjukkan konsumsi bahan bakar untuk menghasilkan listrik sebesar 1 kWh. Terjadi peningkatan SFC sebesar 0,0093 kg/kWh. SFC dapat diturunkan dengan penambahan regenerasi, sehingga SFC dapat dikurangi tetapi kalor yang masuk ke sistem tetap sama.

9. Harga pembangkitan (BPP)

Terjadi peningkatan BPP sebesar 44,3995 Rp/kWh. BPP dibanding dengan SFC semakin besar SFC maka semakin besar juga BPP, dan begitu pula sebaliknya.

10. Penyusutan daya pembangkit

Penyusutan daya pembangkit ini ditunjukkan oleh menurunnya N_{net} . Sehingga dapat dilihat bahwa terjadi penyusutan daya pembangkit sebesar 2.592,2784 kW. Penyusutan daya pembangkit ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain degradasi kekuatan material penyusun mesin pembangkit, degradasi kualitas coating pada sudu-sudu turbin dan kompresor, serta degradasi kemampuan dari isolator kalor atau glasswool sehingga terjadinya kebocoran kalor ke lingkungan.

11. Presentase pemborosan pembangkit

Penyusutan daya pembangkit yang terjadi jika dinyatakan dalam bentuk presentase maka sebesar 2,87 %. Artinya terjadi penyusutan daya sebesar 2,87 % setelah 23 tahun beroperasi.

12. Kerugian ekonomi perusahaan

Berdasarkan produksi listrik, perusahaan mengalami kerugian sebesar:

Penyusutan daya = 2.592,2784 kW

Selisih BPP = Rp. 44,39 /kWh

Kerugian = Penyusutan daya x Selisih BPP

Kerugian = 2.592,2784 x 44,39

Kerugian = Rp. 115.091,18 /jam

Kerugian x 24 jam = Rp. 2.762.188,37 /hari

Kerugian x 365 hari = Rp. 1.008.198.755,97 /tahun

Sedangkan berdasarkan penjualan listrik, perusahaan mengalami kerugian sebesar:

Penyusutan daya = 2.592,2784 kW

Penyusutan daya = 22.708.358,784 kWh/tahun

TDL = Rp. 1.400,00 /kWh

Kerugian = Penyusutan daya x TDL

Kerugian = 22.708.358,784 x 1.400,00

Kerugian = Rp. 31.791.702.297,60 /tahun

5. Kesimpulan

Setelah dilakukan perhitungan diperoleh perbandingan antara kapasitas desain dengan kapasitas aktual, dengan perbandingan sebagai berikut:

1. Kerja kompresor (Wk) mengalami peningkatan sebesar 123,4911 kJ/kg.
2. Kerja turbin (Wt) mengalami peningkatan sebesar 103,1321 kJ/kg.
3. Kerja netto (W_{net}) mengalami penurunan sebesar 20,359 kJ/kg.
4. Kalor masuk (q_{in}) mengalami peningkatan sebesar 30,9986 kJ/kg.
5. Efisiensi termal (η_{th}) mengalami penurunan sebesar 3,73 %.
6. Daya netto (N_{net}) mengalami penurunan sebesar 2.592,2784 kW.
7. Specific fuel consumption (SFC) mengalami peningkatan sebesar 0,0093 kg/kWh.
8. Harga pembangkitan (BPP) mengalami peningkatan sebesar Rp. 44,3995 /kWh.

Setelah dilakukan analisa secara teoritis ditemukan adanya penyusutan daya dari mesin pembangkit sebesar 2.592,2784 kW atau 2,87 % setelah 23 tahun beroperasi. Sehingga perusahaan mengalami kerugian total sebesar Rp. 32.799.901.053,57 /tahun. Penurunan kinerja dari mesin pembangkit disebabkan karena adanya degradasi kemampuan material penyusun mesin pembangkit, penurunan fungsi coating pada sudu-sudu turbin dan kompresor, menurunnya kualitas glasswool atau isolator kalor, dan karena adanya faktor perawatan mesin pembangkit itu sendiri.

Daftar Pustaka

- [1] Kementerian ESDM, 2019, *Indonesia Energy Outlook*, Pusat Data dan Informasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, pp. 45-53.
- [2] Kusuma, I G. B. W., 2010, *Audit Pembangkit Listrik PT. Indonesia Power UBP Bali*, Pusat Penelitian Industri dan Energi Universitas Udayana, Bali, pp. 1-3.
- [3] Kementerian ESDM, 2011, *Mengenal Jenis-Jenis Gas Bumi*, www.migas.esdm.go.id
- [4] Sundari, P., 2014, *Efisiensi Combine Cycle PLTGU PT. Indonesia Power UP Perak-Grati Blok 1. PT Indonesia Power*, Laporan Praktek Kerja Lapangan PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan, pp. 16-17.
- [5] Alief, R., 2013, *Sejarah Singkat Turbin Gas*, www.rakhman.net
- [6] Annur. M. N., 2017, *Pengaruh Variasi Beban Terhadap Performa Turbin Gas Di PLTGU Blok Gt 1.3 PT. Indonesia Power Grati, Pasuruan*, Skripsi Program Studi Diploma III Departemen Teknik Mesin Industri, Fakultas Vokasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, pp. 18-21.

	<p>A A Ngurah Putra Damara Artha Wijaya menyelesaikan studi sarjana Teknik Mesin di Universitas Udayana pada tahun 2017 sampai 2021. Ia menyelesaikan program studi sarjana dengan judul penelitian Analisa Kinerja Mesin Pembangkit Listrik Tenaga Gas Unit 1 Blok 1 di PT. Indonesia Power Grati POMU.</p>
<p>Topik penelitian yang diminati adalah bidang konversi energi khususnya termodinamika dan pembangkitan energi listrik</p>	

Pengaruh Kecepatan Angin dan Kecepatan Kendaraan Terhadap Gaya Skid Pada Mobil Chevrolet Camaro

Arantxa Rama Syamsudin, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, Suarnadwipa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Dalam balapan mobil, mobil-mobil dipacu dalam kecepatan tinggi hingga batas maksimalnya, sehingga kecelakaan di dalam sirkuit balapan terkadang dapat terjadi. Salah satu kecelakaan dalam sirkuit yang pernah terjadi antara lain adalah terjadinya gaya lift pada mobil yang dapat menyebabkan mobil terangkat sehingga terjadi gaya slip, skid maupun rolling pada mobil. Beberapa hal yang mengakibatkan kejadian tersebut adalah kecepatan mobil, kecepatan angin dan sudut tikungan, oleh sebab itu perlu diteliti ketiga parameter tersebut dengan menggunakan simulasi computer berbasis CFD. Analisis CFD dilakukan untuk mengetahui gaya slip dan skid pada kendaraan yang melaju pada berbagai variasi kecepatan. Simulasi Computational Fluid Dynamic divariasikan menjadi 6 kondisi yaitu, mobil melaju pada kecepatan 80 km/h no slip, kecepatan 80 km/h dengan slip, kecepatan 80 km/h dengan slip dan skid, kecepatan 140 km/h no slip, kecepatan 140 km/h dengan slip, kecepatan 140 km/h dengan slip dan skid. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa terjadi pergeseran centre of gravity dari mobil saat no slip, slip dan skid, masing-masing berurutan sebesar 0 mm, 8.191043063 mm dan 11.2876569 mm untuk kecepatan 80 km/h, dan masing-masing berurutan sebesar 0 mm, 33.3943 mm dan 103.195 mm untuk kecepatan 140 km/h, artinya semakin tinggi kecepatan mobil maka pergeseran center of gravity yang menyebabkan mobil mengalami gaya slip dan skid semakin besar.

Kata kunci: Aerodinamika, CFD, gaya slip, gaya skid

Abstract

In-car racing, the cars are driven at high speed to the maximum limit, thus the accidents on the racing circuit can sometimes occur. One of the accidents in the circuit that has occurred, among others, is the occurrence of a lift force on the car which can cause the car to lift and causes skid, slip and rolling force on the car. Some of the things that can cause this incident are the speed of the car, the wind speed and the angle of the corner. Therefore, it is necessary to examine these three parameters using a computer simulation based on CFD. CFD analysis is conducted to determine the slip and skid forces of vehicles moving at various speed variations. Computational Fluid Dynamic simulation is varied into 6 conditions, which are, the car is moving at a speed of 80 km/h with no slip, a speed of 80 km/h with slip, a speed of 80 km/h with slip and skid, a speed of 140 km/h with no slip, a speed of 140 km/h with slip, speed 140 km/h with slip and skid. From the simulation results obtain that there was a shift in the center of gravity of the car when no slip, slip and skid were 0 mm, 8.191043063 mm and 11.2876569 mm respectively for a speed of 80 km/h, and respectively 0 mm, 33.3943 mm and 103.195 mm for a speed of 140 km/h, this means that the higher the speed of the car, the higher shift in the center of gravity causes the car run into a slip and skid force.

Keyword: Aerodynamics, CFD, slip force, skid force

1. Pendahuluan

Kendaraan bermotor adalah suatu benda yang digerakan oleh gear dan mesin sebagai media penggerakannya, serta digunakan sebagai alat transportasi untuk memindahkan manusia atau benda dari satu tempat ke tempat lainnya dalam waktu singkat. Pada dasarnya kendaraan bermotor menggunakan mesin pembakaran dalam, kendaraan bermotor juga kebanyakan memiliki roda yang fungsinya sebagai perpindahan tenaga dari mesin ke permukaan jalan agar kendaraan tersebut dapat berpindah tempat.

Keamanan dasar pada mobil ada dua yaitu: Kesalahan yang terjadi akibat pengemudi sering terjadi dan juga ban kehilangan gesekan saat pengereman hampir setengah gravitasi. Lalu kondisi angin serta jalanan dengan tingkat kemiringan tertentu juga bisa menyebabkan kecelakaan lalu

lintas tentunya hal ini juga berhubungan dengan aerodinamika pada kendaraan.

Seiring dengan perkembangan zaman, mobil tidak hanya digunakan untuk alat transportasi tetapi digunakan juga untuk olahraga, salah satunya adalah balapan mobil. Balap mobil adalah salah satu cabang olahraga yang melibatkan kendaraan khususnya mobil. Salah satu cabang olahraga tontonan yang paling diminati dan juga banyak diiklankan juga merupakan cabang olahraga balap mobil. Pada 11 Juni tahun 1895 balap mobil pertama kali muncul dan dikenalkan, dan hingga saat ini masih menjadi salah satu olahraga yang populer di dunia. Mobil yang digunakan dalam balapan mobil merupakan mobil yang khusus yaitu mobil balap.

Mobil balap merupakan mobil yang dipakai untuk lomba dalam balapan mobil. Mobil balap tidak sama karakteristik dan spesifikasinya dengan mobil yang biasa dipakai sehari-hari. Pada mobil balap,

banyak aspek yang berbeda dengan mobil yang biasa dipakai sehari-hari. Mulai dari body mobil, fairing, spesifikasi dari mesin mobil tersebut hingga ke system kendalinya pun berbeda dengan mobil pada umumnya. Untuk menjadi seorang pembalap, skill untuk mengendarai mobil harus lebih baik daripada pengemudi biasa dan juga menguasai medan balapan atau track balapan adalah kemampuan yang wajib yang dimiliki oleh setiap pembalap. Dari zaman ke zaman mobil balap telah mengalami banyak terobosan teknologi dan juga perubahan desain mobilnya. Tetapi dikarenakan mobil ini dikhususkan untuk melaju dengan kecepatan tinggi, faktor design dari body mobil juga harus diperhatikan agar dapat mensirkulasikan udara pada body mobil dengan baik (aerodinamis).

Dalam perlombaan balapan mobil, Mobil-mobil dipacu dalam kecepatan tinggi hingga batas maksimalnya, sehingga kecelakaan di dalam sirkuit balapan terkadang dapat terjadi. Salah satu kecelakaan dalam sirkuit yang pernah terjadi antara lain adalah terjadinya gaya lift pada mobil yang dapat menyebabkan mobil terangkat dan terjadi gaya skid, slip maupun rolling pada mobil.

Karena pada setiap balapan tidak selalu berjalan dengan mulus, kecelakaan terkadang tidak dapat dihindari. Seperti pada tragedi yang terjadi pada balapan di Le Mans, Prancis pada tahun 1955, dimana Pierre Levegh, seorang pembalap asal Prancis, mungkin saja dapat memenangkan perlombaan jika bukan karena satu kesalahan dalam satu jam terakhir. Tiga tahun kemudian, Levegh diundang untuk bergabung dengan tim Mercedes-Benz; 300SLR mereka harus dilengkapi dengan inovasi baru, rem udara yang akan meningkatkan tikungan.

Sebelum perlombaan, Levegh mengeluh bahwa jalannya terlalu sempit di dekat area pit-stop dan tribun. Pengamatan ini terbukti berhasil. Ketika Levegh berlomba untuk memimpin di dekat pit-stop, dia berbelok untuk menghindari sesama pembalap Jaguar Mike Hawthorn saat bergerak menuju pit. Mobil Levegh, melaju sekitar 150 mph/h, mobil Levegh kehilangan keseimbangannya lalu terjadi gaya angkat yang tidak diinginkan pada mobil yang menyebabkan mobil mengalami bodyroll hingga menabrak tribun penonton.

Kecelakaan selanjutnya terjadi pada saat pengujian prototype dari Chevrolet Camaro Z/28 yang dilakukan pada Nurburgring. Pada saat prototype diuji di sebuah sirkuit Nurburgring di Jerman, pengemudi yang memacu Chevrolet Camaro gagal melakukan tikungan yang menyebabkan mobil menabrak dinding dari sirkuit. Pengemudi serta penumpangnya baik-baik saja tetapi dari yang dapat disimpulkan dari kejadian tersebut adalah mobil mengalami understeer yang menyebabkan mobil gagal berbelok dan akhirnya menabrak dinding [1].

Beberapa penelitian tentang aerodinamika sudah pernah dilakukan sebelumnya, salah satunya adalah yang dilakukan oleh Nehru College of Engineering and Research Centre, dengan judul "CFD Analysis of aerodynamics of car". Penelitian tersebut menjelaskan tentang gaya-gaya aerodinamika yang terjadi pada mobil. Dalam penelitian tersebut, mereka menganalisis fenomena aliran drag yang terjadi pada kendaraan dengan tujuan untuk meminimalisir drag force yang terjadi pada mobil. Kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini dibuat menggunakan aplikasi CAD dengan ukuran/ skala 1:1 dengan mobil aslinya [2].

Untuk melakukan pengujian CFD, peneliti menggunakan aplikasi CFD berupa Ansys. Model mobil yang telah dibuat diimport ke dalam format Ansys agar bisa dibuka dalam Ansys dan selanjutnya meshing body mobil untuk mengetahui apakah mobil sudah layak untuk diuji karena meshing merupakan tahap penting yang dapat menentukan bagaimana hasilnya nanti, setelah itu adalah membuat wind tunnel dalam Ansys.

Dari penelitian tersebut didapatkan koefisien drag, tekanan pada bagian depan dan belakang mobil serta bagaimana aliran dari udara di sekitar mobilnya. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Pancasila, dengan judul "Pemodelan dan Simulasi Stabilitas Sistem Kemudi Sepeda Motor Roda Tiga untuk Penyandang Disabilitas" dimana penelitian ini menganalisis pergeseran center of gravity yang diakibatkan oleh gaya yang diterima pada masing masing roda pada saat kendaraan menikung dikecepatan 10-30 km/jam dengan sudut steer yang bervariasi dari 2-18 derajat dan mencari pada kecepatan berapakah serta sudut steer berapa kendaraan tersebut mengalami slip maupun skid yang diakibatkan oleh gaya yang diterima oleh masing masing roda[3].

2. Dasar Teori

2.1. Aerodinamika Kendaraan

Aerodinamika pada *body* kendaraan yaitu bagian yang sangat penting dari desain kendaraan karena dapat mempengaruhi efisiensi dari kinerja kendaraan itu sendiri apabila tidak direncanakan dengan baik. Kestabilan dari kendaraan dan efisiensi penggunaan bahan bakar dapat lebih baik jika design body kendaraan memiliki gaya hambat yang kecil [4].

Aspek aerodinamika pada sebuah kendaraan memerankan salah satu parameter yang sangat penting dalam design otomotif, karena hal ini berpengaruh pada timbulnya gaya hambat pada kendaraan, dan akan mempengaruhi keseimbangan (stabilitas) dari koefisien hambat, tekanan dinamis serta luas permukaannya [5].

Persamaan tersebut dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$D = 0,5 (C_D \cdot \rho \cdot U_0^2 \cdot A) \quad (1)$$

Dimana :

C_D = Koefisien drag

$\rho \cdot U_0^2$ = Tekanan dinamis arus bebas

A = Luas karakteristik (luas daerah yang mengalami geseran)

2.2. Gaya Slip dan Skid

Slip merupakan gerakan relatif antara roda dan jalanan tempat roda itu menapak. *Slip* terjadi jika pergerakan rotasi roda lebih daripada jarak yang seharusnya ditempuh oleh kendaraan sedangkan gaya *skid* dapat terjadi jika jarak yang ditempuh lebih besar daripada gerakan rotasional roda.

2.3 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu sistem simulasi analisis berbasis komputer yang dikhususkan untuk memprediksi perhitungan seperti perhitungan aliran fluida, heat transfer dan reaksi kimia lainnya yang terjadi pada fluida.

CFD mengandung tiga tahapan, yaitu:

1) Pre-processing.

Pre-processing merupakan tahapan awal dimana mengexport model mobil yang telah dibuat di aplikasi inventor serta dilakukan proses *meshing* pada mobil.

2) *Processing* adalah suatu tahap menghitung serta menganalisis. Proses ini merupakan proses yang paling penting karena meliputi membuat kondisi batas, menentukan kecepatan inlet dan menentukan variasi sudut serang pada mobil.

3) Post-processing

Pada tahapan ini adalah menampilkan seluruh hasil yang dibuat dalam tahapan sebelumnya.

2.4 Center of Gravity

Center of gravity kendaraan adalah titik yang menjumlahkan massa kendaraan di satu titik pusat. Sederhananya, ini adalah lokasi rata-rata berat suatu benda, pusat gravitasi kendaraan paling sering berperan saat mobil berbelok. Pergeseran *center of gravity* sekecil apapun dapat memicu terjadinya gaya *slip* maupun gaya *skid* tergantung dari kecepatan kendaraan saat berbelok maupun sudut belokannya, oleh karena itu, *center of gravity* $\neq 0$ atau terjadinya pergeseran *center of gravity* berbahaya bagi stabilitas kendaraan [6].

3. Metode Penelitian

3.1. Alur penelitian

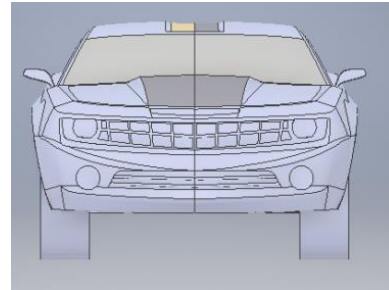
1. Mengumpulkan dan mempelajari literatur.

Mengumpulkan serta mempelajari dari berbagai jurnal penelitian yang sudah ada tentang aerodinamika, variable penyebab kecelakaan dan gaya-gaya aerodinamika yang terjadi pada mobil.

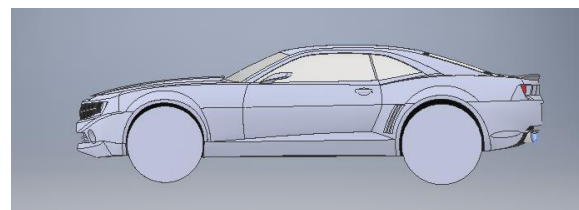
Selanjutnya mempelajari simulasi CFD menggunakan ANSYS 19.2.

2. Pembuatan model kendaraan dengan aplikasi CAD

Membuat model dari mobil 3D yang ingin dianalisa dengan skala 1:1 dengan ukuran aslinya.



Gambar 1. Tampak depan model mobil yang akan diuji



Gambar 2. Tampak samping model mobil yang akan diuji

3. Mengimpor model mobil dari CAD ke Ansys.

4. Meshing

Proses *meshing* merupakan suatu proses yang sangat penting karena mempengaruhi hasil akhir dari simulasi yang dilakukan, proses ini adalah proses dimana segmen segmen dari model mobil disatukan sehingga simulasi dapat dilakukan, apabila proses *meshing* gagal, maka model mobil harus diperbaiki lagi desain dari mobilnya dalam aplikasi inventor.

5. Penentuan kondisi batas

Simulasi aerodinamika yang akan dilakukan dipengaruhi oleh udara pada lingkungan sekitar dengan nilai tekanan atmosfer sebesar 1 atm. Penentuan kondisi batas juga ditentukan pada *inlet*, *outlet* serta pada dinding. Pada bagian *inlet* dimasukan kecepatan kendaraan yang divariasikan dari 80 dan 140 km/h lalu dimasukan serang angin sebesar 58 km/h dan juga sudut serang akan divariasikan. Hal ini dilakukan dengan cara mengatur kecepatan arah u, v dan w masing masing untuk arah x, y dan z. Fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah udara dengan sifat fisik sebagai berikut: density 1,225 kg/m. Udara yang mengalir pada bodi mobil diasumsikan sebagai gas ideal dan *incompressible*. Pada *outlet* Neumann diaplikasikan ($dp/dx=dp/dy=dp/dz=0$), pada body mobil aplikasi adalah wall ($du/dx=dv/dy=dw/dz=0$).

6. Hasil simulasi

Hasil dari simulasi yang akan didapat berupa perubahan tekanan, kecepatan aliran, gaya seret dan gaya tekan di sekitar bodi mobil yang nantinya akan dihitung untuk mencari gaya slip, skid dan gaya rolling yang terjadi pada model mobil.

7. Analisa gaya-gaya aerodinamika

Analisa gaya-gaya aerodinamika dilakukan untuk mencari penyebab mobil mengalami kecelakaan seperti gaya slip, gaya skid dan gaya rolling.

3.2. Perhitungan gaya slip dan skid

Untuk mengetahui apakah mobil mengalami gaya slip maupun gaya skid, $\Sigma F = 0$ dipakai dalam penelitian ini. Jika $\Sigma F = 0$ artinya mobil tidak mengalami gaya slip atau gaya skid, tetapi jika $\Sigma F \neq 0$ maka gaya slip atau gaya skid terjadi, dimana ΣF dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Sigma F = P1 \cdot X + P2 \cdot X - P3 \cdot X - P4 \cdot X \quad (2)$$

Dimana :

- P1 = Tekanan pada roda depan kanan
- P2 = Tekanan pada roda depan kiri
- P3 = Tekanan pada roda belakang kanan
- P4 = Tekanan pada roda belakang kiri
- X = Jarak dari roda ke *center of gravity*

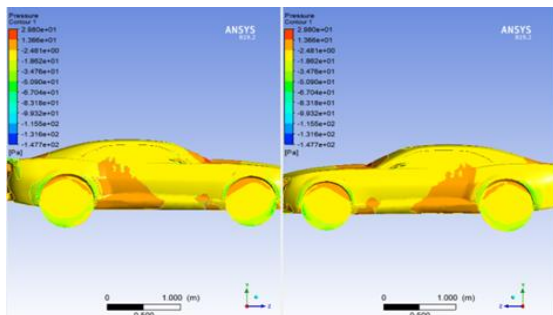
Dan untuk mengetahui berapa pergeseran *center of gravity* yang terjadi menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Cg = \frac{\Sigma F}{(g \cdot \text{berat mobil})} \quad (3)$$

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Kecepatan 80 km/h tanpa slip

Distribusi tekanan yang terjadi pada bagian kiri dan kanan mobil saat mobil melaju tanpa slip pada kecepatan 80 km/h juga sama, tidak adanya perbedaan gradien tekanan antara mobil bagian kiri dan mobil bagian kanan. *Contour* gradien tekanan menggunakan warna berbeda untuk mengetahui perbedaan gradien tekanan, warna hijau muda menggambarkan gradien tekanan sebesar -23.4 Pa, warna kuning -5.7 Pa, warna oranye 12 Pa dan warna merah 29.8 Pa. Gradien tekanan yang terjadi pada keempat roda mobil semuanya sama yaitu -49.1 Pa.



Gambar 3. Gradien tekanan pada roda kecepatan 80km/h tanpa slip.

$$\begin{aligned} P1 &= -49.1 \text{ Pa} & P3 &= -49.1 \text{ Pa} \\ P2 &= -49.1 \text{ Pa} & P4 &= -49.1 \text{ Pa} \\ X &= 1696.03 \text{ cm} \\ \text{Berat mobil} &= 2250 \text{ kg} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$\Sigma F = -49,1 \times 1696,03 + -49,1 \times 1696,03 - -49,1 \times 1696,03 - -49,1 \times 1696,03$$

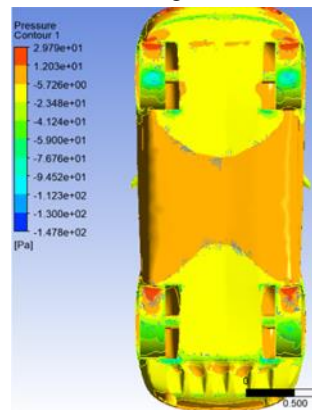
$$\Sigma F = -180796,798$$

$$Cg = \frac{0}{(9.81 \times 2250)} \\ Cg = 0$$

Tidak adanya pergeseran *center of gravity* pada saat mobil melaju tanpa slip di kecepatan 80 km/h yang artinya tidak terjadi gaya slip maupun gaya skid.

4.2. Kecepatan 80 km/h dengan slip

Perbedaan gradien tekanan yang signifikan dapat terlihat pada bagian roda, dimana terjadi perbedaan gradien tekanan pada roda depan dan roda belakang. Tekanan yang terjadi pada kedua roda depan sebesar -94.5 Pa sedangkan tekanan yang terjadi pada roda belakang sebesar -41.2 Pa yang berarti terdapat perbedaan kecepatan antara roda depan dengan roda belakang.



Gambar 4. Gradien tekanan pada roda kecepatan 80km/h dengan slip.

$$\begin{aligned} P1 &= -94.5 \text{ Pa} & P3 &= -41.2 \text{ Pa} \\ P2 &= -94.5 \text{ Pa} & P4 &= -41.2 \text{ Pa} \\ X &= 1696.03 \text{ cm} \\ \text{Berat mobil} &= 2250 \text{ kg} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$\Sigma F = -94,5 \times 1696,03 + -94,5 \times 1696,03 - -41,2 \times 1696,03 - -41,2 \times 1696,03$$

$$\Sigma F = -180796,798$$

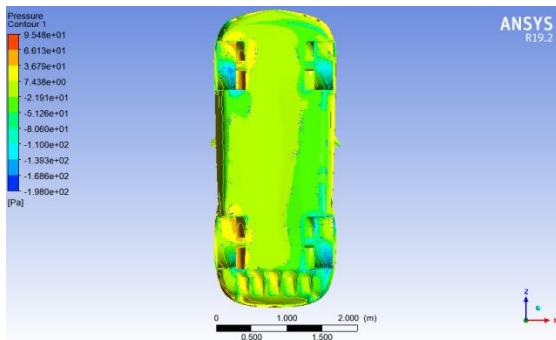
$$C_g = \frac{-180796,798}{(9,81 \times 2250)}$$

$$C_g = -8,191043063$$

Terjadi sedikit pergeseran *center of gravity* pergeseran sebesar 8,191043063 mm kearah kiri, ini menandakan bahwa mobil mengalami *slip* sesaat dikarenakan terjadinya pergeseran *center of gravity*.

4.3. Kecepatan 80 km/h dengan *slip* dan *skid*.

Gradien tekanan yang terjadi pada keempat roda mengalami perbedaan dimana pada roda bagian depan kanan adalah sebesar -168 Pa, roda depan bagian kiri sebesar -110 Pa, roda bagian belakang kanan -21.9 Pa dan roda bagian belakang kiri sebesar -110 Pa yang menyebabkan terjadinya perbedaan kecepatan pada keempat roda karena semakin tinggi tekanan maka kecepatan akan semakin rendah dan sebaliknya.



Gambar 5. Gradien tekanan pada roda kecepatan 80km/h dengan *slip*.dan *skid*.

$$P1 = -168,8 \text{ Pa} \quad P3 = -21,9 \text{ Pa}$$

$$P2 = -110 \text{ Pa} \quad P4 = -110 \text{ Pa}$$

$$X = 1696,03 \text{ cm}$$

$$\text{Berat mobil} = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = -168,8 \times 1696,03 + -110 \times 1696,03 - 21,9 \times 1696,03 - -110 \times 1696,03$$

$$\Sigma F = -249146,807$$

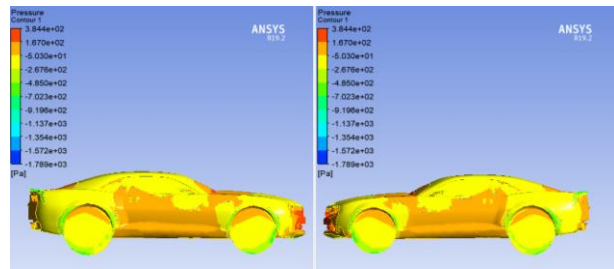
$$C_g = \frac{-249146,807}{(9,81 \cdot 2250)}$$

$$C_g = -11,2876569$$

Pergeseran *center of gravity* pada saat mobil mengalami *slip* dan *skid* pada 80 km/h lebih besar dibandingkan pada saat mobil hanya maju dengan *slip* saja yaitu sebesar 11,2876569 mm kearah kiri, ini menandakan bahwa mobil mengalami *slip* disusul dengan *skid*.

4.4. Kecepatan 140 km/h tanpa *slip*.

Gradien tekanan yang terjadi pada keempat roda mobil pun sama yaitu sebesar -485 Pa tekanan ini menunjukkan bahwa mobil melaju dengan stabil dan keempat roda mengalami kecepatan yang sama.



