

ISSN 2302 – 5182



TEKNIK DESAIN MEKANIKA

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin

Volume 14 • Nomor 1 • JANUARI • 2025 • Hal. 1 - 106

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 14

Nomor 1

Hal. 1 - 106

Badung, Januari 2025

ISSN 2302-5182

TEKNIK DESAIN MEKANIKA

Jurnal Ilmiah Teknik Mesin



Volume 14, Nomor 1, Januari 2025, Hal. 1 – 106

Penanggung Jawab

Koordinator Program Studi Teknik Mesin UNUD

Ketua Dewan Redaksi

Dr. I Made Astika, S.T., M.Erg., M.T.

Redaksi Pelaksana/Tim Validasi

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

Dr. Eng. Made Gatot Karohika, S.T., M.T.

Dr. I Made Parwata, S.T., M.T.

Ketut Astawa, S.T., M.T.

I Wayan Arya Darma, S.T, M.T.

I Gusti Ngurah Putu Tenaya, S.T., M.T.

Dr. Dewa Ngakan Ketut Putra Negara, S.T., M.Sc.

Ir. I Nengah Suarnadwipa, M.T.

I Putu Angga Yuda Pratama, S.T., M.T.

I

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 14 Nomor 1, Januari 2025 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 14 Nomor 1 ini, disajikan 18 artikel, dalam berbagai topik meliputi komposit, material, bahan bakar, sistem bahan bakar, gasifikasi, carbon aktif, dan sistem kontrol.

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 14 • Nomor 1 • Januari 2025 • Hal. 1 – 106

Daftar Isi

Pengaruh Fraksi Massa Terhadap Kekuatan Bending Dan Daya Serap Air Komposit Partikel Kayu Bayur Dengan Matriks Epoxy Averio Alvarez, C.I.P.K Kencanawati, D.N.K Putra Negara	1 - 6
Sintesis Katalis Platina-Titanium Dioksida Dengan Substitusi <i>Reduced Graphene Oxide</i> Dan Karakterisasinya Menggunakan Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i> B. Gde Edy Triana Adi Jaya, Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	7 - 11
Analisa Pengaruh Variasi Transmisi Dan Beban Penumpang Terhadap Konsumsi Energi Sepeda Motor Listrik Konversi Pada Kondisi Jalan Menanjak I Ketut Mariata, I Made Widiyarta, I Wayan Arya Darma	12 - 17
Sintesis Katalis Berbasis Platina Didukung <i>Reduced Graphene Oxide</i> Dan Karakterisasinya Menggunakan Pengujian <i>Cyclic Voltammetry</i> Komang Gede Darmayasa, I Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	18 - 21
Pengaruh Suhu Karbonisasi Terhadap Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif Tempurung Kelapa Dalam Penyimpanan Biogas Abed Nego Ersan, Ketut Astawa, Made Sucipta	22 - 25
Karakteristik Penyimpanan Biogas Menggunakan Karbon Aktif Tempurung Kelapa Dengan Variasi Waktu Aktivasi <i>Microwave</i> I Gusti Agung Putu Denny Putra Wardinatha, Ketut Astawa, Made Sucipta	26 - 29
Pemanfaatan Karbon Aktif Tempurung Kelapa Sebagai Adsorben Untuk Penyimpanan Biogas Dengan Variasi Daya Aktivasi I Nyoman Aditya Bismadiatmika Darma, Ketut Astawa, Made Sucipta	30 - 33
Perancangan Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Sistem Turbin Uap Dengan Fluida Kerja Refrigerant-134A Fadhil Anam, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, I Wayan Bandem Adnyana	34 - 43
Sintesis Katalis Platina Didukung <i>Vulcan XC 72 - Reduced Graphene Oxide</i> Dalam Aplikasi PEMFC dan Karakterisasi Elektrokimia dengan <i>Cyclic Voltammetry</i> Made Edwin Wismaya, I Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	44 - 48
Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Parallel Flow Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer Tegar Ramadhan, Hendra Wijaksana, dan I Gede Teddy Prananda Surya	49 - 55
Pabrikasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> Menggunakan Metode <i>Decal Transfer</i> dengan Variasi Ketebalan Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung <i>Vulcan XC-72</i> Luh Ary Putri Manik, I Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	56 - 61

Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Counter Flow dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer Fikri Nur Rohman, Hendra Wijaksana dan I Gede Teddy Prananda Surya	62 - 68
Analisis Kekuatan Tarik Komposit Berbasis Serat Daun Nanas Dengan Variasi Fraksi Volume dalam Matriks Epoxy-Polyester Basten Munthe, Dewa Ngakan Putra Negara, Cok Istri Putri Kusuma Kencanawati	69 - 74
Pabrikasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> Menggunakan Metode <i>Decal Transfer</i> Dengan Katalis Platina Didukung Karbon Dan Variasi Ketebalan Pande Nyoman Agus Adnyana, I Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	75 - 80
Pabrikasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> Menggunakan Metode <i>Decal Transfer</i> Dengan Variasi Suhu <i>Hot Press</i> Terhadap Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung Vulcan XC-72 Ilham Fauzi, Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	81 - 85
Karakteristik <i>Cyclic Voltammetry</i> Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung Vulcan XC 72 - <i>Reduced Graphene Oxide</i> Dengan Variasi Perbandingan Massa Dewa Made Dwi Adnyana Putra, I Made Joni, Made Suarda, Ketut Astawa, Made Sucipta	86 - 92
Pengaruh Penambahan Biodiesel Pada Pertamina Dex Terhadap Nilai Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Mesin Genset Diesel 3000 Watt Dino Suryadi Munthe, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma dan Ketut Asatawa	93 - 100
Studi Eksperimental Karakteristik Perubahan Energi Potensial pada Material Karbon Aktif Bambu Betung Sebagai Material Pad Alternatif Fikry Sapisandi, Hendra Wijaksana, Teddy Prananda Surya	101 - 106

Pengaruh Fraksi Massa Terhadap Kekuatan Bending Dan Daya Serap Air Komposit Partikel Kayu Bayur Dengan Matriks Epoxy

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

Abstrak

Salah satu upaya dalam mengefisienkan material komposit adalah dengan menemukan inovasi terbaru, lebih murah, lebih bermanfaat dan lebih sedikit menyebabkan polusi. Salah satu material alam yang dapat dijadikan material komposit adalah partikel kayu bayur dengan matriks resin epoxy. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi fraksi massa partikel kayu bayur dan resin epoxy terhadap kekuatan bending dan kekuatan daya serap air. Pengujian yang dilakukan terhadap specimen adalah uji bending (ASTM D790-03 dan uji daya serap air (D570-98). Hasil pengujian bending menunjukkan tegangan bending tertinggi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata 133,47 MPa dan nilai tegangan bending terendah pada fraksi massa 15% : 85% dengan nilai rata-rata 83,94 MPa. Nilai regangan bending tertinggi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata 0,0185 mm dan nilai regangan bending terendah pada fraksi massa 15% : 85% dengan nilai rata-rata 0,0139 mm. Nilai modulus elastisitas bending tertinggi pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata 7928,72 MPa dan nilai modulus elastisitas terendah pada fraksi massa 15% : 95% dengan nilai rata-rata 6817,99 MPa. Pada pengujian daya serap air mendapatkan nilai tertinggi 1,19% pada fraksi massa 15% : 85% dan nilai daya serap air terendah pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata 0,65%.

Kata kunci: partikel kayu bayur, papan partikel, uji lentur, uji bending, uji serap air, epoxy

Abstract

One effort to make composite materials more efficient is to find the latest innovations, which are cheaper, more useful, and cause less pollution. One natural material that can be used as a composite material is bayur wood particles with an epoxy resin matrix. This research aims to determine the effect of variations in the mass fraction of bayur wood particles and epoxy resin on bending strength and water absorption strength. The tests carried out on the specimens were the bending test (ASTM D790-03 and the water absorption test (D570-98). The bending test results showed the highest bending stress at a mass fraction of 5%: 95% with an average value of 133.47 MPa and a stress value of the lowest bending was at a mass fraction of 15%: 85% with an average value of 83.94 MPa. The highest bending strain value was at a mass fraction of 5%: 95% with an average value of 0.0185 mm and the lowest bending strain value was at a mass fraction of 15%: 85% with an average value of 0.0139 mm. The highest bending elastic modulus value is at a mass fraction of 5%: 95% with an average value of 7928.72 MPa and the lowest elastic modulus value is at a mass fraction of 15%: 95% with an average value. -average 6817.99 MPa. In the water absorption test, the highest value was 1.19% at a mass fraction of 15%: 85% and the lowest water absorption value was at a mass fraction of 5%: 95% with an average value of 0.65%.

Keyword : bayur wood particles, particle board, bending test, bending test, water absorption test, epoxy

1. Pendahuluan

Material komposit mempunyai sifat-sifat yang khusus diantaranya adalah, kekuatan, kekakuan, ringan, tidak korosi dan usia fatik yang lebih baik dibandingkan dengan bahan konvensional lain. Seiring berkembangnya teknologi dan inovasi yang terus dilakukan dalam bidang material serat alam dijadikan sebagai bahan penguat komposit. Material komposit umumnya diperkuat menggunakan serat, dimana serat tersebut sangat mempengaruhi dan menentukan kekuatan dari komposit. Bahan serat tersebut dapat diperoleh dari bahan alam dan non alam (Manurung, dkk. 2020)

Salah satu upaya dalam mengefisienkan material komposit adalah dengan menemukan inovasi terbaru, lebih murah, lebih bermanfaat dan lebih sedikit menyebabkan polusi. Salah satu material alam yang dapat dijadikan material komposit adalah partikel kayu. Masih banyak masyarakat yang belum mengetahui bahwa serbuk dari kayu limbah dari pemotongan bisa dijadikan material yang memiliki nilai ekonomis lebih sebagai material yang baik untuk dijadikan bahan dasar dalam kebutuhan rumah

tangga. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan komposit dengan menggunakan serbuk kayu bayur dengan matriks resin epoxy sebagai perekat. Nantinya komposit dari perpaduan serbuk kayu bayur dan resin epoxy diharapkan mampu menjadikan material limbah yang memiliki nilai ekonomis lebih sebagai bahan pengganti untuk pembuatan furniture.

2. Landasan Teori

2.1 Komposit

Secara harfiah, makna dasar dari komposit adalah menggabungkan dan menyusun, atau dapat disimpulkan bahwa komposit adalah suatu bahan material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih bahan penyusun dengan cara pencampuran yang heterogen (terdiri atas berbagai unsur yang berbeda sifat atau berlainan jenis). Campuran ini akan menghasilkan material komposit yang memiliki karakteristik dan sifat mekanik yang berbeda dari material penyusunnya.

2.2 Partikel Kayu Bayur

Kayu bayur atau dalam bahasa latin *pterosperrum javanicum* dikenal memiliki nilai ekonomis yang tinggi karena biasanya digunakan untuk pembuatan kayu lapis, *furniture*, perkapalan, kertas, dan jembatan. Pohon bayur juga dapat digunakan sebagai tanaman revegetasi karena merupakan jenis tanaman yang tumbuh dengan cepat dan memerlukan sedikit cahaya matahari untuk pertumbuhannya. Menurut (Wulandari dan Latifah, 2021) kayu bayur termasuk dalam kelas kuat III dengan massa jenis rata-rata $0,53 \text{ g/cm}^3$ dan memiliki tekstur yang agak kasar tetapi memiliki permukaan yang licin dan mengkilap.

2.3 Resin Epoxy

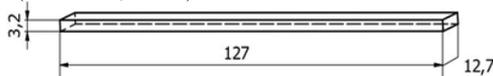
Resin *epoxy* relatif lebih mahal dibandingkan dengan resin *polyester*, harga resin ini sekitar empat kali lebih mahal daripada resin *polyester*. Sehingga bukan pilihan yang baik secara ekonomis, tetapi sangat mudah dalam hal penggunaan dan juga memiliki kualitas kekuatan yang jauh lebih tahan lama dibanding barang yang berbahan resin *polyester*. Resin *epoxy* sebagian besar berwarna kuning pucat dan melekat kuat pada permukaan kayu, dan tidak seperti resin *polyester*, resin ini tidak memerlukan lapisan akhir (*finishing*). Resin epoxy memiliki massa jenis $1,13 \text{ g/m}^3$ nilai modulus elastisitas $2,25 \text{ GPa}$ dan kekuatan tarik 70 MPa (Smith, 2006)

2.4 Papan Partikel (Particle Board)

Papan partikel (*particle board*) adalah papan tiruan yang dapat dibuat dari limbah industri kayu yang direkat menggunakan matriks melalui beberapa proses. Jika kadar air cukup tinggi akan susah untuk melakukan proses pembuatan komposit karena akan membutuhkan perekat yang lebih besar, sebaliknya jika kadar air terlalu rendah akan menghasilkan papan partikel yang cenderung rapuh dan mudah patah serta retak (Iskandar, 2009).

2.5 Uji Bending

Pengujian bending dilakukan dengan metode *three point bending* yang mengacu pada ASTM D790-03. Dari bending test akan dihasilkan distribusi linear tegangan langsung yang bervariasi terhadap ketebalan dan regangan pada permukaan lain. (Matthew, 1994).



Gambar 1. Dimensi spesimen uji bending
(Sumber: Kariana, 2021)

Keterangan Spesimen:

Panjang = 127 mm Tebal = 3,2 mm
Lebar = 12,7 mm

Tegangan bending adalah hasil bagi antara gaya yang dialami spesimen dengan luas penampang, atau dapat dfinisikan secara singkat sebagai gaya persatuan luas.

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

Keterangan :

σ_L = Tegangan bending L = Panjang span
P = Beban b = Lebar spesimen
d = Tebal spesimen

Regangan bending merupakan perbandingan antara penambahan panjang spesimen dibagi dengan panjang span.

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

Keterangan :

ϵ_L = Regangan bending L = Panjang span
 δ = Defleksi spesimen d = Tebal spesimen

Modulus elastisitas yaitu perbandingan tegangan dan regangan aksial pada deformasi elastis

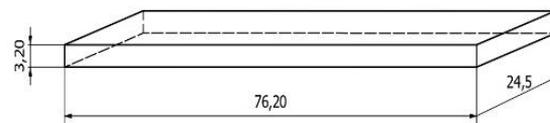
$$E_L = \frac{L^3 . m}{4b . d^3} \quad (3)$$

Keterangan :

E_L = Modulus elastisitas b = Lebar specimen
L = Panjang span d = Tebal spesimen
m = Tangen garis lurus

2.6 Uji Daya Serap Air

Pengujian daya serap air pada penelitian menggunakan metode perendaman 24 jam yang merupakan salah satu dari tujuh pengujian daya serap air yang terdapat di ASTM D570-98.



Gambar 2. Ukuran spesimen uji *water absorption*
(Sumber: Kariana, 2021)

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

Keterangan Rumus:

Wabs = Daya serap air
Wa = Massa basah spesimen
Wo = massa kering spesimen

3. Metode Penelitian

Metode bisa diartikan sebagai cara atau teknik yang digunakan dalam proses penelitian, sedangkan penelitian memiliki arti upaya dalam ilmu pengetahuan yang dilakukan guna memperoleh fakta dan prinsip-prinsip untuk mewujudkan kebenaran.

3.1 Alat Penelitian

Ada beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

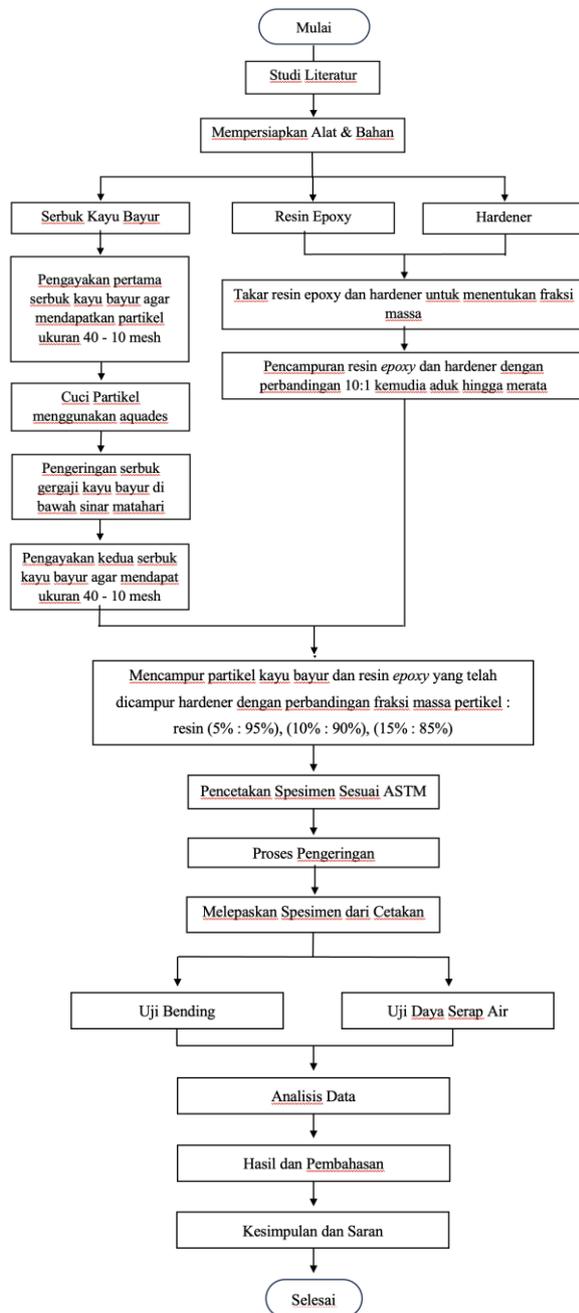
1. Timbangan digital
2. Gelas ukur
3. Jangka sorong
4. Cetakan spesimen
5. Alat tambahan

3.2 Bahan

1. Partikel kayu bayur yang digunakan sebagai penguat.
2. Resin *epoxy* digunakan sebagai matriks atau pengikat dari partikel kayu bayur.
3. Hardener digunakan sebagai campuran pada resin epoxy agar campuran antara partikel kayu bayur dengan resin epoxy.
4. Aquades digunakan untuk mencuci partikel kayu bayur sebelum dikeringkan dan juga digunakan pada pengujian daya serap air.

3.3 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir ini berisi mengenai tahapan penelitian dari awal hingga akhir penelitian.



Gambar 3. Diagram Alir

3.4 Proses Pembuatan Spesimen Uji

1. Ayak serbuk kayu bayur dengan ayakan 10 mesh sehingga ukuran partikel yang lebih besar dari 10 mesh tidak terpakai.
2. Ayak kembali menggunakan ayakan berukuran 40 mesh untuk mengeliminasi partikel yang lebih kecil dari 40 mesh sehingga mendapatkan partikel dengan rentang ukuran 40 mesh - 10 mesh.
3. Cuci partikel serbuk kayu bayur yang telah diayak menggunakan aquades.
4. Keringkan serbuk kayu bayur dibawah terik matahari hingga partikel serbuk kayu kering secara merata.
5. Selanjutnya diayak kembali menggunakan ayakan 40 mesh dan 10 mesh agar mendapatkan partikel dengan rentang ukuran yang spesifik.
6. Menyiapkan cetakan terbuat dari kayu yang telah dilapisi dengan aluminum foil sesuai dengan ukuran yang ditentukan ASTM di setiap jenis pengujian.
7. Melakukan penakaran serbuk kayu bayur dengan resin epoxy sesuai dengan perbandingan fraksi massa.
8. Selanjutnya campur serbuk kayu bayur dan resin epoxy yang telah tercampur dengan hardene.
9. Aduk campuran partikel dan resin hingga merata lalu tuangkan kedalam cetakan sesuai kebutuhan dan pastikan campuran telah mengisi dengan penuh di cetakan sehingga tidak ada ruang kosong yang tersisa.
10. Tunggu spesimen hingga kering lalu keluarkan spesimen dari cetakan dan lakukan pengukuran dan menimbang spesimen untuk memastikan spesimen sudah sesuai ukuran.
11. Lakukan pengulangan pada perbandingan fraksi yang lain dan spesimen yang lain dengan proses yang sama.

4. Hasil dan Pembahasan

Data hasil uji bending merupakan hasil pengujian specimen yang dilakukan di Lab. Metalurgi Teknik Mesin Universitas Udayana. Setiap fraksi massa menggunakan 3 spesimen. Berikut merupakan perhitungan tegangan bending, regangan bending, dan modulus elastisitas dari fraksi massa 10%:90% spesimen B2:

a. Tegangan Bending

Diketahui:

$$P = 215,84 \text{ N}$$

$$L = 16 \times 3,2 = 51,2 \text{ mm}$$

$$d = 3,2 \text{ mm}$$

Ditanya:

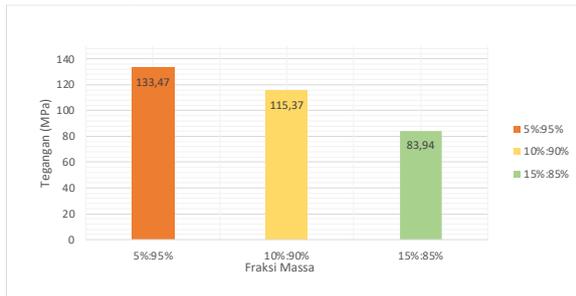
$$\sigma L = \text{Tegangan bending (MPa) ?}$$

Penyelesaian:

$$R = \frac{3P \cdot L}{2b \cdot d^2} = \frac{(3) \times (215,84 \text{ N}) \times (51,2 \text{ mm})}{(2) \times (12,7 \text{ mm}) \times (3,2 \text{ mm})^2}$$

$$= \frac{33153,024 \text{ N}}{260,096 \text{ mm}^2}$$

$$= 127,46 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \approx 127,46 \text{ Mpa}$$



Gambar 5 Grafik Tegangan Bending

Grafik tegangan bending pada gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan partikel kayu bayur dan mengurangi jumlah resin berpengaruh terhadap kekuatan bending. Dimana hasil kekuatan pada fraksi massa 5% : 95% memiliki nilai rata-rata kekuatan bending sebesar 133,47 MPa. Pada fraksi massa 10% : 90% didapatkan nilai rata-rata kekuatan bending sebesar 115,37 MPa sedangkan pada fraksi massa 15% : 85% memiliki nilai rata-rata kekuatan bending sebesar 83,94 MPa. Semakin banyak partikel yang digunakan maka tegangan bending semakin menurun, ini dikarenakan pendistribusian beban pada spesimen tidak merata.

b. Regangan Bending

Diketahui:

$$L = 51,2 \text{ mm}$$

$$d = 3,2 \text{ mm}$$

$$\delta = 2,693 \text{ mm}$$

Ditanya:

$$\varepsilon_L = \frac{6\delta \cdot d}{L^2}$$

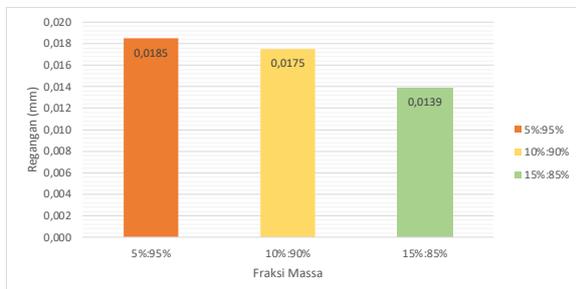
Penyelesaian:

$$\varepsilon_L = \frac{6\delta \cdot d}{L^2}$$

$$= \frac{(6) \times (2,693 \text{ mm}) \times (3,2 \text{ mm})}{(51,2^2 \text{ mm})}$$

$$= \frac{51,706 \text{ mm}}{2621,44 \text{ mm}}$$

$$= 0,197$$



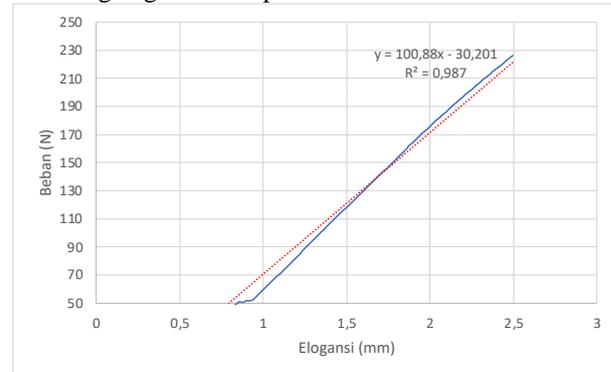
Gambar 6 Grafik Regangan Bending

Nilai rata-rata regangan bending pada komposit fraksi masa 5% : 95% sebesar 0,0185 mm, komposit dengan fraksi massa 10% : 90% memiliki nilai rata-rata kekuatan bending sebesar 0,0175 mm mengalami penurunan dari fraksi massa 5% : 95% namun tidak terlalu signifikan, sedangkan pada

komposit dengan fraksi massa 15% : 85% memiliki nilai regangan bending relative kecil dibandingkan fraksi massa 5% : 95% dan 10% : 90% dengan nilai sebenar 0,0139 mm

c. Modulus Elastisitas

Sebelum menghitung nilai modulus elastisitas bending, terlebih dahulu perlu mencari nilai tangen garis lurus pada daerah elastis.



Gambar 4. Nilai m Modulus Elastisitas Bending

Diketahui :

$$L = 51,2 \text{ mm (Panjang span)}$$

$$b = 12,7 \text{ mm (Lebar)}$$

$$d = 3,2 \text{ mm}$$

$$m = 84,284 \text{ N/mm}$$

Ditanya :

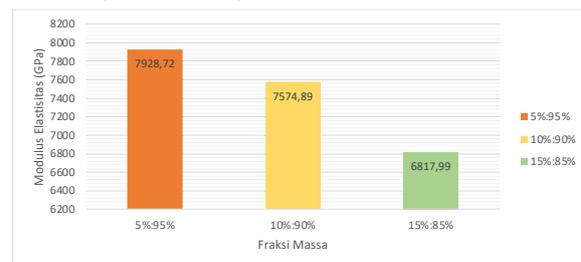
$$E_L = \text{Modulus elastisitas bending (MPa) ?}$$

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

$$= \frac{(51,2 \text{ mm})^3 \times (84,284 \text{ N/mm})}{(4) \times (12,7 \text{ mm}) \times (3,2 \text{ mm})^3}$$

$$= \frac{11312406,99 \text{ N/mm}}{1664,6144 \text{ mm}}$$

$$= 6795,81 \text{ MPa} \sim 6,79 \text{ GPa}$$



Gambar 7 Grafik Modulus Elastisitas Bending

Pada gambar 4.4 grafik modulus elastisitas dapat dilihat bahwa nilai elastisitas tertinggi terdapat pada fraksi massa 5% : 95% dengan nilai rata-rata sebesar 7928,72 MPa. Nilai rata-rata modulus elastisitas pada fraksi massa 10% : 90% sebesar 7574,89 MPa dan modulus elastisitas terendah terdapat pada fraksi massa 15% : 85% dengan nilai rata-rata sebesar 6817,99 MPa. Penurunan nilai modulus elastisitas bending dipengaruhi oleh distribusi partikel yang kurang merata, ketika partikel dicampurkan dengan resin dan ada pertikel yang mengumpul di area tertentu dapat menyebabkan nilai modulus elastisitas menurun. Selain itu void juga memiliki pengaruh terhadap kekuatan bending mulai

dari tegangan, regangan dan modulus elastisitas. *Void* menghambat menyebarkan beban antara partikel dan matriks sehingga membuat nilai modulus elastisitas menurun.

4.1 Hasil Uji Day Serap Air

Pengujian daya serap air menggunakan standar ASTM D570-98 dengan perendaman spesimen 24 jam menggunakan larutan aquades dengan menggunakan 3 spesimen setiap fraksi massa. Pada perhitungan dibawah menggunakan spesimen W2 fraksi massa 5% : 95% sebagai berikut :

Diketahui:

$W_a = 7,22$ gram

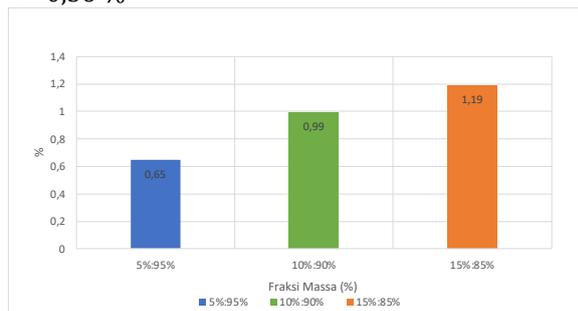
$W_o = 7,18$ gram

Ditanya:

$W_{abs} = ?$

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} W_{abs} (\%) &= \frac{W_a - W_o}{W_o} \times 100 \\ &= \frac{7,22 \text{ gram} - 7,18 \text{ gram}}{7,18 \text{ gram}} \times 100 \\ &= \frac{0,040 \text{ gram}}{7,18 \text{ gram}} \times 100 \\ &= 0,56 \% \end{aligned}$$



Gambar 8 Grafik Daya Serap Air

Dari grafik pengujian daya serap air pada gambar 4.5 menunjukkan fraksi massa 5% : 95% memiliki nilai daya serap air rata-rata sebesar 0,65%, pada fraksi massa 10% : 90% memiliki nilai rata-rata daya serap air sebesar 0,99% dan pada fraksi massa 15% : 85% memiliki nilai rata-rata daya serap air paling tinggi sebesar 1,19%. Daya serap air pada penelitian ini dipengaruhi oleh banyaknya partikel kayu bayur yang digunakan pada setiap spesimen, semakin banyak partikel yang digunakan semakin tinggi daya serap airnya. Hal tersebut dikarenakan kayu bayur tergolong jenis kayu *hydrophilic* yang dimana partikelnya memang mudah menyerap air. Selain itu faktor banyaknya rongga-rongga yang ditimbulkan akibat tidak meratanya penebaran resin atau matriks. Dapat dilihat pada spesimen 5% : 95% dimana resin dengan perbandingan jauh lebih banyak dari partikel memiliki daya serap air yang rendah dikarenakan matriks dapat terdistribusi secara merata sehingga sedikit rongga yang dapat diisi oleh air. Selain itu juga rendah nya daya serap air pada fraksi massa 5% : 95% dikarenakan karakteristik dari resin epoxy tersebut rendah terhadap penyerapan air.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang pengaruh fraksi massa terhadap kekuatan bending dan daya serap air komposit partikel kayu bayur dengan matriks epoxy dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kekuatan bending sangat dipengaruhi oleh fraksi massa yang dibuktikan dari data diatas yang menunjukkan semakin banyak partikel yang digunakan semakin menurun kekuatan tegangan bending, regangan bending dan modulus elastisitas bending. Hasil pengujian bending menunjukkan nilai tertinggi tegangan bending terdapat pada fraksi massa 5% : 95% dengan rata-rata nilai 133,47 MPa. Regangan bending 0,0185 mm dan modulus elastisitas 7928,72 MPa.
2. Perbandingan fraksi massa sangat mempengaruhi daya serap air pada setiap specimen dimana semakin banyak partikel yang ditambahkan semakin tinggi daya serap airnya. Hasil Uji Daya serap air menunjukkan nilai daya serap air pada spesimen 5% : 95% memiliki nilai daya serap air paling rendah dengan nilai rata-rata sebesar 0,65%. Pada fraksi massa 10% : 90% memiliki nilai rata-rata daya serap air sebesar 0,99% dan pada fraksi massa 15% : 85% memiliki nilai daya serap air paling tinggi dengan nilai rata-rata sebesar 1,19%.

Daftar Pustaka

- [1] *Annual Book of Standards, ASTM D 570 - 98, Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*
- [2] *Annual Book of Standards, ASTM D 790 - 03, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*
- [3] Iskandar, M. I. dan Supriadi, Achmad (2013), *Pengaruh Kadar Perikat Terhadap Sifat Papan Partikel Ampas Tebu, Jurnal Penelitian Hasil Hutan, Vol, 31, No. 1*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Keteknikan Kehutanan dan Pengelolaan Hasil Hutan.
- [4]
- [5] Kariana, “*Karakteristik Mekanik Papan Partikel Komposit Serbuk Kayu Jati Matriks Resin Polyester dengan Variasi Fraksi Massa*” Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana
- [6] Manurung, dkk “*Analisa Kekuatan Bahan Komposit Yang Diperkuat Serat Bambu Menggunakan Resin Polyester Dengan Memvariasikan Susunan Serat Secara Acak Dan Lurus Memanjang*” Universitas HKBP Nommensen

- [7] Matthew, F.L., *Composite Materials: Engineering and Science*, Chapman and Hall, UK, 1994
- [8] Smith., W. F. Hashemi, J. (2006). **Foundations Of Material Science and Engineering** (4th ed) me Graw Hill.
- [9] Wulandari, FT., Latifah, S. (2021), "*Laminated board Limbah Potongan Kayu Sebagai Bahan Substitusi Kayu Solid*" Laporan Penelitian PNB. Universitas Mataram



Averio Alvarez, pengusaha muda sekaligus seorang produser musik menyelesaikan program sarjana di jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan komposit dan material baru

Sintesis Katalis Platina-Titanium Dioksida Dengan Substitusi *Reduced Graphene Oxide* Dan Karakterisasinya Menggunakan Pengujian *Cyclic Voltammetry*

B. Gde Edy Triana Adi Jaya¹, Made Joni², Made Suarda¹, Ketut Astawa¹, Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik Mesin - Universitas Udayana, Bukit Jimbaran, Bali

²Finder U-CoE - Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Peningkatan penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar menjadi penyebab utama krisis dan polusi. Beberapa energi terbarukan dikembangkan seperti hidrogen yang dapat diaplikasikan pada Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). PEMFC adalah alat yang dapat mengubah hidrogen menjadi energi listrik melalui komponen utama yaitu Membrane Electrode Assembly (MEA). Pada MEA terdapat katalis sebagai tempat reaksi reduksi-oksidasi. Katalis Pt/C umum digunakan sebagai elektrokatalis, namun kelangkaan, biaya tinggi serta rentan terjadi korosi menjadi kelemahan. Penambahan material pendukung seperti TiO₂ dan rGO mampu meningkatkan kinerja katalis Pt. Maka sintesis katalis Pt.TiO₂/rGO dengan variasi massa tertentu dan beberapa metode lanjutan meliputi Hummers Modifikasi, Hidrotermal dan Fotodeposisi dilakukan untuk mendapatkan katalis dengan biaya yang terjangkau. Karakterisasi dari katalis dilakukan pengujian Cyclic Voltammetry (CV) untuk mengetahui karakteristik konduktivitas tegangan-arus pada reaksi reduksi-oksidasi pada katalis Pt.TiO₂/rGO. Hasil pengujian didapatkan bahwa katalis dengan variasi massa Pt terbanyak menunjukkan puncak potensial anoda untuk reaksi oksidasi dan mengeluarkan arus sebesar 1,1 mV.

Kata kunci: PEMFC, Katalis, Pt.TiO₂/rGO, Cyclic voltammetry

Abstract

The increased use of fossil fuels as an energy source has become a major cause of crises and pollution. Some renewable energies are being developed, such as hydrogen, which can be applied in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC). PEMFC is a device that converts hydrogen into electrical energy through a key component known as the Membrane Electrode Assembly (MEA). The MEA includes a catalyst where the reduction-oxidation reactions occur. Pt/C catalysts are commonly used as electrocatalysts, but their scarcity, high cost, and susceptibility to corrosion are significant drawbacks. The addition of supporting materials such as TiO₂ and rGO can enhance the performance of Pt catalysts. Therefore, the synthesis of Pt.TiO₂/rGO catalysts with specific mass variations and several advanced methods including modified Hummers, hydrothermal, and photodeposition were performed to obtain cost-effective catalysts. The characterization of the catalysts was conducted using Cyclic Voltammetry (CV) to determine the conductivity characteristics of voltage-current in the reduction-oxidation reactions on the Pt.TiO₂/rGO catalyst. The results showed that the catalyst with the highest Pt mass variation exhibited the anodic peak potential for the oxidation reaction and produced a current of 1.1 mV.

Keywords: PEMFC, Catalyst, Pt.TiO₂/rGO, Cyclic voltammetry

1. Pendahuluan

Tingginya penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar pada alat transportasi menjadi penyebab utama krisis energi dan polusi bagi lingkungan. Upaya mengembangkan energi terbarukan telah dilakukan untuk menjawab masalah tersebut. Salah satu pengembangan energi alternatif untuk mengurangi penggunaan energi fosil, adalah hidrogen. Hidrogen dianggap sebagai sumber energi yang menjanjikan untuk bahan bakar alat transportasi karena kandungan yang melimpah, nol-emisi, dan massa atom rendah [1]. Salah satu pemanfaatan hidrogen adalah dapat diaplikasikan pada Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sebagai pengganti mesin pembakaran dalam berbasis energi fosil [2]. PEMFC merupakan perangkat yang mampu mengubah energi kimia yang terdapat didalam bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia pada komponen utamanya yaitu Membrane Electrode Assembly (MEA) [3]. Pada

MEA terdapat katalis yang menjadi tempat reaksi reduksi oksigen pada lapisan katoda dan reaksi oksidasi hidrogen pada lapisan anoda [4].

Secara konvensional katalis yang digunakan pada PEMFC adalah katalis berbasis platina (Pt) yang didukung karbon (C). Katalis Pt/C mampu bekerja dengan baik sebagai elektrokatalis, namun kelangkaan platina serta harga yang tinggi menjadi kelemahan material ini, Selain itu katalis Pt/C rentan mengalami keracunan karbon monoksida (CO) dan adsorpsi karbon lainnya [5]. Maka penambahan serta substitusi material pendukung dapat dilakukan. Penambahan material dukungan seperti titanium dioksida (TiO₂) pada katalis berbasis platina dapat meningkatkan kinerja katalis. (TiO₂) dikatakan mampu menahan korosi, memiliki stabilitas yang baik pada kondisi asam, mudah didapat dan biaya yang rendah [6]. Substitusi penggunaan *reduction graphene oxide* (rGO) sebagai pengganti karbon juga mampu

menghasilkan dispersi yang baik pada material Pt serta dapat bertindak sebagai material pengontrol reaksi elektrokimia secara terkendali [7]

Tujuan dari dilakukannya penelitian adalah untuk mengetahui karakteristik konduktivitas listrik serta titik potensial puncak reaksi reduksi-oksidasi dari katalis Pt.TiO₂/rGO dengan biaya yang lebih terjangkau. Adapun permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini meliputi analisis karakteristik konduktivitas listrik dari katalis Pt.TiO₂/rGO sebagai katalis penyusun MEA pada PEMFC. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari permasalahan, maka perlu adanya batasan meliputi: kemurnian material katalis yang digunakan sesuai dengan yang dikeluarkan oleh pabrikan dan parameter lingkungan seperti Suhu dan tekanan dianggap konstan.

2 Dasar Teori

2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC).

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan suatu alat yang dapat secara langsung mengubah hidrogen menjadi listrik dengan proses elektrokimia. PEMFC terdiri dari *end plate*, *current collector*, *bipolar plate*, *gaskets*, dan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) [8]. Reaksi elektrokimia terdapat di dalam MEA, dimana proses ini berlangsung pada *catalyst layers* (CL) [4]. Pada katalis terjadi reaksi reduksi oksigen di lapisan katoda dan reaksi oksidasi hidrogen dilapisan anoda.

2.2 Material katalis

Umumnya material penyusun katalis pada PEMFC adalah berbasis platina (Pt). Pt dikatakan sebagai bahan terbaik untuk reaksi elektrokimia. Pt memiliki stabilitas katalik yang tinggi dan dapat menahan elektroda-oksidasi [9]. Pada penyusunan katalis, material Pt biasanya didukung dengan karbon sebagai tempat penyebaran atau dudukan dari Pt. Namun dalam penggunaannya, katalis Pt/C rentan terkena korosi yang mengakibatkan melemahnya kinerja katalis [10]. Maka material pendukung dapat ditambahkan seperti TiO₂ yang baik digunakan karena dapat meningkatkan kinerja katalis, stabil terhadap termal dan bersifat hidrofilik sebagai pengelolaan air pada katalis [11]. Substitusi material rGO sebagai pengganti karbon juga dapat dilakukan. rGO mampu bertindak sebagai bahan konduktif untuk reaksi elektrokimia, mampu meningkatkan dispersi Pt secara merata, serta memiliki stabilitas kerja katalik yang baik [12].

2.3 Sintesis katalis

Sintesis katalis merupakan suatu proses pembentukan sebuah senyawa baru dari gabungan unsur atau prekursor kimia. Proses sintesis digunakan untuk memperoleh suatu katalis. Sintesis katalis dapat dilakukan dengan metode tertentu

2.3.1 Metode Hummers Modifikasi

Metode Hummers merupakan suatu metode sintesis sederhana yang umum dalam pembuatan *graphene oxide* (GO). Metode Hummers memiliki keunggulan seperti kesederhanaan dan efisiensi namun masih memiliki kekurangan yaitu menghasilkan gas beracun akibat oksidasi natrium nitrat (NaNO₃), maka metode Hummers dimodifikasi dengan penggunaan asam sulfat pekat (H₂SO₄) dan Kalium Permanganat (KMnO₄) [13][14].

2.3.2 Metode Hidrotermal

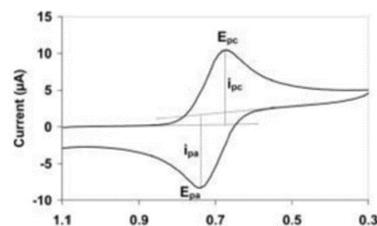
Metode Hidrotermal merupakan metode sintesis dengan menggunakan reaksi dari pelarut dengan suhu berkisar (100-1000 °C) dan tekanan (1-100 Mpa). Metode Hidrotermal dilakukan pada wadah khusus yang tertutup rapat atau autoklaf [15]. Metode Hidrotermal adalah salah satu metode sintesis yang umum digunakan, karena proses yang sederhana dan ramah lingkungan.

2.3.3 Metode Fotodeposisi

Metode Fotodeposisi adalah metode yang umum digunakan sebagai metode untuk membentuk fotokatalis yang terkandung pada logam. Metode Fotodeposisi merupakan metode yang mudah dikerjakan. Memanfaatkan sinar dari sumber cahaya UV dengan waktu dan daya penyinaran yang disesuaikan. Pemanfaatan sinar cahaya akan diserap melalui celah pita untuk membentuk nanokompasit logam/semi konduktor [16].

2.4 Karateriasi *Cyclic voltammetry*

Cyclic voltammetry merupakan salah satu pengujian karakteristik untuk mengetahui konduktivitas tegangan-arus pada katalis. CV dapat memberikan informasi elektrokimia seperti tegangan-arus dalam proses reduksi oksidasi [17]. Hasil analisis akan ditunjukkan pada grafik *Cyclic Voltammogram* [18]. Gambar 2.1 menunjukkan contoh grafik *Cyclic Voltammogram*.



Gambar 2. 1 Grafik Voltammogram [18]

3 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan secara eksperimental dengan menggunakan tiga variasi massa material Pt dan TiO₂. Variasi A terdiri atas 0,05g Pt : 0,15g TiO₂, variasi B terdiri atas 0,1g Pt : 0,1g TiO₂, variasi C terdiri atas 0,15g Pt : 0,05g TiO₂ dengan substitusi massa 0,3g GO disetiap variasi. Beberapa metode sintesis lanjutan dilakukan untuk mendapatkan katalis, seperti Metode Hummers

Modifikasi sebagai sintesis GO, Metode Hidrotermal sebagai sintesis TiO_2/rGO dan Metode Fotodeposisi sebagai sintesis $\text{Pt.TiO}_2/\text{rGO}$. Pengujian karakteristik katalis penyusun MEA dapat dilakukan uji *cyclic voltammetry* (CV) untuk mengetahui konduktivitas listrik pada katalis $\text{Pt.TiO}_2/\text{rGO}$.

3.1 Sintesis Graphene Oxide (GO)

Grafrit alami 2,5g dan Natrium Nitrat 1,25g dicampurkan dengan 60mL Asam Sulfat pekat pada kondisi suhu dibawah 5 °C selama 30 menit. Kemudian 7,5g Kalium Permanganat ditambahkan perlahan dengan menjaga suhu reaksi dibawah 20 °C. Campuran dihangatkan 35 °C dan terus diaduk. Penambahan 150mL aquades secara terkontrol lalu campuran dipanaskan dengan menahan suhu pada 98 °C selama 45 menit. Setelah mencapai suhu ruang, ditambahkan tetesan Hidrogen Peroksida sebanyak 10mL. Kemudian larutan disaring dan di cuci dengan aquades hingga mencapai pH 7. Kemudian endapan dikeringkan dengan oven pada suhu 50 °C.

3.2 Sintesis $\text{TiO}_2\text{-rGO}$

Serbuk GO sebanyak 0,3g dilarutkan dengan 35mL Etanol Anhidrat dan diultrasonikasi selama 1 jam. Kedalam larutan ditambahkan Titanium Dioksida (TiO_2 Degussa P-25) sesuai variasi massa dengan diaduk kuat selama 2 jam. Kemudian larutan dipindahkan ke dalam autoklaf dan dipanaskan pada suhu 180 °C selama 8 jam. Campuran disaring dan dicuci dengan aquades. Kemudian campuran dikeringkan pada oven dengan suhu 60 °C.

3.3 Sintesis $\text{Pt.TiO}_2/\text{rGO}$

Serbuk TiO_2/rGO sesuai variasi massa dilarutkan dengan 100mL Metanol dan diaduk. Kemudian ditambahkan Asam kloroplatinat ($\text{H}_2\text{PtCl}_6\cdot\text{H}_2\text{O}$) sesuai dengan variasi massa dan diultrasonikasi selama 1 jam sambil terus diaduk. Larutan dipindahkan pada reaktor kaca dan dibersihkan dengan Nitrogen (N_2) selama 1 jam. Kemudian diradiasi dengan lampu hologen 10 Watt selama 5 jam. Larutan suspensi selanjutnya disaring dan dibersihkan dengan alkohol dan aquades. Kemudian dikeringkan pada oven dengan suhu 70 °C.

3.4 Metode Pengujian *Cyclic voltammetry*

Pada penelitian dilakukan pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengetahui konduktivitas (teganga-arus) serta titik puncak potensial yang dihasilkan oleh reaksi reduksi-oksidasi dari elektroda katalis $\text{Pt.TiO}_2/\text{rGO}$. Metode uji CV menggunakan sel elektrokimia meliputi elektroda *Counter*, elektroda *refrence*, elektroda *working*, dan elektrolit. Elektroda *counter* yang digunakan adalah lembaran carbon, untuk elektroda *refrence* menggunakan $\text{Ag}/\text{Ag Cl}$ (perak/perak klorida), elektroda *working* yang digunakan adalah katalis $\text{Pt.TiO}_2/\text{rGO}$, dan elektrolit yang digunakan adalah larutan Asam Sulfat pekat 0,1 M. Masing-masing elektroda terhubung pada alat uji

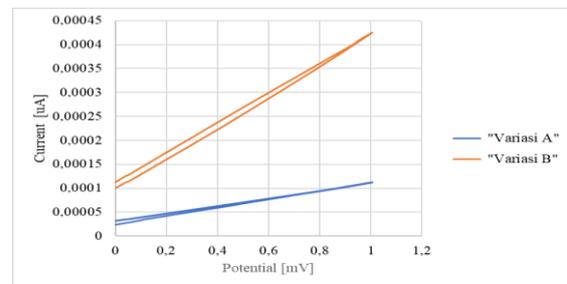
melalui kabel penghubung, dan di rendam pada larutan elektrolit. Kemudian elektroda discan secara *reversibel* dengan *scan rate* 0.1 mV/s dan rentang potensial 1-2 mV. Skema pengujian CV dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1.



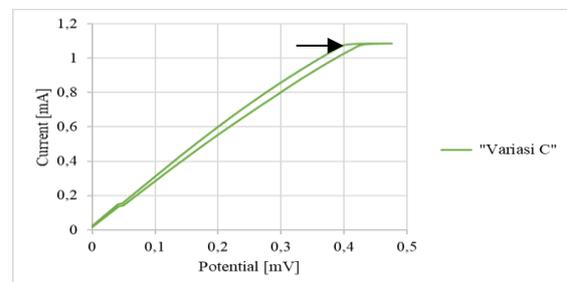
Gambar 3. 1 Skema pengujian cyclic voltammetry

4 Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian *Cyclic voltammetry* dari katalis $\text{Pt.TiO}_2/\text{rGO}$ dengan tiga variasi massa yang berbeda berhasil dilakukan. Hasil dari pengujian CV berupa grafik *voltammogram* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Hasil uji CV variasi A & B



Gambar 4. 2 Hasil uji CV variasi C

Pada Gambar 4.1 menunjukkan grafik hasil uji CV variasi A & B. Grafik dengan warna biru menunjukkan hasil variasi A sedangkan grafik warna orange menunjukkan hasil variasi B. Kedua variasi tersebut mengeluarkan arus dengan besaran μA . Hasil uji variasi A & B tidak dapat ditentukan potensial puncak anodik dan katodik karena tidak terdapat pick puncak dari garis grafik tersebut. Hal ini mungkin disebabkan oleh elektrodanya yang kurang stabil untuk menghantarkan arus-tegangan listrik yang dihasilkan, serta disebabkan oleh elektrolitnya yang terkontaminasi. Untuk Variasi C ditunjukkan dengan Gambar 4.2, dimana variasi C mengeluarkan arus dengan besaran mA. Hasil uji variasi C, terlihat bahwa potensial puncak anodik ditunjukkan pada garis panah warna hitam dengan besaran arus 1,1 mA.

sedangkan puncak katodik tidak dapat ditentukan. Hal memungkinkan bahwa variasi C hanya dapat digunakan di lapisan katalis anoda karena hanya terlihat puncak potensial pada saat reaksi oksidasi saja.

5 Kesimpulan

Katalis Pt.TiO₂/rGO dengan tiga variasi berbeda berhasil dilakukan. Karakteristik dari katalis dilakukan karakterisasi dengan pengujian CV. Hasil dari pengujian CV berupa grafik *Voltammogram* dengan hasil uji terbaik dimiliki oleh variasi massa Pt terbanyak. Pada variasi C menunjukkan adanya reaksi oksidasi yang terlihat dari munculnya titik puncak potensial anodik pada grafiknya. Besaran dari reaksi tersebut menunjukkan 1,1mV pada arusnya. Untuk variasi lainnya tidak dapat ditentukan puncak potensial dari anoda dan katodanya, hal ini mungkin disebabkan oleh penggunaan elektroda kerja yang tidak sesuai atau tidak stabil.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai melalui hibah Penelitian Grup Riset Udayana (PGRU) sesuai dengan kontrak Nomor: B/255.326/UN14.4.A/PT.01.03/2024.

Daftar Pustaka

- [1] Singla, M. K., Nijhawan, P., & Oberoi, A. S. (2021). *Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review*. Environmental Science and Pollution Research, 28, 15607-15626.
- [2] Ren, X., Wang, Y., Liu, A., Zhang, Z., Lv, Q., & Liu, B. (2020). *Current progress and performance improvement of Pt/C catalysts for fuel cells*. Journal of Materials Chemistry A, 8(46), 24284-24306.
- [3] Jung, G. B., Chan, S. H., Lai, C. J., Yeh, C. C., & Yu, J. W. (2019). *Innovative membrane electrode assembly (MEA) fabrication for proton exchange membrane water electrolysis*. Energies, 12(21), 4218.
- [4] Ger Mohideen, M. M., Liu, Y., & Ramakrishna, S. (2020). *Recent progress of carbon dots and carbon nanotubes applied in oxygen reduction reaction of fuel cell for transportation*. Applied Energy, 257, 114027.
- [5] Baronia, R., Goel, J., Kaswan, J., Shukla, A., Singhal, S. K., & Singh, S. P. (2018). *PtCo/rGO nano-anode catalyst: enhanced power density with reduced methanol crossover in direct methanol fuel cell*. Materials for Renewable and Sustainable Energy, 7, 1-13.
- [6] Karuppanan, K. K., Panthalingal, M. K., & Biji, P. (2018). *Nanoscale, catalyst support materials for proton-exchange membrane fuel cells*. In Handbook of nanomaterials for industrial applications (pp. 468-495). Elsevier.
- [7] Lagarteira, T., Delgado, S., Fernandes, C., Azenha, C., Mateos-Pedrero, C., & Mendes, A. (2020). *The role of Pt loading on reduced graphene oxide support in the polyol synthesis of catalysts for oxygen reduction reaction*. International Journal of Hydrogen Energy, 45(40), 20594-20604.
- [8] Xie, F., Shao, Z., Hou, M., Yu, H., Song, W., Sun, S., ... & Yi, B. (2019). *Recent progresses in H₂-PEMFC at DICP*. Journal of Energy Chemistry, 36, 129-140.
- [9] Eshghi, A., & Sabzehmeidani, M. M. (2018). *Platinum-Iron nanoparticles supported on reduced graphene oxide as an improved catalyst for methanol electro oxidation*. international journal of hydrogen energy, 43(12), 6107-6116.
- [10] Mirshekari, G. R., & Rice, C. A. (2018). *Effects of support particle size and Pt content on catalytic activity and durability of Pt/TiO₂ catalyst for oxygen reduction reaction in proton exchange membrane fuel cells environment*. Journal of Power Sources, 396, 606-614.
- [11] Bharti, A., Muliankeezhu, S., & Cheruvally, G. (2018). *Pt-TiO₂ nanocomposites as catalysts for proton exchange membrane fuel cell: prominent effects of synthesis medium pH*. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 18(4), 2781-2789.
- [12] Purkait, M. K., & Chang, C. T. (2020). *Experimental evaluation of Pt/TiO₂/rGO as an efficient HER catalyst via artificial photosynthesis under UVB & visible irradiation*. International Journal of Hydrogen Energy, 45(35), 17174-17190.
- [13] Zaaba, N. I., Foo, K. L., Hashim, U., Tan, S. J., Liu, W. W., & Voon, C. H. (2017). *Synthesis of graphene oxide using modified hummers method: solvent influence*. Procedia engineering, 184, 469-477.
- [14] Muzyka, R., Kwoka, M., Smędowski, Ł., Diez, N., & Gryglewicz, G. (2017). *Oxidation of graphite by different modified Hummers methods*. New Carbon Materials, 32(1), 15-20.
- [15] Feng, S. H., & Li, G. H. (2017). *Hydrothermal and solvothermal syntheses*. In Modern inorganic synthetic chemistry (pp. 73-104).
- [16] Lee, Y., Kim, E., Park, Y., Kim, J., Ryu, W., Rho, J., & Kim, K. (2018). *Photodeposited metal-semiconductor nanocomposites and their applications*. Journal of Materiomics, 4(2), 83-94.
- [17] Kim, T., Choi, W., Shin, H. C., Choi, J. Y., Kim, J. M., Park, M. S., & Yoon, W. S. (2020). *Applications of voltammetry in lithium ion battery research*. Journal of Electrochemical Science and Technology, 11(1), 14-25.
- [18] Pandiarajan, M., & Rajendran, S. (2016). *Applications of Cyclic voltammetry*. Int J Nano Corr Sci and Engg, 3(4), 166-180.

	<p>B. Gde Edy Triana Adi Jaya menyelesaikan studi S1 tahun 2024 Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi mengenai pengembangan katalis dari Proton Exchange Membrane Fuel cell.</p>	

	<p>Made Suarda menyelesaikan studi S1 tahun 1989 program studi Teknik Permesinan Kapal di Universitas ITS Surabaya, Jawa Timur. Kemudian Menyelesaikan studi S2 tahun 2004 program studi Advanced Manufacturing Technology di University of South Australia, Adelaide dan menyelesaikan studi S3 tahun 2020 program studi ilmu teknik di Universitas Udayana, Bali.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah mengenai modelling dan simulasi planar mechanism using bondgraph. Analisis dinamika fluida pada pompa. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya pada tahun 1998, kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya 2001, serta S3 di Shibaura Institute of Technology, Jepang 2007, dan Profesi di Universitas Udayana, Bali tahun 2020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan fuel cell, penyimpan energi, dan green energy. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana</p>	

	<p>Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 tahun 1996 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana, Bali. Kemudian menyelesaikan studi S2 program studi teknik mesin tahun 2006 di Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.</p>	

	<p>I Made Joni menyelesaikan studi program S1 di Universitas Padjadjaran tahun 1998. S2 di Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India tahun 2000. Dan S3 di Hiroshima University Japan pada tahun 2011. Saat ini beliau bekerja pada Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah teknologi nanopartikel serta perkembangan baterai. Saat ini beliau bekerja pada departemen fisika, FMIPA Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat.</p>	

Analisa Pengaruh Variasi Transmisi Dan Beban Penumpang Terhadap Konsumsi Energi Sepeda Motor Listrik Konversi Pada Kondisi Jalan Menanjak

I Ketut Mariata, I Made Widiyarta, I Wayan Arya Darma
Program Studi Teknik - Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

Abstrak

Sepeda motor listrik konversi merupakan salah satu kendaraan yang dapat beroperasi menggunakan bahan bakar alternatif, yaitu dengan energi listrik. Sepeda motor listrik konversi membutuhkan daya yang cukup besar agar dapat berjalan dengan baik, besarnya daya dapat dipengaruhi oleh kondisi medan jalan dan beban penumpang saat sedang berjalan, oleh sebab itu perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui kinerja sepeda motor listrik pada jalan menanjak dengan variasi transmisi dan beban penumpang, serta pengaruhnya terhadap daya sepeda motor listrik. Pada penelitian ini menggunakan sepeda motor tahun 2006 adalah sepeda motor yang dikonversi menjadi sepeda motor listrik. Konversi terhadap sepeda motor dengan baterai sebagai sumber energi menjadikan komponen-komponen pada motor berubah, adanya komponen yang tidak digunakan akan dilepas dan ada pula komponen yang perlu ditambahkan pada sepeda motor sebagai penunjang sistem kerja sepeda motor. Rasio transmisi yang merupakan penunjang sistem kerja sepeda motor divariasikan menjadi tiga rasio (penambahan 12 ring, 2 ring, dan tanpa penambahan ring) yang diuji pada jalanan tanjakan dengan kemiringan 12° dengan beban penumpang dan tanpa beban penumpang pada speed control I dan II. Pengujian dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali untuk mendapatkan rata-rata dari energi yang dikonsumsi, didapatkan bahwa rasio transmisi yang paling efektif adalah pada variasi dengan beban penumpang, rasio transmisi yang mengkonsumsi daya paling optimal adalah rasio transmisi 0,92 dengan penambahan dua ring pada speed control dua sebesar 0.065 kWh/km yang mendapatkan kecepatan maksimum rata-rata sepeda motor listrik sebesar 11 km/jam. Pada variasi tanpa penambahan beban penumpang daya paling optimal terdapat pada variasi rasio transmisi 0,8 sebesar 0,036 kWh/km tanpa penambahan ring pada speed control dua yang mendapatkan kecepatan maksimum rata-rata sepeda motor listrik sebesar 16 km/jam. Hal ini terjadi dikarenakan semakin sedikit waktu tempuh yang dibutuhkan motor untuk menanjak lintasan sepanjang 0,25 km, maka semakin kecil energi yang dikonsumsi sepeda motor listrik.

Kata Kunci: Rasio Transmisi, Uji Sepeda Motor Listrik Konversi, Konsumsi Energi

Abstract

Electric conversion motorcycles are vehicles that operate using alternative fuel sources, specifically electric energy. These conversions require substantial power to operate effectively, which can be influenced by road conditions and passenger load during travel. Therefore, testing is necessary to understand the performance of electric motorcycles on uphill roads with varying transmission ratios and passenger loads, and their impact on electric motorcycle power consumption. In this study, a 2006 Yamaha Mio Sporty motorcycle was converted into an electric motorcycle. Converting the motorcycle to use batteries as the energy source involves modifying motor components. Unused components are removed, while new components are added to support the motorcycle's operation. Transmission ratios, which support the motorcycle's operation, were varied into three ratios (adding 12 rings, 2 rings, and no additional rings). These ratios were tested on a 12° uphill road with and without passenger load at Speed Control I and II. The testing was repeated three times to obtain the average energy consumption. It was found that the most effective transmission ratio with passenger load was a ratio of 0.92, with the addition of two rings at Speed Control II, consuming 0.065 kWh/km and achieving an average maximum speed of 11 km/h for the electric motorcycle. Without additional passenger load, the optimal transmission ratio was 0.8, consuming 0.036 kWh/km at Speed Control II, achieving an average maximum speed of 16 km/h for the electric motorcycle. This occurs because the less time the motorcycle needs to travel a 0,25 km uphill track, the less energy the electric motorcycle consumes.

