

Kekuatan Bending Dan Ketangguhan Impak Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Dengan Keramik Zirconia (ZrO_2) Yang Dibuat Dengan Metode *Hot Extrusion*

M.W. Wildan¹, Subarmono¹, M. Budi Nur Rahman^{2*}

(1) Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No.2 Yogyakarta 55281, Indonesia

(2) Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan Tamantirto Kasihan Bantul Yogyakarta, 55183, Indonesia

*e-mail: nurrahman_umy@yahoo.co.id

Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penambahan partikel zirconia (ZrO_2) sebagai penguat pada komposit *Aluminium Matrix Composite-AMC* yang dibuat dengan metode *hot extrusion* terhadap densitas relatif, kekuatan bending dan ketangguhan impak. Serbuk ZrO_2 merupakan bahan keramik yang keras dan memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi. Penambahan partikel ZrO_2 sebanyak 0; 2,5; 5; 7,5,10, 12,5 dan 15% fraksi berat dicampur dengan serbuk alumunium menggunakan *turbula mixer* selama 2 jam. Campuran serbuk alumunium dan ZrO_2 dikompaksi secara uniaksial dengan tekanan 300 MPa dilanjutkan proses *hot extrusion* pada suhu 625°C dengan *holding time* 30 menit. Pengujian yang dilakukan adalah densitas relatif dengan metode *Archimedes*, kekuatan bending dengan metode *four point bending test* sesuai standar ASTM C 1161 – 02c, dan ketangguhan impak dengan metode Charpy. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan partikel ZrO_2 meningkatkan nilai *bulk density* dan densitas relatif maksimum 94,6% pada penambahan 2,5% fraksi berat. Nilai kekuatan bending komposit menurun seiring dengan penambahan partikel zirconia, bernilai 48,57 MPa pada kondisi tanpa zirconia menjadi bernilai 42,87 MPa pada 5% zirconia selanjutnya 36,56 MPa pada 7,5% zirconia dan semakin turun pada penambahan zirconia selanjutnya. Ketangguhan impak komposit mengalami peningkatan seiring dengan penambahan partikel penguat ZrO_2 sampai penambahan 7,5% sebesar 14,67 kJ/m² namun selanjutnya ketangguhan impak semakin turun.

Kata kunci: AMC, zirconia, *hot extrusion*, *bending*, *impak*

Pendahuluan

Alumunium merupakan bahan yang banyak digunakan pada industri otomotif karena ringan, ulet dan tahan korosi. Akan tetapi, untuk komponen yang bekerja dalam kondisi bergesekan (saling kontak satu dengan lain) alumunium lebih cepat mengalami kerusakan karena ketahanan ausnya rendah. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan alumunium selain dengan teknik paduan(*alloy*) adalah dengan menambahkan serbuk penguat ke dalam matrik komposit *Aluminium Matrix*

Composite-AMC yang dibuat melalui proses metalurgi serbuk.

Komposit adalah dua bahan atau lebih yang berbeda digabung atau dicampur secara makroskopis. Pada umumnya komposit terdiri dari dua unsur utama yaitu penguat (*reinforcement*) dan bahan pengikat yang disebut *matrix*. Penguat adalah bahan utama yang menentukan karakteristik dari komposit seperti kekakuan, kekuatan, dan ketahanan terhadap aus. Sedang *matrix* bertugas melindungi dan mengikat serat/partikel agar bekerja dengan baik[1]. Bahan penguat dapat berupa serat panjang, serat

pendek, dan dalam bentuk partikel yang umumnya keras, kuat tetapi getas seperti boron, karbon, alumina dan SiC. Sedangkan bahan matriks dapat dipilih dari bahan lain seperti resin, alumunium, magnesium dan tembaga[2]. Penguat berbentuk partikel dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus, sedang penguat serat panjang dapat meningkatkan kekuatan bending dan ketangguhan [3].

Ekstrusi panas digunakan untuk fabrikasi paduan temperatur tinggi, penyatuhan dispersi oksida diperkuat tembaga, alumina dan *super alloy* dengan base nikel. Teknik ini juga digunakan untuk material dengan plastisitas rendah seperti beryllium, zirconium dan Nb₃Sn super konduktor. Ekstrusi serbuk logam dengan berbagai suhu akan mendapatkan densitas maksimal. Paduan serbuk biasanya diperoleh deformasi tinggi untuk mendapatkan sifat yang maksimal. Pada ekstrusi dengan suhu rendah dibutuhkan tekanan tinggi untuk mendapatkan peningkatan densitas. Pada paduan tertentu dari komposit, kombinasi suhu dan tekanan akan diperoleh hasil optimal yang ditunjukkan dengan struktur mikro dan kontrol *properties* akhir [4].

