



# Karakteristik Hybrid Metal Komposit Diperkuat Serbuk Batu Apung untuk Pemanfaatan Bahan Alternatif

<sup>1</sup> IKetut Suarsana

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali, Indonesia  
E-mail: suarsana@unud.ac.id

<sup>2</sup> I N. Budiarsa

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali, Indonesia  
E-mail: Nyoman.budiarsa@me.unud.ac.id

**Abstract**—Bahan alam batu apung yang digunakan sebagai bahan penguat material komposit didapat dari alam bekas lahar gunung berapi. Kondisi fisik dari batu apung adalah kerapatannya rendah, ringan dibandingkan dengan batu alam lainnya dan mudah membentuk ikatan. Banyak komposit yang dibuat dari beberapa bahan penguat lainnya seperti dari serat tumbuhan dan dari alam berupa bahan fosil. Permasalahan timbul pada bahan rem cakram adalah materialnya berat, kurang tahan panas karena density cukup rapat, maka dicarilah bahan alternatif yang dapat menggantikan dan karakteristiknya yang baik. Metode *powder metallurgy* yaitu mencampur matrik dan penguat lalu dilakukan pemadatan serbuk menjadi bentuk yang diinginkan kemudian dipanaskan sehingga partikel serbuk menyatu melalui mekanisme ikatan fasa padat. Juga dapat menggabungkan berbagai sifat material yang memiliki karakteristik berbeda, sehingga dapat menjadi sifat yang baru sesuai dengan yang diinginkan. Parameter penelitian ini adalah komposisi berat serbuk batu apung 5%, 10%, 15%, 20% dan  $Al_2O_3/Mg$ : 10% serta komposisi matrik 85%, 80%, 75% dan 70%. Fokus penelitian adalah pengaruh penambahan komposisi serbuk batu apung pada hybrid komposit dan komposisi matriknya terhadap sifat kekerasan, konduktivitas termal dan keausan. Hasil penelitian diperoleh sifat kekerasan sebesar 45,558 HVN, nilai keausan didapat 0,00801 gr/cycle, nilai konduktivitas termal adalah 172,355 W/m°C dan dari hasil penelitian hybrid komposit berpenguat serbuk batu apung yang di proses dengan metalurgi serbuk dapat dipakai sebagai alternative pengganti bahan dari piringan rem cakram (*disc brake*) yang ada.

**Kata Kunci**— Aluminium,  $Al_2O_3$  p, Batu apung, Magnesium

## I. PENDAHULUAN

Komposit merupakan suatu material yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih material, dimana sifat mekanik yang dimiliki material pembentuknya berbeda-beda [1]. Material dari *Aluminium Matrix Composites (AMC)* mempunyai prospek karena menjanjikan karakteristik ketahanan aus dan ketahanan deformasi termal yang baik oleh karena itu banyak industri membutuhkan untuk *disc brake*, *piston*, poros dan *crankshaft*. Aplikasi pengembangan material berbasis logam pada dunia industri cukup potensial, terutama Indonesia memiliki potensi mineral bauxite mencapai 838,9 juta ton yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan industri dan sebagai dasar pembuatan komposit bermatrik Aluminium. Alumina merupakan salah satu jenis keramik oksida yang keras. Menurut [2]. Pada penelitian sebelumnya tentang pengaruh batu apung sebagai bahan abrasif pada komposit telah dilakukan, dimana dengan penambahan serbuk batu apung memberikan pengaruh pada nilai densitas, porositas, dan kuat tekan dari komposit material yang dihasilkan. Semakin meningkat penambahan serbuk batu apung cenderung semakin menurun densitas, sedangkan porositas meningkat [3]. Komposisi batu apung dan clay bahan pengisi pada

pembuatan kompon lis kaca mobil dibuat kosentrasi batu apung dan clay, dimana karakteristik kompon yang dihasilkan mempunyai nilai kekerasan 65 shore A, tegangan putus 29 N/mm<sup>2</sup> dan perpanjangan putus 272%, dari hasil uji ini semua parameter memenuhi SNI 06-1490-1989 lis kaca kendaraan bermotor [4].