Gambar 6. Gradien tekanan pada roda kecepatan 140km/h tanpa *slip*.

$$P1 = -475 \text{ Pa} \quad P3 = -475 \text{ Pa}$$

$$P2 = -475 \text{ Pa} \quad P4 = -475 \text{ Pa}$$

$$X = 1696,03 \text{ cm}$$

$$\text{Berat mobil} = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = -475 \times 1696,03 + -475 \times 1696,03 - 475 \times 1696,03 - -475 \times 1696,03$$

$$\Sigma F = 0$$

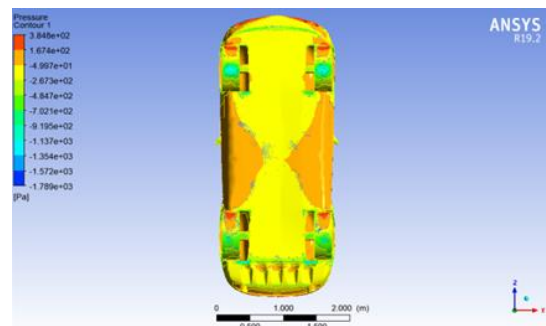
$$C_g = \frac{0}{(9,81 \times 2250)}$$

$$C_g = 0$$

Tidak adanya pergeseran *center of gravity* pada saat mobil melaju tanpa *slip* di kecepatan 140 km/h yang artinya tidak terjadi gaya *slip* maupun gaya *skid*.

4.5. Kecepatan 140 km/h dengan *slip*.

Gradien tekanan yang terjadi pada roda depan dan belakang mengalami perbedaan yang signifikan dimana gradien tekanan yang terjadi roda depan sebesar -702 Pa dan gradien tekanan yang terjadi pada roda belakang sebesar -484.4 Pa, perbedaan tekanan ini mengindikasikan bahwa mobil melaju dalam keadaan yang kurang stabil dikarenakan terjadinya perbedaan kecepatan akibat dari perbedaan tekanan antara roda depan dengan roda belakang.



Gambar 7. Gradien tekanan pada roda kecepatan 140km/h dengan *slip*.

$$\begin{aligned}
 P1 &= -702 \text{ Pa} & P3 &= -484.7 \text{ Pa} \\
 P2 &= -702 \text{ Pa} & P4 &= -484.7 \text{ Pa} \\
 X &= 1696.03 \text{ cm} \\
 \text{Berat mobil} &= 2250 \text{ kg} \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 \Sigma F &= -702 \times 1696,03 + -702 \times 1696,03 - -484,7 \times 1696,03 - -484,7 \times 1696,03
 \end{aligned}$$

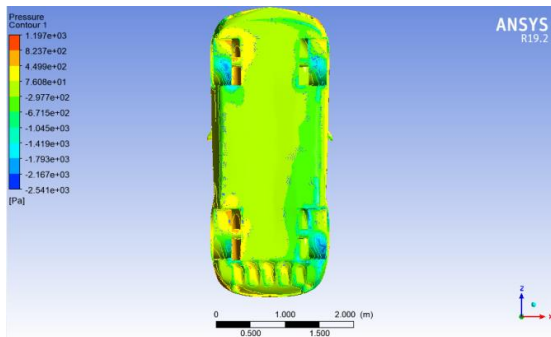
$$\Sigma F = -737095$$

$$\begin{aligned}
 C_g &= \frac{-737095}{(9.81 \times 2250)} \\
 C_g &= -33,3943
 \end{aligned}$$

Terjadi sedikit pergeseran center of gravity pergeseran sebesar 33,3943 mm kearah kiri, ini menandakan bahwa mobil mengalami *slip* sesaat dikarenakan terjadinya pergeseran *center of gravity*.

4.6. Kecepatan 140 km/h dengan *slip* dan *skid*.

Gradien tekanan pada keempat roda yang terjadi semuanya berbeda-beda. Gradien tekanan yang dialami oleh roda depan kanan sebesar -1793 Pa, roda depan kiri -1419, roda belakang kanan -76 Pa dan roda belakang kiri -1793 Pa. Tekanan yang terjadi pada roda dapat mengindikasikan bahwa mobil melaju tidak dalam keadaan stabil dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi pada masing masing roda yang artinya kecepatan yang terjadi pada masing-masing roda berbeda.



Gambar 8. Gradien tekanan pada roda kecepatan 140km/h dengan *slip* dan *skid*.

$$\begin{aligned}
 P1 &= -1793 \text{ Pa} & P3 &= -76 \text{ Pa} \\
 P2 &= -1419 \text{ Pa} & P4 &= -1793 \text{ Pa} \\
 X &= 1696.03 \text{ cm} \\
 \text{Berat mobil} &= 2250 \text{ kg} \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$\Sigma F = -1793 \times 1696,03 + -1419 \times 1696,03 - -76 \times 1696,03 - -1793 \times 1696,03$$

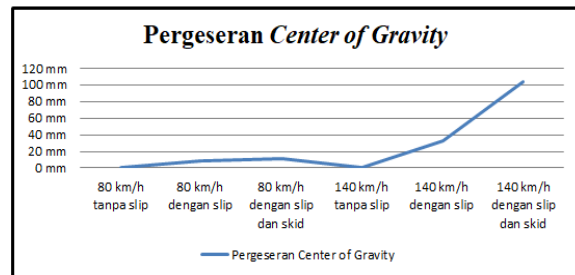
$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= -2277768 \\
 C_g &= \frac{-2277768}{(9.81 \cdot 2250)} \\
 C_g &= -103.195
 \end{aligned}$$

Pergeseran *center of gravity* pada saat mobil mengalami *slip* dan *skid* pada 140 km/h lebih

besar dibandingkan pada saat mobil hanya maju dengan *slip* saja yaitu sebesar 103,195 mm kearah kiri, ini menandakan bahwa mobil mengalami *slip* yang berkepanjangan lalu terjadilah *skid*.

3.7 Perbandingan pergeseran *center of gravity*

Dapat dilihat pada gambar bahwa semakin tinggi kecepatan mobil maka jika terjadi gaya slip maupun skid akan semakin besar pergeseran *center of gravity* yang terjadi pada mobil.



Gambar 9. Grafik pergeseran *center of gravity*

5. Kesimpulan

Salah satu hal yang dapat mengindikasikan kestabilan kendaraan saat melaju adalah besarnya tekanan yang sama pada masing-masing rodanya baik itu roda depan, maupun roda belakang. Perbedaan tekanan yang terjadi pada salah satu roda atau lebih dapat menyebabkan terjadinya gaya pada mobil yang sedang melaju, gaya yang dimaksud disini merupakan gaya *slip*, *skid* maupun *rolling*, semua itu tergantung pada perbedaan tekanan pada masing-masing roda yang terjadi. Dari pengujian diperoleh bahwa terjadi pergeseran *centre of gravity* dari mobil saat no slip, slip dan skid, masing-masing berurutan sebesar 0 mm, 8.191043063 mm dan 11.2876569 mm untuk kecepatan 80 km/h, dan masing-masing berurutan sebesar 0 mm, 33.3943 mm dan 103.195 mm untuk kecepatan 140 km/h.

Daftar Pustaka

- [1] Okulski, T. (2016, May 12). The 2017 Camaro Z/28 Prototype Just Crashed on the Nurburgring. Retrieved from Road and Track.
- [2] R.Varun. (2018). CFD Analysis of Aerodynamics of Car . International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology .
- [3] Adi Nurrahman, Y. D. (n.d.). Pemodelan Dan Simulasi Stabilitas Sistem Kemudi Sepeda Motor Roda Tiga Untuk Penyandang Disabilitas.
- [4] Atmika, I. K. (2017, April). Konstruksi dan Stabilitas Kendaraan. Bali, Indonesia.

- [5] Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M. P. (2000). *Teknologi Otomotif*. Surabaya: Guna Widya.
- [6] Maslakhatus Zahro, I. N. (2018). Analisis Pengaruh Posisi Center of Gravity terhadap Stabilitas Arah Bus Double Deck. *Jurnal Teknik Its*.

	<p>Arantxa Rama Syamsudin menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana, pada tahun 2021 dengan mengambil Program Studi Teknik Mesin pada tahun 2017.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan aerodinamika, gaya <i>slip</i> dan gaya <i>skid</i> pada mobil.</p>	

Karakterisasi Limbah Medis dan *Bed Material* Pasir Alumina Pada Pembakaran *Fluidized Bed*

Claudia Elsha Alvince, I Nyoman Suprapta Winaya, I Putu Lokantara
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Penanganan masalah limbah medis penting untuk diperhatikan terutama dimasa pandemi Covid-19. Penelitian ini menunjukkan teknologi yang tepat untuk mengurangi volume dan sifat infeksius dari limbah medis adalah pembakaran menggunakan reaktor *fluidized bed*, dimana karakteristik limbah medis yang mengandung senyawa karbon sebanyak 47,54% dan kandungan yang mudah menguap tinggi, serta memiliki nilai kalor sebesar 38,147 MJ/kg dapat direduksi dikarenakan limbah bersentuhan dengan *bed material*, sangat mudah untuk mengolah limbah dengan kadar air tinggi dan bernilai kalor rendah. Selain itu, pada penelitian pasir alumina diameter 0,8 dapat mendistribusikan temperatur pada ruang bakar secara merata karena ukurannya yang lebih kecil dari 1,1 mm dapat berfluidisasi dengan baik serta lebih besar dari 0,2 dan 0,5 dapat mempertahankan panas lebih baik.

Kata kunci: Limbah Medis, Pembakaran, Fluidisasi, Pasir Alumina

Abstract

Handling the problem of medical waste is important to pay attention to, especially during the Covid-19 pandemic. This study shows the right technology to reduce the volume and infectious properties of medical waste are combustion using a *fluidized bed* reactor, where the characteristics of medical waste contain 47.54% carbon compounds and high volatile content, and have a heating value of 38.147 MJ / kg can be reduced because the waste is in contact with the *bed material*, it is very easy to treat waste with high moisture content and low calorific value. Also, in this research, 0.8 diameter alumina sand can evenly distribute the temperature in the combustion chamber because it size which is smaller than 1.1 mm can fluidize well and is greater than 0.2 and 0.5 can retain heat better.

Keywords: Medical Waste, Combustion, Fluidized Bed, Alumina Sand

1. Pendahuluan

Limbah medis sangat penting untuk dikelola secara baik dan benar karena berpotensi membahayakan lingkungan dan memiliki resiko bagi kesehatan masyarakat [1], selain itu mengingat kandungan limbah medis lebih banyak anorganik seperti plastik dan karet, yang memiliki sifat kadar air dan kandungan materi yang mudah menguap yang tinggi [2].

Saat ini pembakaran adalah cara mengatasi limbah medis yang tepat. Karena pembakaran terjadi padat temperatur tinggi dapat mengurangi limbah infeksius serta mereduksi volume limbah menjadi abu [3]. Hal ini menjadi penting ditengah daruratnya masalah penanganan limbah medis . Pada penelitian ini digunakan *fluidized bed combustor*.

Prinsip kerja dari *fluidized bed combustor* (FBCs) yaitu menggunakan media pengaduk berupa pasir sebagai *bed material*, hamparan pasir tersuspensi ke atas aliran udara, sehingga akan terjadi pencampuran yang homogen antara udara dengan butiran-butiran pasir tersebut. Turbulensi tinggi yang diciptakan meningkatkan pembakaran dan perpindahan panas yang efisien dan pencampuran yang merata [4]. Dalam hal ini digunakan pasir alumina sebagai *bed material* .

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana karakteristik limbah medis dan pasir alumina dalam pembakaran dengan menggunakan reaktor *fluidized bed*. Adapun variasi dalam penelitian ini adalah diameter pasir alumina yaitu 0,2 mm; 0,5 mm; 0,8 mm; dan 1,1 mm.

2. Dasar Teori

2.1. Limbah Medis

Limbah medis mengacu pada setiap limbah yang dihasilkan dari industri perawatan kesehatan seperti rumah sakit dan laboratorium medis.

Termasuk limbah anatomi, limbah patologis, limbah infeksius, limbah berbahaya, dan limbah lainnya. Semua limbah yang tergolong ke dalam limbah B3 harus memiliki pengelolaan khusus agar tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan sekitar limbah B3 tersebut.

2.2. Fluidized Bed Combustor

Reaktor *fluidized bed* berkarakter proses lebih pendek yang melibatkan pengeringan, gasifikasi, dan pembakaran limbah. Hal ini dilakukan dengan membuat kondisi statis dimana hamparan pasir panas atau material semacamnya dicampur ke material dasar untuk menciptakan panas potensial.

Dikarenakan limbah bersentuhan dengan *bed material*, sangat mudah untuk mengolah limbah dengan kadar air tinggi dan bernilai kalor rendah. Selain itu, aliran limbah plastik dan sampah bernilai kalor tinggi lainnya menyebarkan panas secara merata di seluruh dasar ruang bakar.

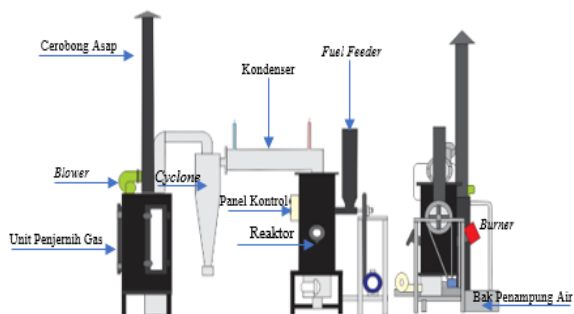
2.3. Pasir Alumina

Aluminium Oksida (Al_2O_3) atau yang sering dikenal alumina adalah substansi butiran berpori yang digunakan sebagai substrat untuk katalis dan sebagai adsorben untuk menghilangkan air dari gas dan cairan. Alumina berbentuk zat kristal putih atau hampir tidak berwarna, sifat fisik yang dimiliki alumina antara lain yaitu konduktivitas listrik rendah, ketahanan terhadap serangan kimia, kekuatan tinggi, kekerasan ekstrim, dan titik leleh tinggi [5].

3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, limbah medis yang digunakan adalah spoit suntikan, masker, kasa, dan kantong infus yang telah dicacah. Pasir alumina yang digunakan melewati proses penyaringan menggunakan *wire mesh* untuk mendapatkan diameter yang diinginkan yaitu 0,2 mm; 0,5 mm; 0,8 mm; dan 1,1 mm. Pembakaran dilakukan pada temperatur operasi yaitu 650°C.

Gambar dibawah menampilkan skematik alat yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 1. Skematik *Fluidized Bed Incinerator*

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karakterisasi Limbah Medis

Karakterisasi bahan bakar dilakukan untuk mengetahui karakteristik limbah medis yang akan digunakan. Karakterisasi limbah medis dilakukan melalui beberapa pengujian yaitu uji *proximate* kalor dan *thermo gravimetric analysis* (TGA), analisis nilai kalor, dan uji *ultimate*.

- Uji *Proximate* dan *Thermo Gravimetric Analysis*

Uji *proximate* bertujuan untuk mengetahui unsur fisika dari bahan bakar sampah medis yang berupa kadar air (moisture), abu (ash), karbon tetap (fixed carbon) dan bahan menguap (volatile).

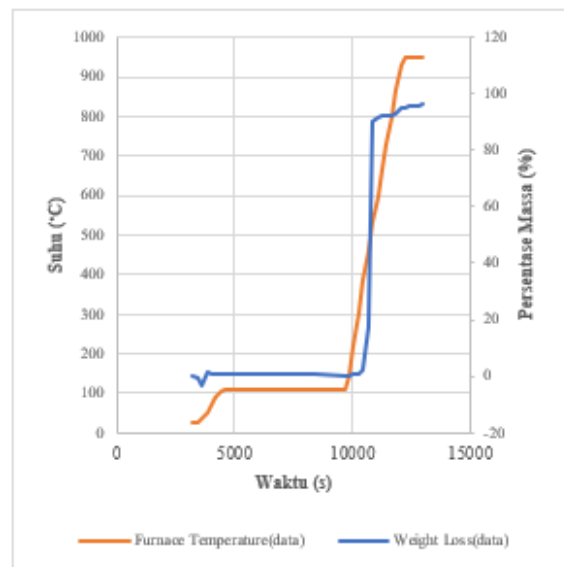
Sedangkan *Thermo Gravimetric Analysis* atau uji TGA dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat fisik dan kimia dari bahan yang diukur sebagai fungsi

dari meningkatnya suhu. Uji *proximate* dan *Thermo Gravimetric Analysis* atau TGA diuji menggunakan alat Leco TGA701 dengan standar ISO-9001:2008 HQ-Q-994. Berikut adalah hasil uji *proximate* dan TGA dari limbah medis.

Tabel 1. Tabel Uji *Proximate* Bahan Bakar Limbah Medis

Bahan Bakar	Moisture (%)	Volatile (%)	Fixed Carbon (%)	Ash (%)
Limbah Medis	0,54	95,67	0,41	3,38

Dari tabel diketahui kadar air dari bahan bakar limbah medis sebesar 0,54%, kandungan abu 3,38%, karbon tetap 0,41%, dan kandungan yang mudah menguap sebesar 95,67%. Hal ini mengindikasikan bahwa limbah medis mudah terbakar dan sangat cocok untuk bahan bakar.



Gambar 2. Grafik TGA

Dari grafik diatas menunjukkan bahwa pada 50 menit pertama terjadi proses pengeringan atau pengurangan kadar air dari limbah medis yaitu pada temperatur 120°C. Kemudian penurunan massa limbah medis terjadi pada temperatur 200-900°C Berdasarkan data pengujian TGA, pembakaran limbah medis dikontrol pada temperatur 650°C

- Analisis nilai kalor

Analisis Nilai Kalor digunakan untuk mengetahui jumlah energi panas yang terlepas untuk tiap satuan massa bahan bakar, pengujian ini juga dikenal dengan uji bom kalorimeter. Berikut adalah tabel hasil pengujian nilai kalor limbah medis. Pengujian nilai kalor dilakukan menggunakan alat *Parr 1341 Oxygen Bomb Calorimeter* dengan standar ASTM *Standard Test Method D5865*. Berikut adalah hasil pengujian nilai kalor dari limbah medis.

Tabel 2. Tabel Nilai Kalor Bahan Bakar Limbah Medis

Bahan Bakar	Berat Sampel (gram)	Nilai Kalor Sampel Limbah Medis			
		Suhu (ΔT_2)		Nilai Kalor (Q_c)	
		T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Sampel (Cal/gr)	MJ/kg
Limbah Medis I	0,524	30,569	33,104	8799,120	38,147
Limbah Medis II	0,525	30,492	33,210	9423,604	

Berdasarkan tabel 2 diketahui bahwa limbah medis memiliki nilai kalor sebesar 38,147 MJ/gr.

• Uji *Ultimate*

Uji *Ultimate* dilakukan untuk menentukan kandungan unsur kimia pada limbah medis. Pengujian ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengetahui kebutuhan udara pembaruan. Berikut merupakan tabel kandungan unsur kimia dari limbah medis.

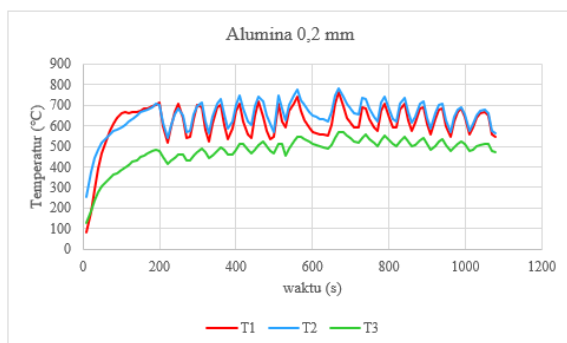
Tabel 3. Tabel Uji *Ultimate* Bahan Bakar Limbah Medis[6]

Bahan Bakar	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Limbah Medis	47,54	7,99	18,54	2,02	0,5

Berdasarkan tabel di atas diketahui limbah medis mengandung 47,54% karbon, 7,99% Hidrogen, 18,54% Oksigen, 2,02% Nitrogen, dan 0,5% Sulfur.

4.2. Distribusi Temperatur Ruang Bakar Pada Setiap Variasi Diameter

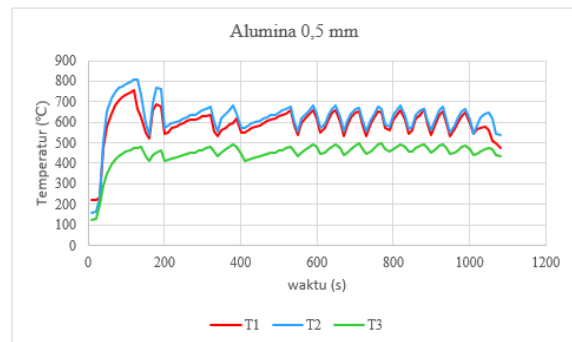
Digunakan 3 buah *thermocouple* yang diletakkan secara bertingkat didalam reaktor. *Thermocouple* 1 berada didasar reaktor untuk mengukur temperatur pada bed material kemudian secara berurutan dengan jarak setiap 10 cm untuk mengukur temperatur diatas bed material pada ruang bakar terdapat *thermocouple* 2 dan 3.



Gambar 3. Grafik Temperatur Diameter 0,2 mm

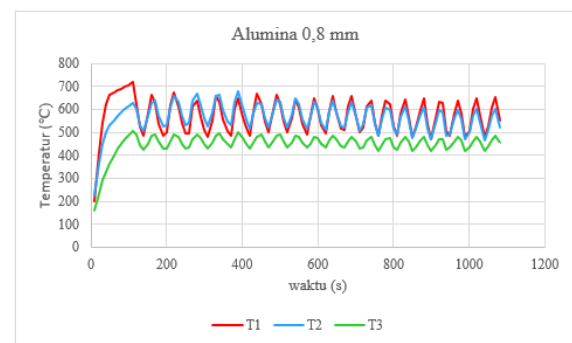
Grafik di atas menunjukkan pada variasi 0,2 mm pembakaran berlangsung pada rentang temperature 500°C-700°C dan stabil sampai pada limbah medis habis terbakar. Melihat pada data

temperature 1 dan 2 yang relatif sama menunjukkan bahwa panas di dalam ruang bakar terdistribusi secara merata dikarenakan terjadinya fluidisasi dengan baik.



Gambar 4. Grafik Temperatur Diameter 0,5 mm

Grafik distribusi temperatur pada variasi 0,5 mm menunjukkan pada awal pembakaran terjadi lonjakan pada temperatur 2 mencapai 807,7 °C namun berikutnya terjadi penurunan temperatur. Kemudian pembakaran berlangsung pada rentang temperatur 500-680°C sampai limbah medis habis terbakar. Pada grafik di atas juga terlihat perbedaan temperatur 1 dan 2 yang kecil karena terjadi fluidisasi sehingga temperatur pada ruang bakar terdistribusi secara merata.

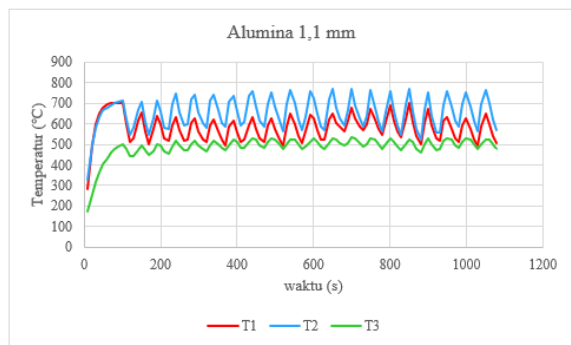


Gambar 5. Grafik Temperatur Diameter 0,8 mm

Grafik distribusi tekanan untuk variasi 0,8mm di atas menunjukkan di awal pembakaran temperatur 1 berada pada 716,6°C, kemudian turun dan berangsur stabil pada temperature 500-680°C. Pada variasi ini terjadi fluidisasi dengan sangat baik yang ditunjukkan pada data temperatur 1 yang relatif sama bahkan melebihi temperatur 2 dikarenakan bed material mengalami peristiwa *bubbling* dengan baik, sehingga distribusi temperatur pada ruang bakar juga merata yang mengakibatkan pembakaran lebih sempurna dan lebih cepat.

Berdasarkan grafik distribusi temperature pada variasi 1,1 mm terlihat bahwa pembakaran berlangsung pada rentang temperature antara 500-760°C, terjadi fluidisasi namun tidak sebaik yang terjadi pada variasi lainnya terlihat dari temperatur 1 dan 2 yang memiliki selisih cukup banyak pada rentang waktu 220 detik sampai 650 detik

mengindikasikan pembakaran kurang sempurna karena distribusi temperatur yang tidak merata.



Gambar 6. Grafik Temperatur Diameter 1,1 mm

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- Limbah medis memiliki kandungan yang mudah menguap sebesar 95,67%, dan kandungan senyawa karbon sebesar 47,54% serta memiliki nilai kalor sebesar 38,147 MJ/kg.
- Pasir alumina diameter 0,8 sebagai bed material dapat berfluidisasi dengan baik dibuktikan dengan temperatur pada ruang bakar terdistribusi secara merata karena ukurannya yang lebih kecil dari 1,1 mm dapat berfluidisasi dengan baik serta lebih besar dari 0,2 dan 0,5 dapat mempertahankan panas lebih baik sehingga pembakaran pada variasi ini lebih baik dan membutuhkan waktu yang relatif lebih cepat untuk mereduksi limbah medis.

Daftar Pustaka

- [1] Jang, Y.-C., Lee, C., Yoon, O.-S., & Kim, H., 2006, *Medical waste management in Korea*, Journal of Environmental Management, 80(2): 107–115.
- [2] Lee, C. C., & Huffman, G. L., 1996, *Medical waste management/incineration.*,

Journal of Hazardous Materials, 48(1-3): 1–30.

- [3] Winaya, I. N. S., 2012, *Fluidized Bed Combustion of High Volatile Matter Fuels – Porous Bed Material*, Heinrich-Bocking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG.
- [4] Van Caneghem, J, A. Brems, P. Lievens, C. Block, P. Billen, I. Vermeulen, R. Dewil, J. Baeyens, C. Vandecasteele., 2012, *Fluidized Bed Waste Incinerators: Design, Operational And Environmental Issues*, Progress in Energy and Combustion Science 38: 551-582.
- [5] Anonymous, 2018, *Alumina Chemical Compound*, Encyclopaedia Britannica, inc <https://www.britannica.com/science/alumina> (diakses 07 September 2020)
- [6] Xie, R., Lu, J., Li, J., & Yin, J., 2010, *A Burning Experiment Study of an Integral Medical Waste Incinerator*, Energy and Power Engineering, 2(03), 175.

	<p>Claudia Elsha Alvince menyelesaikan studi S1 di Universitas Udayana, Program Studi Teknik Mesin, Tahun 2021.</p>
<p>Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi adalah topik pembahasan konversi energi.</p>	

Karakterisasi Limbah Medis dan *Bed Material* Pasir Silika pada *Fluidized Bed Combustion*

Olan Rexcy Sanderan, I Nyoman Suprpta Winaya, I Putu Lokantara
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Saat ini limbah medis menjadi masalah yang harus segera diatasi. Peningkatan volume limbah medis saat ini juga disebabkan oleh pandemi covid-19 yang masih terjadi sampai sekarang. Limbah medis dapat direduksi dengan berbagai cara salah satunya menggunakan pembakaran dengan teknologi *fluidized bed combustion* (FBC). Ukuran diameter *bed material* menjadi salah satu indikator dalam proses pembakaran karena mempengaruhi proses fluidisasi dalam ruang bakar. Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan studi eksperimental yang mencari karakteristik dari limbah medis dan *bed material* pasir silika pada pembakaran *fluidized bed*. Diameter *bed material* pasir silika akan divariasikan dengan ukuran 0.2 mm, 0.5 mm, 0.8 mm dan 1.1 mm. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, proses pembakaran terbaik terjadi pada ukuran diameter 0.2 mm hal ini dikarenakan ukuran *bed material* yang lebih kecil mampu terfluidisasi lebih baik sehingga temperatur ruang bakar dapat terdistribusi secara merata.

Kata kunci: Limbah Medis, Pasir Silika, Pembakaran, Fluidisasi

Abstract

Currently, medical waste is a problem that must be handled immediately. The current increase in the volume of medical waste is also caused by the Covid-19 pandemic which is still happening today. Medical waste can be reduced in various ways, one of which is combustion with fluidized bed (FBC) technology. The size of bed material diameter is an indicator in the combustion process because it affects the fluidization process in the combustion chamber. This research was conducted using an experimental study approach that looked for the characteristics of medical waste and silica sand bed material in fluidized bed combustion. The bed diameter of the silica sand material will be varied with sizes 0.2 mm, 0.5 mm, 0.8 mm, and 1.1 mm. Based on the tests that have been done, the best combustion process occurs at a diameter of 0.2 mm. This is because the smaller bed material can fluidize better so that the temperature of the combustion chamber can be evenly distributed.

Keywords: Medical Waste, Silica Sand, Combustion, Fluidized Bed

1. Pendahuluan

Pandemi covid-19 yang terjadi sampai saat ini berpengaruh terhadap kondisi lingkungan yang dapat disebabkan oleh limbah dari alat medis yang digunakan, Peningkatan limbah khususnya limbah medis adalah dampak dari adanya peningkatan kegiatan pada rumah sakit [1]. Pengelolaan limbah medis secara baik dan benar sangat penting karena berpotensi membahayakan lingkungan dan memiliki resiko bagi kesehatan masyarakat [2].

Limbah medis yang memiliki dampak berbahaya dapat direduksi menggunakan insinerator. *Incinerator* dengan teknologi *Fluidized Bed* memiliki kelebihan untuk mencampur *bed material* dan massa limbah hingga dapat bersirkulasi penuh di dalam ruang bakar [3]. *Fluidized Bed Combustion* menggunakan hamparan berupa *bed material* yang pada umumnya ialah pasir silika, berfungsi sebagai media penghantar dan penyimpan panas di dalam ruang bakar dimana panas yang di simpan akan dihantarkan melalui kontak langsung dengan bahan bakar sehingga akan terjadi proses pembakaran. *Bed material* akan membantu pembakaran menjadi lebih baik karena pencampuran dengan bahan bakar yang baik, perpindahan panas yang tinggi serta kontak dengan area permukaan yang luas [4].

Pada pembakaran *fluidized bed*, ukuran diameter dari *bed material* akan mempengaruhi proses fluidisasi serta pembakaran dalam reaktor. Partikel *bed material* yang lebih besar tidak akan bercampur sebaik partikel *bed material* yang lebih kecil [5]. hal ini karena ukuran *bed material* akan mempengaruhi kebutuhan udara yang digunakan untuk proses fluidisasi dalam ruang bakar [6]. untuk partikel *bed material* yang lebih besar membutuhkan kecepatan fluidisasi minimum yang lebih tinggi sehingga rasio U/U_{mf} atau angka fluidisasi lebih rendah untuk kecepatan fluidisasi tertentu.

Oleh sebab itu, pada penelitian kali ini penulis akan menguji karakterisasi limbah medis dan *bed material* pasir silika dengan ukuran diameter 0.2 mm, 0.5 mm, 0.8 mm, serta 1.1mm menggunakan unit *fluidized bed combustion*.