Keywords: Electric Motorcycle Conversion, Energy Consumption, Transmission Ratio

1. Pendahuluan

Pada saat ini sebagian besar masyarakat menggunakan kendaraan bermotor sebagai salah satu moda transportasi dalam melakukan aktivitas sehari-hari. Hal ini berdampak pada penggunaan bahan bakar yang akan meningkat dan membuat cadangan minyak bumi akan semakin menipis. Disamping itu tingginya pemakaian kendaraan bermotor menyebabkan polusi yang dapat mempengaruhi kualitas udara disekitarnya dan akan memberikan dampak

negatif bagi lingkungan. Salah satu solusi untuk mengurangi dampak yang terjadi yaitu dengan membuat kendaraan yang ramah lingkungan dan dapat beroperasi tanpa menggunakan bahan bakar fosil atau minyak bumi. Sepeda motor listrik merupakan salah satu kendaraan yang dapat beroperasi menggunakan bahan bakar alternatif, yaitu dengan energi listrik.

Efisiensi motor listrik merupakan faktor penting saat membeli atau memasang motor listrik yang akan dioperasikan pada sepeda motor listrik. Baik atau buruknya kinerja sepeda motor

listrik sangat dipengaruhi oleh efisiensi motor listrik sebagai penggerak. Ketika efisiensi sebuah motor listrik dikatakan baik, maka kinerjanya akan lebih maksimal. Pada perancangan sepeda motor listrik ini, motor listrik yang digunakan adalah motor BLDC (*Brushless DC Motor*) atau motor listrik arus searah tanpa sikat, karena memiliki efisiensi baik, tidak memiliki sikat sehingga perawatan lebih mudah, dan memiliki umur pakai lebih lama. (Battaglia et al. 2022) juga menyatakan bahwa motor listrik dengan model BLDC memiliki efisiensi yang tinggi, dikarenakan BLDC memiliki karakteristik traksi dengan kapasitas pembebanan yang baik. Ketika arus semakin besar maka rotor pada BLDC berputar semakin kencang dan sebaliknya, dengan penyaluran torsi yang kontinu motor listrik mampu berputar dengan cepat sesuai dengan kapabilitas motor listrik. Penyaluran torsi yang kontinu pada motor listrik membuat sepeda motor listrik konversi tidak lagi memerlukan variasi rasio transmisi yang tak terhingga, sehingga CVT (*continuously variable transmission*) akan dimodifikasi untuk menyesuaikan sistem kerja pada BLDC motor listrik. (Supriyo et al. 2019).

Pada penelitian ini mio sporty tahun 2006 adalah sepeda motor yang dikonversi menjadi sepeda motor listrik dan mengalami perubahan sumber energi, sepeda motor bahan bakar menggunakan bensin sebagai penghasil daya, sementara sepeda motor yang telah dikonversi menggunakan baterai. Konversi terhadap sepeda motor dengan baterai sebagai sumber energi menjadikan komponen-komponen pada motor berubah, adanya komponen yang tidak digunakan akan dilepas dan ada pula komponen yang perlu ditambahkan pada sepeda motor sebagai penunjang sistem kerja sepeda motor. Sistem kerja sepeda motor listrik yang berubah dengan adanya tambahan motor listrik sebagai penggerak yang mengkonversi energi listrik dari baterai menjadi energi gerak dan kemudian digunakan transmisi untuk berotasi dan ditransfer ke roda belakang sehingga sepeda motor dapat melaju.

Transmisi sepeda motor memakai jenis *open belt drive* yang memiliki dua *pulley* yang dinamakan *primary sheave* sebagai *driver* dan *secondary sheave* sebagai *driven*, variasi rasio yang tak terhingga pada CVT diperoleh dari *roller* di *primary sheave* dan *centrifugal* di *secondary sheave* yang akan mempengaruhi efektifitas BLDC motor. Penggunaan *roller* dan *centrifugal* tidak diperlukan lagi karena akan mengurangi efektifitas pada BLDC motor, oleh karena itu *roller* dan *centrifugal* pada transmisi dilepas untuk mengurangi pembebanan pada transmisi (Bambang Supriyo, 2019), dengan

dilepasnya komponen-komponen diatas maka CVT berubah menjadi transmisi manual dan transmisi sepeda motor listrik konversi menjadi penting untuk diteliti sehingga dapat ditentukan variasi rasio transmisi paling optimal yang mengonsumsi daya baterai paling minimum dengan mengujinya melalui variasi kecepatan yang berbeda. Pada pengujian ini akan dilakukan sepanjang jarak 5 km, karena dengan jarak 5 km sudah bisa menunjukkan perbedaan kondisi baterai awal dan setelah pengujian.

Sepeda motor listrik konversi memerlukan daya yang cukup besar untuk beroperasi dengan baik, yang dipengaruhi oleh kondisi jalan dan beban penumpang saat berkendara. Penelitian oleh (Prasetyo et al. n.d.) meneliti konsumsi daya pada sepeda motor listrik roda dua, dengan fokus pada kebutuhan daya berdasarkan jarak tempuh dan kondisi jalan menanjak dalam waktu tertentu, serta jumlah daya yang dikonsumsi dalam satu pengujian. Namun, penelitian tersebut belum mencakup variasi beban penumpang dan rasio transmisi. Oleh karena itu, diperlukan pengujian lebih lanjut untuk mengevaluasi kinerja sepeda motor listrik pada jalan menanjak dengan berbagai rasio transmisi dan beban penumpang, serta pengaruhnya terhadap konsumsi daya.

Tujuan Penelitian ini adalah untuk mengetahui variasi rasio transmisi dengan penambahan dua belas ring, dua ring dan tanpa ring pada *primary sheave*. Lalu mengetahui daya dari baterai yang dikonsumsi pada setiap variasi rasio transmisi dengan variasi beban pada jalan menanjak dan menentukan pengonsumsi daya paling optimal dari salah satu dari tiga variasi.

2. Dasar Teori

2.1 Sepeda Motor Listrik

Sepeda motor listrik adalah kendaraan yang digerakkan oleh motor listrik tanpa bahan bakar minyak, dikembangkan sebagai solusi terhadap pemanasan global dan keterbatasan bahan bakar minyak. Sepeda motor listrik memiliki banyak kelebihan dibandingkan sepeda motor konvensional seperti ramah lingkungan, biaya perawatan lebih sedikit, ringan, tidak menyebabkan polusi suara, dan penggunaan daya yang sangat efisien. (R et al. n.d).

2.2 Sepeda Motor Listrik Konversi

Sepeda motor elektrifikasi adalah sepeda motor konvensional yang dikonversi menjadi sepeda motor listrik. Perubahan sumber energi dari bahan bakar minyak menjadi listrik menyebabkan perubahan pada komponen motor. Komponen seperti tangki bahan bakar, ruang pembakaran, dan knalpot tidak lagi digunakan

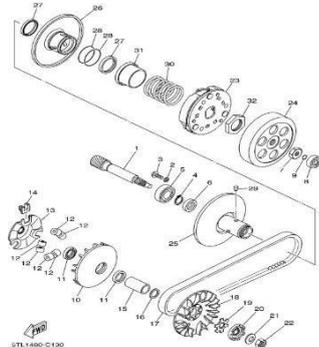
dan diganti dengan baterai, motor controller, dan motor listrik. Selain itu, CVT(continuously variable transmission) dimodifikasi untuk mengurangi beban pada transmisi dan memungkinkan akselerasi yang optimal. (Book and Parsa 2018).

2.3 Continuously Variable Transmission

CVT adalah jenis transmisi dengan rasio yang dapat berubah-ubah secara tak terbatas, memungkinkan penggunaan daya dari pembakaran bahan bakar menjadi lebih efisien (La Battaglia et al., 2022). CVT adalah transmisi otomatis yang beroperasi dengan dua pulley yang dihubungkan oleh V-belt (Subandrio, 2009). Kedua pulley ini memainkan peran penting dalam sistem CVT, karena diameternya dapat berubah secara otomatis ketika mesin bergerak cepat, menghasilkan gaya sentrifugal pada roller dan centrifugal (Battaglia et al. 2022).

2.4 Komponen Penting Pada Sepeda Motor Listrik

Komponen penting pada sepeda motor listrik dilihat secara garis besar dimulai dari sumber energi sampai pada akhirnya sepeda motor mampu mengalami akselerasi. Gambar 1 menjelaskan sumber energi yang dipakai pada sepeda motor listrik adalah baterai, lalu *motor controller* sebagai pengatur daya yang akan masuk ke motor listrik dan perangkat penting terakhir adalah transmisi yang berfungsi sebagai sistem penggerak sehingga sepeda motor dapat melakukan akselerasi. (Battaglia et al. 2022)

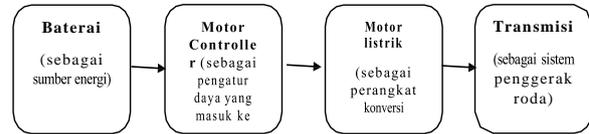


Gambar 1. Bagian-bagian CVT

2.5 Baterai

Baterai adalah salah satu teknologi umum yang sering kita jumpai di kehidupan sehari-hari, baterai hadir dalam bentuk dan ukuran yang berbeda, dari baterai kecil yang digunakan pada perangkat elektronik seperti telepon genggam maupun baterai

lebih besar yang digunakan pada kendaraan listrik. Baterai adalah perangkat elektrokimia yang menyimpan energi dalam bentuk kimia dan mengubahnya menjadi energi listrik untuk menyuplai daya pada perangkat elektronik, baterai dapat berbentuk satu atau lebih sel elektrokimia yang dipasang secara seri maupun paralel yang menghasilkan tegangan dan arus listrik. (Satria n.d.)



Gambar 2. Komponen Penting Sepeda Motor Listrik Konversi

2.6 Motor Controller

Motor controller adalah sebuah perangkat yang berfungsi mengatur besarnya arus yang masuk ke motor listrik sehingga motor listrik dapat beroperasi sesuai dengan performa motor listrik secara efektif. Spesifikasi *motor controller* harus sesuai dengan motor listriknya sehingga dapat bekerja secara optimal, jika input daya yang diberikan oleh *motor controller* lebih besar dari motor listrik maka akan terjadi *overheating* dan *overcurrent protection* yang dapat menyebabkan motor listrik rusak, sebaliknya jika input daya lebih rendah motor listrik akan mengalami kinerja yang lemah dan *overloading*. *Motor controller* memiliki peran penting dalam mengatur aliran arus ke motor listrik agar dapat beroperasi dengan baik sehingga motor listrik kerusakan sebelum waktunya rusak (Zainuri et al. 2022).

2.7 Brushless DC Motor Listrik

Motor listrik adalah sebuah perangkat yang dirangkai untuk menghasilkan sebuah energi mekanis. Rangkaian dibuat untuk menerima *input* dalam bentuk energi listrik dengan memakai prinsip kerja induksi elektromagnetik, motor listrik harus memiliki beberapa bagian untuk sampai pada akhirnya menghasilkan energi mekanis, berikut adalah bagian-bagian dari motor listrik (Supriyo et al. 2019).

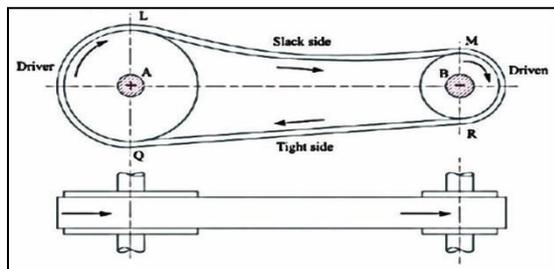
2.8 Transmisi

Transmisi adalah sebuah sistem kerja pada motor yang mentransfer daya dari mesin ke roda penggerak motor. Transmisi pada sepeda motor biasanya memiliki beberapa jenis, contohnya transmisi manual maupun transmisi otomatis. Pada transmisi manual, pengemudi harus secara manual memilih gigi yang sesuai kebutuhan ketika mengendarai motor, sementara transmisi otomatis akan sendirinya bergerak memilih gigi yang paling sesuai berdasarkan kecepatan sepeda motor. Transmisi pada sepeda motor biasanya menggunakan *open belt drive*

untuk memberikannya kepada roda penggerak motor, jenis ini digunakan dengan poros *primary sheave* sejajar dengan poros *secondary sheave* dan dengan arah putaran yang sama. Berikut adalah gambar dari *open belt drive*. (Novita Sari 2018).

2.9 Gaya Hambatan Pada Sepeda Motor

Dalam dinamika kendaraan, beberapa gaya hambat muncul yaitu gaya hambat aerodinamis (R_a), gaya hambat rolling (R_r) dan gaya gradien atau gaya hambat karena tanjakan jalan (R_g). Untuk dapat menggerakkan kendaraan, maka diperlukan gaya dorong yang dapat melawan hambatan yang timbul oleh ketiga gaya hambat tersebut. Gaya dorong atau gaya traksi (traction force, F_t) dapat berasal dari tenaga mesin kendaraan tersebut. (Santi Rahmawati, Istiqomah, and Sutopo n.d.).



Gambar 3. Open Belt Drive

3 Metode Penelitian

3.1 Alat-alat Penelitian

- 3.1.1 GPS Digital Speed
- 3.1.2 Multimeter
- 3.1.3 Clinometer

3.2 Bahan-bahan Penelitian

- 3.2.1 Baterai
- 3.2.2 Motor Listrik DC
- 3.2.3 Brushless DC Motor Controller
- 3.2.4 Konversi Sepeda Motor

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian akan dilakukan dengan menggunakan pengujian secara langsung, sepeda motor konversi yang akan diuji secara langsung di jalan, yang memiliki beberapa tahapan penelitian. Berikut adalah tahapan penelitian dari penulisan ini:

- 3.3.1 Studi literatur.
- 3.3.2 Pengambilan data variasi rasio transmisi.

3.3.3 Pengujian.

3.3.4 Pengambilan data tegangan, arus dan daya.

3.3.5 Penulisan pembahasan dan kesimpulan.

Jika data - data sudah didapat dan telah dilakukan perhitungan, selanjutnya dimasukkan kedalam tabel kemudian dibuat grafik hubungan dan ditarik kesimpulan.

4 Hasil Dan Pembahasan

Penelitian dilakukan untuk mengetahui besar energi yang dikonsumsi pada sebuah sepeda motor listrik konversi pada rasio transmisi yang berbeda; *low ratio*, *medium ratio*, *overdrive ratio*, juga pada kecepatan dan *speed control* yang berbeda. Tahap pertama dari penelitian adalah menghitung besar dari rasio transmisi pada setiap penambahan ring-nya, lalu pengujian konsumsi sepeda motor listrik konversi dilakukan dengan total 36 kali pengujian yaitu; tiga variasi rasio transmisi, dua variasi beban, dua *speed control*, dan tiga kali pengulangan pada setiap variasi.

Pada tabel 1 terlihat jelas bahwa besar energi yang dikonsumsi dengan penambahan 12 ring memiliki perbedaan yang signifikan terhadap rasio transmisi dengan penambahan 2 ring dan tanpa penambahan ring. Jika dilihat pada *speed control I* energi terkecil yang dikonsumsi sepeda motor listrik konversi adalah transmisi penambahan 2 ring. Hal ini juga terjadi pada *speed control II*, energi terkecil yang dikonsumsi adalah transmisi dengan penambahan 2 ring. Hal ini dikarenakan semakin sedikit waktu yang dibutuhkan sepeda motor listrik untuk menempuh lintasan menanjak sepanjang 0,25 km, maka konsumsi energi pada sepeda motor listrik semakin kecil.

Pada tabel 2 dapat dilihat bahwa pada kendaraan tanpa beban penumpang dilakukan sebanyak tiga kali pengujian menghasilkan nilai sebesar 0,050 kWh dan 0,054 kWh pada *speed control I* dan II dengan penambahan 12 ring. Pada kondisi yang sama penambahan 2 ring mengkonsumsi energi sebanyak 0,037 kWh dan 0,040 kWh pada *speed control I* dan II. Jika dilihat dari energi yang dikonsumsi tanpa penambahan ring yaitu sebesar 0,032 kWh dan 0,036 kWh pada *speed control I* dan II, hal ini memperlihatkan bahwa rasio transmisi penambahan 12 ring memperlihatkan konsumsi energi yang relatif lebih besar dari pada rasio penambahan 2 ring dan tanpa ring.

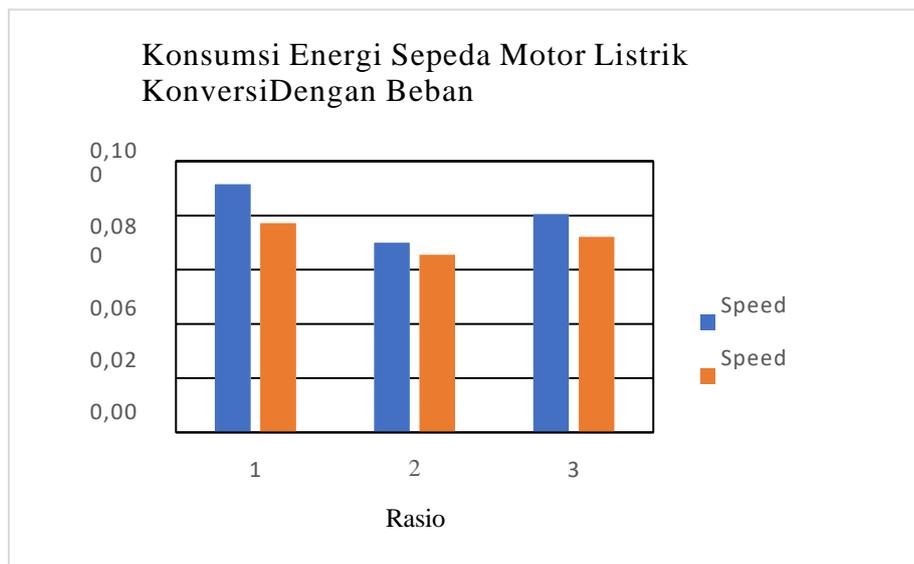
4.1 Data Pengujian pada *Control Speed* Tanpa Beban

Tabel 1. Data Pengujian Pada Speed Control I Dengan Beban Penumpang 70kg

No	Variasi	Tegangan (V)		Runni ng				Konsumsi Energi (kWh/km)
		Awal	Akhir	Waktu (jam)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	
1	Rasio I	47,7	47,2	0,032	46,34	12,66	586,664	0,075
2		47,4	46,9	0,033	46,03	12,82	590,105	0,078
3		47,2	46,5	0,033	45,9	20,02	918,918	0,121
4	Rasio II	49,6	48,8	0,018	48,63	14,92	725,56	0,052
5		49	48,5	0,021	47,19	16,56	781,466	0,066
6		48,5	47,6	0,023	46,23	21,66	1001,34	0,092
7	Rasio III	50,9	46,9	0,026	46,85	18,21	853,139	0,089
8		51	48,1	0,024	46,47	16,25	755,138	0,072
9		49,9	46,9	0,025	45,87	17,53	804,101	0,08

Tabel 2. Data Pengujian Pada Speed Control II Dengan Beban Penumpang 70kg

No	Variasi	Tegangan (V)		Running				Konsumsi Energi (kWh/km)
		Awal	Akhir	Waktu (jam)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)	
1	Rasio I	47	46,2	0,028	45,2	14,87	672,124	0,075
2		46	45,8	0,028	44,05	21,77	958,969	0,107
3		46,4	45,6	0,029	45,24	9,29	420,28	0,049
4	Rasio II	48	47	0,024	46,42	14,59	677,268	0,065
5		47,7	47,1	0,024	46,1	12,1	557,81	0,054
6		47,4	46,5	0,025	45,48	17,11	778,163	0,078
7	Rasio III	47,4	46,9	0,024	45,68	16,91	772,449	0,074
8		47,2	46,7	0,025	45,31	16,91	766,192	0,077
9		46,9	46,5	0,026	45,25	13,88	628,07	0,065



Gambar 4. Data Pengujian Pada Speed Control II Dengan Beban Penumpang 70kg

5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan peneliti, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

Transmisi tanpa penambahan ring diantara *primary fixed sheave* dan *primary sliding sheave* memiliki rasio sebesar 0,81, lalu pada penambahan dua ring diantara *fixed primary sheave* dan *sliding primary sheave* memiliki rasio sebesar 0,92, sementara penambahan dua belas ring diantara *fixed primary sheave* dan *sliding primary sheave* pada transmisi memiliki rasio sebesar 2,13. Jika melihat pengaruh rasio transmisi pada variasi tanpa beban penumpang dan dengan penumpang pada jalanan menanjak terhadap kecepatan sepeda motor listrik, transmisi dengan penambahan dua ring diantara *fixed primary sheave* dan *sliding primary sheave* yang memiliki rasio sebesar 0,92 adalah satu-satunya rasio yang mampu mencapai kecepatan yang paling tinggi sebesar 18 km/jam.

Daftar Pustaka

- Battaglia, Vincenzo La, Alessandro Giorgetti, Stefano Marini, Gabriele Arcidiacono, and Paolo Citti. 2022. "Kinematic Analysis of V-Belt Cvt for Efficient System Development in Motorcycle Applications." *Machines* 10(1). doi: 10.3390/machines10010016.
- Book, and I. Made Parsa. 2018. *MOTOR-MOTOR LISTRIK*.
- Novita Sari, Yulita Dea. 2018. "Perhitungan Ulang Transmisi Sabuk Dan Puli Alternator Pada Kinetic Flywheel Conversion (KFC) Untuk Memaksimalkan Kerja Alat Di Terminal BBM Surabaya Group-Pertamina Perak."
- Prasetyo, Eko, Dahmir Dahlan, Dan Raditya, and Nur Fadhli. n.d. "Analisis Pengujian Sepeda Motor Listrik 3 KW Pada Jalan Mendatar Dan Menanjak."
- R, Vyshakh M., Shemin Jose, Nandu Ramesh, Adersh Joshy Philip BTEch Students, Electronics Engineering, Praveen K. Professor, Adersh Joshy Philip, and Sarath S. Raj. n.d. "Sarath Raj S, Conventional IC Engine to BLDC Powered Electric Motorcycle Conversion E Motorcycle." *International Journal of Electrical Engineering and Technology (IJEET)* 11(2):69–74.
- Santi Rahmawati, Tasya, Silvi Istiqomah, and Wahyudi Sutopo. n.d. *A Manufacturer Opening Decision of Electric Motorcycle Conversion Kit Using The Mixed Integer Linear Programming Method*.
- Satria, Ario Wibawa. n.d. *Analisis Konsumsi Energi Menggunakan Profil Kecepatan Pada Kendaraan Listrik = Analysis of Energy Consumption Using Velocity Profile of Electric Vehicle*.
- Supriyo, Bambang, Sugeng Ariyono, Bambang Tjahjono, and Bambang Sumiyarso. 2019. "Electro-Mechanical Transmission Ratio Shifter of Rubber Belt Continuously Variable Transmission for Motorcycle Applications." in *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1273. Institute of Physics Publishing.
- Zainuri, Fuad, Muhammad Hidayat Tullah, Isnanda Nuriskasari, Rahmat Subarkah, Widiyatmoko Widiyatmoko, Sonki Prasetya, Iwan Susanto, Belyamin Belyamin, and Abdul Aziz Abdillah. 2022. "Performa Kendaraan Konversi Listrik Melalui Pengujian Dynotest." *Jurnal Mekanik Terapan* 3(2):44–49. doi: 10.32722/jmt.v3i2.462



Sintesis Katalis Berbasis Platina Didukung *Reduced Graphene Oxide* Dan Karakterisasinya Menggunakan Pengujian *Cyclic Voltammetry*

Komang Gede Darmayasa¹, I Made Joni², Made Suarda¹, Ketut Astawa¹, Made Sucipta^{1*}

¹Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

²Finder U-CoE – Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Dalam era yang semakin mengedepankan teknologi ramah lingkungan, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) menjadi salah satu fokus utama dalam bidang konversi energi. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis katalis berbasis Platina (Pt) yang didukung oleh *reduced Graphene Oxide* (rGO) melalui metode Hummer yang dimodifikasi, serta mengevaluasi pengaruh variasi perbandingan massa H_2PtCl_6 dengan *Graphene Oxide* (GO) terhadap karakteristik katalis yang dihasilkan. Sintesis dilakukan dengan menggunakan prosedur Hummer yang telah dimodifikasi untuk menghasilkan rGO, yang kemudian dikombinasikan dengan Pt melalui proses reduksi kimia. Hasil sintesis ini diuji menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi permukaan, serta *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk menilai aktivitas elektrokimia dari katalis yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi perbandingan massa H_2PtCl_6 dengan GO mempengaruhi morfologi dan aktivitas elektrokimia katalis Pt/rGO. Katalis dengan komposisi tertentu menunjukkan distribusi partikel Pt yang lebih merata dan ukuran partikel yang lebih kecil, yang berkontribusi pada peningkatan aktivitas elektrokimia. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan katalis yang lebih efisien untuk aplikasi PEMFC, khususnya dalam meningkatkan kerapatan arus dan stabilitas operasional.

Kata kunci: PEMFC, Katalis Pt/rGO, *Reduced Graphene Oxide*, Metode Hummer, Sintesis Katalis.

Abstract

In an era that increasingly prioritizes environmentally friendly technology, the development of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) has become a key focus in the field of energy conversion. This study aims to synthesize platinum (Pt)-based catalysts supported by reduced Graphene Oxide (rGO) through a modified Hummer's method and to evaluate the effect of varying the mass ratio of H_2PtCl_6 to Graphene Oxide (GO) on the characteristics of the resulting catalysts. The synthesis was carried out using a modified Hummer's procedure to produce rGO, which was then combined with Pt through a chemical reduction process. The synthesized catalysts were tested using Scanning Electron Microscopy (SEM) to observe surface morphology and Cyclic Voltammetry (CV) to assess the electrochemical activity of the produced catalysts. The results show that varying the mass ratio of H_2PtCl_6 to GO affects the morphology and electrochemical activity of the Pt/rGO catalysts. Catalysts with certain compositions exhibited more uniform Pt particle distribution and smaller particle sizes, contributing to enhanced electrochemical activity. This study contributes to developing more efficient catalysts for PEMFC applications, particularly in improving current density and operational stability.

Keywords: PEMFC, Pt/rGO Catalyst, *Reduced Graphene Oxide*, Hummer Method, Catalyst Synthesis

1. Pendahuluan

Seiring dengan peningkatan kebutuhan energi yang dipicu oleh pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi, ketergantungan pada sumber energi tak terbarukan masih menjadi masalah utama yang merugikan lingkungan. Oleh karena itu, penelitian saat ini berfokus pada pengembangan mesin konversi energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Hidrogen muncul sebagai bahan bakar alternatif masa depan yang lebih bersih, karena emisi yang dihasilkan hanya berupa uap air [1]

Sel bahan bakar merupakan teknologi ramah lingkungan yang mengubah hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik, uap air, dan panas. PEMFC merupakan salah satu jenis yang menonjol, karena memiliki suhu operasi rendah, polusi minimal, efisiensi energi tinggi, dan berbagai aplikasi [2].

Komponen utama dari PEMFC adalah *Membrane Electrode Assembly* (MEA), yang berperan dalam reaksi elektrokimia yang mengubah hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik. Untuk meningkatkan performa MEA, penting untuk memperhatikan komposisi, jenis katalis, serta metode pembuatannya

Katalis yang umum digunakan adalah platina yang didukung oleh karbon [3]. Namun, terdapat sejumlah kekurangan yang menyebabkan katalis ini kurang efisien [4,5]. Saat ini, untuk meningkatkan efisiensi, karbon sedang digantikan oleh rGO karena memiliki keunggulan dibandingkan karbon [6]. Selain rGO, beberapa peneliti juga menggunakan bahan organik yang dicampur dengan logam [7]. rGO mampu memberikan ketahanan elektrokimia yang tinggi, konduktivitas elektronik yang lebih baik, serta

interaksi yang kuat dengan logam yang mendukung stabilitas nanopartikel platina. Struktur berlapis rGO juga meningkatkan perpindahan massa ke lapisan katalis [8]. Pengembangan katalis Pt/rGO telah mulai diteliti untuk meningkatkan aktivitas dan stabilitas dengan menggunakan prosedur sintesis polyol yang dimodifikasi [9]. Namun, prosedur ini masih belum optimal, karena metode Hummer yang dimodifikasi dianggap lebih efektif dan efisien, di mana serbuk grafit, H_2SO_4 , $KMnO_4$, H_2O_2 , dan H_2PtCl_6 direduksi secara bersamaan [10]. Dalam penelitian tersebut, perbandingan massa antara H_2PtCl_6 dan serbuk grafit oksida (GO) yang digunakan adalah 4:6.

Penelitian ini menyoroti pentingnya meningkatkan kinerja PEMFC dengan katalis Pt/C, sehingga diusulkan pembuatan katalis Pt/rGO melalui sintesis masing-masing komponen menggunakan metode Hummer yang dimodifikasi dengan variasi massa yang berbeda. Katalis ini dapat diaplikasikan dalam pembuatan MEA untuk PEMFC yang digunakan pada kendaraan listrik berbasis sel bahan bakar.

Beberapa masalah yang akan dikaji dalam penelitian ini meliputi: bagaimana karakteristik morfologi katalis Pt/rGO yang dikembangkan menggunakan metode Hummer yang dimodifikasi dengan variasi perbandingan massa H_2PtCl_6 dengan GO, serta bagaimana karakteristik hubungan tegangan-arus listrik dari katalis Pt/rGO pada MEA. Penelitian ini memiliki beberapa batasan, termasuk kemurnian material katalis yang digunakan sesuai dengan standar industri, serta pengaturan suhu dan tekanan yang dianggap konstan.

2. Dasar Teori

Dalam proses ini, serbuk grafit diubah menjadi grafit oksida dengan bantuan $NaNO_3$, H_2SO_4 , $KMnO_4$, dan H_2O_2 . Grafit oksida tersebut kemudian direduksi dengan H_2PtCl_6 dan etilen glikol untuk menghasilkan Pt/rGO, yang diharapkan dapat mengatasi masalah yang diidentifikasi dalam penelitian ini. Fuel Cell adalah perangkat elektrokimia yang menghasilkan listrik, panas, dan uap air melalui proses oksidasi bahan bakar, biasanya hidrogen [11,12]. Berbeda dengan baterai, sel bahan bakar tidak menyimpan energi tetapi terus menghasilkan listrik selama bahan bakar dan oksigen tersedia. Sel bahan bakar pertama kali ditemukan oleh William Grove pada tahun 1839 dan mulai menjadi penting pada abad ke-20. PEMFC adalah jenis sel bahan bakar yang paling umum digunakan, beroperasi pada suhu di bawah $100^\circ C$. Dengan menggunakan hidrogen dan oksigen untuk menghasilkan listrik, PEMFC tidak menghasilkan emisi berbahaya [2]. Meskipun PEMFC memiliki keunggulan dalam operasi yang cepat, ia memerlukan katalis yang mahal untuk mempercepat reaksi. Proses kerja PEMFC melibatkan reaksi redoks pada hidrogen di anoda dan

oksigen di katoda. Elektron yang dihasilkan di anoda dipindahkan ke katoda melalui sirkuit eksternal, menghasilkan listrik, sementara proton melewati membran untuk bereaksi di katoda, menghasilkan air. Komponen utama PEMFC meliputi: Bipolar Plate Mendistribusikan reaktan, menghantarkan arus listrik, dan mencegah kebocoran, Gas Diffusion Layer (GDL) Memastikan difusi reaktan secara efisien ke lapisan katalis serta membantu dalam manajemen air, Catalyst Layer Tempat terjadinya reaksi redoks, terdiri dari material ionomer dan katalis Pt yang didukung oleh karbon dan Membran Memisahkan anoda dan katoda serta mengalirkan proton

Material sintesis yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan Pt sebagai katalis dalam PEMFC untuk reaksi oksidasi hidrogen dan reduksi oksigen [13]. Namun, Pt memiliki kelemahan karena rentan terhadap korosi dalam lingkungan asam di dalam sel bahan bakar. rGO, yang merupakan hasil reduksi dari GO, memiliki kandungan oksigen yang lebih rendah dan ikatan kovalen antar atom karbon yang lebih kuat. GO dan rGO berfungsi sebagai bahan pendukung katalis dalam PEMFC [14]. GO disintesis menggunakan metode Hummer [10], yang melibatkan oksidasi serbuk grafit dengan asam kuat dan oksidator. Proses ini menghasilkan GO yang kemudian dapat direduksi menjadi rGO [15]. Sintesis Pt/rGO dilakukan dengan mencampurkan H_2PtCl_6 dan GO dalam etilen glikol, kemudian direduksi pada suhu $140^\circ C$ untuk menghasilkan Pt/rGO [10]. Variasi massa Pt dan rGO dapat memengaruhi kualitas PEMFC. Eksperimen dilakukan dengan membandingkan berbagai perbandingan massa Pt dan rGO untuk menemukan rasio optimal yang dapat meningkatkan kinerja PEMFC. SEM digunakan untuk mengamati topografi permukaan dan struktur mikro material yang disintesis dengan tingkat perbesaran tinggi [16]. Teknik *Cyclic Voltametri* (CV) digunakan sebagai metode elektrokimia untuk menganalisis reaksi redoks pada material katalis, memberikan wawasan tentang karakteristik elektrokimia material tersebut [16].

3. Metode Penelitian

Penelitian tentang PEMFC ini menggunakan metode Hummer yang dimodifikasi, yang sebelumnya telah dilakukan oleh [10]. Dalam penelitian ini, metode Hummer yang dimodifikasi diterapkan dengan menggunakan bahan-bahan seperti serbuk grafit, air deionisasi, $NaNO_3$, aseton, H_2SO_4 , $KMnO_4$, dan H_2O_2 , yang dimasukkan ke dalam magnetic stirrer pada suhu dan waktu yang telah ditentukan. Setelah serbuk grafit diubah menjadi grafit oksida, proses reduksi dilakukan dengan menambahkan H_2PtCl_6 dan etilen glikol ke dalam magnetic stirrer, menjaga suhu konstan selama waktu yang ditetapkan. Proses reduksi ini menghasilkan Pt/rGO. Penelitian ini berhasil mensintesis Pt/rGO yang dapat mengatasi masalah yang dirumuskan dalam penelitian ini.

3.1 Sintesis GO

Pada penelitian ini berhasil mensintesis GO menggunakan metode Hummer. Prosesnya melibatkan oksidasi 1gram serbuk grafit menggunakan H_2SO_4 , $NaNO_3$, dan $KMnO_4$ di dalam *ice bath* dengan suhu di bawah $20^\circ C$. Setelah itu, larutan diaduk pada suhu $40^\circ C$ selama 14 jam dalam *heat bath*. Selanjutnya, suhu larutan dinaikkan secara bertahap dengan penambahan air hingga mencapai $90^\circ C$, kemudian dipanaskan lagi pada suhu $50^\circ C$ selama satu jam. Warna larutan berubah menjadi coklat dan kuning saat ditambahkan air, menghasilkan graphite oxide yang kemudian disaring, dicuci, dan dikeringkan untuk mendapatkan GO yang terdispersi

3.2 Sintesis Pt/rGO

Untuk sintesis Pt/rGO, suspensi koloid GO dicampur dengan larutan H_2PtCl_6 dengan perbandingan 20% Pt:80% GO, 30% Pt:70% GO dan 40% Pt:60% GO. Proses reduksi dilakukan pada suhu $140^\circ C$ selama 6 jam dengan pengadukan kuat. Pt/rGO yang terbentuk kemudian disaring, dicuci, dan dikeringkan.

3.3 Cyclic Voltammetry (CV) BST8-STAT

Pengukuran CV dilakukan menggunakan BST8- Stat Potentiostat/Galvanostat (NuVant Systems Inc., Indiana, Amerika Serikat) yang dihubungkan ke komputer dengan BST8- Stat. Pengaturan standar tiga elektroda digunakan, dengan substrat berlapis sebagai elektroda kerja, kalomel jenuh (Hg_2Kl_2) elektroda (jenuh KCl) sebagai elektroda referensi, dan elektroda platina melingkar sebagai elektroda lawan. 100 mL 0,1 mol dm^{-3} $NaCl$ digunakan sebagai elektrolit pendukung. Alat Uji CV BST8-STAT ditunjukkan pada Gambar 3.1



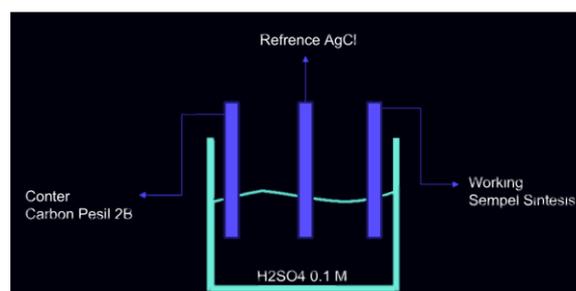
Gambar 3.1. Alat Uji CV BST8-STAT

3.4 Karakteristik Hubungan Tegangan-Arus Listrik Katalis Pt/rGO

Pengujian CV menampilkan hasil karakteristik tegangan arus listrik dari sintesis katalis Pt/rGO dengan variasi massa yaitu: A. 20%Pt:80%rGO, B. 30%Pt:70%rGO, C. 40%Pt:60%rGO. Ditunjukkan dengan hasil grafik sintesis tersebut dengan rentang potensial 0-2V dengan *scan rate* 0,1mV/s dengan menggunakan jenis alat uji CV BST8-STAT. Menggunakan skema pengujian *refrence AgCl*, konter

menggunakan karbon dari isi pensil 2b dan working adalah sampel.

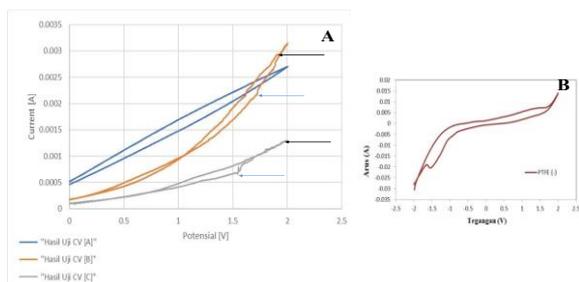
Dalam proses pengambilan grafik karakteristik sintesis katalis Pt/rGO ini dilakukan selama proses bertepatan di Laboratorium Teknologi Nano, FiNder U-CoE, Universitas Padjajaran. Pada pengujian CV ini menggunakan hasil sintesis yang sudah selesai dikerjakan kemudian 0,1gram dimkasukan ke dalam gelas beker sebagai bahan yang di uji. Skema pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2. Skema Pengujian CV

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian CV dari katalis Pt/rGO dengan tiga variasi massa yang berbeda dengan persentase sampel A 20% Pt 80% rGO, sampel B 30% Pt 70% rGO dan sampel C 40% Pt 60% rGO sudah melakukan pengujian CV dan berhasil dilakukan. Hasil dari pengujian CV berupa grafik *voltammogram* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 Hasil pengukuran pada Gambar 4.1 terdapat 3 sampel dimana sampel A berwarna biru dengan persentase 20% Pt dan 80% rGO tidak mendapatkan puncak anoda dan katoda, pada sampel B berwarna oren dengan 30% Pt dan 70% rGO mendapatkan puncak anoda dan katoda pada puncak anoda ditandai dengan warna hitam dan katoda ditandai dengan warna garis biru, sedangkan pada sampel C berwarna abu dengan 40% Pt dan 60% rGO terdapat puncak anoda dan katoda lebih rendah dibandingkan sampel B namun sudah terdapat puncak anoda dan katoda ini disebabkan bahwa terjadi reaksi oksidasi, sedangkan pada konsentrasi massa penggunaan Pt terbanyak terdapat pada sampel C namun reaksi pada sampel C kurang bagus dibandingkan dengan sampel B, pada sampel A tidak terjadinya reaksi oksidasi disebabkan penggunaan alat pengujian yang masih belum tepat pada pengoprasonal dan skema pada pengujian kurang mendapatkan refrensi yang tepat untuk melakukan pengujian CV untuk sampel Pt/rGO pada penelitian ini.



Gambar 4.1. A. Hasil Uji CV 3 Sempel Katalis, B. Perbandingan Hasil Pengujian

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan data dan analisa penelitian dengan tiga variasi massa pada sintesis katalis Pt/rGO. Dengan demikian dapat ditarik kesimpulan pada hasil pengujian karakterisasi CV mendapatkan 2 hasil yang memiliki puncak katodik dan anodik dari 2 hasil tersebut variasi B yang memiliki hasil terbaik yang bisa digunakan sintesis katalis berbasis *Fuel Cell* sedangkan satu sampel tidak memiliki hasil yang diharapkan disebabkan karena tidak mendapatkan refrensi yang tepat dalam pengujian powder sintesis katalis Pt/rGO.

Daftar Pustaka

- [1] Martawati, M. E. (2017). Sistem elektrolisa air sebagai bahan bakar alternatif pada kendaraan. *Jurnal Eltek*, 12(1), 93-104.
- [2] Zhang, G., Xie, X., Xie, B., Du, Q., & Jiao, K. (2019). Large-scale multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 555-563
- [3] Zhao, Y., Mao, Y., Zhang, W., Tang, Y., & Wang, P. (2020). Reviews on the effects of contaminations and research methodologies for PEMFC. In *International Journal of Hydrogen Energy* (Vol. 45, Issue 43, pp. 23174–23200). Elsevier Ltd.
- [4] Hou, J., Yang, M., Ke, C., Wei, G., Priest, C., Qiao, Z., ... & Zhang, J. (2020). Platinum-group-metal catalysts for proton exchange membrane fuel cells: From catalyst design to electrode structure optimization. *EnergyChem*, 2(1), 100023
- [5] Ostroverkh, A., Dubau, M., Kúš, P., Haviar, S., Václavů, M., Šmíd, B., ... & Johánek, V. (2020). Durable ultra-low-platinum ionomer-free anode catalyst for hydrogen proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4641-4651.
- [6] Erickson, K.; Erni, R.; Lee, Z.; Alem, N.; Gannett, W.; Zettl, A. Determination of the Local Chemical Structure of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. *Adv. Mater.* 2010, 22, 4467–4472. [CrossRef] [PubMed]
- [7] Sucipta, M., Sibarani, J., Gunawan, I. G. N. W., Putra, S. G. B., Robert, R. A., Kandou, S., &

- Sudarsana, P. B. (2023). Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Using Membrane Electrode Assembly (MEA) Based on Pt/C Catalyst with Activated Carbon-Chitosan-Nickel. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 13(1), 354-358.
- [8] Pandey, R.P.; Shukla, G.; Manohar, M.; Shahi, V.K. Graphene oxide based nanohybrid proton exchange membranes for fuel cell applications: An overview. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2017, 240, 15–30. [CrossRef]
- [9] Pushkareva, I. V., Pushkarev, A. S., Kalinichenko, V. N., Chumakov, R. G., Soloviev, M. A., Liang, Y., ... & Grigoriev, S. A. (2021). Reduced graphene oxide-supported based catalysts for PEM fuel cells with enhanced activity and stability. *Catalysts*, 11(2), 256.
- [10] Park, J. E., Lim, J., Lim, M. S., Kim, S., Kim, O. H., Lee, D. W., ... & Sung, Y. E. (2019). Gas diffusion layer/flow-field unified membrane-electrode assembly in a fuel cell using graphene foam. *Electrochimica Acta*, 323, 134808.
- [11] Molaeimanesh, R.G. and Torabi, F. (2023) *Fuel Cell Modeling and Simulation: From Microscale to Macroscale*.
- [12] Torabi, F. (2023) *Fuel Cell Modeling and Simulation: From Microscale to Macroscale*.
- [13] Shinozaki K, Zack JW, Pylypenko S, Richards RM, Pivovar BS, Kocha SS. Benchmarking Pt-based catalysts' oxygen reduction reaction activity using standardized rotating disk electrode methods. *Int J Hydrogen Energy*
- [14] Laribi S, Mamma K, Sahli Y, Koussa K. Air supply temperature impact the PEMFC impedance. *J Energy Storage*
- [15] Y. Rafitasari, H. Suhendar, N. Imani, F. Luciana, H. Radean, I. Santoso, Sintesis Graphene Oxide dan Reduced Graphene Oxide, Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF 2016, V, Oktober (2016).
- [16] Mursyida, H, (2006). Karakterisasi MEA (Membrane Electrode Assembly) Hasil Integrasi Bahan-Bahan Komersial Pada Stack PEMFC, Universitas Padjadjaran



Komang Gede Darmayasa, tempat tanggal lahir Selat, 13 Agustus 2002, menyelesaikan studi SMKN 3 Singaraja pada tahun 2020 dan melanjutkan studi sarjana di Universitas Udayana program studi Teknik Mesin angkatan 20 dan mengambil bidang ilmu Konversi Energi

Pengaruh Suhu Karbonisasi Terhadap Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif Tempurung Kelapa Dalam Penyimpanan Biogas

Abed Nego Ersan¹, Ketut Astawa¹, Made Sucipta^{1*}

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Krisis energi global telah mendorong pengembangan sumber energi terbarukan. Biogas sebagai sumber energi terbarukan memiliki potensi besar namun terkendala oleh masalah penyimpanan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan biogas melalui optimasi proses produksi karbon aktif dari tempurung kelapa. Dengan memvariasikan suhu karbonisasi 425°C, 525°C, 625°C. penelitian ini menganalisis pengaruh variabel tersebut terhadap kapasitas adsorpsi karbon aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu karbonisasi 625°C menghasilkan karbon aktif dengan kinerja terbaik dalam kapasitas penyimpanan biogas. Dimana, karbon aktif dengan variasi suhu karbonisasi yang paling tinggi tidak hanya memiliki kapasitas penyimpanan biogas yang lebih banyak, tetapi juga mampu menghasilkan jumlah biogas yang dapat dimanfaatkan lebih besar dibandingkan dengan karbon aktif yang dihasilkan pada suhu karbonisasi yang lebih rendah. Dengan demikian, bahwa suhu karbonisasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan massa penyimpanan biogas secara signifikan dan penggunaan karbon aktif yang berasal dari tempurung kelapa dapat meningkatkan efektivitas penyimpanan biogas dibandingkan dengan penyimpanan tanpa penggunaan karbon aktif sebagai adsorben.

Kata kunci: Biogas, Karbon aktif, Tempurung kelapa, *Adsorbed Natural Gas (ANG)*, *Microwave activation*.

Abstract

The global energy crisis has encouraged the development of renewable energy sources. Biogas as a renewable energy source has great potential but is limited by storage problems. This study aims to improve the efficiency of biogas storage by optimising the production process of coconut shell activated carbon. By varying the carbonisation temperature of 425°C, 525°C, 625°C, this study analysed the effect of these variables on the adsorption capacity of activated carbon. The results showed that the carbonisation temperature of 625°C produced activated carbon with the best performance in biogas storage capacity. In fact, the activated carbon with the highest carbonisation temperature variation not only has more biogas storage capacity, but is also able to produce a greater amount of usable biogas compared to the activated carbon produced at lower carbonisation temperatures. Thus, higher carbonisation temperatures can significantly increase the mass of biogas storage and the use of coconut shell activated carbon can increase the effectiveness of biogas storage compared to storage without the use of activated carbon as an adsorben.

Keywords: Biogas, Activated carbon, Coconut shell, Adsorbed Natural Gas (ANG), Microwave activation.

1. Pendahuluan

Krisis energi global yang semakin mendesak telah mendorong pencarian alternatif sumber energi yang berkelanjutan. Biogas, yang dihasilkan dari proses penguraian bahan organik oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob, muncul sebagai salah satu sumber energi yang memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan. [1]. Potensi biogas sebagai sumber energi alternatif sangat besar mengingat ketersediaan bahan baku yang melimpah dan sifatnya yang ramah lingkungan. Namun, pemanfaatan biogas secara optimal masih terkendala oleh beberapa faktor, salah satunya adalah tantangan dalam penyimpanan.

Sebagai solusi terhadap tantangan dalam penyimpanan biogas, teknologi *Adsorbed Natural Gas (ANG)* telah muncul sebagai solusi yang inovatif. ANG memanfaatkan prinsip adsorpsi, yaitu proses di mana molekul gas melekat pada permukaan material penyerap (adsorben) [2]. Berbeda dengan metode penyimpanan konvensional yang memerlukan tekanan dan suhu yang tinggi,

ANG memungkinkan penyimpanan gas pada kondisi yang lebih ringan [3]. Karbon aktif, dengan luas permukaannya yang sangat besar dan sifat porinya yang unik, menjadi salah satu adsorben yang paling banyak digunakan dalam teknologi ANG [4]. Dengan mengadsorpsi molekul biogas ke dalam pori-pori karbon aktif, gas dapat disimpan dalam volume yang lebih kecil dan dengan tingkat keamanan yang lebih tinggi.

Sebagai adsorben, karbon aktif memiliki luas permukaan yang sangat besar dan struktur pori yang kompleks, memungkinkan terjadinya interaksi fisik dan kimia antara permukaan karbon dengan molekul gas [5]. Hal ini memungkinkan penyimpanan gas dalam volume yang lebih kecil dibandingkan dengan metode konvensional. Di antara berbagai jenis karbon aktif, karbon aktif dari tempurung kelapa sering menjadi pilihan utama karena ketersediaannya yang melimpah, biaya produksi yang relatif rendah, dan sifat adsorpsinya yang baik [6]. Namun, kinerja karbon aktif sangat dipengaruhi oleh proses aktivasi, yang melibatkan pemanasan pada suhu tinggi dalam suasana yang

terbatas oksigen. Faktor-faktor seperti ukuran *mesh* dan suhu karbonisasi akan mempengaruhi luas permukaan, volume pori, dan distribusi ukuran pori, sehingga secara signifikan memengaruhi kapasitas adsorpsi karbon aktif [7].

Berdasarkan penjelasan diatas, maka dilakukan penelitian mengenai karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa dengan variasi suhu karbonisasi tertentu yang diaktivasi menggunakan *microwave* dengan daya dan waktu aktivasi tertentu. Dengan suhu karbonisasi dan suhu aktivasi tertentu pada penelitian tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penyimpanan biogas pada teknologi ANG (*Adsorbed Natural Gas*).

2. Dasar Teori

2.1 Biogas

Biogas adalah gas yang mudah terbakar yang dihasilkan melalui proses fermentasi bahan organik oleh bakteri anaerob. Fermentasi ini berlangsung secara alami dan memerlukan waktu yang cukup lama. Biogas termasuk dalam kategori energi terbarukan karena sumber bahan bakunya akan selalu tersedia selama keberadaan organik masih berlangsung [8].

2.2 Adsorbed Natural Gas (ANG)

ANG, atau Adsorbed Natural Gas, adalah teknologi di mana gas alam diserap oleh pori-pori bahan adsorben pada tekanan yang relatif rendah. ANG merupakan alternatif yang cukup efektif untuk menyimpan gas alam. Penerapan metode ANG membutuhkan material adsorben yang ditempatkan dalam wadah penyimpan sebagai media penampung gas alam, salah satunya adalah karbon aktif [9].

2.3 Tempurung Kelapa

Indonesia merupakan negara produsen kelapa terbesar di antara Filipina, India, Brasil, dan Sri Lanka. Pada tahun 2010, produksi kelapa mencapai 20.655.400 ton. Tempurung kelapa memiliki kandungan atom-atom C, O, H, dan N. Komposisi dari tempurung kelapa ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Tempurung Kelapa (Amu *et al*, 2011)

Komponen	%
Selulosa	33,61
Liginin	36,51
Pentosa	29,27
Abu	0,61

Selain untuk menghasilkan arang, tempurung kelapa juga dapat dimanfaatkan untuk membuat arang aktif, yang memiliki kemampuan menyerap gas dan uap. Arang aktif juga bermanfaat untuk mengurangi tingkat kekerasan air, kandungan besi, dan kandungan NaCl dalam air sumur [10].

3. Metode Penelitian

3.1 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah suhu karbonisasi dari karbon aktif. Adapun suhu karbonisasi yang digunakan, yaitu suhu karbonisasi 425 °C, 525 °C, dan 625 °C. Variabel Kontrol dalam penelitian ini, yaitu ukuran *mesh* daya dan waktu aktivasi karbon aktif. Ukuran *mesh* yang digunakan 35-45 (500µm). Aktivasi dengan daya 800 watt selama 20 menit dengan laju alir nitrogen yaitu 20g/min dan waktu holding time selama 2 jam. Variabel terikat, yaitu: komposisi biogas dan massa penyimpanan biogas.

3.2 Pembuatan Karbon Aktif

Proses pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa terjadi dalam dua proses, yaitu karbonisasi dan aktivasi. Proses pertama adalah karbonisasi, di mana tempurung kelapa yang telah disiapkan dicuci hingga bersih dan dikeringkan. Tempurung kemudian dipotong dengan ukuran sekitar 1x1 cm. Sebelum memulai karbonisasi, aliran listrik diperiksa untuk mencegah gangguan arus pendek. Tempurung kelapa yang sudah dipotong ditimbang dan dimasukkan ke dalam reaktor karbonisasi. Proses pemanasan dimulai dengan meningkatkan suhu secara bertahap, yaitu dari 25°C hingga 125°C selama 7 menit, kemudian suhu dinaikkan lagi hingga 225°C, 325°C, dan 425°C, masing-masing dengan durasi pemanasan 7 menit per tahap. Setelah mencapai suhu 425°C, reaktor dibiarkan pada suhu tersebut selama 2 jam (*holding time*). Setelah proses karbonisasi selesai, alat karbonisasi dimatikan dan dibiarkan mendingin hingga mencapai suhu ruangan. Massa karbon hasil karbonisasi ditimbang dan disimpan dalam wadah tertutup. Proses yang sama diulangi untuk variasi suhu karbonisasi lainnya, yaitu 525°C dan 625°C.

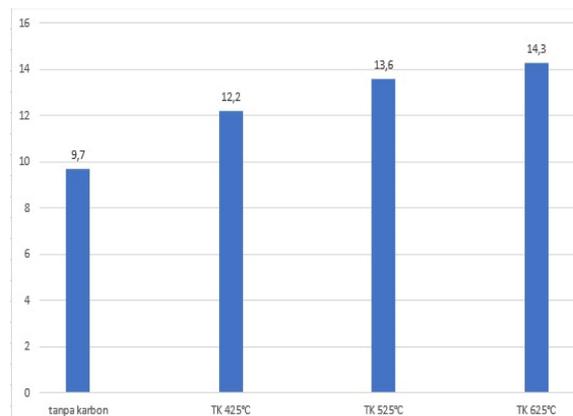
Proses kedua adalah aktivasi karbon. Karbon hasil karbonisasi terlebih dahulu dihaluskan dan disaring dengan tiga ukuran *mesh* yang berbeda, yaitu *mesh* 35-45 (500µm), *mesh* 45-70 (354µm), dan *mesh* 70-230 (210µm). Karbon yang telah disaring dengan ukuran *mesh* 35-45 (500µm) ditimbang untuk menentukan massanya, kemudian dimasukkan ke dalam tabung silinder yang diletakkan di dalam *microwave* untuk proses aktivasi. Sebelum memulai aktivasi, aliran listrik diperiksa kembali untuk mencegah gangguan arus pendek. *Microwave* diaktifkan dengan daya 800 watt, dan karbon diaktifkan selama 20 menit. Selama proses ini, gas nitrogen dialirkan untuk memastikan bahwa lingkungan dalam *microwave* terbebas dari oksigen. Setelah proses aktivasi selesai, massa karbon aktif ditimbang dan disimpan dalam wadah tertutup. Proses yang sama diulangi untuk karbon yang dikarbonisasi pada suhu 425°C dengan ukuran *mesh* 45-70 (354µm) dan *mesh* 70-230 (210µm), serta untuk karbon dengan suhu karbonisasi 525°C dan 625°C dengan ketiga ukuran *mesh* yang berbeda.

3.3 Pengujian Penyimpanan Biogas

Pengujian penyimpanan biogas dilakukan dengan sembilan sampel karbon aktif yang telah dikarbonisasi pada berbagai suhu dan diaktivasi menggunakan microwave. Komposisi biogas diukur menggunakan sensor, kemudian biogas dimasukkan ke dalam *plastic bag* yang telah divakum. Massa tabung penyimpanan diukur dalam keadaan kosong, setelah itu karbon aktif yang telah diaktivasi dimasukkan ke dalam tabung dan massa tabung diukur kembali. Tabung divakum hingga tekanan 20 psi, lalu biogas dialirkan dari *plastic bag* ke dalam tabung hingga tekanan mencapai 100 psi. Setelahnya, massa tabung yang berisi biogas diukur dan komposisi biogas yang keluar diukur dengan sensor. Langkah ini diulang untuk setiap sampel karbon aktif, dengan hasil disajikan dalam bentuk tabel dan grafik yang menunjukkan hubungan antara variasi suhu karbonisasi dan karakteristik penyimpanan.

4. Hasil dan Pembahasan

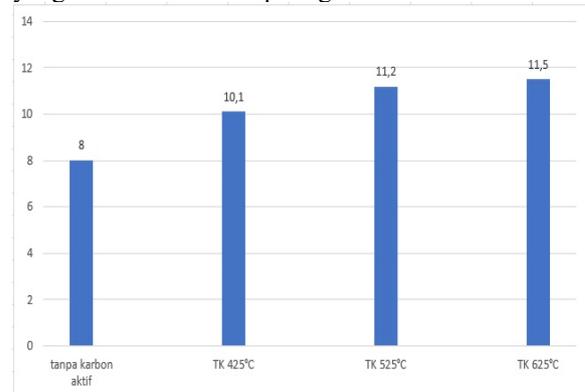
Pada gambar 4.1 menunjukkan massa penyimpanannya biogas pada masing-masing suhu karbonisasi.



Gambar 4.1 Massa biogas tersimpan pada tekanan 100 Psi dengan variasi suhu karbonisasi

Gambar 4.1 memperlihatkan hubungan antara suhu karbonisasi dan kapasitas penyimpanan biogas pada karbon aktif yang berasal dari tempurung kelapa. Dengan meningkatnya suhu karbonisasi, semakin besar pula massa biogas yang dapat teradsorpsi oleh karbon aktif. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh peningkatan pengembangan luas permukaan spesifik karbon aktif pada suhu tinggi. Proses karbonisasi pada suhu yang lebih tinggi menyebabkan terbentuknya lebih banyak pori-pori kecil dan besar di dalam struktur karbon, sehingga menyediakan lebih banyak permukaan untuk interaksi dengan molekul biogas. Selain itu, pada suhu tinggi proses dekomposisi bahan organik dalam tempurung kelapa menjadi karbon lebih sempurna, proses tersebut menghasilkan luas

permukaan karbon aktif yang lebih besar dengan tingkat kemurnian yang lebih tinggi. Sehingga, karbon aktif yang dihasilkan pada suhu karbonisasi yang lebih tinggi memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik terhadap biogas.



Gambar 4.2 Massa biogas yang dapat dimanfaatkan dengan variasi suhu karbonisasi

Pada Gambar 4.2 menunjukkan adanya perbedaan penyimpanan biogas antara menggunakan tabung kosong dengan tabung yang berisi karbon aktif. Penyimpanan biogas pada tabung kosong hanya mampu menyimpan biogas sebanyak 8 gram, sedangkan penyimpanan biogas yang menggunakan karbon aktif dari tempurung kelapa yang di karbonisasi dengan suhu 425°C, 525°C, dan 625°C dengan ukuran *mesh* 35-45 dan daya aktivasi 800 watt selama 20 menit menggunakan *microwave* dapat menyimpan biogas dengan kapasitas yang lebih banyak. Hal ini terjadi di karenakan molekul gas bergerak bebas di dalam tabung kosong, kemudian tabung yang berisi karbon aktif, pori-pori dari karbon aktif akan mengikat molekul gas yang bergerak.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan kesimpulan yang didapat bahwa massa penyimpanan biogas semakin bertambah dengan meningkatnya suhu karbonisasi yang menggunakan karbon aktif dari tempurung kelapa. Dimana sampel terbaik pada penelitian ini untuk menyimpan biogas yaitu suhu karbonisasi 625°C mampu menyimpan lebih banyak biogas serta menghasilkan pengurangan massa penyimpanan saat dikeluarkan yang paling besar dibandingkan dengan suhu karbonisasi yang lebih rendah dan tidak menggunakan karbon aktif

Daftar Pustaka

- [1] Christy, P. M., Gopinath, L. R., & Divya, D. (2014). *A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production*

- through enzymes and microorganisms*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34, 167-173.
- [2] Alhasan, S., Carriveau, R., & Ting, D. K. (2016). *A review of adsorbed natural gas storage technologies*. International Journal of Environmental Studies, 73(3), 343-356.
- [3] Veluswamy, H. P., Kumar, A., Seo, Y., Lee, J. D., & Linga, P. (2018). *A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates*. Applied Energy, 216, 262-285.
- [4] Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). *Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: a review*. Environmental pollution, 252, 352-365.
- [5] Mohammad-Khah, A., & Ansari, R. (2009). *Activated charcoal: preparation, characterization and applications: a review article*. Int J Chem Tech Res, 1(4), 859-864.
- [6] Huang, P. H., Cheng, H. H., & Lin, S. H. (2015). *Adsorption of carbon dioxide onto activated carbon prepared from coconut shells*. Journal of Chemistry, 2015(1), 106590.
- [7] Daud, W. M. A. W., Ali, W. S. W., & Sulaiman, M. Z. (2000). *The effects of carbonization temperature on pore development in palm-shell-based activated carbon*. Carbon, 38(14), 1925-1932.
- [8] Pertiwiningrum, A. 2015. *Buku Instalasi Biogas*. Pusat kajian Pembangunan Peternakan Nasional. Fakultas Peternakan Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- [9] Negara, D. N. K. P., Nindhia, T. G. T., Surata, I. W., & Sucipta, M. (2016). *Potensi bambu swat (gigantochloa verticillata) sebagai material karbon aktif untuk adsorbed natural gas (ANG)*. Jurnal Energi dan Manufaktur Vol, 9(2), 174- 179.
- [10] Suhartana. (2006). *“Pemanfaatan tempurung kelapa sebagai bahan baku arang aktif dan aplikasinya untuk penjernihan air sumur di Desa Belor Kecamatan Ngaringan Kabupaten Grobogan,”* Berk. Fis.,09, pp. 151–156.