Penelitian yang dilaksanakan ini fokus pada pemanfaatan serbuk batu apung untuk penguat hybrid metal komposit sebagai alternatif bahan piringan rem cakram (*brake disc*) dengan metode pembuatan melalui proses metalurgy serbuk (*powder metallurgy*) terhadap sifat fisik dan mekanik yang di uji nilai konduktivitas termal, kekerasan dan keausan.

## II. METODE DAN PROSEDUR

### 2.1 Material Batu apung

Batu apung merupakan hasil letusan gunung berapai yang mengeras dan dapat dipakai sebagai bahan bangunan, bahan absorber, bahan penyaring air bersih dan lain sebagainya. Keberadaan bahan baku batu apung di wilayah Bali mudah untuk didapatkan karena adanya gunung berapi yang dapat menghasilkan gugusan lahar yang saat membeku terbentuk batu apung. Bahan hybrid komposit berpenguat serbuk batu apung yang akan dihasilkan dengan optimasi sifat fisik dan menaiknya dapat berpotensi untuk dikomersialkan [5]. Proses pembuatan serbuk batu apung dengan cara memecahkan batu apung sampai terjadi sebuk, kemudian di ayak sesuai dengan ukuran yang dibuat.

### 2.2 Pembuatan Serbuk

*Decomposition*, yaitu terjadi pada material yang berisi elemen logam. Material akan memisahkan elemen - elemennya jika dipanaskan pada temperatur yang cukup tinggi. Proses ini juga melibatkan dua reaktan yaitu, senyawa metal dan *reducing agent*. Kedua reaktan tersebut bisa berwujud *solid*, *liquid*, dan gas. *Mechanical Processing of Solid Materials*, yaitu proses pembuatan serbuk dengan cara menghancurkan material dengan *ball milling*. Material yang dibuat dengan cara ini harus material yang mudah retak seperti: logam murni, bismuth, antimony, paduan logam yang relatif keras dan getas, serta keramik.

### 2.3 Pencampuran Serbuk (*Mixing*)

Proses pencampuran *mixing* (proses pencampuran yang bertujuan untuk butiran merata secara kimia). Pencampuran ini juga dapat dilakukan dalam keadaan kering (*dry mixing*) dan keadaan basah (*wet mixing*). Komposisi paduan tersebut dapat dicampur dengan melakukan perbandingan jumlah yang sama, agar didapatkan pencampuran terbaik. Dalam pembuatan pellet mentah, tekanan pengompakan sangat berpengaruh pada densitas pellet yang diperoleh. Kurva densitas sebagai fungsi dari tekanan pengompaksian adalah berupa garis lengkung [6].

### 2.4 Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan pemilihan bahan hybrid komposit yang terdiri dari *Aluminium*, serbuk batu apung dan alumina partikel (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dengan aditif Mg. Masing-masing bahan komposit dikerjakan/ diteliti sesuai dengan komposisi I, III, II, IV dan diaduk dengan alat *magnetic stirrer* pada temperatur dan waktu masing-masing 50°C lama 30 menit sampai campuran merata. Komposit matriks Al berpenguat Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan *wetting agent* didasari pada fraksi berat (%wt) menggunakan metode *powder metallurgy* dengan komposisi sebagai berikut: Komposisi I : Al (85%), serbuk batu apung (5%) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Mg (10%) ; Komposisi II : Al (80%), serbuk batu apung (10%) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Mg (10%); Komposisi III : Al (75%), serbuk batu apung (15%) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Mg (10%); Komposisi IV : Al (70%), serbuk batu apung (20%) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Mg (10%). Pada proses pencampuran ditambahkan larutan ethanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) untuk mempermudah terbentuknya campuran yang homogen. Setelah ethanol menguap, serbuk dalam keadaan tercampur dimasukan didalam dapur pemanas untuk dikering 100°C selama 30 menit. Kemudian serbuk dikeluarkan dari dapur pemanas dan dimasukkan dalam cetakan yang telah tersedia. Tekanan pada cetakan dilakukan dengan gaya 25 kN untuk masing-masing spesimen uji dengan ulangan 3 kali, ditahan selama 15 menit, kemudian dikeluarkan dari cetakan didapat material sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Setelah terbentuk spesimen dikenakan perlakuan temperatur sintering: 350, 400, dan 450°C dengan lama penahanan 1 jam.

