



**KARAKTERISTIK MEKANIK, POROSITAS DAN DENSITAS
KOMPOSIT ALUMINIUM-MARMER DENGAN PROSES
METALURGI SERBUK**

DISERTASI

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN
MINAT : MATERIAL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Doktor Teknik



**FAISAL HABIB
NIM. 117060203111018**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
M A L A N G
2020**

**JUDUL DISERTASI :****KARAKTERISTIK MEKANIK, POROSITAS DAN DENSITAS KOMPOSIT ALUMINIUM-MARMER DENGAN PROSES METALURGI SERBUK**

Nama Mahasiswa : Faisal Habib
 NIM : 117060203111018
 Program Studi : Doktor Teknik Mesin
 Minat : Material/Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING :

Promotor : Prof. DR. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc.
 Ko-Promotor 1 : Prof. Ir. Sudjito Suparman, Ph.D.
 Ko-Promotor 2 : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, S.T., M. Eng.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Prof. Ir. I.G.N. Wardana, M.Eng., Ph.D.
 Dosen Penguji 2 : Prof. Dr. Ir. Pratikto, MMT.
 Dosen Penguji 3 : Prof. Dr. Ir. I.G. Ngakan Suardana, MT.

DISERTASI

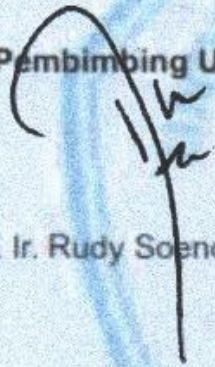
KARAKTERISTIK MEKANIK, DENSITAS DAN POROSITAS KOMPOSIT ALUMINIUM-MARMER DENGAN PROSES METALURGI SERBUK

Oleh:
FAISAL HABIB
NIM. 117060203111018

Telah dipertahankan di depan komisi penguji
pada tanggal 17 Maret 2020
memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Doktor Teknik

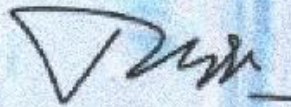
Komisi Pembimbing,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng. Sc.

Pembimbing Pendamping 1,



Prof. Ir. Sudjito Soeparman, Ph.D.

Pembimbing Pendamping 2,



Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, S.T., M.Eng.

Malang,

Universitas Brawijaya

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin
Kebijakan Program Doktor Ilmu Teknik Mesin



Dr. Eng. Ananda Purnowidodo, S.T., M.Eng.

NIM. 197103101998021001

PERNYATAAN ORIGINALITAS DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah DISERTASI ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah DISERTASI ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia DISERTASI dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku. (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 17 Maret 2020



Faisal Habib
117060203111018



RINGKASAN

Faisal Habib, Program Doktor Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Maret 2020, *Karakteristik mekanik, porositas dan densitas komposit aluminium-marmer dengan proses metalurgi serbuk*, Dosen Pembimbing : Rudy Soenoko, Sudjito Suparman, Yudy Surya Irawan.

Pemanfaatan limbah marmer sebagai penguat Metal Matrix Composite (MMC) dengan bahan dasar serbuk Aluminium murni melalui proses metalurgi serbuk (P/M) dimaksudkan untuk mendapatkan komposit paduan Aluminium-marmer yang memiliki sifat fisik dan mekanik yang lebih baik dari bahan dasarnya, serbuk aluminium yang digunakan berbentuk tak beraturan dengan ukuran partikel yang homogen sedangkan serbuk marmer diperoleh dari limbah hasil pemotongan batu marmer di Kabupaten Maros Propinsi Sulawesi selatan.

Serbuk Marmer dihaluskan dan diayak hingga mesh 200 atau sekitar $37\mu\text{m}$ sampai $74\mu\text{m}$. Serbuk aluminium dicampur masing-masing dengan fraksi berat serbuk marmer sebesar 10%, 15% dan 20%, kemudian dipadatkan dengan tekanan kompaksi 300 MPa menggunakan metode *cold isostatic pressing*. *Green body* yang dihasilkan disinter dengan suhu 650°C dan waktu penahanan suhu (*holding time*) selama 180 menit, pada tahap awal hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi dengan fraksi berat marmer terbesar mempunyai kekerasan terbaik oleh karenanya kemudian dibuat kembali *green body* dengan komposisi yang sama yakni fraksi berat 20% marmer untuk selanjutnya disinter dengan temperatur yang sama namun dengan lama waktu penahanan suhu yang divariasikan masing-masing selama 120, 180 dan 240 menit untuk menentukan pengaruh waktu penahanan terhadap kekerasan, porositas, densitas, serta karakteristik permukaan komposit yang diidentifikasi melalui SEM.

Dari uji kekerasan ditemukan bahwa hasil dari proses sintering 240 menit adalah spesimen yang memiliki kekerasan tertinggi, hal ini terjadi karena dengan waktu penahanan (*holding time*) yang lebih lama memberikan kesempatan lebih baik untuk terjadinya penyatuan dari ikatan partikel-partikel campuran bahan sehingga dapat meningkatkan densitas (*densification*) sekaligus memperbaiki porositas. Pada proses sintier ini terjadi pembentukan padatan serbuk berupa Alumina (Al_2O_3) yang merupakan salah satu jenis keramik oksida (*oxide ceramics*) yang merupakan hasil uraian sebagian dari Calcium Carbonate (CaCO_3) dan Aluminium yang ikut berperan meningkatkan kekerasan komposit. Selanjutnya berdasarkan prosedur standar ASTM-C20, hasil uji porositas dan densitas pada paduan Aluminium-Marmer menunjukkan bahwa spesimen dengan waktu sintering 240 menit juga memiliki densitas tertinggi dan porositas terkecil, dengan demikian hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lama waktu pemanasan dapat meningkatkan kekerasan dan kerapatan komposit.

Kata kunci: *Aluminium, Marmer, Sintering, Kekerasan, Densitas dan Porositas*

SUMMARY

Faisal Habib, Mechanical Engineering Doctoral Programme, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, March 2020, *Characteristic of mechanics, porosity and density of aluminium-marble composites by the powder metallurgy process*, Academic supervisor: Rudy Soenoko, Sudjito Suparman, Yudy Surya Irawan.

Utilization of marble waste as a reinforcement Metal Matrix Composite (MMC) with a pure aluminum powder base material through the powder metallurgy process (P/M) is intended to obtain Aluminium-marble alloy composites that have better physical and mechanical properties than the basic material, aluminium powder used is irregular in shape with homogeneous particle size while marble powder is obtained from marble stone cutting waste in Maros Regency, South Sulawesi Province.

