

PENGARUH TEMPERATUR INFILTRASI PADA PEMBUATAN KOMPOSIT Zn + MgO

H. Jumiadi*

Abstraksi

Pada pembuatan material komposit matrik logam (*Metal Matrix Composite*) dengan pendispersian material penguat pada matrik, diantaranya adalah dengan teknik infiltrasi yaitu teknik dengan temperatur pemanasan yang mempengaruhi kinetika infiltrasi dengan mengendalikan secara ketat prosesnya sehingga infiltrasi terjadi secara spontan tanpa bantuan tekanan maupun vakum.

Matrik yang digunakan dalam penelitian ini adalah seng murni (*Special High Grade*) sedangkan penguatnya digunakan penguat partikel dari bahan keramik yaitu magnesia oksida (MgO). Variasi temperatur pemanasan infiltrasi yang digunakan adalah 600, 700 dan 800°C. Pengamatan karakteristik meliputi kekerasan, kekuatan tarik dan struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan kekerasan dan kekuatan tarik tertinggi pada temperatur pemanasan infiltrasi 800°C yaitu 66,4 BHN. Adapun ukuran butir terbesar pada struktur mikro dengan temperatur pemanasan 600 °C yaitu 0,9 mm.

Kata kunci : *Infiltrasi, dispersi, matrik, penguat*

PENDAHULUAN

Sejarah perkembangan teknologi komposit mencatat berbagai temuan yang bersifat inovatif bahkan ide yang menakjubkan. Atas dasar itu komposit dikelompokkan berdasarkan jenis matrik yang antara lain adalah Komposit Matrik Polimer, Komposit Matrik Logam, Komposit Matrik Keramik serta Komposit *in-situ* dengan menggunakan serat, kristal *whisker* dan partikel sebagai penguatnya.

Berbagai teknik fabrikasi Komposit Matrik Logam kini dikenal dan dipraktekkan pengelompokkannya adalah sebagai berikut:

- Teknik metalurgi cair
- Teknik metalurgi bubuk
- Teknik ikatan difusi lembaran-lembarannya
- Teknik infiltrasi fasa uap

Dari berbagai teknik fabrikasi atau proses pembuatan komposit tersebut masing-masing mempunyai keunggulan serta kekurangan, baik dari biaya, proses pembuatan maupun dari sifat-sifat mekaniknya serta disesuaikan dengan bahan matrik dan penguatnya.

Atas dasar itu penelitian ini terutama tertuju pada matrik dengan penguatan partikel untuk aplikasi industri dengan teknik infiltrasi karena hampir isotropik dan mudah diproses. Untuk itu penelitian yang dilakukan menitik beratkan pada pengaruh variasi temperatur infiltrasi pada proses pembuatan komposit matrik logam dengan matrik seng (Zn) dan penguat partikel magnesia oksida (MgO), terhadap sifat-sifat mekanisnya.

Dengan latar belakang masalah diatas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut : Bagaimana pengaruh variasi temperatur infiltrasi pada pembuatan komposit Zn + MgO terhadap sifat mekanisnya.

* Dosen Jurusan Mesin Fak. Teknik Univ. Merdeka Malang

Adapun batasan masalah yang ditentukan sbb :

1. Bahan matrik yang digunakan adalah seng (Zn) yang berupa batangan (*Ingot*) setelah dicor dengan bentuk spesimen uji kekuatan tarik.
2. Bahan penguat yang digunakan adalah magnesia oksida (MgO) yang berupa serbuk.
3. Cetakan keramik yang terbuat dari bahan tahan api.
4. Persentase komposisi berat seng (Zn) dan berat magnesia oksida (MgO) dengan volume fraksi 10%.
5. Penyusunan dan penataan seng (Zn) dan magnesia oksida (MgO).
6. Pemanasan dengan variasi temperatur 600°C, 700°C, dan 800°C.
7. Waktu penahanan temperatur selama 5 jam (konstan).
8. Pendinginan dalam tungku.
9. Pengujian sifat mekanik meliputi : pengujian tarik, pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro.

KAJIAN PUSTAKA

Komposit Matrik Logam (*Metal Matrix Composite*)

Komposit Matrik Logam (*Metal Matrix Composite*) adalah merupakan kombinasi dari logam (sebagai matrik) dengan dua atau lebih material non logam (sebagai penguat) yang digabungkan dalam skala makroskopik untuk membentuk material baru yang berguna. Komposit Matrik Logam ini mempunyai sifat-sifat yang terbaik dari unsur penyusunnya bahkan seringkali beberapa sifat lain yang tidak ada pada unsur penyusunnya itu.