	<p>Abed Nego Ersan menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p>
<p>Judul tugas akhir: Studi Eksperimental Aktivasi Karbon Aktif Tempurung Kelapa Menggunakan <i>Microwave</i> Dengan Variasi Ukuran <i>Mesh</i> Dan Suhu Karbonisasi Untuk Penyimpanan Biogas</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 1998. Kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh November tahun 2001. Lalu, S3 di <i>Shibaura Institute of Technology</i>, Jepang tahun 2007, dan Profesi di Universitas Udayana pada tahun 2020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan <i>fuel cell</i>, penyimpan energi, dan <i>green energy</i>. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana</p>	

	<p>Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 di Program studi Teknik Mesin, Universitas Udayana pada tahun 1996. Kemudian menyelesaikan studi S2 di Program studi teknik mesin, Universitas Brawijaya tahun 2006.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.</p>	

Karakteristik Penyimpanan Biogas Menggunakan Karbon Aktif Tempurung Kelapa Dengan Variasi Waktu Aktivasi *Microwave*

I Gusti Agung Putu Denny Putra Wardinatha¹, Ketut Astawa¹, Made Sucipta^{1*}
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Dengan meningkatnya kebutuhan energi global dan kesadaran akan pentingnya energi terbarukan, biogas menjadi salah satu alternatif yang menarik. Namun, tantangan dalam penyimpanan biogas menjadi kendala utama dalam pemanfaatannya secara luas. Karbon aktif khususnya yang berasal dari tempurung kelapa, memiliki potensi besar sebagai adsorben untuk mengatasi permasalahan ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kapasitas penyimpanan biogas dengan memvariasikan waktu aktivasi 10 menit, 20 menit, dan 30 menit pada karbon aktif berbasis tempurung kelapa yang diaktivasi menggunakan *microwave*. Pemanfaatan biogas dihasilkan dari mengurangi jumlah massa penyimpanan biogas saat pengisian dengan jumlah sisa massa penyimpanan biogas yang dikeluarkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu aktivasi 30 menit menghasilkan kapasitas penyimpanan biogas yang lebih tinggi, maka pemanfaatan biogas juga semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif berbasis tempurung kelapa yang dioptimasi dapat menjadi solusi yang efektif untuk penyimpanan biogas.

Kata kunci: Biogas, Karbon aktif, Waktu aktivasi, Penyimpanan biogas, *Adsorbed Natural Gas (ANG)*, *microwave*.

Abstract

With the increasing global energy demand and awareness of the importance of renewable energy, biogas is becoming one of the attractive alternatives. However, the challenge of biogas storage is a major obstacle to its widespread utilization. Activated carbon especially from coconut shells, has great potential as an adsorbent to overcome this problem. This study aims to optimize the storage capacity of biogas by varying the activation time of 10 minutes, 20 minutes, and 30 minutes on microwave-activated coconut shell-based activated carbon. Biogas utilization results from reducing the amount of biogas storage mass when filling with the remaining amount of biogas storage mass released. The results showed that the activation time of 30 minutes resulted in a higher biogas storage capacity, hence the biogas utilization also increased. This suggests that optimized coconut shell-based activated carbon can be an effective solution for biogas storage.

Keywords: Biogas, Activated carbon, Activation time, Biogas storage, Adsorbed Natural Gas (ANG), Microwave.

1. Pendahuluan

Dengan meningkatnya kebutuhan energi global dan semakin terbatasnya sumber daya fosil, pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti biogas menjadi semakin penting dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar konvensional [1]. Biogas yang dihasilkan melalui proses anaerobik dari bahan organik tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi yang bersih, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan pengelolaan limbah [2]. Namun, meskipun potensi besar biogas dalam mendukung transisi energi berkelanjutan, tantangan terkait penyimpanan dan transportasi biogas yang efisien masih perlu diatasi untuk mendorong penerapan teknologi ini secara lebih luas [3].

Salah satu solusi untuk mengatasi tantangan penyimpanan dan transportasi biogas adalah dengan memanfaatkan karbon aktif, yang dikenal memiliki luas permukaan besar dan kemampuan adsorpsi tinggi terhadap gas, sehingga meningkatkan efisiensi penyimpanan biogas. Karbon aktif telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama dalam penyimpanan gas seperti biogas, karena karakteristiknya yang memungkinkan penyimpanan dan penyerapan gas secara efektif [4]. Salah satu bahan baku yang umum digunakan untuk produksi karbon aktif adalah tempurung kelapa. Tempurung

kelapa dipilih karena selain mudah didapat dan murah, material ini juga merupakan sumber daya terbarukan yang ramah lingkungan. Penggunaan tempurung kelapa sebagai bahan dasar tidak hanya mendukung konsep keberlanjutan, tetapi juga menghasilkan karbon aktif berkualitas tinggi dengan struktur pori yang ideal untuk aplikasi penyimpanan gas [5].

Metode aktivasi karbon aktif menggunakan *microwave* telah terbukti lebih efisien dan cepat dibandingkan dengan metode konvensional, seperti pemanasan tungku. Aktivasi dengan *microwave* bekerja melalui pemanasan dielektrik yang langsung memanaskan bahan dari dalam, sehingga mempercepat proses aktivasi dan memungkinkan distribusi panas yang lebih merata. Hal ini berpengaruh pada peningkatan kualitas pori-pori dan luas permukaan karbon aktif yang dihasilkan [6]. Selain itu, metode ini secara signifikan mengurangi konsumsi energi yang dibutuhkan dalam proses aktivasi, menjadikannya lebih ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan metode konvensional [7]. Dengan demikian, penggunaan *microwave* dalam proses aktivasi karbon aktif menjadi solusi yang unggul dalam hal efisiensi waktu dan energi.

Berdasarkan uraian di atas, pemanfaatan karbon aktif dari tempurung kelapa sebagai media penyimpanan biogas menunjukkan potensi yang

signifikan dalam mengatasi tantangan penyimpanan energi terbarukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi ukuran *mesh* dan waktu aktivasi terhadap kapasitas penyimpanan biogas dari karbon aktif yang dihasilkan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi penyimpanan energi berbasis karbon aktif, serta memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai optimasi penggunaan sumber daya terbarukan.

2. Dasar Teori

2.1 Biogas

Biogas merupakan suatu gas yang mudah terbakar yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri-bakteri anaerob. Fermentasi terjadi secara alami dengan menghabiskan waktu yang relatif lama. Biogas termasuk ke dalam salah satu energi terbarukan dimana sumber bahan bakunya akan selalu ada selama kehidupan masih berlangsung [8].

2.2 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah senyawa amorf yang dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon atau arang yang kemudian diolah secara khusus untuk meningkatkan daya adsorpsinya. Kemampuan karbon aktif untuk mengadsorpsi gas dan senyawa kimia tertentu menunjukkan sifat adsorpsi yang selektif tergantung pada ukuran atau volume pori-pori dan luas permukaannya. Daya serap karbon aktif mencapai tingkatan yang tinggi, berkisar antara 25%-100% dari berat karbon aktif. Karbon aktif bisa dibuat dari berbagai macam bahan, selama bahan tersebut mengandung unsur karbon. Kriteria bahan dasar dari karbon aktif, yaitu memiliki unsur anorganik yang rendah, memiliki daya tahan yang baik, dan mudah diaktivasi.

2.3 Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa merupakan limbah padat dari hasil olahan kelapa yang telah di ambil daging kelapa untuk mendapatkan santan (coconut milk). Tempurung kelapa pada umumnya digunakan untuk bahan bakar, keperluan rumah tangga atau 13 souvenir. tempurung kelapa yang tidak dimanfaatkan secara maksimal sehingga bisa menjadi limbah di masyarakat. Pemanfaatan tempurung kelapa sebagai bahan bakar sudah lama dikenal masyarakat dan saat ini digunakan oleh masyarakat untuk [keperluan rumah tangga, usaha maupun industri. Pemanfaatan briket arang tempurung kelapa telah mendorong kajian teknologi energi pengganti yang terbarukan [9].

2.4 Adsorbed Natural Gas (ANG)

Adsorbed Natural Gas adalah teknologi dimana gas alam diserap oleh pori-pori bahan adsorben pada tekanan yang relatif rendah. ANG merupakan metode alternatif yang cukup efektif untuk menyimpan gas alam. Penggunaan metode ANG membutuhkan material adsorben dalam wadah

penyimpanan sebagai media penyimpanan bahan alam gas, salah satunya adalah karbon aktif [10].

3. Metode Penelitian

3.1 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel bebas yang dianalisis adalah aktivasi karbon aktif, yang terdiri dari tiga kategori waktu aktivasi: 10 menit, 20 menit, dan 30 menit. Selain itu, ukuran *mesh* karbon aktif yang digunakan juga beragam, yaitu *mesh* 35-45, *mesh* 45-70, dan *mesh* 70-230. Sementara itu, untuk menjaga konsistensi, variabel kontrol yang diterapkan mencakup suhu karbonisasi yang ditetapkan pada 725°C, daya aktivasi sebesar 800 watt, dan *holding time* selama 2 jam. Adapun variabel terikat dalam penelitian ini meliputi karakteristik karbon aktif yang dihasilkan serta massa penyimpanan biogas, yang menjadi fokus utama untuk mengukur efektivitas dari proses aktivasi yang dilakukan.

3.2 Pembuatan Karbon Aktif

Proses pembuatan karbon aktif dari tempurung kelapa melibatkan dua tahap utama, yaitu karbonisasi dan aktivasi. Pada tahap karbonisasi, tempurung kelapa dipanaskan dalam kondisi tanpa udara pada suhu tinggi hingga komponen volatilnya menguap, menyisakan struktur karbon berpori. Proses ini dilakukan dengan memanaskan tempurung 0 dalam reaktor pada suhu yang meningkat bertahap hingga mencapai 725°C, lalu dijaga pada suhu tersebut selama 2 jam. Setelah dingin, karbon hasil karbonisasi kemudian dihaluskan dan diayak menjadi beberapa ukuran *mesh*. Tahap selanjutnya adalah aktivasi. Karbon hasil karbonisasi diaktivasi menggunakan *microwave* dengan bantuan aliran gas nitrogen untuk mencegah oksidasi. Proses aktivasi dilakukan dengan variasi waktu dan ukuran *mesh* untuk mendapatkan kondisi optimal. Hasil akhir dari proses ini adalah karbon aktif dengan luas permukaan yang besar dan kemampuan adsorpsi yang tinggi.

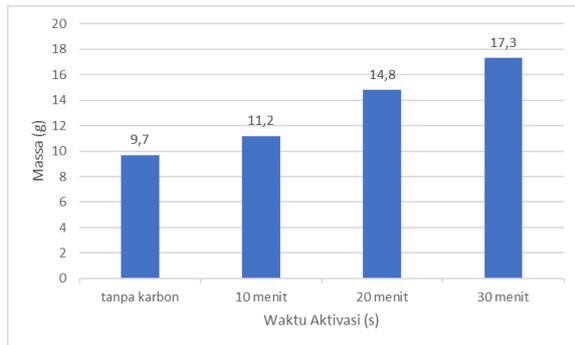
3.3 Pengujian Penyimpanan Biogas

Pengujian penyimpanan biogas ini bertujuan untuk menganalisis kemampuan berbagai jenis karbon aktif dalam menyerap dan menyimpan biogas. Proses pengujian diawali dengan menyiapkan sampel karbon aktif hasil karbonisasi dengan variasi waktu aktivasi. Masing-masing sampel karbon aktif kemudian dimasukkan ke dalam tabung penyimpanan yang telah divakum. Biogas kemudian dialirkan ke dalam tabung hingga mencapai tekanan tertentu. Setelah itu, komposisi biogas yang tersimpan diukur sebelum dan sesudah penyimpanan untuk melihat adanya perubahan. Proses ini diulang untuk semua variasi karbon aktif. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh waktu aktivasi terhadap kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap biogas.

4. Hasil dan Pembahasan

Perubahan massa biogas tersimpan dan saat biogas di keluarkan pada tekanan 100 Psi dengan

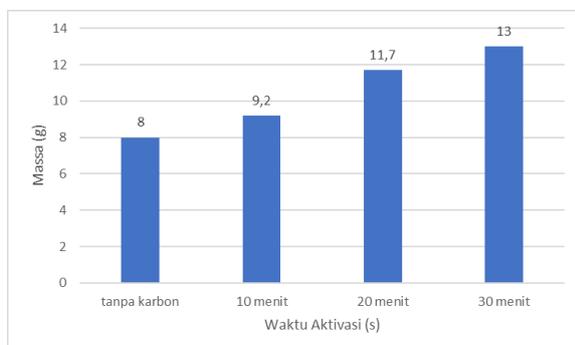
perbandingan variasi *mesh* dan waktu aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Massa biogas tersimpan dan biogas dikeluarkan pada tekanan 100 Psi dengan variasi waktu aktivasi dan ukuran *mesh* 35-45

Gambar 4.1 menunjukkan adanya perbedaan penyimpanan biogas antara penyimpanan tanpa karbon aktif dengan yang berisi karbon aktif. Penyimpanan biogas pada tabung tanpa karbon aktif hanya mampu menyimpan biogas sebanyak 9,7 gram, sedangkan penyimpanan biogas yang menggunakan karbon aktif dari tempurung kelapa yang di karbonisasi dengan suhu 725°C dan di aktivasi menggunakan *microwave* dengan daya 800 watt dan dengan ukuran *mesh* 35-45 selama 10 menit sebagai adsorben mampu menyimpan biogas hingga 11,2 gram. Lalu karbon aktif yang diaktivasi selama 20 menit mampu menyimpan 14,8 gram, Sedangkan karbon aktif yang di aktivasi selama 30 menit mampu menyimpan 17,3 gram pada tekanan 100 psi pada masing-masing sampel. Hal ini terjadi di karenakan molekul gas yang bergerak bebas di dalam tabung kosong, kemudian tabung yang berisi karbon aktif, pori-pori dari karbon aktif akan mengikat molekul gas yang bergerak. Dari grafik tersebut dapat di simpulkan bahwa massa penyimpanan biogas mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya lama waktu aktivasi pada karbon aktif.

Biogas yang dapat dimanfaatkan dengan perbandingan variasi *mesh* dan waktu aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Biogas yang dimanfaatkan

Gambar 4.2 menunjukkan seberapa banyak

biogas yang dapat dikeluarkan dari tabung penyimpanan biogas sehingga dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar. Perbandingan jumlah massa yang tersimpan pada tekanan 100 Psi dan jumlah massa biogas saat dikeluarkan, maka untuk mencari berapa biogas yang dimanfaatkan dengan cara mengurangi jumlah massa biogas saat pengisian pada tekanan 100 Psi dengan jumlah massa biogas yang dikeluarkan pada tekanan 0 Psi. Sampel dari hasil pengurangan terbesar merupakan yang paling efektif untuk menyimpan biogas. Dari data hasil pengurangan, sampel dengan suhu karbonisasi 725°C yang di aktivasi dengan variasi ukuran *mesh* 35-45 dan waktu aktivasi 30 menit mendapat massa terbesar. Oleh karena itu, karbon aktif dengan variasi ini merupakan yang paling efektif dalam penyimpanan biogas.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka kesimpulan yang didapatkan bahwa semakin bertambahnya waktu aktivasi karbon aktif, maka massa penyimpanan biogas semakin bertambah. Pada penyimpanan biogas dengan waktu aktivasi pada *microwave* selama 30 menit mampu menyimpan lebih banyak biogas serta menghasilkan lebih banyak biogas yang dapat dimanfaatkan dibandingkan dengan waktu aktivasi yang lain dan tabung tanpa karbon aktif.

Daftar Pustaka

- [1] Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G., & Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859.
- [2] Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., & Iyyappan, J. (2018). Biogas production—A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and sustainable Energy reviews*, 90(April), 570-582.
- [3] Biloé, S., Goetz, V., & Guillot, A. (2002). Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas production and applications in the sustainable energy transition. *Journal of Energy*, 2022(1), 8750221.
- [4] Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas production and applications in the sustainable energy transition. *Journal of Energy*, 2022(1), 8750221.
- [5] Sekhon, S. S., Kaur, P., & Park, J. S. (2021). From coconut shell biomass to oxygen reduction reaction catalyst: Tuning porosity and nitrogen doping. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111173.

- [6] Grekov, D., Pré, P., & Alappat, B. J. (2020). *Microwave* mode of heating in the preparation of porous carbon materials for adsorption and energy storage applications—an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109743.
- [7] Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C., Almeida, M. F., Rivera-Utrilla, J., & Sánchez-Polo, M. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review. *Journal of environmental management*, 85(4), 833-846.
- [8] Pertiwiningrum, A. 2015. Buku Instalasi Biogas. Pusat kajian Pembangunan Peternakan Nasional. Fakultas Peternakan Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- [9] Panwara, N.L., S.C. Kaushik, Kothari, Surendra, 2011, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, *A Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1513-1524.
- [10] Negara, D. N. K. P., Nindhia, T. G. T., Surata, I. W., & Sucipta, M. (2016). Potensi bambu swat (*gigantochloa verticillata*) sebagai material karbon aktif untuk adsorbed natural gas (ANG). *Jurnal Energi dan Manufaktur* Vol, 9(2), 174-179.

	<p>I Gusti Agung Putu Denny Putra Wardinatha menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p>
<p>Judul tugas akhir: Studi Eksperimental Aktivasi Karbon Aktif Tempurung Kelapa Menggunakan Microwave Dengan Variasi Ukuran Mesh Dan Waktu Aktivasi Untuk Penyimpanan Biogas.</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 1998. Kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh November tahun 2001. Lalu, S3 di <i>Shibaura Institute of Technology</i>, Jepang tahun 2007, dan Profesi di Universitas Udayana pada tahun 2020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan <i>fuel cell</i>, penyimpan energi, dan <i>green energy</i>. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.</p>	

	<p>Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 di Program studi Teknik Mesin, Universitas Udayana pada tahun 1996. Kemudian menyelesaikan studi S2 di Program studi teknik mesin, Universitas Brawijaya tahun 2006.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.</p>	

Pemanfaatan Karbon Aktif Tempurung Kelapa Sebagai Adsorben Untuk Penyimpanan Biogas Dengan Variasi Daya Aktivasi

I Nyoman Aditya Bismadiatmika Darma¹, Ketut Astawa¹, Made Sucipta^{1*}

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Ketergantungan dunia pada energi fosil yang semakin menipis mendorong pencarian alternatif energi bersih dan berkelanjutan. Biogas yang dihasilkan dari berbagai jenis biomassa, menawarkan potensi besar sebagai sumber energi alternatif. Namun, tantangan utama dalam pemanfaatannya adalah penyimpanan biogas yang memerlukan volume besar dan teknologi yang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi penyimpanan biogas menggunakan teknologi Adsorbed Natural Gas (ANG) dengan karbon aktif yang dihasilkan dari tempurung kelapa. Karbon aktif diproduksi melalui proses aktivasi microwave dengan variasi daya 700 sampai 900 watt dengan waktu aktivasi 20 menit, untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan biogas. Biogas yang disimpan dapat menjadi sumber energi alternatif. Ditunjukkan bahwa dengan menggunakan daya aktivasi 900 watt, jumlah biogas yang dihasilkan dan digunakan paling optimal, terlihat dari pengurangan massa penyimpanan saat dikeluarkan yang paling besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif yang diaktivasi dengan daya 900 watt memiliki kapasitas penyimpanan biogas tertinggi. Dengan demikian, karbon aktif dari tempurung kelapa berpotensi sebagai adsorben yang efektif untuk penyimpanan biogas.

Kata kunci: Biogas, Karbon aktif, Daya aktivasi, Penyimpanan biogas, Aktivasi *Microwave*.

Abstract

The world's dependence on dwindling fossil fuels is driving the search for clean and sustainable energy alternatives. Biogas, produced from various types of biomass, offers great potential as an alternative energy source. However, the main challenge in its utilization is biogas storage which requires large volumes and efficient technology. This study aims to analyze the efficiency of biogas storage using Adsorbed Natural Gas (ANG) technology with activated carbon produced from coconut shells. Activated carbon is produced through a microwave activation process with a power variation of 700 to 900 watts with an activation time of 20 minutes, to increase the storage capacity of biogas. The stored biogas can be an alternative energy source. It was shown that by using 900 watts of activation power, the most optimal amount of biogas was produced and used, as seen from the largest reduction in storage mass when released. The results showed that activated carbon activated at 900 watts had the highest biogas storage capacity. Thus, activated carbon from coconut shell has potential as an effective adsorbent for biogas storage.

Keywords: Biogas, Activated carbon, Activation power, Biogas storage, Microwave activation.

1. Pendahuluan

Ketergantungan dunia pada energi fosil yang semakin menipis mendorong pencarian alternatif energi bersih dan berkelanjutan. Biogas yang dapat dihasilkan dari berbagai jenis biomassa, menawarkan potensi besar sebagai sumber energi alternatif [1]. Namun, kendala utama dalam pemanfaatan biogas adalah tantangan dalam penyimpanan. Sifatnya yang mudah memuai membutuhkan volume penyimpanan yang besar dan teknologi yang efisien [2]. Salah satu teknologi yang menjanjikan untuk mengatasi masalah ini adalah *Adsorbed Natural Gas* (ANG). Konsep ANG memungkinkan penyimpanan gas dalam tekanan rendah dengan memanfaatkan material berpori seperti karbon aktif sebagai adsorben [3].

Teknologi ANG memanfaatkan material penyerap seperti karbon aktif, yang memiliki porositas tinggi dan luas permukaan yang besar untuk mengadsorpsi molekul gas [4]. Karakteristik ini memungkinkan karbon aktif menyimpan volume gas yang lebih besar pada tekanan yang lebih rendah. Efisiensi teknologi ini sangat tergantung pada kualitas

karbon aktif yang digunakan, termasuk kemampuan material tersebut dalam menyerap dan melepaskan gas secara efisien [5]. Oleh karena itu, pengelolaan panas selama proses adsorpsi dan desorpsi juga menjadi faktor penting untuk menjaga kinerja penyimpanan gas yang optimal. Dengan demikian, teknologi ANG menjadi solusi yang lebih hemat energi dan lebih aman dibandingkan dengan metode penyimpanan bertekanan tinggi, menjadikannya pilihan yang relevan dalam upaya penyimpanan energi terbarukan, khususnya untuk biogas.

Karbon aktif yang dihasilkan dari limbah tempurung kelapa telah terbukti menjadi material yang sangat efektif dalam aplikasi penyimpanan gas, termasuk biogas. Tempurung kelapa dipilih karena sifatnya yang memiliki struktur pori alami dan kestabilan termal yang baik, membuatnya cocok untuk digunakan dalam proses adsorpsi gas [6]. Dalam penelitian ini, karbon aktif diaktivasi melalui pemanasan menggunakan *microwave* dengan tujuan memodifikasi struktur pori dan meningkatkan luas permukaan material [7]. Hal ini dilakukan untuk

mengoptimalkan sifat adsorptif karbon aktif, sehingga kapasitas penyimpanannya menjadi lebih efisien. Selain itu, ukuran *mesh* juga memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi adsorpsi, di mana ukuran partikel yang lebih kecil dapat meningkatkan luas permukaan karbon aktif, sehingga meningkatkan kemampuannya dalam menyerap gas [8]. Dengan kombinasi aktivasi dan variasi ukuran *mesh*, karbon aktif diharapkan dapat mencapai karakteristik optimal untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan biogas.

Dengan potensi karbon aktif dari tempurung kelapa dan kebutuhan akan teknologi penyimpanan energi yang bersih, penelitian ini akan berkontribusi pada pengembangan sistem penyimpanan biogas berbasis ANG yang lebih optimal. Fokus utama penelitian adalah pada optimasi proses aktivasi karbon aktif melalui variasi daya *microwave*.

2. Dasar Teori

2.1 Karbon Aktif

Karbon aktif adalah bahan karbon yang diproses untuk memiliki luas permukaan yang sangat besar dan struktur pori yang bervariasi, mulai dari ukuran mikro (0–2 nm) hingga ukuran makro (lebih dari 50 nm) [9]. Karbon aktif memiliki sifat fisika, kimia, dan mekanik yang unggul, memungkinkan kapasitas adsorpsinya tinggi. Oleh karena itu, material ini dapat dimanfaatkan sebagai sensor gas, elektrode superkapasitor, pemulihan polutan organik dari air minum, penghilangan zat terlarut dari larutan berair, serta sebagai media penyaring air. Penyerapan yang dapat dilakukan dengan karbon aktif sangat tinggi, yakni sekitar 25% sampai dengan 100% dari massa karbon aktif [10].

2.2 Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa sebagai limbah dari proses produksi VCO (*Virgin Coconut Oil*) tersebut sebenarnya memiliki potensial besar sebagai produk yang bernilai jual karena karakteristik kekuatan, keawetan, dan ketahanannya terhadap air. Hasil samping dari buah kelapa yang dianggap sebagai limbah adalah tempurung kelapa dan sabut kelapa. Yang selama ini hanya digunakan sebagai bahan bakar tradisional untuk memasak. Padahal arang tempurung kelapa mempunyai manfaat yang sangat banyak, salah satunya dimanfaatkan karbonaktif. Dari sekian banyak bahan arang aktif aktif, tempurung kelapa dipilih dikarenakan kandungan selulosa, hemiselulosa, lignin, karbon sangat tinggi dibandingkan bahan/ biomassa yang lain [11].

2.3 Adsorbed Natural Gas (ANG)

Adsorbed Natural Gas (ANG) merupakan teknologi penyimpanan gas alam dengan cara diserap oleh adsorben berpori seperti karbon aktif pada tekanan yang relatif rendah (7–40 bar) dan pada temperatur kamar. Saat ini, teknologi ANG lebih banyak diterapkan di sektor transportasi dan menjadi pilihan yang lebih kompetitif dibandingkan CNG [12]. Namun, penggunaan teknologi ANG di sektor rumah tangga masih belum berkembang secara

komersial. Hal ini disebabkan oleh ketiadaan spesifikasi teknis untuk tabung ANG yang dapat dijadikan acuan dalam proses pembuatannya. Spesifikasi teknis ini sangat penting untuk memastikan kualitas tabung dan memenuhi standar keselamatan bagi pengguna. Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk merancang dan menetapkan spesifikasi teknis tabung ANG yang dapat diterapkan di sektor rumah tangga melalui pembuatan dan pengujian tabung. Dengan demikian, ANG menjadi pilihan alternatif yang memadai untuk penyimpanan gas alam. Salah satu material adsorben yang sesuai untuk digunakan dalam metode ANG adalah karbon aktif.

3. Metode Penelitian

3.1 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa variabel yang digunakan, yaitu variabel bebas, variabel kontrol, dan variabel terikat. Variabel bebas yang digunakan adalah daya aktivasi karbon aktif. Daya aktivasi yang digunakan meliputi tiga tingkatan, yaitu 700 watt, 800 watt, dan 900 watt. Suhu karbonisasi dan waktu aktivasi karbon aktif dikendalikan konstan sebagai variabel kontrol, yaitu pada suhu 725°C dengan waktu *holding time* selama 2 jam. Sedangkan variabel terikatnya mencakup karakteristik karbon aktif dan massa penyimpanan biogas. Perubahan pada variabel bebas diharapkan akan memengaruhi karakteristik karbon aktif yang dihasilkan serta efisiensi penyimpanan biogas.

3.2 Pembuatan Karbon Aktif

Proses pembuatan karbon aktif dimulai dengan tahap karbonisasi. Pada tahap ini, langkah-langkah yang dilakukan meliputi persiapan alat dan bahan, termasuk membersihkan dan mengeringkan tempurung kelapa. Tempurung kelapa kemudian dipotong dengan ukuran sekitar $\pm 1 \times 1$ cm sebelum ditimbang dan dimasukkan ke dalam reaktor. Proses pemanasan bertahap dilakukan, mulai dari suhu awal 25°C hingga mencapai 125°C dalam waktu 7 menit, kemudian suhu dinaikkan hingga 225°C dan 325°C, masing-masing juga dalam waktu 7 menit, hingga akhirnya mencapai suhu 425°C. Setelah itu, reaktor dimatikan dan dibiarkan hingga suhunya turun kembali ke suhu ruangan. Langkah ini diulangi hingga suhu karbonisasi sebesar 725°C tercapai. Setelah karbonisasi selesai, karbon yang dihasilkan ditimbang dan disimpan dalam wadah tertutup.

Selanjutnya adalah tahap aktivasi karbon aktif. Pada tahap ini, karbon hasil karbonisasi dari tempurung kelapa dipersiapkan dan ditumbuk serta disaring dengan ukuran *mesh* 35–45. Karbon dengan suhu karbonisasi 725°C ditimbang dan dimasukkan ke dalam tabung silinder yang diletakkan di alat *microwave*. Aktivasi dimulai dengan memeriksa aliran listrik untuk mencegah gangguan arus pendek, lalu *microwave* dihidupkan dengan daya awal 700 watt selama 20 menit, sambil dialirkan gas nitrogen untuk menjaga lingkungan bebas O₂. Setelah proses

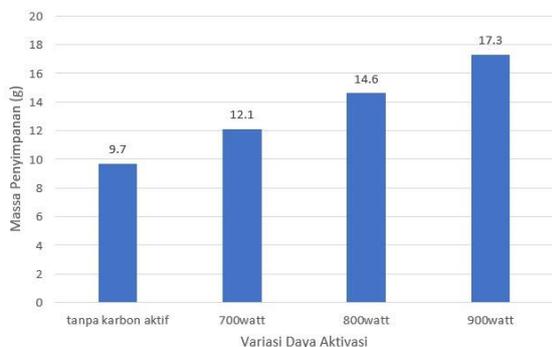
selesai, karbon yang telah diaktivasi ditimbang kembali dan disimpan dalam wadah tertutup. Proses ini diulangi untuk variasi daya aktivasi sebesar 800 watt dan 900 watt. Proses aktivasi ini bertujuan untuk meningkatkan porositas dan kualitas karbon sehingga siap digunakan untuk penyimpanan biogas.

3.3 Pengujian Penyimpanan Biogas

Pengujian penyimpanan biogas dimulai dengan mempersiapkan karbon aktif yang telah dikarbonisasi pada suhu 725°C dan diaktivasi menggunakan *microwave* dengan daya 700, 800, dan 900 watt selama 20 menit. Selanjutnya, biogas dimasukkan ke dalam plastic bag yang telah divakum. Massa tabung penyimpanan dalam keadaan kosong diukur, kemudian karbon aktif dengan ukuran *mesh* 35-45 ditimbang dan dimasukkan ke dalam tabung tersebut. Tabung divakum hingga -20 psi, lalu biogas dari plastic bag dialirkan ke tabung menggunakan kompresor hingga tekanan mencapai 100 psi. Setelah itu, massa tabung yang berisi karbon aktif dan biogas diukur kembali. Komposisi biogas yang keluar diukur dengan sensor setelah katup tabung dibuka, dan massa tabung setelah pelepasan sebagian biogas dicatat. Proses ini diulang untuk setiap variasi daya aktivasi dan hasilnya dianalisis serta disajikan dalam tabel dan grafik untuk melihat hubungan antara daya aktivasi karbon aktif dengan efisiensi penyimpanan biogas.

4. Hasil dan Pembahasan

Perubahan massa biogas tersimpan dengan perbandingan *mesh* 35-45 dan daya aktivasi 700, 800, 900 watt ditunjukkan pada Gambar 4.1.

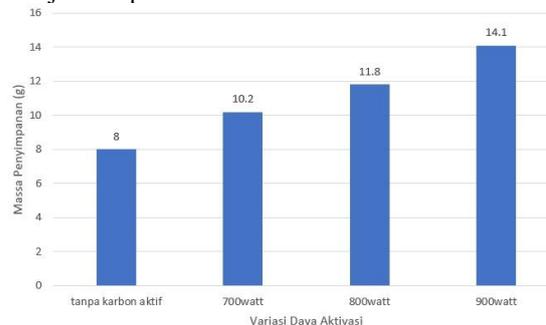


Gambar 4.1 Massa biogas tersimpan pada tekanan 100 Psi dengan variasi daya aktivasi

Berdasarkan Gambar 4.1, terlihat adanya korelasi antara daya aktivasi karbon aktif dengan kapasitas penyimpanan biogas. Semakin tinggi daya aktivasi yang diberikan, semakin besar pula massa biogas yang dapat tersimpan. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh peningkatan luas permukaan spesifik dan volume pori pada karbon aktif akibat proses aktivasi. Daya aktivasi yang lebih tinggi menghasilkan lebih banyak pori-pori kecil dan kompleks pada struktur karbon aktif, sehingga memberikan lebih banyak ruang kosong untuk molekul biogas berinteraksi. Dengan demikian, karbon aktif dengan

daya aktivasi yang lebih tinggi memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar, memungkinkan penyimpanan biogas dalam jumlah yang lebih banyak.

Biogas yang dapat dimanfaatkan dengan perbandingan variasi *mesh* dan daya aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Biogas yang dimanfaatkan

Gambar 4.2 menunjukkan seberapa banyak biogas yang dapat dikeluarkan dari tabung penyimpanan biogas sehingga dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar. Perbandingan jumlah massa yang tersimpan pada tekanan 100 Psi dan jumlah massa biogas saat dikeluarkan, maka untuk mencari berapa biogas yang dimanfaatkan dengan cara mengurangi jumlah massa biogas yang tersimpan pada tekanan 100 Psi dengan jumlah massa biogas yang dikeluarkan pada tekanan 0 Psi. Sampel dari hasil pengurangan terbesar merupakan yang paling efektif untuk menyimpan biogas. Dari data hasil pengurangan, sampel dengan suhu karbonisasi 725°C yang diaktivasi dengan variasi daya 900watt menghasilkan massa terbesar. Oleh karena itu, karbon aktif dengan variasi ini merupakan yang paling efektif dalam menyimpan biogas.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan bahwa massa penyimpanan biogas bertambah dengan meningkatnya daya aktivasi. Pada penyimpanan biogas menggunakan adsorben karbon aktif tempurung kelapa dengan daya aktivasi pada *microwave* sebesar 900 watt mampu menyimpan lebih banyak biogas dibandingkan dengan daya aktivasi yang lain dan tabung tanpa karbon aktif.

Daftar Pustaka

- [1] Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Biogas production and applications in the sustainable energy transition. *Journal of Energy*, 2022(1), 8750221.
- [2] Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., & Kumar, A. (2020). Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123052.

- [3] Biloé, S., Goetz, V., & Guillot, A. (2002). Optimal design of an activated carbon for an *Adsorbed Natural Gas* storage system. *Carbon*, 40(8), 1295-1308
- [4] Tagliabue, M., Farrusseng, D., Valencia, S., Aguado, S., Ravon, U., Rizzo, C., & Mirodatos, C. (2009). Natural gas treating by selective adsorption: Material science and chemical engineering interplay. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), 553-566.
- [5] Reza, M. S., Yun, C. S., Afroze, S., Radenahmad, N., Bakar, M. S. A., Saidur, R., & Azad, A. K. (2020). Preparation of activated carbon from biomass and its' applications in water and gas purification, a review. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 208-238.
- [6] Yang, J., Yue, L., Hu, X., Wang, L., Zhao, Y., Lin, Y., & Guo, L. (2017). Efficient CO₂ capture by porous carbons derived from coconut shell. *Energy & Fuels*, 31(4), 4287-4293.
- [7] Hesas, R. H., Daud, W. M. A. W., Sahu, J. N., & Arami-Niya, A. (2013). The effects of a *microwave* heating method on the production of activated carbon from agricultural waste: A review. *Journal of Analytical and Applied pyrolysis*, 100, 1-11.
- [8] An, Y., Fu, Q., Zhang, D., Wang, Y., & Tang, Z. (2019). Performance evaluation of activated carbon with different pore sizes and functional groups for VOC adsorption by molecular simulation. *Chemosphere*, 227, 9-16.
- [9] Nicholas, A. F. (2019). Activated Carbon for Shape-Stabilized Phase Change Material. *Micro and Nano Technologies*, 279-308.
- [10] Mammoria, C. D. (2016). Pembuatan Karbon Aktif Dari Kulit Durian Sebagai Adsorben Zat Warna Dari Limbah Cair Tenun Songket Dengan Aktivator Naoh. *Journal Of Forest Science* 2016, 4-33.
- [11] Iskandar.2012. Analisis Unsur Karbon Aktif Tempurung Kelapa dengan Metode Analisis Ultimat (Ultimate Analysis). *Jurnal Fisika*.
- [12] California Energy Commission. (2017). *Adsorbed Natural Gas On-Board Storage for Light-Duty Vehicles*. California.

	<p>I Nyoman Aditya Bismadiatmika Darma menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p>
<p>Judul tugas akhir: Kajian Eksperimental Aktivasi Karbon Aktif Dari Tempurung Kelapa Menggunakan Microwave Dengan Variasi Daya Aktivasi Dan Ukuran Mesh Untuk Penyimpanan Biogas.</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 1998. Kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh November tahun 2001. Lalu, S3 di <i>Shibaura Institute of Technology</i>, Jepang tahun 2007, dan Profesi di Universitas Udayana pada tahun 2020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan <i>fuel cell</i>, penyimpanan energi, dan <i>green energy</i>. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana</p>	

	<p>Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 di Program studi Teknik Mesin, Universitas Udayana pada tahun 1996. Kemudian menyelesaikan studi S2 di Program studi teknik mesin, Universitas Brawijaya tahun 2006.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.</p>	

Perancangan Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Sistem Turbin Uap Dengan Fluida Kerja Refrigerant-134A

Fadhil Anam, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma, I Wayan Bandem Adnyana
Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Sinar matahari menghasilkan energi melalui cahayanya, dengan salah satu bentuk energi yang bisa dimanfaatkan adalah energi panas. Penelitian ini mengevaluasi penggunaan energi panas dari radiasi sinar matahari yang akan diubah menjadi energi listrik melalui sebuah prototipe. Prototipe ini terdiri dari beberapa komponen utama, yang bekerja secara berurutan: kolektor surya, penukar panas (heat exchanger), dan turbin uap. Kolektor surya berfungsi menangkap energi radiasi matahari untuk memanaskan fluida udara di dalamnya, yang kemudian diarahkan ke penukar panas. Penukar panas berbentuk pipa konsentrik akan mentransfer panas dari fluida udara ke fluida kerja refrigerant-134A. Fluida kerja refrigerant-134A yang berubah menjadi uap akan mengalir menuju turbin uap dan menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator dinamo, sehingga saat turbin beroperasi, energi listrik dihasilkan. Pada kondisi ideal teoritis, prototipe pembangkit listrik tenaga surya dengan sistem turbin uap menerima energi input sebesar 2245,909 W dan menghasilkan output energi sebesar 751,904 W. Sedangkan pada kondisi non-ideal, hasil simulasi menunjukkan energi input sebesar 2225,004 W dengan output energi sebesar 523,711 W. Efisiensi sistem pada kondisi ideal adalah 33%, sementara pada kondisi non-ideal adalah 24%.

Kata kunci: Prototipe, Rancang Bangun, Energi Radiasi, Kolektor Surya, Heat Exchanger, Refrigerant-134A, Turbin Uap, Energi Listrik.

Abstract

Sunlight produces energy through its light, with one form of energy that can be utilized is heat energy. This research evaluates the use of heat energy from solar radiation which will be converted into electrical energy through a prototype. This prototype consists of several main components, which work sequentially: solar collector, heat exchanger, and steam turbine. The function of the solar collector is to capture solar radiation energy to heat the air fluid inside, which is then directed to the heat exchanger. A heat exchanger in the form of a concentric pipe will transfer heat from the air fluid to the refrigerant-134A working fluid. The refrigerant-134A working fluid which turns into steam will flow to the steam turbine and drive the turbine which is connected to the dynamo generator, so that when the turbine operates, electrical energy is produced. In theoretical ideal conditions, the prototype solar power plant with a steam turbine system receives input energy of 2245,909 W and produces an energy output of 751,904 W. Meanwhile, in non-ideal conditions, the simulation results show an energy input of 2225,004 W with an energy output amounting to 523,711 W. The system efficiency in ideal conditions is 33%, while in non-ideal conditions it is 24%.

Keywords: Prototype, Design, Radiation Energy, Solar Collector, Heat Exchanger, Refrigerant-134A, Steam Turbine, Electrical Energy.

1. Pendahuluan

Listrik adalah suatu hal yang penting bagi kehidupan manusia masa kini. Hampir semua peralatan dalam kebutuhan kita sehari-hari membutuhkan listrik untuk dapat digunakan. Karena itu listrik menjadi sangat penting sehingga dibutuhkan pembangunan infrastruktur untuk pembangkit listrik di setiap negara agar tidak mengalami kekurangan listrik. Di Indonesia sendiri, pembangkit listrik sudah menggunakan banyak metode untuk membuat energi dari yang terbarukan dan juga yang tidak terbarukan. Tetapi masih banyak juga pembangkit listrik yang menggunakan energi tidak terbarukan seperti batu bara yang masih banyak digunakan di Indonesia. Hal ini berdampak buruk karena batu bara akan diperkirakan habis sekitar 70 tahun mendatang [1].

Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sendiri sudah lama dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik di Indonesia dan menjadi salah satu pembangkit listrik yang paling banyak digunakan di

Indonesia untuk membangkitkan listrik yang berkurang setiap tahunnya karena energi yang tidak dapat diperbarukan. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah fasilitas atau sistem yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Potensi PLTS di Indonesia sangat besar karena negara ini terletak di tengah-tengah garis khatulistiwa, yang menghasilkan paparan sinar matahari yang stabil dan konsisten sepanjang hampir setiap bulan, berkat kondisi kepulauan tropisnya [2].

Meskipun demikian, kesadaran pemerintah Indonesia terhadap potensi dan pengembangan PLTS masih kurang signifikan [3]:

1. pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) mengharuskan pengeluaran besar, dan saat ini hanya mampu bersaing secara ekonomis dengan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD).
2. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) memerlukan sebidang tanah yang sangat besar

untuk menghasilkan energi dengan efisien dan mencukupi, kira-kira 1 meter persegi untuk setiap 100 watt peak (Wp).

3. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) hanya dapat efektif menghasilkan listrik saat siang hari, sehingga memerlukan penggunaan baterai penyimpanan untuk menjalankan operasinya pada malam hari.
4. Indonesia masih harus mengimpor *Ingot silicone crystalline* sebagai bahan pokok dalam pembuatan sel surya karena belum diproduksi secara lokal.
5. Jika akses ke pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sulit, maka seringkali perawatan yang diperlukan akan mengakibatkan masalah dan biaya tambahan, lebih banyak dari pada model pembangkit listrik lainnya.
6. Pemantauan yang lebih intensif diperlukan pada sistem PLTS dibandingkan dengan model pembangkit listrik lainnya, yang dapat meningkatkan biaya produksi.

Pada kebanyakan sistem PLTS konvensional, panel surya akan mengambil energi dari matahari dalam bentuk foton. Foton tersebut akan berinteraksi dengan elektron yang terdapat dalam sel surya untuk menghasilkan energi listrik yang telah diubah. Namun, penting untuk menyadari bahwa sinar matahari yang mencapai bumi memiliki berbagai jenis bentuk. Selain menggunakan energi dalam foton, energi panas dari sinar matahari dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik melalui sistem turbin uap. Dalam sistem ini, panas digunakan untuk memanaskan fluida kerja hingga menjadi uap, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Energi ini kemudian dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui penggunaan generator tambahan. Realisasi konsep ini mungkin terjadi jika fluida kerja dapat menghasilkan uap berkualitas tinggi untuk menggerakkan turbin uap pada suhu yang dihasilkan oleh energi panas matahari.

Sebelumnya, konsep prototipe ini telah diajukan oleh Kusuma (2022) dengan menggunakan ammonia sebagai fluida kerja. Selain itu, gagasan mengenai rancangan prototipe ini sebelumnya diajukan dalam Program Kreativitas Mahasiswa oleh Alejos (2017) dengan menggunakan metana sebagai fluida kerja.

Dari hasil tersebut, penulis tertarik melaksanakan penelitian mengenai perancangan prototipe PLTS menggunakan sistem turbin uap dengan fluida kerja refrigerant-134A. Pada studi ini, penulis akan mendapatkan data hasil energi listrik dari prototipe PLTS yang telah dibuat kemudian akan dianalisis secara efisiensi keseluruhan sistem.

2. Landasan Teori

2.1 Penelitian Terdahulu

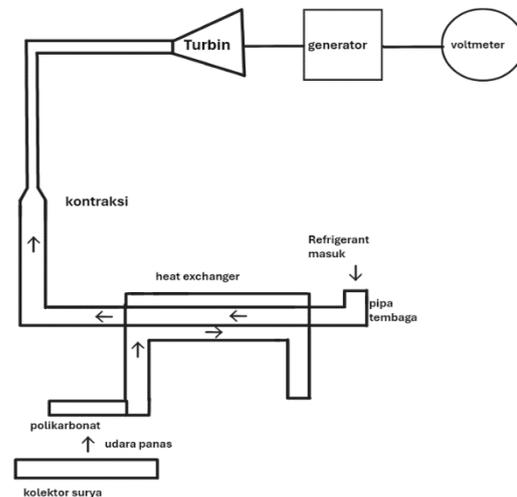
Dalam sistem PLTS umumnya, panel surya berperan sebagai komponen utama yang menerima sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik. Proses ini terjadi karena energi surya yang diterima dalam bentuk foton berinteraksi dengan elektron dalam sel surya, mengubahnya menjadi energi listrik. Tingkat intensitas cahaya memiliki pengaruh yang signifikan pada proses ini; semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima, semakin besar energi yang dibawa oleh foton, dan akibatnya, menghasilkan energi listrik yang lebih besar.

Alejos melakukan studi dengan menciptakan sebuah prototipe PLTS yang tidak bergantung pada energi dari foton, tetapi memanfaatkan energi panas dari matahari. Energi panas ini dimanfaatkan untuk memberikan entalpi yang cukup tinggi pada fluida kerja, yaitu metana (CH_4), sehingga dapat digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Dengan memiliki critical temperature sekitar $-82,5^\circ\text{C}$, harapannya adalah bahwa penelitian ini akan menghasilkan sekitar 1000 W energi listrik per m^2 kolektor surya berbentuk pelat datar, dengan tingkat efisiensi di atas 40% [4].

Sampai sekarang, belum ada penelitian yang mengkaji prototipe PLTS serupa yang menggunakan refrigerant-134A sebagai fluida kerja.

2.2 Desain Kerja Prototipe PLTS

Prototipe yang disusun oleh penulis tidak bergantung pada panel surya sebagai komponen utama dalam mengonversi energi surya menjadi energi listrik.



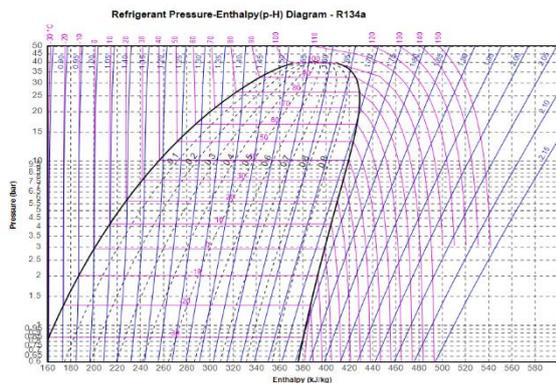
Gambar 1. Rancangan Prototipe PLTS Sistem Turbin Uap

Sebaliknya, energi surya akan diserap oleh kolektor surya berbentuk pelat datar yang terbuat dari besi. Panas dari sinar matahari yang diterima oleh pelat akan meningkatkan suhu permukaan pelat menjadi sekitar 70°C . Suhu ini akan digunakan untuk memanaskan fluida kerja pada heat exchanger yang memiliki entalpi yang tinggi agar mendapatkan tekanan yang tinggi, sehingga mampu menggerakkan turbin uap. Turbin uap ini kemudian mengubah energi tersebut menjadi energi listrik melalui generator. Lalu

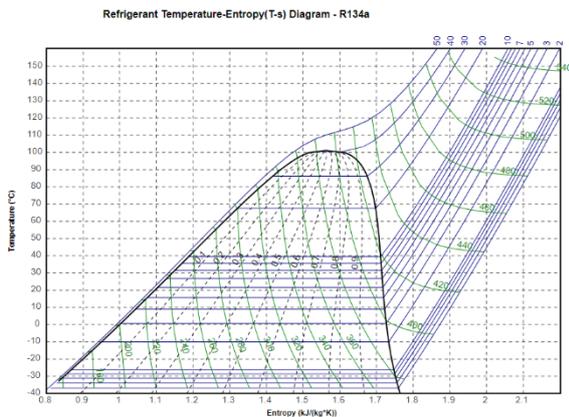
energi listrik yang keluar akan dilakukan pengetesan menggunakan volt meter untuk diukur seberapa besar energi yang dikeluarkan.

2.3 Refrigerant-134A Sebagai Fluida Kerja

Dalam rangkaian penelitian ini, R-134A dipilih sebagai fluida kerja utama karena memiliki titik didih lebih rendah dibandingkan dengan air. R-134A juga menunjukkan resistensi yang baik terhadap reaksi dengan zat asing, sehingga kemungkinan kerusakan pada komponen prototipe PLTS menjadi lebih kecil. Selain itu, R-134A memiliki ketersediaan yang baik di Indonesia karena sering digunakan. Di bawah ini adalah beberapa karakteristik dari R-134A.



Gambar 2. Diagram p-H Refrigerant-134A



Gambar 3. Diagram T-s Refrigerant-134A

Dengan rumus efisiensi kita dapat menghitung perbandingan energi yang dikeluarkan dengan energi yang digunakan.

$$Efisiensi = \frac{Energi\ Terpakai}{Total\ Energi\ Massa} \times 100\%$$

3. Metode Penelitian

3.1 Metode Pengambilan Data

Penelitian dan pengujian ini menerapkan metode eksperimental serta pendekatan deskriptif yang berdasarkan data yang diperoleh dari uji coba. Data yang dimanfaatkan dalam pengujian mencakup:

1. Informasi penting, adalah informasi yang diperoleh secara langsung dari perkiraan dan pembacaan pada satuan instrumentasi dan alat penduga pada setiap pengujian.

2. Informasi pembantu, merupakan informasi mengenai atribut fluida kerja yang digunakan dalam pengujian

Informasi yang diperoleh dari hasil eksperimen ditangani dengan menggunakan rumusan yang ada, kemudian hasil estimasi tersebut disajikan dalam bentuk tabel dan diagram.

Batasan yang akan dinilai dalam tes ini adalah:

1. Energi listrik yang dihasilkan prototipe PLTS.
2. Efisiensi sistem prototipe PLTS secara keseluruhan.

Strategi pengujian dibagi menjadi beberapa fase, yaitu:

1. Perancangan dan pembuatan prototipe PLTS sistem turbin uap.
2. Pengujian prototipe PLTS dengan fluida kerja R-134A.

3.2 Bahan

Bahan yang akan di gunakan dalam penelitian dan pengujian ini adalah:

1. Refrigerant-134A



Gambar 4. Refrigerant-134A

Refrigerant-134A digunakan sebagai fluida kerja pada prototipe PLTS menggunakan sistem turbin uap pada penelitian ini.

2. Cat Hitam



Gambar 5. Cat Hitam

Cat Hitam digunakan untuk mengecat pelat datar.

3.3 Alat

Penelitian dan pengujian ini menggunakan alat sebagai berikut:

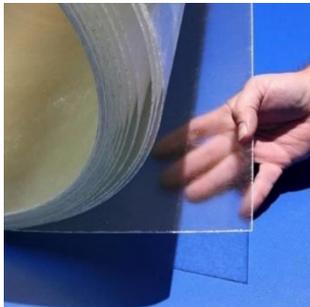
1. Pelat Datar



Gambar 6. Pelat Datar

Pelat datar yang digunakan berbahan dasar besi dengan tebal 6 mm dan ukuran 2 x 1 m, digunakan sebagai surya kolektor dari prototipe PLTS.

2. Polikarbonat



Gambar 7. Polikarbonat

Polikarbonat yang digunakan adalah bertipe *solid* dengan ukuran 2 x 1 m, digunakan sebagai isolator pada prototipe PLTS.

3. Pipa PVC dan Elbow PVC



Gambar 8. Pipa PVC



Gambar 9. Elbow PVC

Pipa PVC digunakan sebagai jalur fluida kerja memutar siklus dalam sistem prototipe PLTS. Elbow PVC digunakan untuk membuat jalur sistem sedemikian rupa sehingga memiliki siklus balik dan tertutup.

4. Blade Turbin Uap



Gambar 10. Blade Turbin Uap

Blade turbin uap digunakan untuk menangkap uap dalam sistem untuk kemudian diubah menjadi energi mekanik.

5. DC Generator



Gambar 11. DC Generator

Generator digunakan untuk menghasilkan listrik dari energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin uap.

6. Ember Plastik



Gambar 12. Ember Plastik

Ember plastik digunakan untuk menampung sisa uap yang mengalir ke bagian akhir sistem untuk didinginkan dan dipakai kembali.

7. Termometer



Gambar 13. Termometer

Termometer digunakan untuk mengukur suhu pada titik-titik tertentu dalam sistem prototipe PLTS.

8. Voltmeter



Gambar 14. Voltmeter

Voltmeter ini digunakan untuk mengukur tegangan yang akan dihasilkan dari perputaran turbin setelah didorong oleh fluida kerja refrigerant-134A.

3.4 Prosedur Pengujian

Dalam penelitian ini, prosedur yang dilakukan adalah mempersiapkan alat dan bahan lalu dilanjutkan dengan proses pengujian dengan rincian per tahapan sebagai berikut.

3.4.1 Persiapan Alat dan Bahan

Berikut adalah tahapan-tahapan persiapan alat dan bahan:

1. Membuat kolektor surya dengan menggunakan pelat datar berbahan dasar besi yang memiliki ketebalan 6 mm dan dimensi sebesar 2 x 1 m. Pelat ini dicat dengan warna hitam agar dapat menyerap sebanyak mungkin energi panas dari matahari. Bagian bawah kolektor surya dilapisi dengan lapisan isolasi dari bahan polikarbonat untuk mengurangi kehilangan energi panas ke lingkungan sekitarnya. Energi panas yang terakumulasi digunakan untuk memanaskan fluida kerja.
2. Proses pembuatan prototipe PLTS melibatkan penggunaan sistem turbin uap dengan menggunakan R-134A sebagai fluida kerja. Dalam pengaturan sederhana siklus uap Rankine, boiler digantikan oleh kolektor surya, yang bertanggung jawab untuk mentransfer panas ke fluida kerja R-134A dalam sistem. Sistem pipa PVC disusun dan dihubungkan sedemikian rupa sehingga membentuk sistem tertutup yang memungkinkan aliran fluida kerja melalui komponen-komponen prototipe PLTS. Setelah mengakumulasi entalpi dari kolektor surya, fluida dialirkan melalui kompresor yang ditempatkan setelahnya.

Fluida kerja yang mendapatkan entalpi tinggi dan berubah bentuk menjadi uap akan dialirkan dalam pipa PVC menggunakan kompresor ukuran kecil menuju ke rancangan turbin uap sederhana. *Blade*

turbin uap akan dikopel oleh generator DC pada urutan berikutnya sehingga dapat digerakkan oleh uap. *Blade* turbin uap yang memutar akan menghasilkan energi mekanik yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator DC. Fluida kerja sisa akan dialirkan menuju ke ember plastik yang digunakan sebagai sistem pendingin dan penampung uap apabila sudah terpakai dan berubah fase kembali menjadi cair.

3.4.2 Proses Pengujian

Penelitian ini menggunakan rancangan yang dibuat oleh penulis untuk melakukan pengujian. Fluida yang digunakan adalah R-134A dengan prototipe PLTS sistem turbin uap. Saat semua alat dan bahan sudah dibuat dan siap digunakan maka pengujian dapat dilaksanakan sesuai dengan jam dan durasi pengujian, yaitu 11.00-12.00, 12.00-13.00, 13.00-14.00, dan 14.00-15.00.

Pertama, fluida kerja disalurkan melalui sistem pipa PVC pada prototipe PLTS. Kompresor diaktifkan untuk memungkinkan aliran fluida kerja. Pada setiap jam pengujian, dilakukan pengujian energi maksimum yang diserap oleh kolektor surya dengan menggunakan kesetimbangan energi. Kemudian, data suhu diambil dari setiap titik dalam siklus Rankine untuk memperoleh entalpi yang dihasilkan. Dengan data ini, kerja netto dan energi input dalam sistem dihitung untuk mengestimasi efisiensi prototipe secara keseluruhan.

Pengujian dilakukan setiap jam selama tiga hari, dengan tujuan mendapatkan data rata-rata harian. Setelah pengujian selesai, akan diperoleh informasi mengenai energi yang dihasilkan oleh sistem dan efisiensi keseluruhan prototipe PLTS dengan R-134A.

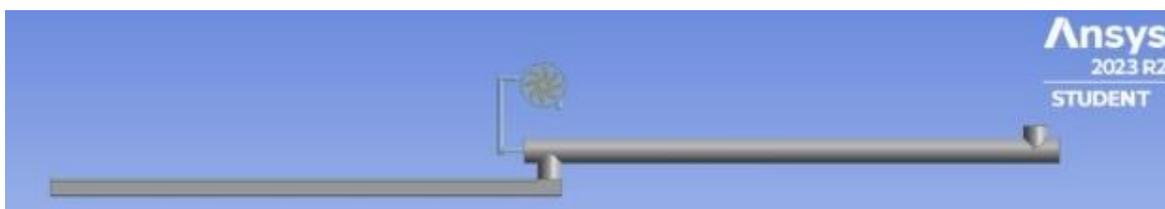
4. Hasil Analisa dan Simulasi

Analisa Hasil Simulasi

1) Analisa Hasil *Geometry*

Pembuatan *geometry prototype* menggunakan ANSYS design Modeller. *Geometry* meliputi hasil susunan secara langsung dari tiga komponen utama dalam *prototype* ini, yaitu kolektor surya, *heat exchanger* dan turbin uap.

Pada komponen kolektor surya, menggunakan pelat datar besi di bagian bawah dengan dimensi 2,1 x 1 x 0,007 m yang di atasnya sejauh 5 cm diletakkan polikarbonat dengan dimensi 2 x 1 x 0,07 m.



Gambar 15. *Geometry Prototype*

Susunan ini menyebabkan celah 10 cm untuk udara panas mengalir ke komponen *heat exchanger*.



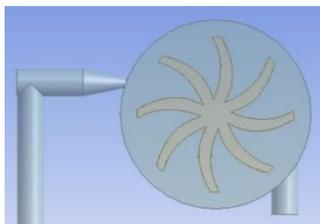
Gambar 16. Polikarbonat

Pada komponen *heat exchanger*, menggunakan pipa *outer* PVC yang di aliri udara panas dengan diameter 4 inch dan pipa *inner* tembaga yang dialiri refrigerant-134A dengan diameter 1 inch. Komponen *heat exchanger* memiliki panjang 2 m dengan tipe aliran permukaan *counter-flow*.