Komposit dengan matrik alumunium telah banyak dikembangkan dan terbukti mampu meningkatkan *mechanical properties* dari alumunium. Pada komposit bermatrik alumunium, material yang sering digunakan sebagai penguat adalah dari bahan keramik. Hal ini karena keramik adalah bahan yang keras dan tahan pada temperatur tinggi. Akan tetapi karena kekerasannya yang tinggi tersebut, bahan keramik cenderung bersifat getas. Sehingga sangat tepat bila keramik yang bersifat keras dikombinasikan dengan alumunium yang bersifat ulet dan tangguh. Dengan

demikian, diharapkan akan didapatkan material yang tangguh sekaligus memiliki kekerasan dan ketahanan aus tinggi.

Penelitian komposit Al-13,5Si-2,5Mg yang diperkuat serbuk zircon ($ZrSiO_4$) dibuat dengan *cold pressing* pada 350 MPa, dilanjutkan dengan *liquid-phase reaction sintering* pada 615°C pada kondisi vakum selama 20 menit. menghasilkan kekuatan tarik maksimum dan tegangan luluh bahan masing-masing akan meningkat sebesar 4 dan 13 %. Sedangkan kekerasan akan meningkat cukup signifikan yaitu sebesar 88 %. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa persentase zircon yang memberikan peningkatan *mechanical properties* paling baik adalah sebesar 15% [5].

Hasil pengujian kekuatan bending, kekerasan Vickers, ketahanan aus dan densitas komposit AMC seiring dengan peningkatan fraksi berat abu terbang (*fly ash*) meningkat sampai 5% berat, selebihnya terjadi penurunan. Aluminum dan abu terbang dikompaksi secara uniaksial dilanjutkan kompaksi secara isostatik dengan tekanan 100 MPa dan diikuti sintering tanpa tekanan dengan lingkungan gas argon. Kekuatan bending, kekerasan Vickers, porositas dan laju keausan berturut-turut 74 MPa, 66 VHN, 4,5% dan 0,04 mg/(MPa.m) [6].

Penelitian karakteristik komposit dengan matrik CuAl diperkuat keramik SiCdengan metode metalurgi serbuk, dikompaksi dengan tekanan 180 MPa dan disinter pada variasi temperatur 650°C, 700°C, 750°C dan 800°C selama 2 jam dengan laju pemanasan 200°C/jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan mikro tertinggi sebesar 80 MPa terjadi pada temperatur sinter 700°C. Selain itu, dari pengamatan struktur mikro terlihat bahwa

kekuatan komposit meningkat karena terbentuknya fase Al_2Cu [7].

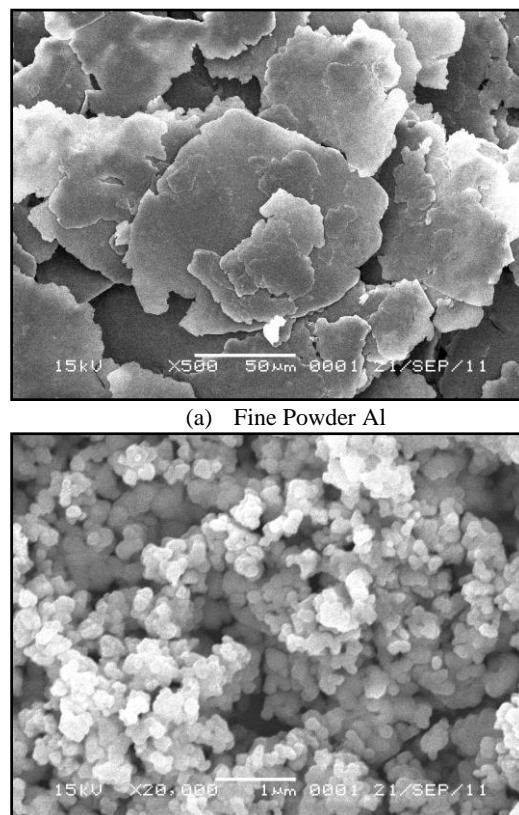
Penelitian *Aluminim Matrix Composite* (AMC) diperkuat serbuk zirconia (ZrO_2) dibuat dengan tekanan uniaksial sebesar 300 MPa dilanjutkan *hot extrusion* pada suhu 625°C. Penambahan zirconia meningkatkan nilai kekerasan AMC dari 66 kg/mm² menjadi 72 kg/mm² pada 2,5% ZrO_2 dan 74 kg/mm² pada 15% ZrO_2 . Penambahan ZrO_2 menurunkan laju keausan AMC dari $85,22 \times 10^{-3}$ mg/MPa.m menjadi $31,63 \times 10^{-3}$ mg/MPa.m pada 2,5% ZrO_2 dan relatif konstan untuk penambahan ZrO_2 selanjutnya [8].