Marble powder is mashed and sieved to mesh 200 or about $37\mu\text{m}$ to $74\mu\text{m}$. Aluminum powder is mixed each with 10%, 15% and 20% marble powder weight fraction, then compacted with 300 MPa compacting pressure using the cold isostatic pressing method, the resulting green body was sintered at 650°C for 180 minutes. At the initial stage the results of the study showed that the composition with the largest weight fraction of marble had the best hardness. The next green body was made with the same composition that is 20% weight fraction of marble then sintered with the same temperature but with a holding time that varies each for 120, 180 and 240 minutes to determine the effect of holding time on hardness, porosity, density, the surface characteristics of the composite are identified through SEM

From the hardness test was found that from the 240 minute sintering process, was obtained the specimen that had the highest hardness, this happens because with a longer holding time provides a better chance for the bonding of the particles of the mixture of materials so that it could increase density (*densification*) while reducing porosity. During the sintering process the solid of mixtures formed in the form of Alumina (Al_2O_3) which is a type of oxide ceramics as a result of the reaction and partial decomposition of Calcium Carbonate (CaCO_3) with Aluminium which has a role in increasing the hardness of composites. Further based on ASTM-C20-00 standard procedures, the porosity and density test results on Aluminum-Marble composites show that specimens with 240 minutes sintering time also have the highest density and less porosity, thus the results of this study indicate that the longer holding time can increase the hardness and density of composites.

Keywords: Aluminium, Marble, Sintering, Hardness, Density and Porosity



PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah atas rahmat dan karunia Allah SWT, sehingga penulisan disertasi ini dapat dirampungkan jua sebagaimana mestinya. Disertasi ini berisikan hasil penelitian rekayasa material dalam upaya memanfaatkan limbah pemotongan batu marmer (*marble*) menjadi bahan komposit Aluminium-marmer dan diharapkan dapat digunakan dalam bidang teknik dan konstruksi lainnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pembuatan bahan komposit Aluminium-marmer serta dapat dijadikan alternatif pemanfaatan dan penanganan limbah pemotongan batu marmer sehingga secara tidak langsung turut membantu memberi solusi dalam penanganan pencemaran lingkungan. Berbagai kendala yang dijumpai di tahap penyiapan bahan dalam penelitian ini berkaitan dengan preparasi benda uji dengan bahan dasar yang terdiri dari limbah pemotongan marmer yang tentu saja harus dihaluskan secara merata agar didapatkan butiran serbuk yang seragam dimana debunya cukup berbahaya bagi kesehatan. *Green body* hasil kompaksi awalnya juga cukup rapuh sehingga mudah pecah saat dipindahkan ke dalam *furnace chamber* oleh karenanya dibutuhkan kehati-hatian. Sebagai bagian dari proses metalurgi serbuk, proses pemanasan atau sinter harus dilakukan secara cermat agar campuran yang terbentuk dapat menyatu dengan baik, dalam penelitian ini proses sinter dilakukan dalam berbagai variasi temperatur untuk menentukan suhu optimal agar didapatkan spesimen komposit terbaik secara fisik dan mekanik, yakni terbentuknya komposit dengan tingkat kekerasan terbaik pula sesuai dengan komposisi paduan yang dirancang berdasarkan fraksi berat dan lama waktu penahanan (*holding time*).

Malang, Maret 2020

PENULIS

**DAFTAR ISI**

IDENTITAS DISERTASI	i
LEMBAR PERUNTUKAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
RIWAYAT HIDUP	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
LEMBAR ORISINALITAS	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Keaslian Penelitian	5
1.6. Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Komposit	7
2.1.1. <i>Metal Matrix Composite</i> (MMC)	10
2.1.2 Komposit Laminat Hibrid	13
2.2. Interface Pada Komposit	14
2.2.1. Interface dan Wettability pada Matriks dan Penguat	14
2.2.2. <i>Interface dan Wettability</i> Lapisan Laminat MMC Dengan Pelapisan	17



2.3. Material.....	17
2.3.1. Aluminium.....	17
2.3.2 Alumina (Al ₂ O ₃).....	19
2.3.4. Marmer.....	20
2.4. Metalurgi Serbuk.....	21
2.4.1. Karakteristik Serbuk.....	22
2.5. Karakterisasi Bahan Komposit.....	38
2.6. Densitas, Porositas dan Penyerapan Air.....	40
2.7. Kekerasan (<i>hardness</i>) Komposit.....	42
2.8. Difraksi Sinar-X Serbuk.....	43
2.9. Penelitian Terdahulu.....	45
2.10. Kontribusi Hasil Penelitian.....	50
2.11. Orisimilitas.....	51
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....	53
3.1. Kerangka Berfikir dan Tinjauan Teoritis.....	53
3.2. Hipotesis.....	55
3.3. Proses Pembentukan dengan Metalurgi Serbuk.....	56
BAB IV METODE PENELITIAN.....	58
4.1. Bahan Penelitian.....	58
4.2. Bentuk dan Ukuran Spesimen.....	59
4.3. Alat yang Digunakan.....	59
4.4. Prosedur Pengujian.....	61
4.4.1. Tahap persiapan dan karakterisasi bahan penelitian.....	61
4.4.2. Tahap Pembuatan Spesimen.....	62
4.5. Metode Pengujian.....	63
4.5.1. Metode Pengambilan Data.....	63
4.5.2 Tahap Pengujian Spesimen.....	65



Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya	Repository Universitas Brawijaya
4.6. Metode Penelitian.....	Repository Universitas Brawijaya	67
4.6.1. Variabel Penelitian.....	Repository Universitas Brawijaya	68
4.6.2. Diagram Alir Penelitian.....	Repository Universitas Brawijaya	68
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	Repository Universitas Brawijaya	70
5.1. Karakterisasi Komposit dan Bahan Dasar.....	Repository Universitas Brawijaya	70
5.2. Pengujian Kekerasan.....	Repository Universitas Brawijaya	73
5.3. Morphology dengan uji SEM.....	Repository Universitas Brawijaya	78
5.4. Pengujian Densitas, Porositas (ASTM C 20-00).....	Repository Universitas Brawijaya	80
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	Repository Universitas Brawijaya	90
6.1. Kesimpulan.....	Repository Universitas Brawijaya	90
6.2. Saran.....	Repository Universitas Brawijaya	91
DAFTAR PUSTAKA.....	Repository Universitas Brawijaya	xviii
LAMPIRAN	Repository Universitas Brawijaya	
Lampiran 1.....	Repository Universitas Brawijaya	1
Lampiran 2.....	Repository Universitas Brawijaya	11
Lampiran 3.....	Repository Universitas Brawijaya	19
Lampiran 4.....	Repository Universitas Brawijaya	28
Lampiran 5.....	Repository Universitas Brawijaya	31
Lampiran 6.....	Repository Universitas Brawijaya	34
Lampiran 7.....	Repository Universitas Brawijaya	35
Lampiran 8.....	Repository Universitas Brawijaya	36



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Komposisi Paduan Aluminium Komersial* 13

