

Pengaruh Kadar TiO₂ Terhadap Kekuatan Bending Komposit Serbuk Al/TiO₂

Toto Rusianto

Dosen Jurusan Teknik Mesin Institut Sains & Teknologi Akprind Yogyakarta

Email: totorusianto@yahoo.com , toto@akprind.ac.id

Lilik Dwi Setyana

Dosen Program Studi Diploma Jurusan Teknik Mesin

Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

Abstrak

Aluminium serbuk sebagai matrik dan TiO₂ sebagai penguat dikenal sebagai bahan komposit matrik logam (MMC), yang dapat diproduksi dengan teknik metalurgi serbuk. Dalam penelitian ini komposit Al/TiO₂ dengan variasi penambahan unsur penguat sebesar 0, 2, 4, 6 dan 8% berat TiO₂. Pembentukan green body dengan tekanan kompaksi 400 dan 500 MPa, dan proses sinter pada suhu 550 °C selama 2 jam. Pengujian meliputi uji bending dan kekerasan brinell, pengamatan srtuktur mikro menggunakan SEM dan mikroskop optik. Hasil penelitian menunjukkan kekerasan dan kekuatan bending meningkat dengan meningkatnya tekanan kompaksi. Komposisi optimum dicapai pada komposisi Al/TiO₂ 4% berat, dengan kekuatan bending sebesar 82 kg/mm² dan kekerasan 42 BHN pada pembentukan dengan tekanan kompaksi 500 MPa.

Kata kunci: metalurgi serbuk, Al/TiO₂, Komposit.

Abstract

Aluminum fine powder as the matrix and TiO₂ as the reinforcement is known as Al/metal matrix composite, that can be produced by powder metallurgy. The research of Al/TiO₂ MMC with various content of reinforcement was 0, 2, 4, 6 and 8% weight of TiO₂. Green body was produced with variuos compacting pressures 400 and 500 MPa, then sintered at 550 °C for 5 hour. Optical and SEM were used to observe the microstructures. Mechanical properties of the specimens including Brinell hardness and modulus of rupture and density of composites increases with increasing compacting pressure. The optimum properties were achieved on the composites containing 4% weight of TiO₂ were modulus of rupture was 82 kg/mm², hardness was 42 BHN and density 2.57 gr/cm³ with compacting pressure of 500 MPa.

Keywords: powder metallurgy, Al/TiO₂ composites.

1. Pendahuluan

Komposit adalah gabungan material yang terdiri dari dua atau lebih komponen material penyusun, baik secara mikro ataupun secara makro yang berbeda bentuk dan komposisi kimianya. Komposit sekarang sedang terus dikembangkan sebagai material teknik dengan penggunaan yang luas, misalnya untuk pesawat terbang, kendaraan bermotor dan peralatan lain yang membutuhkan peralatan yang ringan tetapi sangat kuat.

Pembentukan komposit dapat dilakukan dengan berbagai cara. Salah satu cara pembentukan komposit matrik logam adalah dengan metode metalurgi serbuk. Keuntungan metalurgi serbuk adalah pembuatan komponen relatif lebih

mudah, produk yang dihasilkan langsung dapat digunakan tanpa perlu dilakukan proses permesinan dan dapat diproduksi dalam skala kecil maupun massal. Kendala yang dihadapi antara lain adalah biaya pembuatan serbuk logam karena peralatan untuk pembuatan serbuk yang cukup mahal dan produk yang dihasilkan biasanya akan mengandung porositas.

Adanya porositas tersebut akan menurunkan kekuatan dari sifat mekanisnya dan ini merupakan kelemahan dari metode metalurgi sebuk. Partikel TiO₂ sebagai unsur penguat yang memiliki kekerasan tinggi tetapi rapuh, akan berpengaruh terhadap kekuatan dari komposit tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui seberapa besar pengaruh penambahan partikel penguat TiO₂ terhadap sifat fisis dan mekanis aluminium.

Proses pembentukan komposit adalah dengan metode metalurgi serbuk, yaitu dengan mencam-

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 7 Nomor 2 Oktober 2005.

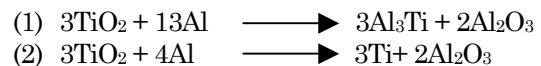
purkan bahan serbuk aluminium *fine powder* sebagai matrik dan penguat partikel TiO₂ *pro-analysis* produksi Merck Jerman. Besarnya variasi tekanan kompaksi adalah 400 dan 500 MPa, dengan pembebanan *uniaxial double action*. Pembuatan komposit dengan metode metalurgi serbuk memerlukan cetakan (*die*) dengan bentuk dan ukuran tertentu disesuaikan dengan bentuk specimen yang akan dibentuk.