Gambar 17. Heat Exchanger

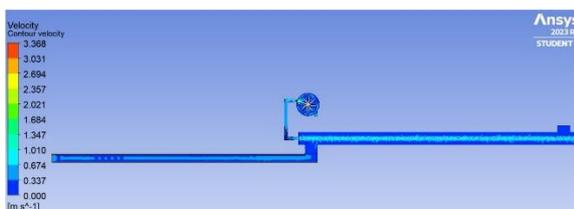
Pada komponen turbin uap, menggunakan turbin dengan diameter 12,7 cm. sebelum memasuki bagian putaran turbin, refrigerant-134A yang berupa uap akan melewati *nozzle* untuk menambah kecepatan dengan diameter awal 1 inch menjadi diameter akhir 1/5 inch.



Gambar 18. Turbin Uap

2) Analisa Hasil Simulasi Pada Domain Kecepatan

Dengan menggunakan *geometry* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan software ANSYS CFX pada *domain* tekanan dengan kecepatan fluida kerja pada 0,5 m/s. Didapatkan nilai kecepatan tertinggi pada 3,368 m/s dan kecepatan terendah 0,337 m/s.



Gambar 19. Prototype Pada Domain Kecepatan

Pada komponen kolektor surya, udara masuk dari inlet sebelah kiri komponen dengan kecepatan

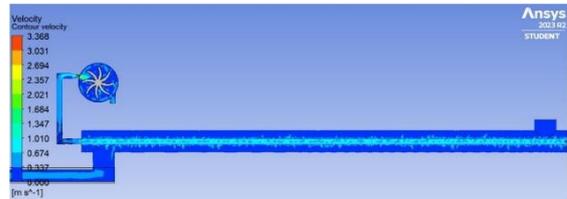
awal diatur pada 0,5 m/s. lewat celah yang dibuat di ujung kanan komponen, udara panas memasuki komponen *heat exchanger* pada kecepatan berkisar di



0,674 m/s.

Gambar 20. Kolektor Surya Pada Domain Kecepatan

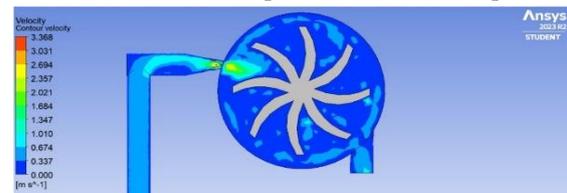
Pada komponen *heat exchanger*, kecepatan udara *outer pipe* dinilai 0,337 m/s sampai 0,674 m/s, kecepatan refrigerant-134A pada *inner pipe* pada 0,674 m/s, ada sedikit kenaikan kecepatan hingga mencapai 1,010 m/s yang terdapat pada pembatas *inner pipe* tembaga dikarenakan terjadinya proses konveksi. Udara panas mengalir pada *outlet pipe* PVC dari kiri ke kanan, sementara refrigerant-134A mengalir pada *inner pipe* tembaga dari kanan ke kiri.



Gambar 21. Heat Exchanger Pada Domain Kecepatan

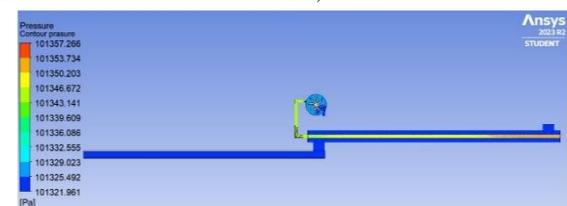
Pada komponen turbin uap, sebelum memasuki *nozzle* kecepatan 1,010 m/s dan setelah melewati *nozzle* kecepatan uap menjadi 2,021 m/s. Pada *outlet* turbin uap kecepatan bernilai 0,674 m/s.

Gambar 22. Turbin Uap Pada Domain Kecepatan



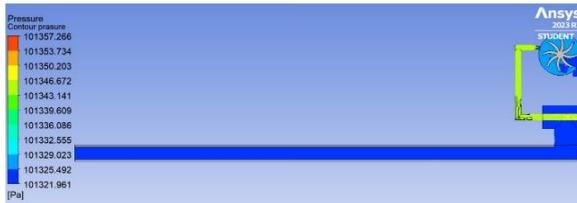
3) Analisa Hasil Simulasi Pada Domain Tekanan

Dengan menggunakan *geometry* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan menggunakan software ANSYS CFX pada domain tekanan. Didapatkan tekanan tertinggi pada 101357,266 Pa dan nilai tekanan terendah 101321,961 Pa.



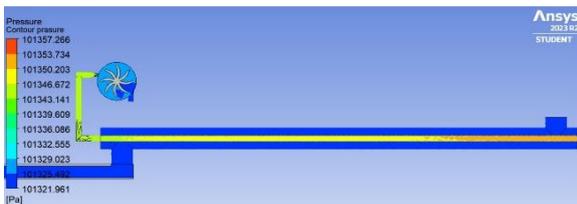
Gambar 23. Prototype Pada Domain Tekanan

Pada kolektor surya, tekanan stabil pada nilai 102325,492 Pa.



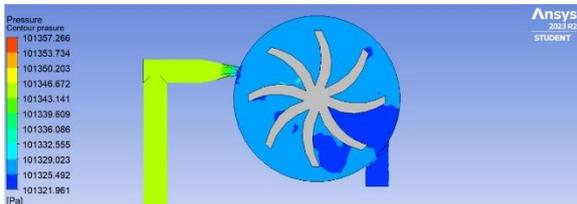
Gambar 24. Kolektor Surya Pada Domain Tekanan

Pada komponen *heat exchanger*, tekanan pada *outer inlet* dan *outlet pipe* stabil pada 101321,492 Pa. Pada *inner pipe*, tekanan pada *inlet* bernilai 101353,734 Pa dan *outlet* bernilai pada 101346,672 Pa.



Gambar 25. Heat Exchanger Pada Domain Tekanan

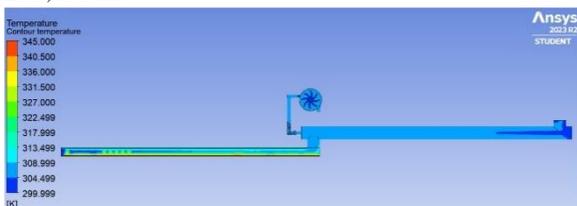
Pada komponen turbin uap, sebelum memasuki *nozzle*, uap memiliki tekanan senilai 101346,672 Pa dan setelah melewati *nozzle* bernilai 101329,023 Pa. sementara di *outlet* uap turbin memiliki tekanan senilai 101321,961 Pa.



Gambar 26. Turbin Uap Pada Domain Tekanan

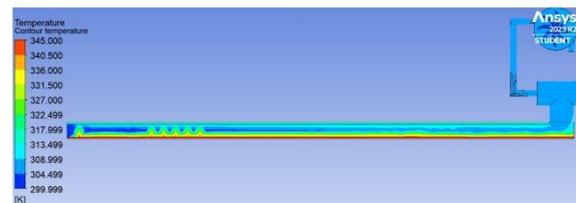
4. Analisa Hasil Simulasi Pada Domain Temperatur

Dengan menggunakan *geometry* yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS CFX pada *domain* temperature. Didapatkan nilai temperature tinggi dengan nilai temperature 345,000 K dan nilai terendah pada 299,999 K.



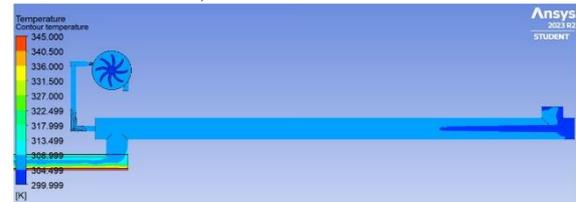
Gambar 27. Prototype Pada Domain Temperatur

Pada komponen kolektor surya pelat datar diberi nilai awal simulasi pada 345,000 K kepada polikarbonat 315,000 K. di dalamnya terjadi *free convection* yang mengakibatkan udara pada suhu normal awal 300 K naik temperturnya. Suhu udara pada *inlet* kolektor surya bernilai 304,499 K dan pada *outlet* kolektor surya menuju ke *heat exchanger* bernilai 308,999 K. temperatur akhir hasil simulasi pelat datar besi bernilai 345 K, sementara itu untuk polikarbonat memiliki temperatur akhir *inlet* senilai 317,999 K dan *outlet* menuju *heat exchanger* bernilai 313,499 K. untuk fluida udara hasil akhir simulasi memiliki temperatur *inlet* 299,999 K dan *outlet* 313,499K.



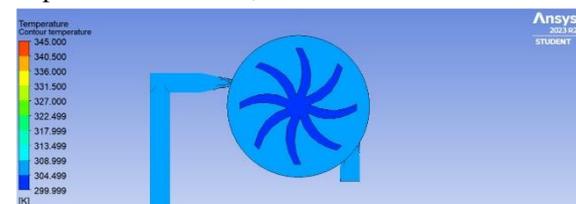
Gambar 28. Kolektor Surya Pada Domain Temperatur

Pada komponen *heat exchanger*, *inner pipe* yang dialiri refrigerant-134A memiliki nilai awal temperatur dalam simulasi adalah 300 K, sementara itu nilai temperatur pada *outer pipe* tempat fluida udara panas bekerja adalah merupakan hasil dari temperatur *outlet* kolektor surya. Pada akhir simulasi, *inlet outer pipe* yang dialiri udara panas memiliki temperatur 304,499 K dan nilai temperatur pada *outlet*-nya pada 308,999 K. Pada *inlet inner pipe* yang dialiri refrigerant-134A memiliki nilai temperatur 299,999 K pada *outlet*-nya memiliki temperatur 308,999 K. Sementara itu temperature permukaan *inner pipe* tembaga pada *inlet* bernilai 300 K dan pada *outlet* bernilai 308,999 K.



Gambar 29. Heat Exchanger Pada Domain Temperatur

Pada komponen turbin uap, temperature sebelum dan sesudah melewati *noozle* memiliki nilai 308,499 K. Pada *outlet* turbin uap memiliki temperatur sebesar 308,499 K.



Gambar 30. Turbin Uap Pada Domain Temperatur

Perbandingan Data Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

1) Kecepatan

Perbandingan kecepatan paling signifikan terjadi setelah uap refrigerant-134A keluar dari *nozzle*.

Tabel 1. Perbandingan Data Kecepatan

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Kecepatan fluida kerja refrigerant-134A setelah melewati <i>nozzle</i>	V	1,511	2,133	3,737	2,500	m/s

2) Tekanan

Perbedaan tekanan yang dicantumkan adalah data tekanan maksimum dan tekanan minimum yang dapat dicapai fluida refrigerant-134A dalam *prototype*.

Tabel 2. Perbandingan Data Tekanan

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Tekanan minimum fluida kerja refrigerant-134A	p_i	101321,961	101317,875	101295,281	100000,000	Pa
Tekanan maksimum fluida kerja refrigerant-134A	p_o	101357,266	101423,125	101674,578	150000,000	

3) Temperatur

Data temperatur yang diambil adalah dari beberapa titik yang ada di dalam *prototype* yang dibutuhkan dalam perhitungan analisi data lebih lanjut.

Tabel 3. Perbandingan Data Temperatur

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Temperatur permukaan pelat datar	T_j / T_s	345,000	345,000	345,000	345,000	K
Temperatur permukaan polikarbonat	T_i	313,499	313,499	313,500	315,000	
Temperatur atmosfer	T_a	317,999	317,999	318,000	300,000	
Temperatur fluida kerja refrigerant-134A sebelum memasuki <i>heat exchanger</i>	T_{in}	300,000	300,000	300,000	300,000	
Temperatur fluida kerja refrigerant-134A sesudah melewati <i>heat exchanger</i>	T_{out}	308,999	308,999	304,499	315,000	
Temperatur permukaan pipa inlet <i>heat exchanger</i>	T_{in}	308,999	308,999	304,499	315,000	

4) Energi

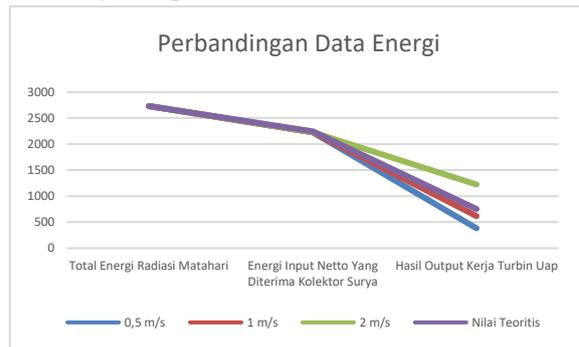
Data energi yang tercantum merupakan energi total dari radiasi matahari, energi *input netto* yang diterima oleh *prototype*, dan kerja turbin (energi *output prototype*). Untuk nilai teoritis didapatkan dari hasil perhitungan rumus termodinamika.

Tabel 4. Perbandingan Data Energi

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Total energi radiasi matahari	Q_r	2730,774	2730,774	2730,774	2730,774	W
Energi <i>input netto</i> yang diterima oleh kolektor surya	Q_c	2225,004	2225,004	2225,017	2245,909	
Hasil <i>output</i> kerja turbin uap	W_t	382,101	617,298	1224,009	751,904	

Gambar 31. Grafik Perbandingan Data Energi

3. Laju Perpindahan Panas

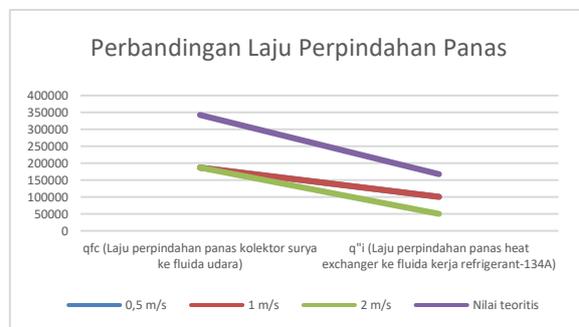


Laju perpindahan panas terjadi pada fluida di dalam komponen kolektor surya dan juga *heat exchanger* yang disebabkan oleh, sesuai dengan masing-masing *free convection* dan juga *counter-flow heat exchanger in a concentric tube annulus*.

Tabel 5. Perbandingan Data Laju Perpindahan Panas

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Laju perpindahan panas kolektor surya ke fluida udara	q_c	186904,862	186904,862	186896,138	342524,047	W/m^2
Laju perpindahan panas <i>heat exchanger</i> ke fluida kerja refrigerant-134A	q_i	100528,396	100528,396	50258,612	167565,945	

Gambar 32. Perbandingan Laju Perpindahan Panas



4. Efisiensi *Prototype*

Dengan membagi energi *output* dengan energi *input* yang diterima oleh *prototype*, maka nilai efisiensi *prototype* didapatkan.

Tabel 6. Perbandingan Data Efisiensi *Prototype*

Data	Lambang	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
		0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Efisiensi keseluruhan <i>prototype</i>	$\eta_{\text{prototipe}}$	17%	28%	55%	33%	%

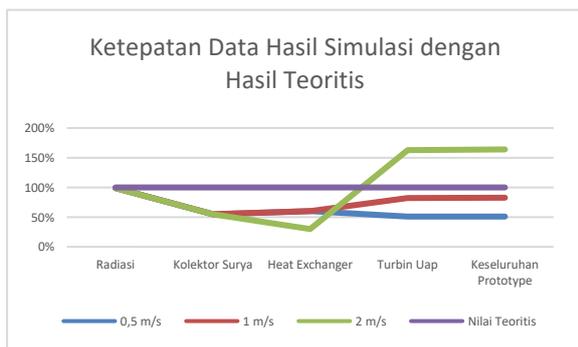
Dari tabel di atas, didapat bahwa efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh *prototype* pada kondisi ideal adalah 33%, sementara itu untuk efisiensi tertinggi ada pada kecepatan fluida kerja 2 m/s yaitu 55%.

Perbandingan Ketepatan Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

Apabila data ideal hasil teoritis dipakai sebagai acuan maksimum hasil data maksimum *prototype*, maka data hasil simulasi dapat dibagi dengan data teoritis tersebut untuk menciptakan perbandingan apabila *prototype* ada di dalam kondisi ideal maupun kurang ideal.

Tabel 7. Perbandingan Ketepatan Data Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

Data	Nilai Simulasi			Nilai Teoritis	Satuan
	0,5 m/s	1 m/s	2 m/s		
Radiasi	99%	99%	99%	100%	%
Kolektor Surya	55%	55%	55%	100%	
Heat Exchanger	60%	60%	30%	100%	
Turbin Uap	51%	82%	163%	100%	
Keseluruhan <i>Prototype</i>	51%	83%	164%	100%	



Gambar 33. Grafik Ketepatan Data Hasil Simulasi Dengan Hasil Teoritis

Untuk radiasi netto, kondisi ideal menghasilkan energi hingga 100%, sementara kondisi tidak ideal pada semua kecepatan hanya mampu menghasilkan 99% besarnya saja.

Untuk kolektor surya, kondisi ideal menghasilkan laju perpindahan panas ke fluida kerja sebesar 342524,047 W/m², sedangkan saat tidak ideal

hanya mampu menghasilkan 55% besarnya saja pada ketiga kecepatan fluida kerja.

Untuk *heat exchanger*, kondisi ideal menghasilkan laju perpindahan panas ke refrigerant-134A sebesar 167565,945 W/m², sementara kondisi tidak ideal pada kecepatan 0,5 m/s dan 1 m/s mampu menghasilkan 60% dan untuk kecepatan 2 m/s hanya sebesar 30% saja.

Untuk turbin uap, kondisi ideal menghasilkan energi sebesar 751,904 W, sementara kondisi tidak ideal hanya mampu menghasilkan 51% untuk 0,5 m/s, 82% untuk 1 m/s, dan 163% untuk 2 m/s.

Untuk keseluruhan *prototype*, kondisi ideal menghasilkan efisiensi energi output sebesar 33%, sementara untuk simulasi pada kecepatan 0,5 m/s mendapatkan efisiensi sebesar 17%, untuk 1 m/s yaitu 28%, dan untuk 2 m/s yaitu 55% besar efisiensinya.

5. Kesimpulan Dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian berupa data teoritis dan hasil simulasi, maka dapat disimpulkan:

1. *Prototype* pembangkit listrik tenaga surya system turbin uap pada kondisi ideal teoritis mendapatkan energi *input* sebesar 2245,909 W dan menghasilkan energi output sebesar 751,904 W. Dengan demikian *prototype* pada kondisi ini memiliki efisiensi sebesar 33%.
2. *Prototype* pembangkit listrik tenaga surya sistem turbin uap pada kecepatan fluida kerja 2 m/s memiliki hasil akhir simulasi tertinggi yaitu mendapatkan energi input sebesar 2225,017 W dan menghasilkan energi output sebesar 1224,009 W. Dengan demikian *prototype* pada kondisi ini memiliki efisiensi sebesar 55%
3. Dengan membuat hasil ideal teoritis sebagai hasil maksimum *prototype* yang kemudian dipakai sebagai perbandingan hasil simulasi, maka pada kondisi non-ideal *prototype* dengan kecepatan 2 m/s dapat bekerja sebesar 164% efisiensinya.

Saran

Adapun saran yang diberikan setelah penelitian ini adalah:

1. Variasi jarak antara pelat datar besi dan polikarbonat dengan yang lebih kecil untuk mendapatkan hasil energi input yang lebih tinggi.
2. Variasi bentuk dan ukuran heat exchanger dengan memperbesar perbandingan antara *outer pipe* dan *inner pipe* agar mendapatkan taju perpindahan panas yang lebih tinggi.
3. Variasi bentuk dan ukuran turbin yang disesuaikan dengan keluaran kecepatan uap dari nozzle agar mendapatkan kerja yang maksimum.

Daftar Pustaka

- [1] Lukman, and Meita Rezki Vegatama. 2023. “Konsentrasi Perekat Organik Pada Biobriket Berbahan Baku Limbah Serbuk Kayu.” 7: 15844–53.
- [2] Asy’ari, Hasyim, Jatmiko, and Angga. 2012. “Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Sel Surya.” *Simposium Nasional RAPI XI FT UMS*: 52–57.
- [3] Boedoyo, Mohamad Sidik. 2013. “Potensi Dan Peranan Plts Sebagai Energi Alternatif Masa Depan Di Indonesia.” *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia* 14(2).
- [4] Alejos, Henry. 2017. “No Titleالابتزاز الإلكتروني.. جرائم تتغذى على طفرة «التواصل ال».” *Universitas Nusantara PGRI Kediri* 01: 1–7. <http://www.albayan.ae>.
- [5] Ahmad, Z., & Bakar, M. A. A. (2022). Performance analysis of a solar thermal power plant with a steam turbine. *Renewable Energy*, 187, 510-522.
- [6] Akintunde. 2013. Experimental study of R134a, R406a and R600a Blend as Alternative To Freon 12. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* Vol. 7 pp. 40-46. ¹
- [7] Apriandi, Riyki, and Aqli Mursadin. 2016. “Analisis Kinerja Turbin Uap Berdasarkan Performance Test Pltu Pt. Indocement P-12 Tarjun.” *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika* 1(1): 37–46.
- [8] Calm, M, J., Hourahan, C, G. 2001. Refrigerant Date Summary. *Engineered Systems*.
- [9] Mustangin, Muhammad. 2018. “Mustangin_buku Turbin Uap.” *TURBIN UAP Prinsip, start-up, perawatan, penunjangnya* xvi: 1–200.
- [10] Povice, Green. 2022. “METODA TERBARU DALAM PEMBANGUNAN PLTS 1 MWp DI BALI Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana.”



Fadhil Anam menyelesaikan studi S1 Jurusan Teknik Mesin di Universitas Udayana, dan menyelesaikannya pada tahun 2024.

Sintesis Katalis Platina Didukung Vulcan XC 72 - Reduced Graphene Oxide Dalam Aplikasi PEMFC Dan Karakterisasi Elektrokimia Dengan Cyclic Voltametry

I Made Edwin Wismaya¹, I Made Joni², Made Suarda¹, Ketut Astawa¹,
Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik - Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

²Finder U-CoE- Universitas Padjadjaran, Jatinanggor, Jawa Barat

Abstrak

Fuel cell adalah salah satu alat green energy yang ramah lingkungan, berkualitas tinggi, dan memiliki potensi dalam berbagai aplikasi portable. Jenis fuel cell umum digunakan pada aplikasi portable adalah menggunakan proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). PEMFC menggunakan bahan bakar hidrogen yang pada proses elektrokimia nya menghasilkan listrik, air, dan panas. Pada penelitian ini difokuskan untuk meningkatkan performa PEMFC dengan katalis Platina yang didukung Vulcan XC 72 – reduced graphene oxide (Pt/VC-rGO). Metode yang digunakan yaitu metode hummer yang dimodifikasi dan metode impregnasi. Massa VC dan rGO divariasikan menjadi 3 macam, yang pertama (0.1 gr Pt : 0.3 gr VC : 0.1 gr rGO), kedua (0.1 gr Pt : 0.2 gr VC : 0.2 gr rGO), dan ketiga (0.1 gr Pt : 0.1 gr VC : 0.3 gr rGO). Pada hasil uji cyclic voltametry menunjukkan hasil variasi 0.1 gr Pt, 0.1 gr VC, dan 0.3 gr rGO mendapatkan hasil yang lebih baik dari ketiga variasi yang menunjukkan rentang potensial 0.6-0.9 V serta current 0,0001 A.

Kata Kunci: fuel cell, PEMFC, Sintesis, Katalis, Pt/VC-rGO, Reduced graphene oxide

Abstract

Fuel cells are a green energy device that is environmentally friendly, high quality, and has potential in various portable applications. The type of fuel cell commonly used in portable applications is a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). PEMFC uses hydrogen fuel which in the electrochemical process produces electricity, water and heat. This research is focused on improving the performance of PEMFC with a platinum catalyst supported by Vulcan XC 72 – reduced graphene oxide (Pt/VC-rGO). The methods used are the modified Hummer method and the impregnation method. The masses of VC and rGO were varied into 3 types, the first (0.1 gr Pt : 0.3 gr VC : 0.1 gr rGO), the second (0.1 gr Pt : 0.2 gr VC : 0.2 gr rGO), and the third (0.1 gr Pt : 0.1 gr VC : 0.3 gr rGO). The results of the cyclic voltametry test show that the results of the 0.1 gr Pt, 0.1 gr VC, and 0.3 gr rGO variations obtained better results than the three variations which showed a potential range of 0.6-0.9 V and a current of 0.0001 A.

Keywords: fuel cell, PEMFC, Synthesis, Catalyst, Pt/VC-rGO, Reduced graphene oxide

1. Pendahuluan

Di era *modern* saat ini, penggunaan bahan bakar fosil terus meningkat, tetapi ketersediaannya diperkirakan akan habis dalam waktu dekat [1]. Peningkatan ini disebabkan oleh bertambahnya jumlah penduduk yang semakin aktif dalam berbagai kegiatan yang membutuhkan banyak energi. Seiring dengan mobilitas penduduk dan kemajuan teknologi yang tidak dapat dihindari, diperlukan sumber energi alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil [2]. Salah satunya menggunakan energi listrik yang bisa didapatkan dari mengubah bahan bakar energi kimia seperti hidrogen, gas alam, metanol, etanol, dan lain-lain [3].

Perkembangan saat ini, alat portabel dan kendaraan transportasi yang menggunakan energi listrik telah diteliti dan dikembangkan [4]. Penggunaan kendaraan listrik saat ini sebagian besar masih bergantung pada baterai sebagai sumber energi listrik, meskipun baterai memiliki keterbatasan dalam kapasitas

penyimpanan dan memerlukan waktu lama untuk pengisian. Namun, beberapa penelitian mulai berfokus pada energi listrik yang berbasis fuel cell [5]. *Fuel cell* adalah teknologi energi hijau yang ramah lingkungan, berkualitas tinggi, dan memiliki potensi untuk diterapkan dalam berbagai bidang, seperti listrik portabel dan stasioner [6]. Salah satu jenis *fuel cell* yang cocok untuk aplikasi portabel adalah proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) [7]. Penggunaan PEMFC memiliki dampak lingkungan yang positif karena memanfaatkan hidrogen sebagai bahan bakar, yang melalui proses elektrokimia menghasilkan listrik, air, dan panas [2]. Dalam sintesis PEMFC, katalis memiliki peran yang sangat penting, di mana katalis yang umum digunakan adalah Platina yang didukung oleh karbon (Pt/C). Kinerja katalis Pt/C dapat ditingkatkan dengan mengatasi kekurangan pada masing-masing komponennya [7]. Vulcan XC 72 (VC) dianggap sebagai alternatif pengganti karbon, karena memiliki

luas permukaan yang besar, porositas yang sesuai, ketahanan korosi yang tinggi, serta konduktivitas listrik yang baik [8]. *Reduced graphene oxide* (rGO) yang dihasilkan dari oksidasi graphene kini dianggap sebagai material yang potensial untuk dikembangkan karena sifat-sifat unggulnya, seperti konduktivitas listrik yang tinggi, konduktivitas termal, dan luas permukaan yang tinggi[9].

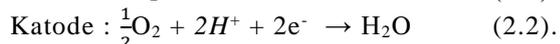
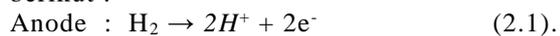
Tujuan dari dilakukannya penelitian ini, yaitu untuk meningkatkan performa PEMFC dengan katalis platina yang didukung Vulcan XC 72 – *reduced graphene oxide* (Pt/VC-rGO) dengan variasi perbandingan massa. Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah, bagaimana karakteristik tegangan-arus listrik katalis Pt/VC-rGO yang dikembangkan dengan variasi perbandingan massa Vulcan XC 72 dan rGO. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan dari luasnya permasalahan yang ada, maka perlu dilakukan pembatasan. Dalam penelitian ini batasan yang dijaga seperti, kemurnian bahan dan material dari katalis yang digunakan sesuai dengan standar yang dikeluarkan oleh pabrikan, dan suhu dan tekanan yang dianggap konstan.

2. Dasar Teori

2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

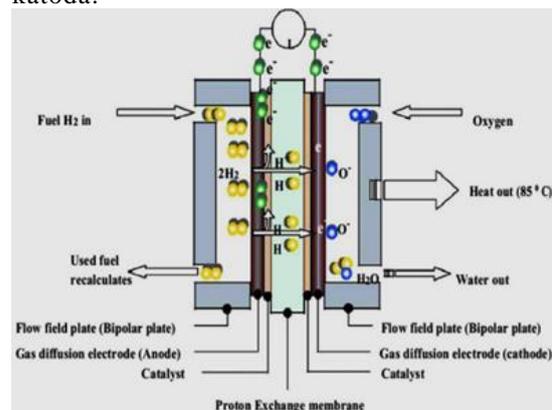
PEMFC merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang paling umum digunakan. PEMFC bekerja dengan elektrolit yang menghantarkan ion hidrogen (H^+) dari anoda ke katoda dan memisahkan gas reaktan pada kedua sisinya. Nafion digunakan sebagai membran elektrolit polimer pada PEMFC, karena material ini memiliki sifat penghantar proton yang tinggi dan konduktivitas yang lebih baik untuk membran tipis, dengan ketebalan yang biasanya dijaga di bawah $200 \mu m$ [10].

Seperti yang digambarkan dalam Gambar 1 proses kerja PEMFC beroperasi dengan menggunakan reaksi redoks yang melibatkan hidrogen di anoda dan oksigen di katoda. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Elektron yang dihasilkan dari reaksi hidrogen di anoda (Pers. 2.1) akan mengalir ke elektrode katoda, di mana mereka terlibat dalam reaksi dengan oksigen (Pers. 2.2) untuk menghasilkan listrik. Pada saat bersamaan, proton yang dihasilkan dari reaksi pertama bergerak menuju katoda melalui elektrolit polimer untuk berpartisipasi dalam reaksi

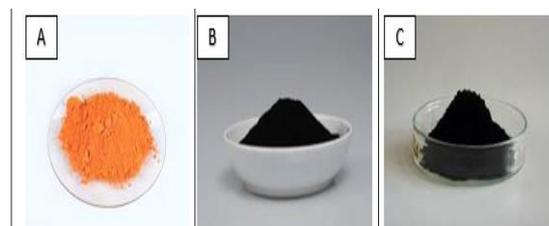
kedua, yang pada akhirnya menghasilkan air di katoda.



Gambar 1. Proses kerja PEMFC [17].

2.2. Material Sintesis

Platina (Pt), yang ditampilkan pada Gambar 2 (A), adalah katalis yang paling sering digunakan dalam PEMFC karena kestabilannya selama reaksi hidrogen dan oksigen di anoda dan katoda. Katalis Pt berbentuk nanopartikel yang terdistribusi di permukaan partikel karbon yang lebih besar sebagai material pendukung [11]. Vulcan XC 72 (VC), seperti yang terlihat pada Gambar 2 (B), adalah bahan pendukung dan campuran katalis Pt yang paling sering digunakan dalam PEMFC. Sebagai material pendukung untuk platina, VC memiliki berbagai karakteristik penting, termasuk stabilitas termal untuk memperpanjang masa pakai katalis, kimia permukaan yang memengaruhi reaktivitas katalitik, serta luas permukaan (morfologi) yang membantu dalam mendistribusikan platina secara merata di permukaan VC [8]. *Reduced graphene oxide* (rGO) yang ditampilkan pada Gambar 2 (C) memiliki beberapa sifat penting, termasuk luas permukaan spesifik yang tinggi yang dibutuhkan untuk katalis, kemampuan dispersi dan absorpsi yang baik, serta sifat mekanik yang memberikan stabilitas dan daya tahan yang baik, sehingga meningkatkan masa pakai katalis[12].



Gambar 2. (A) Platina, (B) Vulcan XC 72, (C) rGO

2.3 Metode Sintesis Material

2.3.1 Metode Hummer yang Dimodifikasi

Pada sintesis rGO, digunakan metode Hummers yang telah dimodifikasi. Metode ini digunakan untuk menghasilkan *graphene oxide* melalui sintesis *graphene*, kemudian dilakukan proses reduksi untuk memperoleh *reduced graphene oxide*. Keunggulan metode ini meliputi biaya produksi yang rendah, penggunaan bahan yang tidak berbahaya, hasil material yang lebih banyak, waktu proses yang relatif cepat, serta tingkat keamanan reaksi yang baik [13].

2.3.2 Metode Impregnasi

Pada sintesis Pt/VC-rGO, digunakan metode reduksi impregnasi. Dalam metode ini, preparasi katalis dilakukan dengan mencampurkan prekursor logam aktif dengan material pendukungnya [14]. Metode ini tidak menghasilkan partikel dengan dispersi tinggi, namun dapat meningkatkan aktivitas katalitik dari katalis [15].

2.4. Karakteristik Katalis

Cyclic Voltammetry (CV) adalah metode elektrokimia yang digunakan untuk menganalisis sifat tegangan-arus listrik, superkapasitor, atau perangkat penyimpanan energi. Pengujian CV menghasilkan voltammogram dengan cara mengukur arus pada elektroda kerja selama pemindaian potensial [16].

3. Metode penelitian

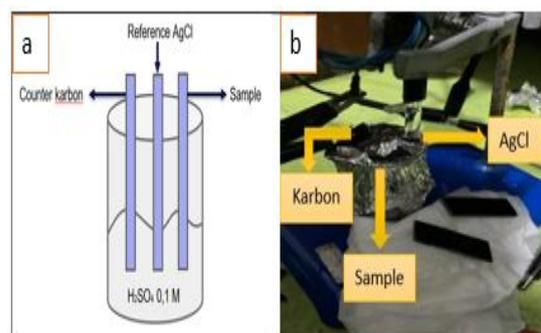
Pada penelitian ini menggunakan tiga variasi massa dari VC dan rGO. Dengan variasi variasi masing-masing 0.3 gr VC – 0.1 gr rGO, 0.2 gr VC – 0.2 gr rGO, dan 0.1 gr VC – 0.3 gr rGO. Metode yang digunakan adalah metode Hummer dimodifikasi dan reduksi Impregnasi. Dalam metode Hummer yang dimodifikasi serbuk grafit alami disintesis dengan material bahan pendukung sehingga menjadi *graphene oxide*(GO). Setelah itu dilakukan metode reduksi Impregnasi dimana Pt, Vulcan xc 72, dan GO disintesis dalam larutan yang ditambahkan etilen glikol sehingga menjadi katalis Pt/VC-rGO. Selanjutnya dilakukan pengujian karakteristik elektrokimia hubungan tegangan-arus yang di hasilkan dengan pengujian CV.

3.1. Metode Pengujian

Dalam penelitian ini menggunakan alat uji CV tipe BST8-Stat dengan skema pada kurva uji CV dengan rentang potensial 0-2 V dengan scan rate 0.1 mV/s. Ketika dilakukan pemindaian dari potensial yang rendah ke tinggi, terjadi reaksi oksidasi, sementara jika

pemindaian dilakukan dari potensial yang tinggi ke rendah, terjadi reaksi reduksi. Dalam proses reduksi, arus puncak yang dihasilkan disebut arus puncak katodik dan potensial puncaknya disebut potensial puncak katodik. Sebaliknya, dalam reaksi oksidasi, arus puncak yang dihasilkan disebut arus puncak anodik dan potensial puncaknya disebut potensial puncak anodik.

Salah satu komponen yang sangat penting digunakan dalam uji ini adalah elektroda. Elektroda berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi elektrokimia, mengukur respons listrik, dan stabilitas. Pada pengujian ini menggunakan 3 elektroda yaitu *reference*, *counter*, dan sampel (*working*). Seperti yang terlihat pada Gambar 3 (a) Skema pengujian dan Gambar 3 (b) Proses pengujian, elektroda *reference* menggunakan AgCl, elektroda *counter* menggunakan karbon, dan elektroda *working* menggunakan sampel katalis Pt/VC-rGO.



Gambar 3. (a) Skema pengujian, (b) Proses pengujian.

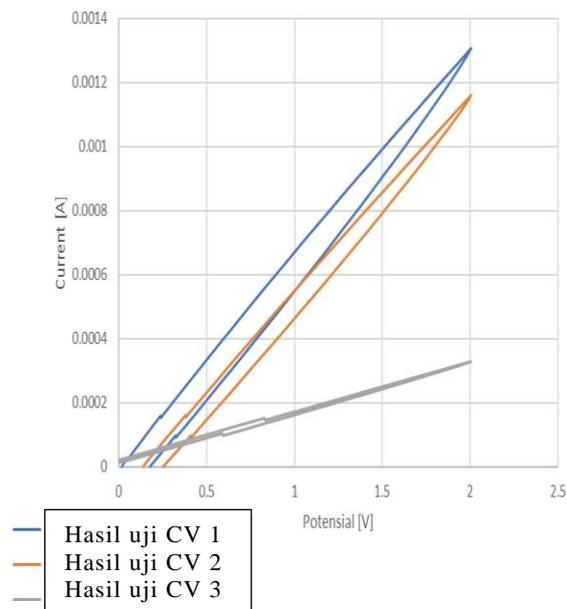
4. Hasil dan Pembahasan

Setelah melakukan sintesis katalis Pt/VC-rGO selanjutnya melakukan pengujian CV. Nantinya akan mendapatkan data hasil dari pengujian yang dapat diolah pada excel maupun aplikasi pengolah data lainnya.

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4 hasil dari uji CV yang dimana garis berwarna biru menunjukkan hasil dari variasi (1), garis berwarna kuning dari variasi (2), dan garis berwarna abu-abu dari variasi (3).

Pada hasil kurva uji yang didapatkan variasi 3 menunjukkan hasil yang lebih baik dimana tingkat arus dan rentang potensialnya lebih tinggi dibanding variasi 1, dan variasi 2 dengan menunjukkan rentang potensial 0.6-0.9 V serta current 0,0001 A. Hal ini menunjukkan bahwa material rGO yang dijadikan katalis pendukung ini memiliki nilai konduktivitas yang tinggi. Selain itu juga rGO memberikan dukungan struktural yang stabil untuk Pt

sebagai katalis utama, dan dispersinya yang merata di seluruh permukaan material. Pada variasi 1 titik awal arus berada diatas variasi 2 dan selanjutnya mengalami peningkatan hingga pada puncaknya juga berada diatas variasi 2 hal ini tidak sesuai dengan variasi massa rGO yang digunakan karena pada variasi 2 penggunaan rGO mempunyai massa yang sama dengan VC.



Gambar 4. Hasil kurva uji CV

5. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian, maka diperoleh kesimpulan hubungan tegangan arus-listrik yang dihasilkan masing-masing variasi menunjukkan adanya hubungan tegangan arus-listrik. Selain itu juga uji CV ini efektif dalam mengevaluasi karakteristik elektrokimia material, termasuk konduktivitas, kapasitas penyimpanan energi, dan reaktivitas katalitik. Pada hasil variasi 3 menunjukkan hasil yang lebih baik dari ketiga variasi yang dilakukan.

6. Daftar Pustaka

- [1] Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214, 118955.
- [2] Padang, Y. A., Mirmanto, M. M., Syahrul, S. S., Sinarep, S. S., & Pandiatmi, P. P. (2020). Pemanfaatan energi alternatif dan terbarukan. *Jurnal Karya Pengabdian*, 2(2), 77-84.
- [3] Zhang, G., Xie, X., Xie, B., Du, Q., & Jiao, K. (2019). Large-scale multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 555-563.
- [4] Rath, R., Kumar, P., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2019). Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors. *International Journal of Energy Research*, 43(15), 8931-8955.
- [5] Singla, M. K., Nijhawan, P., & Oberoi, A. S. (2022). Cost-benefit comparison of fuel cell-based and battery-based renewable energy systems. *International Journal of Energy Research*, 46(2), 1736-1755.
- [6] Wang, J., Wang, H., & Fan, Y. (2018). Techno-economic challenges of fuel cell commercialization. *Engineering*, 4(3), 352-360.
- [7] Chen, Y., Jian, Q., Huang, Z., Zhao, J., Bai, X., & Li, D. (2021). Improvement of thermal management of proton exchange membrane fuel cell stack used for portable devices by integrating the ultrathin vapor chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(74), 36995-37006.
- [8] Rahman, M. M., Inaba, K., Batnyagt, G., Saikawa, M., Kato, Y., Awata, R., ... & Takeguchi, T. (2021). Synthesis of catalysts with fine platinum particles supported by high-surface-area activated carbons and optimization of their catalytic activities for polymer electrolyte fuel cells. *RSC advances*, 11(33), 20601-20611.
- [9] Razaq, A., Bibi, F., Zheng, X., Papadakis, R., Jafri, S. H. M., & Li, H. (2022). Review on graphene-, graphene oxide-, reduced graphene oxide-based flexible composites: From fabrication to applications. *Materials*, 15(3), 1012.
- [10] Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214, 118955.
- [11] Okonkwo, P. C., Belgacem, I. B., Emori, W., & Uzoma, P. C. (2021). Nafion degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review. *International journal of hydrogen energy*, 46(55), 27956-27973.
- [12] Do Nascimento, Jéssica Rabelo, et al. "Synthesis of reduced graphene oxide as a support for nano copper and palladium/copper catalysts for selective NO reduction by CO." *ACS omega* 5.40 (2020): 25568-25581.

- [13] Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., ... & Tour, J. M. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS nano*, 4(8), 4806-4814
- [14] Anindita, F., Permana, D., & Said, H. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Katalis CaO/K₂O dari Batu Gamping untuk Produksi Biodiesel. *Journal of The Indonesian Society of Integrated Chemistry*, 15(1), 30-36.
- [15] Mehrabadi, B. A., Eskandari, S., Khan, U., White, R. D., & Regalbuto, J. R. (2017). A review of preparation methods for supported metal catalysts. *Advances in catalysis*, 61, 1-35.
- [16] Pandiarajan, M., & Rajendran, S. (2016). Applications of Cyclic voltamme. *Int J Nano Corr Sci and Engg*, 3(4), 166-180.
- [17] Habib, M. S., Salam, M. A., Ahmed, K., Uddin, M. S., Hossain, T., Papri, N., ... & Arefin, P. (2021). Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) durability factors, challenges, and future perspectives: a detailed review. *Material Science Research India (Online)*, 18(2), 217-234.



I Made Joni menyelesaikan studi program S1 di Universitas Padjadjaran tahun 1998. S2 di Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India tahun 2000. Dan S3 di Hiroshima University Japan pada tahun 2011.

Bidang penelitian yang diminati adalah teknologi nano partikel dan perkembangan baterai Saat ini beliau bekerja pada Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran.



Made Suarda menyelesaikan studi S1 tahun 1989 program studi Teknik Permesinan Kapal di Universitas ITS Surabaya, Jawa Timur. Kemudian menyelesaikan studi S2 tahun 2004 program studi Advanced Manufacturing Technology di University of South Australia.

Bidang penelitian yang diminati adalah mengenai modelling dan simulasi planar mechanism using bondgraph. Analisis dinamika fluida pada pompa. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.



I Made Edwin Wismaya menyelesaikan studi S1 pada tahun 2024 Universitas Udayana Bali dengan program studi Teknik Mesin.

Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi mengenai pengembangan katalis dari Proton Exchange Membrane Fuel Cell



Ketut Astawa menempuh studi S1 tahun 1996 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana, Bali. Kemudian menyelesaikan studi S2 program studi teknik mesin tahun 2006 di Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.

Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.



Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya pada tahun 1998. S2 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya 2001. Serta S3 di Shibaura Institute of Technology, Jepang 2007, dan Profesi di Universitas Udayana, Bali tahun 20020.

Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan *fuel cell*, penyimpan energi, dan *green energy*. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.

Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Parallel Flow Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer

Tegar Ramadhan, Hendra Wijaksana, dan I Gede Teddy Prananda Surya
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Permintaan energi terus meningkat seiring urbanisasi, ketersediaan sumber energi, dan pertumbuhan populasi. Sekitar 50% energi digunakan untuk pendinginan bangunan. Sistem pendinginan konvensional, seperti kompresi uap, boros energi dan berkontribusi terhadap pemanasan global. Solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan adalah teknik pendingin evaporatif, tapi efektivitas pendingin evaporatif umumnya rendah, yang merupakan kelemahan utama. Namun, ada siklus termodinamika baru yang dikenal sebagai siklus Maisotsenko, dengan ide utamanya adalah untuk mendinginkan udara yang masuk ke saluran basah melalui bagian kering dari saluran basah tersebut. Pada Penelitian ini menggunakan pendingin Maisotsenko aliran udara parallel dengan variasi \dot{m} primer 0,0553 kg/s ; 0,0415 kg/s ; 0,0276 kg/s dan \dot{m} dijaga konstan 0,0691 kg/s. Dan selanjutnya akan dilakukan pengambilan data pada temperatur udara primer, temperatur udara sekunder, dan temperatur udara kerja. Pada \dot{m} udara 0,0276 kg/s penurunan temperatur; efektivitas titik embun basah; dan efektivitas titik embun mencapai nilai tertinggi sebesar 2,1°C; 27,63%; dan 19,81%. Ketika \dot{m} primer 0,0415 kg/s, kapasitas pendinginan meningkat menjadi yang paling tinggi sebesar 58,45 W. Selanjutnya pada \dot{m} primer 0,0276 kg/s EER mencapai 48,6%.

Kata kunci: M-Cycle, Pendingin Evaporatif, Sistem Pendinginan, Penurunan Temperatur

Abstract

Energy demand continues to rise along with urbanization, energy availability, and population growth. About 50% of energy is used for building cooling. Conventional cooling systems, such as vapor compression, are energy-intensive and contribute to global warming. A more efficient and environmentally friendly solution is evaporative cooling techniques, but the effectiveness of evaporative coolers is generally low, which is their main drawback. However, there is a new thermodynamic cycle known as the Maisotsenko cycle, whose purpose is to cool the incoming air into the wet channel through the dry part of the wet channel. In this study, a Maisotsenko cooler with parallel airflow was used with variations in primary air \dot{m} of 0.0553 kg/s, 0.0415 kg/s, and 0.0276 kg/s, while the secondary \dot{m} was kept constant at 0.0691 kg/s. Data collection was conducted on the primary air temperature, secondary air temperature, and working air temperature. At a primary air \dot{m} of 0.0276 kg/s, the temperature drop, wet bulb effectiveness, and dew point effectiveness reached their highest values of 2.1°C, 27.63%, and 19.81%, respectively. When the primary air \dot{m} was 0.0415 kg/s, the cooling capacity increased to the highest value of 58.45 W. Additionally, at a primary air \dot{m} of 0.0276 kg/s, the Energy Efficiency Ratio (EER) reached 48.6%.

Keywords: M-Cycle, Evaporative Cooling, Parallel Flow, Cooling System, Temperature Drop

1. Pendahuluan

Di era modern ini, konsumsi energi menjadi isu yang semakin penting untuk diperhatikan. Permintaan energi terus meningkat seiring dengan urbanisasi, ketersediaan sumber energi konvensional dan terbarukan, serta pertumbuhan populasi yang cepat. Salah satu sektor utama yang mengonsumsi listrik adalah sektor bangunan, yang saat ini menggunakan lebih dari 20% dari total energi primer global. Sekitar 50% dari energi ini digunakan untuk keperluan pendinginan bangunan. Sistem pendinginan konvensional umumnya menggunakan sistem kompresi uap yang sangat boros energi dan berkontribusi terhadap pemanasan global karena penggunaan refrigeran *Chlorofluorocarbon*. Oleh karena itu, Pendekatan yang paling potensial untuk menyelesaikan masalah ini adalah teknik *Evaporative Cooling* (EC) dapat mengurangi konsumsi energi dalam skala besar dan jauh lebih efisien [1]. Sistem pendinginan evaporatif konvensional bekerja dengan cara menurunkan suhu udara proses hingga mendekati

suhu bola basahnya[2]. Sistem pendingin evaporatif dibagi menjadi dua, yaitu Pendingin evaporatif langsung dan Pendingin evaporatif tidak langsung [3]. Secara umum, IEC dapat mendinginkan udara hingga suhu lebih rendah dan menghindari penambahan kelembaban ke udara dibandingkan dengan DEC. Oleh karena itu, IEC memiliki rentang aplikasi yang lebih luas [4]. Efektivitas IEC umumnya rendah, sekitar 0,40 hingga 0,60, yang merupakan kelemahan utama. Namun, ada siklus termodinamika baru yang dikenal sebagai siklus Maisotsenko, yang dianggap sebagai terobosan teknologi dan dapat mengatasi kelemahan tersebut. Siklus Maisotsenko menggabungkan proses termodinamika pertukaran panas dan pendinginan udara evaporatif dalam pendingin udara evaporatif tidak langsung [5].

Pada Penelitian ini menggunakan sistem pendingin *M-Cycle evaporative cooling* dengan udara *parallel flow*. Rumusan masalah, yaitu bagaimana performansi sistem pendinginan maisotsenko udara *parallel flow* dengan variasi laju aliran massa udara

primer. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi eksperimental terhadap performansi sistem pendinginan Maisotsenko dengan konfigurasi aliran udara *parallel flow* dan berfokus mengevaluasi efek dari variasi laju aliran massa udara primer terhadap efisiensi pendinginan dan performa keseluruhan sistem.

Penelitian ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Sistem dianggap terisolasi sempurna.
2. Suhu udara lingkungan atau ruangan tempat pengujian dianggap konstan.
3. Suhu air dianggap konstan.
4. Densitas udara dianggap konstan ($\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$)
5. Laju aliran massa udara sekunder diatur konstan

2. Dasar Teori

2.1. Pendinginan Evaporatif Langsung

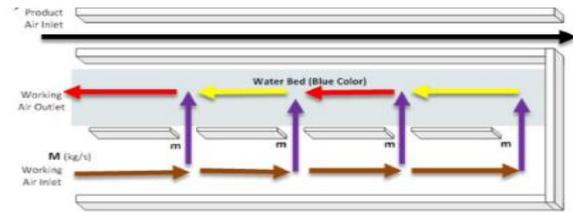
Dalam pendinginan evaporatif langsung, udara panas dan kering mengalir melalui bahan berpori yang permukaannya dijaga tetap basah secara merata. Bahan berpori ini dianggap terisolasi dari lingkungan, sehingga pertukaran panas hanya terjadi antara udara dan air: selama udara melewati bahan berpori tersebut, udara menjadi lebih lembap (menggunakan panas laten) dan didinginkan (menggunakan panas sensible). Secara teoritis, selama suhu air sama dengan suhu bola basah udara, pertukaran ini bersifat isenthalpik dan panas laten dalam nilai absolut sama dengan panas sensible. [6]

2.2. Pendinginan Evaporatif Tidak Langsung

Pada IEC, terdapat dua saluran terpisah untuk udara primer dan sekunder. Udara primer dalam saluran kering didinginkan oleh udara kerja, yang didinginkan oleh penguapan air dalam saluran basah. Prinsip kerja saluran basah mirip dengan DEC di mana udara kerja berkontak langsung dengan air. Batas teoritis pendinginan udara primer adalah suhu bola basah udara ambient masuk tetapi umumnya hanya dapat mencapai efektivitas bola basah 50–80%. [3]

2.3. Siklus Maisotsenko (*M-Cycle*)

M-Cycle bekerja berdasarkan prinsip pendinginan evaporatif tidak langsung, namun dengan pola aliran yang berbeda. Ditunjukkan pada Gambar 1, siklus ini menggunakan dua saluran; saluran produk dan saluran basah. Bagian yang membedakan *M-cycle* adalah pola aliran di saluran basah. Ide utamanya adalah untuk mendinginkan udara yang masuk ke saluran basah melalui bagian kering dari saluran basah tersebut. Setelah bercampur, udara di sisi basah menjadi lembap melalui proses evaporasi dan menyerap panas dari sisi produk/pasokan. Akhirnya, udara kerja ini akan dilepaskan ke atmosfer. Secara teoritis, suhu udara pasokan dapat turun hingga di bawah suhu bola basah dan mencapai suhu titik embun dari udara masuk yang datang. [7]



Gambar 1. Skematik sistem pendingin *M-cycle*

2.4. Dry Bulb Temperature Drop

Perbedaan suhu di sepanjang saluran kering diukur dengan mengambil selisih antara temperatur udara keluar dan temperatur udara masuk [1]. Dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta T = T_{ain} - T_{ao} \quad (1)$$

ΔT = Temperature Drop ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ain} = suhu udara masuk ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ao} = suhu udara keluar ($^{\circ}\text{C}$)

2.5. Efektivitas Bola Basah

Rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan antara asupan temperatur udara dan temperatur bola basahnya [2]. Dapat dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon_{wb} = \frac{t_{db\ in} - t_{db\ out}}{t_{db\ in} - t_{wb\ in}} \quad (2)$$

$t_{db\ out}$ = suhu udara bola kering keluar ($^{\circ}\text{C}$)
 $t_{db\ in}$ = suhu udara bola kering masuk ($^{\circ}\text{C}$)
 ε_{wb} = Efektivitas bola basah ($^{\circ}\text{C}$)
 $t_{wb\ in}$ = Suhu bola basah masuk ($^{\circ}\text{C}$)

2.6. Efektivitas Titik Embun

Rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan antara suhu udara masuk dan suhu titik embunnya [4]. Efektivitas titik embun didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon_{dew} = \frac{t_{db\ in} - t_{db\ out}}{t_{db\ in} - t_{dew}} \quad (3)$$

$t_{db\ out}$ = suhu bola kering keluar ($^{\circ}\text{C}$)
 $t_{db\ in}$ = suhu bola kering masuk ($^{\circ}\text{C}$)
 $\varepsilon_{dew\ in}$ = Efektivitas titik embun
 t_{dew} = Suhu titik embun ($^{\circ}\text{C}$)

2.7. Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan (CC) menunjukkan kemampuan sistem untuk menangani beban pendinginan. Kapasitas ini merupakan hasil kali dari perbedaan suhu di seluruh sistem dan laju aliran massa udara [1]. Dapat dinyatakan sebagai:

$$CC = \dot{m} C_p (T_{ain} - T_{ao}) \quad (4)$$

C_p = Specific heat of air (kJ/kgK)

- \dot{m} = Laju Aliran Massa udara produk (kg/s)
- $T_{a_{in}}$ = suhu udara masuk ($^{\circ}C$)
- T_{a_o} = suhu udara keluar ($^{\circ}C$)
- CC = kapasitas pendinginan (W)

2.8. EER (Energy Efficiency Ratio)

EER dihitung untuk setiap uji eksperimen menggunakan persamaan [8] :

$$EER = \frac{QC}{W} \quad (5)$$

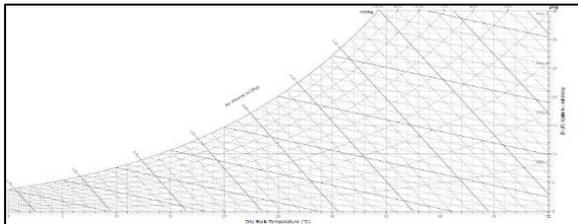
EER = Energy efficiency ratio

QC = Kapasitas pendinginan (Kw)

W = Input daya blower dan Pompa (Watt)

2.9. Diagram Psikrometrik

Diagram psikrometrik dibuat untuk secara grafis menggambarkan semua sifat udara lembab yang diperlukan dalam perhitungan pendingin udara. Nilai-nilai tersebut didasarkan pada pengukuran aktual yang telah diverifikasi untuk konsistensi termodinamis. [9]

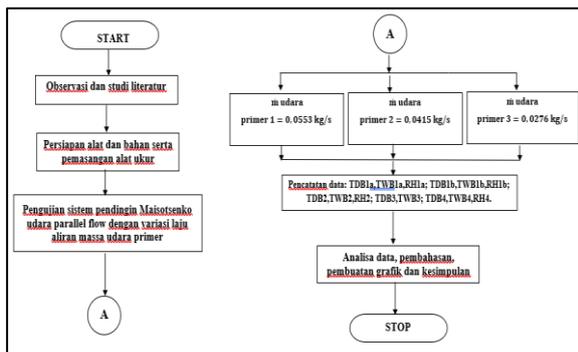


Gambar 2. Diagram Psikrometrik

3. Metode Penelitian

3.1. Diagram Alir Penelitian

Diagram memuat proses penelitian, ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3.2. Variabel Penelitian

- Variabel Bebas
 - \dot{m} udara primer 1 = 0,0553 kg/s
 - \dot{m} udara primer 2 = 0,0415 kg/s
 - \dot{m} udara primer 3 = 0,0276 kg/s
- Variabel Terikat : *dry bulb temperature drop; wet bulb effectiveness; dew point*

effectiveness; cooling capacity; energy efficiency ratio.

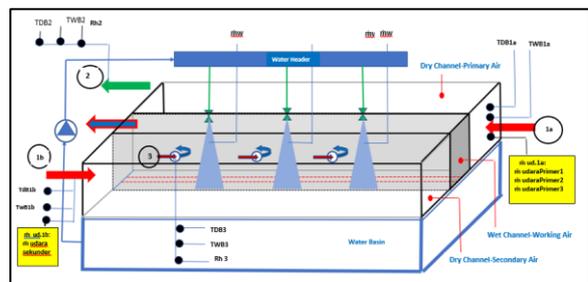
- Variabel Kontrol
 - laju aliran massa air (\dot{m} air)
 - \dot{m} udara sekunder = 0.0276 kg/s

3.3. Alat dan Bahan

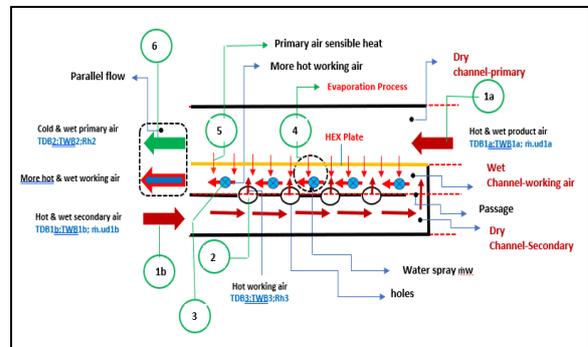
UNI-T UT333 *Thermometer Hygrometer Humidity, Digital wind anemometer* - dengan range 0 – 30 m/s, Pompa pengabut, *Nozzel, Dimer, Stopwatch*, Plat alumunium dan plat tembaga, *Riped* dan paku *riped*, Gerinda dan Bor, Blower Keong, *Flexible hose, Alumunium Foil, Glasswool*

3.4. Pelaksanaan pengujian

Udara *parallel flow* terjadi antara udara primer outlet pada *dry channel* dengan udara kerja outlet pada *wet channel* seperti tampak pada Gambar 4, dan gambar 5.



Gambar 4. Titik Pengukuran sistem Maisotsenko udara *parallel flow* dengan \dot{m} primer



Gambar 5. Prinsip Kerja Alat Uji Maisotsenko Udara *Pararel Flow*

Berdasarkan skematik diagram pada Gambar 5 dapat dijelaskan cara kerja alat uji sebagai berikut (1) udara lingkungan akan masuk melalui *inlet primary dry channel* dan *inlet secondary dry channel*, Selanjutnya udara yang masuk pada *primary dry channel* akan disebut sebagai udara primer, sedangkan udara lingkungan yang masuk pada *secondary dry channel* akan disebut sebagai udara sekunder (2) udara sekunder pada *secondary dry channel*, selanjutnya akan masuk pada wet channel melalui setiap lubang (terdapat 4 lubang) dan satu laluan pada dinding wet channel yang selanjutnya akan disebut sebagai udara kerja (3) Udara kerja pada wet channel ini, selanjutnya

akan mengalami kontak langsung (*secara cross flow*) dengan kabut air yang disemprotkan oleh *water sprayer* dan akan terjadi proses *direct evaporative cooling*. (4) Kontak langsung antara udara kerja dengan kabut air akan mengakibatkan terjadinya proses evaporasi, dimana panas udara kerja akan diserap oleh kabut air sehingga air akan menguap. (5) Semakin besar panas sensibel yang diserap oleh kabut air dari udara kerja, semakin rendah suhu udara kerja. Dengan semakin rendahnya suhu udara kerja, maka semakin banyak panas sensibel udara primer yang dapat diserap oleh udara kerja, setelah ditransfer secara konveksi lalu konduksi melalui dinding *heat exchanger plate (HEX plate)* pada sisi udara primer menuju dinding HEX plate pada sisi *wet channel*. Sebagai akibatnya suhu dan kelembaban udara kerja akan meningkat, akibat proses evaporasi tidak langsung oleh panas sensibel udara primer di *wet channel*, dimana udara kerja pada outlet *wet channel* akan menjadi lebih panas dan lebih basah dibandingkan dengan udara sekunder pada *inlet wet channel*. (6) Proses *indirect evaporative cooling* udara primer oleh udara kerja pada *wet channel* melalui HEX plate akan menghasilkan udara primer yang lebih rendah temperturnya dengan kelembaban absolut yang konstan, yang keluar melalui *outlet primary dry channel* sebagai udara produk. Proses ini akan menghasilkan udara produk pada sisi *primary dry channel* yang berpotensi mencapai suhu dibawah temperatur bola basah *inlet* nya dan juga hampir mendekati temperatur pengembunannya. Sementara itu, udara kerja akan keluar pada sisi *outlet wet channel* sebagai udara yang lebih panas dan lebih basah dan dalam kondisi uap jenuh atau kelembaban relatifnya 100%.

