

Pengaruh Penambahan Partikel Penguat Zirkonia (ZrO_2) terhadap Karakteristik Komposit Bermatriks Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu setelah Pengerasan Penuaan untuk Aplikasi Balistik

Socania Titi Nayoka, Nuzulian Akbar Arandana, dan Bondan Tiara Sofyan^{a)}

Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia, Depok.

^{a)} bondan@eng.ui.ac.id

Abstract.

One of the main requirement for tactical vehicle is bulletproof to ensure the safety of troops inside the vehicle. Common material for tactical vehicle is steel-based material, that has high toughness but heavy, which impedes its mobility. Aluminum composite is being developed for tactical vehicle because it is lighter than steel but still having high toughness. Zirconia (ZrO_2) particulate is added to aluminum matrix as reinforcement due to has high fracture toughness. Heat treatment is given to aluminum composite to improve mechanical properties. In this research, Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu (wt.%) composite with addition of 5, 7.5, and 10 vol.% ZrO_2 particulate were fabricated by squeeze casting. To gain higher toughness toward ballistic impact, the composite was solution treated at 450 °C for 1 hour, then aged at 200 °C. Material characterizations consisted of Rockwell B hardness testing to construct ageing curve, impact testing, fractography analysis, microstructure analysis using optical microscope and Scanning Electron Microscope (SEM), and microanalysis using Energy Dispersive X-Ray (EDX). The composite was then tested by SPR-1 rifle with 7.62 mm bullet from the distance of 15 m. The results showed that the composite fabricated did not have uniform characteristics all over the sample. Based on the material testings which had done, highest hardness was achieved by 7.5 vol.% ZrO_2 , with the value of 71.48 HRB. Addition of ZrO_2 did not affect significantly to the impact value. Observation of microstructure by using optical microscope showed that there was no zirconia found in the matrix. Based on the SEM observation, ZrO_2 clustered and initiated porous. Ballistic testing was done to three layers of 7.5 vol.% ZrO_2 strengthened with silicon content: 4.03 (layer 1), 6.94 (layer 2), dan 1.50 (layer 3). Those composite were not able to withstand 7.62 mm bullet penetration.

Keywords: aluminum composite; ZrO_2 reinforcement; age hardening; ballistic

1 PENDAHULUAN

Salah satu perlengkapan Tentara Nasional Indonesia (TNI) untuk menjaga kedaulatan Negara Kesatuan Republik Indonesia adalah kendaraan taktis. Kendaraan taktis untuk keperluan bertempur harus berasal dari material yang kuat dan tangguh agar mampu mengangkut pasukan dan menahan beban kejut berupa tembakan peluru. Kendaraan taktis yang dimiliki Indonesia saat ini kebanyakan berbahan baja. Baja merupakan material yang tangguh, namun baja memiliki massa jenis yang tinggi mengakibatkan baja termasuk material berat. Hal tersebut tentu akan berpengaruh pada konsumsi bahan bakar yang tinggi dan memperlambat pergerakan kendaraan taktis.

Untuk mengatasi masalah tersebut, diperlukan material yang sekuat baja namun memiliki berat jenis yang lebih ringan. Salah satunya adalah komposit bermatriks logam dengan densitas rendah, seperti aluminium. Komposit

bermatriks logam dapat digunakan sebagai material dasar kendaraan taktis karena terbukti memiliki ketangguhan yang baik dan bersifat tahan peluru. Pada penelitian sebelumnya, Rahmalina, *et.al*^[1] telah berhasil memmanufaktur material komposit Al/SiC yang tahan terhadap beban balistik peluru tipe I (kaliber 0.38 sp) dan tipe II (kaliber 9 mm). Komposit tersebut masih belum mampu menahan penetrasi peluru pada pengujian balistik tipe IIIA (kaliber 5.56 mm). Dari uraian ini maka diperlukan penguat yang dapat meningkatkan ketangguhan material komposit aluminium, salah satunya adalah zirkonia (ZrO₂).

Zirkonium oksida atau zirkonia merupakan material keramik yang mengalami alotrofik. Zirkonia mengalami transisi fasa alotrofik dari monoklinik menjadi tetragonal pada temperatur 1000~1200 °C, dan dari tetragonal menjadi kubik pada temperatur 2370 °C^[2]. Beberapa jenis oksida yang larut dalam struktur kristal zirkonia dapat menghilangkan atau mengurangi perubahan struktur kristal tersebut, seperti MgO, CaO, dan Y₂O₃.