2. Dasar Teori

2.1. Insinerator

Insinerator merupakan seluruh perangkat tertutup yang menggunakan nyala pembakaran yang terkontrol dan memenuhi kriteria untuk klasifikasi bagian bawah boiler, *output* sisa maupun hasil pembakaran, atau unit regenerasi karbon, juga tidak terdaftar sebagai tungku industri.

Insinerasi ialah proses konversi *biomass* atau limbah padatan apa pun menjadi panas menggunakan

teknologi pembakaran. Pada proses pengkonversian energi dengan teknologi FBC (*Fluidized Bed Combustion*), Awalnya ruang bakar dipanasi secara eksternal sampai mendekati temperatur operasi. Material hamparan (*Bed Material*) fluidisasi yang akan dipakai untuk mengabsorpsi panas adalah pasir silika. Pasir silika dan bara api bahan bakar bercampur dan mengalami turbulensi di dalam ruang bakar sehingga keseragaman temperatur sistem menjadi terjaga.

2.2. Bed Material

Material hamparan (*bed material*) yang digunakan pada *fluidized bed combustion* adalah pasir silika. Pasir silika yang telah panas memindahkan panas tersebut ke bahan bakar. Salah satu persyaratan yang harus dimiliki oleh *bed material* adalah nilai konduktifitas termal yang baik dan kalor jenis yang rendah dimana hanya membutuhkan energi yang sedikit untuk meningkatkan temperatur. Fungsi partikel dalam *fluidized bed combustion* ialah untuk membantu pembakaran di dalam ruang bakar dan membantu mempertahankan temperatur ruang bakar. Partikel-partikel tersebut harus mampu menjadi penahan *thermal shock* (lonjakan suhu). Partikel yang umumnya digunakan adalah pasir silika atau kuarsa, dengan ukuran partikel 20 - 50 mesh.

3. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini akan dilakukan menggunakan pendekatan studi eksperimental yang mencari karakteristik dari limbah medis dan *bed material* pasir silika pada pembakaran *fluidized bed* dan dibatasi dengan variabel variabel yang ada seperti dibawah ini:

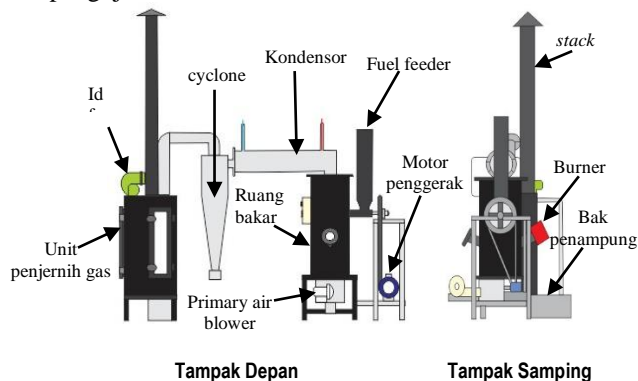
1. Variabel bebas

Dalam penelitian ini variable bebas ialah variasi diameter dari *bed material* yang digunakan dengan ukuran 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm dan 1.1mm.

2. Variabel terikat

Dalam penelitian kali ini variabel terikat yang dipengaruhi oleh variabel bebas ialah distribusi temperatur ruang bakar.

Berikut merupakan gambar skematik dari alat *Fluidized Bed combustor* yang akan digunakan dalam pengujian.



Tampak Depan Tampak Samping
Gambar 1. Skematik *Fluidized bed combustor*

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Karakterisasi Limbah Medis dan Pasir Silika

Sebelum pengujian dilakukan, limbah medis dan *bed material* akan dikarakterisasi terlebih dahulu. Karakterisasi pasir silika dilakukan menggunakan *wire mesh* dengan 4 hasil ukuran diameter yaitu 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm dan 1.1mm. Sedangkan karakterisasi limbah medis dilakukan dengan 3 pengujian yaitu uji *proximate*, uji *Thermo Gravimetric Analysis (TGA)* dan uji nilai kalor. Namun sebelum dikarakterisasi, limbah medis akan dicacah terlebih dahulu hingga berukuran kecil.



Gambar 2 limbah Medis yang Sudah Dicacah

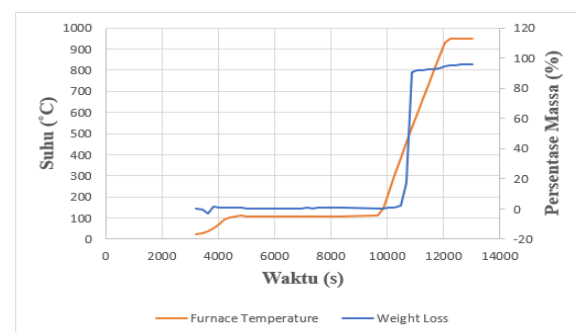
Uji *Proximate* dilakukan guna menentukan presentase kadar air (*moisture content*), zat yang mudah menguap (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), dan kadar abu (*ash*) dari limbah medis. Uji *proximate* dilakukan menggunakan alat uji LECO TGA701 dengan standar ISO-9001:2008 HQ-Q-994 yang datanya ditampilkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 1 Uji *Proximate* Limbah Medis

Bahan Bakar	Kadar Air (%)	Zat Volatil (%)	Karbon Tetap (%)	Kadar Abu (%)
Limbah Medis	0,54	95,67	0,41	3,38

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan limbah medis memiliki kadar air sebesar 0,54%, zat volatile sebesar 95,67%, karbon tetap sebesar 0,41% dan kadar abu sebesar 3,38%. Kadar air yang rendah dan zat volatil yang tinggi mengindikasikan bahwa limbah medis mudah terbakar sehingga dapat dijadikan sebagai bahan bakar.

Thermo gravimetric analisis (TGA) adalah metode analisis thermal dimana perubahan dalam bentuk fisik dan kimia dari bahan bakar yang diukur sebagai fungsi dari meningkatnya suhu (laju pemanasan konstan). Hasil dari uji TGA digambarkan dalam bentuk grafik di bawah ini.



Gambar 3 Grafik TGA

Berdasarkan gambar 3, limbah medis akan mulai mengalami penurunan massa pada temperatur 200°C-900°C sedangkan pada temperatur 120°C kadar air pada limbah medis akan mulai berkurang.

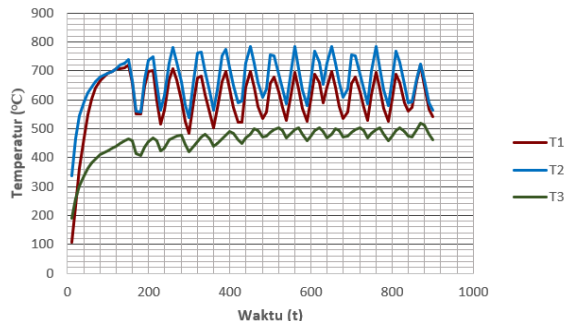
Analisis nilai kalor digunakan untuk mengetahui jumlah energi panas yang terlepas untuk tiap satuan massa bahan bakar. Pada pengujian ini, digunakan alat uji *Parr Oxygen Bomb Calorimeter* dengan *ASTM Standard Test Method D5865*. Berikut tabel dari analisis nilai kalor yang didapatkan.

Tabel 2 Nilai Kalor Limbah Medis

Bahan Bakar	Massa Sampel (gram)	Nilai Kalor Sampel Limbah Medis				
		Suhu (ΔT_2)		Nilai Kalor (Q_c)		
		T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Sampel (Cal/gr)	Rata-Rata (Cal/gr)	(MJ/kg)
Limbah Medis I	0,52389	30,569	33,104	8799,120	9111,362	38,1474515
Limbah Medis II	0,52534	30,492	33,210	9423,604		

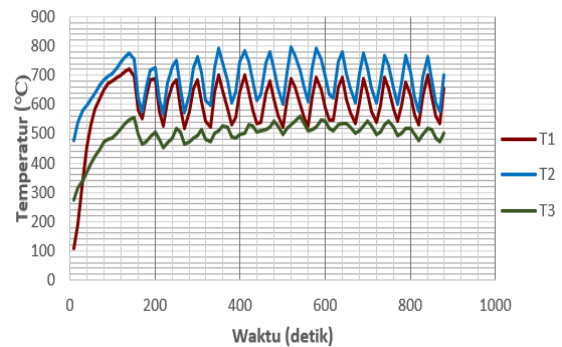
4.2 Distribusi Temperatur Reaktor

Dari hasil pengujian yang dilakukan, didapatkan hasil berupa distribusi temperatur ruang bakar yang berbeda beda dari setiap variasi ukuran diameter *bed material*. 3 buah *thermocouple* yang digunakan diletakkan secara bertingkat di dalam reaktor. Distribusi temperatur reaktor pada setiap ukuran diameter *bed material* dengan rentang waktu selama 15 menit dapat digambarkan melalui grafik di bawah ini:



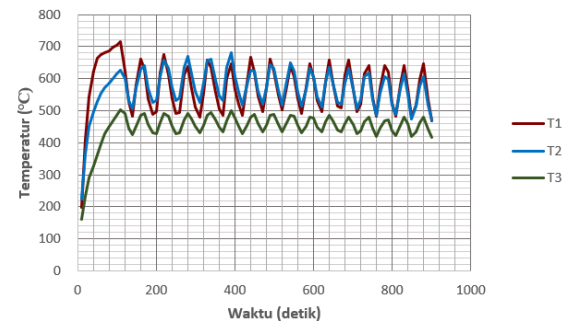
Gambar 4. Grafik distribusi temperatur pada variasi 0,2 mm

Gambar 4 menunjukkan grafik temperatur pembakaran pada ukuran diameter *bed material* 0.2 mm. pada diameter ini, sampah medis dapat terbakar dengan sangat baik dan stabil selama waktu pembakaran, salah satu penyebab temperatur yang tinggi pada reaktor disebabkan proses fluidisasi yang baik sehingga *bed material* yang menyimpan panas dapat dengan mudah membakar sampah medis di dalam ruang bakar.



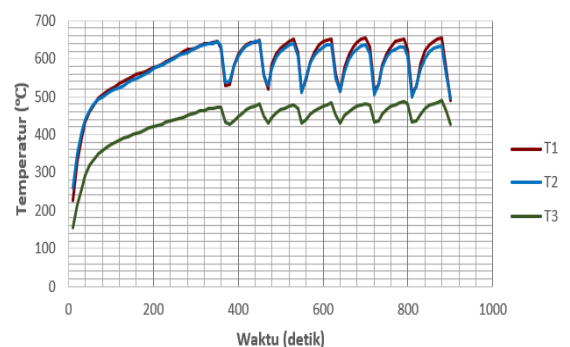
Gambar 5. Grafik distribusi temperatur pada variasi 0,5 mm

Gambar 5 menunjukkan grafik temperatur pembakaran pada variasi ukuran diameter *bed material* 0.5 mm. pembakaran yang terjadi pada variasi diameter 0.5 mm terpantau berlangsung dengan baik dimana temperatur pada ruang bakar menunjukkan nilai yang tinggi dan stabil selama pembakaran. Ukuran diameter yang tepat menyebabkan *bed material* lebih mudah terfluidisasi sehingga pembakaran yang terjadi akan jauh lebih baik.



Gambar 6. Grafik distribusi temperatur pada variasi 0,8 mm

Gambar 6 menunjukkan grafik temperatur pembakaran pada variasi ukuran diameter *bed material* 0.8 mm. Pada *thermocouple* 1 dan 2 menunjukkan setelah beberapa waktu awal pembakaran suhu reaktor tidak mampu kembali mencapai temperatur 700°C. Hal ini menunjukkan variasi ukuran diameter 0.8 mm tidak dapat memindahkan panas ke sampah medis sebaik variasi 0.5 mm dan 0.2 mm sehingga pembakaran yang terjadi tidak maksimal.



Gambar 7. Grafik distribusi temperatur pada variasi 1,1 mm

Gambar 7 menunjukkan grafik temperatur pembakaran pada variasi ukuran diameter *bed material* 1.1 mm yang cukup stabil namun masih memiliki persamaan dengan variasi 0.8 mm yaitu pada *thermocouple* 1 dan 2 temperatur yang tercatat tidak melebihi 700°C seperti pada variasi yang lain. Ukuran *bed material* yang lebih besar dari variasi lain menyebabkan fluidisasi yang terjadi tidak maksimal sehingga panas yang tersimpan pada *bed material* untuk membantu pembakaran sampah medis tidak berpindah sebaik variasi ukuran diameter yang lain.

5. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan mengenai karakterisasi limbah medis dan *bed material* pasir silika pada *fluidized bed combustion* maka diambil kesimpulan bahwa :

- Berdasarkan hasil karakterisasi limbah medis dapat dijadikan sebagai bahan bakar sebab memiliki kadar air yang rendah dan zat volatil serta nilai kalor yang tinggi sehingga mudah terbakar.
- Pasir silika dengan diameter 0.2 mm dapat terfluidisasi lebih baik di dalam ruang bakar hal ini dapat dilihat dari distribusi temperatur yang lebih baik dibandingkan ukuran 0.5 mm, 0.8 mm dan 1.1 mm sehingga dapat lebih efektif dalam mereduksi limbah medis.

Daftar Pustaka

- [1] Hidayah, E.N., (2007), *Uji Kemampuan Pengoperasian Insinerator Untuk Mereduksi Limbah Klinis Rumah Sakit Umum Haji Surabaya*, Jurusan Teknik Lingkungan UPN "Veteran" Jatim. Jurnal Rekayasa Perencanaan, Vol. 4, No.1, Oktober 2007, Surabaya
- [2] Windfeld. Elliott Steen, Marianne Su-Ling Brooks. 2015. *Medical waste management: A review*. Journal of Environmental Management 163 : 98-108.
- [3] Jawahar, B. Z., et al. "Design and Fabrication of Fluidized Bed Incinerator". 2019 *IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*. IEEE, 2019.
- [4] Zhong, Y., Wang, Z., Guo, Z., & Tang, Q. (2013). *Prevention of agglomeration /defluidization in fluidized bed reduction of Fe₂O₃ by CO: The role of magnesium and calcium oxide*. Powder technology, 241, 142-149.
- [5] Lin, C. L., Peng, T. H., & Wang, W. J. (2011). *Effect of particle size distribution on agglomeration/defluidization during fluidized bed combustion*. Powder technology, 207(1-3), 290-295.

- [6] Sudarmanta, B., Wijayanto, R. M., Syaifudin, A., & Nugroho, G. (2017). *Studi numerik pengaruh diameter bed material terhadap karakteristik fluidisasi pada circulating fluidized bed boiler beban 28, 6 MW*. Dalam Seminar Nasional Teknik Mesin (Vol. 12).



Analisa External Flow Pada Mobil Tesla Model S Saat Melaju di Tikungan

Alief Fadil Djanuarno, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, N. Suarnadwipa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Gaya aerodinamika ikut berperan dalam faktor terbesar penyebab kecelakaan pada kendaraan. Hal ini terjadi ketika mobil melaju dengan kecepatan tinggi dan menerima gaya aerodinamika oleh angin baik secara melintang (*crosswind*) maupun dari arah belakang (*tailwind*). *Crosswind* akan mengakibatkan mobil mengalami *slip* yang berlanjut dengan *skid*, dan berakhir dengan terguling. Sedangkan *tailwind* akan mengakibatkan mobil meluncur bebas meskipun tidak secara langsung mengalami *slip*. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisa pada aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk menganalisa aliran eksternal serta mencari tahu nilai gradien tekanan yang terjadi pada 3D model mobil Tesla Model S dan disimulasikan sebagaimana saat bergerak melewati tikungan, seperti melaju, melaju dengan *slip*, mengalami *slip* serta *skid*, dan berbelok. Semakin tinggi kecepatan mobil pada saat berbelok, pergeseran *center of gravity* pada mobil akan semakin besar. Dimulai dari melaju tanpa *slip* pada kecepatan 80 km/j dan 140 km/j mobil tidak memiliki pergeseran *center of gravity*, melaju dengan *slip* pada kecepatan 80 km/j dan 140 km/j mobil memiliki pergeseran *center of gravity* sebesar 5,33896 mm dan 50,0372 mm, dan melaju dengan *slip* dan *skid* pada kecepatan 80 km/j dan 140 km/j mobil memiliki pergeseran *center of gravity* sebesar 15,2613 mm dan 221,84 mm.

Kata kunci: Aerodinamika, Komputasi Dinamika Fluida, Slip, Skid, Dinamika Kendaraan, Titik Pusat Gravitasi

Abstract

Aerodynamic forces play a major role in causing accidents in vehicles. This occurs when the car is traveling at high speed and receives aerodynamic forces by the wind both *crosswind* and from the rear (*tailwind*). *Crosswind* will cause the car to slip which continues with *slippage*, and ends up rolling over. Meanwhile, the *tailwind* will cause the car to slide freely even though it does not slip directly. This research was conducted by analyzing the CFD (*Computational Fluid Dynamic*) application to analyze external flow and find out the value of the pressure gradient that occurs in the 3D model of the Tesla Model S car and it is simulated as when moving through a bend, such as driving, driving with a slip, experiencing a slip as well as *skid*, and turn. The higher the speed of the car when turning, the shift in the center of gravity of the car will be greater. Starting from going without a slip at a speed of 80 km/h and 140 km/h the car has no center of gravity shift, traveling with a slip at a speed of 80 km/h and 140 km/h the car has a shift of center of gravity of 5.33896 mm and 50.0372 mm, and traveling slip and skid at speeds of 80 km/h and 140 km/h the car had a shift in the center of gravity of 15.2613 mm and 221.84 mm.

Keywords: Aerodynamics, Computational Fluid Dynamics, Slip, Skid, Vehicle Dynamics, Center Of Gravity

1. Pendahuluan

Gaya aerodinamika ikut berperan dalam faktor terbesar penyebab kecelakaan pada kendaraan. Hal ini terjadi ketika mobil melaju dengan kecepatan tinggi dan menerima gaya aerodinamika oleh angin baik secara melintang (*crosswind*) maupun dari arah belakang (*tailwind*). *Crosswind* akan mengakibatkan mobil mengalami *slip* yang berlanjut dengan *skid*, dan berakhir dengan terguling. Sedangkan *tailwind* akan mengakibatkan mobil meluncur bebas meskipun tidak secara langsung mengalami *slip*.

Salah satu produsen mobil listrik asal Amerika Serikat, Tesla dengan tipe mobil Model X dan Model 3 masuk dalam kategori mobil dengan nilai uji tabrak terbaik yang dilakukan oleh penyelenggara uji tabrak pada kendaraan baru yang populer di Eropa, yaitu Euro NCAP.

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisa pada aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) yang bertujuan untuk mencari nilai gradien tekanan dengan besarnya gaya *slip* dan *skid* yang

terjadi serta pergerakan *Center of Gravity* pada model mobil Tesla Model S ketika melaju di tikungan.

Dalam hal ini maka ada beberapa permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

1. Bagaimana aliran eksternal terhadap airfoil bodi mobil tersebut pada saat melaju di tikungan serta tekanan udara pada model mobil dengan aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*)?
2. Berapa besarnya gaya *slip* dan *skid* yang terjadi serta pergerakan *Center of Gravity* pada model mobil Tesla Model S ketika melaju di tikungan?

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Analisa CFD pada model mobil 3D dilakukan dengan menggunakan aplikasi ANSYS.
2. Simulasi dan analisa fluida dilakukan hanya pada bodi mobil saat terjadi *skid* di tikungan dengan kecepatan angin dan percobaan kecepatan kendaraan yang telah ditentukan.

3. Pembahasan *Center of Gravity* 1 dimensi ke arah X.
4. Tidak membahas konstruksi dan kestabilan kendaraan.

2. Dasar Teori

Aliran kotor di atas bodi mobil diatur oleh hubungan antara kecepatan dan tekanan yang dinyatakan dalam Persamaan Bernoulli. (Persamaan Bernoulli mengasumsikan aliran yang tidak dapat dimampatkan, yang wajar untuk aerodinamika otomotif, sedangkan hubungan yang setara untuk aliran yang dapat dimampatkan adalah Persamaan Euler.) Persamaannya adalah:

$$P_{statis} + P_{dinamis} = P_{total} \quad (1)$$

$$P_s + 1/2 \rho V^2 = P_{total} \quad (2)$$

Keterangan :

ρ = Densitas udara (kg/m^3).

V = Kecepatan fluida relatif terhadap objek (m/s).

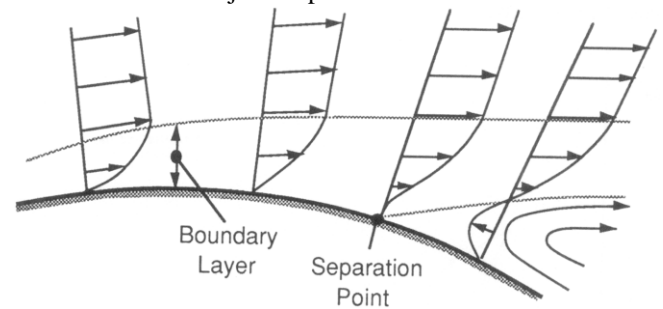
Pada jarak dari kendaraan, tekanan statis hanyalah tekanan ambien, atau barometrik, (P_{atm}). Tekanan dinamis dihasilkan oleh kecepatan relatif, yang konstan untuk semua garis arus yang mendekati kendaraan. Jadi tekanan total (P_t) adalah sama untuk semua garis aliran dan sama dengan $P_s + 1/2 \rho V^2$.

Saat aliran mendekati kendaraan, aliran terbelah, beberapa berada di atas kendaraan, dan lainnya di bawah. Sebagai kesimpulan, salah satu garis aliran harus langsung menuju bodi dan stagnan (yang ditunjukkan menimpa bumper mobil). Pada titik itu kecepatan relatif telah menjadi nol.

Pada bagian depan badan kendaraan, lapisan batas dimulai dari titik di mana garis aliran stagnasi menyentuh permukaan. Pada lapisan batas kecepatan berkurang karena gesekan. Tekanan pada titik stagnasi adalah tekanan total (statis plus dinamis) dan menurun kembali di sepanjang permukaan. Gradien tekanan di sepanjang permukaan bertindak untuk mendorong udara di sepanjang lapisan batas, dan pertumbuhan lapisan tersebut terhambat. Penurunan tekanan ke arah aliran dengan demikian dikenal sebagai "gradien tekanan yang disukai", karena menghambat pertumbuhan lapisan batas.

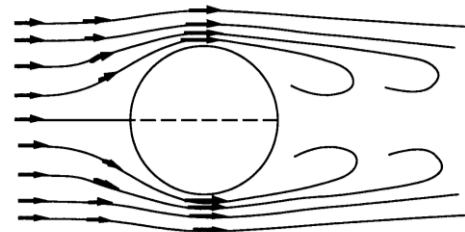
Sayangnya, saat aliran kembali mengikuti bodi, tekanan kembali meningkat. Tekanan yang meningkat bertindak untuk memperlambat aliran di lapisan batas, yang menyebabkannya bertambah tebal. Dengan demikian menghasilkan apa yang dikenal sebagai "gradien tekanan merugikan." Di beberapa titik, aliran di dekat permukaan sebenarnya dapat dibalik oleh aksi tekanan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Titik di mana aliran berhenti dikenal sebagai "titik pemisah". Perhatikan bahwa pada titik ini, arus utama tidak lagi "melekat" pada tubuh tetapi dapat membebaskan diri dan melanjutkan dalam garis lurus yang kurang lebih. Karena mencoba memasukkan udara dari daerah di belakang tubuh, tekanan di daerah ini turun di bawah ambien. Bentuk pusaran dan aliran sangat tidak

beraturan di wilayah ini. Aksi pusaran dalam aliran di atas silinder ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1 Pemisahan Aliran dalam gradien tekanan yang merugikan.

Fenomena pemisahan mencegah aliran mengalir begitu saja ke sisi belakang mobil. Tekanan di daerah pemisah berada di bawah yang dikenakan di bagian depan kendaraan dan perbedaan gaya tekanan keseluruhan ini bertanggung jawab atas "gaya hambat". Gaya hambat yang timbul dari aksi gesekan kental pada lapisan batas pada permukaan mobil disebut "friction drag".



Gambar 2 Vortex yang mengalir di atas badan silinder.

Akibat aliran udara yang berinteraksi dengan kendaraan, gaya dan momen diberlakukan.

Gaya hambat aerodinamis dicirikan oleh persamaan:

$$D_A = P_s + 1/2 \rho V^2 C_D A \quad (3)$$

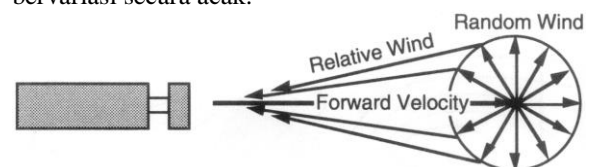
Keterangan :

D_A = Gaya hambat.

P_s = Tekanan statis.

A = Luas frontal area kendaraan (m^2).

Dalam praktiknya, kendaraan yang melaju di sepanjang jalan mengalami angin atmosfer selain komponen angin yang timbul dari kecepatannya. Angin atmosfer bervariasi dalam intensitas di seluruh Amerika Serikat, dengan nilai rata-rata tipikal 10-20 mph, dan angin kencang hingga 50 dan 60 mph. Arah angin di atmosfer akan acak sehubungan dengan arah perjalanan kendaraan. Dengan demikian angin relatif yang dilihat oleh kendaraan akan terdiri dari komponen besar karena kecepatannya, ditambah komponen angin atmosfer yang lebih kecil ke segala arah. Gambar 3 mengilustrasikan bagaimana angin relatif akan bervariasi secara acak.



Gambar 3 Angin relatif yang terlihat oleh kendaraan bermotor di jalan raya.

Ketika angin atmosfer bertiup ke arah kendaraan, ada "headwind", dan kecepatan total yang digunakan dalam persamaan (4) adalah:

$$V = V_V + V_W \quad (4)$$

Keterangan :

V_V = Kecepatan kendaraan.

V_W = Kecepatan angin.

Hembusan ke arah perjalanan disebut "tailwind", dan kecepatannya dikurangi. Karena kecepatan dikuadratkan dalam persamaan (4), peningkatan drag dari headwind jauh lebih besar daripada penurunan drag dari tailwind dengan kecepatan yang sama [1].

Gaya gradien tekanan adalah gaya yang dihasilkan ketika ada perbedaan tekanan di seluruh permukaan. Secara umum, tekanan adalah gaya per satuan luas, melintasi suatu permukaan. Perbedaan tekanan pada suatu permukaan berarti adanya perbedaan gaya, yang dapat menghasilkan percepatan menurut hukum gerak kedua Newton, jika tidak ada gaya tambahan untuk menyeimbangkannya. Gaya yang dihasilkan selalu diarahkan dari wilayah bertekanan lebih tinggi ke wilayah bertekanan lebih rendah. Ketika fluida berada dalam keadaan kesetimbangan (yaitu tidak ada gaya total, dan tidak ada percepatan), sistem tersebut disebut berada dalam kesetimbangan hidrostatis. Dalam kasus atmosfer, gaya gradien tekanan diimbangi oleh gaya gravitasi, menjaga kesetimbangan hidrostatis [2].

Dalam dinamika fluida, gradien tekanan yang merugikan terjadi ketika tekanan statis meningkat ke arah aliran. Secara matematis ini dinyatakan sebagai: $dp/dx > 0$ untuk aliran dalam arah x positif. Meningkatkan tekanan fluida sama dengan meningkatkan energi potensial fluida, yang mengarah pada energi kinetik yang berkurang dan perlambatan fluida. Karena fluida di bagian dalam lapisan batas lebih lambat, itu lebih dipengaruhi oleh peningkatan gradien tekanan. Untuk peningkatan tekanan yang cukup besar, fluida ini dapat melambat ke kecepatan nol atau bahkan menjadi terbalik yang menyebabkan pemisahan aliran. Ini memiliki konsekuensi yang sangat signifikan dalam aerodinamika karena pemisahan aliran secara signifikan mengubah distribusi tekanan di sepanjang permukaan dan karenanya juga karakteristik gaya angkat dan gaya hambat [3].

Pusat tekanan adalah titik di mana jumlah total medan tekanan bekerja pada benda, menyebabkan gaya bekerja melalui titik itu. Vektor gaya total yang bekerja di pusat tekanan adalah nilai dari medan tekanan vektorial terintegrasi. Gaya resultan dan lokasi pusat tekanan menghasilkan gaya dan momen ekuivalen pada benda sebagai medan tekanan awal. Medan tekanan terjadi pada mekanika fluida statis dan dinamis. Spesifikasi pusat tekanan, titik referensi dari mana pusat tekanan direferensikan, dan vektor gaya terkait memungkinkan momen yang dihasilkan

tentang titik mana pun untuk dihitung dengan terjemahan dari titik referensi ke titik baru yang diinginkan. Biasanya pusat tekanan ditempatkan pada benda, tetapi dalam aliran fluida dimungkinkan bagi medan tekanan untuk memberikan momen pada benda sebesar itu sehingga pusat tekanan terletak di luar benda [4].

3. Metode Penelitian

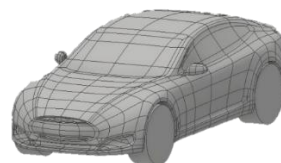
Penelitian ini dilakukan dengan melakukan simulasi pada aplikasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk menganalisa satu variabel dengan variabel lainnya dengan batasan – batasan yang ada. Adapun simulasi ini dikerjakan sesuai dengan tujuan pelaksanaan penelitian, yaitu mencari pengaruh Kecepatan kendaraan, kecepatan udara, tekanan udara, dan kerapatan/kepadatan udara terhadap setiap permukaan luar kendaraan.

3.1. Alur Penelitian

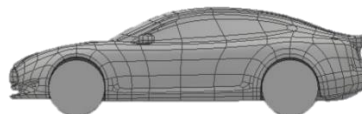
1. Mengumpulkan dan mempelajari literatur.
Mengumpulkan dan mempelajari dari berbagai jurnal penelitian yang sudah ada tentang aerodinamika, variabel penyebab kecelakaan, dan gaya-gaya aerodinamika yang terjadi pada mobil. Selanjutnya mempelajari simulasi CFD menggunakan ANSYS 19.2.

2. Mengimport model mobil dari CAD ke Ansys

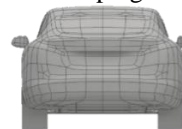
Model 3D mobil diimport ke dalam format yang diinginkan aplikasi CFD untuk dapat dilakukan proses analisa dari geometri yang diinginkan seperti format .IGES atau .stp.