Komposit Berpenguat Partikel

Tipikal awal komposit matrik logam terdiri dari serat boron dalam titanium dan serat karbon dalam nikel. Seiring dengan perjalanan waktu, perhatian tertuju pada serat kontinu dan serat tak kontinu dan kristal *whisker* serta partikel. Rentang diameter nominal untuk masing-masing penguat adalah 3 - 140 μm , 0 - 20 μm dan 0,5 - 100 μm .

Komposit matrik logam dengan penguat partikel lebih menjadi perhatian dikalangan pengembang dan pembuatnya karena prosesnya lebih mudah (murah dari pada komposit berpenguat serat panjang) dengan peningkatan pembasahan lebih, antar muka logam makin kuat, dan sifat mekanik kompositnya pun piawai.

Pada komposit matrik logam dengan penguat keramik, mempunyai fasa keramik yang cenderung mengubah atau menghaluskan struktur dan menghambat difusi.

M a t r i k

Matrik merupakan material pengikat penguat pada komposit. Sifat matrik pada umumnya ulet dan mempunyai kekuatan material yang kurang dibandingkan dengan material penguatnya. Bahan yang dipakai sebagai matrik adalah logam, keramik dan polimer, semua itu tergantung pada bahan yang ingin dihasilkan.

Adapun fungsi-fungsi dari matrik secara ideal adalah:

1. Menginfiltrasi penguat dan cepat membeku pada temperatur dan tekanan yang wajar.
2. Membentuk suatu ikatan koheren, umumnya dalam bentuk ikatan kimia disemua antar muka matrik.
3. Menyelubungi penguat yang biasanya sangat peka takik dan melindunginya dari kerusakan antar penguat berupa abrasi dan melindungi penguat terhadap lingkungan dan serangan zat kimia serta kelembaban.
4. Mentransfer tegangan kerja ke penguat.
5. Memisahkan penguat sehingga kegagalan penguat individu dibatasi dan tidak merugikan integritas komponen secara keseluruhan.
6. Melepas ikatan (*debond*) dari penguat individu, dengan cara absorpsi energi regangan, apabila kebetulan terjadi perambatan retak dalam matrik yang mengenai penguat.
7. Tetap stabil secara fisika dan kimia setelah proses manufaktur.

P e n g u a t

Penguat adalah jenis material yang berfungsi untuk penguatan dalam komposit.

Adapun jenis penguat dibagi menjadi tiga kelompok yaitu :

1. Serat (kontinu dan tak kontinu).
2. *Whisker* (serabut pendek-pendek).
3. Partikel (serbuk).

Berdasarkan dari bentuk penguatnya komposit dikelompokkan menjadi tiga kelompok yaitu :

a. Komposit Serat (*Fibrous Composite*)

Komposit ini dengan serat sebagai penguat, serat-serat yang panjang dalam berbagai bentuk sifat yang lebih kuat bila dibandingkan dengan bahan yang sama dalam bentuk biasa.

b. Komposit Lapisan (*Laminated Composite*)

Terdiri dari lapisan sekurang-kurangnya dua material yang berbeda direkatkan bersama - sama. Penguatnya terdiri dari lembaran, kertas, kain direkatkan dan dikencangkan. Pelapisan dilakukan untuk mengkombinasikan aspek yang terbaik dari lapisan yang digunakan untuk memperoleh bahan yang berguna. Komposit lapis dibentuk dari lapisan-lapisan lamina dengan berbagai penyusun arah serat yang telah ditentukan atau disebut *laminated*.

c. Komposit Partikel (*Partikular Composite*)

Terdiri dari partikel - partikel satu atau lebih material yang diikat dengan matrik. Partikel biasanya dapat digunakan dari bahan logam, non logam maupun keramik.

Seng (Zn)

Seng (Zn) adalah logam yang rapuh, temperatur normal seng adalah 100°C sampai 150°C. Pada temperatur ini seng mudah untuk di rol atau ditarik, bentuk kisi atom seng adalah hexagonal, densitinya 7,13 sampai 7,14 g/cm³, titik cairnyanya 429,6°C. Seng murni ketahanannya tinggi pada udara kering, karena adanya lapisan karbonat dipermukaannya

sehingga bisa menahan adanya pengaruh oksigen. Seng juga tahan terhadap korosi dikarenakan adanya oksida seng, Oleh karena itu banyak digunakan untuk penutup baja, cara penutupannya dilakukan secara dilapis, produk terkenal dari seng adalah untuk perlengkapan rumah, talang, pipa pembuangan.