Proses sinter dalam keadaan padat (*solid sintering*), temperatur pemanasan di bawah temperatur lebur logam. Matrik logam yang digunakan adalah Al dengan suhu leburnya 660 °C, untuk itu temperatur sinter dipilih 550°C dan lamanya waktu sinter adalah 5 jam. Permasalahan dari segi materialnya adalah seberapa besar perubahan sifat fisis dan mekanis dengan adanya penambahan partikel penguat. Untuk itu penulis menentukan variasi campuran komposisi bahan serbuk komposit adalah dengan variasi kandungan partikel TiO₂ yaitu 0, 2, 4, 6 dan 8% berat. Pengujian meliputi berat jenis, pengamatan struktur mikro dan pengamatan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM), sedangkan untuk mengetahui sifat mekanis komposit dilakukan pengujian kekerasan dan uji bending.

2. Tinjauan Pustaka

Wang (2004) melakukan penelitian komposit Al/TiO₂ (20 dan 25% volume) dengan metode metalurgi serbuk, hasil penelitian menunjukkan terjadi reaksi *in-situ* alumina sebagai penguat komposit matrik Al berasal dari Al/TiO₂. Reaksi tersebut diamati menggunakan *differential scanning calorimetry* dan *X-ray diffraction analysis* secara bersamaan. Reaksi *in-situ* terjadi secara eksotermis dengan reduksi Ti dari bentuk oksidanya dan membentuk TiAl₃ dan alumina, kandungan TiO₂ berkurang dengan temperatur reaksi yang lebih tinggi.

Ying (2004) meneliti reaksi dalam antara Al dan TiO₂ keadaan padat selama pemanasan dengan milling energi tinggi secara mekanik komposit serbuk Al/TiO. Pengamatan menggunakan *thermal analysis* dan *X-ray diffraction (XRD)* secara bersamaan. Terjadinya reaksi antara Al dan TiO₂ dalam dua tahapan proses. Pada temperatur rendah reaksi terjadi pada interface yang mana dimulai pada suhu 660 °C. Reaksi pada suhu tinggi terjadi reaksi dengan adanya proses difusi yang dimulai pada suhu di atas 820 °C. Fase pertama yang terbentuk dari reaksi tersebut adalah Al₃Ti. Al₂O₃ sulit terbentuk pada suhu di bawah 800 °C, pembentukan fase Ti(Al,O) berlangsung secara perlahan di atas suhu 1000 °C. Proses milling serbuk Al/TiO₂ mempercepat reaksi interface antara Al and TiO₂. reaksi tersebut adalah sebagai berikut:



Wakashima (2003) Meneliti tentang komposit matrik logam dengan penguat berukuran *submicro* partikel TiB₂ and Al₂O₃ yang terbentuk dari sintesa *in-situ* dari serbuk Al yang kaya dengan Al/Ti-B dengan serbuk Al/TiO₂B, reaksi berlangsung selama proses sinter. Partikel TiB₂ dan Al₂O₃ dapat disintesa *in-situ* dalam matrik aluminium yang mengandung oksida TiO₂ and B₂O₃ dengan *hot pressing* dari campuran tersebut di atas suhu lebur Al (>800 °C) dalam lingkungan gas inert.

Wu S.Q. dkk (2000) meneliti komposit dengan matrik paduan Al (Al/12 % berat Si) yang diperkuat dengan *potassium titanate* (K₂O.nTiO₂) *whiskers* hingga 30% volume. Pengujian kekuatan tarik pada temperatur 300°C dapat meningkatkan kekuatan tarik sebesar 40% dibandingkan tanpa serat penguat. Jika tanpa penguat *ultimate tensile strength* (UTS) dari bahan adalah 138 MPa sedangkan dengan penambahan serat penguat *potassium titanium* 30% volume UTS dapat mencapai 198 MPa.

Komposit matrik logam aluminium sudah banyak dikembangkan, dengan menggunakan penguat yang beragam seperti SiC, B₄C berupa *whisker* atau berupa serat pendek Al₂O₃. Metode yang sering digunakan dalam fabrikasi pembentukan keramik logam dan komposit logam adalah metalurgi serbuk. Prosesnya dilakukan dengan mencampur serta mengaduk serbuk logam (matrik) dan partikel (penguat). Kemudian dilakukan kompaksi dalam keadaan dingin sehingga diperoleh *green body*. Kompaksi dalam keadaan panas juga dapat dilakukan untuk mempermudah pengeluaran gas. Penggabungan matrik logam dengan penguat keramik dapat dihasilkan dengan baik (Suresh dkk, 1993).