Gambar 4 Model 3D mobil Tesla model S.



Gambar 5 Model 3D mobil Tesla model S tampak samping.



Gambar 6 Model 3D mobil Tesla model S tampak belakang.

3. Meshing.
Proses meshing merupakan proses diskretisasi domain fluida dimana segmen-segmen dari model mobil disatukan sehingga simulasi dapat dilakukan. Pada proses ini kita memilih elemen yang diperlukan

dan sesuai dengan spesifikasi komputer yang digunakan untuk melakukan proses perhitungan numerik.

4. Penentuan kondisi batas.

Simulasi aerodinamika yang akan dilakukan dipengaruhi oleh udara pada lingkungan sekitar dengan nilai tekanan atmosfer sebesar 1 atm. Penentuan kondisi batas juga ditentukan pada *inlet*, *outlet* dan juga pada dinding. Pada bagian *inlet* dimasukan kecepatan kendaraan yang divariasikan dari 80-140 km/j, lalu dimasukan kecepatan angin sebesar 58 km/j dan juga sudut serang angin. Hal ini dilakukan dengan cara mengatur kecepatan arah u, v dan w masing masing untuk arah x, y dan z.

Fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah udara dengan sifat fisik sebagai berikut: density 1,225 kg/m. Udara yang mengalir pada bodi mobil diasumsikan sebagai gas ideal dan *incompressible*. Pada outlet Neumann yang diaplikasikan adalah $\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dy} = \frac{dp}{dz} = 0$, sedangkan pada *body* mobil yang diaplikasikan adalah $\frac{du}{dx} = \frac{dv}{dy} = \frac{dw}{dz} = 0$.

5. Hasil simulasi.

Hasil dari simulasi yang akan didapat berupa perubahan tekanan, kecepatan aliran, dan gaya tekan di sekitar bodi mobil yang nantinya akan dihitung untuk mencari gaya *slip* dan *skid* yang terjadi pada model mobil.

6. Analisa gaya-gaya aerodinamika

Analisa gaya-gaya aerodinamika dilakukan untuk mencari penyebab mobil mengalami kecelakaan seperti gaya *slip* dan gaya *skid*.

3.2. Perhitungan

Untuk melakukan perhitungan gaya *slip* dan gaya *skid* pada penelitian ini, diperlukan data spesifikasi dimensi eksterior mobil. Digunakan juga nilai gradien tekanan pada bagian bawah roda sesuai dengan nilai *pressure contour* pada *result* dari setiap simulasi yang akan dilakukan perhitungan.

Untuk mengetahui apakah mobil mengalami gaya *slip* maupun gaya *skid*, $\Sigma F = 0$ dipakai dalam penelitian ini. Jika $\Sigma F = 0$ artinya mobil tidak mengalami gaya *slip* atau gaya *skid*, tetapi jika $\Sigma F \neq 0$ maka gaya *slip* atau gaya *skid* terjadi dimana ΣF dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Sigma F = P1 \times X + P2 \times X - P3 \times X - P4 \times X$$

Dimana :

P1 = Tekanan pada roda depan kanan.

P2 = Tekanan pada roda depan kiri.

P3 = Tekanan pada roda belakang kanan.

P4 = Tekanan pada roda belakang kiri.

X = Jarak dari roda ke *center of gravity*.

Dan untuk mengetahui berapa pergeseran *center of gravity* yang terjadi menggunakan rumus sebagai berikut:

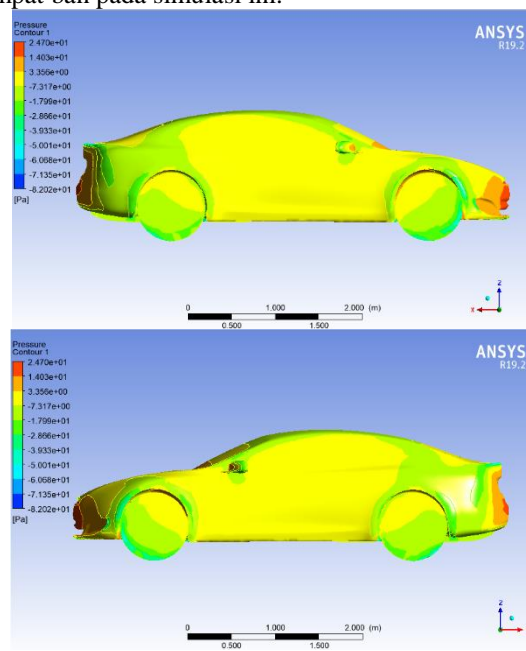
$$Cg = \frac{\Sigma F}{(g \times W)}$$

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 80 km/j tanpa slip

Pada bagian depan mobil tepatnya di bagian hidung atau sekitar *air dam* mobil saat mobil melaju yang memiliki nilai gradien tekanan yang paling tinggi pada mobil dikarenakan bagian tersebut merupakan bagian yang paling depan saat mobil menabrak aliran udara. Bentuk distribusi tekanan yang terjadi pada bagian kiri dan kanan mobil saat mobil maju tanpa slip pada kecepatan 80 km/j terlihat sama.

Untuk mengetahui perbedaan nilai gradien tekanan, dapat dilihat melalui warna *pressure contour* pada hasil simulasi dimulai dari nilai gradien tekanan terbesarnya yang berwarna merah, yaitu sebesar 24,7 Pa, warna jingga sebesar 14,03, warna kuning sebesar 3,356 Pa, warna hijau yang berkisar dari angka -39,33 hingga -7,137 Pa, dan nilai gradien tekanan terendah yang berwarna biru tua sebesar -82,02 yang juga terletak pada permukaan bawah ke empat ban pada simulasi ini.



Gambar 7. Distribusi tekanan bagian samping maju tanpa slip pada kecepatan 80 km/j.

P1 = -82,02 Pa

P2 = -82,02 Pa

P3 = -82,02 Pa

P4 = -82,02 Pa

X = 1840,72 cm

W = 2250 kg

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-82,02 \times 1840,72) + (-82,02 \times 1840,72) - (82,02 \times 1840,72) - (-82,02 \times 1840,72) = 0$$

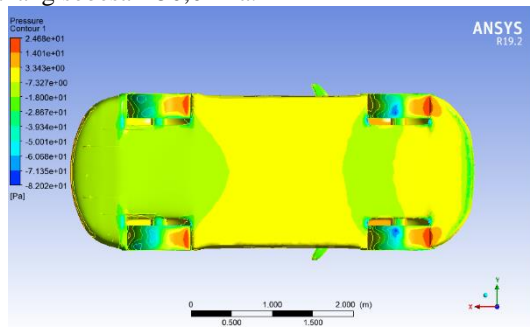
$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / ((9,81 \times W)) = 0 / ((9,81 \times 2250 \text{ kg})) = 0$$

Jadi, tidak ada pergeseran *Center of Gravity* ketika mobil disimulasikan melaju tanpa *slip*.

4.2. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 80 km/j dengan slip

Bentuk distribusi tekanan pada simulasi ini masih terlihat sama seperti saat mobil maju tanpa slip pada kecepatan 80 km/j. Hanya saja nilai gradien tekanan yang dihasilkan pada simulasi ini terlihat sedikit berbeda dengan maju tanpa slip.

Dapat dilihat melalui warna *pressure contour* pada hasil simulasi ini gradien tekanan yang terjadi pada roda depan dan belakang mengalami perbedaan yang signifikan dimana gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda depan sebesar -82,02 Pa dan gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda belakang sebesar -50,01 Pa.



Gambar 8. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* pada kecepatan 80 km/j.

$$P1 = -82,02 \text{ Pa}$$

$$P2 = -82,02 \text{ Pa}$$

$$P3 = -50,01 \text{ Pa}$$

$$P4 = -50,01 \text{ Pa}$$

$$X = 1840,72 \text{ cm}$$

$$W = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

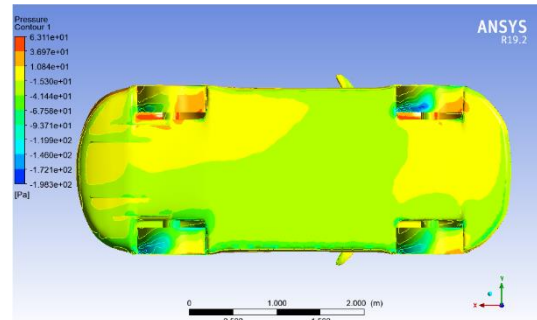
$$\Sigma F = (-82,02 \times 1840,72) + (-82,02 \times 1840,72) - (50,01 \times 1840,72) - (-50,01 \times 1840,72) = -117844$$

$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / ((9,81 \times W)) = (-117844) / ((9,81 \times 2250 \text{ kg})) = -5,33896$$

Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 5,33896 mm ketika mobil disimulasikan melaju dengan *slip*.

4.3. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 80 km/j dengan slip dan skid

Perbedaan nilai gradien tekanan juga terjadi pada setiap tapak ban mobil dimana pada roda depan bagian kanan, yaitu sebesar -198,3 Pa, roda depan bagian kiri sebesar -67,58 Pa, roda belakang bagian kanan -15,30 Pa dan roda depan bagian kiri sebesar -67,58 Pa.



Gambar 9. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* dan *skid* pada kecepatan 80 km/j.

$$P1 = -198,3 \text{ Pa}$$

$$P2 = -93,71 \text{ Pa}$$

$$P3 = -15,3 \text{ Pa}$$

$$P4 = -93,71 \text{ Pa}$$

$$X = 1840,72 \text{ cm}$$

$$W = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-198,3 \times 1840,72) + (-93,71 \times 1840,72) - (15,3 \times 1840,72) - (-93,71 \times 1840,72) = -336856$$

$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / ((9,81 \times W)) = (-336856) / ((9,81 \times 2250 \text{ kg})) = -15,2613$$

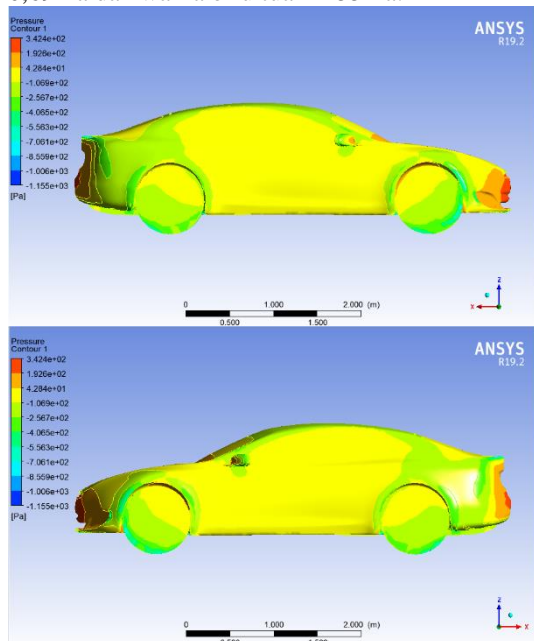
Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 15,2613 mm ketika mobil disimulasikan pada saat melaju dengan *slip* dan *skid*.

4.4. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 140 km/j tanpa slip

Hasil simulasi 140 km/j maju tanpa slip menunjukkan adanya peningkatan nilai gradien tekanan pada setiap warna dari *pressure contour* yang terjadi pada *frontal area* bodi mobil dari simulasi maju tanpa slip dengan kecepatan 80 km/j.

Namun, bentuk distribusi tekanan yang terjadi pada *frontal area* bodi mobil tidak mengalami

perubahan. Untuk mengetahui nilai gradien tekanan dari setiap *pressure contour* dapat dilihat dari warna merah sebesar 342,4 Pa, warna jingga menunjukkan tekanan sebesar 192,6 Pa, warna kuning sebesar 42,84 Pa, warna hijau berkisar dari -556,3 Pa hingga -10,69 Pa dan warna biru tua -1155 Pa.



Gambar 10. Distribusi tekanan bagian samping maju tanpa *slip* pada kecepatan 140 km/j.

- P1 = -1155 Pa
 P2 = -1155 Pa
 P3 = -1155 Pa
 P4 = -1155 Pa
 X = 1840,72 cm
 W = 2250 kg
 g = 9,81 m/s²

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-1155 \times 1840,72) + (-1155 \times 1840,72) - (-1155 \times 1840,72) - (-1155 \times 1840,72)$$

$$= 0$$

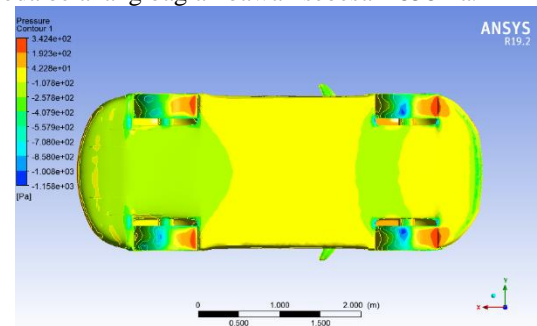
Pergeseran *Center of Gravity* = $\Sigma F / (9,81 \times W)$
 = $0 / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = 0$

Jadi, tidak ada pergeseran *Center of Gravity* ketika mobil disimulasikan melaju tanpa *slip*.

4.5. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 140 km/j dengan *slip*

Dapat dilihat melalui warna *pressure contour* pada hasil simulasi ini gradien tekanan pada roda depan dan belakang mengalami perbedaan yang signifikan dimana nilai gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda depan bagian bawah sebesar -1158

Pa dan nilai gradien tekanan yang terjadi pada kedua roda belakang bagian bawah sebesar -858 Pa.



Gambar 11. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* pada kecepatan 140 km/j.

- P1 = -1158 Pa
 P2 = -1158 Pa
 P3 = -858 Pa
 P4 = -858 Pa
 X = 1840,72 cm
 W = 2250 kg
 g = 9,81 m/s²

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

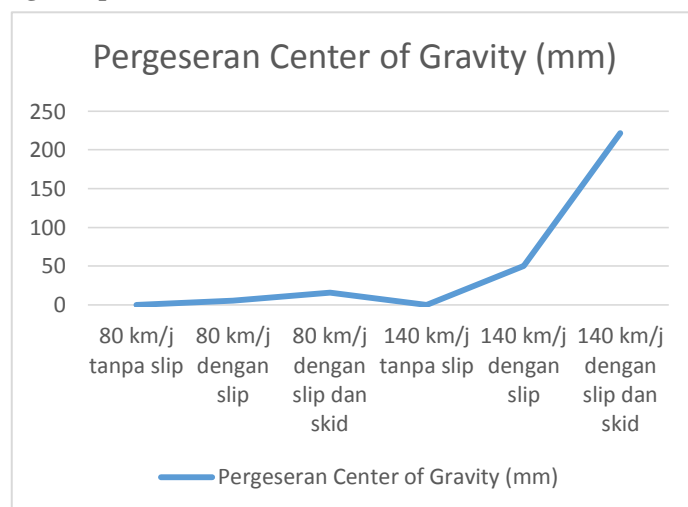
$$\Sigma F = (-1158 \times 1840,72) + (-1158 \times 1840,72) - (-858 \times 1840,72) - (-858 \times 1840,72)$$

$$= -1104445$$

Pergeseran *Center of Gravity* = $\Sigma F / (9,81 \times W)$
 = $(-1104445) / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = -50,0372$

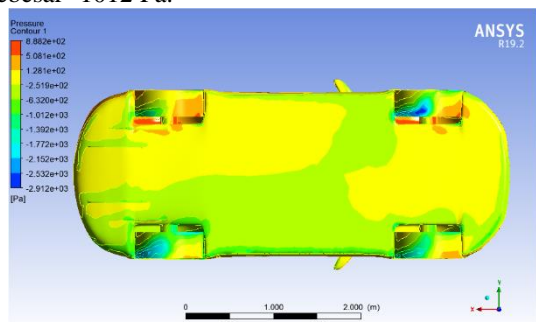
Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 50,03872 mm ketika mobil disimulasikan melaju dengan *slip*.

4.6. Distribusi Tekanan Pada Kecepatan 140 km/j dengan *slip* dan *skid*



Kali ini nilai gradien tekanan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kecepatan.

Perbedaan nilai gradien tekanan juga terjadi pada setiap bagian bawah roda mobil dimana pada roda depan bagian kanan, yaitu sebesar -2912 Pa, roda depan bagian kiri sebesar -1012 Pa, roda belakang bagian kanan -251,9 Pa dan roda depan bagian kiri sebesar -1012 Pa.



Gambar 12. Distribusi tekanan bagian samping maju dengan *slip* dan *skid* pada kecepatan 140 km/j.

$$P1 = -2912 \text{ Pa}$$

$$P2 = -1012 \text{ Pa}$$

$$P3 = -251,9 \text{ Pa}$$

$$P4 = -1012 \text{ Pa}$$

$$X = 1840,72 \text{ cm}$$

$$W = 2250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma F = (P1 \times X) + (P2 \times X) - (P3 \times X) - (P4 \times X)$$

$$\Sigma F = (-2912 \times 1840,72) + (-1012 \times 1840,72) - (251,9 \times 1840,72) - (-1012 \times 1840,72) = -4896558$$

$$\text{Pergeseran Center of Gravity} = \Sigma F / ((9,81 \times W)) = (-4896558) / (9,81 \times 2250 \text{ kg}) = -221,84$$

Jadi, ada pergeseran *Center of Gravity* ke arah belakang sebesar 221,84 mm ketika mobil disimulasikan melaju dengan *slip* dan *skid*.

5. Kesimpulan

Setelah melakukan perhitungan gaya *slip* dan *skid*, maupun perhitungan pergeseran *center of gravity* didapati hasil perhitungan yang negatif. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan fluida yang berada pada simulasi tersebut berlawanan dengan arah pergerakan tersebut yang berarti bahwa nilai gradien tekanannya lebih kecil dari 0 dan pergerakan *center of gravity* menuju ke arah belakang. Nilai gradien tekanan pada setiap ban yang kecil dapat menghasilkan gaya yang besar jika ditambahkan dengan tekanan atmosfer yang akan menghasilkan *absolute pressure*. Hal ini dikarenakan nilai Pa (*Pascal*) pada simulasi merupakan *gauge pressure*.

Gambar 13. Grafik pergeseran *Center of Gravity*.

Dapat dilihat pada gambar bahwa semakin tinggi kecepatan mobil maka jika terjadi gaya *slip* maupun *skid* akan semakin besar pergeseran *center of gravity* yang terjadi pada mobil.

Salah satu hal yang dapat mengindikasikan kestabilan kendaraan saat melaju adalah tekanan yang sama besar pada masing-masing rodanya baik itu roda depan, maupun roda belakang. Perbedaan tekanan yang terjadi pada salah satu roda atau lebih dapat menyebabkan terjadinya gaya pada mobil yang sedang melaju. Gaya yang dimaksud disini merupakan gaya *slip*, *skid* maupun *rolling*, semua itu tergantung pada perbedaan tekanan pada masing-masing roda. Dari pengujian diperoleh bahwa terjadi pergeseran *centre of gravity* dari mobil saat maju tanpa *slip*, maju dengan *slip*, dan maju dengan *slip* dan *skid*. Dimulai pada kecepatan 80 km/j masing-masing berurutan dari sebesar 0 mm, 5,33896 mm, dan 15,2613 mm untuk kecepatan 80 km/h. Sedangkan pada kecepatan 140 km/j masing-masing berurutan dari sebesar 0 mm, 50,0372 mm, dan 221,84 mm.

Daftar Pustaka

- [1] Gillespie, T. (1992). *Fundamental Of Vehicle Dynamics*. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers, Inc.
- [2] *Pressure-gradient force*. (2019, July 19). Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure-gradient_force
- [3] Eckert, E. R., & Drake Jr, R. M. (1959). *Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill.
- [4] Carpenter, C. (1997). *Flightwise Volume 2 Aircraft Stability and Control*.

	<p>Alief Fadil Djanuarno menyelesaikan pendidikan S1 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana pada tahun 2021.</p>
<p>Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi adalah topik pembahasan konversi energi.</p>	

Pengaruh Temperatur Karbonisasi Bambu Betung Terhadap *Wettability* Dan Kekasaran Permukaan Material

Wildan Akhsan, I Wayan Bandem Adnyana, Hendra Wijaksana
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Indonesia adalah negara yang memiliki suhu iklim tropis, suhu udara pada iklim tropis memiliki rata-rata $30^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ dengan tingkat kelembaban udara rata-rata 70% - 80%. Dibutuhkan 60% konsumsi listrik yang setiap harinya untuk mendapatkan standar kenyamanan udara yang diperlukan pada temperatur udara $22^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ dan tingkat kelembaban relatif 40% - 60% digunakan sistem pendingin AC. Akan tetapi dampak penggunaan refrigerant pada sistem pendingin AC dapat menimbulkan lingkungan yang kurang baik dan juga dapat memicu terjadinya pemanasan global semakin tinggi. Sehubungan dengan hal tersebut, saat ini mulai dikembangkan sistem pendingin yang lebih hemat energi dan ramah terhadap lingkungan yaitu sistem *direct evaporative cooling* yang memanfaatkan panas sensibel udara luar untuk menguapkan lapisan air yang terdapat pada material pad yang basah yang dapat digunakan di ruangan terbuka seperti balai adat bali, lobby hotel, restaurant dengan konsep terbuka, dan dapat digunakan sebagai pendingin kandang ayam serta untuk mempertahankan kesegaran buah dan sayuran segar hasil pertanian. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis *wettability* dan kekasaran permukaan material dari arang bambu betung sebagai material pad pada sistem *direct evaporative cooling*. Digunakan temperatur karbonisasi 500°C , 600°C , 700°C , dan 800°C . Dan didapatkan hasil dengan semakin meningkatnya temperatur karbonisasi bambu betung akan semakin rendah *wettability* dan kekasaran permukaan dari material karbonisasi bambu betung tersebut.

Kata Kunci: Temperatur, Karbonisasi, Bambu Betung, Material, *Wettability*, Kekasaran Permukaan, Sudut Kontak

Abstract

Indonesia is a country that has a tropical climate, the temperature in a tropical climate has an average of $30^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ with an average humidity level of 70% - 80%. It takes 60% of electricity consumption every day to get the required standard of air comfort at an air temperature of $22^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity level of 40% - 60% using an air conditioning system. However, the impact of the use of refrigerants on the AC cooling system can cause an unfavorable environment and can also trigger global warming to increase. In connection with this, a cooling system that is more energy efficient and friendly to the environment has begun to be developed, namely a *direct evaporative cooling* system that utilizes the sensible heat of the outside air to evaporate the water layer contained in the wet pad material which can be used in open spaces such as the traditional hall. bali, hotel lobby, restaurant with an open concept, and can be used as a cooler for chicken coops and to maintain the freshness of fresh agricultural fruit and vegetables. This research was conducted to analyze the *wettability* and surface roughness of Betung bamboo charcoal as a pad material in a *direct evaporative* system. cooling. Carbonization temperatures of 500°C , 600°C , 700°C , and 800°C are used. And the results obtained by increasing the carbonization temperature of the bamboo betung, the lower the *wettability* and surface roughness of the bamboo betung carbonization material.

Keywords: Temperature, Carbonization, Betung Bamboo, Material, *Wettability*, Surface Roughness, Contact Angle.

1. Pendahuluan

Negara Indonesia adalah salah satu negara yang memiliki suhu iklim tropis, suhu udara pada iklim tropis memiliki rata-rata $30^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ dengan tingkat kelembaban udara rata-rata 70% - 80% [1]. Sehubungan dengan hal tersebut, saat ini mulai dikembangkan sistem pendingin yang lebih hemat energi dan ramah terhadap lingkungan yang cocok digunakan di ruangan terbuka seperti balai adat bali, lobby hotel, restaurant dengan konsep terbuka, dan dapat digunakan pendingin kandang ayam serta untuk mempertahankan kesegaran buah dan sayuran segar hasil pertanian. Sistem pendingin yang sedang dikembangkan adalah sistem *direct evaporative cooling* yang memanfaatkan panas sensibel udara luar untuk menguapkan lapisan air yang terdapat pada pad material yang basah dan menggunakan proses penguapan, dimana proses ini akan

menghasilkan udara dingin karena sebagian besar panas sensibelnya telah digunakan dalam proses evaporasi tersebut. Komponen yang paling penting pada sistem *direct evaporative cooling* adalah cooling pad, dimana pada cooling pad adalah proses terjadinya penguapan lapisan air oleh panas udara. Material yang paling sering digunakan pada sistem *direct evaporative cooling* adalah material yang berpori, seperti misalnya palash fiber, aspen material, charcoal, khus, serabut kelapa dan lain-lain yang memiliki fungsi menyerap dan menampung air dalam jumlah yang cukup pada cooling pad sebagai bentuk ketersediaan air dalam proses evaporasi pada permukaan material cooling pad [2]. Dalam hal ini permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

Bagaimana pengaruh temperatur karbonisasi bambu betung terhadap *wettability* dan kekasaran permukaan material sebagai *material pad*?

Beberapa batasan yang di tetapkan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Material yang digunakan adalah bambu betung lokal dari Baturiti, Tabanan, Bali (*Dendrocalamus Asper*).
2. Temperatur karbonisasi yang ditetapkan 500°C, 600°C, 700°C dan 800°C.
3. Proses karbonisasi dilakukan pada temperatur ruangan (*indoor*)
4. Karbonisasi dalam lingkungan bebas oksigen (*inert atmosphere*)
5. Pengujian yang dilakukan meliputi proses karbonisasi dan pengujian sudut kontak.

2. Dasar Teori

Dalam penelitian ini akan lebih dipilih bambu sebagai bahan dasar *material pad* dibandingkan kayu. Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa arang bambu aktif memiliki karakteristik adsorbsivitas dan absorpsivitas yang lebih baik dari arang aktif kayu. Arang aktif bambu memiliki adsorbsivitas yang jauh lebih tinggi dari arang aktif kayu karena arang aktif bambu memiliki area permukaan spesifik sekitar 150-400 m²/g, yang hampir 2-3 kali lebih besar dari arang aktif kayu, sehingga dapat digunakan dalam skala yang lebih luas untuk berbagai aplikasi purifikasi, absorpsi, seperti misalnya purifikasi air minum, saringan udara, masker gas, matras dan bantal dan atau untuk penggunaan dalam industri purifikasi [3].

Karbonisasi adalah proses penguraian material yang memiliki struktur karbon yang kompleks seperti kayu, sisa-sisa hasil pertanian melalui pemanasan, yang akan menghasilkan elemen karbon dan senyawa kimia yang masih mengandung karbon dalam struktur kimianya.

Sifat mampu basah (*wettability*) adalah kemampuan suatu fluida untuk membasahi permukaan zat padat, dan *wettability* sangat mempengaruhi kapilaritas dari suatu material. Untuk dapat memiliki kapilaritas, suatu material harus memiliki sifat mampu basah sebagai syarat utamanya. *Wettability* material dipengaruhi oleh sudut kontak, dijelaskan bahwa makin kecil sudut kontak yang terbentuk antara fluida dan material padat, maka material tersebut akan memiliki *wettability* yang makin besar dan sebaliknya *wettability* dan kapilaritas material akan menurun dengan bertambah besarnya sudut kontak [4]. *Wettability* pada permukaan meningkat dengan meningkatnya kekasaran, kenaikan kekasaran akan membuat permukaan hidrofilik semakin hidrofilik dan hidrofobik lebih hidrofobik [5].

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan bahan dan alat meliputi:

1. Bambu betung (*Dendrocalamus Asper*)
2. Reaktor pyrolysis
3. Timbangan

4. Oven
5. Pisau
6. Gergaji
7. Nitrogen
8. Image J
9. Lampu
10. Syringe pump
11. Sample holder
12. Kamera



Gambar 1. Peralatan Proses Karbonisasi



Gambar 2. Peralatan Pengujian Sudut Kontak

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil dan Perhitungan Proses Moisture

1. Kadar kering sampel CRBT1 karbonisasi 500°C.

$$Wbb(\%) = \frac{8,38gr}{(11,48+8,38)gr} \times 100\% = 42,2\%$$

2. Kadar kering sampel CRBT2 karbonisasi 600°C

$$Wbb(\%) = \frac{8,42gr}{(11,8+8,42)gr} \times 100\% = 41,64\%$$

3. Kadar kering sampel CRBT3 karbonisasi 700°C

$$Wbb(\%) = \frac{8,58gr}{(11,74+8,58)gr} \times 100\% = 42,22\%$$

4. Kadar kering sampel CRBT4 karbonisasi 800°C

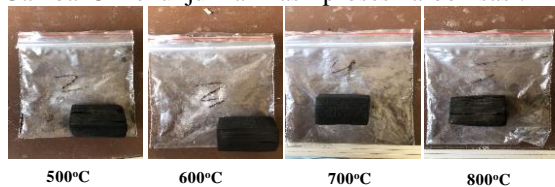
$$Wbb(\%) = \frac{7,62gr}{(10,28+7,62)gr} \times 100\% = 42,57\%$$

5. Rata-rata kadar kering pada setiap sampel bambu betung

$$Wbb(\%) = \frac{(42,2+41,64+42,22+42,57)}{4} = 42,16\%$$

4.2. Proses Karbonisasi

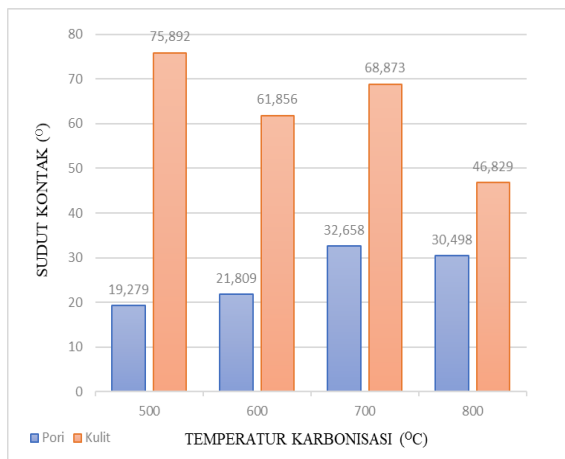
Proses karbonisasi yang dilakukan pada bambu betung meliputi temperatur: 500°C, 600°C, 700°C, 800°C tanpa *holding time* dengan dimensi spesimen berukuran 2,5cm x 1,7 cm x 3,1 cm. Gambar 3 menunjukkan hasil proses karbonisasi:



Gambar 3. Bambu Betung Hasil Karbonisasi

4.3. Pengujian Sudut Kontak

Pengujian sudut kontak adalah pengujian yang dimaksudkan untuk menganalisis daya serap material terhadap suatu fluida yang menyentuh material tersebut. Sudut kontak dapat diketahui melalui analisis video *slow motion* droplet (tetesan air) pada permukaan pori dan kulit pada arang bambu betung menggunakan aplikasi *free studio* yang selanjutnya gambar tersebut di analisis menggunakan aplikasi Image J.