Zirkonia memiliki ketangguhan terhadap retakan yang tinggi. Sifat mekanik ZrO₂ tersebut lebih baik dibandingkan dengan SiC, sehingga diharapkan material komposit ini memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengujian balistik. Penelitian mengenai komposit Al/ZrO₂ telah dilakukan oleh Hemanth, *et.al*^[3]. Penambahan 6-12 % nano-ZrO₂ pada Al-0.5Mn-0.5Zn-1.0Fe-1.4Mg-1.5Ni-12Si terbukti mampu meningkatkan ketangguhan terhadap retakan (*fracture toughness*) aluminium.

Penelitian terhadap komposit Al/ZrO₂ telah dilakukan oleh beberapa peneliti untuk aplikasi non-balistik. Abdizadeh, *et.al*^[4] menginvestigasi sifat mekanik dan perilaku perpatahan dari komposit A356 berpenguat zirkonia. Serbuk zirkonia yang digunakan dalam penelitian ini distabilisasi dengan yttria (Y₂O₃). Kekerasan material komposit ini terbukti lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan paduan A356. Koefisien ekspansi termal partikel keramik lebih rendah dibandingkan dengan paduan aluminium (koefisien ekspansi termal aluminium dan zirkonia masing-masing $24 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ dan $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), sehingga dislokasi dihasilkan pada antar muka matriks dan partikel selama proses solidifikasi yang dapat meningkatkan kekerasan matriks. Pada penambahan 0-5 % ZrO₂, kadar penguat merupakan faktor yang dominan terhadap kekerasan material komposit. Penambahan kadar zirkonia melebihi 10 % faktor utama yang berpengaruh terhadap kekerasan material komposit adalah kandungan *void*.

Berdasarkan hal tersebut diatas, penelitian ini difokuskan pada manufaktur komposit tahan peluru dengan matriks Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat partikel ZrO₂ 5, 7.5, dan 10 vol.% yang dikenai proses pengerasan penuaan. Kemudian akan dilihat kekerasan, kekuatan impact, struktur mikro, dan ketahanan balistik komposit ini untuk mengetahui kelayakan komposit ini untuk dikembangkan sebagai material penyusun kendaraan taktis.

2 MATERIAL DAN METODE

2.1 MATERIAL

Material sebagai bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah logam Al murni (99.99%), Zn berkadar 99.995%, Cu 99.9%, Mg dengan kemurnian 99.902%, dan silikon yang berasal dari *master alloy* Al-5Si. Penguat partikel ZrO₂ berasal dari Cica-Reagent, Kanto Chemical Co.,Inc., Tokyo, Japan, dengan kadar kemurnian minimal 99.0%.

2.2 METODE

Aluminium murni, *master alloy* Al-Si, dan tembaga (Cu) dicampur dalam *crucible* dan dilakukan peleburan dalam *melting furnace* pada temperatur 850-870 °C. Setelah mencapai temperatur pelelehan, proses *degassing* kemudian dilakukan dengan gas argon yang dilanjutkan dengan penambahan elemen Zn dan Mg. Partikel ZrO₂ yang telah dipanaskan pada temperatur 1000 °C selama 1 jam kemudian dimasukkan kedalam lelehan dan diaduk dengan kecepatan 5000 rpm selama 2 menit. Kemudian campuran tersebut dituang ke dalam cetakan logam berdimensi 170 x 170 x 15 mm dan diberi tekanan dengan menggunakan pompa hidrolik sebesar 76 MPa selama 10-15 menit. Hasil pengujian komposisi sampel pelat dengan *Optical Emission Spectroscopy* (OES) disajikan pada Tabel 1.

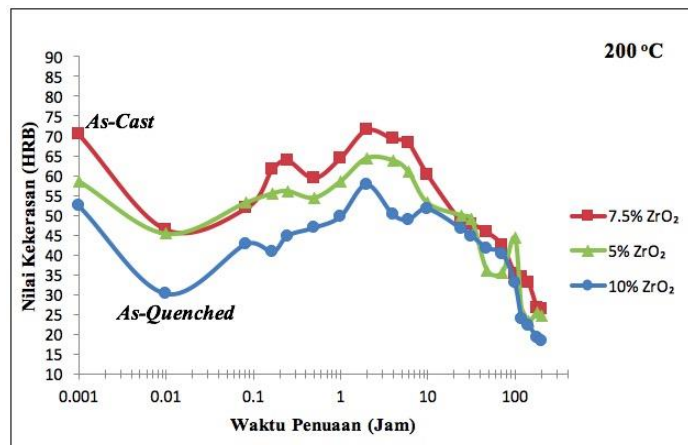
Sampel hasil pengecoran kemudian dilakukan laku pelarutan pada temperatur 450°C selama satu jam. Kemudian sampel dilakukan pendinginan cepat didalam air. Sampel *as-quenched* selanjutnya dimasukkan kedalam *muffle furnace* untuk dilakukan pengerasan penuaan buatan (T6) pada temperatur 200°C selama 5 menit hingga 200 jam. Kekerasan sampel setelah penuaan diamati dengan alat uji Rockwell B. Karakterisasi sampel setelah penuaan