Zirconia (ZrO_2) adalah salah satu bahan yang mempunyai prospek cukup baik untuk digunakan sebagai penguat. Hal ini karena ZrO_2 memiliki kelebihan antara lain kekerasan tinggi, titik leleh tinggi, kekuatan tinggi dan bahan komposit dengan ketangguhan tinggi [9].

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penambahan partikel zirconia (ZrO_2) sebagai penguat komposit *Aluminum Matrix Composite*(AMC) terhadap densitas relatif, kekuatan bending dan ketangguhan impak dibuat dengan metode *hot extrusion*.

Metode Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk alumuniumpaduan Al-SI-Cu buatan Merck (Jerman) sebagai matrik dan serbuk ZrO₂yang distabilkan dengan 3% mol Yttria (Y₂O₃) yang dikenal dengan 3Y-TZP (*Tetragonal Zirconia Polycrystal Stabilized with 3% mol Y₂O₃*) dengan ukuran partikel rata-rata 0,01-2 µm sebagai penguat. Serbuk ZrO₂divariasi dengan fraksi berat 0%; 2,5%; 5%; 7,5%; 10%; 12,5% dan 15% dicampur dengan serbuk alumunium menggunakan *turbula mixer* selama 2 jam. Sebelum dicampur, serbuk ZrO₂dipanaskan pada oven dengan suhu 100°C untuk menghindari terjadinya aglomerasi/ penggumpalan.



Gambar 1. Serbuk yang digunakan penelitian (a) perbesaran 500 x, (b) perbesaran 2000x (saat pengambilan gambar)

Campuran serbuk aluminium dan ZrO₂kemudian dibuat *green body* berdiameter 12 mm dan panjang 25 mm dengan cara dikompaksi secara *uniaxial* pada tekanan 300 MPa. Selanjutnya *green body* dimasukkan dalam *dies* extruder dengan ujung berdiameter 7 mm kemudian dipanaskan sampai suhu 625°C dan *holding time* selama 30 menit dan ditekan sampai keluar dari *dies*. Benda uji hasil ekstrusi diuji *bulk density*, kekerasan Vickers, laju keausan dan mikrostruktur.

Prinsip Archimedes digunakan untuk mengukur *bulk density*, yaitu dengan cara menimbang benda uji didalam fluida (raksa) dan di udara. Densitas benda uji dapat dihitung sebagai berikut:

Dimana ·

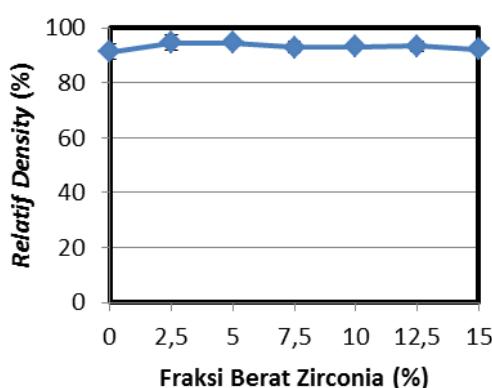
ρ_s = berat jenis spesimen (g.cm^{-3})

ρ = berat jenis fluida (g cm^{-3})

W = berat spesiman di udara (g)

W_{udara} = berat spesimen di udara (g)
 W_{fluida} = berat spesimen pada fluida (g)

Berat jenis relatif diukur dengan membandingkan antara berat jenis hasil pengujian dengan berat jenis teoritis.