Gambar 4. Hasil Data Sudut Kontak

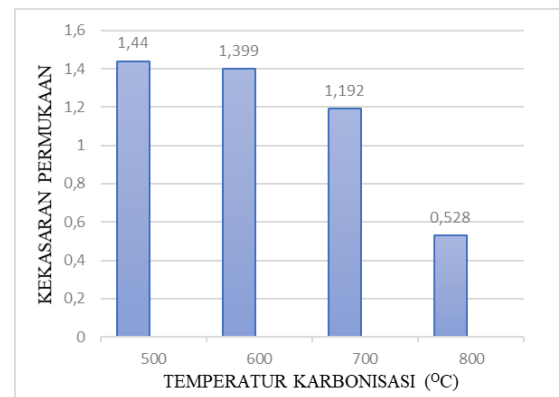
Gambar 4 menunjukkan hasil data sudut kontak dari setiap spesimen karbonisasi bambu betung yang diujikan, dimana semakin meningkatnya temperatur karbonisasi akan cenderung semakin tinggi sudut kontak nya pada bagian pori dan semakin meningkatnya temperatur karbonisasi akan cenderung semakin rendah pada bagian kulitnya. Semua spesimen yang diujikan memiliki sifat hidrofilik karna sudut kontaknya lebih kecil dari 90° yang berarti senang terhadap air.

4.4. Kekasaran Permukaan Material

Kekasaran permukaan material adalah salah satu sifat mekanik dari suatu material, Kekasaran permukaan material dipengaruhi oleh sudut kontak, luas permukaan, jari-jari droplet, dan tinggi droplet.

Untuk mengetahui dan menganalisis luas permukaan, jari-jari droplet, dan tinggi droplet

digunakan juga aplikasi Image J. selanjutnya dilakukan perhitungan dengan mencari luas area yang bersentuhan dengan cairan dan luas area yang bersentuhan dengan udara dengan menggunakan rumus luas lingkaran dan keliling setengah bola, dan dilakukan perhitungan f_1 dan f_2 sehingga didapatkan kekasaran permukaan materialnya sebagai berikut:



Gambar 5. Grafik Kekasaran Permukaan

Dari gambar 5 didapatkan data semakin tinggi temperatur karbonisasi semakin kecil nilai kekasaran permukaan materialnya, ini berhubungan dengan hasil *wettability* jika semakin tinggi *wettability* material maka akan semakin tinggi kekasaran permukaan materialnya begitu juga sebaliknya, karena droplet air dapat terserap dengan baik atau tidak bergantung pada kekasaran permukaan material tersebut.

5. Kesimpulan

Semakin meningkatnya temperatur karbonisasi bambu betung pada bagian porinya maka sudut kontak yang dihasilkan cenderung semakin meningkat dan *wettability* material tersebut akan semakin rendah begitu juga dengan meningkatnya temperatur karbonisasi akan semakin rendah kekasaran permukaan materialnya. Akan tetapi berbeda dengan bagian kulit spesimen, semakin meningkatnya temperatur karbonisasi bambu betung maka semakin kecil sudut kontak yang dihasilkan dengan begitu *wettability* material tersebut akan semakin tinggi begitu juga dengan meningkatnya temperatur karbonisasi nilai kekasaran permukaannya akan semakin tinggi. Dapat disimpulkan semakin tinggi *wettability* material akan semakin tinggi juga kekasaran permukaan material tersebut, dimana kekasaran permukaan material berpengaruh terhadap sifat *wettability* nya, material yang sifatnya hidrofilik akan semakin hidrofilik dan yang hidrofobik akan semakin hidrofobik. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap spesimen yang memiliki sifat *wettability* yang rendah dimana nilai kekasaran permukaan pada spesimen tersebut akan semakin rendah.

Berdasarkan karakteristik dan hasil pengambilan data diatas, maka dapat disimpulkan bahwa spesimen CRBT1 dengan temperatur karbonisasi 500°C

memiliki potensi yang sangat besar untuk dijadikan *material pad* baru pada sistem *direct evaporative cooling* karena memiliki sudut kontak yang nilainya paling kecil pada bagian pori sesuai dengan laju aliran fluida dan juga nilai dari kekasaran permukaan material yang paling besar diantara spesimen diujikan.

Daftar Pustaka

- [1] ASHRAE, 1989, *ANSI/ASHRAE Standard 62-1989, Ventilation For Acceptable Indoor Air Quality*, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- [2] Rawangkul, R, Khedari, J, Hirunlabh, J, Zeghmami, B., 2008, *Performance Analysis Of A New Sustainable Evaporative Cooling Pad Made From Coconut Coir*, Int J Sustain Eng. 1(2):117–131.
- [3] Zhang, C, Zhou, W, Wang, Q, Wang, H, Tang, Y, & Hui, K., 2013, *Comparison Of Static Contact Angle Of Various Metal Foams And Porous Copper Fiber Sintered Sheet*, Applied Surface Science, 276, 377-382.
- [4] Shirazy, M, R, Blais, S, & Fréchette, L, G., 2012, *Mechanism Of Wettability Transition In Copper Metal Foams: From Superhydrophilic To Hydrophobic*, Applied Surface Science, 258, 6416-6424.
- [5] Midiani, Luh Putu Ike, 2020, *Analisis Termal Sintered Zeolit Dan Hybrid Zeolit-Tembaga Untuk Pengembangan Sumbu Kapiler Pipa Kalor (Wick Heat Pipe)*, Disertasi, Teknik, Teknik Mesin, Universitas Udayana, Bali.

	<p>Wildan Akhsan menyelesaikan studi sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2017 sampai 2021. Ia menyelesaikan program sarjana dengan topik penelitian: pengaruh temperatur karbonisasi bambu betung terhadap <i>wettability</i> dan kekasaran permukaan material.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan termodinamika, perpindahan panas, dan pendingin <i>evaporative</i>.</p>	

Studi Eksperimental Perpindahan Kalor dan Pengamatan Temperatur pada Mesin dan Radiator Kendaraan

Adrian Utomo Nugroho, Wayan Nata Septiadi, Ketut Astawa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Transportasi adalah sarana bagi manusia untuk memindahkan sesuatu. Setiap kendaraan yang menggunakan mesin sebagai penggerak utamanya, akan terdapat proses Internal Combustion pada mesin tersebut. Pendinginan temperatur mesin saat ini mayoritas menggunakan radiator untuk melepaskan panasnya. Setiap radiator akan selalu menggunakan fluida pendingin sebagai medianya untuk membantu melepaskan panas mesin tersebut. Penelitian ini dilakukan secara langsung dinamis dan real pada kendaraan sepeda motor dengan membandingkan 3 fluida sebagai media pendinginannya. Fluida yang digunakan pada penelitian ini, yaitu: Radiator Coolant, Aquades (H_2O), dan Nanofluida (Al_2O_3 -Air). Hasil penelitian menunjukkan bahwa Nanofluida (Al_2O_3 -Air) memiliki laju perpindahan panas yang paling baik dibandingkan dengan Aquades (H_2O) dan Radiator Coolant.

Kata Kunci : Nanofluida, Radiator, Laju Perpindahan Kalor, Fluida Kerja Alternatif

Abstract

Transportation is a vehicle for mankind to move something. All vehicles that use an engine as the main motor, there will always be an Internal Combustion processes on the engine itself. Nowadays, most of the vehicle use a radiator in the purpose to release the engine heat. Every radiator will always using a fluid as the media to help the engine releasing the heat. This test is performed by dynamic and real conditions on the road with a motorcycle that comparing 3 fluids for the media. Fluids that are used for the test is: Radiator Coolant, Water (H_2O), and Nanofluids (Al_2O_3 -Air). The test result show that the heat exchange flow of Nanofluids (Al_2O_3 -Air) has the best value if compared with Water (H_2O) and Radiator Coolant.

Keyword: Nanofluid, Radiator, Heat Exchange Flow, Alternate Working Fluid

1. PENDAHULUAN

Transportasi adalah sarana bagi manusia untuk memindahkan sesuatu. Kemajuan teknologi saat ini ditunjukkan dengan kendaraan bermotor yang terus berkembang. Setiap kendaraan yang menggunakan mesin sebagai penggerak utamanya, akan terdapat proses Internal Combustion pada mesin tersebut. [1]

Hasil dari suatu proses Internal Combustion Engine selalu menghasilkan panas. Salah satu komponen utama dalam sistem pendinginan mesin adalah radiator. Radiator memegang peranan penting dalam mesin pembakaran bahan bakar, di dalam silinder mesin menyalurkan energi panas ke dalam bentuk tenaga putar. [2]

Pendinginan temperatur mesin saat ini mayoritas menggunakan radiator untuk melepaskan panasnya. Setiap radiator akan selalu menggunakan fluida pendingin sebagai medianya untuk membantu melepaskan panas mesin tersebut.

Terdapat 3 fluida pendingin yang digunakan untuk melakukan penelitian ini, yaitu radiator

coolant standar pabrik, Air (H_2O), dan nano fluida (Al_2O_3). Air (H_2O) merupakan cairan pendingin yang dapat merusak radiator karena dapat menimbulkan kerak dan endapan yang akan memampatkan radiator itu sendiri. Nanofluida yang digunakan untuk penelitian ini mampu mereduksi panas mesin jika dibandingkan dengan cairan pendingin lain yang digunakan dalam penelitian ini.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh nanofluid (Al_2O_3) sebagai fluida pada radiator terhadap jumlah perpindahan kalornya karena salah satu kelebihan nanofluid (Al_2O_3) yaitu dapat meningkatkan koefisiensi perpindahan panas total yang menjadi indikasi performa sebuah alat penukar panas.

2. DASAR TEORI

Heat exchanger merupakan suatu alat yang berfungsi untuk menukar kalor. Alat penukar kalor pada penelitian ini berfungsi untuk menurunkan temperatur fluida yang mengalir dari dan ke mesin. Tujuan dari penggunaan alat penukar kalor adalah untuk mengoptimalkan kinerja darinya, mendinginkan atau memanaskan suatu fluida

denganmelakukan perpindahanpanas secarakonveksi dankonduksi. Salah satujenis alatpenukar kalor yangdigunakan pada penelitian ini adalahradiator.

Konsep perpindahan kalor yang terjadi pada radiator yaitu: Konduksi terjadi pada saat sirip radiator bersinggungan dengan kisi radiator yang berisikan fluida tersebut, konveksi terjadi ketika proses dipanaskannya fluida oleh panas mesin dan menurunnya temperatur fluida yang dibantu oleh kipas radiator yang berlangsung proses perpindahan kalor secara radiasi.

Perkembangan pada jaman inidalam teknologi, nanotelah menciptakan suatkelas fluida barudan agakkhusus yang di sebut nano fluida. Nano fluida digunakan sebagaifluida yang memilikipotensi yangbesar untuk aplikasipendinginan. Nanofluida berarti duacampuran fasekontinu yang merupakan sebuah cairan atau fluida dan faseyang ter-dispersi yaitu nano partikel padatyang sangathalus, ukurannya lebihkecil dari pada 50 nanometer.

Besar pembuanganpanas radiatoradalah suatunilai yang menunjukkan besarnyapanas pada fluidaradiator yangdapat di buang keudara luar. Perpindahan kalor dapatdi hitung darienergi yang dibuang oleh fluidapanas atau energiyang di terima dari fluidadingin untuk penukarkalor pada radiator. Persamaan yang di gunakan untukmenghitung laju perpindahan kalor adalah

$$Q = m \cdot C_p (T_{h,out} - T_{h,in})$$

Keterangan

Q = Laju perpindahan kalor (W)

\dot{m} = Laju aliran massa fluida (Kg/s)

C_p = Kalor spesifik fluida kerja (KJ/Kg oC)

$T_{h,in}$ = Temperatur air saat memasuki radiator (K)

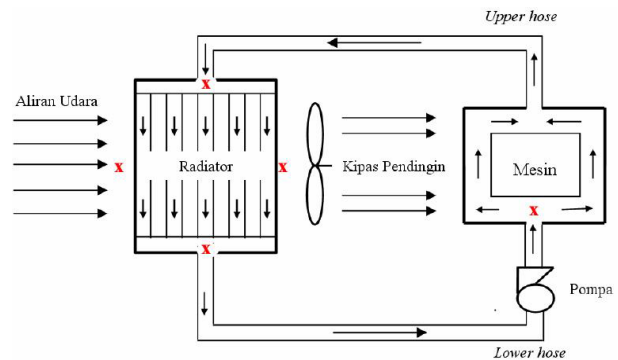
$T_{h,out}$ = Temperatur air saat keluar radiator (K)

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental atau dengan dilakukan percobaan dengan tujuan untuk mencari hubungan antara variabel – variabel dengan batasan yang ada. Metode eksperimental bersifat sistematis dan logis sehingga hasil yang di peroleh dari dilakukannya penelitianini akan sangat akurat dibanding jenis penelitian yang lain. Penelitian ini dilakukan secara langsung dan dinamis agar mendapatkan hasil yang akurat.

Data yang diambil saat penelitian adalah: Temperatur pada mesin (water jacket), Temperatur Radiator In, Temperatur Radiator Out, Temperatur Kisi Radiator bagian Dalam, serta Temperatur udara luar (Ambient). Data yang didapatkan dari hasil data pengolahan data pengujian awal adalah: Laju

Perpindahan Kalor serta perbandingannya terhadap fluida kerja lain yang diteliti.

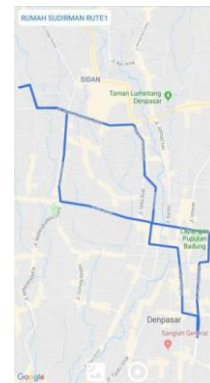


Gambar 1. Bagan Skematik Penelitian

Gambar 1 adalah Bagan Skematik Penelitian yang telah dilakukan. Terdapat lima lambang x pada gambar diatas yang menunjukkan titik-titik thermocople ditempatkan untuk mendapatkan rekaman data temperatur yang akurat.

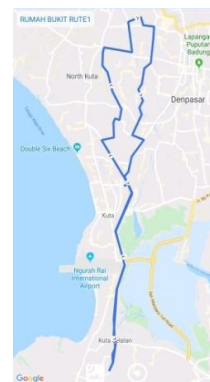
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Rute Penelitian



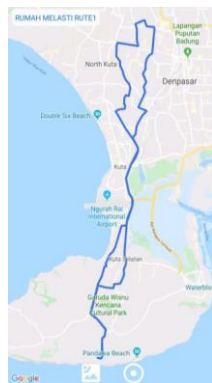
Gambar 2. Sketsa Jalur Penelitian Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Sudirman

Gambar 2 menunjukkan rute pertama penelitian dengan deskripsi menunjukkan jalur utama dengan panjang lintasan 15,3 km.



Gambar 3. Sketsa Jalur Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Bukit

Gambar 3 menunjukkan rute kedua penelitian dengan deskripsi jalur utama dengan panjang lintasan 44,2 km.



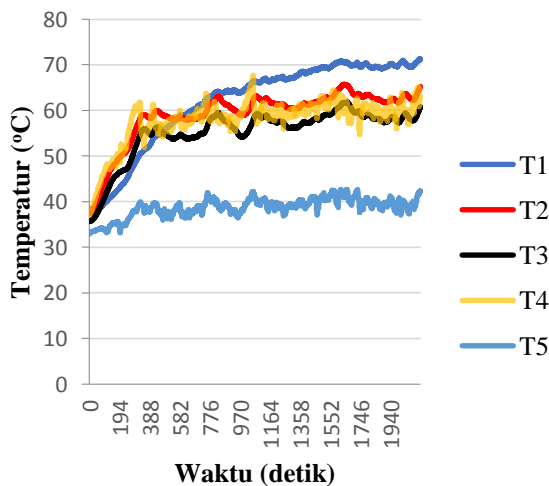
Gambar 4. Sketsa Jalur Gatsu Barat menuju Pantai Melasti

Gambar 4 menunjukkan rute ketiga penelitian dengan deskripsi jalur utama dengan panjang lintasan 59,3 km.

4.2 Distribusi Temperatur

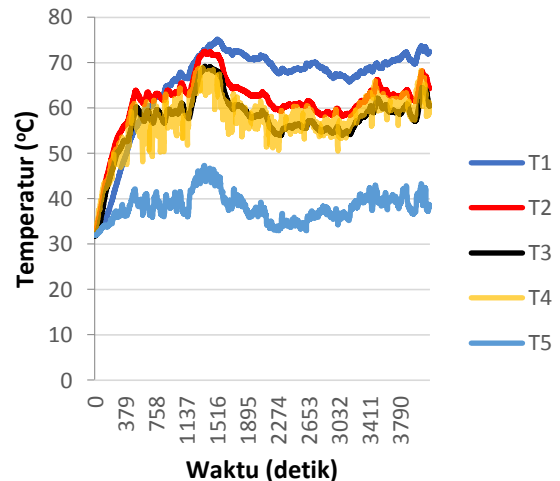
Keterangan

- T1: T. Water Jacket
- T2: T. Radiator In
- T3: T. Radiator Out
- T4: T. Kisi Radiator
- T5: T. Ambient



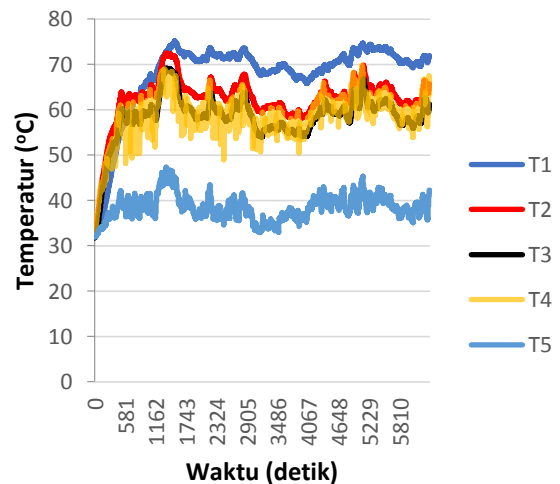
Gambar 5. Grafik Distribusi Temperatur Rute 1 (RADIATOR COOLANT)

Gambar 5 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Sudirman Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 71,29°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 59,2°C dan 55,3°C.



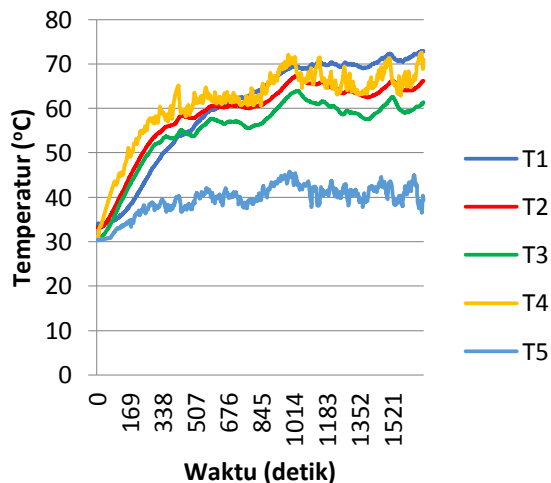
Gambar 6. Grafik Distribusi Temperatur Rute 2 (RADIATOR COOLANT)

Gambar 6 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Bukit Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 75,14°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 61,4°C dan 57,5°C.



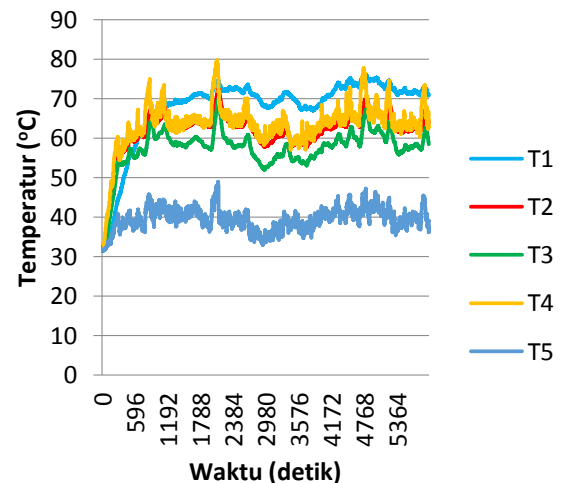
Gambar 7. Grafik Distribusi Temperatur Rute 3 (RADIATOR COOLANT)

Gambar 7 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Pantai Melasti Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 75,14°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 62,4°C dan 58,4°C.



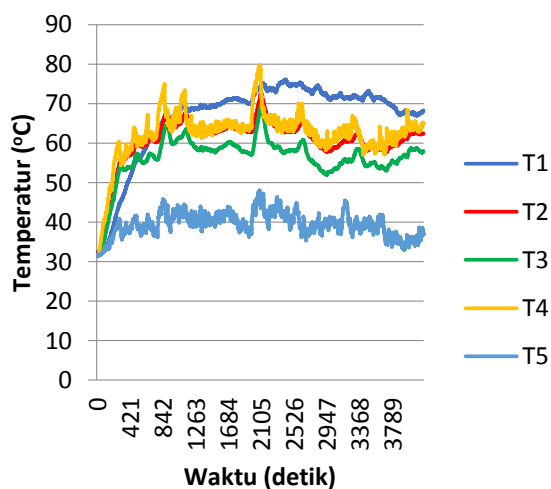
Gambar 8. Grafik Distribusi Temperatur Rute 1 (AQUADES H₂O)

Gambar 8 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Sudirman Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 72,94°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 58,7°C dan 55,2°C.



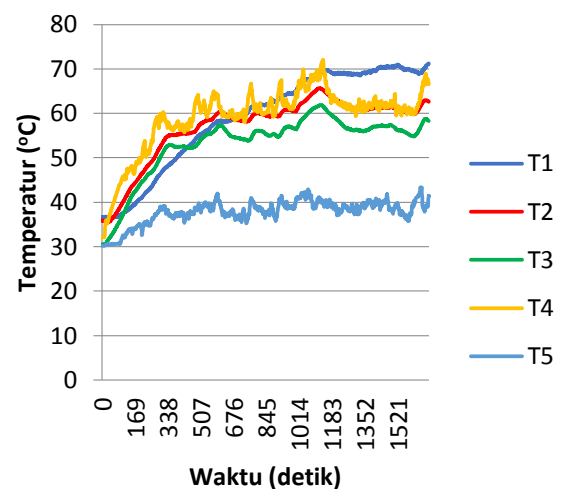
Gambar 10. Grafik Distribusi Temperatur Rute 3 (AQUADES H₂O)

Gambar 10 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Pantai Melasti Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 76,05°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 61,7°C dan 57,4°C.



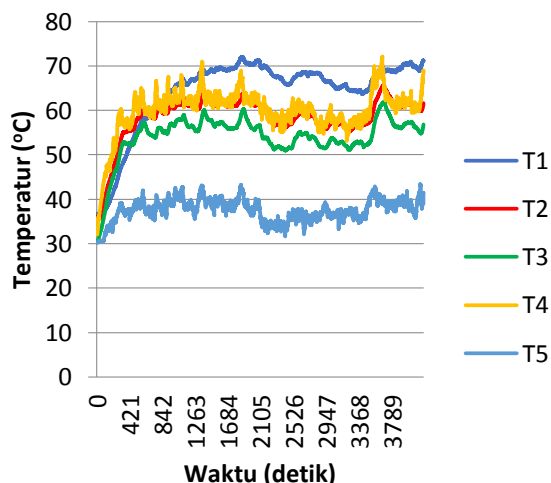
Gambar 9. Grafik Distribusi Temperatur Rute 2 (AQUADES H₂O)

Gambar 9 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Bukit Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 76,11°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 60,5°C dan 56,3°C.



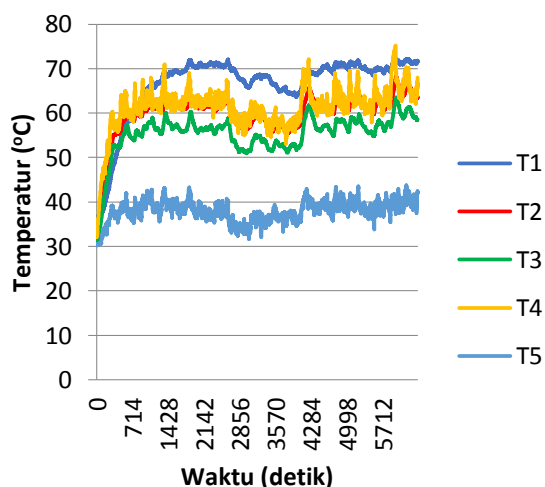
Gambar 11. Grafik Distribusi Temperatur Rute 1 (NANOFLUIDA AL₂O₃)

Gambar 11 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Sudirman Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 71,21°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 56,9°C dan 53,3°C.



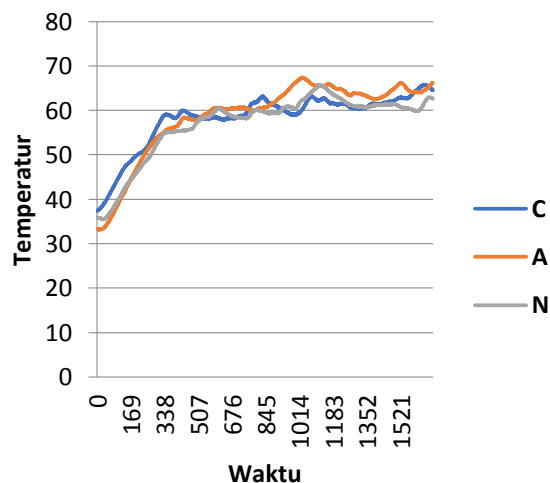
Gambar 12. Grafik Distribusi Temperatur Route 2 (NANOFLUIDA AL₂O₃)

Gambar 12 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Bukit Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 71,99°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 58,3°C dan 54,1°C.



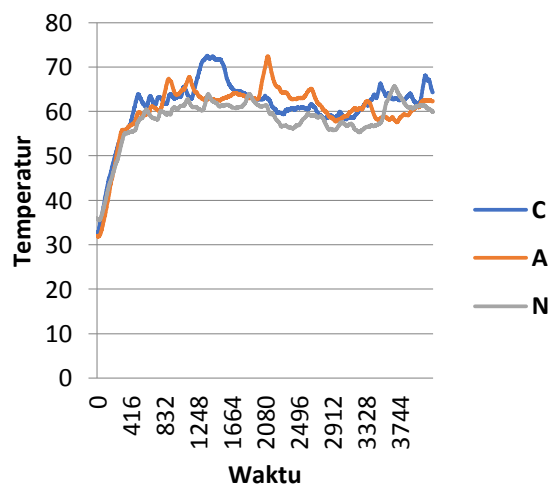
Gambar 13. Grafik Distribusi Temperatur Route 3 (NANOFLUIDA AL₂O₃)

Gambar 13 menunjukkan Grafik Distribusi Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Pantai Melasti Jalur Utama dengan Temperatur maksimal pada mesin sebesar 72,27°C serta rata-rata Temperatur Radiator In dan Out diperoleh sebesar 59,7°C dan 55,4°C.



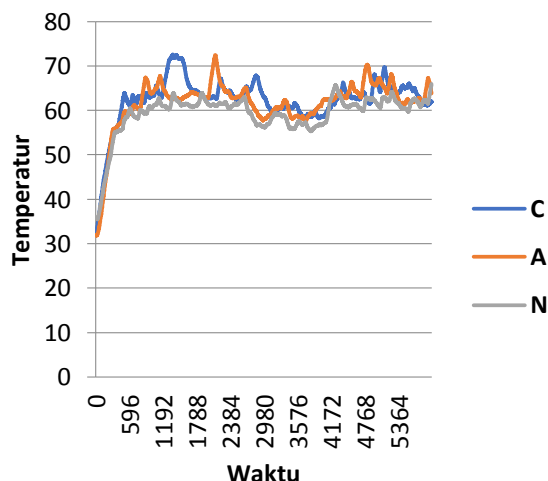
Gambar 14. Grafik Perbandingan Temperatur Route 1

Gambar 14 menunjukkan Grafik Perbandingan Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Sudirman Jalur Utama dengan membandingkan ketiga fluida penelitian: Radiator Coolant (C), Aquades (A), dan Nanofluida (N).



Gambar 15. Grafik Perbandingan Temperatur Route 2

Gambar 15 menunjukkan Grafik Perbandingan Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Kampus UNUD Bukit Jalur Utama dengan membandingkan ketiga fluida penelitian: Radiator Coolant (C), Aquades (A), dan Nanofluida (N).



Gambar 16. Grafik Perbandingan Temperatur Rute 3

Gambar 16 menunjukkan Grafik Perbandingan Temperatur dengan Rute Gatsu Barat menuju Pantai Melasti Jalur Utama dengan membandingkan ketiga fluida penelitian: Radiator Coolant (C), Aquades (A), dan Nanofluida (N).