juga meliputi uji impak, pengamatan struktur mikro saat kondisi penuaan awal, penuaan puncak, dan penuaan berlebih dengan menggunakan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan etsa HF 0.5%, pengujian komposisi mikro dengan *Energy-dispersive X-Ray* (EDX). Sampel untuk pengujian balistik berukuran 100 x 100 x 15 mm dan telah dilapisi dengan partikel WC-Co setebal 200-250 μm melalui metode pelapisan *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF). Pengujian balistik tipe III pada sampel mengacu pada standar NIJ (*National Institute of Justice*) 0108.01 dengan senjata SPR-1, peluru kaliber 7.62 mm, dan jarak tembak 15 meter.

TABEL 1. Komposisi matriks komposit hasil *squeeze casting*.

Unsur	Komposisi (wt.%)		
	Sampel I (5 vol.% ZrO ₂)	Sampel II (7.5 vol.% ZrO ₂)	Sampel III (10 vol.% ZrO ₂)
Zn	11.5894	12.9119	15.1031
Mg	4.7627	5.4576	8.9189
Si	6.7190	6.9387	6.3577
Cu	1.3691	1.3263	1.4340
Fe	0.5539	0.4539	0.3602
Mn	0.0715	0.0727	0.0947
Ti	0.0082	0.0094	0.0196
Cr	0.0113	0.0077	0.0162
Ni	0.0097	0.0789	0.6248
Pb	0.0044	0.0063	0.0696
Sn	0.0011	0.0026	0.0789
Al	Bal.	Bal.	Bal.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN



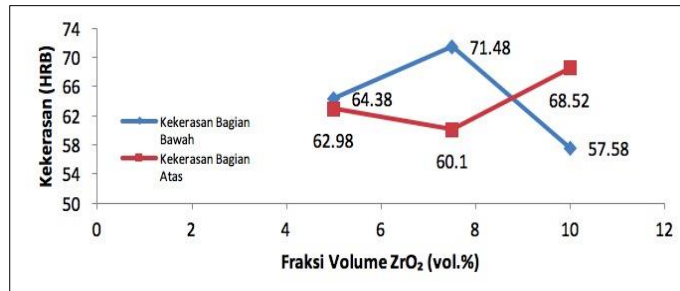
GAMBAR 1. Kurva penuaan pada temperatur 200 °C komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat ZrO₂ dengan variasi fraksi volume 5, 7.5, dan 10 vol%.

Gambar 1 menunjukkan kurva penuaan komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu dengan variasi penguat partikel ZrO₂ sebanyak 5, 7.5, dan 10 vol.% hasil laku pelarutan pada temperatur 450 °C selama 1 jam dan diikuti dengan penuaan pada temperatur 200 °C. Pada kondisi *as-cast*, penambahan 7.5 vol.% ZrO₂ menyebabkan kekerasan komposit menjadi 70.5 HRB. Nilai kekerasan tersebut jauh lebih tinggi jika dibandingkan komposit dengan penambahan 5 dan 10 vol.% ZrO₂ yang menghasilkan kekerasan masing-masing sebesar 58.6 dan 52.3 HRB. Hal ini

sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Abdizadeh, *et.al*^[4]. Dalam penelitian tersebut juga menyebutkan bahwa penambahan partikel ZrO_2 lebih dari 10 vol.% akan menurunkan kekerasan sebab partikel yang lebih banyak akan menginisiasi terbentuknya rongga.

Variasi jumlah partikel ZrO_2 yang ditambahkan juga tidak memengaruhi urutan kekerasan komposit saat kondisi penuaan puncak. Kekerasan saat penuaan puncak dengan fraksi volume ZrO_2 5, 7.5, dan 10 vol.% masing-masing adalah 64.38, 71.48, dan 57.58 HRB. Tidak terjadi peningkatan kekerasan yang signifikan saat kondisi *as-cast* dan kekerasan puncak. Hal ini dimungkinkan temperatur laku pelarutan kurang tinggi untuk mampu melarutkan seluruh fasa kedua dalam matriks paduan^[5].

Pada penelitian ini, komposit tidak berada dalam keadaan homogen sehingga penuaan dilakukan kembali pada bagian bawah pelat. Gambar 2 menunjukkan kekerasan pelat komposit pada bagian atas dan bawah saat penuaan puncak. Kekerasan pada bagian bawah pelat cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan kekerasan bagian atas pelat. Ini dimungkinkan karena partikel ZrO_2 tidak tersebar merata dalam pelat komposit.