3.5. Prosedur Pengujian

(1) Pemasangan alat uji sistem Maisotsenko dilakukan di Lab. Keahlian. (2) Alat pengukuran temperatur bola kering serta kecepatan aliran udara dipasang pada sisi inlet udara primer, sisi inlet udara sekunder, sisi outlet udara produk, dan sisi outlet udara kerja pada saluran basah dan saluran kering. (3) *Blower* dihidupkan dan kecepatan aliran udara primer dan sekunder, dengan \dot{m} udara primer sebesar 0,0553 kg/s dan udara sekunder sebesar 0,0691 kg/s. (4) Pompa pengabut air juga dihidupkan. (5) Setelah semua sistem aktif, sistem dibiarkan stabil sebelum pengujian dilakukan dengan pencatatan data setiap 5 menit selama 30 menit. (6) Setelah 30 menit, blower dan pompa dimatikan, dan sistem dидiamkan selama 30 menit hingga suhu udara pada saluran basah dan kering kembali ke temperatur awal. (7) Langkah-langkah ini diulang untuk rasio kecepatan aliran udara primer 0,6 ($V_{ud.primer2.sekunder2} = 5,4 \text{ m/s} : 9,0 \text{ m/s}$) dan rasio 0,4 ($V_{ud.primer3.sekunder3} = 3,6 \text{ m/s} : 9,0 \text{ m/s}$), di mana \dot{m} udara primer 2 dan primer 3 berturut-turut adalah 0,0553 kg/s, 0,0415 kg/s, dan 0,0276 kg/s, dengan \dot{m} udara sekunder tetap pada 0,0691 kg/s. (8) Pengujian selesai.

4. Hasil dan Pembahasan

Data temperatur dapat dilihat secara berurutan pada Tabel 1, Tabel 3, dan Tabel 5. Untuk data hasil perhitungan menggunakan diagram psikrometrik dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 4, dan Tabel 6

Tabel 1. Data Hasil Pengamatan untuk \dot{m} primer = 0.0553 kg/s

Waktu (Menit)	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,7	35,4	31,9	62,0	29,2	89,7
10	32,5	35,4	31,7	61,0	29,2	89,8
15	32,4	33,3	31,4	62,2	28,9	89,9
20	32,4	33,0	31,3	61,8	28,8	89,9
25	32,3	33,0	31,2	61,8	28,8	90,0
30	32,7	34,0	31,5	61,2	29,0	90,0
\bar{x}	32,5	34,0	31,5	61,7	29,0	89,9

Tabel 2. Data Hasil Perhitungan menggunakan diagram psikrometrik \dot{m} udara primer = 0.0553 kg/s

Waktu (Menit)	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	Tdex 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio (g/kg)
5	26,2	59,2	24,0	26,9	50,5	26,0	27,8	18,9
10	25,9	58,3	23,6	26,1	55,6	25,7	27,8	18,4
15	25,9	58,7	23,6	26,1	55,6	25,6	28,9	18,4
20	25,8	58,0	23,4	25,9	56,0	25,5	27,5	18,2
25	25,7	58,0	23,3	25,8	55,7	25,4	27,5	18,1
30	25,8	57,0	23,4	26,2	52,8	25,5	27,7	18,2
\bar{x}	25,8	58,0	23,5	26,2	53,1	25,6	27,7	18,3

Tabel 3. Data Hasil Pengamatan untuk \dot{m} udara primer = 0.0415 kg/s

Waktu (Menit)	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,6	33,2	31,3	62,5	28,6	88,1
10	33,1	33,9	31,6	60,3	28,9	89,8
15	33,2	33,7	31,6	59,4	28,8	90,1
20	33,1	34,0	31,6	57,2	28,8	90,3
25	32,9	33,8	31,6	60,6	28,7	90,4
30	33,1	33,9	31,6	60,1	28,7	90,5
\bar{x}	33,0	33,8	31,6	60,0	28,8	89,9

Tabel 4. Data Hasil Perhitungan menggunakan diagram psikrometrik \dot{m} udara primer = 0.0415 kg/s

Waktu (Menit)	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	Tdex 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio (g/kg)
5	25,9	58,0	23,6	26,0	55,9	25,6	27,0	18,4
10	25,8	55,1	23,2	26,0	52,5	25,5	27,5	18,0
15	25,7	54,1	23,1	25,9	52,6	25,3	27,5	17,8
20	25,2	52,0	22,3	25,5	49,3	24,9	27,5	17,0
25	25,8	56,0	23,3	26,1	53,1	25,5	27,4	18,1
30	25,8	55,1	23,2	26,0	52,5	25,4	27,4	18,0
\bar{x}	25,7	55,1	23,2	25,9	52,5	25,4	27,5	17,9

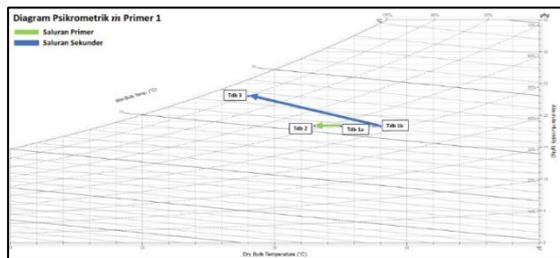
Tabel 5. Data Hasil Pengamatan untuk \dot{m} udara primer = 0.0276 kg/s

Waktu (Menit)	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,7	33,4	30,4	63,9	28,4	88,9
10	33,2	33,1	30,5	57,9	28,2	90,0
15	33,4	33,5	30,8	56,8	28,4	90,3
20	32,2	32,8	30,3	65,7	28,2	90,5
25	32,1	33,3	30,6	66,1	28,2	90,6
30	32,0	33,2	30,5	66,6	28,1	90,7
\bar{x}	32,6	33,2	30,5	62,8	28,3	90,2

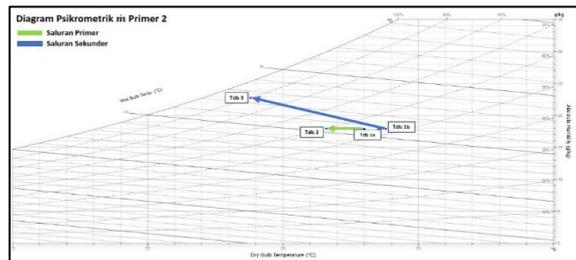
Tabel 6. Data Hasil Perhitungan menggunakan diagram psikrometrik \dot{m} udara primer = 0.276 kg/s

Waktu (Menit)	$T_{wb,1a}$ (°C)	Rh 1a (%)	$T_{dew,1a}$ (°C)	$T_{wb,1b}$ (°C)	Rh 1b (%)	$T_{wb,2}$ (°C)	$T_{wb,3}$ (°C)	Absolute ratio (g/kg)
5	25,6	55,7	23,1	25,8	53,5	25,0	26,9	17,8
10	24,5	52,3	21,6	24,7	49,6	24,1	26,9	16,2
15	24,8	48,7	21,6	24,84	48,4	24,1	27,1	16,2
20	25,7	68,7	23,4	25,9	56,7	25,2	27,0	18,2
25	25,9	60,4	23,8	26,2	56,2	25,6	27,0	18,6
30	26,0	61,0	23,9	26,3	56,9	25,5	26,9	18,7
\bar{x}	25,0	53,2	22,2	25,2	51,4	24,3	27,0	16,9

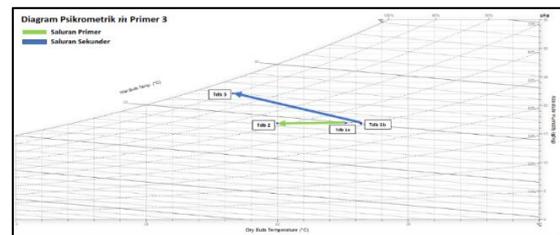
Digram Psikrometrik disajikan pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8



Gambar 6. Digram Psikrometrik rata-rata distribusi temperatur \dot{m} udara primer = 0.0553 kg/s



Gambar 7. Digram Psikrometrik rata-rata distribusi temperatur \dot{m} udara primer = 0.0415 kg/s



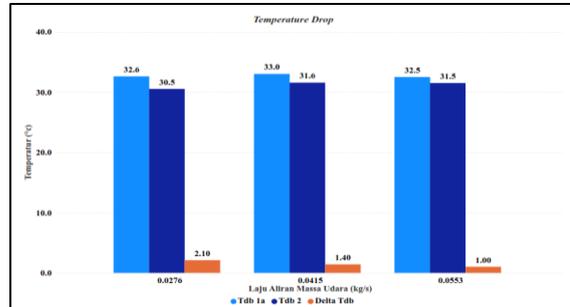
Gambar 8. Digram Psikrometrik rata-rata distribusi temperatur \dot{m} udara primer = 0.0276 kg/s

4.1. Analisis Temperature Drop

Hasil perhitungan ΔT_{dB} (Temperature Drop) disajikan pada tabel 7.

Tabel 7. Temperature Drop

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	$T_{db,1a}$ (°C)	$T_{db,2}$ (°C)	ΔT_{dB} (°C)
0.0553	32,5	31,5	1,0
0.0415	33,0	31,6	1,4
0.0276	32,6	30,5	2,1



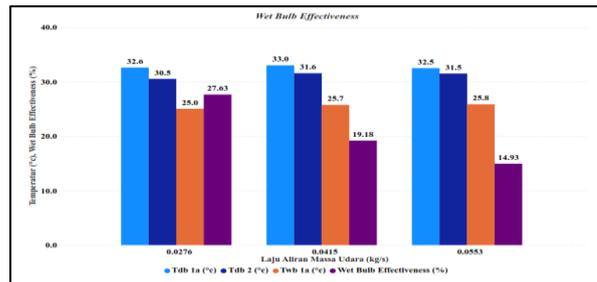
Gambar 9. Grafik Temperature drop Tdb

4.2. Analisis Wet bulb effectiveness

Hasil perhitungan WBE disajikan pada tabel 8

Tabel 8. Wet bulb effectiveness

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	$T_{db,1a}$ (°C)	$T_{wb,1a}$ (°C)	$T_{db,2}$ (°C)	Wet bulb effectiveness (%)
0.0553	32,5	25,8	31,5	14,93
0.0415	33,0	25,7	31,6	19,18
0.0276	32,6	25,0	30,5	27,63



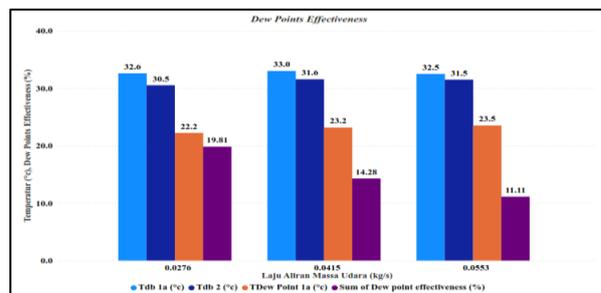
Gambar 10. Grafik Wet bulb effectiveness

4.3. Analisis Dew point effectiveness

Hasil perhitungan DPE disajikan pada tabel 9.

Tabel 9. Dew point effectiveness

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	$T_{db,1a}$ (°C)	$T_{Dew,1a}$ (°C)	$T_{db,2}$ (°C)	Dew point effectiveness (%)
0.0553	32,5	23,5	31,5	11,11
0.0415	33,0	23,2	31,6	14,28
0.0276	32,6	22,2	30,5	19,81



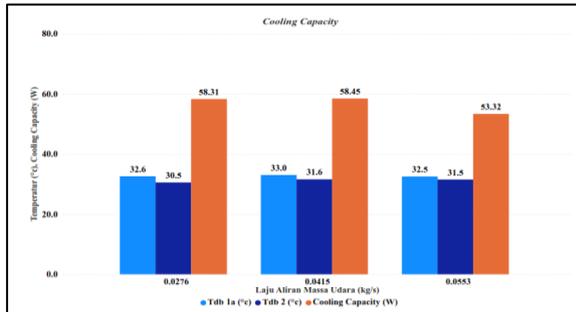
Gambar 11. Grafik Dew point effectiveness

4.4. Analisis Cooling Capacity

Hasil perhitungan CC disajikan pada tabel 10.

Tabel 10. Cooling Capacity

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	Tdb 1a (°C)	Tdb 2 (°C)	Cp J/(kgK)	Cooling Capacity (W)
0,0553	32,5	31,5	1006	53,318
0,0415	33,0	31,6	1006	58,45
0,0276	32,6	30,5	1006	58,308



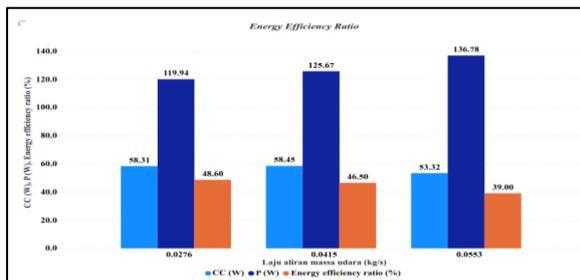
Gambar 12. Grafik Cooling Capacity

4.5. Analisis Energy Efficiency Ratio

Hasil perhitungan EER disajikan pada tabel 11.

Tabel 11. Energy Efficiency Ratio

Laju aliran massa udara (kg/s)	Cooling Capacity (W)	Daya input total (w)	EER (%)
0,0553	53,318	136,78	39
0,0415	58,45	125,67	46,5
0,0276	58,308	119,94	48,6



Gambar 13. Grafik Energy Efficiency Ratio

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, didapat ΔT_{db} terendah 1,0°C. Pada \dot{m} udara primer 0,0276 kg/s, didapat ΔT_{db} tertinggi 2,1°C.
2. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, efektivitas wet bulb berada pada nilai terendah 14,93%. Pada \dot{m} 0,0276 kg/s, efektivitas wet bulb mencapai nilai tertinggi 27,63%.
3. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, efektivitas titik embun berada pada nilai terendah 11,11%. Pada \dot{m} primer 0,0276 kg/s, efektivitas titik embun mencapai nilai tertinggi 19,81%.
4. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, kapasitas pendinginan berada pada nilai terendah 53,318 W. Pada \dot{m} udara primer 0,0415 kg/s, kapasitas pendinginan mencapai nilai tertinggi 58,45 W.

5. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, didapat nilai EER terendah 39%. Pada \dot{m} udara primer 0,0276 kg/s, EER mencapai nilai tertinggi 48,6%.

Daftar Pustaka

- [1] Ali, M. et al., 2021, *Performance enhancement of a cross flow dew point indirect evaporative cooler with circular finned channel geometry*, Journal of Building Engineering, 35, p. 101980.
- [2] Anisimov, S. et al., 2014, *Performance investigation of a M (Maisotsenko) -cycle cross-flow heat exchanger used for indirect evaporative cooling*, Energy, pp. 1–14.
- [3] Khalid, O. et al., 2016, *Experimental analysis of an improved Maisotsenko cycle design under low velocity conditions*, Applied Thermal Engineering, 95, pp. 288–295.
- [4] Lin, J. et al., 2021, *Understanding the transient behavior of the dew point evaporative cooler from the first and second law of thermodynamics*, Energy Conversion and Management [Preprint].
- [5] Rajput, R.K., 2007., *Engineering Thermodynamics Third Edit*, LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD.
- [6] Riangvilaikul, B. and Kumar, S., 2010, *An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system*, Energy and Buildings, 42(5), pp. 637–644.
- [7] Rogdakis, E.D., Koronak, I.P. and Tertipis, D.N., 2013, *Experimental and computational evaluation of a Maisotsenko evaporative cooler at Greek climate*, Energy & Buildings.
- [8] Romero-lara, M.J. et al., 2023, *Seasonal energy efficiency ratio of regenerative indirect evaporative coolers — Simplified calculation method*, Applied Thermal Engineering, 220(November 2022), p. 119710.
- [9] Sajjad, U. et al., 2021, *A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 122(January), p. 105140.

	<p>Tegar Ramadhan menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, dari tahun 2020 hingga 2024, dengan fokus utama pada bidang konversi energi.</p>
<p>Judul Tugas Akhir Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Parallel Flow Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer</p>	

Pabrikasi *Membrane Electrode Assembly* Menggunakan Metode *Decal Transfer* Dengan Variasi Ketebalan Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung Vulcan XC-72

Luh Ary Putri Manik¹, I Made Joni², Made Suarda^{1*}, Ketut Astawa^{1*},
Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik - Mesin Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

²Finder U-CoE- Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Energi memegang peranan sangat penting dalam kehidupan manusia. Saat ini, sebagian besar sumber energi di Indonesia masih bergantung pada bahan bakar fosil. Penipisan sumber energi fosil dan masalah lingkungan merupakan dua permasalahan utama yang akan dihadapi jika terus bergantung pada energi berbasis bahan bakar fosil. Oleh karena itu, transisi menuju energi hijau, seperti hidrogen, menjadi fokus utama saat ini. Hidrogen dapat dikonversi menjadi listrik menggunakan teknologi proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), dimana membrane electrode assembly (MEA) sebagai jantungnya. Kinerja MEA dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya oleh metode pabrikasi yang digunakan. Fokus utama penelitian ini adalah peningkatan performa PEMFC melalui pabrikasi MEA menggunakan metode decal transfer dengan variasi ketebalan katalis Pt.TiO₂/vulcan XC-72. Sampel 1 dengan ketebalan anode dan katode 30 μm, Sampel 2 dengan ketebalan anode 30 μm dan katode 40 μm, dan Sampel 3 dengan ketebalan anode 30 μm katode 50 μm. Berdasarkan pengujian kinerja, Sampel 1 menunjukkan hasil terbaik, yaitu menghasilkan tegangan 0,3 μV. Sedangkan sampel 2 dan 3 menghasilkan tegangan yang lebih rendah yaitu 0,2 μV. Ketebalan yang lebih rendah cenderung menghasilkan MEA dengan kinerja yang lebih baik. Hal ini diakibatkan karena umumnya pada ketebalan katalis yang lebih rendah akan menghasilkan hubungan antarmuka yang lebih baik sehingga zona three phase boundaries (TPB) terbentuk.

Kata Kunci: Decal Transfer, ketebalan katalis, Membrane Electrode Assembly

Abstract

Energy is very important in human life. Currently, most energy sources in Indonesia still depend on fossil fuels. The depletion of fossil energy sources and environmental problems are two major problems that will be faced if we continue to rely on fossil fuel-based energy. Therefore, the transition to green energy, such as hydrogen, is a major focus at the moment. Hydrogen can be converted into electricity using proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) technology, where the membrane electrode assembly (MEA) is the key. MEA performance is influenced by several factors, one of which is the fabrication method used. The main focus of this study is to improve PEMFC performance through MEA fabrication using the decal transfer method with variations in the thickness of the Pt.TiO₂/vulcan XC-72 catalyst. Sample 1 with anode and cathode thickness of 30 μm, Sample 2 with anode thickness of 30 μm and cathode of 40 μm, and Sample 3 with anode thickness of 30 μm and cathode of 50 μm. Based on performance testing, Sample 1 showed the best results, which produced a voltage of 0.3 μV. While samples 2 and 3 produced a lower voltage of 0.2 μV. Lower thickness tends to produce MEA with better performance. This is because generally at a lower catalyst thickness it will produce a better interface relationship so that the three phase boundaries (TPB) zone is formed.

Keywords: Decal Transfer, catalyst thicknes, Membrane Electrode Assembly

1. Pendahuluan

Bahan bakar fosil seperti minyak bumi dan batu bara merupakan sumber energi utama yang umumnya digunakan di Indonesia saat ini. Penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan mengakibatkan berbagai masalah lingkungan, salah satunya adalah perubahan iklim global [1]. Hal ini terjadi akibat emisi yang dihasilkan dari penggunaan bahan bakar fosil. Selain itu, ketersediaan bahan bakar fosil yang terbatas dikhawatirkan menyebabkan krisis energi, sehingga mengakibatkan sulitnya pemenuhan kebutuhan energi. Maka dari itu, upaya transisi

menuju energi yang lebih ramah lingkungan dan terbarukan terus dilakukan [2].

Hidrogen merupakan sumber energi yang dianggap mampu menggantikan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama [3]. Melalui reksi elektrokimia, hidrogen dapat dikonversi menjadi listrik menggunakan teknologi fuel cell [4]. Teknologi fuel cell telah di terapkan dalam berbagai sektor, seperti pada sektor transportasi yang umumnya menggunakan proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) [5]. PEMFC merupakan fuel cell suhu rendah dengan empat komponen penyusun,

yaitu *end plat*, *current collector*, gasket, dan *membrane electrode assembly* (MEA) [6].

MEA adalah komponen utama dalam PEMFC, terdiri atas tiga komponen penyusun, yaitu *proton exchange membrane* (PEM), lapisan katalis, dan *gas diffusion layer* (GDL) yang membentuk zona *three phase boundaries* (TBP) [7-9]. Di dalam MEA inilah reaksi elektrokimia terjadi, dimana lapisan katalis memegang peranan yang sangat penting [7]. Umumnya katalis menggunakan material platina (Pt) yang didukung karbon [3]. Penggunaan Pt mengakibatkan tingginya biaya produksi [10]. Hal ini mendorong dilakukannya berbagai penelitian untuk menekan biaya produksi sekaligus meningkatkan kinerja *fuel cell*, salah satunya dengan cara substitusi titanium dioksida (TiO₂) [11]. Selain itu, pemilihan metode pabrikan diketahui mampu mengurangi penggunaan Pt sekaligus meningkatkan kinerja *fuel cell* [12]. *Decal transfer* merupakan bagian dari metode *catalyst coated membrane* (CCM) yang saat ini banyak diterapkan untuk mengasihkan MEA dengan kinerja yang baik. Metode *decal transfer* dianggap mampu mengasihkan MEA dengan area aktif elektrokimia yang lebih tinggi dibandingkan metode lainnya [7]. Metode pabrikan *decal transfer* ini menggabungkan dua teknik dalam prosesnya, yaitu *doctor blade* dan *hot press* [13].

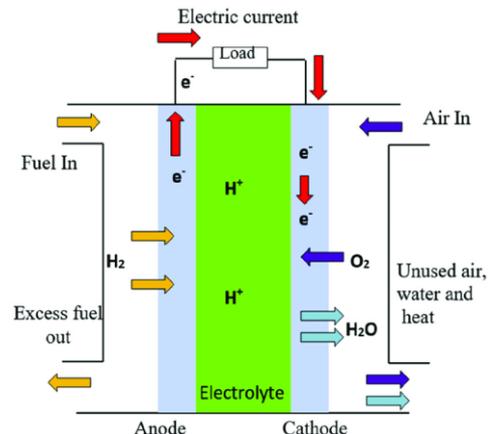
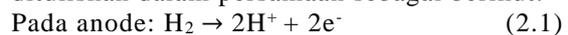
Doctor blade merupakan teknik pelapisan katalis pada substrat menggunakan *doctor knife*. Teknik pelapisan ini dapat mengasihkan lapisan katalis yang merata, homogen, dan akurat karena dalam prosesnya ketebalan katalis dapat diatur sesuai dengan kebutuhan [7]. Pengaturan ketebalan lapisan katalis ini sangat penting, karena ketebalan lapisan katalis dapat mempengaruhi porositas, resistansi massa, resistansi aktivitas elektroda, dan ohmik yang nantinya akan berdampak pada kinerja *fuel cell* secara keseluruhan [14].

Studi lebih lanjut mengenai pabrikan MEA dengan katalis Pt.TiO₂/vulcan XC-72 menggunakan metode *decal transfer* dengan variasi ketebalan lapisan katalis tertentu dilakukan untuk menganalisis kinerjanya terhadap MEA yang dihasilkan. Untuk menjaga fokus penelitian dan meminimalisir penyimpangan akibat luasnya permasalahan, maka perlu dilakukan pembatasan, diantaranya kemurnian material komponen MEA yang digunakan sesuai dengan yang dikeluarkan oleh pabrikan. Tekanan, waktu, dan suhu lingkungan diasumsikan konstan selama proses *hot press*, dan katalis yang digunakan dalam pembuatan MEA adalah Pt.TiO₂/vulcan XC-72 yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya.

2. Dasar Teori

2.1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) merupakan *fuel cell* suhu rendah yang beroperasi pada kisaran suhu 80°C [15]. PEMFC terdiri atas beberapa komponen penyusun, yaitu *end plat*, *current collector*, gasket, dan MEA [6]. Secara konsep, pengoperasian sistem PEMFC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Jenis *fuel cell* ini menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar dan oksigen (dapat menggunakan udara) sebagai oksidan. Hidrogen akan disuplai ke anode, sedangkan oksigen ke katode. Hidrogen akan mengalami reaksi oksidasi atau *hydrogen oxidation reaction* (HOR), sedangkan oksigen mengalami reaksi reduksi atau *oxygen reduction reaction* (ORR). Reaksi HOR akan memecah hidrogen menjadi ion hidrogen positif (H⁺) dan elektron (e⁻). H⁺ akan ditransfer menuju katode melalui PEM, sedangkan elektron akan diangkut oleh GDL menuju *current collector* untuk dialirkan ke *circuit external*. H⁺ yang telah sampai di katode akan bertemu dengan e⁻ dari *circuit external* dan oksigen membentuk air. Reaksi di atas dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:



Gambar 1. Sistem Pengoperasian PEMFC [16]

2.2. Membrane Elektrode Assembly

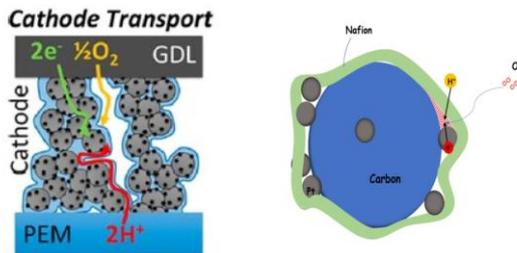
Membrane electrode assembly (MEA) merupakan komponen paling penting dalam PEMFC karena pada MEA inilah terdapat zona TBP. TBP merupakan zona dimana elektrolit, elektroda dan area berpori berpotongan seperti pada Gambar 2. Pada zona TBP inilah transport bahan bakar, ionik, dan muatan terjadi [9].

MEA terdiri atas tiga komponen penyusun yaitu:

a. Proton Exchange Membrane

Proton exchange membrane (PEM) berperan sebagai elektrolit, umumnya berbahan dasar *perfluorosulfonic acid* (PFSA) seperti nafion. PEM berfungsi untuk mentransfer H⁺

dari sisi anoda ke katoda. PEM harus memiliki permeabilitas gas yang rendah karena harus mampu mencegah konduksi elektron dan mencegah bahan bakar bercampur dengan oksidan. Selain itu, PEM juga harus memiliki kelembapan yang rendah, stabilitas elektrokimia, stabilitas termal, dan stabilitas mekanik yang baik [9].



Gambar 2. Zona Three Phase Boundaries [9]

b. Lapisan Katalis

Lapisan katalis berperan sebagai elektroda, yaitu tempat berlangsungnya reaksi elektrokimia. Di dalam lapisan katalis inilah hidrogen dan oksigen mengalami reaksi oksidasi dan reduksi. Terdapat empat karakteristik utama yang harus dimiliki lapisan katalis, yaitu sifat berpori untuk media konduksi, konduktivitas untuk transfer elektron, kontak antara muka dengan membran untuk transfer massa, dan juga lapisan katalis harus cukup tipis. Ketebalan tidak hanya mempengaruhi kecepatan perpindahan massa dan muatan tetapi juga berkaitan dengan efisiensi pemanfaatan katalis [9].

c. Gas Diffusion Layer

Gas diffusion layer (GDL) terdiri dari dua lapisan, yaitu *gas diffusion media* (GDM) dan *microporous layer* (MPL). GDL merupakan struktur berpori yang berperan sebagai pengangkut elektron menuju lapisan katalis atau sebaliknya, menyediakan jalur difusi gas ke lapisan katalis, serta mendukung pengelolaan air [12]. Umumnya GDL menggunakan bahan berbasis karbon, yaitu serat karbon sebagai GDM dan serbuk karbon sebagai MPL [9].

2.3. Decal Transfer

Decal transfer merupakan bagian dari metode *catalyst coated membrane* (CCM) dengan mengaplikasikan katalis langsung pada membran melalui substrat, umumnya teflon atau kapton film dengan menggunakan teknik *doctor blade coating*. Substrat yang telah dilapisi katalis ditransfer ke kedua sisi membran elektrolit menggunakan mesin *hot press* [17]. Mekanisme proses *decal transfer* ditunjukkan pada Gambar 3.

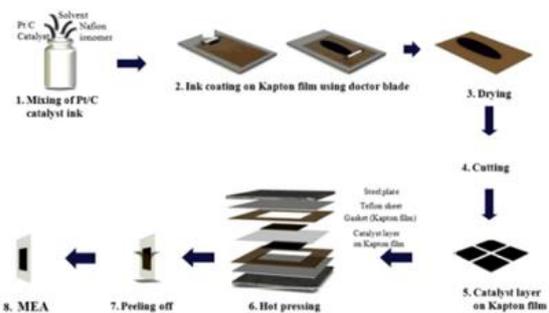
A. Doctor Blade

Doctor blade coating merupakan teknik pelapisan katalis menggunakan alat yang disebut dengan *doctor knife*. Teknik pelapisan

ini memiliki keunggulan dibandingkan teknik pelapisan lainnya, yaitu pendistribusian katalis yang homogen dan akurasi ketebalan. Menggunakan teknik *doctor blade*, ketebalan tinta katalis dapat disesuaikan dengan kebutuhan [7].

B. Hot Press

Hot press merupakan metode yang umum digunakan untuk mentransfer katalis ke membran. Teknik ini mampu menghasilkan kontak antarmuka yang baik antara katalis dan membran. Umumnya, pada proses *hot press* kondisi seperti tekanan, suhu dan waktu memegang peranan yang sangat penting terhadap kinerja MEA secara keseluruhan [18]. Namun, saat ini metode *hot press* rolling juga dipertimbangkan dalam pabrikasi MEA karena mampu menghasilkan MEA dengan kinerja yang baik [19].



Gambar 3. Mekanisme Proses CCM-DT [17]

3. Metode penelitian

Pada penelitian ini dilakukan pabrikasi MEA menggunakan metode *decal transfer* dengan katalis Pt.TiO₂/vulcan XC-72.

3.1 Pre-treatment Membrane

Membrane direndam secara bergantian menggunakan larutan H₂SO₄ (3-5%) dan H₂O₂ (0,5M) yang dipanaskan pada suhu 60-80°C. Kemudian dibilas menggunakan air deionisasi hingga pH 7. Lalu, disimpan pada air destilasi.

3.2 Pembuatan Tinta Katalis

Tinta katalis dibuat dengan mencampurkan 1gr katalis Pt.TiO₂/vulcan XC-72; 2,4gr air destilasi; 1,2gr isopropanol alkohol (IPA); 1,2gr *nafion solution*; dan 0,75gr *etilen glycol*. Campuran ini kemudian di homogenasi menggunakan ultrasonikasi pada frekuensi 60 Hz selama 3jam. Dilakukan penambahan es untuk mencegah kenaikan suhu selama proses ultrasonikasi.

3.3 Deposisi Tinta Katalis

Deposisi tinta katalis pada kapton film dilakukan menggunakan mesin *doctor blade* dengan ketebalan yang telah ditentukan. Pada penelitian ini terdapat tiga variasi ketebalan lapisan katalis, yaitu Sampel 1 dengan ketebalan anode dan katode 30µm, Sampel 2 dengan ketebalan anode 30µm dan katode 40µm, dan Sampel 3 dengan ketebalan anode 30µm dan

katode $50\mu\text{m}$. Kapton film yang telah terlapiis katalis kemudian dikeringkan pada *vacuum oven* dengan suhu 90°C selama 70 menit.

3.4 Hot Press

Membran diapit katalis yang telah dideposisikan pada kapton film kemudian dimasukkan pada mesin *hot press*. *Hot press* dilakukan pada suhu 80°C dan ketebalan $140\mu\text{m}$. Setelah proses *hot press*, katalis akan tertransfer ke membran, lalu kapton film dilepas.

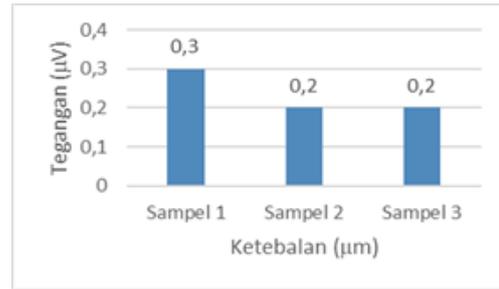
3.5 PEMFC Testing

PEMFC *testing* merupakan pengujian untuk mengetahui kinerja MEA. Pengujian ini dilakukan dengan prototipe PEMFC menggunakan MEA yang telah berhasil dipabrikasi. Rancangan alat pengujian MEA pada PEMFC terdiri atas komponen elektrolizer dan unit PEMFC yang dapat dibongkar pasang. Cara kerja alat ini adalah elektrolizer dihubungkan pada *power supply* dengan tegangan yang diatur 10V. Hidrogen hasil elektrolisis akan dialirkan ke sisi anode PEMFC sedangkan pasokan oksigen ke sisi katode menggunakan ketersediaan udara atmosfer pada lingkungan pengujian. Selanjutnya, akan terjadi rekasi elektrokimia di MEA. Lalu *current collector* pada PEMFC dihubungkan dengan pengukur tegangan listrik.

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian kinerja ketiga sampel ditunjukkan pada Gambar 4. Dapat dilihat Sampel 1 dengan variasi ketebalan katalis sisi anode $30\mu\text{m}$ dan katode $30\mu\text{m}$ menghasilkan tegangan terbesar yaitu $0,3\mu\text{V}$. Sedangkan Sampel 2 dan 3 menghasilkan tegangan lebih kecil yaitu $0,2\mu\text{V}$. Hal ini dapat disebabkan karena pada Sampel 1 dengan ketebalan lapisan katalis yang lebih rendah, membran dan katalis membentuk antarmuka yang baik, sehingga zona TPB terbentuk dan transfer massa berlangsung dengan optimal [9].

Ketebalan katalis akan mempengaruhi porositas. Semakin tebal lapisan katalis, porositasnya cenderung meningkat [20]. Hal ini dikaitkan dengan fenomena *pore collapse* atau runtuhnya lapisan katalis selama proses pengeringan dalam pabrikasi MEA, dimana ketebalan lapisan katalis erat kaitannya dengan struktur pori yang terbentuk selama proses pabrikasi [21]. Ketebalan yang lebih tinggi dapat meningkatkan porositas yang dapat menghambat transport ionik dan reaktan untuk menghasilkan listrik secara optimal. Oleh karena itu, pengendalian ketebalan selama pabrikasi sangat penting untuk mencapai kinerja *fuel cell* yang optimal. [21-22].



Gambar 4. Grafik Hubungan Ketebalan Lapisan Katalis dan Tegangan

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa ketebalan lapisan katalis memengaruhi kinerja MEA PEMFC. Ketebalan lapisan katalis dan kinerja MEA berbanding terbalik, yaitu semakin tipis lapisan katalis semakin baik kinerja yang dihasilkan. Hal ini dapat disebabkan karena karakteristik kontak antarmuka katalis dan membran yang membentuk zona TPB.

Daftar Pustaka

- [1] Azhar, M., Solechan, S., Saraswati, R., Suharso, P., Suhartoyo, S., & Ispriyarso, B., 2018, *The New Renewable Energy Consumption Policy of Rare Earth Metals to Build Indonesia's National Energy Security*, In E3S Web of Conferences (Vol. 68, p. 03008). EDP Sciences.
- [2] A. Nugraha *et al.*, 2022, *Energy Outlook 2022*, Jakarta: Pertamina Energy Institute.
- [3] Zhao, Y., Mao, Y., Zhang, W., Tang, Y., & Wang, P., 2020, *Reviews on the effects of contaminations and research methodologies for PEMFC*, International journal of hydrogen energy, 45(43), 23174-23200.
- [4] Bhosale, A. C., Ghosh, P. C., & Assaud, L., 2020, *Preparation methods of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells and unitized regenerative fuel cells: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110286.
- [5] Gopal, S. M., & Reddy, K. M., 2023, *Design and control of high voltage gain interleaved boost converter for fuel cell based electric vehicle applications*, J Electron Comput Netw Appl Math, 3(32), 9-24.
- [6] Parekh, A., 2022, *Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review*, Frontiers in Energy Research, 10, 956132.

- [7] Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Daud, W. R. W., Radzuan, N. A. M., & Haque, M. A., 2021, *Comparison of catalyst-coated membranes and catalyst-coated substrate for PEMFC membrane electrode assembly: A review*, Chinese Journal of Chemical Engineering, 33, 1-16.
- [8] Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A., 2018, *Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 117-134.
- [9] Xie, M., Chu, T., Wang, T., Wan, K., Yang, D., Li, B., & Zhang, C., 2021, *Preparation, performance and challenges of catalyst layer for proton exchange membrane fuel cell*, Membranes, 11(11), 879.
- [10] Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A., 2018, *Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 117-134.
- [11] Wang, J., Xu, M., Zhao, J., Fang, H., Huang, Q., Xiao, W., ...& Wang, D., 2018, *Anchoring ultrafine Pt electrocatalysts on TiO₂-C via photochemical strategy to enhance the stability and efficiency for oxygen reduction reaction*, Applied Catalysis B: Environmental, 237, 228-236.
- [12] Okonkwo, P. C., Ige, O. O., Uzoma, P. C., Emori, W., Benamor, A., & Abdullah, A. M., 2021, *Platinum degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review*, International journal of hydrogen energy, 46(29), 15850-15865.
- [13] Choi, M., Kim, J. K., Kim, J., Yang, S., Park, J. E., Kim, O. H., & Cho, Y. H., 2018, *PtRu/C catalyst slurry preparation for large-scale decal transfer with high performance of proton exchange membrane fuel cells*. RSC advances, 8(63), 36313-36322.
- [14] Ferng, Y. M., Su, A., & Hou, J., 2014, *Parametric investigation to enhance the performance of a PBI-based high-temperature PEMFC*, Energy conversion and management, 78, 431-437.
- [15] Akinyele, D., Olabode, E., & Amole, A., 2020, *Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems*, Inventions, 5(3), 42.
- [16] Li, C., Liu, Y., Xu, B., & Ma, Z., 2019, *Finite time thermodynamic optimization of an irreversible proton exchange membrane fuel cell for vehicle use*, Processes, 7(7), 419.
- [17] Cho, H. J., Jang, H., Lim, S., Cho, E., Lim, T. H., Oh, I. H., ... & Jang, J. H., 2011, *Development of a novel decal transfer process for fabrication of high-performance and reliable membrane electrode assemblies for PEMFCs*, International journal of hydrogen energy, 36(19), 12465-12473.
- [18] Gatto, I., Saccà, A., Baglio, V., Aricò, A. S., Oldani, C., Merlo, L., & Carbone, A., 2019, *Evaluation of hot pressing parameters on the electrochemical performance of MEAs based on Aquivion® PFSA membranes*, Journal of Energy Chemistry, 35, 168-173.
- [19] Mehmood, A., & Ha, H. Y., 2012, *An efficient decal transfer method using a roll-press to fabricate membrane electrode assemblies for direct methanol fuel cells*, International journal of hydrogen energy, 37(23), 18463-18470.
- [20] Sassin, M. B., Garsany, Y., Atkinson Iii, R. W., Hjelm, R. M. E., & Swider-Lyons, K. E., 2019, *Understanding the interplay between cathode catalyst layer porosity and thickness on transport limitations en route to high-performance PEMFCs*, International Journal of Hydrogen Energy, 44(31), 16944-16955.
- [21] Suzuki, T., Tanaka, H., Hayase, M., Tsushima, S., & Hirai, S., 2016, *Investigation of porous structure formation of catalyst layers for proton exchange membrane fuel cells and their effect on cell performance*. International Journal of Hydrogen Energy, 41(44), 20326-20335.
- [22] Xia, L., Ni, M., Xu, Q., Xu, H., & Zheng, K., 2021, *Optimization of catalyst layer thickness for achieving high performance and low cost of high temperature proton exchange membrane fuel cell*. Applied Energy, 294, 117012.

	<p>Luh Ary Putri Manik melanjutkan studi di Program Sarjana Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2020. Bidang penelitian yang diminati adalah <i>sustainable energy</i>, khususnya hidrogen yang kemudian ditekuni sebagai topik penelitian tugas akhir.</p>
---	--

Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Counter Flow Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer

Fikri Nur Rohman, Hendra Wijaksana dan I Gede Teddy Prananda Surya

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Penggunaan energi tak terbarukan yang semakin lama semakin meningkat menyebabkan semakin meningkatnya emisi gas rumah kaca, sehingga hal ini dapat berdampak buruk pada lingkungan. Salah satu penggunaan energi tak terbarukan yang perlu dikurangi ialah sektor pendinginan. Energi yang ramah lingkungan pada sektor pendinginan ialah penggunaan pendinginan evaporative, salah satunya yaitu M-IEC yang termasuk dalam pendinginan evaporative tidak langsung serta tergolong dalam pengembangan jenis pendinginan evaporative, karena menggabungkan proses pendinginan evaporative langsung dan pendinginan evaporative tidak langsung. Dalam penelitian ini sistem pendinginan maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling dilakukan dengan pola udara counter flow dengan memvariasikan laju aliran massa udara primer 0,055296 kg/s, 0,041472 kg/s dan 0,027648 kg/s. Distribusi laju aliran massa udara primer akan sangat mempengaruhi temperature udara masuk dan temperature udara keluaran, ΔTDB tertinggi didapatkan pada laju aliran massa udara primer 0,027648 kg/s, efektivitas bola basah (ϵ_{wb}) dan efektivitas titik embun (ϵ_{dp}) tertinggi terjadi pada laju aliran massa udara primer 0,027648 kg/s disebabkan faktor semakin rendah laju aliran massa udara, diikuti dengan rendahnya temperature bola kering akan menghasilkan efektivitas yang semakin tinggi. Kapasitas pendinginan (Q_s) tertinggi terjadi pada laju aliran massa udara primer 0,05296 kg/s karena sistem pendinginan maisotsenko tergantung pada tingginya temperature masuk bola kering dan laju aliran massa udaranya sehingga akan menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih besar pulak. Energi efficiency ratio (EER) tertinggi terjadi pada laju aliran massa udara primer 0,05296 kg/s, besarnya EER sangat tergantung pada kapasitas pendinginan yang dihasilkan, dimana kapasitas pendinginan juga akan meningkat dengan meningkatnya laju aliran massa udara primer yang lebih besar.

Kata kunci: Pendinginan evaporative, M-IEC, variasi laju aliran massa udara, selisih penurunan temperature, efektivitas bola basah, efektivitas titik embun, kapasitas pendinginan dan energi efficiency ratio

Abstract

The increasing use of non-renewable energy causes increasing greenhouse gas emissions, so that this can have a negative impact on the environment. One of the uses of non-renewable energy that needs to be reduced is the cooling sector. Environmentally friendly energy in the cooling sector is the use of evaporative cooling, one of which is M-IEC which is included in indirect evaporative cooling and is included in the development of the evaporative cooling type, because it combines the direct evaporative cooling process and indirect evaporative cooling. In this study, the Maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling system was carried out with a counter flow air pattern by varying the primary air mass flow rate of 0.055296 kg / s, 0.041472 kg / s and 0.027648 kg / s. The distribution of the primary air mass flow rate will greatly affect the inlet air temperature and outlet air temperature, the highest ΔTDB is obtained at a primary air mass flow rate of 0.027648 kg/s, the highest wet bulb effectiveness (ϵ_{wb}) and dew point effectiveness (ϵ_{dp}) occur at a primary air mass flow rate of 0.027648 kg/s due to the factor that the lower the air mass flow rate, followed by the low dry bulb temperature will produce higher effectiveness. The highest cooling capacity (Q_s) occurs at a primary air mass flow rate of 0.05296 kg/s because the maisotsenko cooling system depends on the high dry bulb inlet temperature and its air mass flow rate so that it will produce a greater cooling capacity. The highest energy efficiency ratio (EER) occurs at a primary air mass flow rate of 0.05296 kg/s, the amount of EER is highly dependent on the cooling capacity produced, where the cooling capacity will also increase with the increase in the primary air mass flow rate.

Keywords: Evaporative cooling, M-IEC, variation of air mass flow rate, air temperature distribution, temperature drop difference, wet bulb effectiveness, dew point effectiveness, cooling capacity, cooling rate and energy efficiency ratio.

1. Pendahuluan

Sudah sejak lama energi tak terbarukan semacam minyak, batu bara dan gas menjadi bagian penting dalam kehidupan manusia di alam ini, ditambah populasi manusia disetiap tahunnya yang semakin meningkat, juga sangat berdampak pada penggunaan

energi tersebut. Yang mana energi tak terbarukan ini sangat berpengaruh pada kenaikan emisi gas rumah kaca. Penggunaan sistem pendinginan udara yang semakin meningkat di setiap tahunnya, terutama pendinginan konvensional yang menggunakan teknologi kompresi, menyebabkan semakin naiknya

konsumsi energi. Dengan demikian berdampak pula kepada kenaikan emisi gas rumah kaca. Salah satu teknologi pendinginan yang ramah lingkungan ialah sistem pendinginan evaporative melalui siklus *maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling (M-IEC)* karena sistem ini menyediakan suplai suhu udara dibawah bola basah hingga mendekati suhu titik embun dengan efisiensi tertinggi tetapi juga mengkonsumsi listrik jauh lebih rendah dibandingkan sistem pendinginan lain [1]

Jenis baru sistem pendinginan *evaporative* tidak langsung yaitu siklus *maisotsenko*. Siklus *maisotsenko* ini juga sangat ramah lingkungan berbeda dengan sistem pendinginan udara konvensional yang mana sistem ini memanfaatkan gas alam atau sumber panas tingkat rendah seperti energi matahari dan limbah panas industri. Sistem pengoperasian siklus *maisotsenko* ini sama dengan sistem pengoperasian pada perangkat *indirect evaporative cooling*. Akan tetapi pada siklus *maisotsenko* terdapat beberapa saluran udara yang dilubangi. Lubang saluran ini bertujuan untuk mengalihkan udara setelah didinginkan disalurkan kering untuk masuk ke saluran basah. Dengan adanya saluran udara ini bertujuan untuk mendinginkan udara keluaran hingga mencapai suhu titik embun yang mana sesuai dengan udara masuk [2].

Pada penelitian kali ini siklus *maisotsenko* memiliki 5 jalur lubang pengalihan udara di saluran kering pada saluran kerja, 5 jalur lubang pengalihan udara ini bertujuan untuk mengalihkan aliran fluida atau udara setelah didinginkan di saluran kering untuk masuk ke saluran basah. Pada sistem pendinginan siklus *maisotsenko* ini pola aliran udara yang masuk ke saluran basah berada dalam kondisi *counter flow* (berlawanan arah) pada saluran kerja. Pola *counter flow* di sistem siklus *maisotsenko* bertujuan untuk membantu meningkatkan efisiensi pendinginan [3]. Serta dengan pola perbedaan laju aliran massa udara *primer* dan *sekunder* yang berbeda dapat memberikan efektivitas yang optimal terhadap kinerja dari siklus *M-IEC* itu sendiri. Cara yang tepat untuk meningkatkan efektivitas pada pendinginan siklus *maisotsenko* adalah dengan mengurangi rasio laju aliran masa udara produk terhadap laju aliran massa udara kerja [4].

Dalam penelitian sistem pendinginan *M-Cycle* ini menggunakan saluran bertipe balok dengan ukuran 12 cm x 8 cm x 8 cm pada saluran kering dan 12 cm x 4 cm x 8 cm pada saluran basah. Tipe ini bertujuan untuk udara yang masuk ke saluran basah mendapatkan kontak yang lebih lama pada dinding saluran kering produk karena faktor luas dari saluran kering yang lebih luas dari pada saluran basah sehingga kecepatan udara masuk di saluran basah cenderung lebih lambat, sehingga panas dari saluran

produk dapat diserap lebih banyak pada dinding saluran basah.

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah untuk menganalisa performansi sistem pendinginan *maisotsenko* udara *counter flow* dengan variasi laju aliran massa udara *primer*.

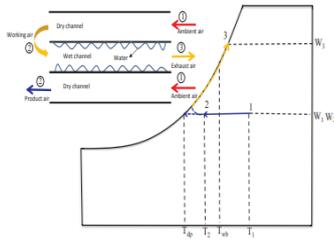
2. Dasar Teori

2.1 Pendinginan Evaporative

Pendinginan *evaporative* merupakan sistem pendingin tanpa menggunakan refrigerant, kontruksi dasarnya terdiri dari udara dan semburan air Pendinginan. Pada pendinginan *evaporative*, air sebagai media pendinginan dan menambah kelembaban pada aliran udara [5]. Oleh karena itu, pendinginan *evaporative* menyebabkan penurunan suhu udara pasokan yang sebanding dengan penurunan panas sensibel dari udara pasokan dan peningkatan kelembaban udara pasokan yang sebanding dengan perolehan panas laten oleh air [6]. Pendinginan *evaporative* umumnya membutuhkan seperempat tenaga listrik yang digunakan oleh kompresi uap mekanis untuk pengkondisian udara. Oleh karena itu, sistem ini akan membantu mengurangi penggunaan listrik dan juga mengurangi emisi gas rumah kaca.

2.2 Siklus Maisotsenko (M-Cycle)

Siklus *Maisotsenko (M-Cycle)* merupakan evolusi pendinginan *evaporative* tidak langsung, siklus ini pertama kali diperkenalkan oleh valerij Maisotsenko yang pertama kali di perkenalkan pada 1976. Siklus ini dianggap sangat inovatif karena kemampuannya untuk mencapai efisiensi tinggi dengan konsumsi energi yang rendah. Siklus *M-Cycle* juga merupakan pendinginan *evaporative* titik embun (*DPEC*) yang mana bagian dari udara yang didinginkan secara tidak langsung disirkulasikan di saluran basah *HMX* sehingga dapat meningkatkan efektivitas pertukaran panas secara keseluruhan[7]. Penukar panas dan massa (*HMX*) berbasis siklus *M-Cycle* juga dapat dengan mudah diintegrasikan dalam sistem pendingin konvensional. Dalam kondisi iklim sedang, udara sekitar tidak memerlukan kelembaban lagi sebelum dikirim ke ruangan yang dikondisikan. Sedangkan tenaga surya dapat dimanfaatkan untuk tujuan pemanasan sehingga menjadikan keseluruhan sistem ramah lingkungan. *HMX* berbasis siklus *M-Cycle* dalam kondisi seperti ini dapat memberikan keuntungan dibandingkan dengan metode konvensional karena dapat bekerja dengan baik bahkan pada kelembaban yang kurang efektif. Sehingga memungkinkan penerapan teknologi pengering yang lebih luas di area dimana sistem ini diperkirakan kurang berguna [8].



Gambar 1. Siklus Pendinginan Maisotsenko

2.3 Laju Aliran Massa

Laju aliran massa adalah massa dari suatu aliran yang mengalir tiap detiknya yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran, jenis aliran dan besar kecilnya penampang yang dialiri fluida. Cara untuk meningkatkan efisiensi pendinginan pada siklus maisotsenko adalah dengan mengurangi rasio aliran massa produk terhadap kerja. Namun, metode ini menyebabkan peningkatan konsumsi air yang signifikan

2.4 Temperature Dry Bulb (Bola Kering)

Suhu bola kering merupakan suhu termodinamika yang sebenarnya yang pengukurannya dapat dilakukan secara langsung. Oleh karena itu, suhu bola kering memberikan gambaran tentang sejauh mana suhu udara yang diukur tersebut [9]

2.5 Temperature Wet Bulb (Bola Basah)

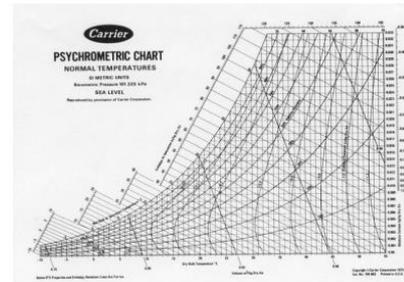
Temperature bola basah adalah rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan asupan temperature udara dan temperature bola basahnya.

2.6 Temperature Dew Point (Suhu Titik Embun)

Titik embun adalah rasio perbedaan suhu bola kering inlet dan outlet dengan perbedaan suhu antara bola kering inlet dan suhu titik embun yang sesuai. Adanya perubahan pada Suhu titik embun menunjukkan adanya perubahan panas laten atau adanya perubahan kandungan uap air di udara.

2.7 Diagram Psikometrik (Psychrometric Chart)

Psikrometrik merupakan studi tentang campuran udara dan air serta merupakan dasar penting untuk memahami cara mengubah kondisi udara dari satu keadaan ke keadaan lain.



Gambar 2. Diagram psikometrik chart

3. Metode Penelitian

3.1 Konsep Penelitian

Penelitian akan dilakukan secara eksperimental pada alat pendinginan siklus maisotsenko udara counter flow dengan variasi laju aliran massa udara primer 0,055296 kg/s, 0,041472 kg/s dan 0,027648 kg/s terhadap laju aliran massa udara sekunder yang konstan pada laju aliran massa udara 0,06912 kg/s. Adapun tahapan-tahapan penelitiannya sebagai berikut

1. Observasi dan studi literatur
2. Persiapan alat dan bahan serta pemasangan alat ukur
3. Pengujian sistem pendinginan Maisotsenko udara counter flow dengan variasi laju aliran massa udara primer
4. Pencatatan data
5. Penganalisan data, pembahasan, pembuatan grafik dan Kesimpulan

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

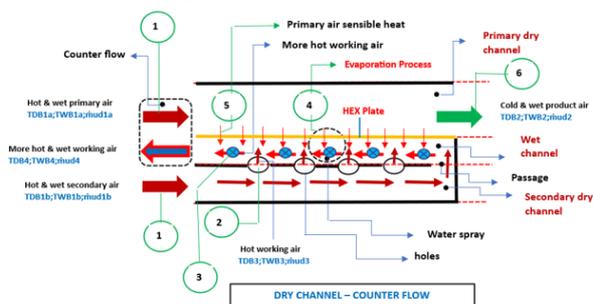
1. UNI-T UT333 Thermometer Hygrometer Humidity
2. HT-9815 Thermocouple 4 Channel HTI HT9815 Probe Termometer Termocouple
3. Digital wind anemometer - dengan range 0 – 30 m/s
4. Pompa pengabut
5. Nozzel
6. Dimer
7. Stopwatch
8. Plat alumunium dan plat tembaga
9. Riped dan paku riped
10. Gerinda dan Bor
11. Blower Keong
12. Flexible hose
13. Alumunium Foil
14. Glasswool

3.3 Cara Kerja Alat Uji

1. udara lingkungan akan masuk melalui *inlet primary dry channel* dan *inlet secondary dry channel* dengan variasi laju aliran massa udara primer: sekunder. Maka dengan variasi laju

aliran massa, udara primernya diatur masing-masing secara berurutan dengan kecepatan aliran udara primer 1, 2 dan 3 sebesar 7,2m/s, 5,4m/s, dan 3,6m/s, sedangkan kecepatan aliran udara sekunder, baik untuk kecepatan aliran udara sekunder 1, 2, dan 3 akan dijaga konstan sebesar 9m/s.

- udara sekunder pada secondary dry channel, selanjutnya akan masuk pada wet channel melalui setiap lubang (terdapat 5 lubang) dan satu laluan pada dinding wet channel yang selanjutnya akan disebut sebagai udara kerja
- Udara kerja pada wet channel ini, selanjutnya akan mengalami kontak langsung (secara cross flow) dengan kabut air yang disemprotkan oleh water sprayer dan akan terjadi proses direct evaporative cooling, dimana terjadi kontak langsung antara udara kerja dan kabut air.
- Kontak langsung antara udara dengan kabut air akan mengakibatkan terjadinya proses evaporasi, dimana panas udara kerja akan diserap oleh kabut air sehingga air akan menguap. Dengan diserapnya panas udara kerja oleh kabut air, maka udara kerja akan mengalami penurunan suhu atau udara kerja akan menjadi lebih dingin.
- Setelah ditransfer secara konveksi lalu konduksi melalui dinding heat exchanger plate (HEX plate) pada sisi udara primer menuju dinding HEX plate pada sisi wet channel. dimana terjadi pendinginan indirect evaporative udara primer oleh udara kerja.
- Proses indirect evaporative cooling udara primer oleh udara kerja pada wet channel melalui HEX plate akan menghasilkan udara primer yang lebih rendah temperaturnya dengan kelembaban absolut yang konstan, yang keluar melalui outlet primary dry channel sebagai udara produk. Karena proses pendinginan indirect evaporative, maka kelembaban absolut udara produk akan tetap konstan sama dengan kelembabannya pada inlet primary dry channel



Gambar 3. Prinsip kerja sistem maisotsenko aliran counter flow

4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Data Hasil Penelitian

Pengujian eksperimental dilakukan pada sistim pendinginan Maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling. Pengambilan data pada penelitian dilakukan melalui hasil dari eksperimental dan hasil dari perhitungan pada diagram psikometrik chart. Adapun hasil data distribusi temperature dapat dilihat masing-masing secara berurutan pada Tabel 1, Tabel 3 dan Tabel 5. Untuk data hasil perhitungan menggunakan diagram psikometrik chart dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 4 dan Tabel 6.

Tabel 1. Data hasil pengujian eksperimental pada laju aliran massa 0,055296 kg/s

Waktu (Menit)	Data Primer (Data Eksperimental) Temperature Dry Bulb (TDB) dan Outlet RH					
	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2(°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3(%)
5	33,8	31,4	31,4	71,4	29	87,5
10	33,9	32	31,8	70,7	29,2	89
15	34,1	31,8	31,9	71,2	29,8	89,2
20	34,1	31,9	31,9	71,8	29,8	89,3
25	33,8	31,8	31,8	70,6	29,6	89,4
30	34	31,7	31,9	72,6	29,7	89,5
\bar{x}	33,9	31,7	31,8	71,3	29,5	88,9

Tabel 2. Data hasil perhitungan dengan diagram psikometrik chart laju aliran massa udara primer 0.055296 kg/s

Waktu (Menit)	Data Sekunder (Perhitungan Pada Diagram Psikometrik Chart) Temperature Wet Bulb (TWB), Inlet Relative Humidity (RH), Temperature Dew Point (TDP), Absolute Ratio							
	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	T dew 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio g/kg (d.a)
5	26,9	62,4	25,6	26,4	71,4	26,4	26,6	20,8
10	27,1	62,8	25,8	26,7	69,9	26,6	27	21,1
15	27,3	62,9	26	26,8	71,6	26,8	27,6	21,4
20	27,4	63,5	26,2	26,9	71,8	26,9	27,6	21,6
25	27,1	63,1	25,8	26,6	70,6	26,6	27,4	21,1
30	27,5	64,5	26,4	27	73,4	27	27,6	21,8
\bar{x}	27,2	63,2	25,9	26,7	71,4	26,7	27,3	21,3

Tabel 3. Data hasil pengujian eksperimental pada laju aliran massa 0.041472 kg/s

Waktu (Menit)	Data Primer (Data Eksperimental) Temperature Dry Bulb (TDB) dan Outlet RH					
	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,9	30,8	30,8	76,1	29	88,8
10	33,3	31,2	31	76,2	29	90
15	33,4	31,7	31,5	73	29,3	90,1
20	33,3	31,5	31,4	74,3	29,3	90,3
25	33,8	32,2	32	73,6	29,4	90,4
30	33,7	31,9	31,8	71,4	29,2	90,1
\bar{x}	33,4	31,5	31,4	74,1	29,2	88,9

Tabel 4. Data hasil perhitungan dengan diagram psikometrik chart laju aliran massa udara primer 0.041472 kg/s

Waktu (Menit)	Data Sekunder (Perhitungan pada Diagram Psikometrik Chart) Temperature Wet Bulb (TWB), Inlet Relative Humidity (RH), Temperature Dew Point (TDP), Absolute Ratio							
	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	Tdew1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio g/kg (d.a)
5	27,1	67,6	26,1	26,6	76,1	26,6	26,6	21,5
10	27,3	66,9	26,3	26,8	75,4	26,8	27	21,8
15	27,2	65,6	26,1	26,8	72,2	26,8	27,6	21,4
20	27,3	66,8	26,3	26,9	73,9	26,8	27,6	21,7
25	27,7	66,5	26,7	27,3	72,8	27,3	27,4	22,2
30	27,1	64,2	26	26,8	71	26,7	27,6	21,3
\bar{x}	27,3	66,2	26,2	26,8	73,5	26,8	27,3	21,6

Tabel 5. data hasil pengujian eksperimental pada laju aliran massa 0.027648 kg/s

Waktu (Menit)	Data Primer (Data Eksperimental) Temperature Dry Bulb (TDB) dan Outlet RH					
	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2(°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	33	31,6	30,7	75,9	29,1	89
10	33,1	31,6	30,6	74,8	28,8	90,2
15	32,8	31,4	30,4	76	28,4	90,4
20	32,6	31,3	30,3	72,5	28,2	90,5
25	32,7	31,3	30,2	73	28	90,6
30	32,7	31,5	30,4	71,4	28,3	90,7
\bar{x}	32,8	31,4	30,4	73,9	28,4	90,2

Tabel 6. Data hasil perhitungan dengan diagram psikometrik chart laju aliran massa udara primer 0.027648 kg/s

Waktu (Menit)	Data Sekunder (Perhitungan pada Diagram Psikometrik Chart) Temperature Wet Bulb (TWB), Inlet Relative Humidity (RH), Temperature Dew Point (TDP), Absolute Ratio							
	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	Tdew 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio g/kg (d.a)
5	27	66,6	26	26,7	72,1	26,5	26,9	21,3
10	26,8	64,9	25,6	26,4	70,6	26,2	26,8	20,8
15	26,7	66,3	25,7	26,5	71,8	26,2	26,5	20,9
20	26,1	63,6	24,8	25,8	68,5	25,6	26,3	19,8
25	26,1	63,3	24,8	25,8	68,6	25,6	26,1	19,9
30	26	62,7	24,6	25,8	67,1	25,5	26,4	19,6
\bar{x}	26,4	64,5	25,2	26,2	69,8	25,9	26,5	20,3

4.2 Selisih Penurunan Temperature Bola Kering (Temperature Drop)

Selisih penurunan temperature bola kering (temperature drop) merupakan selisih temperatur bola kering inlet dan outlet pada saluran udara primer sistem pendinginan Maisotsenko dan dapat ditentukan menggunakan persamaan dibawah.

$$\Delta T_{db} = T_{dbin} - T_{dbout} = T_{db1a} - T_{db2} \quad (1)$$

Tabel 7 selisih penurunan Tdb

m.primer(kg/s)	Tdb1a (°C)	Tdb2 (°C)	ΔT_{db} (°C)
0,05296	33,9	31,8	2,1
0,0411472	33,4	31,4	2
0,027648	32,8	30,4	2,4

Pada Tabel 7. dapat dilihat bahwa selisih penurunan temperatur bola kering tertinggi didapat pada laju aliran massa udara primer 0,027648 kg/s. Serta semakin tinggi laju aliran massa udara primer akan menghasilkan temperatur bola kering yang semakin besar.