Sifat-Sifat Seng

Salah satu faktor yang mendukung pesatnya penggunaan seng dewasa ini, karena seng memiliki sifat-sifat penting sebagai berikut:

- Perbandingan antara kekuatan yang cukup dan beban yang ringan, hal ini merupakan suatu keunggulan dari seng.
- Sifat mampu bentuk, seng dapat dikerjakan dengan mudah dan cepat serta mudah dibentuk sesuai dengan model yang diinginkan, dirol atau ditarik.
- Daya hantar listrik, seng merupakan salah satu logam *non ferro* yang mempunyai daya hantar listrik tinggi, sehingga dipakai sebagai tahanan listrik selain tembaga.
- Konduktifitas panas, seng mempunyai konduktivitas panas tinggi, terbukti dengan cepatnya perpindahan panas dari bagian yang temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah, sehingga banyak dipakai untuk peralatan pemanas dan berbagai komponen teknik lain yang berhubungan dengan perpindahan panas seperti pada bahan semi konduktor termistor.

Magnesia Oksida (MgO)

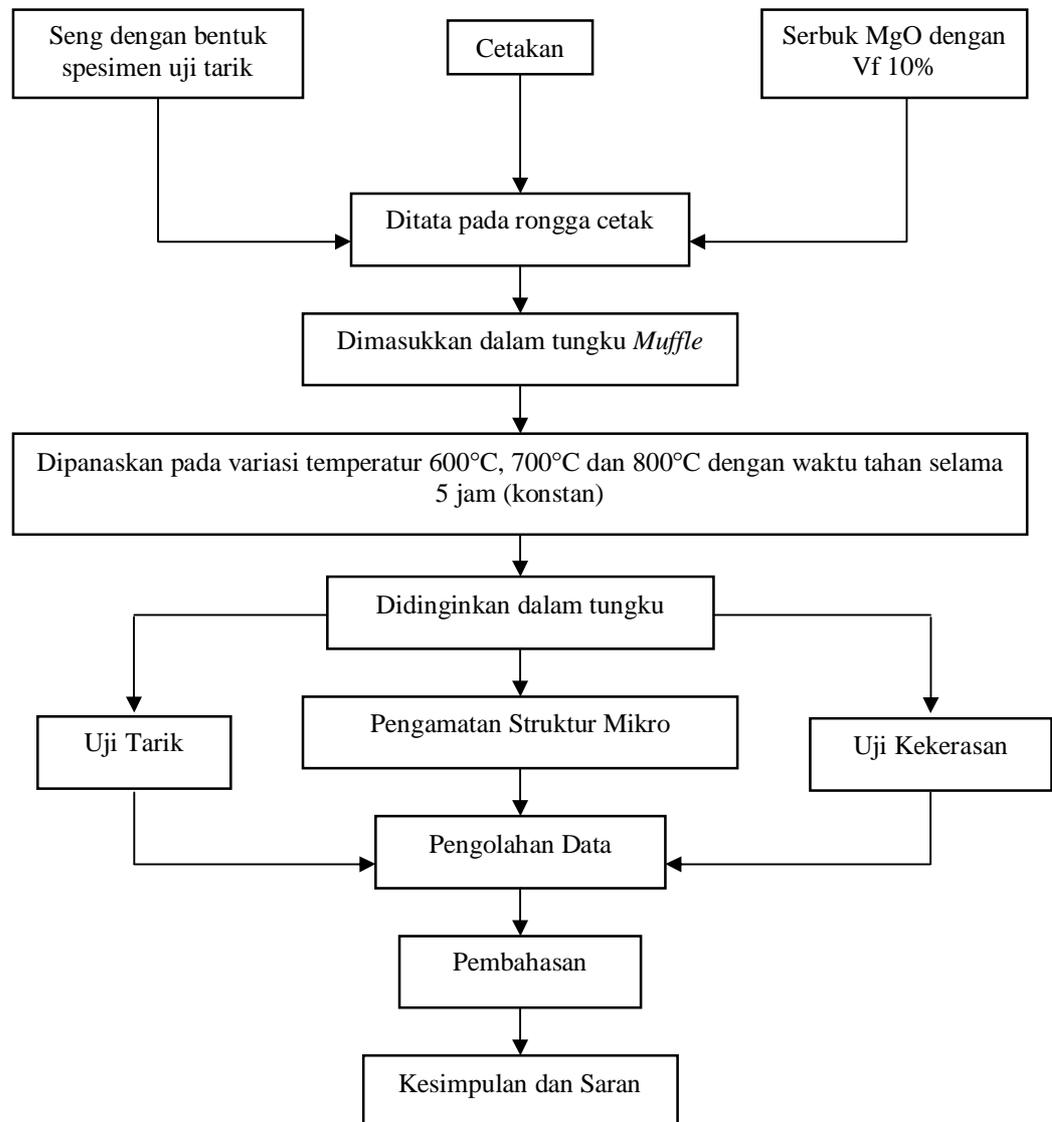
Magnesia Oksida (MgO) adalah termasuk jenis dari bahan keramik yang merupakan persenyawaan hasil dari ikatan ionik yang terjadi antara magnesium (Mg) dan Oksigen (O₂). Magnesia Oksida (MgO) merupakan oksida keramik yang merupakan oksida tahan api yang sangat bermanfaat. Pada temperatur rendah sampai temperatur sedang, struktur seperti ini adalah isolator listrik, namun pada umumnya akan menjadi konduktif pada temperatur tinggi ketika agitasi termal dari ion - ionnya meningkatkan mobilitas struktur tersebut.