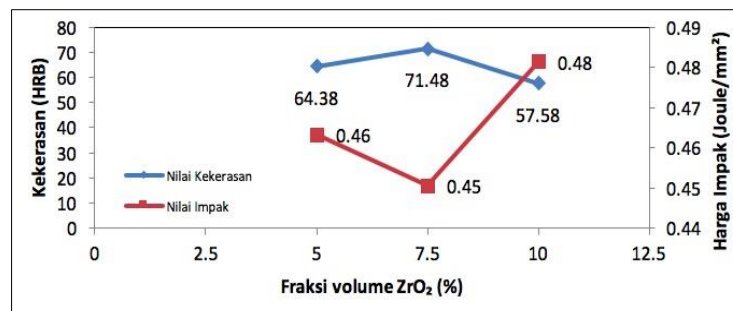


GAMBAR 2. Perbandingan kekerasan komposit pada bagian atas dan bagian bawah pelat.

TABEL 2. Perbandingan kekerasan bagian atas pelat hasil penelitian dan kekerasan teori (perhitungan hukum campuran) saat penuaan puncak.

Fraksi Volume ZrO_2 (vol.%)	Kekerasan Komposit Hasil Penelitian (HV)	Kekerasan Komposit Teori (HV)
5	115	202.94
7.5	131	223.44
10	103	243.95

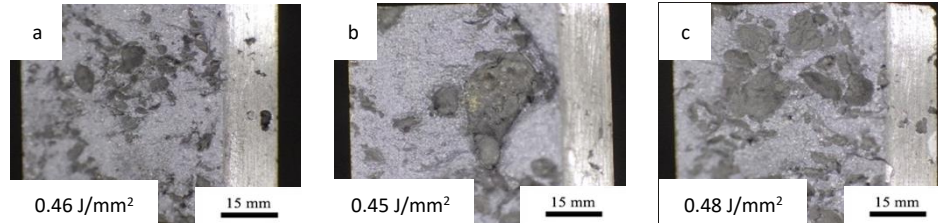
Perbandingan antara kekerasan komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat ZrO_2 pada bagian atas pelat hasil penelitian ini dan kekerasan hasil perhitungan hukum campuran komposit dengan matriks Al-7Zn berpenguat ZrO_2 ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil uji kekerasan komposit pada penelitian ini menunjukkan adanya deviasi yang sangat besar dengan kekerasan secara teori. Hal ini menunjukkan bahwa pada penelitian ini terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil kekerasan komposit sehingga kekerasan komposit saat penuaan puncak cukup rendah, seperti munculnya porositas dan adanya partikel ZrO_2 yang tertinggal dalam *crucible* pada proses pengecoran sehingga tidak sepenuhnya masuk ke dalam cetakan.



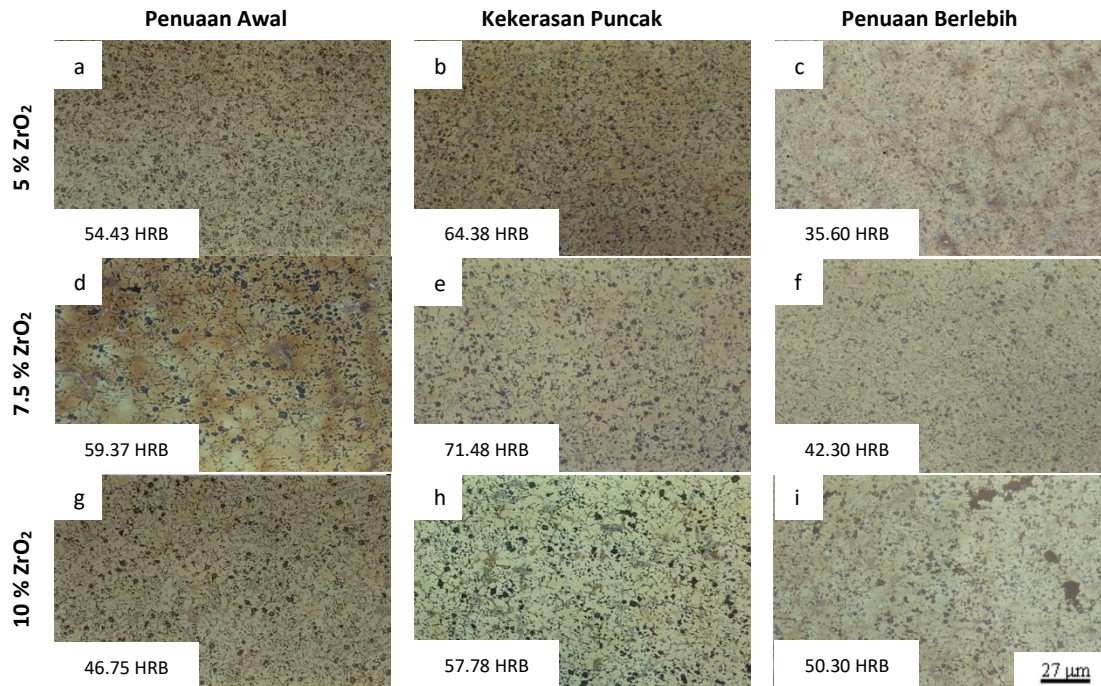
GAMBAR 3. Pengaruh fraksi volume partikel ZrO_2 terhadap harga impact dan kekerasan komposit bermatriks Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu pada kondisi penuaan puncak.