Tabel 2. 2. Sifat-sifat Logam Aluminium (Corden, 1994) 18

Tabel 2. 3. Sifat-sifat Alumina (Corden, 1994) 19

Tabel 2. 4. Hasil Analisis Kandungan Unsur Kimia Limbah Marmer 21

Tabel 2. 5. Klasifikasi Bentuk Partikel Serbuk (L. Kang, 2005) 23

Tabel 2. 6. Pengaruh Proses Sinter (Shatokha, 2012) 35

Tabel 4. 1. Perbandingan Fraksi Berat Komposit 62

Tabel 4. 2. Perbandingan Hasil Proses Pembentukan dengan Metalurgi Serbuk Berdasarkan Fraksi Berat dan Variasi Temperatur Sinter yang Dilakukan dengan Durasi Sinter 180 Menit 63

Tabel 5. 1. Hasil Uji Komposisi Unsur Kimia Marmer 70

Tabel 5. 2. Kandungan Serbuk Aluminium Hasil Uji Komposisi 71

Tabel 5. 3. Komposisi Kandungan Kimia Komposit 72

Tabel 5. 4. Hasil Pengukuran Berdasarkan Cara ASTM C.20-00 dalam Berbagai Fraksi. 80

Tabel 5. 5. Hasil Perhitungan Densitas, Porositas dan Daya Serap Air pada Spesimen 80

Tabel 5. 6. Hasil Pengujian Porositas Berdasarkan Standar ASTM C,20-00 84

Tabel 5. 7. Hasil Perhitungan Lengkap Ketiga Spesimen yang Telah Diuji Densitas dan Porositas 84

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1. Komposit Isotropik	9
Gambar 2. 2. Arah Penguatan Komposit	9
Gambar 2. 3. Klasifikasi MMC Berdasarkan Bentuk Penguat	11
Gambar 2. 4. Komposisi Lamina Isotropik.....	14
Gambar 2. 5. <i>Mechanical Bonding</i>	14
Gambar 2. 6. <i>Electrostatic Bonding</i>	15
Gambar 2. 7. <i>Chemical Bonding</i>	15
Gambar 2. 8. Gaya yang Dihasilkan pada Peristiwa <i>Wetting</i>	16
Gambar 2. 9. Sudut Kontak Adhesivitas Permukaan Padat.....	17
Gambar 2.10. Bentuk Partikel Serbuk	24
Gambar 2.11. Ilustrasi Bentuk Butiran dalam Tahapan Proses Metalurgi Serbuk	26
Gambar 2.12. Jenis Kompaksi/Penekanan	27
Gambar 2. 13. Perilaku Serbuk saat Kompaksi	28
Gambar 2. 14. Mekanisme Pengurangan Energi Permukaan Selama Proses Sinter (a) <i>densification mechanism</i> dan (b) <i>coarsening</i>	29
Gambar 2. 15. Sudut Kesetimbangan Dihedral antara <i>Grain Boundary</i> dan <i>solid/vapor</i> .	30
Gambar 2. 16. Idealisasi Pemodelan Tahapan Proses Sinter yang Meliputi (a) <i>Initial Stage</i> , (b) <i>necking</i> partikel diakhir <i>initial stage</i> , (c) <i>intermediate stage</i> dan (d) <i>final stage</i>	31
Gambar 2. 17. Perilaku Serbuk pada Tahapan Sintering.....	32
Gambar 2. 18. Tahapan Pertumbuhan Leher dengan Rasio X/D	33
Gambar 2. 19. Struktur Pori pada <i>Intermediate Stage</i>	33
Gambar 2. 20. Pertumbuhan Butir yang Mengeliminasi Porositas.....	34
Gambar 2. 21. Pemisahan dan Pembulatan Pori pada <i>Final Stage</i>	34
Gambar 2. 22. Pengaruh Temperatur Sinter Terhadap Sifat Mekanik	35
Gambar 2. 23. Perilaku Partikel Serbuk saat <i>Solid State Sintering</i>	36
Gambar 2. 24. Perilaku Partikel Serbuk saat Proses <i>Liquid Phase Sintering</i>	37
Gambar 2. 25. Proses Terjadinyya Densifikasi dan <i>Swelling</i>	38
Gambar 2. 26. Skema Pengujian Kekerasan dengan Indentasi Vickers	43
Gambar 2. 27. Difraksi Sinar-X pada Suatu Kristal	44
Gambar 3. 1. Kerangka Konsep Penelitian.....	55
Gambar 3. 2. Skema Prosedur Kegiatan Penelitian	57
Gambar 4. 1. Serbuk Marmer.....	58



Gambar 4. 2. Serbuk Aluminium.....	59
Gambar 4. 3. Bentuk Spesimen Uji yang Dibuat.....	59
Gambar 4. 4. Spesimen yang Dibentuk Silinder untuk Pengujian Penampang.....	65
Gambar 4. 5. Spesimen Komposit dalam Berbagai Fraksi Berat.....	65
Gambar 4. 6. Diagram Alir Penelitian.....	69
Gambar 5. 1. Pola XRD untuk Bahan Dasar Serbuk Marmer.....	71
Gambar 5. 2. Pola XRD untuk Bahan Dasar Serbuk Aluminium.....	71
Gambar 5. 3. Pola XRD untuk Komposit Aluminium – Marmer.....	72
Gambar 5. 4. Grafik Tingkat Kekerasan Permukaan masing-masing Spesimen.....	74
Gambar 5. 5. Grafik Tingkat Kekerasan Penampang masing-masing Spesimen.....	74
Gambar 5. 6. Spesimen dari Berbagai Komposisi Fraksi Berat setelah Disinter.....	75
Gambar 5. 7. Spesimen Komposit yang Telah Disinter pada Temperatur 700°C.....	75
Gambar 5. 8. Grafik Tingkat Kekerasan Permukaan masing-masing Spesimen dalam Berbagai Variasi Lama Waktu Pemanasan.....	76
Gambar 5. 9. Grafik Tingkat Kekerasan Penampang masing-masing Spesimen dalam Berbagai Variasi Lama Waktu Pemanasan.....	77
Gambar 5. 10. Foto Hasil SEM Permukaan Spesimen dengan Fraksi Berat 20% - 2H. a) 200µm dan b) 20µm.....	78
Gambar 5. 11. Foto Hasil SEM Permukaan Specimen dengan Fraksi Berat 20% - 2H. a) 200 µm dan b) 20 µm.....	79
Gambar 5. 12. Foto Hasil SEM Permukaan Spesimen dengan Fraksi Berat 20% - 4H. a) 200 µm dan b) 20 µm.....	79
Gambar 5. 13. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Densitas Material.....	85
Gambar 5. 14. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Porositas Material.....	85
Gambar 5. 15. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Daya Serap Air Material.....	85
Gambar 5. 16. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Berat Spesifik Material.....	86
Gambar 5. 17. Porositas pada Penampang dengan Lama Waktu Sinter 120 Menit.....	86
Gambar 5. 18. Porositas pada Penampang dengan Lama Waktu Sinter 180 Menit.....	87
Gambar 5. 19. Porositas pada Penampang dengan Lama Waktu Sinter 240 Menit.....	87