Tabel 1 Karakteristik dan Sifat-sifat fisik dari Magnesia Oksida (MgO)

Material	Karakteristik	Berat Jenis (g/cm ³)	Titik Cair (°C)	Kekuatan Lentur (kg/cm ²)	Koefisien Pemuai panjang (x 10 ⁶ (1/°C)	Konduktivitas Thermal (°C/mm)
Magnesia Oksida (MgO)	- Konduktivitas termal (baik) - Pemuai termal (besar)	3,6	2800	2000	11,0	0,1

METODOLOGI PENELITIAN

Diagram Alir Penelitian



Gambar 1 Skema Diagram Alir Penelitian

Prosedur Penelitian

Proses pembuatan komposit Zn + MgO dengan teknik infiltrasi terdiri dari dua tahapan, yaitu:

- Tahap persiapan
- Tahap percobaan
- Tahap karakterisasi material

Tahap persiapan

Tahap persiapan adalah mempersiapkan segala sesuatu yang berhubungan dengan percobaan diantaranya adalah :

a. Persiapan bahan baku

Bahan baku utama yang digunakan dalam percobaan ini adalah *ingot* Seng (Zn) murni yang sudah mengalami proses pengecoran dengan bentuk spesimen uji kekuatan tarik, dan serbuk magnesia oksida (MgO).

Selanjutnya bahan baku tersebut mengalami preparasi sebagai berikut :

b. Penimbangan matrik seng (Zn)

Penimbangan dari matrik seng bertujuan untuk mendapatkan ukuran berat matrik untuk perhitungan volume fraksi dan berat dari partikel penguat.

Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut :

Letakkan matrik seng keatas timbangan yang telah disiapkan.

Catat ukuran berat yang ditunjukkan oleh timbangan

c. Perhitungan volume fraksi dan berat dari partikel penguat

Setelah matrik seng ditimbang, ukuran beratnya dimasukkan dalam perhitungan volume fraksi dan

berat dari partikel penguat. Adapun persamaannya sebagai berikut :

$$V_f = \frac{\frac{M_p}{r_p}}{\frac{M_m}{r_m} + \frac{M_p}{r_p}} \times 100$$

dimana :

V_f = Volume fraksi (%)

M_p = Berat partikel (gr)

M_m = Berat matrik (gr)

ρ_p = Berat jenis partikel (gr/cm^3)

ρ_m = Berat jenis matrik (gr/cm^3)

d. Penimbangan Partikel Penguat

Penimbangan partikel penguat MgO bertujuan untuk mendapatkan ukuran berat yang diinginkan sesuai dengan perhitungan diatas.

Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut :

a. Letakkan serbuk MgO keatas timbangan yang telah disiapkan.

b. Atur berat partikel MgO sesuai dengan ukuran dari hasil yang telah dihitung sebelumnya.

c. Partikel yang telah ditimbang dimasukkan dalam kantong plastik untuk digunakan pada proses

penataan kedalam cetakan dengan matrik seng.

e. Penataan Matrik dan Penguat

Penataan matrik dan penguat dalam cetakan dilakukan sebelum proses pemanasan dalam tungku. Yang terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut :

- a. Masukkan setengah berat partikel MgO kedalam rongga cetak.
- b. Rapiakan dengan kuas sehingga partikel penguat merata.
- c. Matrik seng diletakkan diatasnya.
- d. Partikel penguat yang setengahnya dimasukkan, sehingga menutupi matrik.
- e. Rapiakan lagi dengan kuas sampai benar-benar rata.
- f. Pastikan bahwa rongga cetak tertutup oleh partikel.

Tahap Percobaan

Tahap percobaan adalah merupakan serangkaian tahapan proses yang dilakukan untuk memperoleh produk komposit Zn + MgO yang terdiri dari tahapan - tahapan sebagai berikut :

a. Pemanasan

Proses pemanasan disini merupakan proses dari teknik infiltrasi dalam tungku *muffle* dengan memanaskannya sampai temperatur yang ditentukan dilanjutkan dengan waktu penahanan temperatur selama 5 jam (konstan). Proses ini bertujuan untuk penginfiltrasian partikel penguat kedalam matrik seng yang mencair.

b. Pendinginan

Proses pendinginannya dilakukan dilakukan dalam tungku selama kurang lebih 12 jam.

Tahap Karakterisasi Komposit Matrik Logam

Tahap karakterisasi ini merupakan serangkaian pengujian untuk mengetahui sifat mekanik dari komposit Zn + MgO dengan pengujian yang antara lain :

- a. Pengujian Kekerasan
- b. Pengujian Kekuatan Tarik
- c. Pengamatan strukturmikro

DATA HASIL PENELITIAN

Penimbangan Berat Material Sebelum Proses Infiltrasi

Susunan terdiri dari matrik Seng murni (Zn) dan penguat MgO, Hasil penimbangan sebelum proses infiltrasi disajikan pada tabel 2 sebagai berikut :

Tabel 2. Data Berat Rata-rata Seng (Zn) dan Magnesia Oksida (MgO)

No	Berat Zn (M_{Zn}) (gr)	Volume Zn (M_{Zn} / ρ_{Zn}) (cm^3)	Volume MgO ($V_{Zn} \times V_f$) (cm^3)	Berat MgO ($V_{MgO} \times \rho_{MgO}$) (gr)
1	135,19	18,93	1,893	6,81
2	134,31	18,81	1,881	6,77
3	137,96	19,32	1,932	6,95
4	136,60	19,13	1,913	6,89
5	141,70	19,84	1,984	7,14
6	148,13	20,75	2,075	7,47
7	139,31	19,51	1,951	7,02
8	133,13	18,67	1,867	6,72
9	135,00	18,91	1,891	6,81
10*	132,55	-	-	-

Keterangan : *(Base Metal)

Hasil Penimbangan Berat Material Komposit

Berat dari material komposit meningkat seiring dengan terinfiltrasinya penguat. Hasil rata-rata penambahan berat tercantum pada tabel 3 sebagai berikut :

Tabel 3. Data Persentase dan Pertambahan berat dari Komposit

No	Temperatur Pemanasan (° C)	Berat Zn Sebelum Proses Infiltrasi (gr)	Berat komposit Setelah Proses Infiltrasi (gr)	Rata-rata Pertambahan Berat (gr)	Persentase Pertambahan Berat (%)
1	600	135,19	135,69	0,5	0,67
2	600	134,31	134,61	0,3	0,40
3	600	137,96	138,16	0,2	0,27
4	700	136,60	137	0,4	0,55
5	700	141,70	141,8	0,1	0,14
6	700	148,13	148,63	0,5	0,74
7	800	139,31	139,71	0,4	0,55
8	800	133,13	133,43	0,3	0,40
9	800	135,00	135,1	0,1	0,13

Hasil Pengujian Kekerasan

Kekerasan dari komposit Zn + MgO meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan. Hasil pengujian rata-rata kekerasan tercantum pada tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Kekerasan

No	Temperatur Pemanasan (° C)	Lama Penahanan (jam)	Pendinginan	Kekerasan Rata-rata (BHN)
1	600°C	5 jam	Tungku	57
2	700°C	5 jam	Tungku	62
3	800°C	5 jam	Tungku	66
4*	-	-	-	66