4.3 Laju Perpindahan Kalor

Pada penelitian ini didapatkan laju aliran massa fluida sebesar 16,62 Kg/s (4000 rpm) dengan menghitung kecepatan putar bilah waterpump yang langsung terhubung ke camshaft pada mesin serta kalor spesifik fluida sebagai berikut:

- Cp Radiator Coolant = 3,521 KJ/Kg °C
- Cp H₂O = 4,185 KJ/Kg °C
- Cp Al₂O₃-Air = 4,189 KJ/Kg °C

Laju Perpindahan Kalor Radiator Coolant Rute 1

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 3,521 \times (59,2-55,3)$$

$$Q = 228,22W$$

Laju Perpindahan Kalor H₂O Rute 1

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 4,185 \times (58,7-55,2)$$

$$Q = 243,44W$$

Laju Perpindahan Kalor Al₂O₃ Rute 1

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 4,189 \times (56,9-53,3)$$

$$Q = 250,64W$$

Laju Perpindahan Kalor Radiator Coolant Rute 2

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 3,521 \times (61,4-57,5)$$

$$Q = 228,22W$$

Laju Perpindahan Kalor H₂O Rute 2

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 4,185 \times (60,5-56,3)$$

$$Q = 292,13W$$

Laju Perpindahan Kalor Al₂O₃ Rute 2

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 4,189 \times (58,3-54,1)$$

$$Q = 292,41W$$

Laju Perpindahan Kalor Radiator Coolant Rute 3

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 3,521 \times (62,4-58,4)$$

$$Q = 234,07W$$

Laju Perpindahan Kalor H₂O Rute 3

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 4,185 \times (61,7-57,4)$$

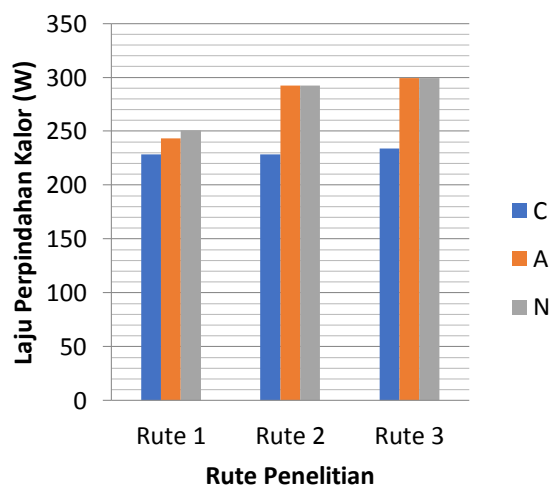
$$Q = 299,08W$$

Laju Perpindahan Kalor Al₂O₃ Rute 3

$$Q = \dot{M} \cdot Cp (T. Radiator In - T. Radiator Out)$$

$$Q = 16,62 \times 4,189 \times (59,7-55,4)$$

$$Q = 299,37W$$



Gambar 17. Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Kalor masing-masing fluida

Gambar 17 menunjukkan Grafik Perbandingan Laju Perpindahan Kalor masing-masing fluida dengan keterangan: Radiator Coolant (C), Aquades (A), dan Nanofluida (N).

5. KESIMPULAN

Kinerja Sistem Pendingin Radiator yang diberikan pada Laju Perpindahan Kalor dengan menggunakan Nanofluida (Al₂O₃-Air) dengan variasi 3 Rute Penelitian, menghasilkan nilai paling baik dengan nilai 299,37W dibandingkan Aquades (H₂O) dengan nilai 299,08W serta Radiator Coolant yang memiliki nilai 234,07W.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Ahmad, dkk. 2014. “Perancangan dan Pengujian Radiator Tester Skala Laboratorium yang Terintegrasi Pengatur Putaran Mesin dan Hembusan Angin (*Regulator Wind Blower*)”. Fakultas Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- [2]. Mustafa. 2016. “Analisis Variasi Media Pendinginan Pada Radiator terhadap Kinerja Laju Pembuangan Panas dengan Konveksi Paksa”. Fakultas teknik Universitas Merdeka, Madiun.

	<p>Adrian Utomo Nugroho menyelesaikan studi S1 di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana pada tahun 2021.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik berkaitan dengan konversi energi yaitu: dibidang nanofluida, dan mesin konversi energi</p>	

Studi Eksperimental Karakteristik Permeabilitas Pada Arang Dan Karbon Aktif Bambu Betung

Rere Septire Elifere, I Ketut Gede Wirawan, Hendra Wijaksana
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Guna memperoleh tingkat udara yang nyaman di negara tropis seperti Indonesia, digunakan sistem pendingin udara berbasis kompresor (AC) yang membutuhkan listrik dalam jumlah besar dan akan memperparah pemanasan global. Oleh karena itu, upaya yang dilakukan adalah dengan menggunakan sistem pendingin yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Sistem pendingin alternatif itu adalah sistem *direct evaporative cooling*. Dalam sistem *direct evaporative cooling*, efek pendinginan dihasilkan dari proses penguapan yang terjadi pada material pad yang telah dibasahi air. Bahan material pad sendiri digunakan sebagai aplikasi sistem pendingin evaporasi sebagai media pendingin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik permeabilitas pada arang dan karbon aktif bambu betung. Sebagai bahan baku, bambu dapat menghasilkan arang berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang tinggi. Digunakan temperatur karbonisasi 500°C (KB 1), 600°C (KB 2), aktivasi karbon tanpa holding time 500°C (KBA 1), aktivasi karbon tanpa holding time 600°C (KBA 2), aktivasi karbon dengan holding time 60 menit 500°C (KBA 3), dan aktivasi karbon dengan holding time 60 menit 600°C (KBA 4). Hasil dari seluruh pengujian menunjukkan bahwa spesimen KB 2 (600°C) memiliki potensi yang sangat besar untuk dijadikan material pad baru pada sistem *direct evaporative cooling* karena memiliki hasil permeabilitas yang paling tinggi. Dengan karakteristik sebagai berikut: spesimen KB 2 memiliki diameter pori 8.52 μm , memiliki nilai porositas 17.81 % dan memiliki nilai permeabilitas sebesar $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$.

Kata kunci: *Direct evaporative cooling*, bambu betung, karbonisasi, aktivasi karbon, struktur pori, diameter pori, porositas, dan permeabilitas.

Abstract

In order to obtain a comfortable level of air in a tropical country like Indonesia, compressor-based air conditioning (AC) systems are used, which require large amounts of electricity and will exacerbate global warming. Therefore, efforts are being made to use a cooling system that is more energy efficient and environmentally friendly. The alternative cooling system is a *direct evaporative cooling* system. In the *direct evaporative cooling* system, the cooling effect is generated from the evaporation process that occurs in the pad material that has been moistened with water. The pad material itself is used as an application for the evaporative cooling system as a cooling medium. This study aims to analyze permeability characteristics of charcoal and active carbon of bamboo betung. As a raw material, bamboo can produce porous charcoal with a high specific surface area and high porosity. Carbonization temperatures of 500°C (KB 1), 600°C (KB 2) are used, activated carbon without holding time 500°C (KBA 1), activated carbon without holding time 600°C (KBA 2), activated carbon with holding time 60 minutes 500°C (KBA 3), and activated carbon with holding time 60 minutes 600°C (KBA 4). The results of all tests indicate that the KB 2 (600°C) specimen has a very large potential to be used as a new pad material in the *direct evaporative cooling* system because it has the highest permeability results. With the following characteristics: the KB 2 specimen has a pore diameter of 8.52 μm , has a porosity value of 17.81 % and has a permeability value of $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$.

Keywords: *Direct evaporative cooling*, bamboo betung, carbonization, carbon activation, pore structure, pore diameter, porosity, and permeability.

1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah penduduk yang sangat pesat di hampir seluruh negara, mengakibatkan peningkatan kebutuhan akan perumahan dan perkantoran yang cukup pesat pula. Di negara tropis seperti Indonesia, pertumbuhan gedung-gedung untuk apartemen dan gedung perkantoran mengakibatkan kebutuhan energi listrik meningkat untuk sistem pendingin *air conditioning* (AC) yang berbasis kompresor. Sistem pendingin kompresi uap ini memerlukan input energi listrik untuk pengoperasiannya, dan hampir 60% energi listrik pada bangunan-bangunan besar diperuntukkan bagi pengoperasian sistem AC tersebut, selain permintaan kebutuhan energi listrik yang tinggi, penggunaan refrigerant pada sistem AC dapat membahayakan

kelestarian lingkungan, dimana refrigerant dalam jumlah besar yang dilepas ke udara sekitar, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang tidak baik berupa pemanasan global.

Upaya yang dilakukan untuk mengurangi dampak yang diakibatkan oleh penggunaan sistem AC dalam hal kebutuhan energi listrik yang tinggi dan dari dampak lingkungan yang akan terjadi, maka diperlukan suatu sistem pendingin yang hemat energi dan ramah lingkungan yaitu sistem pendingin *direct evaporative cooling*. Sistem pendingin evaporatif merupakan sistem pendingin alternatif yang dapat digunakan untuk mengurangi dampak penggunaan sistem AC, karena sistem pendingin evaporatif hanya memerlukan udara dan air sebagai penggerak utama sistem pendinginannya, dengan hanya sedikit

kebutuhan energi listrik untuk menggerakkan *mechanical fan* dan pompa air.

Dalam sistem *direct evaporative cooling* dibutuhkan material pad yang berpori (*porous pad material*) yang memiliki daya serap dan daya tampung air yang cukup tinggi untuk menjamin terjadinya proses evaporasi pada permukaan material pad. Dengan daya serap dan daya tampung air yang tinggi dari material cooling pad, akan menghasilkan area cooling pad yang terbasahi air (*wetted area*) yang makin luas, sehingga akan meningkatkan jumlah panas sensibel udara suplai yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut, dan temperatur udara produk menjadi semakin rendah (lebih dingin). Secara umum material penukar panas dan massa yang baik untuk sistem pendinginan *evaporative* adalah material yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan gaya kapiler yang besar [1].

Dalam usaha menjamin ketersediaan air pada material pad maka diperlukan karakteristik permeabilitas yang tinggi, sehingga kebutuhan air untuk proses evaporasi dapat terpenuhi. Hubungan antara gaya pemompaan kapiler dan permeabilitas bertolak belakang. Semakin besar gaya pemompaan kapiler, semakin kecil permeabilitasnya [2]. Peningkatan karakteristik permeabilitas pada material pad sistem *direct evaporative cooling* tersebut dapat dilakukan dengan peningkatan struktur pori material pad melalui proses karbonisasi. Proses karbonisasi akan merubah material menjadi *carbonized material* berupa arang (*charcoal*) yang diikuti dengan perubahan struktur pori termasuk didalamnya ukuran pori, porositas, luas permukaan pori dan juga volume pori. Ukuran pori yang dihasilkan akan tergantung dari temperatur karbonisasi dan aktivasi karbon yang diberikan, semakin tinggi temperatur karbonisasi, semakin besar ukuran pori yang dihasilkan [3]. Proses karbonisasi akan menjadikan material memiliki struktur pori mikro dengan ukuran pori yang secara umum masih lebih besar dari ukuran pori nano.

Bahan baku utama pembuatan penyerap pori berbasis karbon antara lain kayu dan bambu. Bambu memiliki kepadatan serat yang tinggi dan tekstur yang keras. Sebagai bahan baku, bambu dapat menghasilkan arang berpori dengan luas permukaan spesifik yang tinggi dan porositas yang tinggi. Bambu tumbuh dengan cepat dan bisa dipanen setiap empat tahun. Mengganti kayu dengan bambu untuk pembuatan arang berpori dapat mengurangi emisi karbondioksida [4].

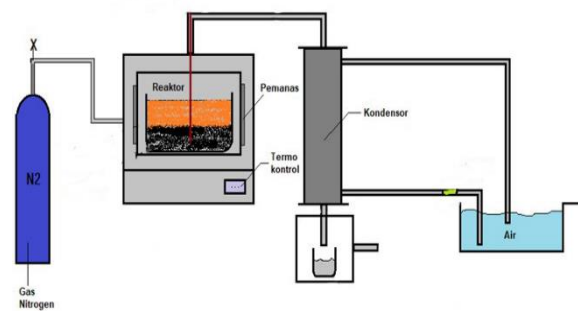
Berdasarkan dari pemaparan tersebut diatas, dimana diketahui belum terlalu banyak penelitian yang mengkaji karakteristik permeabilitas pada arang dan karbon aktif bambu betung untuk sistem *direct evaporative cooling*, maka penulis akan melakukan penelitian tentang karakteristik permeabilitas pada arang dan karbon aktif bambu betung sebagai material pad baru sistem *direct evaporative cooling*. Dalam penelitian ini sebagai material dasar yang dipakai adalah bambu betung yang akan

dikarbonisasi pada temperatur karbonisasi karbonisasi 500 °C dan 600 °C.

2. Dasar Teori

2.1 Proses Karbonisasi

Karbonisasi adalah proses pirolisis material organik dalam kondisi bebas oksigen (*inert atmosphere*) yang menghasilkan residu solid yang memiliki kandungan elemen karbon yang tinggi. Karbonisasi merupakan reaksi pirolitik yang kompleks yang melibatkan banyak reaksi seperti *dehydrogenation*, *condensation*, *hydrogentransfer* dan *isomerization*. Tujuan dari proses karbonisasi adalah memperkaya kandungan karbon dan menghasilkan pori awal material. Pemilihan proses karbonisasi dalam penelitian ini didasarkan pada hasil penelitian [3], proses karbonisasi dilakukan di dalam reaktor yang sebelumnya dialiri N₂ lalu dilakukan proses karbonisasi pada temperatur (500-900° C) dengan memiliki hasil struktur pori yang berbeda dengan bambu karbonisasi suhu yang lebih tinggi.



Gambar 1. Peralatan proses karbonisasi

Permeabilitas merupakan makroskopik ukuran kemudahan mengalirnya cairan melalui rongga *porous material* atau media berpori. Permeabilitas didefinisikan sebagai kemampuan cairan mengalir melalui lubang *porous material* [5].

Besarnya permeabilitas yang terjadi pada *porous material* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut :

$$\frac{p^2 \cdot \varepsilon^2}{1 - \varepsilon)^2} \quad (1)$$

dimana K adalah permeabilitas material (μm^2), dp adalah diameter pori (μm), C adalah faktor geometrik bambu yang diasumsikan sama dengan material kayu karbonisasi yaitu 122 [6] dan ε adalah porositas. Porositas dicari dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$s(\varepsilon) = \frac{V_{pw}}{V_w} \quad (2)$$

$$p_w = M_a \times V_s \quad (3)$$

dimana V_{pw} adalah volume pori yang terbentuk pada material (cm^3), V_w adalah volume total material (cm^3), M_a adalah massa air yang terserap (gr), dan V_s adalah volume spesifik air saat jenuh (cm^3/gr).

3. Metode Penelitian

3.1 Pembuatan Arang dan Karbon Aktif Bambu Betung

1. Bambu betung dikeringkan terlebih dahulu dibawah paparan sinar matahari selama 10 hari, kemudian dipotong-potong dengan ukuran $P \times L \times T = 2,5\text{cm} \times 1,7\text{cm} \times 3,1\text{cm}$, sebanyak 3 sampel dan selanjutnya dikeringkan kembali pada dapur listrik pada suhu 120°C selama 6 jam.
2. Proses karbonisasi 500°C dan 600°C : (a) 3 sampel uji pertama dimasukkan ke dalam reaktor karbonisasi untuk proses karbonisasi 500°C ; (b) reaktor karbonisasi dialiri nitrogen dengan laju aliran 1 L/min selama 15 menit untuk mendapatkan kondisi bebas oksigen (inert atmosfir), kemudian temperatur reaktor karbonisasi ditingkatkan dengan laju pemanasan $500^\circ\text{C}/\text{jam}$ dan diatur hingga mencapai 500°C tanpa *holding time*. (c) Sampel didinginkan dalam *furnace* selama 12 jam dan akan dihasilkan sampel arang bambu betung KB 1, KBA 1, dan KBA 3.
3. Proses karbonisasi selanjutnya dilakukan dengan pengulangan langkah 2a –2c dengan peningkatan temperatur karbonisasi 600°C , dan akan dihasilkan sampel arang bambu betung KB 2, KBA 2, dan KBA 4.
4. Proses aktivasi spesimen tanpa *Holding Time*: (a) Sampel KBA 1 dan KBA 2 di *inject* gas nitrogen dan dimasukkan kedalam reaktor. (b) Reaktor dialiri nitrogen dengan laju aliran 1 Liter/menit selama 12 detik dan di *setting* suhunya 600°C dengan laju pemanasan $500^\circ\text{C}/\text{jam}$. (c) Ketika suhu sudah mencapai 600°C , reaktor dimatikan lalu spesimen dikeluarkan.
5. Proses aktivasi spesimen dengan *holding time* 60 menit: (a) Sampel KBA 3 dan KBA 4 di *inject* gas nitrogen dan dimasukkan kedalam reaktor. (b) Reaktor dialiri nitrogen dengan laju aliran 1 Liter/menit selama 12 detik dan di *setting* suhunya 600°C dengan laju pemanasan $500^\circ\text{C}/\text{jam}$. (c) Ketika suhu sudah mencapai 600°C , spesimen tetap dipanaskan didalam reaktor dengan suhu 600°C selama 60 menit. (d) Setelah 60 menit, spesimen dikeluarkan dari reaktor.
6. Selanjutnya dilakukan uji SEM pada spesimen KB 1, KB 2, KBA 1 KBA 2, KBA 3, dan KBA 4.

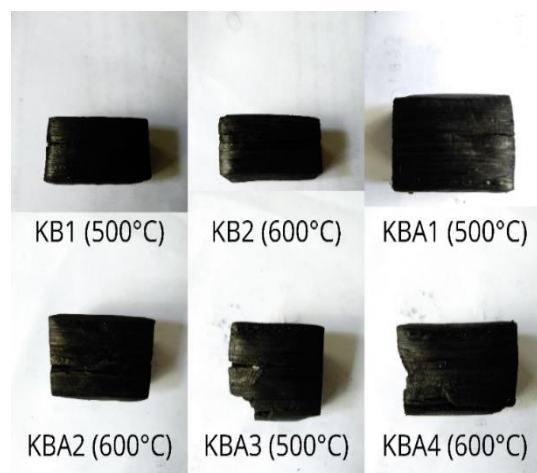
3.2 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

1. Membuat spesimen dengan ukuran $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ dari arang bambu yang dihasilkan melalui pengujian karbonisasi.
2. Meletakkan 6 spesimen (KB 1, KB 2, KBA 1 KBA 2, KBA 3, dan KBA 4) tersebut ke dalam alat *Scanning Electron Microscope* (SEM).
3. Melakukan analisis struktur pori pada masing-masing spesimen.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Proses Pengujian Karbonisasi

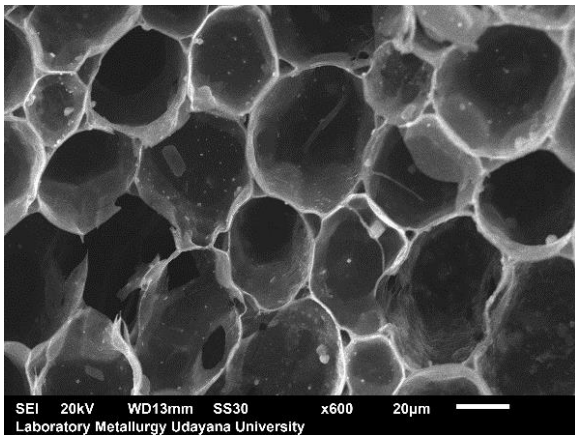
Dari pengujian karbonisasi maka dihasilkan arang dan karbon aktif bambu betung. Dalam penelitian ini, diharapkan struktur pori yang dihasilkan dari spesimen arang dan karbon aktif bambu betung yang telah dikarbonisasi memiliki diameter pori yang relatif besar, agar spesimen bambu betung yang telah dikarbonisasi mempunyai nilai porositas yang tinggi dan nilai permeabilitas yang tinggi. Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian karbonisasi berupa arang bambu betung.



Gambar 2. Spesimen Hasil Karbonisasi dan Aktivasi.

4.2 Karakteristik Permeabilitas

Berdasarkan rumus diatas dibutuhkan data diameter pori dan porositas untuk mendapatkan hasil permeabilitas. Dilakukan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan analisis menggunakan aplikasi ImageJ dan didapatkan diameter pori spesimen arang bambu. Gambar 3 Menunjukkan gambar hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada spesimen arang bambu betung.



Gambar 3. Struktur Pori Pada Spesimen KB 2 (600 °C).

Dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan analisis menggunakan aplikasi ImageJ didapatkan data yang terdapat dalam Tabel Gambar 1 Sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Pengolahan Data Struktur Pori Pada Bambu Betung.

Nama Spesimen	Jari-Jari Pori (µm)	Diameter Pori (µm)
Karbonisasi		
KB 1 (500°C)	3.520227197	7.040454393
KB 2 (600°C)	4.262234668	8.524469335
Aktivasi Tanpa HT		
KBA 1 (500°C)	3.172657572	6.345315144
KBA 2 (600°C)	2.581197669	5.162395338
Aktivasi HT 60 menit		
KBA 3 (500°C)	3.615470371	7.230940742
KBA 4 (600°C)	2.681850643	5.363701286

Setelah didapatkan diameter pori maka selanjutnya dicari nilai porositas spesimen arang bambu betung. Porositas adalah perbandingan antara volume pori dan volume total yang terbentuk pada material bambu betung yang telah dikarbonisasi. Didapatkan volume pori dengan cara massa air tertahan didalam spesimen dikalikan dengan volume jenis spesifik air jenuh dan volume total material dengan cara menghitung dimensi dari spesimen arang bambu betung. Tabel 2 menunjukkan hasil porositas bambu betung dari pengolahan data yang telah dilakukan.

Tabel 2. Hasil Pengolahan Data Porositas Pada Bambu Betung

Nama Spesimen	Massa Awal (gr)	Massa Akhir (gr)	Massa Air Yang Tertahan (gr)	Volume Pori Spesifik (cm ³)	Volume Total Material (cm ³)	Porositas (%)
Karbonisasi						
KB 1 (500°C)	3.14	6.5	3.36	3.37	19.46	17.34
KB 2 (600°C)	3.06	6.06	3.01	3.01	16.92	17.81
Aktivasi Tanpa HT						
KBA 1 (500°C)	2.1	5.45	3.35	3.36	15.59	21.57
KBA 2 (600°C)	2.38	5.84	3.46	3.47	14.26	24.4
Aktivasi HT 60 menit						
KBA 3 (500°C)	2.46	5.29	2.83	2.84	14.86	19.12
KBA 4 (600°C)	1.5	3.14	1.64	1.64	10.12	16.24

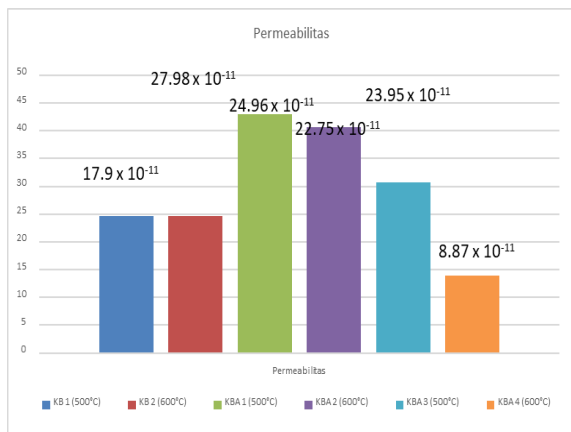
Dari hasil porositas dan diameter pori dapat dicari nilai permeabilitas dari arang bambu betung. Dengan menggunakan rumus diatas maka didapatkan hasil nilai permeabilitas. Tabel 3 menunjukkan hasil permeabilitas bambu betung dari pengolahan data yang telah dilakukan. Berdasarkan tabel tersebut, spesimen KBA 4 (600°C) memiliki nilai permeabilitas terendah, yaitu $8.87 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ dan spesimen KB 2 (600°C) memiliki nilai permeabilitas tertinggi, yaitu $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$. Spesimen yang memiliki diameter pori dan porositas yang besar akan menghasilkan permeabilitas yang besar.

Tabel 3. Hasil Pengolahan Data Permeabilitas Pada Bambu Betung.

Nama Spesimen	Porositas	Faktor Geometrik Bambu	Diameter Pori (µm)	Permeabilitas (cm ²)
Karbonisasi				
KB 1 (500°C)	0.1734	122	7.04	17.9×10^{-11}
KB 2 (600°C)	0.1781	122	8.52	27.98×10^{-11}
Aktivasi Tanpa HT				
KBA 1 (500°C)	0.2157	122	6.34	24.96×10^{-11}
KBA 2 (600°C)	0.2440	122	5.16	22.75×10^{-11}
Aktivasi HT 60 menit				
KBA 3 (500°C)	0.1912	122	7.23	23.95×10^{-11}
KBA 4 (600°C)	0.1624	122	5.36	8.87×10^{-11}

Gambar 4 menunjukkan hasil perhitungan permeabilitas berupa grafik antara nilai permeabilitas dengan temperatur karbonisasi pada spesimen KB 1, KB 2, KBA 1, KBA 2, KBA 3, dan KBA 4. Berdasarkan grafik tersebut, ditunjukkan bahwa spesimen arang bambu betung KB 2 (600°C) memiliki nilai permeabilitas tertinggi yaitu $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ dan spesimen KBA 4 (600°C) memiliki

nilai permeabilitas yang paling rendah yaitu sebesar $8.87 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$.



Gambar 4. Grafik Hasil Data Permeabilitas Pada Bambu Betung.

5. Kesimpulan

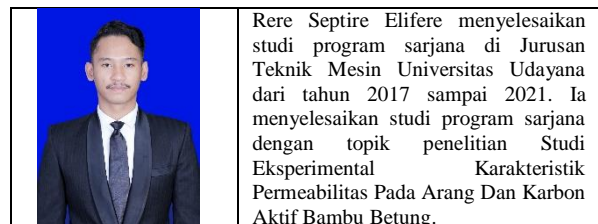
Dari penelitian yang sudah dilakukan, karakteristik permeabilitas arang dan karbon aktif bambu betung, dapat disimpulkan bahwa :

Spesimen arang bambu betung temperatur karbonisasi 600°C (KB 2) memiliki nilai permeabilitas yang paling besar yaitu $27.98 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$ jika dibandingkan dengan spesimen dengan temperatur karbonisasi yang lain. Berdasarkan hasil pengambilan data diatas, maka dapat disimpulkan bahwa spesimen dengan temperatur karbonisasi 600 °C (KB 2) memiliki potensi yang besar untuk dijadikan material *pad* baru pada sistem *direct evaporative cooling* karena memiliki karakteristik nilai permeabilitas yang paling besar diantara spesimen arang bambu yang diujikan. Spesimen KB 2 dan KBA 1 memiliki nilai permeabilitas yang besar dikarenakan suhu karbonisasi yang tinggi dan proses aktivasi yang dilakukan pada material setelah proses karbonisasi akan memperbesar pori awal yang telah terbentuk pada saat proses karbonisasi dan juga menghasilkan pori-pori kecil yang baru. Sedangkan spesimen KBA 4 dengan aktivasi menggunakan *holding time* 60 menit menghasilkan nilai permeabilitas yang rendah, dikarenakan kemungkinan ada sejumlah pori yang terbakar (*burn off*) sehingga mengurangi porositas dan hasil permeabilitas pada material arang bambu betung.

Daftar Pustaka

[1] Zhao, X., Liu, S., & Riffat, S. B., 2008, *Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems*, *Building and Environment*, Vol. 43, No. 11, pp. 1902-1911.

- [2] Li, Jinwang & Lu, Ningxiang & Cong, Tianshu, 2019, *Experimental study on evaporation-capillary pumping flow in capillary wick and working fluid system*, *Thermal Science*, Vol. 25, No. 413-413, pp. 10.2298/TSCI180918413L.
- [3] Isa, S. S. M., Ramli, M. M., Hambali, N. A. M. A., Kasjoo, S. R., Isa, M. M., Nor, N. I. M., ... & Ahmad, N., 2016, *Adsorption properties and potential applications of bamboo charcoal: a review*, In *MATEC Web of Conferences*, Vol. 78, p. 01097, EDP Sciences.
- [4] Huang, Pei-Hsing., Jhan, Jhih-Wei., Cheng, Yi-Ming., Cheng, Hau-Hsein, 2014, *Effect of Carbonization Parameters of Moso-Bamboo Based Porous Charcoal on Capturing Carbon Dioxide*, *Scientific World Journal*.
- [5] Berti, L. F., Santos, P. H. D., Bazzo, E., Janssen, R., Hotza, D., & Rambo, C. R., 2011, *Evaluation of permeability of ceramic wick structures for two phase heat transfer devices*, *Applied thermal engineering*, Vol. 31, No. 6-7, pp. 1076-1081.
- [6] Solomon, A. B., Mahto, A. K., Joy, R. C., Rajan, A. A., Jayprakash, D. A., Dixit, A., & Sahay, A., 2020, *Application of bio-wick in compact loop heat pipe* *Applied Thermal Engineering*, Vol. 169, No. 114927.



Analisa Unjuk Kerja Heat Recovery Steam Generator Pada Blok 1 Unit 1 Pt. Indonesia Power Grati Pomu

Gede Ferdy Wardiana, I.G.B. Wijaya Kusuma, A.A.I.A. Sri Komaladewi
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

PLTGU PT. Indonesia Power Grati Pomu merupakan suatu pembangkit listrik yang menggunakan sistem kombinasi dari dua sistem pengoperasian yaitu PLTG dengan PLTU. Dimana gas buang dari PLTG yang suhunya masih mencapai 500°C dimanfaatkan untuk menghasilkan uap. Komponen utama dari PLTU ialah Heat Recover Steam Generator, dimana komponen tersebut sangat berperan penting untuk menentukan input dari turbin uap yang dimana kualitas dan keefektifitasannya harus dipertimbangkan. Berdasarkan kondisi tersebut, peneliti mencoba melakukan analisa perbandingan unjuk kerja pada on-design dan aktual dari HRSG atau alat penukar kalor yang harus dipertimbangkan keefektifitasannya. Analisa dilakukan pada Blok 1 Unit 1 dengan menggunakan perhitungan terhadap laju perpindahan panas, efektifitas, serta pressure drop yang terjadi. Setelah dilakukannya analisa terjadi penurunan nilai efektifitas, pada kondisi on-design sebesar 23,23% dan kondisi aktual sebesar 13,55% dengan jumlah penurunan yang terjadi sebesar 9,68%. Terjadi penurunan tekanan, untuk kondisi on-design mencapai nilai 9149,7 Pascal dan kondisi aktual 9127,5 Pascal, terjadi penurunan sebesar 21,46 Pascal. dari analisa yg dilakukan ditemukan beberapa faktor-faktor terjadinya penurunan nilai efektifitas antara lain yaitu laju perpindahan panas, nilai q maksimal, dan LMTD.

Kata kunci: Analisa, HRSG, Perpindahan Panas

Abstract

PLTGU PT. Indonesia Power Grati Pomu is a power plant that uses a combination system of two systems, namely PLTG and PLTU. Where the exhaust gas from the PLTG, whose temperature still reaches 500°C, is used to produce steam. The main component used to generate steam is the Heat Recovery Steam Generator, where this component is very important to determine the input of the steam turbine whose quality and effectiveness should be prohibited. Based on these conditions, the researcher tries to analysis the performance comparison of the design and the actual HRSG or heat exchanger which must consider its effectiveness. The analysis is carried out at Block 1 Unit 1 by using the calculation of the rate of displacement, effectiveness, and pressure drop that occurs. After the assessment, the decrease in the effectiveness value, in the design condition was 23.23% and the actual condition was 13.55% with the amount of decrease that occurred was 9.68%. There is a pressure drop, for the condition in-design it reaches the value of 9149.7 Pascal and the actual condition is 9127.5 Pascal, there is a decrease of 21.46 Pascal. From the analysis conducted, it was found several factors for the implementation of decreasing the effectiveness value, namely heat rate, maximum q value, and LMTD.