Paduan aluminium sebagai matrik yang digunakan pada *Metal Matrix Composites* dapat digunakan dari berbagai macam seperti Al tipe 1100, 2XXX, 6XXX, 7XXX, Al-Si-Mg. Sedangkan penguat dapat berupa partikel seperti SiC, Al₂O₃, B₄C, berupa *whisker* SiC atau berupa serat pendek Al₂O₃. Aluminium sebagai matrik komposit dengan partikel penguat Al₂O₃ banyak dikembangkan sebagai komponen mesin yang membutuhkan ketahanan aus maupun kekuatan tarik yang tinggi. Akan tetapi seberapa besar penambahan unsur penguat dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatannya apabila dibentuk menjadi komponen mesin perlu diteliti lebih lanjut (Van Den Berg, 1998).

Sifat fisik dan sifat mekanis dari bahan komposit sangat dipengaruhi oleh jumlah unsur-unsur penyusunnya. Kekuatan tarik dari komposit sangat ditentukan dari fraksi volume penyusunnya, yang dirumuskan (Gibson, 1994):

$$\sigma_c = v_f \sigma_f + v_m \sigma_m \quad (1)$$

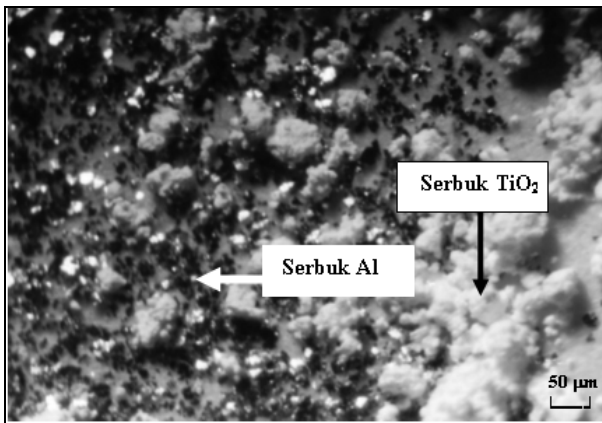
Sedang berat jenis komposit ditentukan dengan persamaan *rule of mixture*:

$$\rho_c = \rho_m \cdot v_m + \rho_f \cdot v_f \quad (2)$$

Metalurgi serbuk adalah teknik pembentukan logam dalam keadaan padat, dimana bahan logam dibuat serbuk dengan ukuran partikel yang halus. Proses pembentukan adalah bahan serbuk dimasukkan ke dalam cetakan (*die*) kemudian dilakukan kompaksi (*compaction*). Setelah dilakukan kompaksi serbuk membentuk *green body* yang sesuai dengan bentuk cetakan yang diinginkan. *Green body* tersebut kemudian disinter. Tujuannya adalah agar terjadi proses difusi antar partikel serbuk sehingga partikel akan menyatu, dan terbentuk logam yang padat. Proses metalurgi serbuk biasanya akan menghasilkan adanya porositas di dalam logam dan porositas tersebut akan berpengaruh pada dari berat jenisnya.

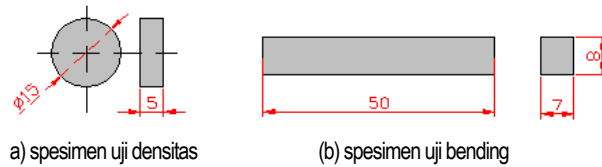
3. Metode Penelitian

Serbuk Al Serbuk Al (*fine powder*, stabilized about 2% fat) Spesifikasi : M : 26.98 g/mol.. Serbuk TiO₂ Spesifikasi :M : 79.90 g/mol. dengan variasi komposisi TiO₂ adalah 0, 2, 4, 6 dan 8 % berat Bentuk serbuk dapat dilihat pada Gambar 1 .



Gambar 1. Foto Serbuk Al *Fine Powder* dan Serbuk TiO₂ (Aglomerat)

Campuran serbuk yang homogen kemudian dimasukan dalam cetakan. Cetakan ditempatkan pada mesin *Universal testing machine* kemudian dilakukan kompaksi dengan variasi tekanan 400 dan 500 MPa untuk pembentukan *green body*. *Green body* yang dihasilkan untuk pembentukan spesimen dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk dan Ukuran Spesimen *Green Body*

Sintering dilakukan pada temperatur 550 °C, selama 5 jam dalam *furnace*. Jalannya siklus pemanasan pada specimen. Laju pemanasan adalah 5°C/menit sedang pendinginan di dalam *furnace* (dengan cara mematikan power ke *furnace*).

a. Pengujian

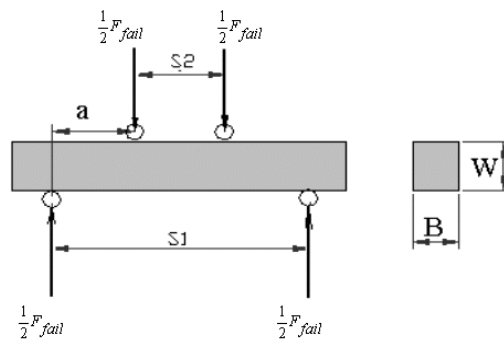
Struktur mikro diamati dengan *scanning electron microscope* (SEM) untuk mengamati fase. Untuk mengetahui unsur-unsur yang terkandung dalam specimen dilakukan pengujian EDX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*).