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Teknologi bahan terus dikembangkan mengingat dalam banyak bidang industri sangat diperlukan berbagai jenis material yang sesuai syarat-syarat teknis yang dibutuhkan. Bahan komposit belakangan ini merupakan salah satu bahan teknik yang menjadi favorit terutama dalam sifat teknis yakni kekuatan, kekerasan, kekakuan, bobot yang ringan, koefisien ekspansi termal yang rendah, peredaman getaran yang baik, ketahanan aus, ketahanan korosi serta formability yang baik, keunggulan ini menjadikannya selalu menarik untuk diteliti agar didapatkan jenis komposisi material baru yang dapat memiliki sifat-sifat yang lebih baik dibanding bahan teknik lainnya. Contoh penggunaannya banyak dijumpai pada industri otomotif, industri pesawat terbang, kereta api, bahan konstruksi, peralatan olah raga, alat rumah tangga, dan sebagainya (Narayan, 2014).

Salah satu jenis bahan komposit yang sering dijumpai adalah *metal matrix composite* (MMC) yang merupakan salah satu jenis bahan komposit bermatriks metal/aluminium dengan berbagai macam penguatan partikel seperti alumina (Al_2O_3), silika (SiO_2), SiC dan sebagainya. Khusus Aluminium matriks komposit (AMC) telah dipelajari secara luas sejak tahun 1920-an dan saat ini banyak digunakan pada pembuatan peralatan olah raga, kemasan elektronik, maupun dalam industri otomotif. Disamping berbagai keunggulan yang telah disebutkan di atas, pembuatan bahan komposit aluminium umumnya juga terkendala karena membutuhkan biaya yang relative besar dengan teknologi yang cukup tinggi. Di sisi lain, bahan aluminium pada umumnya memiliki kelemahan berupa sifat lunak (*ductile*) dan dengan katahahan panas yang rendah sehingga penggunaannya dalam bidang konstruksi tertentu masih sangat terbatas.

Pembuatan material komposit berbahan dasar aluminium umumnya ditujukan untuk memperkuat sifat teknis bahan dasar, oleh karenanya diperlukan bahan penguat yang secara teknis dapat memperbaiki karakteristik komposit MMC nantinya. Oleh karena material komposit terdiri dari dua atau lebih unsur/element yang masing-masing berperan memperbaiki sifat dan karakteristik termasuk kekerasan material komposit maka perubahan persentase komposisi kandungan masing-masing unsur/element akan dapat mempengaruhi sifat fisik dan sifat mekanis, (Mutlu, 2006).

Evaluasi dan pengujian kualitas bahan komposit MMC dengan penggunaan berbagai komposisi material penguat yang dipandang baru untuk mendapatkan sifat teknis material yang baik seperti disebutkan diatas telah banyak dilakukan, diantaranya dengan menggunakan bahan serbuk jerami dan sekam sebagai bahan/unsur tambahan yang keduanya mengandung unsur silica dan memberikan efek seperti halnya bahan keramik (Mutlu, 2009).

Pemanfaatan limbah serbuk marmer sejauh ini terbatas untuk keperluan penguatan bahan konstruksi bangunan, (Chetry, 2018) yang menemukan fenomena meningkatnya kekerasan dan ketahanan kompressif beton setelah dicampurkan dengan serbuk marmer dalam takaran tertentu disamping dipandang sebagai bahan konstruksi ramah lingkungan. Pada penelitian lain ditemukan kenyataan bahwa penggunaan serbuk marmer sebagai pengisi pada komposit berbahan dasar karet dapat memperbaiki sifat mekanis yakni dengan meningkatnya kekuatan tarik, modulus geser, kekerasan, termasuk naiknya nilai densitas, (Ahmed, 2012).

Aluminium sejauh ini dikenal merupakan matriks yang paling populer dan potensial untuk komposit bermatriks logam (MMC). Paduan Aluminium cukup menarik karena densitas yang rendah, memiliki kemampuannya untuk diperkuat oleh presipitasi, ketahanan korosi yang baik, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, serta kapasitas redaman yang tinggi sehingga sebagai bahan teknik menjadi menarik untuk dipadukan dengan bahan lainnya. Matriks aluminium pada umumnya merupakan paduan Al-Si, Al-Cu, dan lain-lain, sebagaimana diusulkan oleh American Aluminium Association, Aluminium Matrix Composite (AMC) harus merujuk pada bahan paduan penguatnya sebagai sebutannya. Pada era tahun 1980-an, industri transportasi mulai mengembangkan AMC yang diperkuat berbagai macam material tambahan, hal mana menjadi sangat menarik karena sifat isotropiknya yakni sifat mekaniknya lebih baik dari paduan tanpa penguatnya, disamping dianggap biaya pengolahannya yang relatif rendah.

Penggunaan aluminium sebagai bahan dasar komposit MMC yang diperkuat serat alami tertentu melalui proses metalurgi serbuk telah diupayakan oleh (Maleque, 2012) untuk dikembangkan menjadi komposit aluminium bagi aplikasi pad rem otomotif dengan menguji densitas, porositas, kekerasan dan sifat mekanik menggunakan scanning electronic microscopic (SEM). Sebelumnya, (Radzi, 2011) telah melakukan karakterisasi serbuk palm (*palm ash*) dengan menggunakan XRF, Malvern Particle Size serta Scanning Electron Microscopy (SEM) yang ditujukan untuk melihat potensi penggunaan serbuk palm (*palm ash*) menggantikan bahan asbestos dalam komposit MMC. Bahwa material komposit terdiri



dari dua atau lebih unsur/elemen yang masing-masing berperan memperbaiki sifat dan karakteristik termasuk porositas material komposit itu sendiri maka perubahan persentase komposisi kandungan unsur/elemen akan dapat mempengaruhi sifat fisik dan sifat mekanis sebagaimana telah dilakukan oleh (Mutlu, 2006). Dalam proses pembentukan komposit umumnya dilakukan melalui proses solid-state yakni metalurgi serbuk, metode ini memungkinkan untuk mendapatkan AMC yang diperkuat partikel dengan sifat mekanis yang tinggi

Karenanya penelitian ini juga dilakukan dalam rangka menyelidiki karakteristik AMC yang dibentuk juga melalui proses metalurgi serbuk dengan memanfaatkan limbah marmer sebagai campuran penguat agar dapat diperoleh komposisi material Komposit Aluminium-marmer yang ideal. Dengan pemanfaatan bahan limbah serbuk marmer yang banyak terdapat di Kabupaten Maros, Sulawesi Selatan ini tentu saja menjadi salah satu alternatif yang dapat mereduksi masalah lingkungan yang ditimbulkannya. Penelitian ini diarahkan untuk menyelidiki karakteristik komposit yang dibuat dengan variasi persentase fraksi berat bahan serbuk marmer dan serbuk Aluminium murni yang dapat terbentuk dengan baik melalui proses metode metalurgi serbuk yang diketahui mampu memberikan kontrol yang teliti terhadap komposisi dan penggunaan campuran yang tidak dapat difabrikasi dengan proses lain.