Keterangan : *(Base Metal)

Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

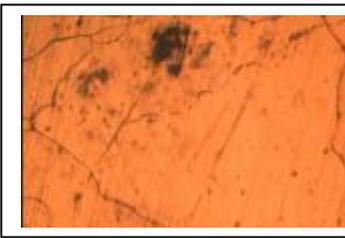
Kekuatan Tarik dari komposit Zn + MgO meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan, hasil pengujian rata-rata kekuatan tarik pada tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5 Data Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

No	Temperatur Pemanasan (° C)	Waktu Tahan (jam)	Tegangan <i>Ultimate</i> rata-rata σ_u (kN)	Regangan rata-rata ϵ (%)
1	600°C	5 jam	2,4	0,4
2	700°C	5 jam	2,6	0,6
3	800°C	5 jam	2,8	0,8
4*	-	-	2,9	0,9

Keterangan : *(Base Metal)

Hasil Pengamatan Struktur Mikro

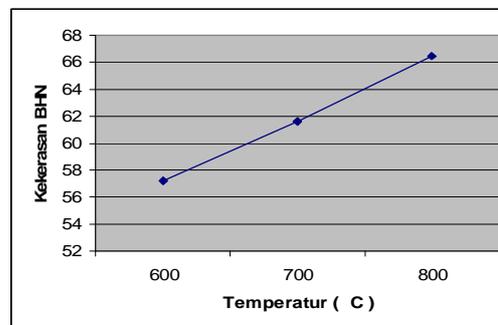
		
Foto Struktur Mikro <i>Base Metal</i> (Zn) pada pembesaran 200x	Foto Struktur Mikro Komposit Zn + MgO dengan Temperatur Pemanasan Infiltrasi 600°C pada pembesaran 200x	Foto Struktur Mikro Komposit Zn + MgO dengan Temperatur Pemanasan Infiltrasi 700°C pada pembesaran 200x

Gambar 2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

PEMBAHASAN

Pembahasan Hasil Pengujian Kekerasan Komposit Zn + MgO

Berdasarkan dari data hasil pengujian kekerasan pada komposit Zn + MgO dengan volume fraksi 10% tetap, pada komposit dengan temperatur pemanasan infiltrasi 600°C nilai kekerasan rata-ratanya 57,2 BHN, pada komposit dengan temperatur pemanasan infiltrasi 700°C nilai kekerasan rata-ratanya 61,6 BHN, dan pada komposit dengan temperatur pemanasan infiltrasi 800°C nilai kekerasan rata-ratanya 66,4 BHN, sehingga data-data tersebut diatas dapat digambarkan sebagai berikut :

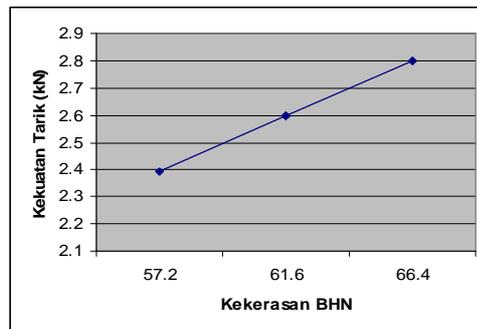


Gambar 3 Hubungan antara Temperatur dan Kekerasan

Dimana semakin tinggi temperatur pemanasan infiltrasi maka akan semakin tinggi pula nilai kekerasannya seiring dengan pendispersian yang merata, untuk nilai kekerasan komposit yang mengandung penguat partikel keras seperti alumina, zirkon, gelas *whisker* silikon karbida serta magnesia oksida nilai kekerasannya meningkat sedangkan nilai kekerasan komposit yang mengandung partikel lunak seperti grafit dan mika nilai kekerasannya menurun. Oleh karena itu pada teknik infiltrasi, suhu pemanasan mempengaruhi kinetika infiltrasi atau pendistribusian penguat dalam matrik. Sehingga mengakibatkan terjadinya pembasahan antara matrik cair dengan terdispersinya partikel penguat pada batas butir sehingga ukuran besar butir mengecil seperti terlihat pada gambar 2 foto struktur mikro.