Pengujian dilakukan di Laboratorium untuk mengetahui karakteristik fisik dan mekanik yaitu kekerasan, konduktivitas termal dan keausan hybrid komposit [7].

## 2.5 Proses Pengujian Kekerasan

Pada pengujian kekerasan ini akan menghasilkan data. Data yang didapat akan dimasukkan ke tabel pengambilan data, dimana pada tabel akan dijelaskan bahwa pada masing - masing komposisi terdapat 12 spesimen uji, yang masing - masing spesimen tersebut dibagi menjadi 3 titik agar mendapatkan data yang lebih akurat, yaitu titik 1, 2, dan 3 pada titik - titik tersebutlah akan dilakukan pengujian kekerasan. Nilai kekerasan didapat dengan persamaan: [8].

$$VHN = \frac{1,854 \times P}{d^2} \quad (1)$$

Dimana : VHN adalah Vickers Hardness Number, P adalah Beban yang diberikan (kg), d = diagonal rata-rata

## 2.6 Uji Konduktivitas termal

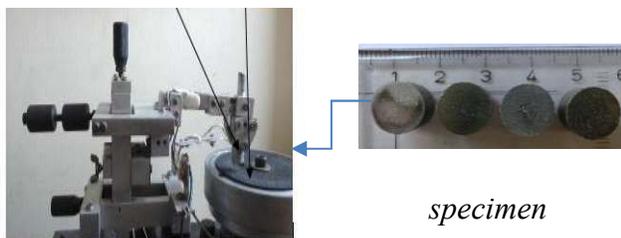
Nilai konduktivitas termal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Konduktivitas termal kebanyakan bahan merupakan fungsi suhu, dan bertambah sedikit kalau suhu naik, akan tetapi variasinya kecil dan sering kali diabaikan [9]. Jika nilai konduktivitas termal suatu bahan makin besar, maka makin besar juga panas yang mengalir melalui benda tersebut. Karena itu, bahan yang bernilai besar adalah penghantar panas yang baik, sedangkan bila bernilai kecil bahan itu kurang menghantar atau merupakan isolator [10].

## 2.7 Uji keausan

Keausan adalah hilangnya sejumlah lapisan permukaan material akibat gesekan antara permukaan padat dengan benda lain. Gesekan adalah gaya resistensi yang menahan gerakan antara dua permukaan padat yang bersentuhan atau padat dengan cairan. Keausan pada dasarnya memiliki beberapa mekanisme yaitu abrasi, erosi, adhesi, kelelahan, dan korosi. Laju keausan dinyatakan dengan jumlah kehilangan atau pengurangan material (massa, volume, atau ketebalan) per satuan berat benda uji dengan satuan waktu. Laju keausan dapat dihitung dengan persamaan 2:

$$k' = \frac{w_0 - w_1}{t} = \frac{w}{t} \quad (2)$$

Dimana  $k'$  = laju keausan (cycle),  $w_0$  = berat awal benda uji (gr),  $w_1$  = berat akhir benda uji (gr);  $l$  = jarak geser (cycle), dan  $w$  = selisih berat goresan yang hilang (gr).



GAMBAR 1. ALAT UJI KEAUSAN DAN SPESIMEN

## 2.8 Variabel Penelitian

Variabel Bebas dari penelitian ini berupa komposisi batu apung suhu sintering (variabel yang direncanakan) yaitu komposisi I, komposisi II, komposisi III dan komposisi IV. Sedangkan Suhu sintering yang diambil adalah: 350, 400 dan 450°C; holding time 1 jam.