Proses metalurgi serbuk yang merupakan proses pembentukan spesimen dengan menggunakan bahan dasar berbentuk serbuk yang dikompaksi kemudian disinter di tungku pemanas (furnace) hingga temperatur dibawah titik leleh yang sering dinyatakan sebagai proses konsolidasi serbuk pada temperatur tinggi. Maka dengan proses metalurgi serbuk dapat diperoleh komposit dengan efisiensi penggunaan bahan yang relatif tinggi serta tingkat terjadinya cacat seperti segregasi dan kontaminasi yang sangat rendah menyebabkan penulis memilih judul disertasi “Karakteristik Mekanik, Porositas dan Densitas Komposit aluminium-marmer dengan proses Metalurgi Serbuk”

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas maka dapat diidentifikasi dan dirumuskan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Apakah serbuk marmer benar-benar dapat memenuhi syarat sebagai bahan komposit yang dapat memperbaiki karakteristik dan sifat mekanis komposit berbahan dasar aluminium murni sehingga penting diketahui seberapa besar pengaruh persentase fraksi



4

berat serbuk marmer dan aluminium sebagai material komposit melalui proses metalurgi serbuk terhadap karakteristik permukaan, kekerasan, densitas dan porositas.

2. Apakah temperatur sinter berpengaruh terhadap terbentuknya spesimen komposit mengingat temperatur leleh kedua bahan sangat berbeda jauh. Dalam kaitan ini berapakah komposisi fraksi berat campuran yang dapat menghasilkan komposit dengan temperatur sinter yang dipandang sebagai temperatur ideal.
3. Dari berbagai variable pembentukan melalui proses metalurgi serbuk seperti komposisi campuran, temperatur sinter, apakah terdapat pengaruh yang signifikan durasi waktu penahanan saat pemanasan sintering (*holding time*) dan perbedaan suhu sinter terhadap sifat-sifat mekanis komposit seperti struktur mikro, porositas dan densitas serta kekerasan baik pada permukaan maupun pada penampang komposit yang dihasilkan.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian tentang pembuatan bahan komposit yang memanfaatkan limbah serbuk marmer dan aluminium sesungguhnya dapat mencakup aspek pembahasan yang sangat luas sehingga dipandang perlu diberikan batasan masalah sebagai berikut :

1. Bahan utama dalam penelitian ini menggunakan bubuk aluminium murni produk *MERCK* buatan Germany berbentuk serbuk halus dengan spesifikasi ukuran rata-rata $< 80 \mu\text{m}$ sehingga dianggap dapat langsung digunakan pada pencampuran (*blending*) dengan serbuk marmer.
2. Tidak memperhitungkan pengaruh langsung maupun tak langsung dari reaksi unsur kimia partikel marmer yang diambil dari kabupaten Maros provinsi Sulawesi Selatan terhadap proses terbentuknya komposisi spesimen serta sifat-sifat mekanis lainnya setelah dilakukan pengujian.
3. Tidak mempertimbangan temperature titik leleh bahan marmer untuk menentukan temperature sinter mengingat perbedaan titik leleh kedua bahan yakni marmer dan aluminium sangat jauh berbeda.
4. Persentase penambahan serbuk marmer (fraksi berat) ke dalam serbuk aluminium pada setiap campuran masing-masing adalah 0, 5, 10, 15 dan 20 (% berat).
5. Pembentukan *green body* dilakukan dengan menggunakan cetakan *stainless steel* pada mesin *press* dengan tekanan kompaksi 300 MPa.
6. Proses sinter dilakukan dengan metode sinter tanpa tekanan pada berbagai variasi temperatur masing-masing adalah 500°C , 600°C , 650°C dan 700°C .

1.4. Tujuan Penelitian

Dalam penelitian ini akan dilakukan investigasi pengaruh besaran perbandingan komposisi fraksi berat serbuk Aluminium-marmer pada material komposit melalui proses pembentukan metalurgi serbuk (*powder metallurgy*) terhadap sifat-sifat komposit yang berkenaan dengan sifat mekanis seperti kekerasan, densitas dan porositas sehingga dengan demikian fokus penelitian ini bertujuan sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui komposisi perbandingan fraksi berat serbuk Aluminium-marmer yang memungkinkan terbentuknya komposit yang dapat dibuat melalui proses metalurgi serbuk sekaligus mengetahui suhu sinter terbaik pada pembentukan komposit dimaksud.
2. Untuk mengetahui pengaruh suhu sinter pada beberapa campuran variasi fraksi berat *green body* bahan komposit aluminium-marmer terhadap sifat mekanik komposit yang dihasilkan terutama nilai kekerasan, densitas, dan porositas.
3. Untuk mengetahui pengaruh lama waktu penahanan pemanasan (*sintering holding time*) terhadap morfologi permukaan, kekerasan, densitas dan porositas komposit.

1.5. Keaslian Penelitian.

Penelitian interaksi berbagai bahan organik dengan matrik penguat untuk mendapatkan komposisi ideal bahan komposit terutama pada Aluminium Matrix Composite (AMC) telah banyak dilakukan, demikian halnya pemanfaatan bahan limbah marmer sejauh ini lebih banyak sebagai penguat bahan konstruksi bangunan seperti semen maupun conblok dan belum dilakukan secara spesifik bagi upaya mengembangkan bahan teknik berbahan dasar metal (MMC). Pemanfaatan limbah serbuk marmer sebagai unsur penguat aluminium murni berdasarkan penelusuran topik-topik penelitian yang telah dilakukan sebelumnya belum pernah dilakukan, oleh karenanya penelitian tentang “Karakteristik Mekanik, Porositas dan Densitas Komposit *aluminium-marmer* dengan Proses Metalurgi Serbuk” menjadi penelitian yang menarik karena dalam komposisi tertentu serbuk Aluminium dan serbuk marmer dibentuk menjadi spesimen komposit melalui metoda metalurgi serbuk dalam bentuk komposit partikel (*Particulate Composite Materials*) dimana partikel/butiran serbuk marmer dan serbuk aluminium diproses bersama-sama, dan pencampuran keduanya memerlukan persentase takaran fraksi berat yang sesuai sehingga memungkinkan terbentuknya spesimen komposit mendekati ideal. Dari komposisi terbaik spesimen kemudian disinter dengan berbagai variasi lama waktu penahanan (*holding time*) lalu diselidiki kekerasan, porositas dan densitas bahan yang dihasilkan, oleh karenanya keaslian penelitian ini terkait pembuatan



6

AMC dengan penggunaan limbah serbuk marmer sebagai penguat dapat dipertanggungjawabkan.