Gambar 3. Pengaruh fraksi berat ZrO₂ terhadap densitas relatif komposit Al-ZrO₂

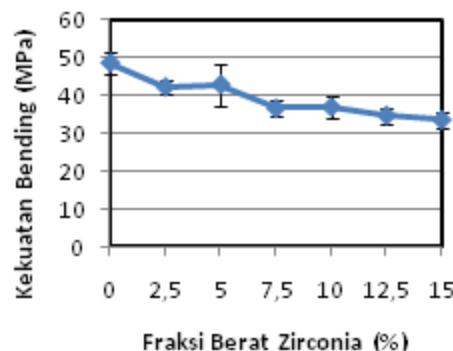
Densitas relatif akan semakin turun seiring dengan penambahan fraksi berat partikel ZrO₂. Ini berarti pori-pori pada specimen sedikit meningkat. Pengaruh tersebut disebabkan pada saat kompaksi, partikel lunak mengalami deformasi plastis sedangkan partikel keras hanya mengalami deformasi elastic [4]. Pada penelitian ini campuran komposit adalah alumunium sebagai matriks bersifat lunak sedangkan ZrO₂ sebagai penguat bersifat keras (12,5 GPa - VHN). Jika campuran bahan ini dikompaksi, serbuk alumunium mengalami deformasi plastis, sedang ZrO₂ mengalami deformasi elastis. Setelah proses kompaksi selesai maka partikel keras akan kembali ke kondisi semula, sehingga akan menimbulkan tekanan pada partikel lunak yang telah terdeformasi plastis. Akibatnya pada batas butir antar partikel Al akan terjadi peregangan sehingga porous menyebar di antara batas tersebut. Selain itu, perbedaan ukuran serbuk antara matriks dan penguat yang cukup tinggi menyebabkan posisi partikel penguat hanya akan menempel pada permukaan matriks. Kondisi ini berakibat pada penurunan densitas relatif, karena jumlah porous cenderung tidak berkurang. Padahal secara teoritis berat komposit Al-ZrO₂ akan meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi berat ZrO₂ karena densitas penguat yang lebih besar.

Penyebab lain menurunnya densitas dengan bertambahnya jumlah ZrO₂ adalah antar partikel ZrO₂ yang bersentuhan/bergerombol tidak terjadi sinter. Temperatur ekstrusi dalam penelitian ini adalah 625°C sedang untuk terjadinya sinter antar partikel ZrO₂ diperlukan temperatur yang lebih tinggi lagi ($\pm 1450^\circ\text{C}$) [9]. Kondisi ini menyebabkan terjadinya gumpalan-gumpalan partikel ZrO₂ pada permukaan matriks alumunium yang disebut *clustering*. Berkumpulnya partikel ZrO₂ di beberapa bagian ini mengindikasikan bahwa proses pencampuran serbuk (*mixing*) antara partikel matriks dan penguat belum sempurna, dan sifat ZrO₂ yang mudah teraglomerasi.

Pengujian Bending dilakukan dengan metode four point bending dengan laju pembebahan 10 mm/menit sebanyak 3 spesimen tiap variasi. Data hasil pengujian penambahan fraksi berat ZrO₂ terhadap kekuatan bending komposit Al-ZrO₂ disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 4.

Tabel 2 Hasil Pengujian Kekuatan Bending Komposit Al-ZrO₂

Fraksi Berat ZrO ₂ (%)	Nilai Modulus of Rupture (MPa)	Standar Deviasi (MPa)
0	48,57	2,90
2,5	42,17	4,40
5	42,83	5,63
7,5	36,56	2,20
10	36,94	3,08
12,5	34,71	2,16
15	33,53	2,29



Gambar 4. Pengaruh fraksi berat ZrO₂ terhadap kekuatan bending komposit Al-ZrO₂

Penambahan fraksi berat zirconia menurunkan kekuatan bending komposit dari 48,57 MPa menjadi 42,17 MPa dan 42,83 MPa pada fraksi berat 2,5% dan 5% serta semakin kecil untuk penambahan fraksi berat selanjutnya. Kekuatan bending dipengaruhi oleh gaya maksimum yang mampu ditahan sebelum patah dan momen inersia penampang material. Penurunan kekuatan bending disebabkan adanya porous yang terbentuk pada komposit yang semakin banyak seiring bertambahnya jumlah partikel ZrO₂. Suhu lebur ZrO₂ sangat tinggi $+ 2700^\circ\text{C}$ sehingga pada suhu 625°C belum tersinter dengan baik akibatnya ikatan antara matriks alumunium dengan ZrO₂ sangat lemah. Adanya porous dapat diketahui dari menurunnya *relative density*. Peningkatan *relative density* sampai penambahan ZrO₂ sampai 5% belum dapat mengindikasikan kekuatan ikatan matriks dengan penguat. Adanya porous dan retak akan mengurangi kekuatan bending karena menimbulkan konsentrasi tegangan yang semakin tinggi. Perbedaan koefisien muai panas antara partikel zirconia dengan alumunium menyebabkan terjadinya tegangan sisa tekan pada permukaan