Gambar 3 menunjukkan harga impact komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat partikel ZrO_2 dan hubungannya dengan nilai kekerasan. Harga impact komposit dengan partikel penguat 5, 7.5, dan 10 vol.% ZrO_2

saat kondisi kekerasan puncak pada proses penuaan di temperatur 200 °C masing-masing adalah 0.46, 0.45, dan 0.48 Joule/mm². Terjadinya penurunan harga impact dari penambahan 5 vol.% penguat ZrO₂ menjadi 7.5 vol.% disebabkan karena peningkatan kekerasan komposit. Sedangkan pada penambahan partikel penguat ZrO₂ hingga 10 vol.%, harga impact komposit meningkat dan mencapai nilai paling tinggi diantara variasi penambahan partikel penguat ZrO₂ yang lain. Hal ini sesuai dengan fenomena dimana jika kekerasan dan kekuatan material meningkat, maka keuletan dan ketangguhan material tersebut akan menurun^[6]. Berdasarkan Gambar 4, bentuk perpatahan sampel hasil pengujian impact merupakan perpatahan getas karena tidak terlihat bentuk perpatahan berserat.



GAMBAR 4. Permukaan patahan hasil pengujian impact komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat partikel ZrO₂ dengan fraksi volume (a) 5, (b) 7.5, dan (c) 10 vol.% saat kondisi penuaan puncak

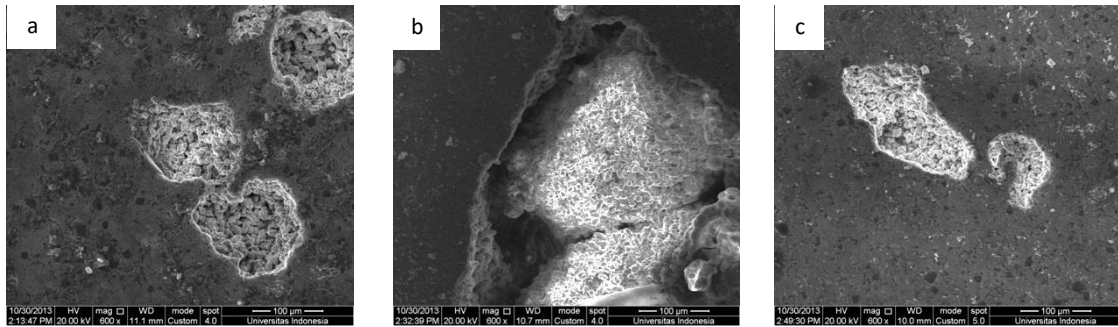


GAMBAR 5. Struktur mikro komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu dengan variasi penambahan partikel penguat ZrO₂ 5 vol.% (a-c), 7.5 vol.% (d-f), dan 10 vol.% (g-i) dengan perbesaran 100x pada kondisi penuaan awal, kekerasan puncak, dan penuaan berlebih.

Struktur mikro komposit Al/ZrO₂ selama penuaan pada 200 °C saat kondisi penuaan awal, puncak, dan berlebih dengan variasi penambahan partikel ZrO₂ sebanyak 5, 7.5, dan 10 vol.% diamati dengan menggunakan mikroskop optik (perbesaran 100x), hasilnya disajikan dalam Gambar 5. Struktur mikro menunjukkan tidak adanya partikel ZrO₂ yang tersebar didalam matriks. Keberadaan partikel ZrO₂ kemungkinan berada menggumpal dalam rongga, oleh karena itu akan dibuktikan lebih lanjut pada hasil pengamatan dengan SEM.