1.6. Manfaat Penelitian.

1. Ditemukan komposit yang unik dengan logam induk berupa aluminium dengan material penguat berupa serbuk marmer yang diharapkan dapat dikembangkan lebih jauh di masa yang akan datang.
2. Memperkaya khasanah jenis paduan penguat material komposit berbahan dasar aluminium AMC dan menjadi pilihan alternatif pemanfaatan limbah marmer.
3. Mendorong bagi terbukanya peluang didapatkannya material komposit berbahan dasar aluminium (AMC) yang ringan, kuat dan keras serta ramah lingkungan.
4. Mendorong pemanfaatan bahan limbah untuk berkontribusi mengurangi potensi pencemaran lingkungan, limbah debu pemotongan marmer berbahaya bagi kesehatan.
5. Dapat dijadikan referensi pembuatan komposit dengan proses metalurgi serbuk dengan pemanasan dan lama penahanan (*sintering holding time*) yang dapat disesuaikan.
6. Membuka kemungkinan untuk dapat digunakan sebagai material bodi kapal laut maupun pesawat udara yang memerlukan bahan yang kuat, rigid, ringan dan tahan karat.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Komposit

Komposit merupakan jenis material yang terus dikembangkan karena sifat-sifatnya yang menguntungkan seperti : kekuatan dan kekakuan yang tinggi, ketahanan fatigue yang baik dan relatif tidak mengalami korosi. Komposit adalah material hasil kombinasi makroskopis dari dua atau lebih komponen yang berbeda, dengan tujuan untuk mendapatkan sifat-sifat fisik dan mekanik tertentu yang lebih baik daripada sifat dasar masing-masing komponen penyusunnya, komponen penyusun dari komposit yaitu berupa penguat (*reinforcement*) dan pengikat (*matrix*), karena bahan komposit merupakan bahan gabungan secara makro, maka bahan komposit dapat didefinisikan sebagai suatu system material yang tersusun dari gabungan atau campuran/kombinasi dua atau lebih unsur-unsur utama yang secara makro berbeda di dalam bentuk dan atau komposisi material yang pada dasarnya tidak dapat dipisahkan untuk membentuk material baru yang lebih bermanfaat (Miracle, 2001).

Kekuatan dan sifat dari komposit merupakan fungsi dari fasa penyusunnya, komposisinya serta geometri dari fasa penguat. Geometri fasa penguat disini adalah bentuk dan ukuran partikel, distribusi, dan orientasinya. Penguat merupakan material yang umumnya jauh lebih kuat dari matriks dan berfungsi memberikan kekuatan tarik. Komposit mempunyai sifat berbeda dengan sebagian besar material konvensional yang selama ini dikenal bersifat tidak homogen dan anisotropik sehingga sering dipelajari dari dua sudut pandang yang berbeda, yaitu mikromekanik dan makromekanik.

Mikromekanik mengkaji interaksi antar bahan-bahan pembentuknya dalam skala mikroskopik. Pada kajian makromekanik, komposit dianggap homogen dan pengaruh bahan-bahan pembentuknya hanya dideteksi sebagai sifat yang tampak secara menyeluruh. Material komposit dengan menggunakan bahan dasar aluminium sebagai matrik, dapat dikategorikan sebagai golongan komposit Metal Matrix Composite (MMC). Untuk meningkatkan kemampuan dari bahan aluminium telah diupayakan oleh banyak peneliti di bidang komposit dengan cara memberi bahan penguat keramik seperti alumina (Al_2O_3), silikon karbida (SiC), periklas (MgO) dan lain-lain.

Komposit dibuat dengan kombinasi dua atau lebih material yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopik untuk membentuk material yang baru dengan syarat terjadi ikatan antara kedua material tersebut. Penguat berperan memberi efek

penguatan terhadap komposit dimana penguat ini bersifat kurang ulet, tetapi rigid dan lebih kuat, karena modulus elastisitasnya lebih tinggi dari pada matriks. Matriks merupakan bahan dasar yang berperan sebagai penyangga dan pengikat reinforced. Matriks memiliki karakteristik lunak, ulet, berat persatuan volume yang rendah dengan modulus elastisitas yang rendah. Matriks harus memiliki kemampuan mengikat dan atau memberikan ikatan antar muka (*interface bonding*) yang kuat antara matriks dan penguatnya. Dengan kata lain bahan pembentuk komposit terdiri dari matriks dan penguat (*reinforcement*) yang berbeda dalam bentuk dan komposisi serta tidak saling melarutkan.

Matriks adalah *body constituent* yang memberi bentuk pada komposit sedangkan *reinforcement* adalah *structural constituent* yang menentukan internal struktur dari komposit. *Reinforcement* komposit harus mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibanding matriks sehingga dapat berfungsi sebagai penahan beban, sedangkan matriks harus dapat mentransfer beban dengan baik ke *reinforcement*. Fungsi utama dari penguat adalah sebagai penopang kekuatan dari komposit, sehingga tinggi rendahnya kekuatan komposit sangat tergantung dari penguat yang digunakan, karena tegangan yang dikenakan pada komposit mulanya diterima oleh matriks akan diteruskan kepada penguat, sehingga penguat akan menahan beban sampai beban maksimum. Oleh karena itu penguat harus mempunyai tegangan tarik dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada matriks penyusun komposit. Matriks adalah fasa dalam komposit yang mempunyai bagian atau fraksi volume terbesar (dominan).

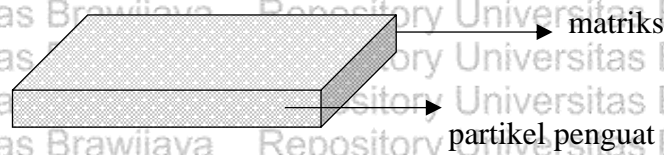
Matriks berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari efek lingkungan serta kerusakan akibat benturan. Komposit dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis penguatnya, yaitu:

1. Partikulat, yang terdiri dari partikel besar dan penguatan dispersi.
2. Fiber, yang terdiri dari kontinyu dan diskontinyu (terikat dan acak).
3. Struktural, yang terdiri dari lamina dan *panel sandwich*

Berdasarkan sifat penguatnya, maka komposit dibagi menjadi dua, yaitu:

a. Komposit Isotropik

Komposit isotropik adalah komposit yang penguatnya memberikan penguatan yang sama untuk berbagai arah (dalam arah transversal maupun longitudinal) sehingga segala pengaruh tegangan atau regangan dari luar akan mempunyai nilai penguatan yang sama. Pada gambar 2.1 di bawah ini merupakan gambar dari komposit isotropik.