4.3 Efektifitas Bola Basah (Wet Bulb Effectiveness)

Efektifitas Bola Basah merupakan ukuran kemampuan sistem pendingin Maisotsenko untuk mendinginkan udara hingga dibawah temperatur bola basah udara inlet (TWb). Performansi pendinginan ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$\varepsilon_{wb} = \frac{T_{dbin} - T_{dbout}}{T_{dbin} - T_{wb1a}} \times 100\% \quad (2)$$

Tabel 8 efektivitas bola basah

m.primer(kg/s)	Tdb1a (°C)	Tdb2 (°C)	Twb1a (°C)	ε_{wb} (%)
0,05296	33,9	31,8	27,2	31,3
0,0411472	33,4	31,4	27,3	32,8
0,027648	32,8	30,4	26,4	37,5

Tabel 8. memperlihatkan hasil wet bulb effectiveness (WBE) yang mana hasil tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara primer 0,027648 kg/s. Ini terjadi karena pada laju aliran massa udara rendah memberikan waktu interaksi pertukaran panas yang lama, sehingga lebih banyak panas sensibel udara yang dapat ditransfer secara konveksi dari udara ke plat penukar panas (heat exchanger plate). Hal ini menunjukkan bahwa besarnya WBE sangat tergantung pada kondisi udara primer inlet termasuk didalamnya TBK dan TBB udara primer inlet, serta juga tergantung pada laju aliran massa udaranya.

4.4 Efektivitas Titik Embun (Dew Point Effectiveness)

Dew point effectiveness (DPE) merupakan ukuran kemampuan sistim pendingin Maisotsenko untuk mendinginkan udara hingga mendekati temperatur pengembunannya (dew point temperature). Besarnya DPE dapat ditentukan menggunakan persamaan seperti dibawah.

$$\varepsilon_{dp} = \frac{T_{dbin} - T_{dbout}}{T_{dbin} - T_{dpin}} \times 100\% \quad (3)$$

Tabel 9. efektivitas suhu titik embun

m.primer(kg/s)	Tdb1a (°C)	Tdb2 (°C)	TDew1a (°C)	ε_{dp} (%)
0,05296	33,9	31,8	25,9	26,25
0,0411472	33,4	31,4	26,2	27,7
0,027648	32,8	30,4	25,2	31,57

Berdasarkan pada Tabel 9. dapat dilihat bahwa dew point effectiveness (DPE) tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara udara primer 0,027648 kg/s. Hal ini didapatkan karena dengan kapasitas panas udara yang lebih besar yang dialirkan, maka akan lebih banyak panas sensibel udara terserap oleh plat penukar panas secara konveksi sehingga menghasilkan selisih temperatur bola kering.

4.5 Kapasitas Pendinginan (Cooling Capacity)

Kapasitas pendinginan merupakan ukuran kemampuan sistim pendingin untuk memindahkan sejumlah panas dari udara yang akan didinginkan per-satu satuan waktu. Besarnya kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q_c = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

Tabel 10. Kapasitas pendinginan

\dot{m}_{udara} (kg/s)	C_p (kJ/kg.K)	ΔTDB (°C)	Q_c (Kw)
0,05296	1,005	2,1	0,11
0,0411472	1,005	2	0,08
0,027648	1,005	2,4	0,07

Pada Tabel 10. dapat dilihat bahwa kapasitas pendinginan tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara primer 0,05296 kg/s. Tingginya kapasitas pendinginan disebabkan karena semakin tinggi laju aliran massa udaranya, akan menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih besar.

4.6. Energi Efficiency Ratio (EER)

Energi efficiency ratio (EER) merupakan perbandingan antara kapasitas pendinginan yang dihasilkan dan energi input yang digunakan. Pada pengujian ini digunakan 2 buah blower masing-masing untuk saluran udara primer dan saluran udara kering dengan daya listrik sebesar 250 W dan 260 W. Besarnya EER ini dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$EER = \frac{Q_c}{P} \quad (5)$$

Tabel 11 Energi efficiency ratio

\dot{m} (kg/s)	Q_c (kW)	P (kW)	EER
0,05296	0,11	0,51	0,22
0,041472	0,08	0,51	0,15
0,027648	0,07	0,51	0,14

Berdasarkan pada Tabel 11. dapat diperlihatkan bahwa energy efficiency ratio (EER) tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara yang tertinggi pula yakni 0,05296 kg/s. Dari hasil pengujian tersebut, dapat dikatakan bahwa pada besarnya daya input yang sama, besarnya EER sangat tergantung pada kapasitas pendinginan yang dihasilkan, dimana kapasitas pendinginan juga akan meningkat dengan semakin tingginya laju aliran massa udara panas yang lebih besar.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian pada sistem pendinginan maisotsenko pola counter flow dengan variasi laju aliran massa udara primer, didapatkan data dan hasil performansi sistem pendinginannya dengan kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil efektivitas pada Efektivitas bola basah (ϵ_{wb}) dan Efektivitas titik embun (ϵ_{dp}) tertinggi dan terendah terjadi pada laju aliran massa udara primer yang sama. (ϵ_{wb}) dan (ϵ_{dp}) tertinggi terjadi pada \dot{m}_{primer} 0,027648 kg/s sedangkan (ϵ_{wb}) dan (ϵ_{dp}) terendah terjadi pada \dot{m}_{primer} 0,05296. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa dengan laju aliran massa udara primer inlet yang rendah, diikuti juga dengan TBK udara primer inlet yang rendah, akan menghasilkan (ϵ_{wb}) dan (ϵ_{dp}) yang lebih tinggi.

2. Kapasitas pendinginan (QC) tertinggi ada pada \dot{m}_{primer} 0,05296 kg/s sedangkan kapasitas pendinginan terendah terjadi pada \dot{m}_{primer} 0,027648 kg/s. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa semakin tinggi laju aliran massa udaranya, akan menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih besar.
3. Energi efficiency ratio (EER) tertinggi terjadi pada \dot{m}_{primer} 0,05296 kg/s dengan energi efficiency ratio sebesar 0,22 sedangkan energi efficiency ratio terendah terjadi pada \dot{m}_{primer} 0,027648 kg/s dengan nilai energi efficiency ratio sebesar 0,14. Maka dengan besaran daya input yang sama, besarnya EER sangat tergantung pada kapasitas pendinginan yang dihasilkan, dimana kapasitas pendinginan juga akan meningkat dengan meningkatnya laju aliran massa udara primer yang lebih besar.

Daftar Pustaka

- [1] *Sohani, A., Sayyaadi, H., & Mohammadhosseini, N. (2018). Comparative study of the conventional types of heat and mass exchangers to achieve the best design of dew point evaporative coolers at diverse climatic conditions. Energy Conversion and Management, 158, 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.042>*
- [2] *Phi Ma, N., & Minh Hiên, Đ. (n.d.). Nghiên cứu thực nghiệm về thiết bị làm lạnh không khí kiểu bay hơi nước gián tiếp ứng dụng chu trình maisotsenko (M-IEC) experimental research on the indirect evaporative cooler applying the maisotsenko cycle (M-IEC).*
- [3] *Pandelidis, D., Anisimov, S., & Worek, W. M. (2015). Performance study of counter-flow indirect evaporative air coolers. Energy and Buildings, 109, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.004>*
- [4] *Tertipis, D., & Rogdakis, E. (2015). Maisotsenko cycle: technology overview and energy-saving potential in cooling systems. Energy and Emission Control Technologies, 15. <https://doi.org/10.2147/eect.s62995>*
- [5] *Kalsia, M., Sharma, A., Kaushik, R., & Dondapati, R. S. (2023). Evaporative Cooling Technologies: Conceptual Review Study. Evergreen, 10(1), 421–429. <https://doi.org/10.5109/6781102>*
- [6] *Borasiya, M. D., Atodariya, V. H., Kher, P. N., Devankumar, M., & Patel, S. (2017). A Review on Potential of Indirect Evaporative*

- Cooling System. In IJSTE-International Journal of Science Technology & Engineering | (Vol. 3). www.ijste.org*
- [7] Muscio, A., Cossu, M., Morselli, N., Puglia, M., Pedrazzi, S., & Allesina, G. (2023). *A modified ε -NTU analytical model for the investigation of counter-flow Maisotsenko-based cooling systems. Applied Thermal Engineering, 231.*
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120944>
- [8] Ali, M., Sheikh, N. A., Khalid, O., Manzoor, S., & Ali, H. M. (2018). *Parametric investigation of a counter-flow heat and mass exchanger based on Maisotsenko cycle. Thermal Science, 22(6), 3099–3106.*
<https://doi.org/10.2298/TSCI160808296A>
- [9] Parningotan, J. W., Program, S., Teknika, S., & Belawan, A. M. (n.d.). *ANALISA PENGARUH UDARA PADA AC SPLIT TERHADAP LAJU PENDINGIN PADA RUANGAN. ATDS SAINTECH-Journal of Engineering, 3(1), 2022.*

	<p>Fikri Nur Rohman</p> <p>Menyelesaikan studi program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2020 sampai 2024</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati yaitu Konversi Energi</p>	

Analisis Kekuatan Tarik Komposit Berbasis Serat Daun Nanas Dengan Variasi Fraksi Volume Dalam Matriks Epoxy-Polyester

Basten Munthe¹, Dewa Ngakan Putra Negara¹, Cok Istri Putri Kusuma Kencanawati^{1*}

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Komposit menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik dari bahan asalnya. Penggunaan serat alami sebagai penguat komposit semakin diminati karena ramah lingkungan dan ketersediaannya yang melimpah. Serat daun nanas mempunyai potensi besar sebagai penguat karena kekuatannya yang tinggi dan potensinya sebagai alternatif serat sintetis. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi fraksi volume serat daun nanas (5%, 10%, dan 15%) terhadap kekuatan tarik komposit berbasis matriks epoxy-polyester. Metode yang diterapkan meliputi pencetakan spesimen dengan teknik hand lay-up, diikuti dengan pengujian tarik sesuai standar ASTM D3039. Hasilnya menunjukkan bahwa fraksi volume serat 5% dengan orientasi serat sejajar (0°) memberikan kekuatan tarikan tertinggi. Namun, peningkatan fraksi volume serat justru cenderung mengurangi kekuatan tarik karena berkurangnya kemampuan matriks dalam mengikat serat. Temuan ini mengungkapkan bahwa fraksi volume dan orientasi serat sangat mempengaruhi sifat komposit mekanik serat daun nanas, membuka peluang penerapan komposit ramah lingkungan di berbagai bidang.

Kata kunci: Serat Daun Nanas, Orientasi Arah Serat, Resin epoxy-polyester, Uji Tarik

Abstract

Composite resulting in better mechanical properties than the original material. The use of natural fibers as composite reinforcement is increasingly in demand because of its environmental friendliness and abundant availability. Pineapple leaf fiber has great potential as a reinforcement because of its high tensile strength and potential as an alternative to synthetic fibers. This research aims to examine the effect of variations in the volume fraction of pineapple leaf fibers (5%, 10% and 15%) on the tensile strength of epoxy-polyester matrix based composites. The method applied includes molding the specimen using the hand lay-up technique, followed by tensile testing according to ASTM D3039 standards. The results show that a fiber volume fraction of 5% with parallel fiber orientation (0°) provides the highest tensile strength. However, increasing the fiber volume fraction actually tends to reduce the tensile strength due to the reduced ability of the matrix to bind the fibers. These findings reveal that volume fraction and fiber orientation greatly influence the mechanical properties of pineapple leaf fiber composites, opening opportunities for the application of environmentally friendly composites in various fields.

Keywords: Pineapple leaf fibre, fibre orientation, epoxy-polyester resin, tensile test

1. Pendahuluan

Komposit adalah gabungan lebih material yang memiliki sifat mekanik kuat dibandingkan material asalnya [1]. Material komposit tetap menjadi topik menarik bagi para ilmuwan fisika karena keberagaman penggunaannya di berbagai bidang seperti elektronik, transportasi, kedokteran, biologi, dan lainnya [2].

Seiring meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan, penggunaan serat alami sebagai pengganti serat sintetis dalam komposit semakin diminati [3]. Misalnya, serat daun nanas memiliki kemungkinan besar sebagai penguat komposit karena ketersediaannya yang melimpah dan sifat ramah lingkungannya [4]. Serat alami memberikan keunggulan bobot ringan, biaya produksi lebih rendah, dan sifat yang dapat diperbarui. Namun, tantangan penggunaan serat alami termasuk variabilitas sifat mekanik yang tinggi karena faktor pertumbuhan dan pengolahan, serta kesulitan dalam mencapai sifat yang konsisten [5].

Penelitian mengenai komposit serat daun nanas telah menarik minat selama beberapa dekade terakhir. Meskipun penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi serat daun nanas sebagai penguat komposit, masih terdapat keterbatasan, seperti variasi fraksi volume yang terbatas dan penggunaan beragam jenis matriks yang sulit untuk dibandingkan [6].

Aplikasi komposit serat daun nanas sangat luas, mulai dari komponen otomotif ringan hingga bahan bangunan berkelanjutan. Dalam penelitian ini, dipilih matriks epoxy-polyester karena sifat adhesi yang baik pada serat alami, ketahanan kimia yang tinggi, dan kemampuan membentuk ikatan silang yang kuat [7]. Berdasarkan studi sebelumnya, variasi fraksi volume 5%, 10%, dan 15% dipilih untuk menganalisis pengaruhnya dengan sifat komposit serat daun nanas [8].

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan fraksi volume optimal serat daun nanas dalam komposit dengan matriks epoxy-poliester. Dengan

variasi fraksi volume secara sistematis, diharapkan penelitian ini dapat meningkatkan pemahaman tentang penguatan serat daun nanas dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik komposit. Oleh sebab itu, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan model prediksi sifat mekanik komposit serat alami dan membuka peluang aplikasi yang lebih luas untuk material komposit berbasis serat alami.

2. Dasar Teori

2.1 Komposit

Merupakan material yang terbentuk dari gabungan bahan dengan sifat berbeda untuk menghasilkan material yang lebih kuat atau memiliki karakteristik unggul lainnya. Resin mengikat serat sehingga beban terlihat pada komposit akan lebih ringan [9].

2.2 Resin Epoxy

Epoxy adalah jenis resin termoset yang populer karena kekuatannya yang tinggi, ketahanannya yang baik, dan kemampuan untuk merekat dengan kuat. [10]. Resin banyak digunakan di dalam industri, terutama pada teknik kimia, sipil, khususnya di mesin.

2.3 Resin Polyester

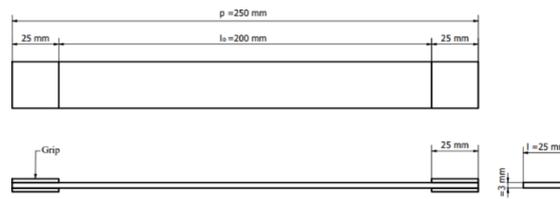
Resin polyester ketika dicampur dengan katalis, bahkan pada suhu ruangan, dapat menghasilkan material yang kuat dan kaku. Ketika ditambahkan katalis, resin ini akan membeku pada suhu ruang antara 20°C hingga 25°C. Secara umum, resin polyester memiliki sifat tahan terhadap zat asam, basa, serta panas. Selain itu, resin polyester lebih ekonomis dibandingkan dengan resin lainnya, seperti resin epoxy, yang harganya lebih tinggi [11].

2.4 Serat Daun Nanas

Proses pembentukan serat diawali dengan pembelahan sel secara meristematis, diikuti dengan pemanjangan dan penebalan dinding sel. Lignin dideposisikan pada dinding sel selama proses penebalan, memberikan kekuatan dan kekakuan pada serat. Proses ekstraksi serat melibatkan pemisahan serat dari jaringan non-serat melalui proses mekanis dan kimiawi. Kualitas serat yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh metode ekstraksi yang digunakan [12].

2.5 Uji Tarik

Pengujian tarik adalah metode uji material untuk mengukur kekuatan tarik, tegangan, dan regangan bahan sesuai standar ASTM D 3039, beban bertahap sambil memadukan panjang perubahan material. Spesimen digunakan terhadap pengujian tarik dibentuk sesuai dengan standar ASTM D3039, seperti yang dilampirkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Spesimen Uji Tarik

Keterangan:

t = Tebal Spesimen

l = Lebar Spesimen

P = Panjang pesimen

Dimana:

Tegangan maksimum dihitung dengan rumus:

$$\sigma = \frac{p}{A_0}$$

Regangan yang dihitung dengan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

Modulus elastis dihitung dengan persamaan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Keterangan:

σ = Tegangan Tarik (Mpa)

ε = Regangan (%)

E = Modulus Elastisitas (Gpa)

P = Beban (N/m²)

A_0 = Luas Penampang awal spesimen(mm²)

ΔL = Pertambahan panjang spesimen setelah pengujian (mm)

L_0 = Panjang Awal Spesimen Sebelum Pengujian (mm)

3. Metode Penelitian

3.1 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Alat Uji: Alat uji taik Tensilon RTG-1250.
2. Alat cetak: Terbuat dari akrilik berbentuk segi empat, bahan akrilik dipilih karena *epoxy* dan *polyester* tidak menempel pada akrilik, dan permukaan akrilik yang datar.
3. Alat Ukur: Gelas ukur, busur derajat, penggaris, timbangan digital.
4. Alat Bantu: Gunting, pengaduk elektrik, sendok
5. Alat Pembersih: Tissue, lap tangan

3.2 Bahan Penelitian

Pada penelitian berikut bahan yang akan digunakan adalah :

1. *Epoxy sikadur 52-id* dan *Polyester yukalac 157 BQTN*.
2. Serat daun nanas berjenis *smooth cayenne*.
3. Aseton
4. Aquades
5. Lilin malam digunakan untuk menutup celah cetakan agar mencegah kebocoran dan terbentuknya rongga.
6. Busur derajat.

3.3 Proses Pembuatan Serat Daun Nanas

Ada beberapa tahap dalam proses pengolahan serat daun nanas dapat dilihat yaitu :

1. Daun nanas yang merupakan limbah panen tanaman buah nanas diambil dan dibersihkan dari sisa kotoran dan debu yang bersumber dari proses pemisahan antara buah dan daun.
2. Setelah dibersihkan dari kotoran dan debu, kemudian diambil daun untuk di keruk menggunakan sendok *stainless steel*.
3. Setelah didapatkan serat daun nanas yang terpisah dari daging daunnya, kembali dicuci bersih menggunakan air mengalir.
4. Lalu keringkan serat. Untuk mendapat serat daun nanas yang bersih.
5. Kemudian jemur dan setelah kering serat daun nanas dipotong sesuai dengan ukuran panjang, lebar dan tebal tiap spesimen.

3.4 Perhitungan Fraksi Volume

1. Volume cetakan:

Diketahui:

$$VC = P \times l \times t$$

$$= 25\text{cm} \times 25\text{cm} \times 0,3\text{cm}$$

$$= 187,5\text{cm}^3$$

2. Perbandingan serat daun nanas dan matrik

a. 5% : 95%

b. 10% : 90%

c. 15% : 85%

3. Berat serat daun nanas = 0,43 gr/m³

4. Berat Matrik = 1,11 gr/m³

5. Menghitung volume matrik dan berat serat daun nanas:

a. $VF = \text{Variasi Fraksi Volume serat (\%)} \times VC$

$$= 5\% \times 187\text{cm}^3$$

$$= 9,375\text{cm}^3$$

$$BF = VF \times \rho f$$

$$= 9,375\text{cm}^3 \times 0,43\text{ gr/cm}^3$$

$$= 4,03\text{ gr}$$

$$Vm = Vc - Vf$$

$$= 187,5\text{ cm}^3 - 9,375\text{ cm}^3$$

$$= 178,12\text{cm}^3$$

$$Bm = Vm \times \rho m$$

$$= 178,12\text{ cm}^3 \times 1,11\text{ gr/cm}^3$$

$$= 197,71\text{gr}$$

b. $VF = \text{Variasi Fraksi Volume serat (\%)} \times VC$

$$= 10\% \times 187\text{cm}^3$$

$$= 18,75\text{cm}^3$$

$$BF = VF \times \rho f$$

$$= 18,75\text{ cm}^3 \times 0,43\text{ gr/cm}^3$$

$$= 8,06\text{ gr}$$

$$Vm = Vc - Vf$$

$$= 187,5\text{ cm}^3 - 18,75\text{ cm}^3$$

$$= 168,75\text{cm}^3$$

$$Bm = Vm \times \rho m$$

$$= 168,12\text{ cm}^3 \times 1,11\text{ gr/cm}^3$$

$$= 187,31\text{gr}$$

c. $VF = \text{Variasi Fraksi Volume serat (\%)} \times VC$

$$= 15\% \times 187\text{cm}^3$$

$$= 28,12\text{cm}^3$$

$$BF = VF \times \rho f$$

$$= 28,12\text{cm}^3 \times 0,43\text{ gr/cm}^3$$

$$= 12,09\text{gr}$$

$$Vm = Vc - Vf$$

$$= 187,5\text{ cm}^3 - 28,12\text{ cm}^3$$

$$= 159,37\text{cm}^3$$

$$Bm = Vm \times \rho m$$

$$= 159,37\text{ cm}^3 \times 1,11\text{ gr/cm}^3$$

$$= 176,90\text{gr}$$

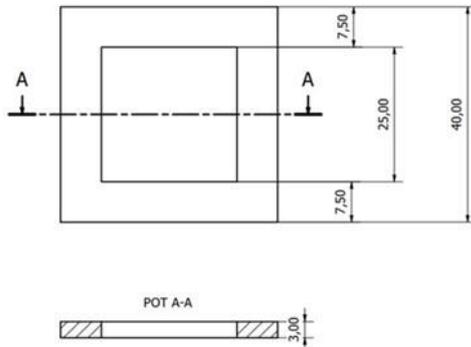
Dari hasil perhitungan berat matriks dan serat diatas dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Berat Serat Daun Nanas dan Matriks

Fraksi volume serat daun nanas dengan matriks	Berat serat daun nanas	Berat matrik
5% : 95%	4,03 gr	197,71 gr
10% : 90%	8,06 gr	187,31 gr
15% : 85%	12,09 gr	176,90 gr

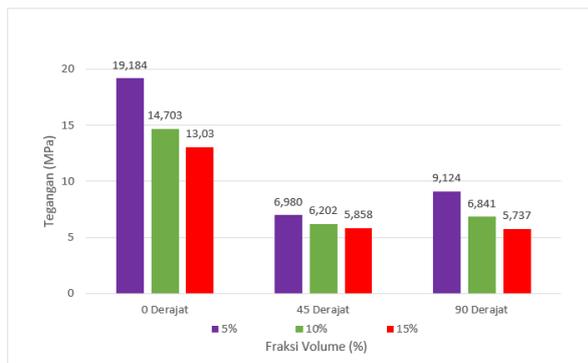
3.5 Desain Cetakan

Cetakan komposit digunakan berbentuk persegi. Untuk lembaran pencetak memiliki dimensi luar 40 x 40 x 0,3 cm dengan lubang pencetak berdimensi 25 x 25 x 0,3 cm.



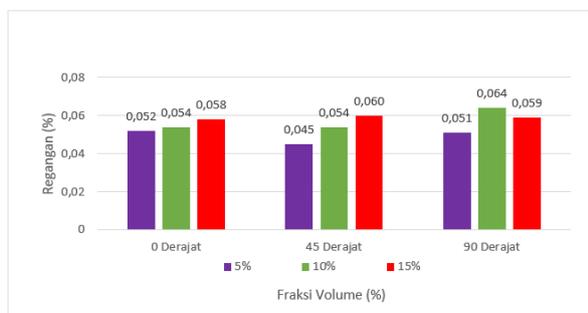
Gambar 3.1 Cetakan Biokomposit

4. Hasil dan Pembahasan



Gambar 4.1 Diagram Tegangan Tarik

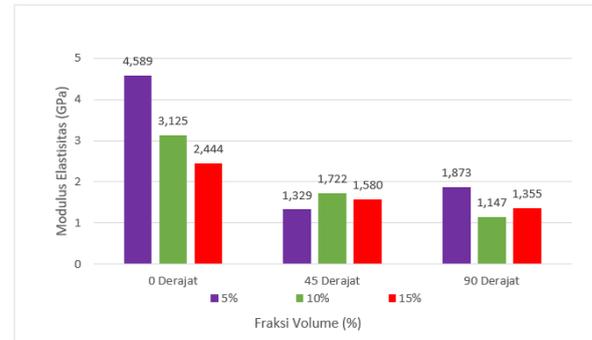
Berdasarkan diagram tegangan diatas dapat kita simpulkan bahwa fraksi volume 5% serat dengan arah serat 0° memiliki tegangan tarik lebih signifikan dibandingkan dengan fraksi volume lainnya. Hal tersebut bisa terjadi karena serat 5% memiliki daya rekat antara serat dengan matriks sangat baik, sehingga kekuatan komposit mencapai nilai maksimal. Arah serat juga dapat mempengaruhi kekuatan tarik. Apabila serat sejajar dengan arah beban, maka serat lebih mampu menahan beban sehingga meningkatkan kekuatan tarik.



Gambar 4.2 Diagram Regangan Tarik

Pada diagram regangan tarik diatas dapat disimpulkan bahwa arah serat 90° memiliki regangan

tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan arah serat lainnya. Hal tersebut bisa terjadi karena serat pada sudut tersebut memiliki komposit untuk mengalami deformasi yang lebih besar, sementara arah serat 0° dan 45° derajat langsung menahan beban tarik, menghasilkan regangan yang lebih kecil dan meningkatkan kekakuan komposit.



Gambar 4.3 Diagram Modulus Elastisitas Tarik

Pada diagram modulus elastisitas di atas dapat kita simpulkan bahwa serat 5% dengan arah serat 0° memiliki modulus elastisitas paling tinggi. Hal tersebut dapat terjadi karena serat 0° memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kekakuan komposit melalui kekuatan daya rekat matriks maupun serat dan arah serat yang sejajar dengan arah pembebanan. Sebaliknya, pada arah 45° dan 90° serat kurang efektif dalam menahan beban tarik secara langsung, yang menyebabkan modulus elastisitas yang lebih rendah.



Gambar 4.4 Arah Serat 0 Derajat, 45 Derajat, dan 90 Derajat

Berdasarkan gambar diatas dapat kita lihat perbedaan arah serat dan jumlah serat tiap spesimen pada komposit. Serat yang lebih sedikit memiliki kekuatan tarik lebih kuat karena memiliki daya rekat antara serat dengan matriks sangat baik, sehingga kekuatan komposit mencapai nilai maksimal. Namun, ketika fraksi volume serat meningkat,

peningkatan kandungan serat mengurangi kemampuan matriks untuk mengikat serat secara efektif, sehingga menurunkan kekuatan tarik.



Gambar 4.5 Spesimen Setelah Pengujian

Berdasarkan gambar spesimen setelah pengujian diatas dapat diamati bahwa semakin kecil arah serat maka kekuatan tarik akan semakin tinggi hal ini terjadi jika serat sejajar dengan arah beban, maka serat lebih mampu menahan beban sehingga meningkatkan kekuatan tarik. Sebaliknya, bila serat tidak sejajar dengan arah beban, kontribusi serat terhadap kekuatan tarik berkurang karena serat tidak sejajar sempurna dalam arah pembebanan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah penulis lakukan pengaruh variasi fraksi volume biokomposit epoxy – polyester terhadap kekuatan tarik dapat di simpulkan sebagai berikut.

1. Pada hasil data yang telah didapat, fraksi volume serat 5% memiliki daya rekat antara serat dengan matriks sangat baik, sehingga kekuatan komposit mencapai nilai maksimal. Namun, ketika fraksi volume serat meningkat, peningkatan kandungan serat mengurangi kemampuan matriks untuk mengikat serat secara efektif, sehingga menurunkan kekuatan tarik.
2. Berdasarkan dengan Orientasi arah, serat sejajar dengan arah pembebanan 0° memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kekuatan tarik komposit. Apabila serat sejajar dengan arah beban, maka serat lebih mampu menahan beban sehingga meningkatkan kekuatan tarik. Sebaliknya, bila serat tidak sejajar dengan arah beban, kontribusi serat terhadap kekuatan tarik berkurang karena serat tidak sejajar sempurna dalam arah pembebanan.

Daftar Pustaka

- [1] Fahmi, H., & Hermansyah, H. (2011). Pengaruh orientasi serat pada komposit resin polyester/serat daun nenas terhadap kekuatan tarik. *Jurnal Teknik Mesin*, 1(1), 46-52.
- [2] Kusumastuti, A. (2009). Aplikasi serat sisal sebagai komposit polimer. *Jurnal Kompetensi Teknik*, 1(1), 27-32.
- [3] Widodo, E. (2022). Buku Ajar Mekanika Komposit dan Bio-Komposit. *Umsida Press*, 1-111.
- [4] Sulaiman, M., & Rahmat, M. H. (2018). Kajian potensi pengembangan material komposit polimer dengan serat alam untuk produk otomotif. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*.
- [5] Fitrayudha, A., Fajrin, J., & Anshari, B. (2020). Analisis sifat mekanis komposit polyester sisal menggunakan metode anova. *Media Bina Ilmiah*, 14(7), 2817-2824.
- [6] Nuriana, W., & Wicaksono, R. Z. A. PEMANFAATAN SERAT DAUN NANAS (ANANAS COMASUS L.) SEBAGAI PENGUAT KOMPOSIT RESIN POLYESTER. *PROSIDING*, 187.
- [7] Anggrin, A. A. (2021). *Analisis Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Pengujian Tarik dan Bending Komposit Limbah Kulit Singkong-Poliester* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Kalimantan).
- [8] Zarviansyah, P. (2023). *PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUME DAN PANJANG SERAT KOMPOSIT SERAT SABUT KELAPA BERMATRIK POLYESTER TERHADAP PENGUJIAN TARIK PROYEK AKHIR* (Doctoral dissertation, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung).
- [9] Muhajir, M., Mizar, M. A., Sudjimat, D. A., & Mesin-ft, J. P. T. (2016). Analisis kekuatan tarik bahan komposit matriks resin berpenguat serat alam dengan berbagai varian tata letak. *Jurnal Teknik Mesin*, 24(2), 1-8.
- [10] Siregar, I. C. R., Yudo, H., & Kiryanto, K. (2017). Analisa Kekuatan Tarik dan Tekuk pada Sambungan Pipa Baja dengan Menggunakan Kanpe Clear NF sebagai Pengganti Las. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 5(4).
- [11] Muhammad, M., & Putra, R. (2018). Uji Mekanik Komposit Berpenguat Serat Pandan Duri dan Resin Polyester Dengan Variasi Komposisi Metoda Fraksi Berat. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 6(2), 63-72.
- [12] Wijoyo, Catur Purnomo dan Achmad Nurhidayat, 2011 "Optimasi Kekuatan Tarik Serat Nanas (Ananas Comous L. Merr) Sebagai Alternatif Bahan Komposit Serat Alam" Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi, Fakultas Teknik, Uiversitas Wahid Hasyim.

- [2] Kusumastuti, A. (2009). Aplikasi serat sisal sebagai komposit polimer. *Jurnal Kompetensi Teknik, 1*(1), 27-32.
- [3] Widodo, E. (2022). Buku Ajar Mekanika Komposit dan Bio-Komposit. *Umsida Press*, 1-111.
- [4] Sulaiman, M., & Rahmat, M. H. (2018). Kajian potensi pengembangan material komposit polimer dengan serat alam untuk produk otomotif. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*.
- [5] Fitrayudha, A., Fajrin, J., & Anshari, B. (2020). Analisis sifat mekanis komposit polyester sisal menggunakan metode anova. *Media Bina Ilmiah, 14*(7), 2817-2824.
- [6] Nuriana, W., & Wicaksono, R. Z. A. PEMANFAATAN SERAT DAUN NANAS (ANANAS COMASUS L.) SEBAGAI PENGUAT KOMPOSIT RESIN POLYESTER. *PROSIDING*, 187.
- [7] Anggrin, A. A. (2021). *Analisis Pengaruh Ukuran Partikel Terhadap Pengujian Tarik dan Bending Komposit Limbah Kulit Singkong-Poliester* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Kalimantan).
- [8] Zarviansyah, P. (2023). *PENGARUH VARIASI FRAKSI VOLUME DAN PANJANG SERAT KOMPOSIT SERAT SABUT KELAPA BERMATRIK POLYESTER TERHADAP PENGUJIAN TARIK PROYEK AKHIR* (Doctoral dissertation, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung).
- [9] Muhajir, M., Mizar, M. A., Sudjimat, D. A., & Mesin-ft, J. P. T. (2016). Analisis kekuatan tarik bahan komposit matriks resin berpenguat serat alam dengan berbagai varian tata letak. *Jurnal Teknik Mesin, 24*(2), 1-8.
- [10] Siregar, I. C. R., Yudo, H., & Kiryanto, K. (2017). Analisa Kekuatan Tarik dan Tekuk pada Sambungan Pipa Baja dengan Menggunakan Kanpe Clear NF sebagai Pengganti Las. *Jurnal Teknik Perkapalan, 5*(4).
- [11] Muhammad, M., & Putra, R. (2018). Uji Mekanik Komposit Berpenguat Serat Pandan Duri dan Resin Polyester Dengan Variasi Komposisi Metoda Fraksi Berat. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal, 6*(2), 63-72.
- [12] Wijoyo, Catur Purnomo dan Achmad Nurhidayat, 2011 “Optimasi Kekuatan Tarik Serat Nanas (Ananas Comous L. Merr) Sebagai Alternatif Bahan Komposit Serat Alam” Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi, Fakultas Teknik, Uiversitas Wahid Hasyim.

	<p>Basten Munthe menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2024.</p>
<p>Judul tugas akhir: Pengaruh Variasi Fraksi Volume Dan Orientasi Arah Serat Daun Nanas Dengan Resin Epoxy-Polyester Terhadap Kekuatan Tarik Biokomposit</p>	

	<p>Cok Istri Putri Kusuma Kencanawati menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 1998. Kemudian melanjutkan studi S2 di Universitas Gadjah Mada tahun 2003. Lalu S3 di Universitas Udayana pada tahun 2020.</p>
<p>Bidang Penelitian yang diminati adalah ilmu bahan/komposit, akustik, ekologi industri</p>	

	<p>Dewa Ngakan Putra Negara menyelesaikan studi S1 di Universitas Brawijaya pada tahun 1995. Kemudian melanjutkan studi S2 di <i>University of Bradford</i> tahun 2001. Lalu S3 di Universitas Udayana pada tahun 2020.</p>
<p>Bidang Penelitian yang diminati adalah porous material untuk proses adsorpsin.</p>	

Pabrikasi Membrane Electrode Assembly Menggunakan Metode Decal Transfer Dengan Katalis Platina Didukung Karbon Dan Variasi Ketebalan

Pande Nyoman Agus Adnyana¹, I Made Joni², Made Suarda^{1*}, Ketut Astawa^{1*},
Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik - Mesin, Universitas Udayana, Bukit, Jimbaran Bali

²Finder U-CoE – Universitas Padjajaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Penggunaan kendaraan konvensional meningkatkan ketergantungan terhadap energi bahan bakar fosil yang sumber dayanya kian menipis, belum lagi masalah yang ditimbulkan berupa gas emisi. Hidrogen merupakan energi alternatif yang dapat menjadi solusi dengan memanfaatkan teknologi fuel cell pada kendaraan berbasis listrik. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) adalah salah satu jenis teknologi fuel cell yang umum diaplikasikan pada kendaraan listrik. Namun terdapat beberapa kendala, seperti kinerja, dan efektivitas biaya, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut. Komponen utama dari PEMFC adalah membrane electrode assembly (MEA) yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia. Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisis pengaruh ketebalan MEA terhadap kinerjanya yang diuji dengan PEMFC testing. Pada penelitian ini, MEA dipabrikasi melalui metode decal transfer dengan variasi ketebalan MEA yaitu 140 μm , 170 μm , dan 200 μm . Berdasarkan hasil pengujian PEMFC testing, sampel MEA dengan ketebalan 140 μm menunjukkan hasil terbaik dengan nilai tegangan tertinggi yang dihasilkan yaitu 9800 μV pada kondisi tanpa resistansi. Pada resistansi tertentu, nilai densitas arus tertinggi dan densitas daya maksimum yang dihasilkan adalah 9,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan 12204 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Kata kunci: Decal Transfer, Membrane Electrode Assembly, Ketebalan MEA

Abstract

The use of conventional vehicles increases dependence on fossil fuel energy whose resources are increasingly depleted, not to mention the problems caused by emission gases. Hydrogen is an alternative energy that can be a solution by utilizing fuel cell technology in electric-based vehicles. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is one type of fuel cell technology that is commonly applied to electric vehicles. However, there are several obstacles, such as performance and cost effectiveness, so further development is needed. The main component of PEMFC is the membrane electrode assembly (MEA) which is where the electrochemical reaction occurs. The purpose of this study is to analyze the effect of MEA thickness on its performance which is tested by PEMFC testing. In this study, MEA was fabricated using the decal transfer method with variations in MEA thickness, namely 140 μm , 170 μm , and 200 μm . Based on the results of PEMFC testing, the MEA sample with a thickness of 140 μm showed the best results with the highest voltage value produced, namely 9800 μV in conditions without resistance. At a certain resistance, the highest current density and maximum power density values produced are 9.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ and 12204 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Keywords: Decal Transfer, Membrane Electrode Assembly, MEA Thickness

1. Pendahuluan

Produksi dan penggunaan kendaraan konvensional dalam skala besar meningkatkan ketergantungan terhadap energi bahan bakar fosil yang saat ini sumber dayanya semakin menipis. Masalah selanjutnya yang timbul adalah ancaman berupa gas emisi yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil tersebut, sehingga diperlukan pengembangan teknologi transportasi yang ramah lingkungan dan energi alternatif baru sebagai pengganti bahan bakar fosil, salah satunya adalah hidrogen. Fuel cell merupakan teknologi yang dapat mengkonversi hidrogen menjadi listrik dan dapat digunakan sebagai sumber energi pada kendaraan berbasis listrik. Kendaraan listrik berbasis hidrogen memiliki potensi yang menjanjikan karena beberapa kelebihanannya, diantaranya yaitu waktu pemakaian jangka panjang, waktu pengisian bahan bakar yang singkat, serta bebas emisi [1 - 2]. Proton exchange

membrane fuel cell (PEMFC) adalah salah satu jenis teknologi fuel cell yang paling umum diaplikasikan pada kendaraan listrik berbasis hidrogen [3 - 4]. Untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan, PEMFC memiliki beberapa komponen yang diintegrasikan, membrane electrode assembly (MEA) adalah jantung dari PEMFC yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia antara hidrogen dan oksigen untuk menghasilkan listrik. MEA pada umumnya tersusun atas membran elektrolit, lapisan katalis anoda dan katoda, serta gas diffusion layer [5].

Lapisan katalis yang paling umum digunakan pada MEA adalah katalis berbasis platina yang didukung karbon (Pt/C). Namun, ketersediaan Pt yang terbatas membuat harganya relatif tinggi sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kinerja dari MEA melalui proses pabrikasinya. Upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja dari MEA sekaligus

menurunkan biaya produksinya adalah dengan mengatur ketebalan MEA yang akan dibuat. Ketebalan MEA dapat diatur dengan menggunakan katalis yang tipis, sehingga memerlukan pemuatan Pt yang rendah dan mampu memberikan laju reaksi elektrokatalitik pada MEA yang lebih unggul dibandingkan MEA dengan porositas katalis yang tebal dan berliku-liku dimana karbon mengendap. *Decal transfer method* (DTM) adalah salah satu metode yang menggabungkan beberapa teknik pelapisan katalis dalam pembuatan MEA. DTM memiliki beberapa kelebihan dibandingkan metode lainnya, salah satunya adalah dapat mengatur ketebalan MEA [5 - 6]. Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja dari MEA selama proses fabrikasi dengan menggunakan DTM, yaitu suhu, waktu, dan tekanan *hot press*, dimana tekanan *hot press* akan mempengaruhi ketebalan dari MEA yang dibuat [7 - 8].

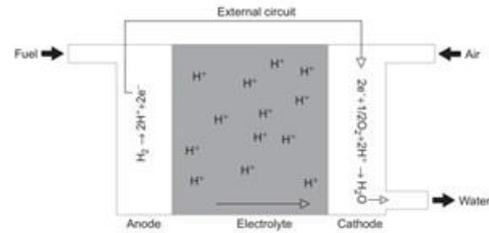
Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja MEA dengan katalis Pt/C yang dipabrikasi menggunakan metode *decal transfer* dan ketebalan MEA yang divariasikan. Adapun permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini meliputi analisis kinerja MEA dengan katalis Pt/C yang dipabrikasi menggunakan metode *decal transfer* dan ketebalan MEA yang divariasikan. Untuk mendapatkan hasil yang diharapkan dari permasalahan tersebut, diperlukan adanya batasan meliputi komponen yang digunakan dalam pengujian adalah komponen yang sudah tersedia secara komersial, katalis yang digunakan adalah katalis yang telah dikembangkan dalam penelitian sebelumnya, dan pembuatan MEA ini dilakukan pada suhu ambient.

2. Dasar Teori

2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) adalah salah satu jenis *fuel cell* dengan suhu pengoperasian yang terbilang rendah, yaitu pada kisaran 40 - 80 °C. Pengaplikasian PEMFC ini banyak diterapkan pada alat transportasi, karena mampu memberikan kerapatan daya yang tinggi dan waktu start-up yang cepat, serta tidak menghasilkan gas emisi.

Selama pengoperasian PEMFC, terjadi reaksi oksidasi hidrogen di anoda yang kemudian melepaskan elektron menuju katoda melalui sirkuit eksternal. Di katoda, elektron akan bergabung dengan oksigen, lalu bereaksi dengan ion H^+ yang keluar melalui elektrolit, dan akhirnya membentuk air (H_2O). PEMFC pada umumnya terdiri dari tiga bagian, yaitu dua pelat bipolar, dan sebuah membran yang disebut *membrane electrode assembly* (MEA) yang merupakan jantung dari PEMFC [9].

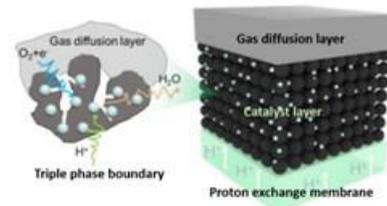


Gambar 1. Skema reaksi pada PEMFC [9].

Oksidasi bahan bakar terjadi di anoda dan reduksi terjadi di katoda, kedua elektroda tersebut dibantu oleh sebuah katalis.

2.2 Membrane Electrode Assembly

Membrane electrode assembly (MEA) adalah inti dari PEMFC yang merupakan tempat terjadinya reaksi elektrokimia dimana terbentuk zona *triple phase boundary* (TPB). MEA tersusun dari anoda GDL, lapisan katalis anoda, membran elektrolit, lapisan katalis katoda, dan katoda GDL. MEA yang baik harus dapat membentuk zona TPB yang dapat menyediakan jalur pengangkutan elektron, proton, dan gas reaktan [9 - 10].



Gambar 2. Skema *triple phase boundary* [6].

a. Membran Elektrolit

Membran ini berfungsi sebagai elektrolit padat untuk memisahkan dan menghantarkan proton dari anoda menuju katoda. Membran yang umum digunakan saat ini adalah membran asam perfluorosulfonat (PFSA) seperti nafion dengan kelebihan yaitu stabilitas termal dan mekanik yang baik, serta konduktivitas proton yang tinggi.

b. Lapisan Katalis

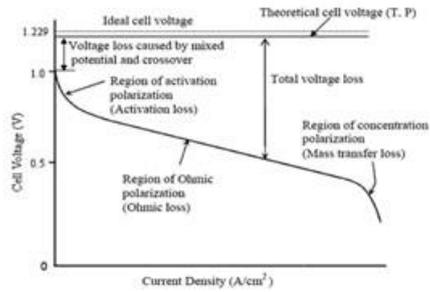
Lapisan katalis pada MEA adalah tempat terjadinya reaksi redoks sehingga dapat menghasilkan listrik. Lapisan katalis umumnya memiliki ketebalan (~10 - 100 μm , biasanya 30 μm) yang terdiri dari serbuk katalis, ionomer konduktif proton (PEM) atau politetrafluoroetilen (PTFE). Katalis yang paling umum digunakan pada PEMFC adalah katalis berbasis platina yang didukung oleh karbon (Pt/C)

c. Gas Diffusion Layer

Gas diffusion layer (GDL) adalah struktur berpori yang berfungsi sebagai pendukung terjadinya reaksi pada lapisan katalis dan menyediakan jalur transportasi untuk gas reaktan dan air. Pada umumnya, GDL memiliki dua lapisan yaitu *gas diffusion media* (GDM) yang terbuat dari serat karbon dan *microporous layer* (MPL) yang terbentuk dari serbuk karbon [10].

2.3 Karakteristik PEMFC

Karakteristik PEMFC dapat ditunjukkan melalui grafik tegangan dan densitas arus (V/i) atau kurva polarisasi PEMFC. Kurva polarisasi didapat dengan mengukur tegangan keluar *fuel cell* pada arus yang berbeda, atau sebaliknya.



Gambar 3. Kurva polarisasi [10].

Gambar 3 adalah kurva polarisasi PEMFC yang menunjukkan 4 mekanisme/zona *losses*, dimana potensi sel akan menurun dari potensinya karena adanya *losses* tersebut pada sistem.

a. Fuel Crossover

Fuel crossover adalah zona dimana terjadi kehilangan energi pada sistem saat hidrogen melewati membran elektrolit dan berpindahnya elektron melalui elektrolit. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi pengoperasian PEMFC, yaitu suhu, tekanan, kelembaban, dan densitas arus.

b. Activation Losses

Activation losses adalah zona dimana energi akan hilang pada sistem yang digunakan untuk memulai reaksi elektrokimia yang terjadi pada permukaan elektroda. Sebagian dari tegangan akan hilang dalam reaksi yang harus memindahkan elektron dari/menjuuri elektroda.

c. Ohmic Losses

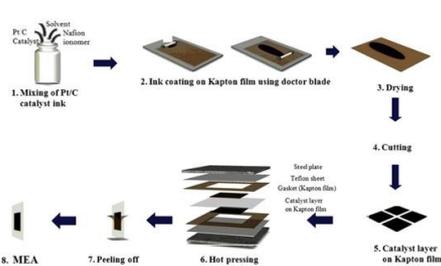
Ohmic losses adalah kerugian energi yang disebabkan karena adanya resistansi internal pada sistem PEMFC. Pada zona ini, tegangan akan menurun secara perlahan seiring meningkatnya arus,

d. Mass Transport Losses

Mass transport losses terjadi karena laju perpindahan massa dari suatu spesies pada elektroda membatasi produksi arus yang pada umumnya terjadi pada densitas arus PEMFC yang tinggi [10 - 11].

2.4 Decal Transfer Methods

Decal transfer methods (DTM) adalah salah satu metode pabrikasi yang disarankan dalam pembuatan MEA.



Gambar 4. Metode Decal Transfer [12].

Melalui metode ini, katalis dibentuk dengan melapiskan tinta katalis ke kapton film menggunakan mesin *doctor blade coating*. Selanjutnya katalis ditransfer ke membran elektrolit menggunakan mesin *hot press*.

a. Doctor Blade Coating

Doctor blade coating adalah teknik pelapisan tinta katalis dengan menggunakan alat yang disebut *doctor blade* atau *knife*. Kelebihan dari teknik ini adalah dapat mengatur ketebalan lapisan katalis dan diaplikasikan dengan mudah untuk pabrikasi MEA.

b. Hot Press

Hot press adalah cara yang efektif dan sederhana dalam pembuatan MEA. Alat ini mampu menghasilkan kontak antarmuka yang baik antara elektroda dengan membran elektrolit. Kondisi *hot press* seperti tekanan, suhu, dan durasi *hot press* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja dan daya tahan dari MEA. Pada umumnya, kondisi *hot press* dalam pembuatan MEA dilakukan pada suhu 120-160 °C, durasi selama 30-300 detik, dan tekanan 2-3,5 MPa, dimana tekanan pada *hot press* akan berpengaruh pada ketebalan MEA yang akan dibuat, umumnya kurang dari 1 mm [10].

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini membahas terkait pengaruh ketebalan MEA terhadap kinerja MEA yang dipabrikasi dengan metode *decal transfer*. Material katalis yang digunakan adalah Pt/C.

3.1 Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu membran PFSA D170-U dengan dimensi 3 × 3 cm, kapton film, 1 gram tinta katalis Pt/C dengan perbandingan massa 0,4 gram platina dan 0,6 gram karbon, 1,2 gram nafion solution 5wt%, 1,2 gram air deionisasi, 1,2 gram isoprophil alkohol (IPA), dan 1,2 gram etilen glikol.

3.2 Pre-Treatment Membran

Membran PFSA direndam selama 1 jam pada suhu 60 - 80 °C dalam larutan H₂O₂ dengan konsentrasi 3 - 5% untuk menghilangkan pengotor organik dan anorganik yang terkandung dalam membran. Selanjutnya membran direndam kembali selama 1 jam pada suhu 60 - 80 °C dalam larutan H₂SO₄ 0,5 M untuk memprotonisasi membran. Kemudian membran dibilas dengan air deionisasi pada suhu 70 °C hingga mencapai pH 7. Membran yang telah di *pre-treatment* selanjutnya disimpan dalam air destilasi pada suhu kamar.

3.3 Preparasi dan Deposisi Tinta Katalis

Proses pembuatan tinta katalis dimulai dengan mencampurkan 1 gram bubuk katalis Pt/C, 1,2 gram air destilasi, 1,2 gram *nafion solution* 5wt%, 1,2 gram isoprophil alkohol, dan 1,2 gram etilen glikol ke dalam gelas vial. Tinta yang dihasilkan kemudian di ultrasonikasi dengan gelombang 60 Hz selama 3 jam. Selanjutnya tinta katalis diteteskan sebanyak 0,4 mg/cm² pada kapton film dan diratakan menggunakan *doctor blade*. Ketebalan katalis yang dibuat telah

ditetapkan dalam penelitian ini adalah 30 μm . Tinta katalis yang telah dilapiskan pada kapton film kemudian dikeringkan menggunakan *vacuum oven* pada temperatur 100 $^{\circ}\text{C}$ selama 1 jam 10 menit. Setelah kering, lapisan tinta katalis akan dipotong dengan ukuran $3 \times 3 \text{ cm}$ dan siap untuk di *hot press* dengan membran PFSA.

3.4 Proses Decal Transfer

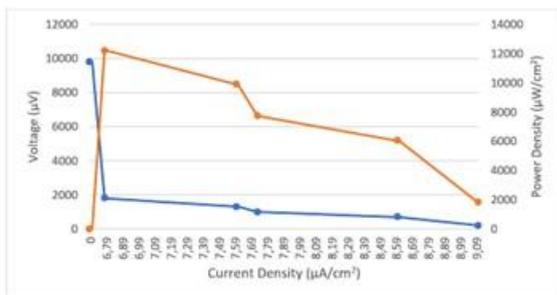
Kapton film yang telah dilapisi tinta katalis disusun dengan mengapit membran PFSA yang sudah di *pre-treatment* dan selanjutnya dilakukan proses *hot press*. Proses *hot press* dilakukan dengan temperatur 80 $^{\circ}\text{C}$. Ketebalan MEA yang dibuat pada penelitian ini telah ditetapkan yaitu 140, 170, dan 200 μm . Setelah proses *hot press* selesai, kapton film dilepas dari kedua sisi elektroda hingga didapatkan MEA.

3.5 Pengujian Kinerja MEA

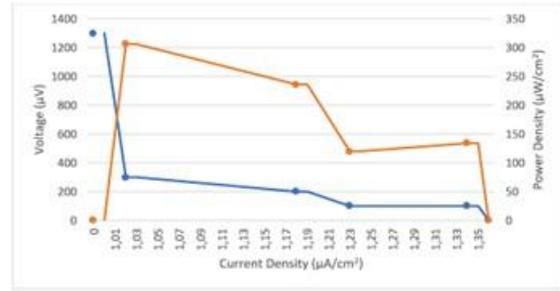
Karakterisasi densitas daya dan arus dilakukan dengan menggunakan PEMFC testing ED 9741-2. Pengujian dimulai dengan menyusun MEA menjadi *single cell* PEMFC (MEA, GDL, gasket silikon, *current collector*, *end plate*) untuk diletakkan pada alat uji. Kemudian hubungkan kabel yang tersedia pada alat uji PEMFC dengan *current collector* pada PEMFC. Selanjutnya hubungkan DC *power supply* dengan elektrolizer dan tegangannya diatur pada 10 V. Hubungkan selang pada elektrolizer dengan PEMFC yang telah dirakit pada sisi anoda. Ketika tegangan tanpa resistansi yang dihasilkan PEMFC sudah stabil, catat data tegangan (V) dan arus (I). Berikan resistansi yang telah ditentukan, yaitu 3,4, 10, 15, 20, dan 30 ohm. Saat tegangan pada masing-masing resistansi sudah stabil, catat data tegangan dan arus yang terlihat pada Avometer. Setelah data didapatkan, lakukan proses analisis.

4. Hasil dan Pembahasan

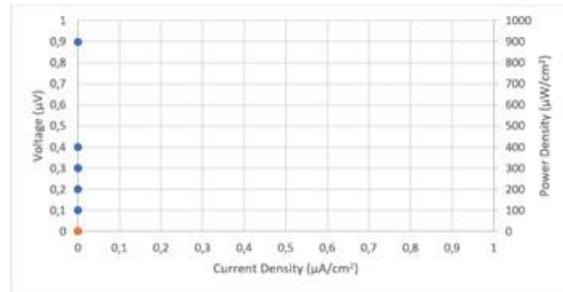
Pengujian PEMFC testing pada sampel MEA dengan tiga variasi ketebalan yang berbeda telah dilakukan. Hasil dari pengujian PEMFC testing ini berupa kurva polarisasi kinerja PEMFC yang ditunjukkan pada Gambar 5, 6, dan 7. Kurva polarisasi adalah gambaran standar untuk mengevaluasi kinerja dari *fuel cell* selama pengoperasian dan berupa kurva yang menunjukkan hubungan antara tegangan dengan densitas arus yang dihasilkan saat diberikan suatu resistansi.



Gambar 5. Kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 140 μm .



Gambar 6. Kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 170 μm .



Gambar 7. Kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 200 μm .

Gambar 5 menunjukkan kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 140 μm yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu 9800 μV pada kondisi tanpa resistansi. Selanjutnya diberikan resistansi pada nilai 3,4 ohm dan menghasilkan nilai tegangan 200 μV dengan nilai densitas arus 9,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Penurunan tegangan terjadi karena adanya *activation losses* dan *ohmic losses*. *Activation losses* adalah kerugian yang terjadi saat memulai reaksi elektrokimia, energi yang dibutuhkan untuk memulai reaksi tersebut menyebabkan adanya penurunan tegangan. *Ohmic losses* terjadi karena saat diberikan resistansi, arus yang bergerak menghasilkan resistansi internal dan menyebabkan penurunan tegangan. Sementara itu, nilai densitas daya yang dihasilkan awalnya meningkat seiring dengan meningkatnya densitas arus, pada nilai densitas arus 6,78 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, nilai densitas daya yang dihasilkan adalah 12204 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Nilai tersebut merupakan puncak densitas daya yang dihasilkan oleh MEA dengan ketebalan 140 μm . Namun, Gambar 5. menunjukkan nilai densitas arus tertinggi yang dihasilkan adalah 9,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, terlihat bahwa densitas daya maksimum tidak selalu tercapai pada densitas arus maksimum [10 - 11].

Gambar 6 menunjukkan kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA 170 μm yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu 1300 μV pada kondisi tanpa resistansi. Setelah diberikan resistansi pada nilai 3,4 ohm, nilai densitas arus yang dihasilkan adalah 1,36 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, namun tegangan listrik menunjukkan nilai 0 μV . Hal ini terjadi karena adanya *activation losses* sehingga tegangan listrik yang dihasilkan terlalu kecil untuk dideteksi oleh Avometer. Namun saat diberikan resistansi 10 ohm, terlihat nilai densitas arus yang dihasilkan adalah 1,34

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan menunjukkan adanya kenaikan nilai tegangan yaitu sebesar $100\ \mu\text{V}$. Sementara itu, terjadi penurunan densitas daya pada resistansi $15\ \text{ohm}$, hal ini disebabkan adanya *ohmic losses* sehingga nilai arus yang dihasilkan menurun dan menyebabkan nilai densitas daya yang dihasilkan ikut menurun. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 densitas arus tertinggi yang dihasilkan adalah $1,36\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan puncak densitas dayanya adalah $306\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Gambar 7 menunjukkan kurva polarisasi PEMFC dengan ketebalan MEA $200\ \mu\text{m}$ yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu $900\ \mu\text{V}$ pada kondisi tanpa resistansi. Namun setelah diberikan resistansi, arus listrik yang dihasilkan terlalu kecil untuk dideteksi oleh Avometer. Hal ini terjadi karena adanya delaminasi lapisan katalis dan membran yang disebabkan oleh kurangnya tekanan saat proses pabrikasi. Hal ini menyebabkan tidak terbentuknya ikatan yang baik antara lapisan katalis dengan membran, sehingga zona *triple phase boundary* (TPB) pada MEA tidak terbentuk [6] [13].

5. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisa yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa pengaruh ketebalan MEA berbanding terbalik dengan kinerja MEA, dimana semakin tipis MEA yang dibuat maka semakin baik kinerja yang dihasilkan oleh MEA tersebut. Pada penelitian ini, MEA dengan ketebalan $140\ \mu\text{m}$ menghasilkan kinerja terbaik. Pada kondisi tanpa resistansi, nilai tegangan tertinggi yang dihasilkan adalah $9800\ \mu\text{V}$. Setelah diberikan resistansi, nilai densitas arus tertinggi yang dihasilkan adalah $9,1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ dan nilai densitas daya maksimum yaitu $12204\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

Daftar Pustaka

- [1] De Oliveira-Assis, L., Garcia-Trivino, P., Soares-Ramos, E. P., Sarrias-Mena, R., Garcia-Vazquez, C. A., Ugalde-Loo, C. E. and Fernandez-Ramirez, L. M. (2021). Optimal Energy Management System Using Biogeography Based Optimization for Grid-Connected MVDC Microgrid with Photovoltaic, Hydrogen System, Electric Vehicles and Z-Source Converters. *Energy Convers Manag*, vol. 248.
- [2] Chen, Y., Lan, L., Hao, Z. and Fu, P. (2022). Cradle-Grave Energy Consumption, Greenhouse Gas and Acidification Emissions in Current and Future Fuel Cell Vehicles: Study based on five hydrogen production methods in China. *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7931–7944.
- [3] Shi, H., Su, C., Ran, R., Cao, J. and Shao, Z. (2020). Electrolyte Materials for Intermediate-Temperature Solid Oxide Fuel Cells. *Progress in Natural Science: Material International*, 30, 764 – 774.
- [4] Hu, C., Zhao, Y., Zhang, Z., Zhang, H. and Chen, D. (2023). Optimization of Flow Field Structure for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack by Multi-Physics Coupling Simulation. *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 18, no. 7, 2023.
- [5] Huah, L. B., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Daud, W. R. W., Radzuan, N. A. M. and Haque, M. A. (2020). Comparison of Catalyst-Coated Membranes and Catalyst-Coated Substrate for PEMFC Membrane Electrode Assembly: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*.
- [6] Wang, K., Zhou, T., Cao, Z., Yuan, Z., He, H., Fan, M. and Jiang, Z. (2023). Advanced 3D Ordered Electrodes for PEMFC Applications: From Structural Features and Fabrication Methods to the Controllable Design of Catalyst Layers. *Green Energy & Environment*.
- [7] Squadrito, G. (2018). Preparation of MEA. In *Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research*, pp. 117–138.
- [8] Zucconi, A., Hack, J., Suter, T. A. M., Braglia, M., Shearing, P. R., Brett, D. J. L. and Rettie, A. J. E. (2023). In Situ X-Ray Imaging of HT-PEMFC Hot-Pressing Using Contrast Enhancement. *J Power Sources*, vol. 584.
- [9] Guaitolini, S. V. M. and Fardin, J. F. (2018). Fuel Cells: History (Short Remind), Principles of Operation, Main Features, and Applications. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, vol. 2, pp. 123–150.
- [10] Zhang, J., Wu, J. and Zhang, H. (2013). PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis. Newnes.
- [11] Kaur, G., Gates, B. D., Chhina, H., Taylor, A. K., Gautam, S., Schneider-Coppolino, M. and Duncan, K. L. (2022). Charge and Mass Transport and Modeling Principles in Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells. In *PEM Fuel Cells* (pp. 173-195).
- [12] Cho, H. J., Jang, H., Lim, S., Cho, E., Lim, T., Oh, I., Kim, H. and Jang, J. H. (2011). Development of a Novel Decal Transfer Process for Fabrication of High-Performance and Reliable Membrane Electrode Assemblies for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 19, pp. 12465–12473.
- [13] Silva, R. A., Hashimoto, T., Thompson, G. E. and Rangel, C. M. (2012). Characterization of MEA Degradation for an Open Air Cathode PEM Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, pp, 7299–7308.

	<p>Pande Nyoman Agus Adnyana menyelesaikan studi S1 tahun 2024 Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi mengenai pabrikan MEA dari Proton Exchange Membrane Fuel cell.</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada tahun 1998, kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 2001, serta S3 di Shibaura Institute of Technology, Jepang 2007, dan Profesi di Universitas Udayana, Bali tahun 2020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan fuel cell, penyimpanan energi, dan green energy. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana</p>	

	<p>I Made Joni menyelesaikan studi program S1 di Universitas Padjadjaran tahun 1998. S2 di Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India tahun 2000. Dan S3 di Hiroshima University Japan pada tahun 2011. Saat ini beliau bekerja pada Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah teknologi nanopartikel serta perkembangan baterai. Saat ini beliau bekerja pada departemen fisika, FMIPA Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat.</p>	

	<p>Made Suarda menyelesaikan studi S1 tahun 1989 program studi Teknik Permesinan Kapal di Universitas ITS Surabaya, Jawa Timur. Kemudian Menyelesaikan studi S2 tahun 2004 program studi Advanced Manufacturing Technology di University of South Australia, Adelaide dan menyelesaikan studi S3 tahun 2020 program studi ilmu teknik di Universitas Udayana, Bali.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah mengenai modelling dan simulasi planar mechanism using bondgraph. Analisis dinamika fluida pada pompa. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.</p>	

	<p>Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 tahun 1996 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana, Bali. Kemudian menyelesaikan studi S2 program studi teknik mesin tahun 2006 di Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.</p>	

Pabrikasi Membrane Electrode Assembly Menggunakan Metode Decal Transfer Dengan Variasi Suhu Hot Press Terhadap Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung Vulcan XC-72

Ilham Fauzi¹, Made Joni², Made Suarda^{1*}, Ketut Astawa^{1*}, Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik Mesin - Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

²Finder U-CoE – Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Meningkatnya penggunaan energi fosil diberbagai negara, terkhusus pada sektor otomotif adalah salah satu penyebab krisis energi dan pencemaran udara. Upaya yang dapat dilakukan adalah beralih dari energi fosil menuju energi baru & terbarukan. Beberapa energi baru & terbarukan telah banyak dikembangkan contohnya energi hidrogen. Contoh pengaplikasian energi hidrogen adalah fuel cell. Jenis fuel cell yang dapat digunakan pada sektor otomotif adalah proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). PEMFC memiliki komponen terpenting yaitu membrane electrode assembly (MEA). Pabrikasi MEA yang rumit dan materialnya yang mahal menjadi penyebab permasalahan yang harus di pecahkan. Salah satu solusinya adalah dengan mensubstitusi platina dengan titanium dioksida. Metode decal transfer banyak digunakan karena mampu meningkatkan kontak ionik catalyst ke membran. Pada penelitian ini dilakukan pabrikasi MEA menggunakan metode decal transfer dengan memvariasikan suhu hot press, yaitu 40°C, 60°C, dan 80°C untuk mengetahui suhu yang optimal dan performa MEA yang dihasilkan menggunakan pengujian kinerja MEA. Ketebalan katalis yang digunakan adalah 30 µm dan ketebalan MEA diatur 140 µm. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa MEA dengan variasi suhu 40°C dan 60°C menghasilkan tegangan terkecil yaitu 0,1 µV dan 0,2 µV, sedangkan pada suhu 80°C tegangan yang dihasilkan mencapai tegangan terbesarnya yaitu 0,4 µV. Jadi, dapat disimpulkan suhu terbaik adalah 80°C

Kata kunci: PEMFC, MEA, Suhu hot press

Abstract

The increasing use of fossil fuels in various countries, especially in the automotive sector, is one of the causes of the energy crisis and air pollution. Efforts that can be made are to switch from fossil fuels to new and renewable energy. Several new and renewable energies have been widely developed, for example hydrogen energy. An example of the application of hydrogen energy is fuel cells. The type of fuel cell that can be used in the automotive sector is the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). PEMFC has the most important component, namely the membrane electrode assembly (MEA). The complicated fabrication of MEA and its expensive materials are the causes of problems that must be solved. One solution is to substitute platinum with titanium dioxide. The decal transfer method is widely used because it can increase the contact of the ionic catalyst to the membrane. In this study, MEA fabrication was carried out using the decal transfer method by varying the hot press temperature, namely 40°C, 60°C, and 80°C to determine the optimal temperature and performance of the MEA produced using MEA performance testing. The thickness of the catalyst used was 30 µm and the thickness of the MEA was set at 140 µm. From the test results, it was obtained that MEA with temperature variations of 40°C and 60°C produced the smallest voltage, namely 0.1 µV and 0.2 µV, while at a temperature of 80°C the voltage produced reached its largest voltage, namely 0.4 µV. So, it can be concluded that the best temperature is 80°C

Keywords: PEMFC, MEA, Hot press temperature

1. Pendahuluan

Meningkatnya penggunaan energi fosil diberbagai negara, terkhusus penggunaan pada sektor otomotif menyebabkan semakin menipisnya cadangan energi fosil dan polusi udara. Dalam beberapa tahun terakhir polusi udara meningkat sebesar 31% [1]. Upaya yang dapat dilakukan yaitu beralih dari energi fosil menuju energi hidrogen [2]. Salah satu pengaplikasian energi hidrogen adalah teknologi Fuel cell.

Fuel cell adalah teknologi yang dapat mengubah hidrogen menjadi listrik dengan reaksi elektrokimia [3]. Jenis fuel cell yang dapat digunakan pada otomotif adalah proton exchange membran feul cell (PEMFC) yang memiliki kemampuan operasi pada

suhu rendah di bawah 100°C [4]. PEMFC memiliki komponen penyusun seperti current collector, membrane electrode assembly (MEA), dan bipolar plate [5]. Komponen terpenting dalam PEMFC adalah MEA, yang tersusun dari beberapa bagian yaitu gas diffusion layer (GDL), catalyst, dan proton exchange membrane (PEM) [6].

MEA berperan sebagai tempat terjadinya proses elektrokimia pada PEMFC, prosesnya terjadi ketika oxygen reduction reaction (ORR) terjadi di dalam catalyst katoda, lalu hydrogen oxidation reaction (HOR) di catalyst anoda [7]. Sehingga catalyst berperan penting pada kinerja PEMFC. Bahan yang banyak digunakan untuk catalyst adalah platina (Pt) yang didukung carbon (C) [8]. Namun,

penggunaan Pt mengakibatkan biaya produksi yang tinggi dan pabrikasi MEA yang rumit. Upaya yang saat ini dilakukan untuk menekan biaya penggunaan Pt adalah mensubstitusi katalis tanpa mengurangi kinerjanya, serta melakukan pemilihan metode pabrikasinya [9].

Dalam pabrikasi MEA, terdapat dua cara teknik pabrikasi yang dapat digunakan yaitu *catalyst-coated-membranes* (CCM) atau *catalyst-coated-substrates* (CCS) [10]. Teknik CCM banyak digunakan pada pabrikasi MEA karena kemampuan dan keunggulannya, yaitu mampu meningkatkan kontak permukaan ionik antara membran dan *catalyst* [11]. CCM memiliki metode yaitu *decal transfer* (DT). Metode DT dipilih karena paling layak secara pabrikan [12]. Metode DT memiliki keuntungan yaitu MEA yang dihasilkan memiliki karakteristik yang baik. Prosesnya, substrat dilapisi katalis menggunakan alat *doctor blade*, selanjutnya *catalyst* ditransfer ke membran menggunakan hotpress [13].

Hot press dilakukan supaya memperoleh hasil kontak antar muka yang baik antara katalis dan PEM. Parameter hotpress seperti tekanan, waktu, dan suhu berpengaruh penting dalam hasil performa MEA secara keseluruhan [14].

Tujuan dari dilaksanakannya penelitian adalah untuk mengetahui uji performa MEA yang di pabrikasi menggunakan metode *decal transfer* dengan parameter suhu *hotpress* yang divariasikan pada katalis Pt.TiO₂/Vulcan XC-72. Adapun permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini meliputi analisis uji performa MEA sebagai komponen pada PEMFC. Untuk mendapatkan hasil optimal, maka perlu adanya batasan yang dimiliki meliputi: material komponen MEA yang digunakan sesuai dengan yang tersedia secara komersial dan tekanan, waktu diasumsikan konstan pada proses hotpress.

2. Dasar Teori

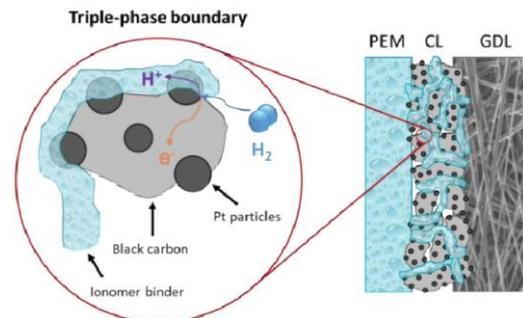
2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

PEMFC merupakan suatu jenis *fuel cell* yang mampu bekerja pada temperatur rendah yaitu 40-80 °C dan memiliki efisiensi sebesar 60 % serta memiliki kerapatan arus yang tinggi [15]. PEMFC memiliki beberapa komponen penyusun terdiri dari *end plate*, *current collector*, *bipolar plate*, *gasket*, *gas diffusion layer* (GDL), *CL*, *MEA*. Proses reaksi kimia yang terdapat pada PEMFC terjadi di dalam MEA, oksigen reaksi reduksi terjadi di katoda dan reaksi oksidasi hidrogen terjadi di anoda [6-8].

2.2 Membrane Electrode Assembly

Dalam PEMFC, reaksi elektrokimia dalam MEA terutama terjadi di zona *three phase boundaries* (TPB), dimana komponen seperti elektrolit, dan katalis disusun berlapis-lapis untuk membentuk zona TPB. Struktur TPB sangat menguntungkan untuk perpindahan massa dan muatan melalui reaksi elektrokimia pada lapisan katalis. Artinya TPB

mempunyai dampak signifikan terhadap aktivitas dan daya tahan elektroda PEMFC yang merupakan kunci peningkatan kinerja MEA [16]. Gambar 1 merupakan ilustrasi zona TPB



Gambar 1. ilustrasi zona TPB [17]

2.3 Pabrikasi Membrane Electrode Assembly

MEA dapat dipabrikasi dengan dua metode yaitu CCM dan CCS. CCM dan CCS memiliki kelebihan dan kekurangannya masing masing. Kelemahan terbesar untuk metode fabrikasi CCS adalah persyaratan penggunaan Pt yang tinggi untuk mencapai kinerja yang sama pada metode CCM [11-12].

2.2.2 Catalyst Coated Membrane (CCM)

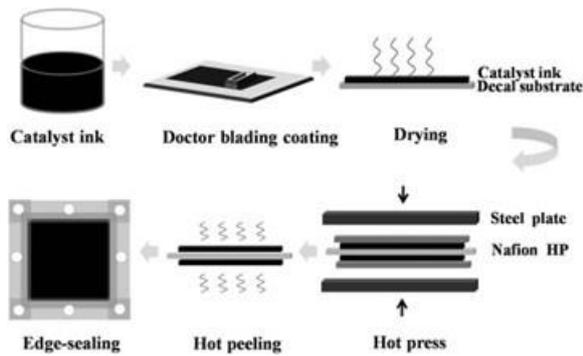
Metode CCM dimulai dengan menerapkan *catalyst ink* langsung ke membran dengan menggunakan beberapa teknik tertentu yaitu *direct wet spray*, *decal transfer*, *painting*, *screen and injection printing*. Teknik CCM juga dapat dikombinasikan seperti teknik *decal transfer* yang dikombinasikan dengan teknik *spray* [12].

2.3.2 Decal transfer Methode

Decal transfer banyak digunakan secara massal. Teknik ini dapat menghasilkan resistensi yang rendah pada MEA karena proses pabrikasinya. Dimana lapisan katalis dibentuk dengan cara menuangkan katalis ke media substrat sebelum dipindahkan ke membran dengan perlakuan hotpress. Temperatur tinggi untuk memperoleh hasil yang optimal [12]. Gambar 2 merupakan contoh dari *decal transfer methode*.

2.4 Karakteristik performa PEMFC testing ED 9741-2.

MEA dapat diketahui kualitasnya dengan cara menguji performa MEA dengan menggunakan alat uji PEMFC testing ED 9741-2. Prinsip kerja alat ini, adalah dengan menghubungkan elektrolisis air untuk menghasilkan hidrogen. gas yang dihasilkan dari elektrolisis akan dialirkan menuju anoda sedangkan pasokan oksigen diambil melalui udara di sisi katoda. Selanjutnya akan terjadi reaksi elektrokimia pada MEA yang akan menghasilkan *output* listrik dan air, lalu kolektor elektron dihubungkan dengan pengukur tegangan listrik untuk mengukur tegangan yang dikeluarkan. Selain itu beban tertentu akan diberikan untuk mengukur arus listrik yang dihasilkan [19].



Gambar 2. Decal transfer metode [18]

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan secara eksperimental dengan menggunakan tiga parameter variasi suhu pada saat proses *hotpress* diatur pada suhu 40°C, 60°C, dan 80°C dengan masing masing ketebalan katalis 30 µm dan ketebalan MEA 140 µm. Metode yang digunakan pada saat pabriaksi adalah *decal transfer* dengan teknik CCM. Pengujian pada MEA dilakukan dengan uji performa untuk mengetahui tegangan yang dihasilkan oleh MEA.

3.1. Pretreatment membrane

Membran (PFSA D170-U) potong dengan ukuran 3x3 cm, panaskan membran dengan *magnetic stirrer* pada suhu 60-80°C dalam larutan H₂O₂ konsentrasi 3-5% 50mL dalam gelas beaker. Kemudian panaskan kembali membran dengan cairan H₂SO₄ 0,5M pada suhu 60-80°C, selanjutnya bilas membran dengan suhu 70°C dengan aquades hingga pH 7, lalu simpan membran dengan air dieionisasi.

3.2. Preperasi tinta katalis

Preperasi tinta katalis dimulai dengan mencampurkan katalis (Pt.TiO₂/Vulcan XC-72) sebanyak 1g, dengan *distilled water* sebanyak 2,4g nafion solution 5 wt% sebanyak 1,2g etilen glikol sebanyak 0,75g dan isopropanol alkohol sebanyak 1,2g dimasukkan dalam gelas vial. Campuran diultrasonikasi dengan menggunakan ultrasonic bath yang di isi ice cube pada 60 Hz selama 3 jam. Kemudian campuran katalis di teteskan pada kapton film berukuran 3,5 x 3,5 cm dan diratakan ketebalannya yaitu 30 µm menggunakan *doctor blade machine*. Kemudian dikeringkan dengan oven vacuum pada suhu 90°C selama 70 menit.

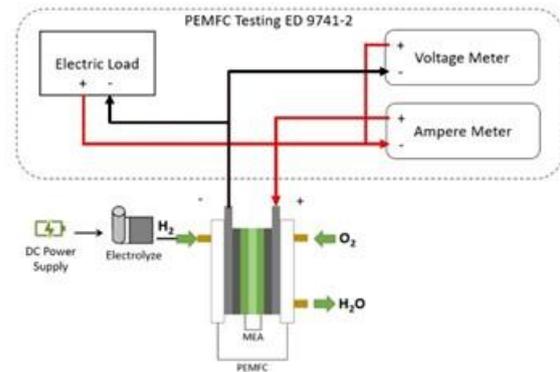
3.3. Proses Decal Transfer & Hot press

Proses *decal transfer* dan *hot press* dimulai dengan membran yang sudah dipretreatment kemudian diletakkan dikedua sisi kapton film yang sudah di keringkan kemudian dilakukan proses *hot press* dengan menggunakan mesin *hot press* dengan variasi suhu yang sudah di tentukan pada penelitian dan ketebalan MEA 140 µm serta ketebalan katalis 30 µm. Setelah *hotpress* selesai, kapton film dilepas dari kedua sisi membran sehingga MEA berhasil dibuat.

3.4. Metode Pengujian Performa MEA

Pengujian Performa dilakukan menggunakan mesin Uji performa (PEMFC) testing ED 9741-2

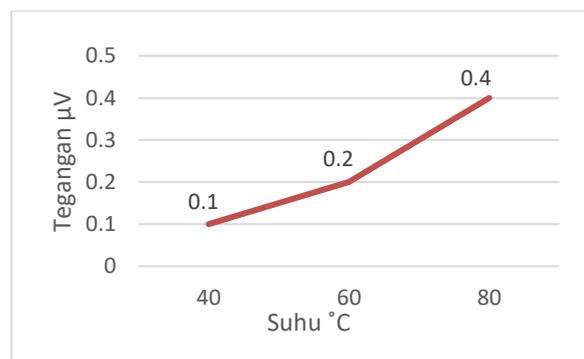
untuk mengetahui tegangan pada MEA yang dibuat. MEA dirakit dengan menggabungkan komponen penyusun (endplat, current collector, gasket, GDL AvCarb (2230) lalu hubungkan kabel yang tersedia pada alat uji dengan *current collector* pada *single cell* PEMFC, pasang elektrolisis air pada *single cell* PEMFC dan alirkan gas hidrogen pada selang menuju PEMFC dengan *power supply* sebesar 10 volt pada elektrolisis. Setelah tegangan keluar pada setiap variasi didapatkan lakukan proses analisis. Gambar 3 merupakan skema pengujian performa MEA.



Gambar 3. Skema Uji performa

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian performa dari Pabriaksi MEA menggunakan katalis Pt.TiO₂/Vulcan XC-72) dengan variasi suhu *hotpress* berhasil dilakukan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa listrik yang dikeluarkan pada MEA katalis Pt.TiO₂/Vulcan XC-72 akibat variasi suhu *hotpress* seperti yang di tunjukan pada Gambar (4.1) merupakan grafik hubungan tegangan terhadap variasi.



Gambar 4. Grafik hubungan tegangan terhadap variasi

Pada Gambar 4 dilihat terdapat grafik hubungan tegangan terhadap variasi suhu *hot press*. Pada variasi suhu 40°C tegangan yang dikeluarkan sangat kecil sebesar 0,1 µV dan pada variasi suhu 60°C tegangan yang dikeluarkan cukup kecil sebesar 0,2 µV. Hal ini dapat terjadi mungkin disebabkan kurang optimalnya suhu pada saat proses *hot press*. Suhu *hot press* yang optimal akan mempengaruhi kontak permukaan katalis dan pem [20]. Pada variasi suhu

80°C tegangan yang dihasilkan mampu menghasilkan tegangan sebesar 0,4 μ V lebih besar dari variasi suhu 40°C dan 60°C. Hal ini mungkin disebabkan karena mampu terciptanya zona TPB dan mampu menghasilkan kontak permukaan yang baik antara katalis dan pem, namun material katalis yang digunakan pada penelitian ini hanya mampu mengeluarkan tegangan sebesar μ V.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan didapatkan hasil bahwa suhu *hot press* akan mempengaruhi tegangan yang dihasilkan, semakin optimal suhu *hot press* maka tegangan yang dihasilkan akan semakin besar. Pada variasi suhu 80°C tegangan yang dihasilkan mampu menghasilkan tegangan terbesar yaitu 0,4 μ V lebih besar dibandingkan dengan variasi suhu 40°C dan 60°C yang hanya mampu menghasilkan 0,1 μ V dan 0,2 μ V.

Daftar Pustaka

- [1] Eren, B. M., Taspinar, N., & Gokmenoglu, K. K., 2019, *The impact of financial development and economic growth on renewable energy consumption, Empirical analysis of India*. Science of the Total Environment, 663, pp. 189-197.
- [2] Tenar, T., 1994, *Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations.*, Energy. 143, pp. 284-294.
- [3] Bhosale, A. C., Ghosh, P. C., & Assaud, L., 2020, *Preparation methods of membrane electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells and unitized regenerative fuel cells: A review*, In Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 133.
- [4] Olabi, A. G., Wilberforce, T., Alanazi, A., Vichare, P., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., Elsaid, K., & Abdelkareem, M. A., 2022, *Novel Trends in Proton Exchange Membrane Fuel Cells*, In Energies., Vol. 15, pp. 14.
- [5] Sim, J., Kang, M., & Min, K., 2021, *Effects of basic gas diffusion layer components on PEMFC performance with capillary pressure gradient*, International Journal of Hydrogen Energy, 46(54), pp. 27731–27748.
- [6] Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A., 2018, *Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review*, In Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 89, pp. 117-134.
- [7] Chen, M., Zhao, C., Sun, F., Fan, J., Li, H., & Wang, H., 2020, *Research progress of catalyst layer and interlayer interface structures in membrane electrode assembly (MEA) for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system*, In eTransportation, Vol 5.
- [8] Zhang, X., Li, H., Yang, J., Lei, Y., Wang, C., Wang, J., Tang, Y., & Mao, Z., 2021, *Recent advances in Pt-based electrocatalysts for PEMFCs*, In RSC Advances, Vol 5, pp. 13316-13328.
- [9] Liu, H., Ney, L., Zamel, N., & Li, X., 2022, *Effect of Catalyst Ink and Formation Process on the Multiscale Structure of Catalyst Layers in PEM Fuel Cells*, Applied Sciences, Switzerland, 12 (8).
- [10] Parekh, A., 2022, *Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review*, In Frontiers in Energy Research, Vol. 10.
- [11] Lim, B. H., Majlan, E. H., Tajuddin, A., Husaini, T., Wan Daud, W. R., Mohd Radzuan, N. A., & Haque, M. A. 2021. *Comparison of catalyst-coated membranes and catalyst-coated substrate for PEMFC membrane electrode assembly: A review*, In Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 33. Pp. 1-16.
- [12] Jie un. choi, Kyeong, M. K., Kim, M. S., Lee, S. S., Seo, B., Park, H. S., Park, H. Y., Henkensmeier, D., Lee, S. Y., & Kim, H. J. 2021. *Synthesis of sulfonated poly(Arylene ether sulfone)s containing aliphatic moieties for effective membrane electrode assembly fabrication by low-temperature decal transfer methods*, Polymers, 13,11.
- [13] Mihwa, C., Kim, J. K., Kim, J., Yang, S., Park, J. E., Kim, O. H., & Cho, Y. H. 2018. *PtRu/C catalyst slurry preparation for large-scale decal transfer with high performance of proton exchange membrane fuel cells*, RSC Advances, 8.13. pp. 36313-36322.
- [14] Gatto, I., Saccà, A., Baglio, V., Aricò, A. S., Oldani, C., Merlo, L., & Carbone, A. 2019. *Evaluation of hot pressing parameters on the electrochemical performance of MEAs based on Aquivion® PFSA membranes*, Journal of Energy Chemistry, Vol 35, pp. 168-173
- [15] Alaswad, A., Omran, A., Sodre, J. R., Wilberforce, T., Pignatelli, G., Dassisti, M., ... & Olabi, A. G. 2020. *Technical and commercial challenges of proton-exchange membrane (PEM) fuel cells*. Energies, 14(1), 144..
- [16] Cai, X., Lin, R., Wang, H., Liu, S., & Zhong, D. 2021. *One simple method to improve the mass transfer of membrane electrode assembly to realize operation under wide humidity*. Journal of Power Sources, 506, 230185.
- [17] Robert, M., Vito Di Noto, M., & Jean-Christophe Perrin, M 2021. *Impact of degradation and aging on properties of PFSA membranes for fuel cells Impact des dégradations et du vieillissement sur les propriétés des membranes PFSA pour piles à combustible Présentée par Composition du jury*. Énergie et Mécanique

- [18] Liang, X., Pan, G., Xu, L., & Wang, J. 2015. *A modified decal method for preparing the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells*, Fuel, vol. 139, pp. 393–400.
- [19] Sucipta, M., Sibarani, J., Gede Nengah Wika Gunawan, I., Galang Bhuna Putra, S., Anderson Robert, R., Kandou, S., & Brahmanda Sudarsana, P. 2023. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Membrane Electrode Assembly Based on Platinum-Carbon Electrocatalyst with Activated Carbon-Chitosan-Nickel*, Vol. 13, Issue 1.
- [20] Wang, M., Medina, S., Ochoa-Lozano, J., Mauger, S., Pylypenko, S., Ulsh, M., & Bender, G. 2021. *Visualization, understanding, and mitigation of process-induced-membrane irregularities in gas diffusion electrode-based polymer electrolyte membrane fuel cells*. International Journal of Hydrogen Energy, 46(27), pp. 14699-14712

	Ilham Fauzi menyelesaikan studi S1 tahun 2024 Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali.
Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi mengenai Pabrikasi Membrane Electrode Assembly dari Proton Exchange Membrane Fuel cell.	

	Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya pada tahun 1998, kemudian melanjutkan program S2 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya 2001, serta S3 di Shibaura Institute of Technology, Jepang 2007, dan Profesi di Universitas Udayana, Bali tahun 2020.
Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan fuel cell, penyimpan energi, dan green energy. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana	

	I Made Joni menyelesaikan studi program S1 di Universitas Padjadjaran tahun 1998. S2 di Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India tahun 2000. Dan S3 di Hiroshima University Japan pada tahun 2011. Saat ini beliau bekerja pada Departemen
---	---

	Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran.
Bidang penelitian yang diminati adalah teknologi nanopartikel serta perkembangan baterai. Saat ini beliau bekerja pada departemen fisika, FMIPA Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat.	

	Made Suarda menyelesaikan studi S1 tahun 1989 program studi Teknik Permesinan Kapal di Universitas ITS Surabaya, Jawa Timur. Kemudian Menyelesaikan studi S2 tahun 2004 program studi Advanced Manufacturing Technology di University of South Australia, Adelaide dan menyelesaikan studi S3 tahun 2020 program studi ilmu teknik di Universitas Udayana, Bali.
Bidang penelitian yang diminati adalah mengenai modelling dan simulasi planar mechanism using bondgraph. Analisis dinamika fluida pada pompa. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.	

	Ketut Astawa menyelesaikan studi S1 tahun 1996 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana, Bali. Kemudian menyelesaikan studi S2 program studi teknik mesin tahun 2006 di Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.
Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya.	

Karakteristik *Cyclic Voltammetry* Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung *Vulcan XC 72 - Reduced Graphene Oxide* Dengan Variasi Perbandingan Massa

Dewa Made Dwi Adnyana Putra¹, I Made Joni², Made Suarda¹, Ketut Astawa¹, Made Sucipta^{1*}

¹Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Bukit Jimbaran Bali

²Finder U-CoE- Universitas Padjadjaran, Jatinanggor, Jawa Barat

Abstrak

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) merupakan sebuah teknologi konversi elektrokimia yang dapat menghasilkan listrik dan kalor dengan memanfaatkan energi hidrogen. PEMFC memiliki efisiensi yang tinggi, temperatur pengoperasian rendah serta memiliki sifat yang ramah lingkungan jadi sangat mendukung penggunaan green energy untuk dimanfaatkan dalam keperluan sehari-hari. Penelitian ini berfokus untuk mengoptimalkan kinerja dari alat PEMFC dengan katalis platina-titanium dioksida yang didukung Vulcan XC 72-reduced graphene oxide (Pt.TiO₂/VC-rGO) dengan menggunakan metode hummer yang sudah dimodifikasi, metode hidrotermal dan metode fotodeposisi untuk sintesis katalis. Variasi VC dan rGO yang digunakan adalah variasi massa, dengan variasi pertama 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO₂ : 0.1 gr VC : 0.2 gr rGO, kedua 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO₂ : 0.15 gr VC : 0.15 gr rGO, dan ketiga 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO₂ : 0.2 gr VC : 0.1 gr rGO. Dengan pengujian cyclic voltametry (CV) didapatkan hasil yang baik dalam pembacaan tegangan arus listrik pada ketiga sampel pengujian, dimana pada variasi ketiga menunjukkan rentang reaksi oksidasi dan reduksi paling lebar.

Kata Kunci: fuel cell, Katalis, PEMFC, Pt/C, Titanium Dioksida, Sintesis,

Abstract

Proton exchange membrane fuel (PEMFC) cell is an electrochemical conversion technology that can produce electricity and heat by utilizing hydrogen energy. PEMFC has high efficiency, low operating temperature and has environmentally friendly properties so it strongly supports the use of green energy to be utilized in daily needs. This research focuses on optimizing the performance of PEMFC devices with platinum-titanium dioxide catalyst supported by Vulcan XC 72-reduced graphene oxide (Pt. TiO₂/VC-rGO). This study used the modified hummer method, hydrothermal method and photodeposition method for the synthesis of Pt. TiO₂/VC-rGO catalyst. The variation of VC and rGO used is mass variation, with the first variation 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO₂ : 0.1 gr VC : 0.2 gr rGO, second 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO₂ : 0.15 gr VC : 0.15 gr rGO, and third 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO₂ : 0.2 gr VC : 0.1 gr rGO. with cyclic voltametry (CV) testing, the results are not good in reading the electric current voltage in the three test samples. The third variation shows the widest range of oxidation and reduction reactions.

Keywords: fuel cell, Catalyst, PEMFC, Pt/C, titanium dioxide, Synthesis,

1. Pendahuluan

Mobilitas dan pertumbuhan penduduk yang masif mengakibatkan meningkatnya kebutuhan energi untuk transportasi, terutama kendaraan dengan berbahan bakar fosil. Bahan bakar fosil yang digunakan sebagai energi kendaraan konvensional saat ini merupakan energi yang tidak dapat diperbaharui yang mana suatu saat akan habis [1]. Seiring dengan kemajuan teknologi, saat ini produsen kendaraan berlomba-lomba menciptakan kendaraan listrik sebagai upaya untuk beralih ke energi alternatif dari bahan bakar fosil [2]. Energi listrik yang digunakan umumnya didapatkan dari melakukan proses kimia untuk mengubah bahan bakar seperti hidrogen, gas alam, metanol, etanol, dan lain-lain agar nantinya dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik untuk menggerakkan kendaraan [3].

Inovasi terhadap kendaraan listrik masih sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dari penggunaan energi listrik tersebut. Sumber listrik dari kendaraan listrik saat ini didominasi oleh penggunaan baterai, hal ini belum cukup efisien dikarenakan baterai memiliki kapasitas penyimpanan yang terbatas serta memerlukan waktu lama yang cukup lama untuk sekali pengisian [4]. Salah satu teknologi terbaru hasil dari inovasi pemanfaatan energi listrik untuk kendaraan adalah memanfaatkan hidrogen dengan fuel cell [5]. *Fuel cell* adalah sebuah teknologi yang berupa alat konversi elektrokimia yang dapat menghasilkan listrik dari hasil reaksi antara hidrogen dan oksigen, yang mana tentunya teknologi ini sangat ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan sebagai listrik portabel dan stasioner [6]. *Proton*

exchange membrane fuel cell (PEMFC) merupakan salah satu jenis *fuel cell* yang sangat baik digunakan untuk keperluan listrik portable disamping karena ramah lingkungan PEMFC memiliki efisiensi yang tinggi dan temperatur pengoperasian yang rendah jadi akan aman digunakan dalam jangka Panjang. [6]. Dalam pengoperasiannya, PEMFC memerlukan katalis yang berperan sebagai pembuatan energi hidrogen, dan katalis yang umum digunakan adalah logam mulia platina yang didukung oleh karbon (Pt/C), namun kinerja katalis ini masih perlu untuk ditingkatkan guna mencapai performa yang optimal [7]. Pt yang didukung dengan titanium dioksida (TiO₂) menjadi salah satu alternatif katalis yang efektif untuk mengolah polutan di udara baik sebagai katalis, TiO₂ memiliki keunggulan diantaranya ketersediaan melimpah di bumi, biaya rendah, tidak beracun dan memiliki stabilitas yang tinggi [8]. Sebagai alternatif pengganti karbon, Vulcan XC 72 (VC) dapat menjadi opsi yang bagus karena luas permukaannya yang besar, kemudian porositas yang sesuai, tahan terhadap korosi, serta memiliki konduktivitas listrik yang baik [9]. *Reduced graphene oxide* (rGO) yang dihasilkan dari oksidasi graphene telah menarik minat yang semakin besar sebagai bahan pendukung untuk aplikasi elektrokatalitik, graphene dapat meningkatkan dispersi struktur nano Pt yang menghasilkan luas permukaan besar untuk aktivitas elektrokatalitik. Maka penggabungan VC dan rGO menjadi kombinasi yang luar biasa antara rasio aspek tinggi, luas permukaan spesifik tinggi dan memberikan penguatan pada matriks, 3 sehingga menghasilkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap deformasi [10].

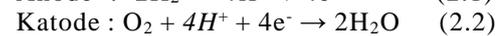
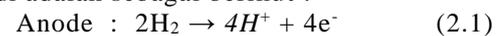
Tujuan dari dilakukannya penelitian ini yaitu, untuk meningkatkan performa katalis pada PEMFC dengan pembuatan katalis Pt.TiO₂/VC-rGO dengan variasi perbandingan massa Vulcan XC-72 dan rGO. Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah, bagaimana karakteristik hubungan tegangan- arus listrik katalis Pt.TiO₂/VC- rGO apabila diterapkan sebagai katalis pada MEA. Karena luasnya permasalahan yang ada, maka perlu dilakukan pembatasan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Dalam penelitian ini batasan yang dijaga seperti, spesifikasi penyusun material katalis yang digunakan sesuai dengan standar yang dikeluarkan oleh industri pabrik. dan suhu serta tekanan dianggap konstan pada setiap proses.

2. Dasar Teori

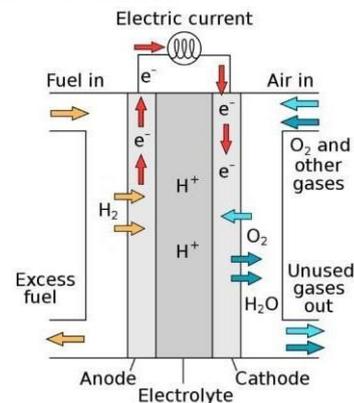
2.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PEMFC adalah salah satu konverter energi yang paling menjanjikan karena memiliki efisiensi tinggi, bebas polutan, dan keberlanjutan energi. PEMFC biasanya disuplai dengan hidrogen di anoda dan udara di katoda. PEMFC mempunyai fungsi utama menghantarkan proton, memisahkan pengoksidasi bahan bakar dan mengisolasi proton, dan kinerjanya secara langsung mempengaruhi kinerja PEMFC. PEMFC yang ideal harus menunjukkan tingkat konduktivitas proton yang tinggi, kandungan air dan permeabilitas molekul gas yang tepat, stabilitas elektrokimia dan stabilitas mekanik yang baik dengan karakteristik ideal suhu dekomposisi 250–500°C. Proses PEMFC menggunakan reaksi redoks pada hidrogen (anode) dan oksigen (katode) [11].

Seperti yang terlihat pada Gambar 1, proses kerja PEMFC beroperasi menggunakan reaksi redoks yang melibatkan hidrogen di anoda dan oksigen di katoda. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut :



Pada anoda, asam dari elektrolit, hidrogennya akan terionisasi menghasilkan elektron dan ion hidrogen (proton). Reaksi ini akan membebaskan energi (Pers 2.1). Sementara di katoda, oksigen bereaksi dengan elektron yang diambil dari elektroda dan proton (ion hidrogen) membentuk air (Pers 2.2). Reaksi tersebut di atas berlangsung kontinyu, elektron yang dihasilkan pada anoda harus dapat melewati rangkaian elektrik menuju katoda. Demikian juga ion hidrogen (proton) harus dapat melewati elektrolit.



Gambar 1. Prinsip kerja PEMFC [17].

2.2. Material Sintesis

Platina (Pt) merupakan logam terbaik yang dapat digunakan sebagai katalis proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). Karena Platina merupakan elektrokatalis yang sangat konduktif serta memiliki aktivitas katalitik yang tinggi dan stabilitas kimia yang sangat baik dalam mereduksi oksigen dan

mengoksidasi hidrogen pada pengoperasian PEMFC [12].

Titanium dioksida (TiO_2) adalah salah satu bahan menarik dengan banyak keunggulan signifikan seperti rasio kekuatan/berat yang tinggi, kelembaman kimia, dan baik ketahanan terhadap ketahanan korosi, yang secara efektif meningkatkan kinerja sel. TiO_2 memiliki stabilitas luar biasa dalam atmosfer oksidasi dibandingkan dengan bahan oksida, nitrida, dan karbida lainnya yang telah diteliti secara menyeluruh sebagai bahan pendukung sehingga sangat berpotensi sebagai katalis yang efektif mengolah polutan [8].

Vulcan XC 72 (VC) merupakan bahan pendukung katalis Pt yang umum digunakan dalam PEMFC juga berfungsi sebagai bahan pengatur jarak antar lembaga graphene dalam PEMFC. Bahan berbasis VC dianggap sebagai bahan pendukung yang paling cocok karena karakteristik intrinsiknya seperti sifat berpori, luas permukaan yang tinggi dan konduktivitas listrik yang baik untuk memperpanjang masa pakai katalis [9].

Reduced graphene oxide (rGO) memiliki sifat penting yang sangat dibutuhkan untuk katalis, diantaranya luas permukaan spesifik yang tinggi, sifat mekanik yang dapat memberikan stabilitas dan durabilitas yang baik, serta kemampuan dispersi dan absorpsi yang baik. Semua sifat tersebut dapat meningkatkan masa pakai katalis [13].



Gambar 2. (a) Bubuk Platina, (b) Titanium dioksida, (c) Vulcan XC 72 dan (d) r-GO

2.3 Metode Sintesis Material

2.3.1 Metode Hummer yang Dimodifikasi

Metode Hummers yang telah dimodifikasi digunakan untuk mensintesis rGO. Metode tersebut digunakan untuk menghasilkan *graphene oxide* melalui sintesis *graphene*, kemudian *reduced graphene oxide* (rGO) diperoleh setelah melalui proses reduksi *graphene*. Kelebihan metode ini diantaranya

biaya produksi yang rendah, hasil material yang dapat dibuat lebih banyak, waktu proses pembuatan yang singkat, serta tingkat keamanan dari reaksi yang ditimbulkan lebih aman karena tidak menggunakan bahan yang berbahaya [14].

2.3.2 Metode Hidrotermal

Pada sintesis TiO_2 didukung Vulcan XC-72 dan rGO, digunakan metode hidrotermal. Metode ini melibatkan autoklaf untuk menciptakan reaksi yang optimal. Metode ini digunakan karena memiliki efisiensi keberhasilan yang tinggi dan kontrol morfologi yang lebih baik terhadap ukuran dan bentuk partikel TiO_2 [15].

2.3.2 Metode Fotodeposisi

Metode Fotodeposisi merupakan teknik untuk mensintesis material dengan cara mendepositkan partikel logam pada permukaan material lain melalui proses fotokatalisis. Metode ini berfungsi untuk meningkatkan sifat katalitik dari TiO_2 dan menjadikan kinerjanya lebih efektif dalam aplikasi PEMFC [16].

2.4. Karakteristik Katalis

Cyclic Voltammetry (CV) adalah alat standar dalam elektrokimia dan telah sering digunakan di fuel cell untuk mempelajari kinerja elektroda dan mengkarakterisasi transfer elektron yang melibatkan sel mikroba atau biofilm. Pengukuran CV memberikan informasi yang sangat efektif tidak hanya mengenai evolusi reaksi redoks atau reaksi elektrokimia yang dilakukan tetapi juga pada kinerja superkapasitor, seperti perilaku jangka panjang dan jendela potensial serta kapasitansi [17].

3. Metode penelitian

Penelitian ini memvariasikan massa dari VC dan rGO dan digunakan 3 macam variasi. Dengan variasi masing-masing 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO_2 : 0.1 gr VC : 0.2 gr rGO untuk variasi pertama, 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO_2 : 0.15 gr VC : 0.15 gr rGO untuk variasi kedua, 0.1 gr Pt : 0.1 gr TiO_2 : 0.2 gr VC : 0.1 gr rGO untuk variasi ketiga.

Metode yang digunakan adalah metode Hummer dimodifikasi, metode hidrotermal dan metode fotodeposisi. Dalam metode Hummer yang dimodifikasi serbuk grafit disintesis dengan material bahan pendukung hingga berubah menjadi *graphene oxide* (GO).

Setelah itu dilakukan metode hidrotermal untuk mensintesis TiO_2 yang didukung Vulcan XC-72 dan rGO dengan memasukkan serbuk rGO dan vulcan XC-72 ke dalam larutan etanol anhidrat dengan

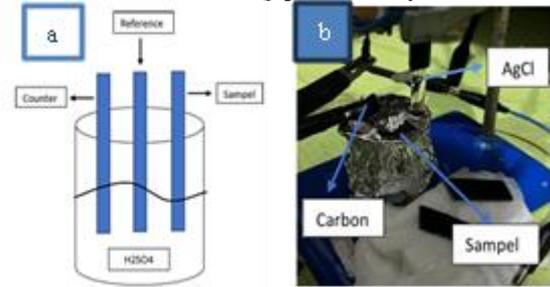
ultrasonik selama 1 jam kemudian ditambahkan $\text{TiO}_2/\text{P25}$ dan diaduk kuat selama 2 jam, setelah itu dipindahkan ke autoklaf untuk dipanaskan pada suhu 180°C selama delapan jam hingga terakhir melalui proses pendinginan pada suhu ruangan, dicuci dan dikeringkan pada vakum dengan suhu 60°C untuk mendapatkan GNT tereduksi.

Langkah selanjutnya adalah mensintesis menggunakan metode fotodeposisi, yang mana setelah Sintesis Pt TiO_2 didukung Vulcan XC-72-rGO, 0,2 g GNT disuspensikan ke dalam larutan metanol (100 mL) pada suhu 25°C , kemudian ditambahkan $\text{H}_2\text{PtCl}_6\text{H}_2\text{O}$ kemudian dilakukan pengadukan magnetik diikuti ultrasonikasi selama 1 jam, kemudian diradiasi dengan lampu 8 W Hg selama 5 jam, setelah itu disaring dan dicuci dengan air DI dan alkohol untuk menghilangkan klorida dan akhirnya dikeringkan dengan vakum pada suhu 70°C semalaman. Dengan demikian sintesis $\text{Pt.TiO}_2/\text{VC-rGO}$ dengan tiga variasi tadi sudah selesai dilakukan. Setelah melakukan sintesis dengan tiga metode tadi dilakukan pengujian karakteristik elektrokimia hubungan tegangan-arus yang di hasilkan dengan melakukan pengujian *cyclic voltammetry* (CV).

Pada penelitian ini alat yang digunakan untuk pengujian adalah CV tester tipe BST8-Stat dengan skema pada kurva uji CV meliputi rentang potensial 0 hingga 2 V dengan *scan rate* 0.1 mV/s. Jika pemindaian dilakukan dari potensial rendah ke potensial tinggi maka akan terjadi reaksi oksidasi, sedangkan jika pemindaian dilakukan dari potensial tinggi ke potensial rendah maka akan terjadi reaksi reduksi. Selama proses reduksi, arus maksimum yang dihasilkan disebut arus puncak katodik dan potensial maksimum disebut potensial puncak katodik. Sebaliknya pada reaksi oksidasi, arus maksimum yang diperoleh disebut arus puncak anodik dan potensial maksimumnya disebut potensial puncak anodik.

Elektroda merupakan salah satu komponen yang sangat penting digunakan dalam uji CV. Elektroda memiliki fungsi sebagai tempat terjadinya reaksi elektrokimia, mengukur stabilitas dan mengukur respons listrik. Ada 3 jenis elektroda yang digunakan dalam pengujian ini, diantaranya *reference*, *counter*, dan sampel (*working*). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (a) Skema pengujian dan Gambar 3 (b) Proses pengujian, elektroda *reference* menggunakan AgCl, kemudian untuk elektroda *counter* menggunakan *carbon*, dan elektroda sampel (*working*) menggunakan sampel yang telah dibuat sebelumnya yaitu katalis $\text{Pt.TiO}_2/\text{VC-}$

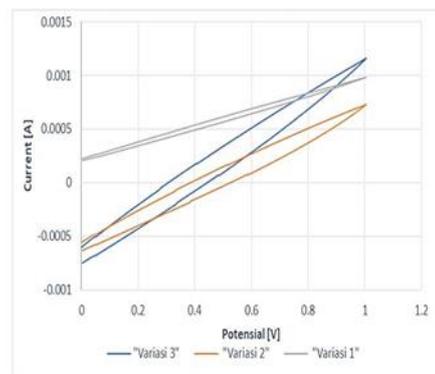
rGO. Pada proses pengujian CV yang dimana masing – masing elektroda di jepit dan dihubungkan ke alat pengujian CV, dan diatur *scan rate* serta rentang potensialnya.



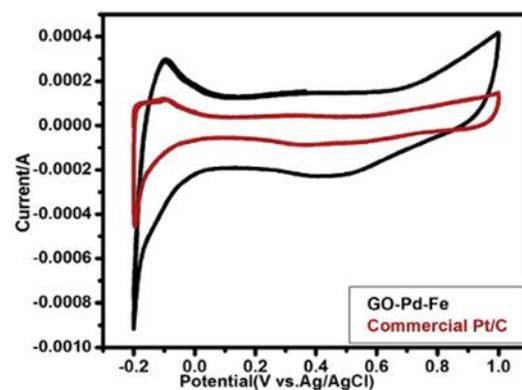
Gambar 3. (a) Skema pengujian, (b) Proses pengujian.

4. Hasil dan Pembahasan

Setelah proses sintesis katalis $\text{Pt.TiO}_2/\text{VC-rGO}$ selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah mengumpulkan data dengan melakukan pengujian CV. Data yang diperoleh dalam pengujian nantinya dapat diolah pada excel maupun aplikasi pengolah data lainnya.



Gambar 4. Hasil kurva uji CV



Gambar 5. Bentuk Kurva Hasil pengujian CV yang seharusnya [18]

Seperti yang terlihat pada Gambar 4 hasil kurva dari uji CV, menunjukkan pada variasi pertama, kedua dan ketiga tidak

ditemukannya puncak potensial anodik dan katodik. Jika mengacu pada Gambar 5 yang merupakan bentuk seharusnya dari kurva hasil pengujian CV, terlihat bentuk kurva yang melengkung menunjukkan adanya puncak potensial anodik dan katodik yang artinya bahwa proses pengujian dan pembacaan datanya berlangsung sebagaimana mestinya. Namun dari ketiga variasi yang telah diujikan variasi ketiga menunjukkan hasil yang baik dikarenakan mempunyai rentang potensial anodik dan katodik yang lebar dibandingkan dengan variasi yang lain. Pada ketiga variasi mengeluarkan arus μA .

Ketiga variasi tersebut tidak adanya puncak potensial anodik dan katodik bisa disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya persiapan elektroda yang kurang baik atau elektroda yang digunakan telah terkontaminasi. Larutan elektrolit juga dapat menjadi faktor yang menyebabkan kegagalan dalam pengujian, elektrolit yang digunakan harus stabil dan tidak tercemar untuk memastikan respon pada voltameteri yang konsisten.

5. Kesimpulan

Setelah serangkaian prosedur penelitian yang dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil adalah ketiga variasi tidak menunjukkan adanya hubungan tegangan arus-listrik yang dihasilkan. Ketiga variasi tidak menunjukkan adanya puncak saat dilakukan pengujian CV. Kegagalan dalam pembacaan data dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti elektroda sampel yang terkontaminasi, dan kurangnya kestabilan elektrolit sehingga menyebabkan terjadi kegagalan mengintrepetasikan data. Namun pada variasi ketiga merupakan hasil yang baik dikarenakan memiliki rentang reaksi reduksi dan oksidasi yang lebar.

6. Daftar Pustaka

- [1] Hasan, M. S., & Widayat, W. (2022). **Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia.** *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), 38-48.
- [2] Padang, Y. A., Mirmanto, M. M., Syahrul, S. S., Sinarep, S. S., & Pandiatmi, P. P. (2020). **Pemanfaatan energi alternatif dan terbarukan.** *Jurnal Karya Pengabdian*, 2(2), 77-84.
- [3] Zhang, G., Xie, X., Xie, B., Du, Q., & Jiao, K. (2019). **Large-scale multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell.** *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 555-563.
- [4] Rath, R., Kumar, P., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2019). **Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors.** *International Journal of Energy Research*, 43(15), 8931-8955.
- [5] Vikrant, Kumar, dkk. (2021). **Titanium dioksida (Pt/TiO₂) yang diplatinisasi sebagai katalis multi-fungsi untuk termokatalisis, fotokatalisis, dan katalisis fototerma untuk menghilangkan polutan udara.** *Materi Terapan Hari Ini* 23 (2021): 100993.
- [6] Rachman, B. A., Noerochim, L., & Purniawan, A. (2021). **Analisis Pengaruh Variasi Tekanan Hot Press Decal Transfer terhadap Morfologi Membrane Electrode Assembly dan Performa Elektrokimia PEM Fuel Cell.** *Jurnal Teknik ITS*, 10(2), B92-B97.
- [7] Chen, Y., Jian, Q., Huang, Z., Zhao, J., Bai, X., & Li, D. (2021). **Improvement of thermal management of proton exchange membrane fuel cell stack used for portable devices by integrating the ultrathin vapor chamber.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(74), 36995-37006.
- [8] Naik, Keerti M., Eiji Higuchi, dan Hiroshi Inoue. (2020). **Nanopartikel Pt yang didukung lembaran nano TiO₂ yang kekurangan oksigen dua dimensi sebagai katalis tahan lama untuk reaksi reduksi oksigen dalam sel bahan bakar membran penukar proton.** *Jurnal Sumber Daya* 455: 227972.
- [9] Rahman, M. M., Inaba, K., Batnyagt, G., Saikawa, M., Kato, Y., Awata, R., ... & Takeguchi, T. (2021). **Synthesis of catalysts with fine platinum particles supported by high-surface-area activated carbons and optimization of their catalytic activities for polymer electrolyte fuel cells.** *RSC advances*, 11(33), 20601-20611.
- [10] Apandi, N. M., Zailani, W. W. A., Izwan, K. N. K., Zakaria, M., & Zulkarnain, N. N. (2024). **Graphene oxide as carbon-based materials: A review of geopolymer with addition of graphene oxide towards sustainable construction materials.** *Construction and Building Materials*, 411, 134410.

- [11] Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). **Fuel cell application in the automotive industry and future perspective.** *Energy*, 214, 118955.
- [12] Okonkwo, P. C., Belgacem, I. B., Emori, W., & Uzoma, P. C. (2021). **Nafion degradation mechanisms in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system: A review.** *International journal of hydrogen energy*, 46(55), 27956-27973.
- [13] Nascimento, J. R., D'Oliveira, M. R., Veiga, A. G., Chagas, C. A., & Schmal, M. (2020). **Synthesis of reduced graphene oxide as a support for nano copper and palladium/copper catalysts for selective NO reduction by CO.** *ACS omega*, 5(40), 25568-25581.
- [14] Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., ... & Tour, J. M. (2010). **Improved synthesis of graphene oxide.** *ACS nano*, 4(8), 4806-4814.
- [15] Syuhada, N. (2023). **Fabrikasi dan Uji Luas Permukaan Material Microsphere-Nanorod Titanium Dioksida.** *SPIN JURNAL KIMIA & PENDIDIKAN KIMIA*, 5(1), 146-155.
- [16] Hikmah, M., & Wahyuni, N. (2023). **Sintesis Fotokatalis TiO₂ untuk Degradasi Zat Warna Sintetis Metilen Biru dengan Bantuan Sinar Tampak.** *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3), 878-887.
- [17] Pandiarajan, M., & Rajendran, S. (2016). **Applications of Cyclic voltamme.** *Int J Nano Corr Sci and Engg*, 3(4), 166-180.
- [18] Dhali, Sunil, et al. **"Graphene oxide supported Pd-Fe nanohybrid as an efficient electrocatalyst for proton exchange membrane fuel cells."** *International Journal of Hydrogen Energy* 45.37 (2020): 18704-18715..

	<p>Dewa Made Dwi Adnyana Putra menyelesaikan studi S1 pada tahun 2024 Universitas Udayana Bali dengan program studi Teknik Mesin.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi mengenai pengembangan katalis dari Proton Exchange Membrane Fuel Cell</p>	

	<p>Made Sucipta menyelesaikan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya pada tahun 1998. S2 di Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya 2001. Serta S3 di Shibaura Institute of Technology, Jepang 2007, dan Profesi di Universitas Udayana, Bali tahun 20020.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan <i>fuel cell</i>, penyimpanan energi, dan <i>green energy</i>. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.</p>	

	<p>I Made Joni menyelesaikan studi program S1 di Universitas Padjadjaran tahun 1998. S2 di Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India tahun 2000. Dan S3 di Hiroshima University Japan pada tahun 2011.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah teknologi nano partikel dan perkembangan baterai Saat ini beliau bekerja pada Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran.</p>	

	<p>Made Suarda menyelesaikan studi S1 tahun 1989 program studi Teknik Permesinan Kapal di Universitas ITS Surabaya, Jawa Timur. Kemudian menyelesaikan studi S2 tahun 2004 program studi Advanced Manufacturing Technology di University of South Australia.</p>
<p>Bidang penelitian yang diminati adalah mengenai modelling dan simulasi planar mechanism using bondgraph. Analisis dinamika fluida pada pompa. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.</p>	



Ketut Astawa menempuh studi S1 tahun 1996 program studi Teknik Mesin di Universitas Udayana, Bali. Kemudian menyelesaikan studi S2 program studi teknik mesin tahun 2006 di Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur.

Bidang penelitian yang diminati adalah konversi energi meliputi perencanaan ketel uap serta topik mengenai kolektor surya. Saat ini beliau bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana.

Pengaruh Penambahan Biodiesel Pada Pertamina Dex Terhadap Nilai Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Mesin Genset Diesel 3000 Watt

Dino Suryadi Munthe, I Gusti Bagus Wijaya Kusuma dan Ketut Asatawa
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Penggunaan teknologi di era kini memerlukan sumber energi untuk pengoperasiannya, salah satunya adalah dengan minyak bumi. Bahan bakar diesel atau lebih dikenal solar di Indonesia tergolong bahan bakar paling banyak digunakan. Pentingnya keberadaan bahan bakar solar serta menipisnya persediaan minyak bumi, pemerintah Indonesia telah mengambil tindakan dengan memanfaatkan bahan bakar nabati atau biodiesel yang dicampur dengan solar. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis bagaimana pengaruh penambahan bahan bakar biodiesel dengan Pertamina Dex pada perubahan nilai konsumsi spesifik mesin genset diesel 3000 Watt. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen berupa pengujian dan analisis karakter fisik pada variasi bahan bakar dan pengaruh penambahan biodiesel pada Pertamina Dex pada unjuk kerja mesin genset diesel yaitu daya yang dihasilkan, konsumsi bahan bakar setiap detik, dan konsumsi bahan bakar spesifik. Variasi penambahan biodiesel yang digunakan ialah B5, B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, dan B50 serta dextrite sebagai pembanding. Hasil dari penelitian pada variasi penambahan biodiesel pada Pertamina Dex, B5 menghasilkan nilai konsumsi bahan bakar paling rendah yakni 0.181 Kg/kWh pada pembebanan 3000 Watt dan B50 menghasilkan nilai paling tinggi yakni 0.205 Kg/kWh pada pembebanan 3000 Watt. Setiap variasi penambahan biodiesel pada Pertamina Dex dari lima persen hingga lima puluh persen mengalami peningkatan nilai konsumsi bahan bakar spesifik. Penambahan biodiesel pada Pertamina Dex menaikkan nilai massa jenis bahan bakar. Perubahan kerapatan bahan bakar meningkatkan flash point dan fire point sehingga proses pembakaran pada mesin genset diesel melambat. Konsumsi bahan bakar spesifik pada mesin genset diesel semakin meningkat seiring penambahan jumlah biodiesel yang digunakan.

Kata kunci: Konsumsi bahan bakar spesifik, biodiesel, minyak jelantah, mesin genset diesel

Abstract

The use of technology in today's era requires an energy source for its operation, one of which is petroleum. Diesel fuel or better known as diesel in Indonesia is classified as the most widely used fuel. The importance of the existence of diesel fuel and the depletion of petroleum supplies, the Indonesian government has taken action by utilizing biofuel or biodiesel mixed with diesel. This study was conducted with the aim of analyzing the effect of adding biodiesel fuel with Pertamina Dex on changes in the specific consumption value of 3000 Watt diesel generator engines. This study uses an experimental method in the form of testing and analyzing physical characteristics on fuel variations and the effect of adding biodiesel to Pertamina Dex on the performance of diesel generator engines, namely the power produced, fuel consumption per second, and specific fuel consumption. The variations of biodiesel added used are B5, B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, and B50 as well as dextrite as a comparator. The results of the study on the variation of biodiesel addition in Pertamina Dex, B5 produced the lowest fuel consumption value of 0.181 Kg/kWh at 3000 Watt loading and B50 produced the highest value of 0.205 Kg/kWh at 3000 Watt loading. Each variation of the addition of biodiesel to Pertamina Dex from five percent to fifty percent has experienced an increase in the value of specific fuel consumption. The addition of biodiesel to Pertamina Dex increases the fuel density value. Changes in fuel density increase flash point and fire point so that the combustion process in diesel generator engines slows down. Specific fuel consumption in diesel generator engines is increasing as the amount of biodiesel used increases.