Pengujian kekerasan dengan metode Brinell dilakukan sebanyak 5 titik untuk masing-masing specimen. Besarnya beban yang digunakan adalah 15,625 kg. sedangkan nilai kekerasan dihitung dengan persamaan:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

b. Uji Bending

Pengujian bending menggunakan metode *four point bending* Standar JIS R 1601. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Uji Bending (*Four Point Bending*) Standar JIS R 1601

Tegangan maksimum terhadap beban bending dinyatakan sebagai *modulus of rupture* (σ_{MOR}) yang ditentukan dengan persamaan (Green, 1998):

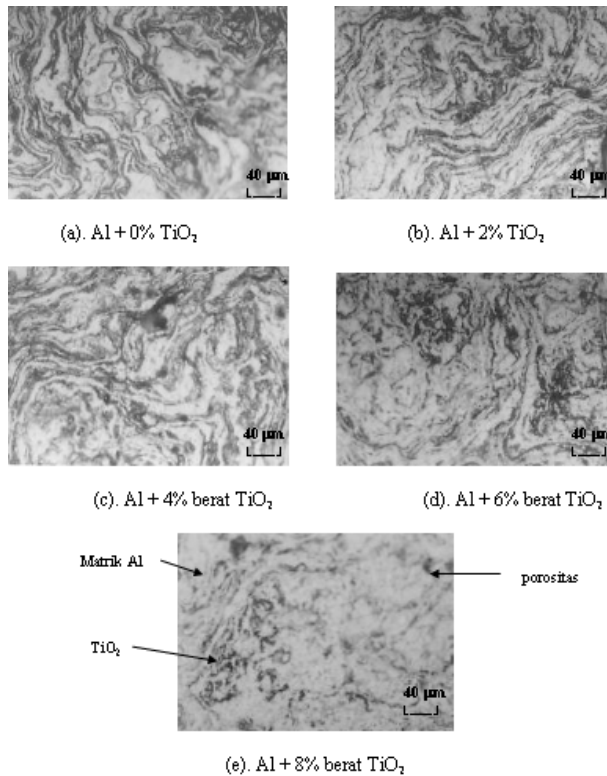
$$\sigma_{MOR} = \frac{3(S_1 - S_2)}{2BW^2} F_{fail} \quad (4)$$

dimana: F_{fail} = beban bending maksimum, S_1 = jarak antar beban, S_2 = jarak antar tumpuan, W = tebal specimen, B = lebar specimen

4. Hasil Penelitian

4.1 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop kemudian dilakukan pemotretan dengan perbesaran 500 X . Hasil foto struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 4.

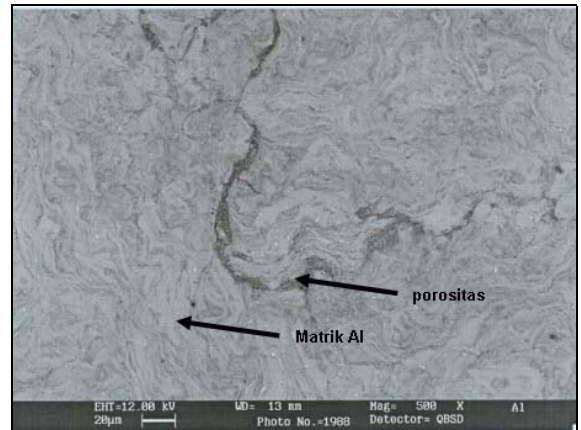


Gambar 4. Foto Struktur Mikro Komposit Al/ TiO_2 dengan Variasi Penambahan % Berat TiO_2 , pada Tekanan Kompaksi 500 MPa

Dari pengamatan foto struktur mikro pada menunjukkan pada spesimen dengan tekanan kompaksi 500 MPa jumlah porositas (warna hitam) lebih sedikit dibandingkan pada spesimen dengan tekanan 400 MPa. Ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya tekanan kompaksi akan mengurangi porositas. Dengan berkurangnya porositas maka densitas dari spesimen juga menjadi lebih besar.