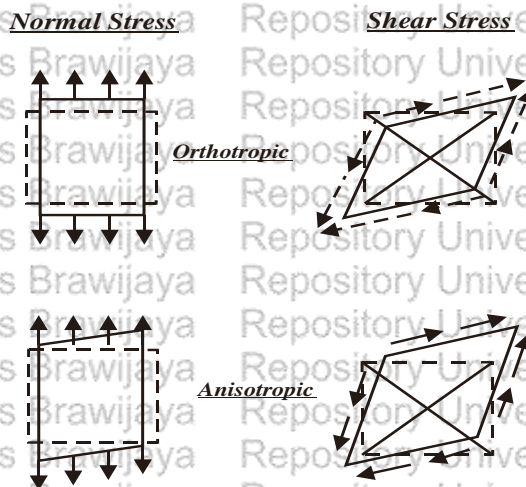


Gambar 2. 1. Komposit Isotropik

Dari gambar 2.1 di atas menerangkan bahwa pada komposit isotropik bila diberikan gaya luar akan memberikan tegangan atau penguatan yang sama ke segala arah.

b. Komposit Anisotropik

Komposit anisotropik adalah komposit yang matriksnya memberikan penguatan tidak sama terhadap arah yang berbeda, misalnya nilai penguatan untuk arah transversal tidak sama dengan penguatan arah longitudinal. Gambar 2.2 di bawah menerangkan mengenai arah penguatan komposit dan menunjukkan bahwa pada komposit anisotropik jika diberikan gaya luar yang sama, maka efek yang ditimbulkan akan mempunyai tegangan yang berbeda tiap arah penguatannya.



Gambar 2. 2. Arah Penguatan Komposit (Miracle, 2001)

Umumnya penguatan paling besar terjadi pada penguat arah serat. Namun bila menggunakan penguat berupa partikel maka berdasarkan matriksnya, komposit dibedakan menjadi beberapa jenis (Miracle, 2001) yaitu:

- Metal Matrix Composite* (MMC), dengan matriksnya adalah material logam
- Polymer Matrix Composite* (PMC), dengan matriksnya adalah material polimer
- Ceramic Matrix Composite* (CMC), dengan matriksnya adalah material keramik

2.1.1. Metal Matrix Composite (MMC)

Metal Matrix Composite adalah salah satu jenis komposit yang merupakan kombinasi dari dua material atau lebih dengan matriks berupa logam dan umumnya menggunakan keramik atau semacamnya sebagai penguat. Bila ditinjau dari segi sifat mekanisnya, MMC jika dibandingkan dengan material monolitik memiliki sifat- sifat sebagai berikut (Miracle, 2001) & (Fu, 2012):

- Kekuatan tinggi (*Higher stiffness-to-density ratios*)
- Modulus elastis tinggi (*Higher strength-to-density ratios*)
- Ketahanan fatik lebih baik
- Memiliki sifat yang baik pada temperatur tertentu, yaitu kekuatan tinggi dan laju *creep* yang rendah
- Koefisien termal ekspansi lebih rendah, konduktivitas listrik dan termal tinggi
- Ketahanan aus lebih baik
- Sifat ketangguhan dan ketahanan impak serta ketahanan permukaan tinggi
- Tahan terhadap perubahan lingkungan atau temperatur secara tiba-tiba

Keunggulan MMC jika dibandingkan dengan PMC (Fu, 2012), yaitu :

- Ketahanan terhadap temperature tinggi
- Transfer tegangan dan regangan yang baik
- Lebih tahan terhadap api Tidak mudah terbakar
- Memiliki kekakuan dan Kekuatan tekan dan geser yang baik
- Tidak menyerap kelembapan
- Konduktivitas panas dan listrik lebih tinggi sehingga memiliki ketahanan aus dan muai termal yang lebih baik
- Ketahanan terhadap radiasi lebih tinggi

Sedangkan kekurangan MMC :

- Biayanya mahal

Standarisasi material dan proses yang sedikit sifat Matrik pada MMC :

- Mempunyai keuletan yang tinggi
- Mempunyai titik lebur yang rendah
- Mempunyai densitas yang rendah

Berdasarkan bentuk partikel penguatnya, MMC dibagi menjadi 2, (Fu, 2012) yaitu:

1. Continuous

Pada jenis ini bahan yang digunakan sebagai penguat adalah fiber. Komposit dengan

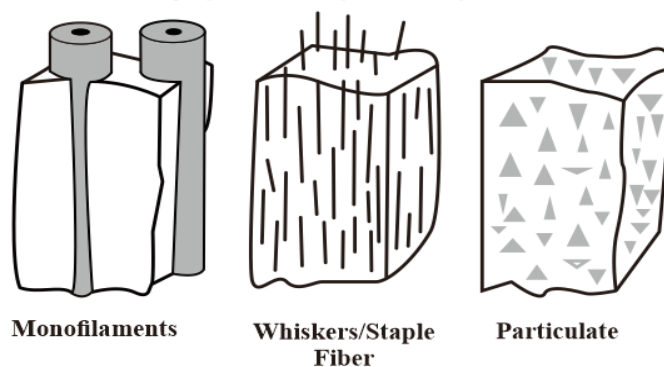
penguat fiber umumnya digunakan jika komponen yang hendak dibuat lebih mementingkan kekuatan tarik yang baik. Kekuatan tarik ini akan berpusat pada fiber-fiber panjang. Penguat dengan *continuous-aligned-fiber* memiliki sifat anisotropik. Kekuatan dan kekakuannya akan lebih baik jika beban searah dengan fiber dibandingkan dengan arah tegak lurus fiber.

2. *Discontinuous*

Pada jenis ini, bahan yang digunakan sebagai penguat dapat berupa (Fu, 2012) :

- Partikel
- Short fiber
- Fiber

Gambar 2.3 di bawah ini merupakan bentuk-bentuk dari partikel penguat *discontinuous*



Gambar 2. 3. Klasifikasi MMC Berdasarkan Bentuk Penguat (Pecharsky, 2005)

Komposit dengan penguat jenis *discontinuous* digunakan untuk aplikasi yang pembebanannya diterima merata di seluruh material MMC, karena beban akan disalurkan ke semua penguat melalui matriks sehingga penyebarannya akan merata dan tidak terpusat seperti serat *continuous* (Pecharsky, 2005) & (Fu, 2012). Dengan penguat jenis ini, memungkinkan untuk membuat material komposit secara metalurgi serbuk.