Keywords: Specific fuel consumption, biodiesel, used cooking oil, diesel generator engine

1. Pendahuluan

Mengingat kemajuan teknologi, tingginya konsumsi minyak bumi setiap tahun menyebabkan persediaan bahan bakar minyak menipis, dan harga minyak bumi terus naik. Minyak bumi adalah minyak mentah diolah kembali melalui proses destilasi untuk menghasilkan berbagai jenis bahan bakar minyak seperti solar, minyak tanah, dan bensin. Bahan bakar diesel atau lebih dikenal solar di Indonesia tergolong bahan bakar yang cukup banyak digunakan. Solar digunakan sebagai bahan bakar pada alat transportasi, alat berat, alat pertanian, perindustrian hingga

pembangkit listrik. Pentingnya keberadaan bahan bakar solar serta menipisnya persediaan minyak bumi, pemerintah Indonesia telah melakukan berbagai upaya. Pada keputusan Menteri ESDM nomor 295.K/EK.01/MEM.E/2022 tentang pengelolaan bahan bakar biodiesel dari nabati sebagai campuran bahan bakar minyak jenis solar (KemenESDM RI, 2023). Biodiesel dapat dibuat menggunakan minyak nabati ataupun hewani sehingga terbaharukan. Biodiesel lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan solar karena menghasilkan gas buang lebih bersih dan sedikit..

Dalam pengembangan bahan bakar biodiesel pemerintah meluncurkan jenis bahan bakar campuran yakni dextrite (B20) dan biosolar (B35). Biodiesel yang dicampurkan pada dextrite dan biosolar berasal dari minyak kelapa sawit dan kedelai. Penggunaan biodiesel mempengaruhi proses atomisasi bahan bakar pada ruang pembakaran karena nilai viskositas lebih tinggi dua puluh kali dibanding bahan bakar diesel fosil (Devita et al., 2015). Biodiesel dan solar memiliki sifat kimia dan fisika yang mirip sehingga dapat digunakan secara langsung ataupun dicampur tanpa perlu adanya modifikasi pada mesin diesel (Djamin & Soni S. Wirawan, 2010).

Minyak jelantah, salah satu bahan pembuatan biodiesel yang memiliki potensi besar mengingat tingginya konsumsi minyak goreng di Indonesia. Penulis tertarik melakukan penelitian untuk menguji minyak jelantah sebagai bahan bakar biodiesel. Minyak jelantah adalah minyak sisa penggorengan. Menurut penelitian Setyawardhani et al., (2008) minyak jelantah dari sisa penggorengan mengandung senyawa karsinogenik (zat yang dapat menyebabkan kanker) yang tidak boleh dikonsumsi. Selain itu, limbah minyak jelantah masih dibuang secara tidak patuh, yang dapat menyebabkan pencemaran, merusak ekosistem perairan dan kesuburan tanah. (Erna et al., 2017). Dengan adanya biodiesel terbaharukan dari minyak jelantah, tentu akan mengurangi penggunaan solar di Indonesia. Berdasarkan data Kementerian ESDM pembuatan minyak jelantah menjadi biodiesel mencapai tiga juta kilo liter. Minyak jelantah yang rendah kualitasnya sudah menjadi limbah yang tidak digunakan lagi dan mengandung trigliserida dan asam lemak bebas. Minyak jelantah juga memiliki sifat yang mirip dengan minyak kelapa (Prasetyo, 2018).

Dari latar belakang diatas, penulis ingin menguji variasi kadar campuran pertamina dex dengan biodiesel yang diolah dari bahan baku minyak jelantah. Penulis juga membandingkan penggunaan biodiesel dari minyak jelantah pada pertamina dex dengan dextrite. Pada penelitian ini penulis melakukan pengujian waktu konsumsi dua ml bahan bakar, torsi, dan daya pada mesin genset diesel 3000 Watt, sehingga dapat menghitung nilai SFC (*Specific Fuel Consumption*) mesin tersebut.

Tujuan penelitian ini diharapkan dapat menambah pemahaman dan pengalaman bagi penulis maupun pembaca mengenai pengaruh penambahan bahan bakar biodiesel pada pertamina dex untuk nilai konsumsi bahan bakar mesin genset diesel dan dapat menghasilkan bahan bakar dengan memanfaatkan minyak jelantah yang mampu menyaingi bahan bakar dextrite.

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya fokus pada nilai konsumsi bahan bakar spesifik mesin genset.

2. Pengujian dilakukan pada mesin genset diesel berkapasitas 3000 Watt.
3. Pengujian menggunakan pertamina dex yang diproduksi pertamina dan biodiesel dinuat sendiri serta dextrite sebagai pembanding.

2. Dasar Teori

2.1 Biodiesel

Biodiesel adalah bahan bakar yang dihasilkan dari minyak nabati dan lemak hewan. Contohnya adalah minyak kelapa sawit, kedelai, dan bahan alami lainnya. Karena sifatnya yang terbaharukan, biodiesel sangat baik untuk dikembangkan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar diesel. Gas buang yang dihasilkan dari penggunaan biodiesel lebih ramah lingkungan karena bebas sulfur, bilangan asap (*smoke number*) yang rendah. Selain itu, komponen utama solar adalah hidrokarbon, biodiesel termasuk dalam kategori monoalkil ester atau metil ester secara kimiawi (Devita et al., 2015). Biodiesel dibuat melalui reaksi kimia antara minyak nabati dengan alkohol, kemudian dibantu katalis seperti natrium atau kalium hidroksida (Pertamina, 2023). Transesterifikasi adalah reaksi yang menggabungkan senyawa ester dan alkohol dengan katalisator untuk menghasilkan biodiesel. Dikarenakan alkohol larut dalam minyak, maka diperlukan katalisator seperti, natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dengan sifat basa kuat.

2.2 Minyak Jelantah

Minyak jelantah berasal minyak goreng yang telah digunakan. Proses pembuatan minyak goreng menggunakan bahan baku yang beragam diantaranya kelapa sawit, kelapa, dan jagung. Di Indonesia minyak goreng yang paling banyak digunakan terbuat dari kelapa sawit. Menurut studi (Rukmini, 2007) Ketika minyak jelantah dibuang sembarangan, kadar COD (Chemical Oxygen Demand) dan BOD (Biology Oxygen Demand) meningkat dalam perairan, yang meningkatkan risiko pencemaran lingkungan. Selain itu minyak jelantah tidak baik dikonsumsi karena dapat menyebabkan kanker dan tekanan darah tinggi. Proses penggorengan menyebabkan dekomposisi asam lemak sehingga minyak tersebut tidak layak digunakan (Megawati & Muhartono, 2019). Proses pembuatan minyak jelantah menjadi biodiesel yakni, sebanyak 3liter disaring kemudian dilarutkan dengan methanol sebanyak 900 ml, aduk selama 15 menit agar tercampur rata. Setelah itu, larutan dipanasin hingga 60 °C dan diaduk selama 90 menit (Busyairi et al., 2020).

2.3 Mesin Diesel

Mesin diesel adalah mesin pembakaran dalam yang menciptakan pembakaran dengan memanfaatkan tekanan kompresi. Berbeda dengan

pembakaran mesin bensin, proses pembakaran mesin diesel tidak melibatkan pemantik. Dengan rasio kompresi lebih besar menghasilkan panas sebagai pemicu terjadinya pembakaran. Siklus mesin diesel diawali dengan pemasukan udara ke dalam mesin, kemudian terjadi langkah kompresi. Setelah itu, kalor disemprotkan pada tekanan konstan dan terjadi pembakaran atau langkah ekspansi dan diakhir kalor dikeluarkan. Mesin diesel diciptakan oleh Rudolf Diesel untuk menciptakan siklus ideal diesel dan menerima paten di tahun 1893.

Salah satu aspek penting yang dihasilkan mesin genset diesel adalah daya. Daya adalah besarnya tenaga yang dihasilkan persatuan waktu. Besarnya daya yang dihasilkan dapat di tentukan

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

dengan rumus:

Keterangan:

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

Berikutnya adalah konsumsi bahan bakar. Untuk menghasilkan daya, mesin genset mengkonsumsi sejumlah bahan bakar setiap detik. Berikut rumus untuk menentukan nilai konsumsi

$$\dot{v} = \frac{V}{t} \quad (2)$$

bahan bakar:

Keterangan:

\dot{v} = Laju volume bahan bakar (ml/dt)

v = Volume bahan bakar (ml)

t = Waktu (detik)

$$\dot{m}_f = \dot{v} \times \rho \quad (3)$$

Keterangan:

\dot{m}_f = Laju konsumsi bahan bakar (gr/dt)

ρ = Densitas bahan bakar (g/mm³)

Diakhir dapat ditentukan konsumsi bahan bakar spesifik. Rumus untuk menentukan nilai konsumsi bahan bakar spesifik adalah berikut:

Keterangan:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \times \frac{3600}{1000} \quad (4)$$

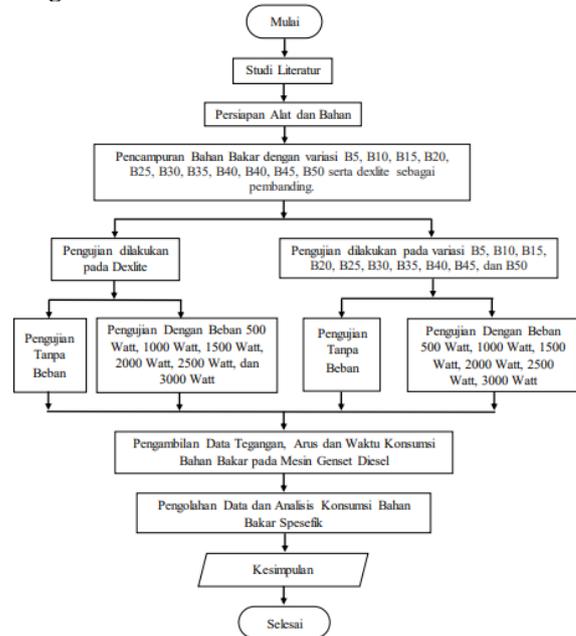
SFC = Besarnya konsumsi bahan bakar spesifik (kg/kWh)

P = Daya (kW)

3. Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah penelitian eksperimental untuk mengetahui pengaruh penambahan bahan bakar biodiesel pada pertamina dex terhadap nilai konsumsi spesifik mesin genset diesel 3000 Watt.

3.1 Diagram Alir



Gambar 1. Diagram alir

3.2 Alat

- Genset diesel yang digunakan untuk penelitian dengan spesifikasi sebagai berikut; Output maksimum 3000 Watt (3,75 kva); Rated output 2700 Watt (3 kva); 220 Volt; Type mesin 178F (3,68kw); Starting electric dan recoil (double starter); Bahan bakar solar; Fuel tank capacity 10 liter; Oil capacity 1,1 liter; Speed (rpm/min) 3000/3600; Dimension 0,71m × 0,59m × 0,62m.



Gambar 2. Mesin genset

- Sprit berfungsi sebagai tempat penyimpanan dan pengukuran bahan bakar yang digunakan untuk pengujian
- Penyangga sprit berfungsi sebagai penyangga agar sprit tetap dalam kondisi normal dan tidak goyah.
- Selang bahan bakar berfungsi sebagai penghubung dari tangki ke tempat penampungan bahan bakar.
- Lampu LED berfungsi sebagai pembebanan bagi mesin genset diesel ketika pengujian dilakukan.
- Stop kontak berfungsi untuk menghubungkan lampu LED dengan mesin genset diesel ketika pelaksanaan pengujian.

- g. *Stopwatch* berfungsi untuk mengukur waktu yang dibutuhkan dalam pengujian dua mililiter bahan bakar pada mesin genset diesel.
- h. Gelas ukur berfungsi sebagai tempat mengukur volume penggunaan minyak tanah pada biodiesel.
- i. Spatula kaca berfungsi untuk mengaduk bahan bakar yang dicampur agar menjadi larutan homogen.

3.3 Bahan

- a. Biodiesel
Biodiesel yang digunakan berbahan baku minyak jelantah.
- b. Pertamina Dex
Pada penelitian ini menggunakan bahan pertamina dex yang diproduksi pertamina.

3.4 Prosedur Pengujian

Pengujian pada mesin genset diesel dilakukan menggunakan 10 variasi persentasi komposisi pencampuran bahan bakar pertamina dex dan biodiesel yakni, B5 (5% biodiesel + 95% pertamina dex), B10 (10% biodiesel + 90% pertamina dex), B15 (15% biodiesel + 85% pertamina dex), B20 (20% biodiesel + 80% pertamina dex), B25 (25% biodiesel + 75% pertamina dex), B30 (30% biodiesel + 70% pertamina dex), B35 (35% biodiesel + 65% pertamina dex), B40 (40% biodiesel + 60% pertamina dex), B45 (45% biodiesel + 55% pertamina dex), B50 (50% biodiesel + 50% pertamina dex). Sementara itu, pembebanan yang diberikan dalam pengujian ini juga bervariasi yakni mulai dari tanpa pembebanan, 500 Watt, 1000 Watt, 1500 Watt, 2000 Watt, 2500 Watt, sampai 3000 Watt. Proses pengujian dimulai dengan mencampur bahan bakar sesuai variasi. Masukkan bahan bakar ke dalam spuit yang terhubung ke selang bahan bakar, lalu nyalakan mesin genset. Hubungkan lampu LED pada mesin genset sebagai beban. Hitung lama waktu konsumsi dua mililiter bahan bakar pada mesin genset. Setia percobaan dilakukan berulang tiga kali.

3.5 Prosedur Pembuatan Biodesel

Langkah pertama adalah pemurnian, minyak jelantah dituang ke dalam wadah lalu disaring untuk memisahkan kotoran yang mengendap. Kemudian, tiga liter minyak jelantah dipanaskan menggunakan kompor hingga mencapai suhu 60°C. Metanol dicampurkan perlahan kedalam wadah pemanas sebanyak 900 ml. Setelah tercampur merata dan mencapai suhu 60°C, tuangkan ke wadah lain agar lebih cepat dingin. Setelah dingin biodiesel siap untuk digunakan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karakteristik Bahan Bakar

Dari pengujian diperoleh data *flash point*, *fire point* dan densitas bahan bakar sebagai berikut:

Tabel 1. Karakteristik bahan bakar

Bahan Bakar	Flash (°C)	Point	Fire (°C)	Point	Densitas (gr/ml)
B5	41.2		61.1		0.83
B10	42.6		62.8		0.83
B15	43.4		63.2		0.84
B20	44.5		64.5		0.84
B25	45.3		66.8		0.84
B30	45.6		72.3		0.85
B35	46		74.4		0.85
B40	46.9		75.2		0.85
B45	47.7		76.9		0.86
B50	48.5		77.3		0.86
Biodiesel	90.5		120.2		0.89
Pertamina Dex	38.7		57.6		0.82
Dexlite	45.1		65.9		0.84

Jika dilihat pada grafik *flash point* dan *fire point* serta densitas, petamina dex memiliki nilai densitas, *flash point* dan *fire point* paling rendah dan biodiesel memiliki nilai densitas, *flash poin* dan *fire point* paling tinggi. Pada penambahan variasi penambahan biodiesel pada pertamina dex terjadi peningkatan nilai densitas, *flash point* dan *fire point* bahan bakar.

4.2. Tegangan Dan Kuat Arus Mesin Genset

Tabel 2. Data tegangan dan kuat arus

	Tegangan (V) dan Arus (I)													
	Tanpa Beban		500 W		1000 W		1500 W		2000 W		2500 W		3000 W	
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
B5	220	0.57	220	2.64	220	5.80	220	8.23	220	11.81	220	14.69	220	17.58
B10	220	0.50	220	2.49	220	5.61	220	7.87	220	11.25	220	14.21	220	16.62
B15	219	0.45	219	2.42	219	5.43	219	7.46	219	10.86	219	13.30	219	15.61
B20	219	0.41	219	2.35	219	5.26	219	7.03	219	10.19	219	12.65	219	14.61
B25	219	0.37	219	2.26	219	5.02	219	6.65	219	9.54	219	12.03	219	13.59
B30	218	0.32	218	2.20	218	4.85	218	6.42	218	9.07	218	11.48	218	13.08
B35	218	0.29	218	2.12	218	4.62	218	6.01	218	8.62	218	10.91	218	12.31
B40	218	0.27	218	2.03	218	4.48	218	5.59	218	8.21	218	10.46	218	11.44
B45	217	0.27	217	1.94	217	4.24	217	5.36	217	7.84	217	10.02	217	10.86
B50	217	0.26	217	1.86	217	4.06	217	4.98	217	7.49	217	9.48	217	10.41
Biodiesel	216	0.21	216	1.70	216	3.68	216	4.18	216	6.96	216	9.45	216	9.71
Pertamina Dex	225	0.72	225	3.09	225	6.36	225	8.38	225	12.23	225	15.12	225	17.99
Dexlite	218	0.36	218	2.29	218	4.87	218	6.31	218	9.23	218	11.53	218	13.12

4.3. Waktu Konsumsi Bahan Bakar Mesin Genset

Tabel 3. Data waktu konsumsi bahan bakar

	Tanpa	500	1000	1500	2000	2500	3000
	Beban	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt
B5	14.03	13.85	12.04	10.83	10.06	9.38	8.49
B10	14.48	14.22	12.46	11.28	10.42	9.65	8.96
B15	15.04	14.34	13.06	11.84	11.04	10.25	9.55
B20	15.64	14.45	13.64	12.48	11.55	10.74	10.15
B25	16.09	14.95	14.28	13.09	12.26	11.22	10.77
B30	16.53	15.44	14.79	13.54	12.79	11.74	11.23

4.4 Daya Mesin Genset

Setelah memperoleh data tegangan dan arus dari pengujian bahan bakar pada mesin genset diesel selanjutnya dapat dilakukan penghitungan daya yang dihasilkan mesin genset menggunakan persamaan (1):

$$P = V \cdot I$$

$$P = 220 \cdot 0,57$$

$$P = 125,4 \text{ Watt}$$

Persamaan tersebut digunakan pada penghitungan data tegangan dan arus lainnya. Sehingga, data daya yang dihasilkan mesin genset dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 4. Data daya

	Tanpa	500	1000	1500	2000	2500	3000
	Beban	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt
B5	125.4	580.8	1276	1810.6	2598.2	3231.8	3867.6
B10	110	547.8	1234.2	1731.4	2475	3126.2	3656.4
B15	98.5	529.9	1189.1	1633.7	2378.3	2912.7	3434.2
B20	89.7	514.6	1151.9	1539.5	2231.6	2770.3	3199.5
B25	81	494.9	1099.3	1456.3	2089.2	2634.5	2976.2
B30	69.7	479.6	1057.3	1399.5	1977.2	2502.6	2851.4
B35	63.2	462.1	1007.1	1310.1	1879.1	2378.3	2683.5
B40	58.8	442.5	976.6	1218.6	1789.7	2280.2	2493.9
B45	58.5	420.9	920	1163.1	1701.2	2174.3	2356.6
B50	56.4	403.6	881	1050.2	1625.3	2057.1	2258.9
Biodiesel	45.3	367.2	794.8	902.8	1503.3	2041.2	2229.1
Pertamina Dex	162	695.2	1431	1885.5	2751.7	3402	4047.7
Dexlite	78	499.2	1061.6	1375.5	2012.1	2513.5	2860.1

4.5 Laju Volume Bahan Bakar Mesin Genset

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada data daya mesin genset. Selanjutnya dapat dihitung laju aliran volume bahan bakar menggunakan persamaan (2).

$$\dot{v} = \frac{V}{t}$$

$$\dot{v} = \frac{2\text{ml}}{14,03}$$

$$\dot{v} = 0,142 \frac{\text{ml}}{\text{dt}}$$

B35	17.05	15.92	15.23	14.02	13.20	12.24	11.74
B40	17.56	16.42	15.72	14.45	13.73	12.72	12.27
B45	18.06	16.92	16.23	14.92	14.22	13.31	12.74
B50	18.65	17.60	16.88	15.45	14.76	13.87	13.23
Biodiesel	20.03	18.44	17.98	16.45	15.72	14.77	14.20
Pertamina Dex	14.01	13.78	11.99	10.77	10.01	9.27	8.44
Dexlite	16.63	15.63	14.63	13.77	12.72	11.66	11.27

Persamaan ini digunakan kembali pada data hasil konsumsi bahan bakar lainnya. Data hasil laju volume bahan bakar dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 5. Data laju volume bahan bakar

$$\dot{m}_f = \dot{v} \times \rho$$

$$\dot{m}_f = 0,142 \times 0,83$$

$$\dot{m}_f = 0,117 \frac{\text{gr}}{\text{dt}}$$

	Tanpa	500	1000	1500	2000	2500	3000
	Beban	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt
B5	0.142	0.144	0.166	0.184	0.198	0.213	0.235
B10	0.138	0.140	0.160	0.177	0.191	0.207	0.223
B15	0.132	0.139	0.153	0.168	0.181	0.195	0.209
B20	0.127	0.138	0.146	0.160	0.173	0.186	0.197
B25	0.124	0.133	0.140	0.152	0.163	0.178	0.185
B30	0.120	0.129	0.135	0.147	0.156	0.170	0.178
B35	0.117	0.125	0.131	0.142	0.151	0.163	0.170
B40	0.113	0.121	0.127	0.138	0.145	0.157	0.162
B45	0.110	0.118	0.123	0.134	0.140	0.150	0.156
B50	0.107	0.113	0.118	0.129	0.135	0.144	0.151
Biodiesel	0.099	0.108	0.111	0.121	0.127	0.135	0.140
Pertamina Dex	0.142	0.145	0.166	0.185	0.199	0.215	0.236

4.6 Laju Konsumsi Bahan Bakar Mesin Genset

Data laju konsumsi bahan bakar diperoleh dengan menggunakan konversi data dari Tabel 1 dan data Tabel 5, maka penghitungan laju konsumsi bahan bakar menggunakan persamaan (3).

Persamaan di atas digunakan pada data lainnya. Data hasil penghitungan laju aliran konsumsi bahan bakar dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 6. Data laju konsumsi bahan bakar

	Tanpa Beban	500 Watt	1000 Watt	1500 Watt	2000 Watt	2500 Watt	3000 Watt
B5	0.117	0.119	0.137	0.152	0.164	0.176	0.195
B10	0.114	0.116	0.132	0.146	0.158	0.171	0.185
B15	0.110	0.116	0.128	0.141	0.152	0.163	0.175
B20	0.106	0.115	0.122	0.134	0.145	0.156	0.165
B25	0.104	0.111	0.117	0.127	0.136	0.149	0.155
B30	0.102	0.109	0.114	0.124	0.132	0.144	0.151
B35	0.099	0.106	0.111	0.120	0.128	0.138	0.144
B40	0.096	0.102	0.107	0.117	0.123	0.133	0.137
B45	0.094	0.101	0.105	0.115	0.120	0.129	0.134
B50	0.092	0.097	0.101	0.110	0.116	0.123	0.129
Biodiesel	0.088	0.096	0.098	0.107	0.113	0.120	0.124
Pertamina Dex	0.116	0.118	0.136	0.151	0.163	0.176	0.193
Dexlite	0.100	0.106	0.114	0.121	0.131	0.143	0.148

4.7 Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Mesin Genset

Nilai laju konsumsi bahan bakar spesifik dapat dihitung menggunakan data pada Tabel 4 dan data pada Tabel 6, lalu penghitungan menggunakan persamaan (4):

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \times \frac{3600}{1000}$$

$$SFC = \frac{0,117}{0,1254} \times \frac{3600}{1000}$$

$$SFC = 3,358 \text{ Kg/kWh}$$

Berikut adalah data hasil perhitungan konsumsi bahan bakar spesifik.

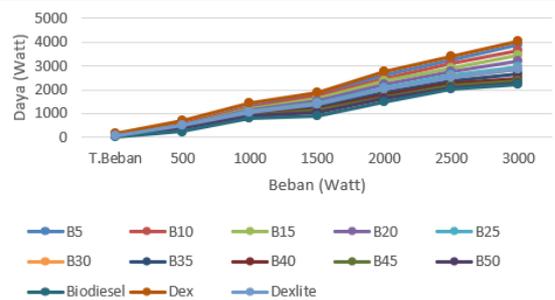
Tabel 7. Data Konsumsi Bahan Bakar Spesifik

	Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (Kg/kWh)						
	Tanpa Beban	500 Watt	1000 Watt	1500 Watt	2000 Watt	2500 Watt	3000 Watt
B5	3.358	0.737	0.386	0.302	0.227	0.196	0.181
B10	3.730	0.762	0.385	0.303	0.229	0.200	0.182
B15	4.020	0.788	0.387	0.310	0.230	0.201	0.183
B20	4.254	0.804	0.381	0.313	0.233	0.202	0.185
B25	4.622	0.807	0.383	0.313	0.234	0.203	0.187
B30	5.268	0.818	0.388	0.318	0.240	0.207	0.190
B35	5.639	0.825	0.396	0.329	0.245	0.208	0.193
B40	5.877	0.829	0.394	0.345	0.247	0.209	0.197
B45	5.784	0.863	0.410	0.355	0.253	0.213	0.204
B50	5.872	0.865	0.412	0.366	0.256	0.215	0.205
Biodiesel	6.993	0.941	0.443	0.426	0.270	0.211	0.212
Pertamina Dex	2.577	0.611	0.342	0.288	0.213	0.186	0.171
Dexlite	4.591	0.764	0.386	0.316	0.234	0.204	0.186

4.8 Pembahasan

Berdasarkan pengujian penambahan bahan bakar pertamina dex pada biodiesel (minyak jelantah)

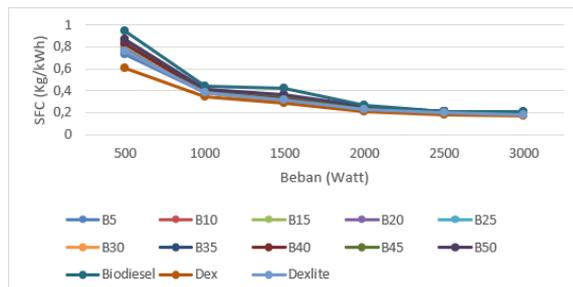
serta dexlite sebagai pembanding pada mesin genset diesel FAW-VW Tsuzumi Japan dengan output maksimum 3000 Watt. Pada Tabel 3, dapat dilihat perbandingan waktu konsumsi bahan bakar pertamina dex, biodiesel, dexlite, dan variasi penambahan biodiesel pada pertamina dex. Pertamina dex merupakan bahan bakar paling boros dimana menghabiskan 2 ml bahan bakar pada mesin genset dalam waktu 8,44 detik pada pembebanan 3000 Watt. Biodiesel adalah bahan bakar paling irit dimana menghabiskan 2 ml bahan bakar dalam waktu 14,20 detik pada pembebanan 3000 Watt. Pada variasi penambahan biodiesel pada pertamina dex, setiap penambahan lima persen biodiesel pada pertamina dex menyebabkan waktu konsumsi 2 ml bahan bakar semakin besar pada mesin genset. Hal ini berarti bahwa, penambahan biodiesel pada pertamina dex membuat bahan bakar semakin irit dikarenakan ketika biodiesel dicampur dengan pertamina dex maka densitas (massa jenis) bahan bakar akan semakin besar. Karena kerapatan bahan bakar meningkat sehingga *flash point* dan *fire point* bahan bakar juga semakin tinggi sehingga proses pembakaran pada mesin kurang sempurna.



Gambar 3. Grafik daya

Pada Tabel 4, dapat dilihat data daya yang dihasilkan mesin genset pada penggunaan bahan bakar pertamina dex, biodiesel, dexlite, dan variasi penambahan biodiesel pada pertamina dex. Penggunaan bahan bakar pertamina dex menghasilkan daya sebesar 4047,7Watt pada pembebanan tinggi yakni 3000 Watt. Nilai ini lebih besar dari nilai daya yang dihasilkan dexlite, biodiesel dan seluruh variasi campuran bahan bakar biodiesel dan pertamina dex. Biodiesel menghasilkan daya paling tinggi sebesar 2229,1Watt dan dexlite menghasilkan daya paling tinggi 2860.1Watt pada pembebanan 3000 Watt. Pada variasi penambahan biodiesel pada pertamina dex, setiap penambahan lima persen biodiesel pada pertamina dex menyebabkan daya yang dihasilkan bahan bakar pada mesin genset menurun. Pada variasi B5 menghasilkan daya sebesar 3867,6Watt pada mesin genset. Penurunan nilai daya terjadi setiap tingkatan penambahan biodiesel pada pertamina dex sampai variasi B50 menghasilkan daya sebesar 2258,9Watt pada pembebanan 3000 Watt. Penurunan nilai daya yang dihasilkan setiap variasi penambahan biodiesel pada pertamina dex dari B5 hingga B50

diakibatkan perubahan densitas, flash point dan fire point bahan bakar setiap penambahan biodiesel.



Gambar 4. Grafik konsumsi bahan bakar spesifik Mesin Genset

Data di tabel 6 memperlihatkan bahwa pengujian konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) pada mesin genset tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada penggunaan bahan bakar Pertamina Dex, Biodiesel, Dexlite, dan variasi penambahan biodiesel pada Pertamina Dex. Penambahan beban pada genset menurunkan nilai bahan bakar yang digunakan. Pada pembebanan 3000 Watt, konsumsi bahan bakar spesifik pada Biodiesel paling tinggi yakni 0,212 Kg/kWh dan Pertamina Dex dengan nilai paling kecil yakni 0,171 Kg/kWh. Pada setiap variasi penambahan biodiesel pada Pertamina Dex, nilai konsumsi bahan bakar spesifik B5 paling kecil yakni 0,181 Kg/kWh pada pembebanan 3000 Watt, dan B50 paling besar yakni 0,205 Kg/kWh pada pembebanan 3000 Watt. Setiap penambahan biodiesel pada Pertamina Dex sebesar 5% hingga 50% meningkatkan konsumsi bahan bakar spesifik.

Sesuai penelitian yang dilakukan, variasi B25 memiliki performansi yang paling mirip dengan Dexlite yang di jual Pertamina. Dari keseluruhan variasi penambahan biodiesel pada Pertamina Dex menghasilkan nilai konsumsi bahan bakar spesifik dengan perubahan yang tidak jauh. Pemanfaatan minyak jelantah menjadi biodiesel sebagai campuran pada Pertamina Dex masih mampu menyaingi performansi konsumsi bahan bakar spesifik dari Dexlite yang di jual di Pertamina. Diantara sepuluh variasi penambahan biodiesel pada Pertamina Dex yang dibuat, B25 merupakan variasi yang memiliki nilai konsumsi bahan bakar spesifik dan memiliki nilai daya mirip dengan Dexlite.

5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dengan menambahkan biodiesel pada Pertamina Dex menurunkan densitas (massa jenis) bahan bakar. Perubahan kerapatan bahan bakar meningkatkan nilai flash point dan fire point bahan bakar yang mengakibatkan proses pembakaran pada mesin genset semakin melambat sehingga menghasilkan daya yang semakin kecil, begitu juga dengan nilai konsumsi bahan bakar semakin lambat. Semakin besar konsentrasi biodiesel yang digunakan maka nilai

konsumsi bahan bakar spesifik semakin meningkat pada mesin genset.

Daftar Pustaka

- [1] Busyairi, M., Muttaqin, A. Z., Meicahyanti, I., & Saryadi, S. (2020). *Potensi Minyak Jelantah Sebagai Biodiesel dan Pengaruh Katalis Serta Waktu Reaksi Terhadap Kualitas Biodiesel Melalui Proses Transesterifikasi*. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(2), 935–936. <https://doi.org/10.32672/jse.v5i2.1920>
- [2] Devita, Liza, (2015). *Biodiesel Sebagai Bionergi Alternatif dan Prospektif*. *Jurnal Agrica Ekstensia*, 9(2), 24-26.
- [3] Djamin, M., & Soni S. Wirawan. (2010). *Pengaruh Komposisi Biodiesel Terhadap Kinerja Mesin dan Emisi Gas Buang*. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 11(3), 381-387.
- [4] Erna, N., Sakti, W., Fakultas, W. P., Dan, M., Pengetahuan, I., Unnes, A., Sekaran, K., & Semarang, G. (2017). *Pengolahan Minyak Goreng Bekas (Jelantah) Sebagai Pengganti Bahan Bakar Minyak Tanah (Biofuel) Bagi Pedagang Gorengan di Sekitar FMIPA UNNES*. *REKAYASA: Jurnal Penerapan Teknologi Dan Pembelajaran*, 15(2), 89–90.
- [5] KemenESDM RI. (2023). *Direktorat Jenderal EBTKE - Kementerian ESDM*. Diakses pada 10 Maret 2023, dari <https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/01/18/3401/telah.terbit.keputusan.dirjen.ebtke.nomor.3.ke.k.05dje2023.tentang.pedoman.implementasi.pencampuran.bahan.bakar.nabati.jenis.biodiesel.ke.dalam.bahan.bakar>.
- [6] Megawati, M., & Muhartono. (2019). *Konsumsi Minyak Jelantah dan Pengaruhnya terhadap Kesehatan*. *Jurnal Majority*, 8(2), 259–264. <https://juke.kedokteran.unila.ac.id/index.php/majority/article/view/2481>
- [7] Pertamina. (2023, 16 April). *Pengertian Biodiesel*. Diakses pada 5 Mei 2023, dari https://onesolution.pertamina.com/Insight/Page/Pengertian_Biodiesel
- [8] Prasetyo, J. (2018). *Studi Pemanfaatan Minyak Jelantah Sebagai Bahan Baku Pembuatan Biodiesel*. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 2(2), 3–4. <https://doi.org/10.32493/jitk.v2i2.1679>
- [9] Rukmini, (2007) *Regenerasi Minyak Goreng Bekas Dengan Arang Sekam Menekan*

Kerusakan Organ Tubuh, Prosiding Seminar Nasional Teknologi, 455-459.

- [10] Setyawardhani, D. A., Martutik, & Wahyuni. (2008). *Pengaruh Rasio Metanol/Minyak Terhadap Parameter Kecepatan Reaksi Metanolisis Minyak Jelantah dan Angka Setana Biodiesel*. *Ekuiilibrium*, 7(1), 23–27. <http://kimia.ft.uns.ac.id/file/Ekuilibrium/Volume 7 No 1/Artikel 05 vol 7 no 1.pdf>

	Dino Suryadi Munthe merupakan mahasiswa di Universitas Udayana Program Studi Teknik Mesin sejak tahun 2020. Melakukan penelitian di bidang konversi energi dengan topik penggunaan minyak jelantah menjadi biodiesel sebagai tugas akhir untuk menempuh gelar Sarjana (S1).
Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan teknologi konversi energi.	

Studi Eksperimental Karakteristik Perubahan Energi Potensial Pada Material Karbon Aktif Bambu Betung Sebagai Material Pad Alternatif

Fikry Sapisandi, Hendra Wijaksana, Teddy Prananda Surya
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Dalam upaya meningkatkan efisiensi penggunaan listrik untuk sistim pendinginan, dikembangkan sistim pendingin direct evaporative yang lebih hemat energi, ramah lingkungan dan menghasilkan pendinginan yang cukup signifikan. Komponen utama sistim pendingin direct evaporative adalah material cooling pad. Dalam penelitian ini dikembangkan material cooling pad berbahan dasar bambu betung, yang kemudian dikarbonisasi pada variasi temperatur karbonisasi 400°C, 500°C, 600°C, 700°C dan 800°C, selanjutnya material karbon tersebut diaktivasi pada temperatur 600°C dan menghasilkan material karbon aktif bambu betung. Langkah berikutnya dilakukan pengujian untuk mendapatkan karakteristik perubahan energi potensial pada material karbon aktif bambu betung tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material bambu betung yang dikarbonisasi pada temperatur 800°C dan diaktivasi pada temperatur 600°C menghasilkan energi potensial pori yang tertinggi yakni sebesar 8.35×10^{-8} J, dengan ketinggian kenaikan kapiler tertinggi mencapai 0.748 m. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran jari pori material, semakin tinggi kenaikan kapilernya dan demikian pula energi potensial yang dihasilkan semakin besar. Untuk aplikasi sistim pendinginan direct evaporative, direkomendasikan untuk menggunakan material yang memiliki energi potensial pori yang lebih besar.

Kata kunci : Perubahan energi potensial, material karbon aktif bambu betung, material pad alternatif

Abstract

In an effort to increase the efficiency of electricity use for the cooling system, a direct evaporative cooling system was developed which is more energy efficient, environmentally friendly and produces significant cooling. The main component of a direct evaporative cooling system is the cooling pad material. In this research, a cooling pad material made from betung bamboo was developed, which was carbonized at various carbonization temperatures of 400°C, 500°C, 600°C, 700°C and 800°C, then activated at a temperature of 600°C and produced active carbon material from betung bamboo. The next test was carried out to obtain the characteristics of potential energy changes in the active carbon material of betung bamboo. The test results showed that the betung bamboo material which was carbonized at a temperature of 800°C and activated at a temperature of 600°C produced the highest pore potential energy, namely 8.35×10^{-8} J, with the highest capillary rise height reaching 0.748 m. As a result, it can be concluded that the smaller the pore size of the material, the higher the capillary rise and thus the greater the potential energy produced. For direct evaporative cooling system applications, it is recommended to use materials that have greater pore potential energy.

Keyword: Potential energy changes, betung bamboo activated carbon material, alternative pad material

1. Pendahuluan

Direct evaporative cooling merupakan salah satu sistim pendingin alternatif non-kompresi uap yang lebih hemat energi, ramah lingkungan dan menghasilkan pendinginan yang cukup signifikan. Komponen utama sistim direct evaporative cooling ini adalah material cooling pad. Penelitian-penelitian terbaru mengenai material pad telah banyak dilakukan untuk mengembangkan material pad yang lebih murah, efisien dan berbasis bahan dasar lokal. Berbagai jenis material pad yang banyak diteliti diantaranya coconut coir [1], aspen and cellulose material [2], porous ceramics material [3], local fibers [4], cellulosic evaporative cooling pads [5]. Namun demikian belum banyak dilakukan penelitian mengenai penggunaan bambu, khususnya material karbon aktif bambu betung sebagai material pad alternatif bagi sistem pendinginan direct evaporative. Penelitian mengenai bambu untuk berbagai macam

kegunaan telah banyak dilakukan. Putra Negara et.al telah melakukan penelitian kapasitas adsorpsi nitrogen dari karbon aktif bambu tabah [6]. Peng Liao et.al.,(2012) menguji kemampuan adsorpsi arang bambu (bamboo charcoal) terhadap methylene blue [7]. Qiang Ren et.al.,(2019) meneliti penggunaan arang bambu untuk pembuatan material penyerap kelembaban berbasis semen[8]. Penelitian awal mengenai karakteristik material karbon aktif bambu betung telah dilakukan diantaranya oleh Wahyu Wiwekanyana (2022) menguji secara eksperimental karakteristik kerja kapiler material karbon aktif bambu betung tanpa holding time[9]. Kemudian Ogie Indra Putra (2023) meneliti karakteristik energi kinetik (hambatan kekentalan fluida) material karbon aktif bambu betung tanpa holding time[10]. Sedangkan Ngurah Surya Nata (2022) menguji karakteristik capillary rise material karbon aktif bambu betung dengan holding time 30menit[11]

Pembuatan material karbon aktif bambu betung ini dilakukan melalui proses karbonisasi dengan variasi temperatur karbonisasi, yang selanjutnya dilakukan proses aktivasi hingga dihasilkan material karbon aktif bambu betung yang berpori karbon (porous carbonaceous material) dan memiliki karakteristik kapilaritas yang tinggi, sehingga mampu menarik fluida secara kapiler, masuk kedalam pori material dan membasahi permukaan material untuk proses pendinginan evaporative.

Dalam hal ini, sehubungan dengan karakteristik kapilaritas material karbon aktif bambu betung, akan dilakukan pengkajian mengenai karakteristik perubahan energi potensial, ketinggian kapiler dan struktur pori material karbon aktif bambu betung sebagai material pad alternatif sistem pendinginan evaporative.

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. Bahan material yang digunakan adalah bambu betung (*dendrocalamus asper*) lokal Bali yang berumur 4-5 tahun.
2. Pengujian hanya meliputi proses karbonisasi, proses aktivasi karbon dan uji scanning electron microscope (SEM)
3. Ukuran material uji dianggap uniform yakni panjang x lebar/tebal x tinggi=25mm x 17mm x 30mm
4. Pori material yang dihasilkan dianggap seragam berbentuk silinder
5. Fluida yang digunakan adalah air.

2. Dasar Teori

Kesetimbangan energi untuk capillary rise (kenaikan ketinggian permukaan fluida) terdiri dari 3 besaran energi yakni kerja yang dilakukan untuk mengangkat air dalam pori material (W), energi kinetik yang berhubungan dengan pengaruh viskositas dalam aliran fluida (K) dan energi potensial yang berhubungan dengan energi yang tersimpan dalam kolom fluida. Kesetimbangan energi dalam kolom fluida material berpori dapat dirumuskan dalam persamaan: [12]

$$W - K = - \Delta U \quad (1)$$

Ketinggian kenaikan permukaan fluida dalam pori material, h dapat ditentukan bila telah terjadi kesetimbangan gaya vertikal yakni antara gaya keatas dan gaya kebawah pada pori material, dimana gaya keatas dalam hal ini adalah gaya kapiler dan gaya kebawah adalah gaya berat air, yang dapat dirumuskan sebagai persamaan kesetimbangan gaya vertikal: [13]

$$2\pi r \cdot \sigma \cdot \cos \gamma = \pi r^2 \cdot h \cdot \rho_w \cdot g \quad (2)$$

gaya keatas gaya kebawah

Sehingga besarnya kenaikan ketinggian permukaan fluida, h dapat dirumuskan sebagai:

$$h = \frac{2\sigma \cos \gamma}{\rho_w \cdot g \cdot R} \quad (3)$$

h = ketinggian kenaikan kapiler (m)

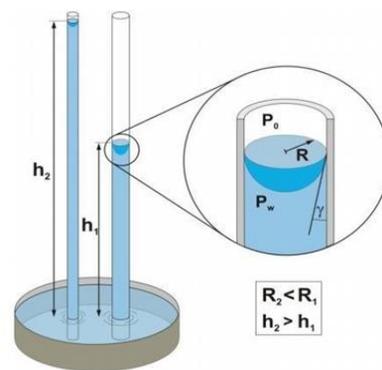
R = jari-jari meniskus = jari-jari pori (m)

σ = tegangan permukaan cairan = 0.00727 N/m (untuk air pada suhu 20°C)

γ = sudut yang terbentuk antara meniskus cairan dengan dinding pori (°) = 0

ρ_w = massa jenis air = 1000 kg/m³

g = percepatan gravitasi = 10 m/s²



Gambar 1. Ketinggian kenaikan kapiler

Besarnya perubahan energi potensial di dalam material berpori dapat ditentukan dengan mengintegrasikan gaya hidrostatik (f_i) yang bekerja di dalam pori akibat meningkatnya permukaan air pada pori material dari $z=0$ hingga $z=h$,

$$-\Delta U = \int_0^h f_i \cdot dz \quad (4)$$

Dimana gaya hidrostatik adalah hasil perkalian antara tekanan hidrostatik lokal (Δp) dan luas penampang pori (A_c) yang dapat diwakili oleh diameter pori, serta massa jenis fluida dan ketinggian permukaan air, seperti yang tertulis pada persamaan

$$f_i = \Delta P \cdot A_c = \pi/4 \cdot \rho \cdot g \cdot D^2 \cdot z \quad (5)$$

Kombinasi Persamaan (4) dan (5) yang kemudian diintegrasikan, akan menghasilkan Perubahan Energi Potensial akibat adanya kenaikan kapiler seperti pada persamaan dibawah:

$$-\Delta U = \int_0^h \frac{\pi}{4} \rho g D^2 z \cdot dz = \frac{\pi}{8} \rho g D^2 h^2 \quad (6)$$

ΔU = perubahan energi potensial ($\text{kg m}^2/\text{s}^2=\text{Nm}$)
 ρ_w = massa jenis air = $1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)
 D = diameter pori (m)
 h = ketinggian kenaikan kapiler (m)

3. Metode Penelitian

Penelitian ini meliputi pembuatan material karbon aktif bambu betung dan pengujian struktur pori. Adapun tahapan pembuatan dan pengujian material uji meliputi:

1. Pemotongan bambu betung kedalam ukuran panjang x lebar(tebal) xtinggi = 25mm x 17mm x 30mm
2. Material bambu yang telah dipotong-potong tersebut, kemudian dimasukkan kedalam oven pada suhu 120°C selama 6 jam untuk pengeringan.
3. Material uji yang telah kering tersebut, kemudian dilakukan proses karbonisasi pada electric furnace dengan variasi temperature karbonisasi 400°C , 500°C , 600°C , 700°C dan 800°C .
4. Material uji yang telah selesai dikarbonisasi diberikan kode nama material sesuai dengan temperature karbonisasinya, masing-masing secara berurutan sebagai PB 400, PB 500, PB 600, PB 700, dan PB 800.
5. Selanjutnya material hasil proses karbonisasi diatas dimasukkan satu persatu untuk diaktivasi karbon pada temperature furnace 600°C
6. Material hasil proses aktivasi (material karbon aktif bambu betung) tersebut kemudian diberikan kode nama material masing-masing secara berurutan sebagai PBC 400, PBC 500, PBC 600, PBC 700 dan PBC 800
7. Selanjutnya dilakukan Uji SEM terhadap masing-masing material karbon aktif tersebut diatas, untuk mendapatkan struktur pori dan ukuran jari pori material.

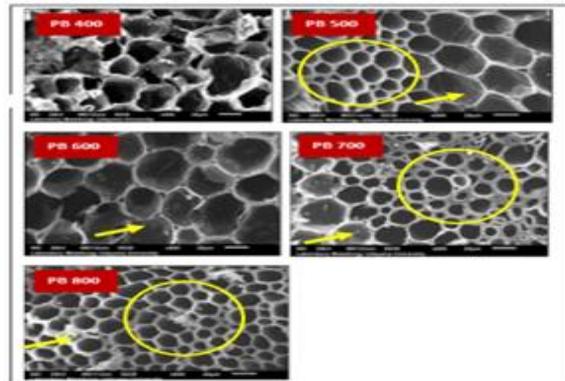
Pengkodean nama masing-masing material hasil proses karbonisasi dan aktivasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Proses Nama Material	Karbonisasi		Aktivasi	
	T $^\circ\text{C}$	Kode	T $^\circ\text{C}$	Kode
PAD 1	400°C	PB 400	600°C	PBC 400
PAD 2	500°C	PB 500	600°C	PBC 500
PAD 3	600°C	PB 600	600°C	PBC 600
PAD 4	700°C	PB 700	600°C	PBC 700
PAD 5	800°C	PB 800	600°C	PBC 800

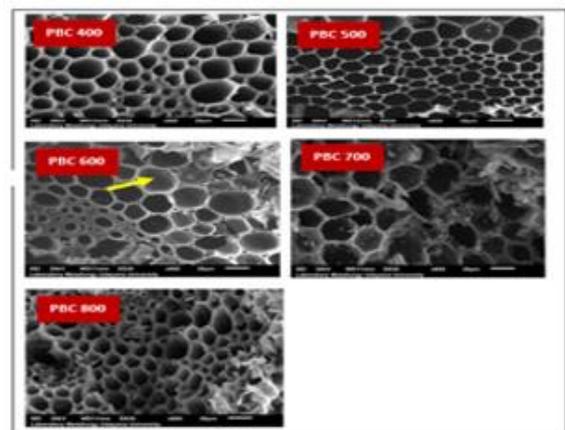
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Struktur Pori dan Ukuran Jari Pori Material

Dari hasil uji SEM didapat struktur pori dan ukuran jari pori material seperti terlihat pada Gambar 2 dan Tabel 2.



Gambar 2.a. Struktur pori material hasil proses karbonisasi



Gambar 2.b. Struktur pori material hasil proses aktivasi karbon

Pada Gambar 2.a. dapat dilihat bahwa proses karbonisasi menghasilkan struktur pori material, dimana pori yang terbentuk yang masih banyak tertutup lapisan tipis serta belum banyak pori kecil yang terbentuk. Hal ini disebabkan oleh rendahnya penetrasi panas yang diterima oleh material, sehingga masih banyak padatan-padatan material bambu yang belum terdekomposisi. Dapat dikatakan bahwa proses karbonisasi menghasilkan atau membuka pori awal material.

Pada Gambar 2.b. terlihat bahwa telah banyak terbuka pori kecil akibat tingginya penetrasi panas yang diterima material, yang telah mampu lebih banyak mendekomposisi padatan-padatan yang masih tertinggal pada proses karbonisasi. Semakin tinggi penetrasi panas yang diterima material, semakin

banyak pori kecil yang terbentuk, dan semakin meningkatkan karakteristik kapilaritas material.

Dari gambar struktur pori hasil uji SEM pada Gambar 2.b. akan dapat ditentukan jumlah pori yang dihasilkan oleh setiap material karbon aktif bambu betung beserta ukuran jari-jari masing-masing porinya, yang kemudian didapatkan ukuran jari pori rata-rata setiap material karbon aktif bambu betung tersebut, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran jari-jari pori material

No	Nama Material	ΣPori	Σ Ukuran jari pori (μm)	Ukuran jari pori (μm)
1	PBC 400	105	331,892	3,161
2	PBC 500	137	445,289	3,250
3	PBC 600	112	297,945	2,660
4	PBC 700	69	208,013	3,015
5	PBC 800	165	320,957	1,95

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa material karbon aktif yang dikarbonisasi pada temperature 800°C dan diaktivasi pada temperature 600°C yakni PBC 800 memiliki jari pori rata-rata terkecil 1.95 mikrometer, sedangkan jari pori terbesar dimiliki oleh material karbon aktif bambu betung PBC 500 yakni sebesar 3.25 mikrometer. Besarnya ukuran jari pori rata-rata didapat dengan membagi jumlah total ukuran jari pori masing-masing material dengan jumlah porinya. Dengan didapatnya ukuran jari pori rata-rata setiap material karbon aktif tersebut diatas, akan dapat selanjutnya digunakan untuk menentukan kenaikan kapiler serta energi potensial pori material tersebut.

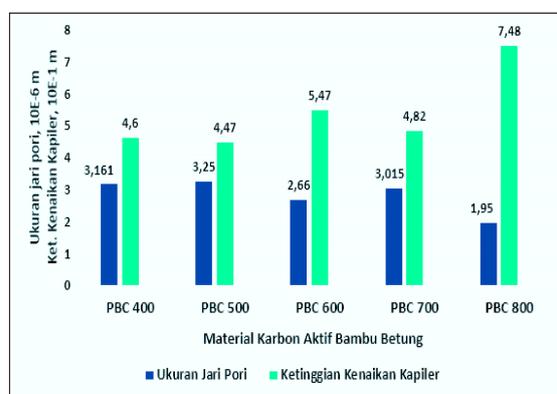
4.2. Ketinggian Kenaikan Kapiler

Besarnya ketinggian kapiler dapat ditentukan menggunakan persamaan (3), dan hasil perhitungan ketinggian kenaikan kapiler masing-masing material uji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Ketinggian kenaikan kapiler

No	Nama Material	Tegangan. Permukaan Air (N/m)	Ukuran Jari Pori (10 ⁻⁶ m)	Ketinggian Kenaikan Kapiler (m)
1	PBC 400	0,00727	3,161	0,460
2	PBC 500	0,00727	3,250	0,447
3	PBC 600	0,00727	2,660	0,547
4	PBC 700	0,00727	3,015	0,482
5	PBC 800	0,00727	1,95	0,748

Ketinggian kenaikan kapiler merupakan kesetimbangan antara gaya keatas (gaya kapiler) dan gaya kebawah (gaya berat air) dalam pori material. Ketinggian kenaikan kapiler yang dicapai merupakan ketinggian kenaikan maksimum permukaan air pada material. Ketinggian kenaikan kapiler ini berbanding terbalik dengan ukuran jari pori material, semakin kecil ukuran jari pori material, semakin tinggi kenaikan kapiler yang dapat dicapai oleh material tersebut. Pada Tabel 3 dan Gambar 3 dapat dilihat bahwa material karbon aktif bambu betung PBC 800 dengan ukuran jari pori terkecil yakni 1.95 mikrometer, menghasilkan ketinggian kenaikan kapiler tertinggi yakni sebesar 0.748 m dan kenaikan kapiler terendah dicapai oleh material PBC 500 yakni sebesar 0.447 m dengan ukuran jari pori terbesar 3.25 mikrometer.



Gambar 3. Hubungan ukuran jari pori dan kenaikan kapiler

4.3. Perubahan Energi Potensial Pada Pori Material

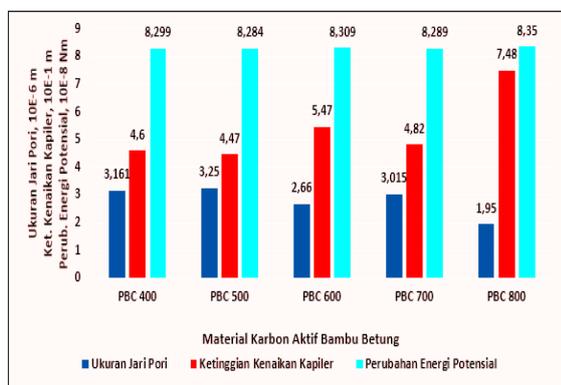
Besarnya energi potensial yang dihasilkan akibat kenaikan kapiler dalam pori material tersebut diatas dapat ditentukan menggunakan persamaan (6). Besarnya energi potensial pada pori untuk masing-masing material uji dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perubahan energi potensial pori material

No	Nama Material	Ukuran Jari Pori (10 ⁻⁶ m)	Ketinggian Kenaikan Kapiler (m)	Perubahan Energi Potensial (10 ⁻⁸ N.m)
1	PBC 400	3,161	0,460	8,299
2	PBC 500	3,250	0,447	8,284
3	PBC 600	2,660	0,547	8,309
4	PBC 700	3,015	0,482	8,289
5	PBC 800	1,95	0,748	8,350

Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa energi potensial terbesar dihasilkan oleh material karbon aktif bambu betung PBC 800 yakni sebesar 8.35×10^{-8} Nm dengan ukuran jari porinya yang terkecil yakni 1.95 mikrometer. Sedangkan material karbon aktif PBC 500 dengan pori terbesarnya yaitu 3.25 mikrometer menghasilkan energi potensial terendah sebesar 8.284×10^{-8} Nm. Hal ini menunjukkan semakin kecil ukuran jari pori material, semakin besar energi potensial yang dihasilkan, karena ukuran pori yang kecil akan menghasilkan ketinggian kenaikan kapiler yang lebih tinggi.

Hubungan ukuran jari pori, ketinggian kenaikan kapiler dan energi potensial yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan ukuran jari pori, kenaikan kapiler dan energi potensial

Gambar 4 menjelaskan hubungan antara ukuran jari pori material, ketinggian kenaikan kapiler dan perubahan energi potensial pada pori material karbon aktif bambu betung. Semakin kecil ukuran jari pori yang dimiliki material, maka semakin tinggi kenaikan kapilernya serta perubahan energinya. Dalam konteks ini, energi potensial sebenarnya adalah energi yang berlawanan dengan energi kapiler (kerja kapiler), Dimana kerja kapiler mengangkat cairan keatas masuk kedalam pori material dengan ketinggian tertentu dan pada saat yang bersamaan ketinggian kenaikan kapiler akan menghasilkan perubahan energi potensial pori material, yang bekerja kearah yang berlawanan dengan arah kerja kapiler. Semakin tinggi kenaikan kapiler, semakin besar pula perubahan energi potensial pori material.

Dalam aplikasinya untuk material pad alternative sistim pendinginan direct evaporative, lebih diharapkan material karbon aktif bambu betung yang memiliki energi potensial tinggi. Energi potensial yang tinggi menunjukkan kenaikan kapiler yang tinggi. Dengan kenaikan kapiler yang lebih tinggi, untuk ukuran material yang sama, akan memiliki area terbasahi yang lebih luas. Area terbasahi yang lebih luas, memungkinkan

perpindahan panas dari udara ke air pada material pad akan menjadi lebih besar, yang menghasilkan pendinginan udara secara evaporative yang lebih besar pula, dalam artian udara yang melewati material pad (udara produk) akan menjadi lebih dingin. Namun demikian, walaupun arah kerja energi potensial adalah kebawah melawan arah kerja kapiler, hal ini tidak akan mengurangi kerja kapiler untuk mengangkat sejumlah massa air masuk kedalam pori material. Dengan kata lain, besarnya energi potensial hanya menunjukkan ketinggian maksimum kenaikan kapiler material, dimana terjadi kesetimbangan antara gaya keatas (gaya kapiler) dan gaya kebawah (gaya berat air).

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perubahan energi potensial material karbon aktif bambu betung seperti paparan diatas, dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Energi potensial tertinggi dihasilkan oleh material bambu betung yang dikarbonisasi pada temperatur 800°C dan diaktivasi pada temperatur 600°C (PBC 800) yakni sebesar $8,35 \times 10^{-8}$ N.m
2. Energi potensial terendah dihasilkan oleh material bambu betung yang dikarbonisasi pada temperatur 500°C dan diaktivasi pada temperatur 600°C (PBC 500) yakni sebesar $8,284 \times 10^{-8}$ N.m
3. Dalam aplikasi sistem direct evaporative cooling lebih dipilih material yang memiliki energi potensial yang lebih tinggi, yakni material PBC 800 yang memiliki energi potensial terbesar yakni $8,284 \times 10^{-8}$ N.m dengan kenaikan kapiler tertinggi yakni sebesar 0,748 m, dimana kenaikan kapiler material yang lebih tinggi akan menghasilkan area basah material yang lebih luas, yang memperbesar perpindahan panas yang terjadi.

Daftar Pustaka

- [1] Akintunji, L.L., Haruna, I.U. et.al., 2014. Theoretical Performansi Analysis of Coconut Coir as Media in Evaporative Cooler, International Journal of Scientific & Technology Research 3 (3)
- [2] Kulkarni, R.K., S.P.S. Rajput (2011) Comparative performance of evaporative cooling pads of alternative material.

- [3] Boukhanouf, R. 2014. Investigation of An Evaporative Cooler for Building in Hot and Dry Climates, *Journal of Clean Technologies*, Vol.2, No. 3..
- [4] Al-Sulaiman F., 2002. Evaluation of the performance of new evaporative cooling pad materials, *Energy Conversion and Management* 43, 2267-2273
- [5] Malli, A. et al., 2011. Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads. *Energy Conversion and Management*, 52(7), pp.2598–2603. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.015>.
- [6] Putra Negara. D.N.K., Tirta Nindia T.G., Surata, I.W., Hidayat F., Sucipta, M. 2019. Nanopore Structure, Surface Morphology and Adsorption Capacity of Tabah Bamboo-Activated Carbon, *Surface and Interface*. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.04.002>
- [7] Liao, P., Ismael, Z.M., Zhang, W., Yuan, S., Tong, M., Wang, K. 2012. Adsorption of Dyes from Aqueous by Microwave Modified Bamboo Charcoal, *Chemical Engineering Journal* 195-196, 339-346.
- [8] Ren, Q., Zeng, Z., Jian, Z., Chen, Q. 2019. Incorporation of Bamboo Charcoal for Cement-based Humidity Adsorption Material, *Construction and Building Materials* 215, 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.173>
- [9] Wahyu Wiwekanyana, 2022. Studi eksperimental karakteristik kerja kapiler material karbon aktif bambu betung tanpa holding time
- [10] Ogie Indra Putra, 2023. Studi eksperimental karakteristik hambatan kekentalan fluida pada material karbon aktif bambu betung sebagai material pad alternatif.
- [11] Ngruh Surya Pranata, 2022. Studi eksperimental karakteristik capillary rise material karbon aktif bambu betung dengan holding time 30 menit sebagai material pad alternative
- [12] Extrand C.W. and Sung In Moon, 2013. *Experimental measurement of forces and energies associated with capillary rise in a vertical tube*. *Journal of Colloid and Interface Science* 407 (2013) 488-492. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2013.06.017>
- [13] Dani Or, 2018. *Capillary Processes in Porous Media (An introduction to Soil Physics)*. Department of Environmental System Science (D-USYS), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH Zurich)



Fikry Sapisandi menempuh pendidikan program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2017 dan menyelesaikannya pada tahun 2024 dengan topik Studi Eksperimental Karakteristik Perubahan Energi Potensial Pada Material Karbon Aktif Bambu Betung Sebagai Material Pad Alternatif

Bidang penelitian yang menjadi konsentrasi pada penelitian tersebut adalah KONVERSI ENERGI



Hendra Wijaksana menyelesaikan studi S1 Teknik Mesin di ITS Surabaya, kemudian melanjutkan studi S2 Energy Technology di Salford University, U.K dan menyelesaikan studi S3 di Program Doktor Ilmu Teknik, UNUD