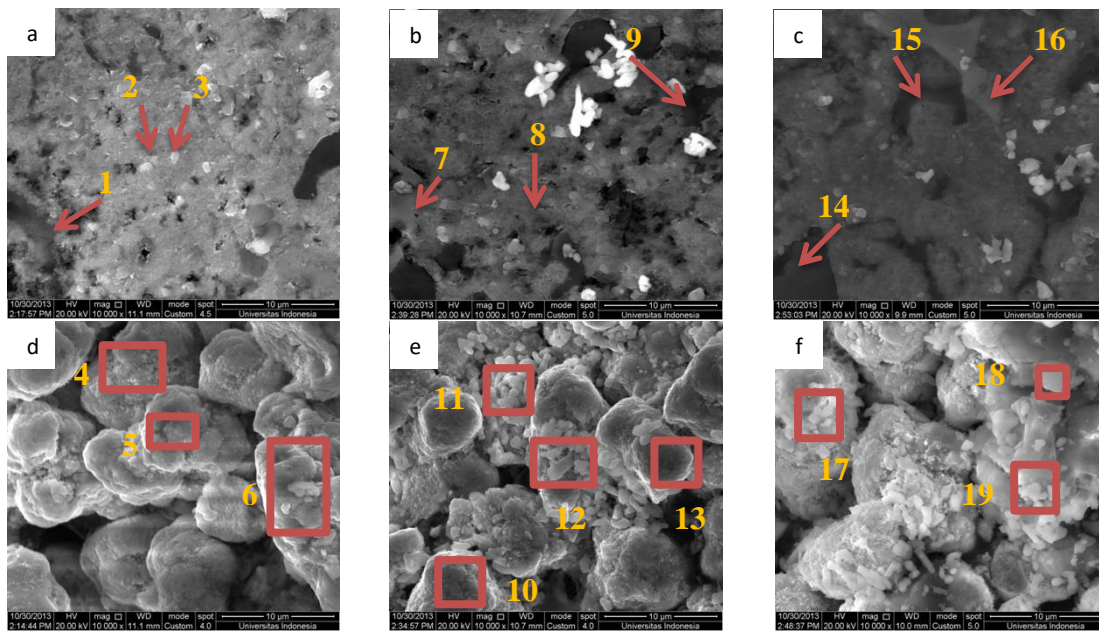
Hasil pengamatan sampel komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat partikel ZrO₂ dalam kondisi penuaan berlebih pada temperatur 200 °C ditampilkan dalam Gambar 6. Dari hasil foto mikro dengan mikroskop optik menunjukkan bahwa tidak tampak partikel ZrO₂ yang tersebar dalam matriks, setelah diamati dengan

menggunakan mikroskop elektron dengan perbesaran 600x, maka tampak rongga pada permukaan sampel dan berisi partikel yang diperkirakan adalah partikel ZrO_2 yang mengelompok.



GAMBAR 6. Pengamatan SEM pada komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat (a) 5 , (b) 7.5 , dan (c) 10 vol.% partikel ZrO_2 kondisi penuaan berlebih. Tampak rongga yang besar dan didalamnya terdapat segregasi partikel.

Gambar 7 merupakan fasa-fasa yang akan diuji komposisinya menggunakan EDX. Sedangkan Tabel 3 hingga Tabel 5 menunjukkan hasil persentase atom yang muncul pada fasa-fasa yang diamati. Secara umum, endapan yang terbentuk dalam kondisi penuaan berlebih pada temperatur $200^\circ C$ adalah Mg_2Si dan $MgZn_2$. Hasil pengamatan EDX pada semua variasi komposisi ZrO_2 tidak mendeteksi adanya atom Cu. Hal ini berarti tidak terdapat endapan seperti Al_2Cu dalam matriks. Hasil ini sejalan dengan penelitian Syarida, *et.al*^[7] bahwa penambahan Cu sebanyak 1 wt.% tidak akan memunculkan endapan berbasis Cu. Meskipun difusivitas Cu lebih tinggi dibandingkan dengan Zn dan Mg, namun jumlah Zn dan Mg yang jauh lebih banyak mengakibatkan endapan didominasi oleh Zn dan Mg.



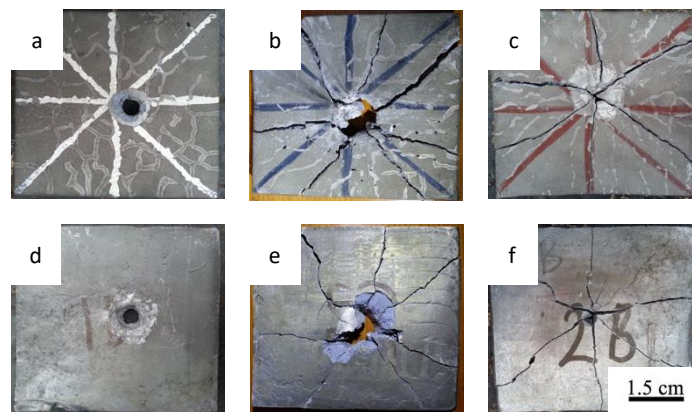
GAMBAR 7. Foto mikro komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu dengan penguat ZrO_2 (a-d) 5 vol.%, (b-e) 7.5 vol.%, dan (c-f) 10 vol.% dalam kondisi penuaan berlebih dengan menggunakan SEM dan beberapa titik untuk diuji komposisi menggunakan EDX. Gambar a, b, c adalah matriks komposit. Gambar d, e, f adalah kumpulan partikel ZrO_2 .