4.2 Pengamatan dengan SEM dan EDX

Pengamatan dengan SEM (*scanning electron microscope*) hanya dilakukan pada spesimen dengan komposisi Al tanpa penambahan TiO_2 dan spesimen dengan komposisi Al/6% berat TiO_2 . Dengan pengamatan melalui SEM dapat diamati struktur mikro dengan perbesaran yang lebih besar lagi dibandingkan dengan menggunakan mikroskop optik. Foto hasil SEM dapat ditunjukkan pada Gambar 5.



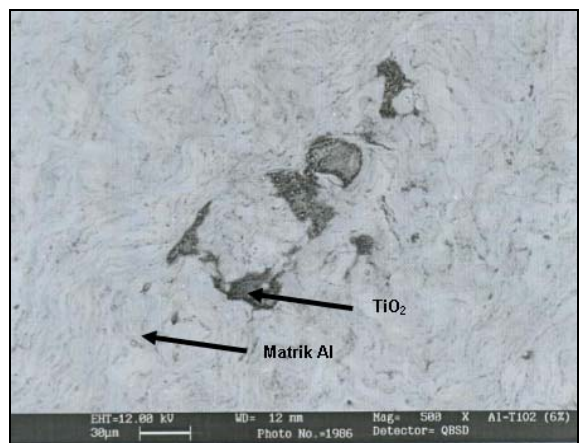
Gambar 5. Foto SEM Spesimen Komposisi Al Tanpa Penambahan TiO_2

Dari pengamatan tersebut terlihat adanya porositas pada spesimen, salah satu kelemahan metalurgi serbuk adalah adanya porositas pada produknya yang tidak dapat dihilangkan sama sekali. Hasil pengujian EDX (*Energy Dispersive X-Ray Analysis*) terhadap Al *base metal* tanpa penambahan TiO_2 didapat prosentase unsur-unsur yang terkandung antara lain seperti tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Spesimen Al Tanpa Penambahan TiO_2 Hasil EDX

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
C K	ED	0.36	0.72
O K	ED	16.94	25.50
Al K	ED	82.26	73.41
Si K	ED	0.44	0.38
Total		100.00	100.00

Dari Gambar 10 terlihat foto SEM terlihat adanya partikel penguat TiO_2 berwarna gelap. Hasil pengujian EDX terhadap komposit Al / 6% berat TiO_2 dan juga pada fase partikel TiO_2 didapat prosentase unsur-unsur yang terkandung antara lain seperti tercantum pada Tabel 2.



Gambar 6. Foto SEM Spesimen Komposit Al/ 6% TiO_2

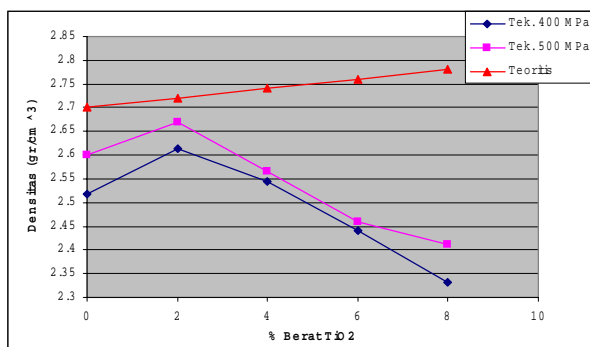
Tabel 2. Komposisi Al + 6% berat TiO₂ hasil EDX

(a) analisa pada matrik Al				(b) analisa pada partikel penguat TiO ₂					
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %	Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %		
C	K	ED	0.43	0.87	C	K	ED	0.82	1.70
O	K	ED	12.82	19.78	O	K	ED	21.51	33.66
Al	K	ED	86.75	79.35	Al	K	ED	51.99	48.23
Total		100.00	100.00	Si	K	ED	7.77	6.93	
				K	K	ED	0.94	0.60	
				Ca	K	ED	3.75	2.34	
				Ti	K	ED	8.22	4.30	
				Fe	K	ED	5.00	2.24	
				Total		100.00	100.00		

Dari hasil analisa EDX di atas pada pengujian terhadap matrik Al terdapat unsur oksigen ini menunjukkan terjadi oksidasi dari serbuk Al tersebut. Sedang dari hasil analisa partikel penguat ditemukan adanya unsur logam Al. Hal ini menunjukkan terjadinya reaksi *in-situ* yang terjadi antara Al dan TiO₂ membentuk TiO₂, yang ditandai juga oleh jumlah unsur O (oksigen) pada analisa partikel penguat sebesar 21,51% jika dibandingkan pada matrik Al yang berjumlah 12,82%. Seperti dikemukakan oleh Wang (2004) menyatakan reaksi *in-situ* alumina sebagai penguat komposit matrik Al berasal dari Al/TiO₂. Reaksi tersebut diamati menggunakan *differential scanning calorimetry* dan *X-ray diffraction analysis* secara bersamaan menunjukkan bahwa terjadi reaksi eksotermis dengan reduksi Ti dari bentuk oksida dan membentuk TiAl₃ dan alumina, kandungan TiO₂ menurun dengan temperatur reaksi yang lebih tinggi.