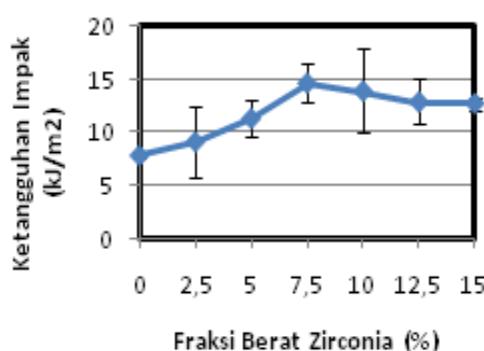
interface antara penguat dengan matrik sehingga menurunkan kekuatan komposit [8].

Hasil Pengujian Ketangguhan Impak

komposit mengalami peningkatan seiring dengan penambahan partikel penguat ZrO_2 sampai 7,5% ZrO_2 namun selanjutnya mengalami menurunan. Data hasil pengujian keausan dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 5.

Tabel 3. Hasil pengujian pengaruh fraksi berat ZrO_2 terhadap ketangguhan impak komposit Al-Zr O_2

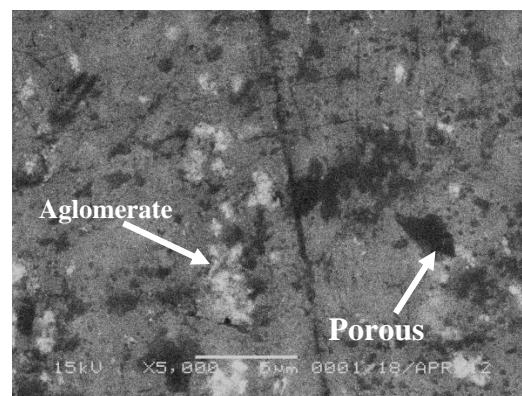
Fraksi Berat ZrO_2 (%)	Energi Impak (kJ)	Ketangguhan Impak (kJ/m ²)	Standar Deviasi (kJ/m ²)
0	0,128	7,81	0,32
2,5	0,174	9,11	3,40
5	0,185	11,31	1,73
7,5	0,231	14,64	1,81
10	0,231	13,89	3,95
12,5	0,219	12,87	2,13
15	0,196	12,73	0,62



Gambar 5. Pengaruh fraksi berat ZrO_2 terhadap laju keausan komposit Al-Zr O_2

Peningkatan ketangguhan impak maksimum terjadi pada penambahan fraksi berat ZrO_2 7,5% yaitu sebesar 14,64 kJ/m², penambahan ZrO_2 selanjutnya menurunkan ketangguhan impak. Peningkatan ketangguhan impak disebabkan karena penambahan fraksi berat dapat mengurangi porositas yang diketahui dari peningkatan *relative density* sampai penambahan 5% zirconia. Penambahan zirconia selanjutnya menghasilkan *relative density* turun karena jumlah porous semakin banyak yang juga mempengaruhi ketangguhan impak. Peningkatan jumlah porous memicu retak dan akan menurunkan ketangguhan impak yang dimiliki. Hasil pengamatan struktur mikro juga menunjukkan pada fraksi berat yang lebih besar muncul *agglomerate* zirconia dimana ikatannya

sangat lemah karena antar butiran belum tersinter dengan baik seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Foto mikro komposit Al-Zr O_2 pada 5% ZrO_2 dan suhu ekstrusi 625°C

Penambahan bahan penguat dimanfaatkan untuk meningkatkan kekuatan sehingga komposit dapat menanggung beban yang lebih besar. Penguat juga dapat meningkatkan ketangguhan material sehingga energi yang diperlukan untuk mengawali dan merambatkan patah semakin banyak. Ketangguhan merupakan ukuran energi yang diperlukan untuk menimbulkan perpatahan akibat beban. Peningkatan ketangguhan lebih signifikan terjadi ketika mikrostruktur mengharuskan perpatahan merambat melintasi fasa-fasa ulet. Pergerakan ini menghasilkan regangan berlangsung tanpa perpatahan sehingga meningkatkan luas daerah dibawah kurva tegangan-regangan dan keuletan diujung retak mengurangi konsentrasi tegangan akibatnya energi patah yang diperlukan semakin besar. Hal ini seperti mendispersikan fasa penguat yang lebih keras di dalam matrik ulet. Selain itu peningkatan energy patah dapat ditingkatkan dengan memberikan regangan semu (*apparent strain*) melalui pembentukan mikroretak. Regangan semu akan terbentuk dengan banyaknya perpindahan kecil yang terjadi saat daerah yang terpengaruh bertambah luas dan meningkatkan hasil kali tegangan-regangan sehingga meningkatkan energi patah yang diperlukan.