Variabel Terikat pada penelitian ini (variabel yang dicari) adalah Karakteristik fisik dan mekanik berupa konduktivitas termal, sifat kekerasan dan keausan.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

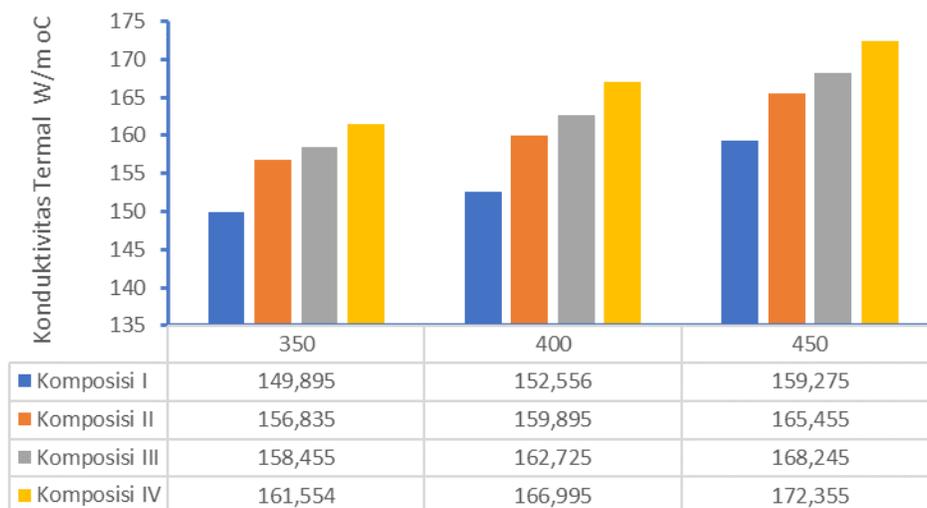
Data hasil penelitian dapat dilihat pada Tabel 1, menunjukkan bahwa dari proses penambahan komposisi batu apung pada komposit dengan temperatur yang berbeda memberikan efek peningkatan pada kekerasan dan konduktivitas termal, namun pada keausan terjadi penurunan laju keausan. Hal ini dapat disimpulkan bahwa efek temperatur dan penambahan serbuk batu apung memberikan pengaruh secara signifikan.

TABEL.1 HASIL UJI KEKERASAN, KONDUKTIVITAS TERMAL DAN KEAUSAN.

Komposisi	Temperatur Perlakuan	Konduktivitas Termal	Kekerasan	Keausan
		(k = W/m oC)	HVN	(gram/cycle)
5%batu apung+85%AL+10%Al2O3/Mg	350	149,895	35,583	0,0352
	400	152,556	36,653	0,0255
	450	159,275	39,064	0,0154
10%batu apung+80%AL+10%Al2O3/Mg	350	156,835	36,684	0,029
	400	159,895	38,755	0,0195
	450	165,455	41,013	0,01275
15%batu apung+75%AL+10%Al2O3/Mg	350	158,455	38,855	0,0252
	400	162,725	40,755	0,0175
	450	168,245	43,236	0,0099
20%batu apung+70%AL+10%Al2O3/Mg	350	161,554	42,555	0,0219
	400	166,995	43,675	0,0131
	450	172,355	45,558	0,00801

#### 3.1 Konduktivitas Panas

Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian konduktivitas termal meliputi deskripsi material dan termokopel T1 - T7 dengan jarak sensor pembaca dari tiap termokopel. Pengujian dilakukan pada masing - masing material uji dengan variasi kombinasi perlakuan komposit yang berbeda. Data hasil pengujian kemudian dihitung nilai konduktivitas termal. Saat pengujian berlangsung, temperatur lingkungan berada pada suhu 19°C dan daya pemanas sebesar 66 watt sesuai dengan kemampuan mesin uji yang digunakan. Hasil hubungan perlakuan komposit dengan konduktivitas panas dapat dilihat sebagai berikut:

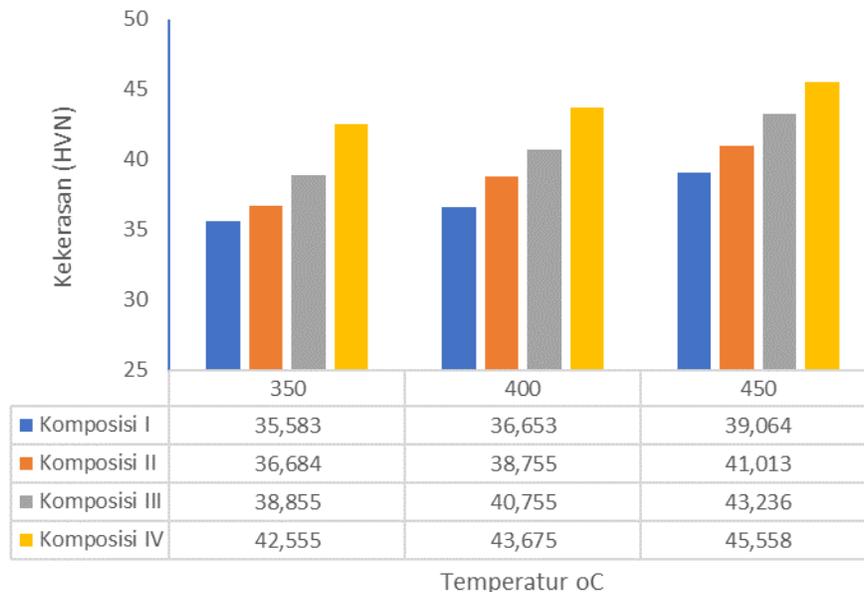


GAMBAR 2. HASIL HUBUNGAN TEMPERATUR DENGAN KONDUKTIVITAS TERMAL

Dari Gambar 2 terlihat hasil pengujian konduktivitas termal pada kombinasi perlakuan komposisi, temperature sintering dan komposisi serbuk batu apung dalam bentuk grafik. Hasil didapat bahwa terjadi peningkatan konduktivitas panas dari setiap kombinasi perlakuan komposisi, temperatur sintering yang berbeda. Peningkatan nilai konduktivitas termal dapat dilihat dari kombinasi perlakuan Komposisi I sebesar 149,895 Watt/m oC sampai komposisi Komposisi IV sebesar 172,355 Watt/m °C, Pada Perlakuan komposisi I, temperature 350°C, 450oC dan 550oC berturut-turut menghasilkan konduktivitas termal sebesar (149,895 Watt/m.°C, 152,556 Watt/m.°C dan 159,275 Watt/m.°C). Pada komposisi II temperatur 350°C, 450°C serta 550°C, berturut-turut menghasilkan konduktivitas termal (156,835 Watt/m.°C,159,895 Watt/m.°C dan 165,445 Watt/m.°C). Pada komposisi III temperature 350°C, 450°C serta 550°C, berturut-turut menghasilkan konduktivitas termal (158,455 Watt/m.°C, 162,725 Watt/m.°C dan 168,245 Watt/m.°C). Jadi terlihat bahwa adanya pengaruh dari kombinasi perlakuan komposisi komposit, temperature sintering terhadap nilai konduktivitas panas pada masing-masing uji meningkat. Dimana masing-masing perlakuan kombinasi komposisi memberikan pengaruh terjadi peningkatan kemampuan konduktivitas panas pada hybrid komposit. Hal ini dipengaruhi oleh kerapatan meningkat setiap perlakuan temperatur sintering dan komposisi. Dengan peningkatan penambahan partikel serbuk batu apung yang sifatnya keras dan butiran halus dapat mengurangi pori-pori dan dapat meningkatkan kerapatan bahan. Konduktivitas panas bahan yang mempunyai nilai tinggi dapat menghantarkan panas dengan baik dapat diaplikasikan sebagai bahan konduktor, Sedangkan konduktivitas panas bahan yang mempunyai nilai rendah dapat diaplikasikan sebagai bahan isolator, karena pengantahantar panas yang buruk.

### 3.2 Sifat Kekerasan

Data hasil uji kekerasan dapat ditampilkan dalam bentuk grafik kombinasi hubungan perlakuan temperatur sintering, persen komposisi dan holding time. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *vickers* menggunakan indenter piramida intan, besar sudut antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah 136°. Pengukuran diameter rata-rata diambil dari ukuran besaran tanpak tekan indetor. Standar untuk pengujian kekerasan vickers digunakan ASTM E-92 rentang makro (1 – 100 kg).. Perhitungan nilai kekerasan mengikuti persamaan 1 [11]. Hasil perhitungan nilai kekerasan ditunjukkan pada grafik sebagai berikut:



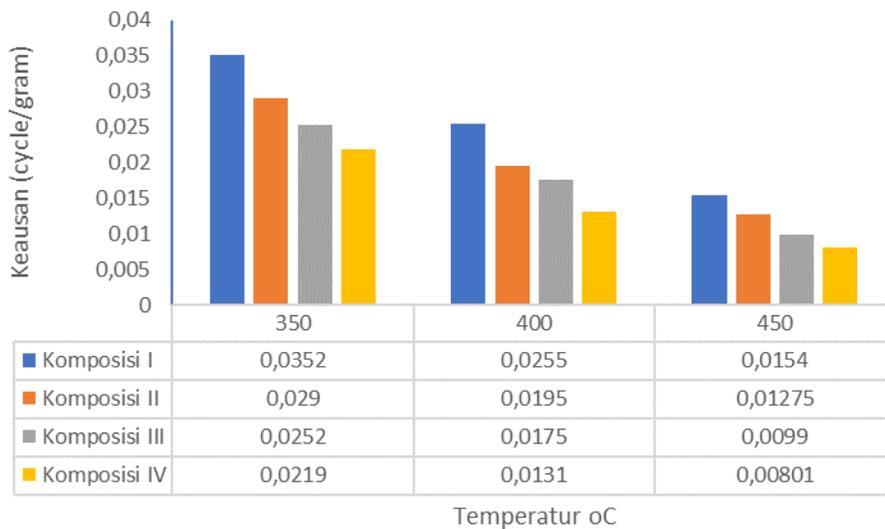
GAMBAR 3 GRAFIK HUBUNGAN TEMPERATUR DENGAN KEKERASAN

Pada Gambar 3 menunjukkan hubungan kombinasi perlakuan temperatur sentering dan komposisi terhadap nilai kekerasan, dimana pada setiap peningkatan kombinasi perlakuan terjadi peningkatan sifat kekerasan. Peningkatan nilai kekerasan pada penelitian hybrid komposit ini dapat ditunjukkan dari kombinasi perlakuan Komposisi I sebesar 35,385 VHN sampai kombinasi komposisi IV sebesar 45,558 VHN, Pada masing-masing temperatur sintering kombinasi perlakuan komposisi I sebesar (35,583 VHN, 36,653 VHN, 39,064 VHN);

Komposisi II sebesar (36,684 VHN, 38,775 VHN, 41,013 VHN); Komposisi III sebesar (38,855 VHN, 40,755 VHN, 43,236 VHN); Komposisi IV sebesar (42,555 VHN, 43,675 VHN, 45,558 VHN). Nilai kekerasan meningkat pada penelitian hybrid komposit ini disebabkan oleh peningkatan jumlah komposisi serbuk batu apung dan peningkatan temperatur sintering, dimana bentuk partikel serbuk yang keras dan halus berfungsi sebagai penguat dan perekat dalam setiap kombinasi komposit. Kekerasan pada kombinasi komposisi komposit, disetiap temperatur sintering dan komposisi menunjukkan peningkatan kekerasan. Jadi kekerasan dapat dipengaruhi oleh efek temperatur perlakuan sintering dan juga jumlah persen serbuk batu apung sebagai pengikat atau penguat komposit ini. Nilai kekerasan yang dimiliki oleh hybrid komposit ini diharapkan dapat diaplikasikan pada salah satu komponen kendaraan terutama sebagai *disc brake*.

### 3.3 Laju Keausan

Data hasil uji keausan ditampilkan dalam bentuk grafik untuk mempermudah membahas dan untuk menunjukkan hubungan antara komposisi, temperatur sintering terhadap laju keausan. Spesimen uji keausan dan pengujian ini mengikuti standar ASTM G99-95. Pada gambar 4 ditunjukkan grafik hubungan pengaruh kombinasi antara perlakuan sintering dan komposisi terhadap laju keausan material hybrid komposit seperti berikut :



GAMBAR 4 GRAFIK HUBUNGAN TEMPERATUR DENGAN KEAUSAN

Dalam gambar 4 dapat dijelaskan bahwa kombinasi komposisi penguat pada matrik alumina menunjukkan nilai laju keausan pada komposisi I dan perlakuan temperatur sintering 350 oC mengalami penurunan secara linier, dimana semakin besar nilai kombinasi perlakuan pada material maka laju keausan turun. Penurunan laju keausan dapat dilihat dari komposisi perlakuan I sebesar 0,0352 gr/cycle sampai komposisi IV sebesar 0,00801 gr/cycle. Pada setiap kombinasi perlakuan komposisi, temperatur sintering dapat dikatakan berpengaruh secara signifikan dilihat dari data yang didapatkan. Pada penelitian ini dapat dikatakan material hybrid komposit yang dibuat setiap kombinasi perlakuan mengalami laju keausannya menurun. Komposit yang laju keausan kecil sangat baik diaplikasikan untuk komponen-komponen mesin yang mengalami gaya gesek.

## IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju keausan menurun pada kombinasi perlakuan komposisi, temperatur sintering, dimana komposisi I sebesar 0,0352 gr/cycle sampai komposisi IV sebesar 0,00801 gr/cycle. Konduktivitas termal meningkat dipengaruhi oleh kerapatan meningkat setiap perlakuan temperatur sintering. Nilai kekerasan meningkat yang dipengaruhi oleh efek temperatur perlakuan sintering dan juga jumlah persen serbuk batu apung sebagai pengikat atau penguat komposit. Pada setiap kombinasi perlakuan komposisi, temperatur sintering dapat dikatakan berpengaruh secara signifikan dilihat dari data yang didapatkan. Jadi dari kesimpulan yang didapat laju keausan rendah dan sebaliknya konduktivitas panas serta kekerasan komposit tinggi pada penelitian ini, dapat diaplikasikan sebagai penganganti bahan alternatif pada komponen mesin, seperti bodi kendaraan, bodi pesawat,

*disc brake*, rumah rem, yang mana semua komponen ini membutuhkan sifat keras, laju keausan rendah serta tahan terhadap panas.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prodi Teknik Mesin, Kepala Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium Proses Produksi serta Laboratorium Fenomena Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Ketua LPPM Universitas Udayana, dan Kepala Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang atas fasilitas yang diberikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. S. Putra, I. G. Putu, A. Suryawan, dan I. K. Suarsana, "Efek Perlakuan Silane Pada Komposit Berpenguat Serat Jelatang Terhadap Kekuatan Impact," *J. Desain Mek.*, hal. 1–5, 2019.
- [2] S. N. Grigoriev *dkk.*, "Peculiarities of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Crystallization on the Surface of h-BN Particles," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 8054, hal. 1–8, 2022.
- [3] R. Nurhasanah, P. Karo Karo, dan Suprihatin, "Pengaruh Batu Apung Sebagai Bahan Abrasif Terhadap Karakteristik Komposit," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 2, no. 1, hal. 103–107, 2014.
- [4] S. Bahri dan Rahmaniari, "Komposit Batu Apung dan Clay Sebagai Bahan Pengisi Pada Pembuatan Komponen Lis Kaca Mobil," *J. Din. Penelit. Ind.*, vol. 26, no. 1, hal. 59–65, 2015.
- [5] F. Mahaddilla dan A. Putra, "Pemanfaatan Batu Apung Sebagai Sumber Silika dalam Pembuatan Zeolit Sintetis," *J. Fis. Unand*, vol. 2, no. 4, hal. 262–268, 2013.
- [6] I. Atmaja, I. Tika, dan I. Wijaya, "The Effect Composition Ratio of Raw Material on Compost Quality and Timing for Composting," *J. BETA (Biosistem dan Tek. Pertanian)*, vol. 5, no. 1, hal. 111–119, 2017.
- [7] D. Shetty, "A Literature Review on Processing and Testing of Mechanical Properties of Hybrid Composites Using Graphene/Epoxy with Alumina," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 03, hal. 1263–1274, 2019.
- [8] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*. Prentice Hall, 1993.
- [9] D. Ray, B. Sarkar, R. Basak, dan A. Rana, "Study of the thermal behavior of alkali-treated jute fibers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 85, hal. 2594–2599, Sep 2002.
- [10] A. Patnaik, M. Abdulla, A. Satapathy, dan S. Biswas, "A Study on a Possible Correlation Between Thermal Conductivity and Wear Resistance of Particulate Filled Polymer Composites," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 2, hal. 837–849, 2010.
- [11] G. Ronald, *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw-Hill, 1994.