Pengujian balistik dilakukan hanya satu kali dengan tiga lapis sampel. Ketiga sampel tersebut memiliki kandungan silikon 1.50, 4.03, dan 6.94 wt.% dan partikel ZrO_2 sebanyak 7.5 vol.%. Pelapisan dengan partikel WC-Co melalui metode *high velocity oxygen fuel* (HVOF) dilakukan pada tiga sampel yang masing-masing mengandung 1.50, 4.03, dan 6.94 wt.% Si terlebih dahulu dan menghasilkan retakan pada permukaan sampel-sampel tersebut

setelah dilapisi. Sedangkan Pengujian balistik pada tiga lapis komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu berpenguat 7.5 vol.% ZrO₂ penelitian ini tidak dilakukan.

TABEL 3. Komposisi unsur hasil pengujian EDX untuk sampel dengan partikel ZrO₂ 5, 7.5, dan 10 vol.% saat penuaan berlebih, penjelasan Gambar 7 (a-f)

Titik ke-	Rata-rata Unsur (%atom)									Fasa yang Mungkin ^[4]
	Zn	Mg	Si	Cu	O	Zr	Al	Fe	Na	
1	2,86	0,96	19,91	0,15	32,70	-	43,42	-	-	MgZn ₂
2	4,41	0,55	-	-	21,75	-	73,29	-	-	MgZn ₂ , Al ₂ O ₃
3	3,78	0,64	-	0,03	26,48	-	69,06	-	-	MgZn ₂ , Al ₂ O ₃
4	-	-	-	-	64,32	34,08	1,60	-	-	ZrO ₂
5	-	0,43	-	-	63,94	31,75	3,88	-	-	ZrO ₂
6	-	0,54	-	-	65,50	20,99	12,98	-	-	ZrO ₂ , Al ₃ Zr
7	1,15	1,08	69,35	-	7,70	-	20,71	-	-	Matriks Al
8	3,79	0,74	-	-	31,16	0,27	64,04	-	-	MgZn ₂ , Mg ₃ Zn ₃ Al ₂
9	0,68	26,65	27,88	-	35,76	-	9,03	-	-	Mg ₂ Si
10	-	0,77	-	-	68,61	28,75	0,87	-	-	ZrO ₂
11	-	0,54	-	-	68,12	6,90	24,44	-	-	ZrO ₂ , Al ₃ Zr, Al ₂ O ₃
12	-	1,53	-	-	67,69	11,01	19,77	-	-	ZrO ₂
13	-	1,23	-	-	59,83	37,06	1,88	-	-	ZrO ₂
14	0,42	22,23	31,63	-	41,50	-	4,23	-	-	Mg ₂ Si
15	2,64	6,88	22,26	-	35,15	-	33,07	-	-	Mg ₂ Si
16	-	-	14,70	-	-	-	70,98	10,09	4,24	Fe ₂ SiAl ₈
17	0,51	0,83	-	-	69,50	22,96	6,21	-	-	ZrO ₂
18	1,68	2,46	2,71	-	64,47	1,78	26,90	-	-	ZrO ₂ , Al ₃ Zr
19	0,69	1,18	1,28	-	64,25	6,13	26,46	-	-	ZrO ₂ , Al ₃ Zr



GAMBAR 8. Tampak depan dan belakang (a-d) pelat lapisan pertama, (b-e) pelat lapisan kedua, dan (c-f) pelat lapisan ketiga komposit Al/ZrO₂ yang telah mengalami penuaan puncak pada 200 °C selama 2 jam dan pelapisan permukaan setelah pengujian balistik tipe III (kaliber 7.62 mm).

Tampak depan dan belakang pelat komposit yang telah diuji balistik disajikan pada Gambar 8. Kekerasan yang dimiliki pelat lapisan pertama (62.40 HRB), kemudian pelat lapisan kedua (71.48 HRB), dan pelat lapisan ketiga (72.90 HRB). Sedangkan harga impact pelat hampir sama, secara berturut-turut yaitu 0.469 J/mm², 0.450 J/mm², dan 0.454 J/mm². Hasil pengujian menunjukkan pelat lapisan pertama tampak berlubang, pelat lapisan kedua retak dan hancur menjadi tujuh bagian dan terlihat jejak peluru yang menembus pelat tersebut. Sedangkan pelat lapisan ketiga juga mengalami retak dan hancur menjadi enam bagian, namun pada bagian belakang hanya terlihat adanya lekukan karena bekas deformasi impact pada bagian belakang pelat.