Pembahasan Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Komposit Zn + MgO

Berdasarkan dari data hasil pengujian kekuatan tarik pada komposit Zn + MgO dengan volume fraksi 10% tetap, pada nilai kekerasan rata-rata 57,2 BHN nilai tegangan *ultimate* rata-ratanya 2,4 kN, pada nilai kekerasan rata-rata 61,6 BHN nilai tegangan *ultimate* rata-ratanya 2,6 kN, dan pada nilai kekerasan rata-rata 66,4 BHN nilai tegangan *ultimate* rata-ratanya 2,8 kN. Sehingga data-data tersebut diatas dapat digrafikkan sebagai berikut :

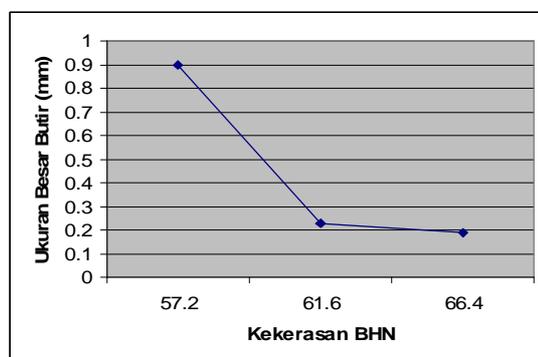


Gambar 4 Hubungan antara Kekerasan dan Kekuatan Tarik

Dimana semakin tinggi harga kekerasannya maka semakin tinggi pula harga kekuatan tariknya. Hal ini disebabkan karena, nilai kekerasan berbanding lurus dengan harga kekuatan tarik.

Pembahasan Hasil Pengamatan Struktur Mikro Komposit Zn + MgO

Berdasarkan data hasil perhitungan besar butir dan gambar foto struktur mikro komposit Zn + MgO dengan volume fraksi 10% tetap, pada temperatur pemanasan infiltrasi 600°C dengan nilai kekerasan rata-rata 57,2 BHN ukuran besar butirnya 0,9 mm, pada temperatur pemanasan infiltrasi 700°C dengan nilai kekerasan rata-rata 61,6 BHN ukuran besar butirnya 0,231 mm, dan pada temperatur pemanasan infiltrasi 800°C dengan nilai kekerasan rata-rata 66,4 BHN ukuran besar butirnya 0,187 mm, sehingga data-data tersebut diatas dapat digrafikkan sebagai berikut :



Grafik 5 Hubungan antara Kekerasan dan Ukuran Besar Butir

Dimana semakin tinggi nilai kekerasan maka ukuran dari besar butir semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh semakin tingginya temperatur pemanasan infiltrasi sehingga mengakibatkan partikel penguat terdispersi pada batas butir yang terjadi saat partikel penguat terperangkap

dalam struktur yang memadat oleh fasa matrik yang mengkristal sehingga pertumbuhan besar butir terhambat karena pengaruh laju pemadatan pada pendinginan lambat, seperti terlihat pada gambar foto struktur mikro.

SIMPULAN

Setelah melakukan pengujian dan menganalisa data pada pembuatan komposit Zn + MgO dengan volume fraksi 10% tetap, pada variasi temperatur pemanasan infiltrasi 600, 700, 800°C dapat disimpulkan bahwa :

1. Dengan bertambahnya temperatur infiltrasi, maka semakin banyak jumlah partikel yang terdispersi kedalam matrik seng.
2. Kekerasan dari komposit Zn + MgO meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan infiltrasi.
3. Kekuatan Tarik dari komposit Zn + MgO meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan infiltrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- F.R. Jones, 1989, *Interfacial Phenomena in Composite Material*, School of Material, University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom.
- Hartomo, A. J, 1997, *Komposit Matrik Logam*, Andi Offset, Yogyakarta
- Japrie, Sriati, 1983, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Erlangga, Jakarta.
- N. Hansen, D.Juul Jensen, T. Leffers, H. Lilholt, 1991, *Metal Matrix Composite Processing, Microstructure and Properties*.
- Schwartz, Mel. M, 1996, *Composite Materials*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey.
- Smallman, R.E, 1995, *Metallurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*, Erlangga, Jakarta.
- S.T. Petters, 1989, *Advance Composite Material and Process*.
- Sugiarto, 1999, *Pedoman Praktikum Uji Logam*, Universitas Merdeka Malang.
- Van Vlack, Lawrence.H,1989, *Elemen-elemen Ilmu dan Rekayasa Material*, Erlangga, Jakarta.