Keywords: Analysis, HRSG, Heat Transfer

1. Pendahuluan

Kurangnya pasokan listrik disebabkan oleh minimnya jumlah pembangunan pembangkit di Indonesia pada beberapa tahun terakhir. Salah satu upaya yang dapat dilakukan guna meningkatkan produksi tenaga listrik adalah membangun beberapa pembangkit listrik dengan penggunaan energi bahan bakar fosil seefisien mungkin adalah mendirikan siklus kombinasi PLTGU (Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap) [1]. Dimana uap panas hasil pembakaran dari *Combustion Chamber* selanjutnya akan dipergunakan sebagai pemutar turbin untuk dapat menghasilkan energi listrik, dan temperatur gas buang dari hasil memutar turbin ini nantinya digunakan untuk memanaskan ketel uap yang disebut Heat Recovery Steam Generator sehingga dapat kembali menghasilkan uap bertekanan dan bertemperatur tinggi untuk memutar turbin uap. Energi listrik yang di hasilkan setiap pembangkit ini yang nantinya akan di distribusikan untuk semua kepentingan.

PT. PLN (Persero) yang memiliki beberapa anak buah perusahaan yang bertugas melayani listrik daerah Jawa dan Bali, salah satunya adalah PT. Indonesia Power Grati Pomu wilayah Pasuruan, Jawa Timur. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap yang berada di PT. Indonesia Power Grati Pomu bekerja berdasarkan siklus termodinamika, untuk PLTG menggunakan siklus Bryton sebagai siklus kerjanya, PLTGU menggunakan siklus Rankine. Proses Produksi Listrik PLTGU Grati Pomu terdiri dari 3 blok pengoperasian dengan pola operasi pada blok 1 yaitu menggunakan pola 3-3-1, pada blok 2 menggunakan sistem *Open Cycle* saja, dan yang terakhir pada Blok 3 yang merupakan milik PLN menggunakan pola operasi 3-3-1 dengan menggunakan dua jenis bahan bakar yaitu Gas Alam dan HSD (*High Speed Diesel*).

Untuk meningkatkan produksi energy listrik maka komponen-komponen utama Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) haruslah beroperasi secara maksimal [2]. HRSG merupakan alat *heat exchngr* yang memanfaatkan kalor sisa gas

buang turbin gas untuk memanaskan air dan mengubahnya menjadi uap. HRSG memiliki beberapa komponen penting didalamnya salah satunya yaitu heat exchanger yang terdiri dari evaporator, economizer, dan superheater. Melakukan analisa pada prestasi *Heat Recovery Steam Generator* akan dapat mengetahui *output* dari temperatur dan tekanan yang dihasilkan, seberapa maksimal kinerja dari *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* dapat diketahui seberapa efektif turbin di gerakan.

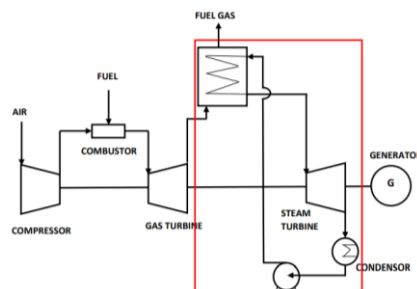
Namun HRSG yang digunakan industri pembangkit listrik di Grati, pasuruan masih memiliki perpindahan panas dan efektifitas yang kurang, dengan batasan normal 43 % kini unjuk kerja yang dihasilkan hanya mencapai kurang lebih 27% saja. Hal ini disebabkan oleh usia dari unit 1 pembangkit ini sudah lama. Diharapkan dengan dilakukannya analisis HRSG ini dapat memiliki nilai perpindahan panas yang maksimal karena sangat mempengaruhi putaran turbin nantinya.

Berdasarkan latar belakang yang sudah didapat, peneliti mencoba melakukan analisa pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* di PLTGU Grati Pomu Pasuruan, dengan menganalisa unjuk kerja dari HRSG akan dapat mengetahui seberapa efektif perpindahan panas dan penurunan tekanan yang terjadi, serta dapat mengetahui efisiensi dari turbin itu sendiri yang nantinya diambil kesimpulan untuk meningkatkan kinerjanya.

2. Dasar Teori

2.1 Definisi PLTGU

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) merupakan suatu sistem kombinasi dari pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Dimana panas gas buang dari PLTG yang suhunya masih mencapai 500°C dimanfaatkan untuk menghasilkan uap sebagai penggerak utama turbin uap. Tujuan utama dari siklus ini yaitu untuk meningkatkan efisiensi termal PLTG yang awalnya relatif kecil yaitu kurang lebih 25%. Efisiensi termal yang mampu dicapai instalasi siklus gabungan tersebut sebesar 48-50 %. pemanfaatan gas buang dari turbin gas yang awalnya dibuang ke lingkungan kini dimanfaatkan kembali untuk memanaskan air umpan (*feed water*) menjadi uap panas lanjut (*superheated vapor*) yang menggunakan *heat exchanger* atau *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. Heat Exchanger atau penukar panas adalah peralatan yang menerapkan prinsip perpindahan panas yang digunakan untuk mentransferkan kalor antar 2 fluida atau lebih. Kebanyakan heat exchanger, fluida-fluida kerjanya dipisah oleh permukaan diantara kedua fluida tersebut dan biasanya fluidanya tidak bercampur [3].



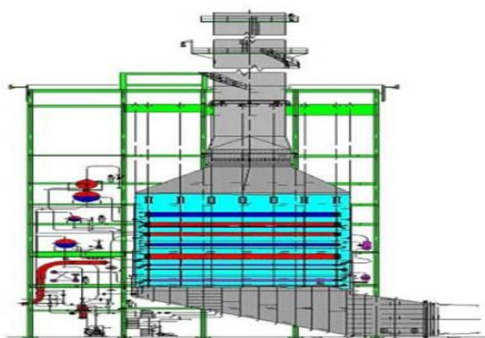
Gambar 1. Siklus Combine Cycle PLTGU

Prinsip kerja dari siklus ini dapat digambarkan sebagai berikut, Gas buang hasil pembakaran turbin gas dengan temperature yang masih tinggi yaitu 550 °C dialirkan masuk ke dalam HRSG di bagian inlet fluida panas untuk memanaskan air di dalam pipa-pipa pemanas, kemudian gas buang ini dibuang ke atmosfer melalui outlet fluida panas dengan temperature yang sudah rendah 130 °C. Fluida yang berada di drum berupa air sebagian berubah menjadi uap karena pemanasan tersebut, campuran air dan uap ini dipisahkan dari air menggunakan separator.

Uap yang sudah terkumpul kemudian dipergunakan untuk memutar sudu-sudu turbin uap, sedangkan air nya kembali menuju drum untuk disirkulasi lagi kedalam pipa-pipa pemanas bersama dengan air pengisi yang baru. Proses tersebut terjadi secara berulang-ulang selama HRSG beroperasi. Agar dapat memproduksi uap yang banyak dalam waktu yang relatif cepat, maka perpindahan panasnya dilakukan dengan aliran counter flow dengan sirkulasi paksa, dan sirkulasi airnya harus cepat.

2.2 Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

HRSG atau Heat Recovery Steam Generator, merupakan peralatan utama dari Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap yang berfungsi untuk memanfaatkan gas buang dari turbin gas untuk memproduksi uap air yang bertekanan. Panas/kalor yang dipindahkan dari gas buang tersebut seluruhnya berpindah dengan cara konveksi ke air yang berada di dalam pipa. Gas buang turbin mengalir memanasi peralatan HRSG mulai dari superheater, ekonomizer dan selanjutnya keluar melalui cerobong [4]. *Heat recovery steam generator* adalah salah satu bagian utama dari suatu pembangkit yang menggunakan prinsip *combine cycle* dengan tujuan memanfaatkan panas dari aliran gas panas. HRSG memproduksi uap bertujuan untuk dapat menggerakkan turbin uap. Pada PLTGU Grati POMU ini terdapat 3 blok pengoperasian, pada blok 1 dan 3 terdapat tiga HRSG yang masing-masing dihubungkan dengan sebuah turbin gas dan ketiga HRSG tersebut menggerakkan sebuah turbin uap. Sedangkan pada blok 2 terdiri dari tiga gas turbin dengan pengoperasian *open cycle*.



Gambar 2. HRSG Sirkulasi paksa [5]

Ada beberapa jenis HRSG yang ada yaitu yang pertama HRSG jenis sirkulasi alami, HRSG sirkulasi paksa, HRSG tekanan tunggal, HRSG dua tekanan, HRSG dengan tekanan bertingkat, HRSG dengan burner bantu. HRSG yang dipergunakan pada penelitian ini adalah jenis HRSG sirkulasi paksa dengan design model vertikal. Bagian-bagian utama pada suatu HRSG terbagi menjadi beberapa tingkatan komponen antara lain pada bagian paling bawah dari HRSG yaitu superheater, dibagian atas nya adalah evaporator lalu ada economizer dan pada bagian paling atas merupakan preheater yang merupakan pemanasan awal dari feed water.

2.3 Perpindahan Panas

Energi kalor merupakan suatu energi yang berpindah akibat adanya perbedaan suhu. Energi panas bergerak dari ruang yang mempunyai suhu tinggi ke suhu yang rendah. Setiap benda atau massa memiliki energi dalam yang saling berhubungan dengan gerak acak dari atom-atom penyusun didalamnya. Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi itu kekal dan tidak dapat dirubah besarnya sepanjang waktu, memiliki nilai yang sama baik sebelum atau sesudah sesuatu terjadi [5]. Besaran energi akan selalu sama tetapi bentuknya dapat diubah. dalam hal ini perpindahan panas dapat melalui 3 cara, yaitu : Perpindahan panas secara konduksi, secara konveksi, dan secara radiasi.

3. Metode Penelitian

3.1. Deskripsi Penelitian

Analisa dilakukan terhadap perpindahan panas pada sistem dari HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) pada blok 1 unit 1 di PT. Indonesia Power Grati Pomu. Analisa dilakukan menggunakan parameter-parameter kinerja mesin pembangkit

3.2. Variabel Penelitian

3.3. Data Penelitian

1. Data Primer

Data ini berasal dari hasil penelitian dan observasi lapangan di PT. Indonesia Power Grati POMU yang diperoleh langsung dari CCR (*Central Control Room*)

2. Data sekunder

Data yang digunakan berasal dari hasil penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh pihak PT. Indonesia Power.

3.4. Prosedur Penelitian

1. Pengumpulan data
2. Menganalisa unjuk kerja *heat recovery steam generator*

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data

Tabel 1. Data observasi lapangan

Jenis Data	Beban	Temperatur				Tekanan	Massflow	
		T _{c,in}	T _{c,out}	T _{h,in}	T _{h,ot}	P4	m _c	m _h
	%	°C	°C	°C	°C	kPa	kg/s	kg/s
On-Design	75	50	507	561	101	105,2	52,1	322,5
Aktual	75	41,9	130,04	511,9	496,	104	31	322

Dimensi tabung penukar kalor:

$$D_i = 0,10 \text{ m}$$

$$D_o = 0,12 \text{ m}$$

$$L = 1,2 \text{ m}$$

$$S_T = 0,18 \text{ m}$$

4.2. Unjuk Kerja On-design *Heat Recovery Steam Generator*

1. Sifat-sifat fluida

Menentukan sifat-sifat fluida panas dan fluida dingin diperoleh dengan cara menginterpolasi menggunakan tabel properties, data yang digunakan yaitu rata-rata dari nilai pada setiap fluida sehingga didapatkan sifat-sifat fluida seperti ini.

- Fluida panas

$$k_g = 96,94 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\mu_g = 23,26 \times 10^{-6} \text{ kg/m.s}$$

$$Pr_g = 0,7$$

$$Cp_g = 9,69 \text{ kJ/kg.K}$$

- Fluida dingin

$$k_c = 577,4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\mu_c = 96,5 \times 10^{-6} \text{ kg/m.s}$$

$$Pr_c = 0,8745$$

$$Cp_c = 5,26 \text{ kJ/kg.K}$$

2. Laju kapasitas

- Fluida panas

$$C_h = \dot{m}_h \times Cp_h$$

$$= 322,5 \text{ kg/s} \times 9,69 \text{ kJ/kg.K}$$

$$= 3125,025 \text{ kJ/s.K}$$

- Fluida dingin

$$C_c = \dot{m}_c \times Cp_c$$

$$= 52,1 \text{ kg/s} \times 5,26 \text{ kJ/kg.K}$$

$$= 274,05 \text{ kJ/s.K}$$

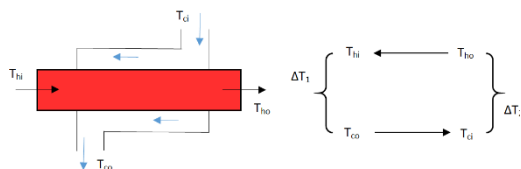
3. Luas permukaan

$$A = (\pi \cdot D \cdot L)$$

$$A_i = 3,14 \text{ m} \times 0,10 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} = 0,3768 \text{ m}^2$$

$$A_o = 3,14 \text{ m} \times 0,12 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} = ,4521 \text{ m}^2$$

4. Perbedaan temperature rata-rata (LMTD)



Gambar 3. Log Mean Temperature Different dengan arah aliran berlawanan (counter flow)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h.in} - T_{c.out}) - (T_{h.out} - T_{c.in})}{\ln \frac{(T_{h.in} - T_{c.out})}{(T_{h.out} - T_{c.in})}}$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(561^\circ\text{C} - 101^\circ\text{C}) - (507^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})}{\ln \frac{(561^\circ\text{C} - 101^\circ\text{C})}{(507^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})}}$$

$$\Delta T_{LMTD} = 428,6^\circ\text{C}$$

5. Koefisien perpindahan panas menyeluruh (U)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

Sebelum mendapatkan nilai U, diperlukan nilai-nilai sebagai berikut

- a. Koefisien perpindahan kalor bagian dalam pipa (h_i)

$$\bar{h}_i = \frac{m_c \cdot c_{pc} (T_{h.out} - T_{c.in})}{A_i \Delta T_{LMTD}}$$

$$\bar{h}_i = \frac{52,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 5,26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times (101^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C})}{0,3768 \text{ m}^2 \times 428,6^\circ\text{C}}$$

$$\bar{h}_i = 775,5 \text{ kJ/kg.K}$$

- b. Koefisien perpindahan kalor bagian luar pipa (h_o)

$$h_o = \frac{Nud \cdot k}{D_o}$$

mencari koefisien perpindahan kalor pada bagian luar pipa dipergunakan persamaan seperti di atas dengan mencari parameter” seperti berikut.

- Bilangan Reynold

Untuk menghitung kecepatan maksimal gas, digunakan persamaan:

$$V_{max} = \frac{S_T}{(S_T - D_o)} v$$

$$V_{max} = \frac{0,18 \text{ m}}{(0,18 \text{ m} - 0,12 \text{ m})} 1 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = 3 \text{ m/s}$$

Didapat bilangan Reynold sebagai berikut

$$Re = \frac{\rho_g \cdot V_{max} \cdot D_o}{\mu_h}$$

$$Re = \frac{(74,07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3 \text{ m/s} \times 0,12 \text{ m})}{23,26 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$Re = 1,15 \times 10^6$$

- Bilangan nusselt

$$Nu_d = C Re^m Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4}$$

$$Nu_d = 0,076 \times (1,15 \times 10^6)^{0,7} \times (0,7^{0,37}) \left(\frac{0,7}{0,7}\right)^{1/4}$$

$$Nu_d = 953,9$$

Didapat nilai h_o:

$$h_o = \frac{Nud \cdot k}{D_o}$$

$$h_o = \frac{953,9 \times 96,94 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K}}{0,12 \text{ m}}$$

$$h_o = 770,6 \text{ kJ/kg.K}$$

Sehingga didapat nilai h_o sebagai berikut.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

$$U = 167,92 \text{ kJ/kg.K}$$

6. Laju perpindahan panas

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LMTD}$$

$$q = 167,92 \text{ kJ/kg.K} \times 0,4521 \text{ m}^2 \times 428,6^\circ\text{C}$$

$$q = 32.537,9 \text{ kW}$$

7. Efektifitas

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

Dimana

$$q_{max} = C_{min} (T_{hi} - T_{ci})$$

Dalam penentuan nilai q max, Jika C_c < C_h maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$q_{max} = C_c (T_{h-i} - T_{c-i})$$

$$q_{max} = 274,05 \text{ kJ/s.K} (834 \text{ K} - 323 \text{ K})$$

$$q_{max} = 140037,51 \text{ kW}$$

Jadi, nilai efektifitas yang dihasilkan adalah

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

$$\epsilon = \frac{32.537,9 \text{ kW}}{140037,506 \text{ kW}}$$

$$\epsilon = 0,2323 = 23,23\%$$

8. Pressure drop

$$\Delta_p = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2$$

$$\Delta_p = 0,269 \frac{1,2 \text{ m}}{0,12 \text{ m}} \frac{1}{2} 755,86 \text{ kg/m}^3 \times 9 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta_p = 9149,7 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$$

4.3. Unjuk Kerja Aktual Heat Recovery Steam Generator

Untuk mengetahui unjuk kerja Aktual, dilakukan langkah-langkah perhitungan sama seperti on-design, tetapi menggunakan data actual yang ada pada tabel data dan didapat hasil sebagai berikut.

- Nilai rata-rata logaritmik (Δ_{LMTD}) = 416,8 °C
- Laju perpindahan panas (q) = 10.092,5 kW
- Efektifitas (ε) = 13,55 %
- Pressure drop (ΔP) = 9127,5 Pa

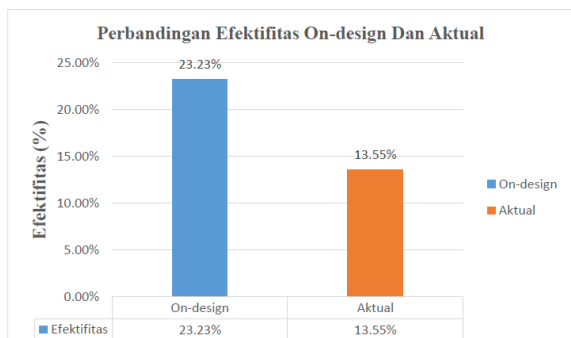
4.4. Analisa Unjuk Kerja On-design dan Aktual Heat recovery Steam Generator

Setelah didapat parameter-parameter yang diperlukan, selanjutnya kita bandingkan antara hasil dari on-design dengan kondisi actual. Nilai-nilai tersebut dirangkum menjadi satu dalam sebuah tabel.

Tabel 2. Perbandingan unjuk kerja on-design dan aktual heat recovery steam generator

Parameter	On-design	Aktual	Selisih	Satuan
	Value			
Nilai rata-rata	428,6	416,8	11,8	°C

logaritmi k (Δ_{LMTD})				
Laju perpindahan panas (q)	32.537,9	10.092,5	22.445,4	kW
Efektifitas (ϵ)	23,23	13,55	9,68	%
Pressure drop (ΔP)	9149,7	9127,5	21,46	Pascal

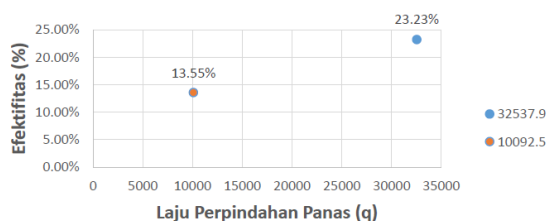


Gambar 4. Perbandingan efektifitas on-design dan aktual

Dari gambar 4 terjadi perbedaan nilai efektifitas yang sangat signifikan. Pada on-design efektifitas yang dihasilkan yaitu 23,23% dan kondisi aktual yaitu sebesar 13,55%. Penurunan nilai efektifitas tersebut sebesar 9,68%.

Faktor yang mempengaruhi penurunan dari sebuah efektifitas yang pertama adalah terdapat kotoran-kotoran yang terdapat pada sistem dari HRSG, kotoran-kotoran tersebut bisa berupa kerak-kerak pada dinding luasan perpindahan panas yang mengakibatkan tidak maksimalnya perpindahan panas yang terjadi. Berdasarkan persamaan 2.17, penurunan dari nilai efektifitas juga diakibatkan oleh nilai yang dihasilkan heat transfer yang terjadi dan q_{max} pada HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*).

Pengaruh Laju Perpindahan Panas On-design Dan Aktual Terhadap Efektifitas



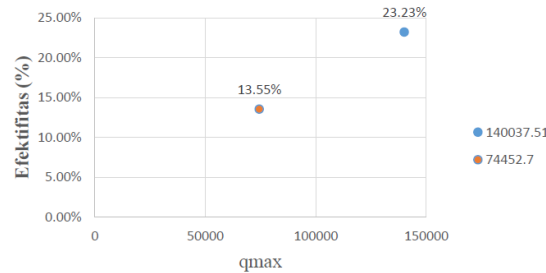
Gambar 5. Pengaruh heat transfer on-design dan aktual terhadap efektifitas

Dapat dijelaskan pada grafik perbandingan laju perpindahan kalor terhadap efektifitas, laju perpindahan kalor pada kondisi on-design dapat digambarkan pada point berwarna biru dengan nilai lebih besar yaitu 32.537,9 kW dan jika dibandingkan dengan kondisi aktual pada point berwarna merah yaitu 10.092,5 kW. Kecilnya hasil laju perpindahan

panas pada kondisi aktual yang mengakibatkan nilai efektifitas yang cukup rendah.

Hal tersebut disebabkan oleh parameter-parameter dari persamaan laju perpindahan panas seperti koefisien perpindahan kalor total dan nilai LMTD yang nilainya relatif kecil. Terutama pada koefisien perpindahan kalor total dimana bilangan pembagi pada persamaannya seperti koefisien perpindahan kalor dalam pipa dan koefisien perpindahan kalor luar pipa yang nilainya kurang.

Pengaruh Q_{max} On-design Dan Aktual Terhadap Efektifitas

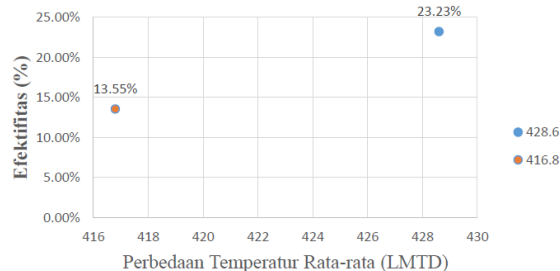


Gambar 6. pengaruh q_{max} on-design dan aktual terhadap efektifitas

Dapat dijelaskan pada grafik perbandingan q_{max} terhadap efektifitas diatas, q_{max} pada kondisi on-design dapat digambarkan pada point berwarna biru dengan nilai lebih besar yaitu 140.037,51 kW dan jika dibandingkan dengan kondisi aktual pada point berwarna merah nilainya lebih rendah yaitu sebesar 74.452,7 kW. Dengan demikian nilai efektifitas yang dihasilkan pada kondisi kecil juga disebabkan oleh nilai laju perpindahan panas yang juga relatif kecil meskipun q_{max} yang dihasilkan sudah lebih rendah dari kondisi on-design.

Dari gambar 5 menjelaskan semakin tinggi nilai heat transfer rate yang di hasilkan maka semakin tinggi juga nilai efektifitas yang dihasilkan. Dan dari gambar 6 menjelaskan semakin tinggi nilai q_{max} maka semakin rendah nilai efektifitas. Jika hal demikian terpenuhi maka terjadi peningkatan yang signifikan terhadap hasil dari efektifitas pada kondisi aktual.

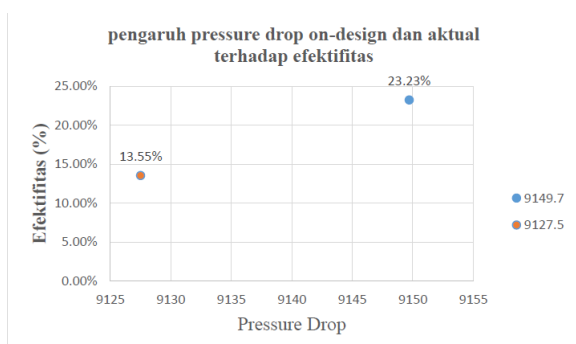
pengaruh LMTD on-design dan aktual terhadap efektifitas



Gambar 7. Pengaruh LMTD on-design dan aktual terhadap efektifitas

Pada gambar 7 menjelaskan LMTD sangat mempengaruhi performansi dari alat penukar panas.

Dimana nilai LMTD yang dihasilkan pada kondisi on-design dengan point yang berwarna biru sebesar 428,6 °C dan pada kondisi aktual dengan tanda point berwarna merah yaitu sebesar 416,8 °C, terdapat selisih sebesar 9,18 °C. Penyebab nilai dari LMTD relatif kecil yaitu pada fluida dingin dan fluida panas yang keluar dan masuk itu harus mendekati seperti pada data on-design, dan jika hal tersebut terpenuhi maka nilai LMTD yang dihasilkan juga dapat lebih besar. Dimana jika faktor-faktor pengali dari persamaan laju perpindahan panas nilai nya cukup tinggi mulai dari nilai LMTD itu sendiri dan koefisien perpindahan panas menyeluruh yang dihasilkan maka nilai laju perpindahan panas yang didapat juga semakin tinggi.



Gambar 8. Pengaruh pressure drop on-design dan aktual terhadap efektifitas

Dari gambar 8 terlihat adanya penurunan tekanan yang tidak terlalu signifikan terhadap efektifitas dari alat penukar panas. Pada kondisi on-design penurunan tekanan yang terjadi yaitu sebesar 9149,7 Pascal dan pada kondisi aktual terjadi penurunan tekanan sebesar 4127,5 Pascal, disini terdapat selisih sebesar 21,46 Pascal. Semakin tinggi *pressure drop* yang terjadi maka semakin berkurangnya nilai unjuk kerja dari alat penukar panas tersebut. *Pressure drop* yang dihasilkan pada kedua data menunjukkan terjadinya penurunan tekanan sebesar 10 %, hal tersebut masih dikategorikan aman.

5. Penutup

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah diselesaikan, analisa perpindahan panas pada alat HRSG adalah sebagai berikut:

1. Nilai LMTD yang dihasilkan oleh HRSG ini yaitu pada kondisi on-design sebesar 428,6 °C dan pada kondisi aktual sebesar 416,8 °C dengan selisih sebesar 11,8 °C
2. Laju Perpindahan panas yang dapat dihasilkan HRSG ini yaitu pada kondisi on-design sebesar 32.537,9 kW dan pada kondisi aktual sebesar 10.092,5 kW dengan selisihnya yaitu 22.445,4 kW.
3. Efektifitas yang didapat dari analisa ini yaitu pada kondisi on-design sebesar 23,23% dan pada kondisi aktual didapat sebesar 13,50% dengan selisih 9,68%.

4. *Pressure drop* yang terjadi pada kedua data yang dianalisa yaitu pada kondisi on-design sebesar 9149,7 Pascal dan pada kondisi aktual sebesar 9127,5 Pascal dengan selisih 21,46 Pascal.

5.2 Saran

Diperlukan saran agar penelitian kedepannya dapat berjalan dengan baik. Adapun beberapa saran yang dapat membantu antaralain yang pertama perlu dilakukan penelitian kedepannya apakah kondisi karakteristik material yang di gunakan pada HRSG itu sendiri berpengaruh terhadap unjuk kerjanya. Yang kedua penambahan *extended* sangat disarankan untuk menambah luas permukaan, hal ini mungkin berdampak cukup tinggi dengan nilai unjuk kerja yang dihasilkan.

Daftar Pustaka

- [1] Anson Elian, 2017, *Perancangan Termal Heat Recovery Steam Generator Sistem Tekanan Dua Tingkat Dengan Variasi Beban Gas Turbin*, Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Vol. 6, No. 1, ISSN: 2337-3539.
- [2] N. R.S. Janah, 2018, *Analisa Unjuk Kerja Heat Recovery Steam Generator (HRSG) dengan Menggunakan Pendekatan Porous Media di PLTGU*, Vol. 7, No. 1, pp. 84-88
- [3] K Ryanta Tanato, 2017, *Analisa Unjuk Kerja Alat Penukar Panas Amine Regenerator Reboiler Di Pt Pertamina Ep - Asset 2 - Prabumulih Field*, Jurnal Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Vol. 3, No. 2, pp. 88-93
- [4] Hendri, 2018, *Analisis Pengaruh Penurunan Temperatur LMTD Terhadap Unjuk Kerja HRSG pada PLTGU*, Vol. 6, No. 2, pp. 74-85
- [5] D. G. A. Darma Saputra, 2020, *Redesain Penukar Panas Ringkas Pada Heat Recovery Steam Generator Di PLTGU PT. Indonesia Power*, Jurnal Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Vol. 9, No. 2, ISSN 2302-5182

	<p>Gede Fedy Wardiana menyelesaikan studi sarjana Teknik Mesin di Universitas Udayana pada tahun 2017 sampai 2021. Menyelesaikan program studi sarjana dengan judul penelitian Analisa Unjuk Kerja Heat Recovery Steam Generator Pada Blok 1 Unit 1 PT. Indonesia Power Grati Pomu.</p>
<p>Topik penelitian yang diminati adalah bidang konversi energi khususnya perpindahan panas dan pembangkitan energy listrik</p>	

Auto Tuning PID Kontrol Pada Inkubator Bayi

I Putu Pasek Pradipta Rezkyasa, A.A.Adhi Suryawan, dan I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Buki, Jimbaran Bali

Abstrak

Kurangnya jaringan lemak dibawah kulit merupakan salah satu faktor bayi prematur mengalami keadaan hipotermia atau suhu tubuh yang rendah. Selain itu, inkubator bayi juga berguna agar bayi prematur terlindungi dari kontak langsung dengan lingkungan sekitarnya dikarenakan fungsi organ-organ pada bayi prematur belum sempurna. Untuk membuat inkubator bayi dalam keadaan yang ideal bagi bayi prematur, diperlukan suhu sekitar 33 sampai 35 derajat celcius dan kelembaban relatif sekitar 40% sampai 60% agar membantu bayi prematur mempertahankan suhu tubuhnya. Maka dari itu, diperlukan suatu sistem pengendalian otomatis yang dapat mengendalikan suhu dan kelembaban di dalam inkubator bayi agar penanganan bayi prematur dapat ditingkatkan dan mengurangi faktor kelalaian tenaga medis. Diperlukan mikrokontroler Arduino Mega 2560, Arduino Uno, Sensor LM35, Sensor DHT22 untuk mengontrol suhu dan kelembaban di dalam inkubator bayi. Diperoleh hasil pada penelitian prototipe inkubator bayi tanpa beban dan dengan beban 2 kg mencapai suhu kestabilan 34°C dan kelembaban 40% hingga 60% RH di dalam inkubator bayi. Menggunakan metode Auto Tuning PID kontrol pada pengujian tanpa beban, diperoleh nilai maximum overshoot (M_p) = 4,9111%, rata-rata sinyal error = 3,8666% dan mencapai keadaan steady state pada detik ke-1023. Pada pengujian dengan beban 2 kg, diperoleh nilai maximum overshoot (M_p) = 3,6317%, rata-rata sinyal error = 2,3696% dan mencapai keadaan steady state pada detik ke-5924.