4.3 Hasil Pengujian Densitas

Berat jenis komposit hasil pembentukan dengan metalurgi serbuk dipengaruhi oleh tekanan kompaksi dan komposisi penguat. Berat jenis komposit tergantung dari jumlah fraksi volume unsur penyusunnya. Berat jenis Al = 2,7 gr/cm³ sedangkan berat jenis TiO₂ = 4,27 gr/cm³, dengan diketahuinya prosentase berat titanium oksida maka dapat ditentukan fraksi volumenya. *Green body* dan spesimen hasil sinter ditimbang untuk mencari berat spesimen. Dari data berat spesimen tersebut kemudian dapat ditentukan berat jenis aktual komposit menurut persamaan 3.



Gambar 7. Grafik Pengaruh Penambahan TiO₂ Terhadap Densitas Relatif Komposit Al/TiO₂ Hasil Sinter dengan Variasi Tekanan Kompaksi

Dari pengamatan Gambar 7 memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya tekanan kompaksi meningkatkan densitas pada masing-masing komposisi campuran komposit Al/TiO₂. Pengaruh tekanan kompaksi akan meningkatkan kepadatan dari benda uji atau dengan kata lain densitasnya meningkat. Peningkatan tersebut disebabkan oleh sifat logam aluminium sebagai matrik yang bersifat ulet dan memiliki sifat plastis. Dengan adanya sifat plastis tersebut apabila ada beban yang bekerja pada bahan tersebut maka bahan akan berubah bentuk. Perubahan bentuk karena tekanan akan mendorong serbuk-serbuk mengisi ruang kosong di dalam cetakan. Akan tetapi apabila tekanan kompaksi terus ditingkatkan pemampatan akan mencapai maksimal atau densitas benda uji sudah tidak dapat ditingkatkan lagi. Karena kemampuan untuk mengisi ruang kosong sudah terhenti karena adanya desakan antar partikel tersebut. Densitas relatif dari bahan tidak akan mencapai 100% jika dibandingkan dengan bahan tersebut apabila dicor, karena masih terdapat kekosongan atau rongga di antara partikel serbuk logam tersebut. Pengaruh tekanan kompaksi terhadap peningkatan densitas, juga telah dilaporkan oleh Arik dan Cengiz (2001) yang meneliti komposit Al/Al₄C₃ dengan metode metalurgi serbuk dan Sukanto (2003) yang meneliti serbuk Al hasil atomisasi air. Bahwa dengan meningkatnya tekanan kompaksi akan meningkatkan densitas spesimen.

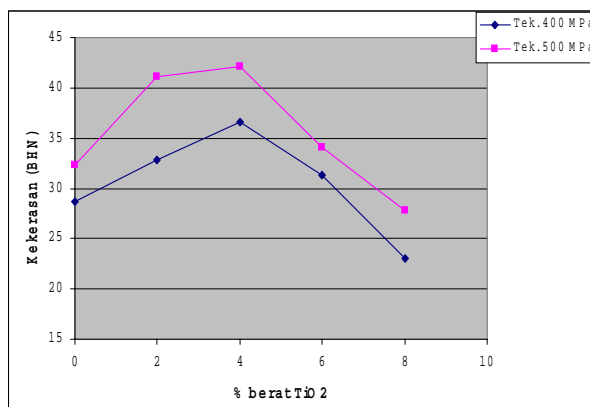
Pengaruh penambahan TiO₂ terhadap densitas cenderung akan menurunkan densitas, penurunan ini dikarenakan jumlah TiO₂ yang bertambah banyak akan terjadi kontak antar serbuk TiO₂. Selama proses sinter antar serbuk TiO₂ tidak terjadi sinter dikarenakan suhu lebur untuk TiO₂ (1857°C) lebih tinggi dibandingkan logam Al. Sehingga untuk terjadinya sinter antar serbuk TiO₂ dibutuhkan suhu yang lebih tinggi lagi. German (1994) menjelaskan bahwa campuran antara serbuk lunak dan keras akan menurunkan densitas. Pengaruh tersebut disebabkan pada saat kompaksi, partikel lunak mengalami deformasi plastis sedang partikel keras hanya mengalami deformasi elastis.

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Dari hasil pengujian kekerasan dengan menggunakan metode Brinell dengan beban 15,625 kg, pengujian dilakukan terhadap masing-masing spesimen, diperoleh data-data yang ditampilkan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 8.