4 KESIMPULAN

Secara umum, dapat ditarik kesimpulan bahwa material komposit Al-13.20Zn-6.38Mg-6.67Si-1.38Cu dengan penambahan variasi penguat 5, 7.5, dan 10 % partikel ZrO₂ berada dalam keadaan tidak homogen. Namun berdasarkan pengujian yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Kekerasan puncak komposit dicapai pada temperatur 200 °C selama 2 jam untuk seluruh variasi penambahan partikel penguat 5, 7.5, dan 10 % ZrO₂.
2. Saat penuaan puncak pada temperatur 200 °C, penambahan 5, 7.5, dan 10 % partikel penguat ZrO₂ masing-masing menghasilkan kekerasan 64.38, 71.48, dan 57.58 HRB. Turunnya kekerasan dari penambahan 7.5 ke 10 % partikel ZrO₂ disebabkan oleh porositas yang lebih tinggi.
3. Harga impact komposit aluminium berpenguat 5, 7.5, dan 10 % masing-masing adalah 0.46, 0.45, dan 0.48 J/mm² pada kondisi penuaan puncak di suhu 200 °C. Terdapat rongga-rongga pada permukaan patahan komposit hasil pengujian impact. Bentuk perpatahan komposit ini adalah perpatahan getas.
4. Kondisi sampel tidak homogen, terdapat banyak porositas, sehingga tidak dapat disimpulkan bahwa kekerasan maksimal dan harga impact yang akurat pada penuaan puncak akan dicapai saat penambahan fraksi volume 5, 7.5, atau 10 % partikel ZrO₂.
5. Melalui pengamatan struktur mikro, partikel ZrO₂ tidak tampak tersebar dalam matriks paduan aluminium dan terdapat banyak porositas dalam matriks.
6. Hasil EDX menunjukkan bahwa porositas diinisiasi oleh pengelompokan partikel ZrO₂ serta adanya kemungkinan pembentukan Al₂O₃ dan Al₃Zr dari sistem Al-ZrO₂, namun karena terjadi pengelompokan pada ZrO₂ sehingga reaksi kimia tersebut tidak terjadi sempurna.
7. Pada kondisi penuaan berlebih di suhu 200 °C endapan pada komposit ini didominasi oleh Mg₂Si dan MgZn₂.
8. Pelat lapisan ketiga dengan matriks Al₁₂Zn₆Mg₁Cu_{1.5}Si dan penguat partikel 7.5 % ZrO₂ mampu menahan penetrasi peluru pengujian balistik tipe III namun pelat tersebut masih mengalami retak karena rongga-rongga yang terbentuk pada pelat tersebut.

ACKNOWLEDGMENTS

Penulis sangat bersyukur dengan penyediaan dana penelitian melalui Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) 2017 dari Kementerian Riset, Teknologi, & Pendidikan Tinggi Republik Indonesia.

REFERENSI

- 1 Rahmalina, D., Sofyan, B. T., Suharno, B., & Siradj, E. S. (2012). Pengaruh Fraksi Volume Penguat Silikon Karbida terhadap Karakteristik Balistik Komposit Matriks Aluminium. *Majalah Pengkajian Industri*, Vol. 6 (No.1).
- 2 Park, J. (2008). *Bioceramics: Properties, Characterizations, and Applications*. Iowa, USA: Springer Science+Business Media, LLC.
- 3 Hemanth, J. Development and Property Evaluation of Aluminum Alloy Reinforced with nano-ZrO₂ Metal Matrix Composites (NMMCs). *Materials Science and Engineering A*, 507, 110-113.
- 4 Abdizadeh, H., & Baghchesara, M, A. (2013). Investigation on Mechanical Properties and Fracture Behavior of A356 Aluminum Alloy Based ZrO₂ Particle Reinforced Metal-Matrix Composites. *Ceramics International*, 39, 2045-2050.
- 5 Han, N. M., Zhang, X. M., Liu, S. D., He, D. G., & Zhang, R. (2011). Effect of Solution Treatment on the Strength and Fracture Toughness of Aluminum Alloy 7050. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 4138-4145.
- 6 Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (8th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- 7 Syarida, M. F. (2013). *Skripsi: Pengaruh Penambahan Cu terhadap Pengerasan Penuaan Komposit Al-8Zn-4Mg Berpenguat SiC Hasil Squeeze Casting untuk Aplikasi Balistik*. Depok: Universitas Indonesia.