Kata kunci : Arduino Mega 2560; Arduino Uno; Sensor LM35; Sensor DHT22

Abstract

Lack of fatty tissue under the skin is one of the factors in premature babies experiencing hypothermia or low body temperature. In addition, baby incubators are also useful so that premature babies are protected from direct contact with the surrounding environment because the function of the organs in premature babies is not yet perfect. To make a baby incubator in ideal conditions for premature babies, it requires a temperature of 33 to 35 degrees Celsius and a relative humidity of about 40% to 60% to help premature babies maintain their body temperature. Therefore, we need an automatic control system that can control the temperature and humidity in the infant incubator so that the handling of premature babies can be improved and reduce the negligence factor of medical personnel. An Arduino Mega 2560 microcontroller, Arduino Uno, LM35 sensor, DHT22 sensor is required to control the temperature and humidity in the baby incubator. The results obtained from the research on the prototype of a baby incubator without load and with a load of 2 kg reached a stable temperature of 34 danC and humidity of 40% to 60% RH in the infant incubator. Using the Auto Tuning PID control method on the no-load test, the maximum overshoot value (M_p) = 4.9111%, the average error signal = 3.8666% and reaches a steady state at 1023 seconds. In the test with a load of 2 kg, the maximum overshoot value (M_p) was obtained = 3.6317%, the average error signal = 2.3696% and reached a steady state at 5924 seconds.

Keywords: Arduino Mega 2560; Arduino Uno; LM35 Sensor; DHT22 Sensor

1. Pendahuluan

Kurangnya jaringan lemak dibawah kulit merupakan salah satu faktor bayi prematur mengalami keadaan hipotermia atau suhu tubuh yang rendah. Selain itu, inkubator bayi juga berguna agar bayi prematur terlindungi dari kontak langsung dengan lingkungan sekitarnya dikarenakan fungsi organ-organ pada bayi prematur belum sempurna. Untuk membuat inkubator bayi dalam keadaan yang ideal bagi bayi prematur, diperlukan suhu sekitar 33 sampai 35 derajat celcius dan kelembaban relatif sekitar 40% sampai 60% agar membantu bayi prematur mempertahankan suhu tubuhnya [1]. Banyak daerah di Indonesia, khususnya di daerah-daerah pedesaan masih banyak menggunakan inkubator yang sistemnya masih manual. Inkubator manual sangat beresiko bagi bayi karena banyak faktor, terutama kelalaian yang membahayakan bayi

di dalam inkubator. Kasus yang sering terjadi adalah perawat atau tenaga medis lalai dalam memantau dan mengatur temperatur inkubator sehingga suhu di dalam inkubator tidak sesuai dengan kebutuhan bayi. Maka dari itu, diperlukan suatu sistem pengendalian otomatis yang dapat mengendalikan suhu dan kelembaban di dalam inkubator bayi agar penanganan bayi prematur dapat ditingkatkan dan mengurangi faktor kelalaian tenaga medis.

Beberapa permasalahan yang akan diteliti meliputi:

1. Bagaimana merancang auto tuning PID kontrol pada inkubator bayi memiliki signal error $\leq 5\%$?
2. Bagaimana merancang auto tuning PID kontrol pada inkubator bayi memiliki M_p (Maximum overshoot) $\leq 5\%$?

3. Bagaimana merancang auto tuning PID kontrol untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan mencapai sinyal kestabilan?

Sebagai batasan penelitian kali ini meliputi:

1. Kondisi suhu set point pada inkubator bayi 34° C dan kelembaban 40-60% RH.
2. Pengontrolan suhu dilakukan dalam keadaan steady state.
3. Bayi yang digunakan merupakan bayi tiruan dengan beban 2 kg diasumsikan mampu mewakili keadaan bayi yang sebenarnya.
4. Tidak menganalisa perpindahan panas pada inkubator bayi.
5. Posisi sensor berada pada 15 cm dari bidang depan inkubator, dari bidang samping 12 cm, kemudian sensor suhu diletakkan 30 cm di atas dari posisi bayi.

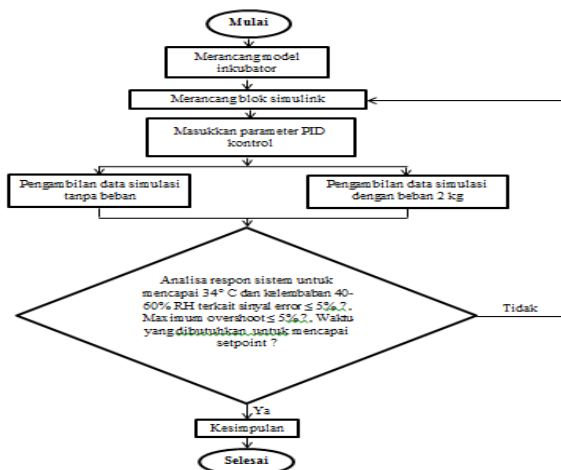
2. Dasar Teori

Penelitian kali ini, dilakukan pemodelan inkubator dengan mikrokontroler Arduino Mega 2560 dan 2 mikrokontroler Arduino Uno yang terintegrasi satu sama lain dengan bantuan filter yang terbuat dari *Electrolite Condensor* 22 μF, 25 volt yang dirangkai menjadi satu kesatuan dengan *Resistor* 2 kilo ohm. Penerapan *auto tuning* PID kontrol dibantu dengan *software Matlab/Simulink*. Agar didapat suhu yang stabil yaitu 34° C dan kelembaban 40-60% RH diperlukan *prototype* inkubator dengan mikrokontroler Arduino. Pemilihan *gain* dari PID secara *Trial* yang tidak tepat akan mempengaruhi temperatur sebagai luaran dari sistem inkubator.

Peralatan-peralatan berikut yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Sebuah laptop
2. *Software MATLAB/Simulink*
3. Termometer
4. Inkubator bayi
5. Mikrokontroler Arduino Mega
6. Mikrokontroler Arduino Uno

3. Metode Penelitian



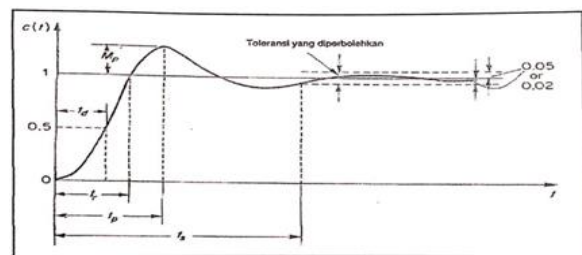
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Parameter-parameter berikut digunakan dalam menentukan karakteristik respon transient pada suatu sistem kontrol [2]:

1. *Delay Time* (t_d) adalah waktu yang ditempuh respon transient untuk mencapai setengah dari nilai target.
2. *Rise Time* (t_r) adalah waktu yang ditempuh respon transient dari 0% hingga 100% dari nilai targetnya.
3. *Peak Time* (t_p) adalah waktu yang ditempuh respon transient untuk mencapai puncak lewatan pada kali pertama.
4. *Maximum Overshoot* (M_p) adalah nilai puncak maximum yang diukur dari kurva respon transient. Apabila nilai puncak maximum tidak sama dengan satu, dapat digunakan *Maximum Percentage Overshoot* seperti dibawah ini:

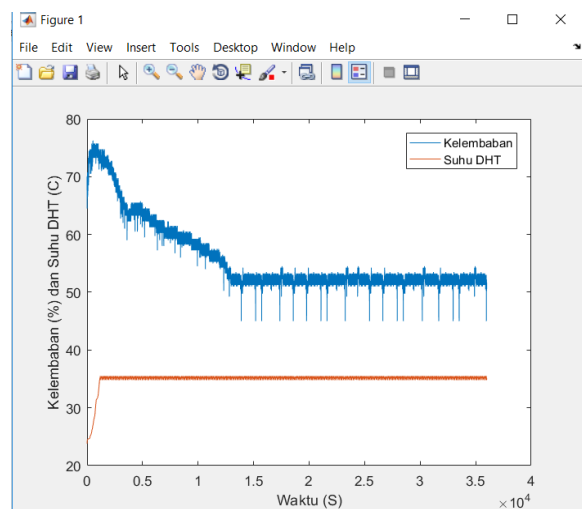
$$\text{Maximum percentase overshoot} = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \times 100 \quad (1)$$

5. *Settling Time* (t_s) dapat diartikan sebagai waktu yang diperlukan kurva respon transient untuk mencapai dan stabil disekitar nilai akhir. *Settling Time* juga dapat diartikan sebagai waktu penetapan yang terkait dengan konstanta waktu terbesar pada suatu sistem kontrol.

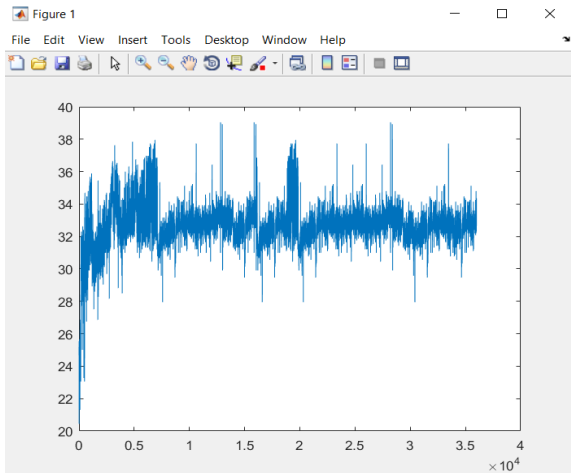


Gambar 2. Karakteristik *response transient*

4. Hasil dan Pembahasan



Gambar 3. Grafik kelembaban dan suhu DHT pada simulasi tanpa beban



Gambar 4. Grafik rata-rata suhu sensor LM35 pada simulasi tanpa beban

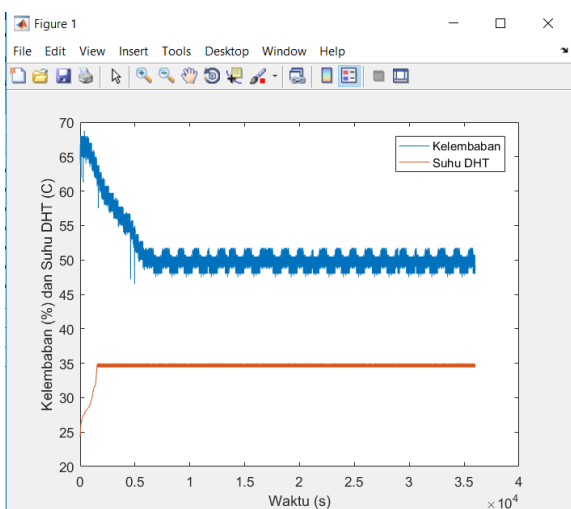
Berdasarkan data yang diperoleh, maka dapat di jelaskan dalam parameter-parameter berikut :

1. Delay time (waktu tunda), $t_d = 325$ sekon
2. Rise time (waktu naik), $t_r = 649$ sekon
3. Peak time (waktu puncak), $t_p = 1009$ sekon
4. Maximum overshoot,

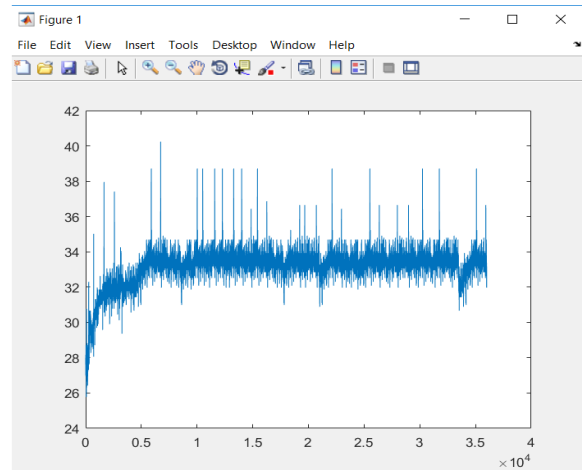
$$Mp = \frac{PV-SV}{SV} \times 100\% = \frac{35,6697998-34}{34} \times 100\% = 4,9111\%$$
5. Settling time, $t_s = 1023$ sekon
6. Sinyal error rata-rata \bar{e}

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{PV-SP}{SP} \times 100\% = \frac{47327,68903}{36000} = \frac{1,314658}{34} \times 100\% = 3,8666\%$$

Berikut adalah data dari pengujian inkubator bayi dengan simulasi beban 2 kg :



Gambar 5. Grafik kelembaban dan suhu DHT pada simulasi dengan beban 2 kg



Gambar 6. Grafik rata-rata suhu sensor LM35 pada simulasi dengan beban 2 kg

Berdasarkan data yang diperoleh, maka dapat di jelaskan dalam parameter-parameter berikut :

1. Delay time (waktu tunda), $t_d = 1591$ sekon
2. Rise time (waktu naik), $t_r = 3182$ sekon
3. Peak time (waktu puncak), $t_p = 5891$ sekon
4. Maximum overshoot,

$$Mp = \frac{PV-SV}{SV} \times 100\% = \frac{35,23480225-34}{34} \times 100\% = 3,6317\%$$
5. Settling time, $t_s = 5924$ sekon
6. Sinyal error rata-rata \bar{e}

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{PV-SP}{SP} \times 100\% = \frac{29004,07}{36000} = \frac{0,8056686}{34} \times 100\% = 2,3696\%$$

5. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan menambahkan kontrol PID sesuai dengan metode auto tuning pada model Simulink/MATLAB, didapat nilai rata-rata sinyal error $\bar{e} = 3,8666\%$ pada pengujian inkubator bayi tanpa beban dan rata-rata sinyal error $\bar{e} = 2,3696\%$ pada pengujian inkubator bayi dengan pemberian beban 2 kg.
2. Dengan menambahkan kontrol PID sesuai dengan metode auto tuning pada model Simulink/MATLAB, didapat nilai Mp (*Maximum Overshoot*) = 4,9111% pada pengujian inkubator tanpa beban sedangkan nilai MP (*Maximum Overshoot*) = 3,6317% pada pengujian inkubator bayi dengan pemberian beban 2 kg.
3. Dengan menambahkan kontrol PID sistem mencapai keadaan (*settling time*), t_s pada

detik ke-1023 saat pengujian *prototype incubator* tanpa beban, kemudian pada pengujian *prototype incubator* dengan beban 2 kg, keadaan *settling time* dicapai pada detik ke-5924.

Daftar Pustaka

- [1] Lapono, L., 2016, *Sistem Pengontrolan Suhu Dan Kelembaban Pada Inkubator Bayi. Jurnal Fisika : Fisika Sains dan Aplikasinya*, 1, 1 (Apr. 2016), 12-17.
- [2] Ogata, Katsuhiko, 1996, *Teknik Kontrol Automatik*. Jakarta : Erlangga.



I Putu Pasek Pradipta Rezkyasa menuntaskan program sarjananya di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana dari tahun 2013 hingga 2021. Topik penelitian yang diambil dalam menyelesaikan studinya berjudul Auto Tuning PID Kontrol Pada Inkubator Bayi.

Topik yang diminati diantaranya yang berkaitan dengan Robotika dan Sistem Kontrol Otomatis.

Studi Efisiensi Pembakaran Pada Pembakaran *Fluidized Bed* Limbah Medis

Febyoga Pratama Ginting, I Nyoman Suprpta Winaya, I Putu Lokantara
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Limbah medis merupakan limbah infeksius, sehingga perlu dilakukan pengelolaan limbah medis untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh limbah medis tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi limbah medis dengan menggunakan teknologi pembakaran *fluidized bed* untuk menghitung efisiensi pembakarannya. Pembakaran *fluidized bed* merupakan teknologi yang mampu mereduksi limbah medis menjadi abu serta memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi. Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan studi eksperimental untuk mengetahui pengaruh jenis partikel *bed material* (pasir silika, pasir alumina, dan pasir zeolit) terhadap efisiensi pembakaran pada pembakaran *fluidized bed*. Hasil penelitian ini menunjukkan pembakaran dari ketiga variasi *bed material* dengan ukuran diameter *bed material* 0,5 mm, pasir silika merupakan *bed material* yang memiliki efisiensi pembakaran tertinggi sebesar 96,73 %.

Kata Kunci : Efisiensi, Limbah Medis, Fluidized Bed, Pembakaran

Abstract

Medical waste is infectious waste, so it is necessary to manage medical waste to reduce the negative impact caused by medical waste. This study aims to reduce medical waste by using fluidized bed combustion technology to calculate its combustion efficiency. Fluidized bed combustion is a technology that is able to reduce medical waste to ash and has a high combustion efficiency. This study was conducted by applying experimental studies to determine the influence of bed material particles (silica sand, alumina sand, and zeolite sand) on combustion efficiency in fluidized bed combustion. The result of this study showed the combustion of the three variations of bed material with a diameter of bed material 0,5 mm, silica sand is a bed material that has the highest combustion efficiency of 96,73 %.

Keywords : Efficiency, Medical Waste, Fluidized Bed, Combustion

1. Pendahuluan

Limbah medis adalah limbah yang dihasilkan oleh institusi medis seperti rumah sakit, klinik, dan laboratorium). Limbah medis dikategorikan ke dalam limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) dengan kode limbah A337-1 karena memiliki karakteristik infeksius, sehingga pengolahan limbah medis yang tidak tepat dapat menyebabkan penyakit infeksi serta cedera di tempat kerja [1]. *Fluidized bed combustion* merupakan proses pembakaran dengan efisiensi pembakaran yang tinggi, sehingga dapat dicapai dengan rasio udara berlebih yang lebih rendah dan temperatur yang lebih rendah, serta memenuhi persyaratan pengolahan limbah medis [2]. Masalah utamanya adalah TPA limbah medis akan menyebabkan pencemaran lingkungan dan menimbulkan penyakit.

Dari beberapa teknologi pengelolaan limbah medis, teknologi pembakaran *fluidized bed* adalah pilihan yang tepat untuk diandalkan saat ini. Dimana pembakaran *fluidized bed* dapat mengurangi limbah infeksius menjadi abu yang tidak dapat dikenali serta dapat mengurangi penimbunan sampah [3]. Namun kekurangan dari proses insinerasi limbah medis adalah menghasilkan gas beracun yang dapat merusak atmosfer seperti dioksin, furan, PAH [4,5]. Silika merupakan pasir yang memiliki kemampuan hidrofobik yang stabil [6].

Oleh karena itu, dalam penelitian ini penulis menguji pengaruh jenis partikel *bed material* terhadap efisiensi pembakaran pada pembakaran *fluidized bed*.

Berdasarkan latar belakang diatas maka rumusan masalah yang diambil dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh jenis partikel *bed material* terhadap efisiensi pembakaran pada pembakaran *fluidized bed* ?

Beberapa batasan masalah yang ditetapkan dalam penelitian antara lain : reaktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor unggun terfluidisasi; jenis partikel *bed material* yang digunakan adalah pasir silika, pasir alumina dan pasir zeolit; limbah medis mengacu pada limbah medis padat bukan logam, seperti; masker, kain kasa, spuit, botol dan selang infus; temperatur operasi pembakaran 650°C; ukuran *bed material* yang digunakan 0,5 mm.

2. Metode Penelitian

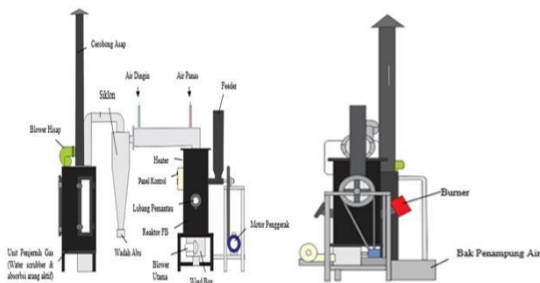
Dalam penelitian ini material yang digunakan berupa limbah medis padat bukan logam dengan berbagai partikel *bed material*, bahan bakar yang digunakan akan dicacah dan kemudian dimasukkan kedalam ruang pembakaran. Pencacahan dilakukan dengan memotong limbah medis padat non logam menjadi potongan-potongan kecil dan dilakukan proses pengeringan terlebih dahulu. Limbah

medis yang telah dicacah dimasukkan ke dalam ruang pembakaran melalui *feeder*, yang akan digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran *fluidized bed*.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. *Flow meter* : 1 buah
2. *Burner* : 1 buah
3. *Heater* : 3 buah
4. *Blower* : 3 buah
5. *Thermocouple* : 3 buah
6. *Thermostart* : 1 buah
7. *Water Scrubber* : 1 buah
8. *Gas Analyzer* : 1 buah

Penelitian dilakukan pada prototipe unit *fluidized bed combustion* (FBC) yang dirancang untuk menguji limbah medis di laboratorium. Diagram skema unit FBC yang akan dirancang dan alat ukur yang digunakan ditunjukkan pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1 Skematik Reaktor *Fluidized Bed Combustion*

Langkah-langkah pengujiannya adalah sebagai berikut :

1. Siapkan semua alat pengujian dan pastikan area pengujian bersih dan tidak ada asap di udara sekitar alat FBC.
2. Menguji karakteristik limbah medis.
3. Masukkan *bed material*.
4. Gunakan *blower* untuk menghembuskan udara dari dasar reaktor melalui nosel yang ada sampai *bed material* benar-benar terfluidisasi dengan baik.
5. Hidupkan burner untuk memanaskan *bed material* dalam reaktor hingga temperatur operasi mencapai 650°C.
6. Masukkan bahan bakar limbah medis yang telah dipotong-potong ke dalam ruang bakar, dimana telah ditentukan berat dan komposisinya.
7. Setelah pembakaran selesai dilakukan, hitung energi panas yang masuk dan energi panas yang keluar.
8. Kemudian hitung efisiensi pembakaran dari masing-masing jenis partikel *bed material*.
9. Gunakan pasir silika, pasir alumina, dan

pasir zeolit untuk poin pertama hingga poin delapan dalam penelitian.

10. Kesimpulan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Karakteristik Limbah Medis

Tujuan pengujian karakteristik limbah medis adalah untuk mengetahui kandungan bahan bakar limbah medis yang akan digunakan dalam penelitian ini. Pengujian karakteristik limbah medis memerlukan 4 jenis pengujian, yaitu : analisis *proximate*, analisis *ultimate*, analisis nilai kalor, dan analisis *thermogravimetri* (TGA). Analisis *proximate* bertujuan untuk mengetahui kadar air, bahan mudah menguap, karbon tetap dan abu dari limbah medis.

Tabel 1 Hasil Uji *Proximate*

Bahan Bakar	Kadar	Zat	Karbon	Kadar
	Air (%)	Volatil (%)	Tetap (%)	Abu (%)
Limbah Medis	0,54	95,67	0,41	3,38

Analisis *ultimate* merupakan pengujian yang digunakan untuk mengetahui kandungan unsur kimia dalam limbah medis.

Tabel 2 Hasil Uji *Ultimate*

Bahan Bakar	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
	Limbah Medis	47,54	7,99	18,54	2,02

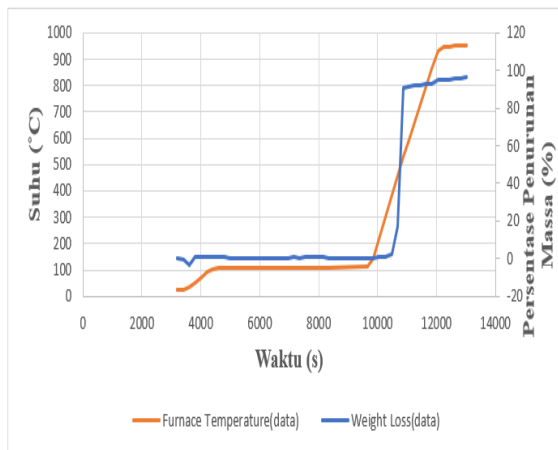
Analisis nilai kalor digunakan untuk mengetahui energi panas yang dilepaskan per satuan masa bahan bakar.

Tabel 3 Hasil Uji Nilai Kalor

Bahan Bakar	Berat Sampel 1 (gram)	Nilai Kalor Sampel Limbah Medis			
		Suhu (ΔT_2)		Nilai Kalor (Q_c)	
		T1 (°C)	T2 (°C)	Sampel (Cal/gr)	(MJ/gr)
Limbah Medis I	0,52389	30,569	33,104	8799,120	38,1474515
Limbah Medis II	0,52534	30,492	33,210	9423,604	

Thermo gravimetric analysis (TGA) adalah

pengujian yang digunakan untuk mengetahui perubahan sifat fisik dan kimia dari limbah medis dengan meningkatnya suhu.

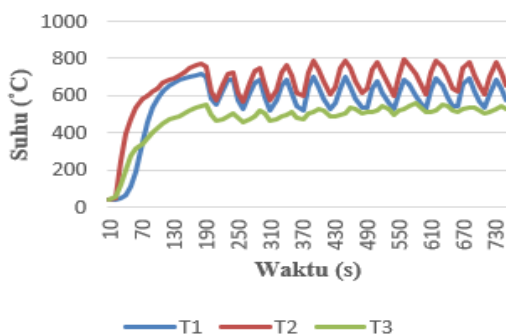


Gambar 2 Uji TGA Limbah Medis

Berdasarkan gambar grafik, hasil uji TGA di atas menunjukkan bahwa kualitas limbah medis berkurang pada suhu 200-800°C. bersamaan dengan itu, pada suhu 100°C akan terjadi proses pengeringan atau pengurangan kadar air dari limbah medis.

3.2 Grafik Distribusi Temperatur Pembakaran Bed Material Pasir Silika

Dalam pengujian ini, didapat suhu operasi reaktor (T_1 , T_2 , dan T_3) yang dibaca menggunakan termokopel yang dipasang secara vertikal dari atas ke bawah pada sisi reaktor. Dimana T_1 terdapat pada 10 cm diatas *bed material*, T_2 berjarak 10 cm diatas T_1 , dan T_3 berjarak 10 cm diatas T_2 . Berikut merupakan profil temperatur pembakaran limbah medis dari pembakaran *bed material* pasir silika yang terdapat pada gambar 3 di bawah ini :



Gambar 3 Grafik Distribusi Temperatur Pembakaran Pasir Silika

3.3 Efisiensi Pembakaran Bed Material

Efisiensi pembakaran dihitung dengan

membandingkan kalor masuk dalam proses pembakaran dengan kalor yang keluar dalam proses pembakaran. Dimana efisiensi akan menunjukkan seberapa besar kalor yang dipergunakan dalam proses pembakaran.

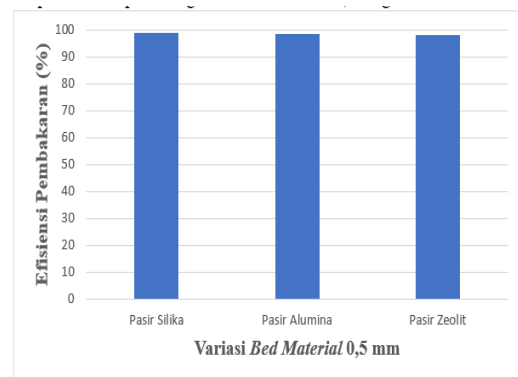
Dimana rumus efisiensi sebagai berikut :

$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \%$$

Tabel 4 Efisiensi Pembakaran

Variasi Bed Material (0,5 mm)	Q_{in} (MJ/s)	Q_{loss} (MJ/s)	Efisiensi Pembakaran (%)
Pasir Silika	55,5775	0,62356	98,87
Pasir Alumina	81,4975	1,31630	98,38
Pasir Zeolit	59,5195	1,05738	98,22

Dari data yang diperoleh sesuai dengan Tabel 4, maka diperoleh hasil efisiensi pembakaran pada masing-masing jenis partikel *bed material*. Hasil data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut :



Gambar 4 Diagram Efisiensi Pembakaran

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan pada pengaruh jenis partikel *bed material* terhadap efisiensi pembakaran pada pembakaran *fluidized bed* dapat disimpulkan bahwa :

- Pasir silika merupakan pasir yang memiliki efisiensi tertinggi pada suhu pembakaran 650°C yaitu sebesar 98,87 %. Sedangkan pada pasir alumina dan pasir zeolit secara berurutan sebesar 98,38 %, 98,22 %.

Daftar Pustaka

[1] Hossain, M. S., Santhanam, A., Nik

- Norulaini, N. A., & Omar, A. K. M., 2011, *Clinical solid waste management practices and its impact on human health and environment - A review*. Waste Management, 31(4), 754–766.
- [2] Duan, F., Wan, H., Han, Y., Chyang, C., Chen, H., & Tso, J., 2012, *Characteristics of fluidized bed combustion with intermittent feeding using woodblocks and rubber*. 2. Pollutant emissions. Energy and Fuels, 26(9).
- [3] Lee, C. C., & Huffman, G. L., 1996, *Medical waste management / incineration*. Journal of Hazardous Materials, 48(1-3), 1-30.
- [4] Schecter, A., Birnbaum, L., Ryan, J. J., & Constable, J. D., 2006, *Dioxins: An overview*. Environmental Research, 101(3), 419 - 428
- [5] Insa, E., Zamorano, M., & López, R., 2010, *Critical review of medical waste legislation in Spain. Resources, Conservation and Recycling*, 54(12),1048–1059.
- [6] Kobayashi, J., Kawamoto, K., & Kobayashi, N., 2019, *Effect of porous silica on the removal of tar components generated from waste biomass during catalytic reforming*. Fuel Processing Technology, 194(June), 106104.



Febyoga Pratama Ginting
menyelesaikan studi S1 di
Universitas Udayana, Program
Studi Teknik Mesin, Tahun
2021.

Konversi energi merupakan bidang penelitian yang
menjadi konsentrasi pada penelitian ini