Variasi tekanan kompaksi akan memberikan pengaruh terhadap kekerasan yaitu dengan meningkatnya tekanan kompaksi akan meningkatkan kekerasan. Tekanan kompaksi tertinggi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah 500 MPa. Dengan tekanan tersebut diperoleh kekerasan ter-

tinggi sebesar 42 BHN pada komposit Al/4% berat TiO₂. Komposisi Al tanpa penambahan TiO₂ kekerasan adalah 32 BHN. Dengan bertambahnya tekanan kompaksi maka kekerasan spesimen juga meningkat, hal ini disebabkan karena meningkatnya densitas. Pengaruh tekanan pada saat kompaksi akan menyebabkan partikel Al mengalami deformasi plastis, karena sifat logam Al yang ulet. Dengan deformasi plastis yang besar maka akan mendorong celah antar partikel menjadi lebih kecil sehingga porositas yang ada di *green body* pun akan semakin kecil. Dengan semakin kecilnya porositas maka densitasnya meningkat, dengan meningkatnya densitas maka akan meningkatkan kekerasan.



Gambar 8. Grafik Pengaruh Kandungan % Berat TiO₂ Terhadap Kekerasan Komposit Al/TiO₂ dengan Variasi Tekanan Kompaksi

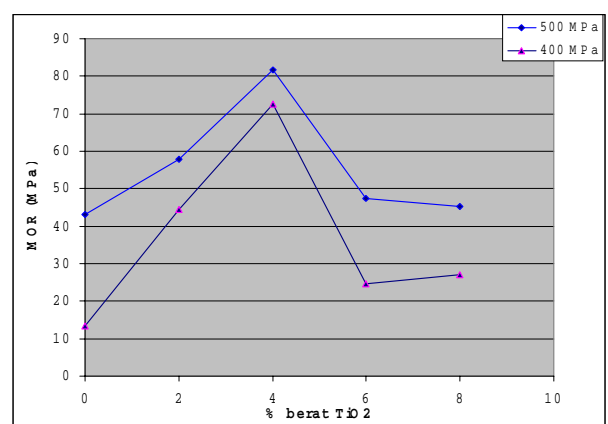
Peningkatan kekerasan dapat juga dipengaruhi oleh adanya *strain hardening* (pengerasan regangan) dari partikel aluminium. Jika bahan dideformasi pada temperatur rendah (relatif terhadap titik cairnya), maka pengerasan terjadi mengikuti deformasinya (Surdia, 1991). Gejala ini dinamakan pengerasan regangan atau pengerasan kerja. Hubungan antara tegangan sebenarnya dan regangan sebenarnya didekati oleh persamaan $\sigma = F\varepsilon^n$ dimana n adalah koefisien eksponen pengerasan, ε adalah regangan sebenarnya. Pengaruh tekanan kompaksi akan mempengaruhi besarnya deformasi (regangan / ε), semakin besar tekanan kompaksi maka akan semakin besar pula deformasinya. Dari persamaan tersebut di atas maka dengan meningkatnya deformasi maka akan meningkatkan kekuatan dari spesimen tersebut.

Peningkatan kekerasan dengan selain penambahan TiO₂ juga disebabkan oleh adanya alumina yang terbentuk karena reaksi *in-situ*, ditunjukkan dengan adanya unsur Al pada fase penguat TiO₂ dari hasil pengujian EDX. Sedangkan penurunan kekerasan karena sifat serbuk TiO₂ yang mengalami aglomerasi, sehingga tidak dapat tercampur sempurna secara homogen dengan serbuk matrik

Al. Sehingga kontak antar serbuk TiO₂ tidak akan meningkatkan kekuatan terhadap komposit, reaksi *in-situ* Al dengan TiO₂ terjadi pada permukaan serbuk yaitu hanya pada interface antara serbuk Al dan TiO₂. Jika antar serbuk tersebut tidak ada kontak maka reaksi *in-situ* tidak akan terjadi. Dari bentuk serbuk TiO₂ yang mengalami aglomerat menyebabkan kontak dengan matrik Al lebih kecil. Sehingga penambahan TiO₂ tidak menyebabkan peningkatan kekuatan lebih besar lagi justru sebaliknya akan menurunkan kekuatan. Penurunan kekerasan dapat disebabkan juga oleh penurunan densitas aktual dari spesimen. Dengan menurunkan densitas spesimen menunjukkan pula jumlah porositas bertambah. Dengan bertambahnya porositas maka kekerasan juga akan menurun.