Penurunan ketangguhan impak selain disebabkan karena porous yang semakin banyak seiring bertambahnya partikel ZrO_2 juga dipengaruhi material penguatnya. Kekerasan partikel penguat yang tinggi mengakibatkan sifat komposit Al-Zr O_2 menjadi cenderung getas. Pada saat perambatan retak bertemu dengan material penguat, retak akan bergeser mencari daerah yang ikatannya lebih lemah baik antara matrik dengan penguat maupun diantara penguat-penguat. Pada fraksi berat yang lebih besar dari 5% terdapat agglomerate antar penguat yang ikatannya lemah dibandingkan ikatan antara matrik aluminium

dengan penguat zirconia. Hal ini menyebabkan energi perambatan retak komposit Al-ZrO₂ pada fraksi berat kurang dari 5% mengalami peningkatan, sehingga ketangguhan material menjadi meningkat. Ikatan *agglomerate* antar partikel zirconia lebih lemah karena suhu sinternya sangat tinggi sehingga energi perambatannya lebih kecil, akibatnya ketangguhan material semakin berkurang.

Kesimpulan

1. Penambahan partikel ZrO₂ dapat meningkatkan densitas actual dan densitas relatif dengan densitas relatif tertinggi pada fraksi berat 2,5% sebesar 94,621%.
2. Pada suhu ekstrusi 625°C, penambahan partikel penguat ZrO₂ menurunkan kekuatan bending komposit Al-ZrO₂. Komposit 0% ZrO₂ memiliki kekuatan bending 48,57 MPa dengan penambahan fraksi berat sampai 5% ZrO₂ kekuatan bending menjadi 42,83 MPa dan selanjutnya semakin rendah. Keberadaan porous semakin banyak akan menurunkan kekuatan bending.
3. Pada suhu ekstrusi 625°C, penambahan partikel penguat ZrO₂ meningkatkan ketangguhan impak komposit Al-ZrO₂ dengan nilai ketangguhan impak tertinggi pada penambahan 7,5 % ZrO₂ sebesar 15 kJ/m² dan penambahan selanjutnya cenderung turun. Peningkatan ketangguhan karena porous semakin kecil. Pada fraksi berat lebih tinggi, porous semakin banyak akibat terjadi agglomerasi dimana butiran zirconia belum tersinter dengan baik.

Referensi

- [1] Hadi BK., "Mekanika Struktur Komposit", Penerbit ITB, Bandung, 2000.
- [2] Rawal S., "Metal Matrix Composites for SpaceApplications", Journal JOM pp 14-17, 2001.
- [3] Schwartz, M. M., 1984, *Composite MaterialsHand Book*, McGraw Hill, New York.
- [4] German, R.M., 1984, "Powder Metallurgy Science", Metal Powder Industries Federation, Princeton New Jersey.
- [5] Ejiofor, J.U., Okorie B.A. dan Reddy R.G., 1997, "Powder Processing and Properties of Zircon-Reinforced Al-13,5Si-2.5Mg Alloy Composite", Journal of Materials Engineering and Performance Vol 6 (No.3) : p326-334
- [6] Subarmono, Jamasri, M.W. Wildan dan Kusnanto., 2008, "Pemanfaatan Limbah Abu Terbang Sebagai Penguat Aluminum Matrix Composite", Jurnal Teknik Mesin Universitas Kristen Petra Surabaya Vol. 10 No. 2 :109-114
- [7] Wang, H., Rui Z., Xing H., Chang-An W., dan Yong H., 2008, "Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu-Al composite", Journal of Materials Processing Technology Vol. 197 : p43-48
- [8] Rahman, M.B.N., M.W. Wildan, Subarmono, 2011, "Kekerasan Dan Laju Keausan Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Dengan Keramik Zirconia (ZrO₂) Yang Dibuat Dengan Metode Hot Extrusion", Prociding Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII) VI, STTNAS Yogyakarta,
- [9] Barsoum, M.W., 1997, "Fundamental of Ceramics", Mc Graw-Hill Book Co New York.