4.5 Hasil Pengujian Bending

Variasi tekanan kompaksi akan memberikan pengaruh terhadap kekuatan bending yaitu dengan meningkatnya tekanan kompaksi akan meningkatkan kekuatan bending (Gambar 9). Pengaruh tekanan kompaksi tertinggi dalam penelitian ini adalah 500 MPa. Kekuatan bending komposit pada kandungan 4% berat TiO₂ merupakan yang tertinggi yaitu sebesar 81,67 MPa dengan tekanan kompaksi 500 MPa. Apabila kekuatan tersebut dibandingkan dengan tanpa penambahan TiO₂ sebesar 43,02 MPa maka ada kenaikan sebesar 90%. Arik dan Cengiz (2001) yang meneliti komposit Al/Al₄C₃ dengan metode metalurgi serbuk, dengan variasi tekanan kompaksi. Pengujian bending dengan metode *three point bending*, menunjukkan bahwa dengan meningkatnya tekanan kompaksi, maka kekuatan bending (*transverse rupture strength*) dari spesimen juga meningkat.



Gambar 9. Grafik Pengaruh Kandungan TiO₂ Terhadap Modulus of Rupture (MOR) dengan Variasi Tekanan Kompaksi

Peningkatan kekuatan komposit hanya terjadi sampai kandungan TiO₂ 4% berat, sedangkan penambahan TiO₂ lebih dari 4% berat akan

menurunkan kekuatan. Peningkatan kekuatan dengan selain penambahan TiO₂ juga disebabkan oleh adanya alumina yang terbentuk karena reaksi *in-situ*. Sedang penurunan kekuatan karena sifat serbuk TiO₂ yang aglomerat, sehingga penambahan TiO₂ menurunkan kekuatan, seperti telah dijelaskan di atas. Penurunan kekuatan lebih banyak dipengaruhi oleh menurunnya densitas aktual komposit. Densitas seharusnya meningkat sesuai dengan persamaan *rule of mixture* komposit (densitas teoritis).

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan yaitu:

1. Peningkatan tekanan kompaksi meningkatkan kekerasan, kekuatan bending dan densitas.
2. Penambahan TiO₂ 4% berat meningkatkan kekerasan dari 32 BHN hingga 42 BHN pada tekanan kompaksi 500 MPa.
3. Penambahan TiO₂ 4% berat meningkatkan kekuatan bending dari 43,02 MPa menjadi 81,67 MPa pada tekanan kompaksi 500 MPa.
4. Penambahan TiO₂ lebih besar dari 4% berat terhadap matrik Al menurunkan kekerasan, kekuatan bending dan densitas.
5. Pada pertikel penguat terjadi reaksi *in-situ* terbentuknya Al₃Ti dan Al₂O₃, hasil reaksi tersebut sebagai unsur penguat dalam komposit Al/TiO₂.

Daftar Pustaka

1. Arik Halil; Bagci Cengiz. *Investigation of Influence of Pressing Pressure and Sintering Temperature on the Mechanical Properties of Al/Al₄C₃ Composite Materials*, Turkish Journal Eng. Env. Sci, Tubitak. 2003.
2. Barsoum, Michel W., *Fundamental of Ceramic*, Mc Graw-Hill Book Co New York. 1997.
3. German, Randall M., *Powder Metallurgy Science*, Metal Powder Industries Federation, Princeton New Jersey. 1984.
4. Gibson, Ronald F., *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill Book Co New York. 1994.
5. Green, David J., *An Introduction to the Mechanical Properties of Ceramics*, Cambridge University Press. 1998.
6. Smith, William F., *Principles of Materials Science And Engineering*, McGraw – Hill Inc, New York. 1996.
7. Suresh, Subra and Mortensen A., *Fundamentals of Metal matrix Composites*, Butterworth-Heinemann, Stoneham London. 1993
8. Van den Berg, Mark R., *Aluminum MMC's-Current Status & Future Prospect: Commercial Applications*” Prosiding dalam *Al MMC Consortium* <http://www.almmc.com>. 1998.
9. Wakashima, K., *In Situ Synthesis and Properties of Aluminum Composites with Ultrafine TiB₂ and Al₂O₃ Particulates*, Materials Science Forum, Volume: 475-479 <http://0-87849-960-1.scientific.net/>, 2004.
10. Wang Deqing, “In-situ Process of Aluminum-Alumina Composites in Al/TiO₂ systems” *Journal of Advanced Materials*, 2000.
11. Wu S.Q., Wei Z.S. and Tjong S.C, ”The Mechanical and Thermal Expansion Behavior of An Al-Si Alloy Composite Reinforced with Potassium Titanate Whisker” *Jurnal Composites Science and Technology* 60 march, 2000, pp. 2873-2880.
12. Ying, D.Y., D.L. Zhang, dan M. Newby. “Solid-State Reactions during Heating Mechanically Milled Al/TiO₂ Composite Powders” *Metallurgical and Materials Transaction volume 35A*. 2004.