Metal Matrix Composite yang paling umum digunakan, yaitu :

❖ Matriks Aluminium

- *Continuous fibers*: boron, silikon karbida, alumina, grafit
- *Discontinuous fibers*: alumina, alumina-silika
 - *Whiskers*: silikon karbida
 - *Particulates*: silikon karbida, boron karbida

❖ Matriks Magnesium

- *Continuous fibers*: grafit, alumina

- *Whiskers*: silikon karbida
- *Particulates*: silikon karbida, boron karbida
- ❖ Matriks Titanium
 - *Continuous fibers*: silikon karbida, *coated boron*
 - *Particulates*: titanium karbida
- ❖ Matriks Tembaga
 - *Continuous fibers*: grafit, silikon karbida
 - *Wires*: niobium-titanium, niobium-timah
 - *Particulates*: silikon karbida, boron karbida, titanium karbida.
- ❖ Matriks *Superalloy*
 - *Wires*: tungsten

Secara spesifik MMC yang memanfaatkan Aluminium sebagai matriks disebut sebagai Aluminium Matrix Composite (AMC), telah dipelajari secara luas sejak tahun 1920-an dan mulai dikembangkan pada 1980-an terkait industri transportasi, AMC yang diperkuat secara terputus-putus dianggap sangat menarik karena sifat mekanik isotropiknya (lebih tinggi dari paduan tanpa penguatnya) dan biayanya yang rendah karena pemrosesan yang murah dan harga yang rendah dari beberapa bahan penguat seperti partikel SiC atau serat Alumina (Al_2O_3). Matriks aluminium pada umumnya merupakan paduan Al-Si, Al-Cu, 2xxx atau 6xxx, sehingga seperti halnya yang diusulkan oleh American Aluminium Association, AMC harus merujuk kepada konstituennya yakni dengan penamaan sesuai matriks dengan menggunakan singkatan dari pengaturan tulangan dan fraksi volume dalam besaran persentase dengan simbol tipe (bentuk) tulangan. Komposit matriks logam aluminium komersial (AMMC) memiliki kekuatan dan kekakuan spesifik yang jauh lebih tinggi dengan sifat mekanis yang dapat meningkat suhu tinggi, memiliki resistensi aus yang lebih tinggi dengan koefisien ekspansi termal yg lebih rendah dibandingkan dengan paduan dasar mereka karena penggabungan partikel atau serat yang sesuai ke dalam logam matriks, (Schaffer, 2004). Bahan-bahan baru ini telah ditemukan dan digunakan dalam pembuatan barang-barang olahraga, kemasan elektronik, perlengkapan persenjataan, industri otomotif dan sebagainya, komposisi dari paduan Aluminium komersial yang dibuat dengan metalurgi serbuk sesuai nama produsennya diantaranya dapat dilihat pada Tabel 2.1. berikut :

Tabel 2. 1. Komposisi Paduan Aluminium Komersial*

Alloy	Manufacturer	Cu	Mg	Si
602	Alcoa	-	0.6	0.4
601	Alcoa	0.25	1.0	0.6
6711	Ampal	0.25	1.0	0.8
321	Eckart	0.20	1.0	0.5
AA6061	wrought	0.25	1.0	0.6
202	Alcoa	4.0	-	-
2712	Ampal	3.8	1.0	0.75
201	Alcoa	4.4	0.5	0.6
2014	Alpoco	4.4	0.5	0.8
13	Eckart	4.5	0.5	0.2
123	Eckart	4.5	0.5	0.7
AA2014	wrought	4.5	0.5	0.8

*(Schaffer, 2004)

2.1.2 Komposit Laminat Hibrid

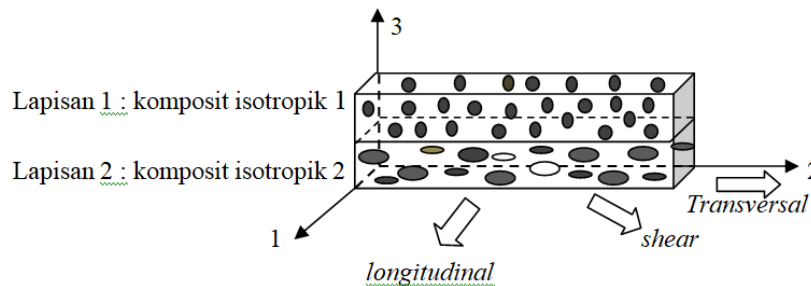
❖ Komposit laminat adalah komposit yang terdiri dari gabungan dua atau lebih lembaran (*lamina*) atau *ply* yang membentuk elemen struktur secara integral (Miracle, 2001).

Lamina biasanya berkaitan dengan penyusunan struktural secara *unidirectional* serat dalam matriks. Perubahan penyusunan struktur menjadi sangat penting karena penguat berfungsi sebagai media pembawa beban sedangkan matriks berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari efek lingkungan serta kerusakan akibat benturan.

❖ Salah satu jenis material komposit lamina adalah komposit hibrid, yaitu merupakan material dari gabungan 2 jenis material atau lebih sebagai penguat, karena satu material penguat saja tidak memenuhi sifat yang diharapkan (Miracle, 2011). Laminat hibrid adalah laminat yang tersusun atas lamina-lamina dengan kombinasi yang berbeda dari segi material (jenis penguat dan matriks) serta arah penguat. Penguat komposit laminat hibrid dikontribusi oleh penguatan dua jenis atau lebih penguat yang berbeda maupun penyusunan strukturalnya.

❖ Komposit lamina isotropik yang dibuat dari 2 lapisan komposit isotropik menunjukkan sifat *orthotropic*, yaitu sifat yang mengarah terhadap tiga bidang simetri. Tiga bidang

tersebut masing-masing sejajar terhadap sumbu 1, 2 dan 3. Jika distribusi matriks pada lapisan 1 maupun lapisan 2 sama-sama homogen maka penguatan pada sumbu transversal (arah sumbu 2), sumbu longitudinal (sumbu 1) dan arah sumbu 3, akan bernilai sama sehingga bersifat isotropik dengan penguatan kesegala arah bernilai sama (Miracle, 2001). Hal tersebut dapat dilihat seperti Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2. 4. Komposisi Lamina Isotropik (Miracle, 2001)

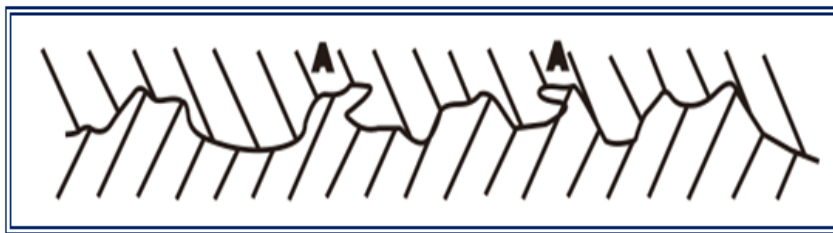
2.2. Interface Pada Komposit

2.2.1. Interface dan Wettability pada Matriks dan Penguat

Interface antara matriks dan penguat dalam pembuatan komposit akan sangat berpengaruh terhadap sifat akhir dari komposit yang terbentuk, baik sifat fisik maupun mekanik. Interface adalah suatu fasa atau media yang terdapat pada komposit yang berfungsi untuk mentransfer beban dari penguat-matriks-penguat (Masuda, 2007). Beberapa jenis ikatan yang dapat terjadi pada interfacial bonding:

1. Mechanical Bonding

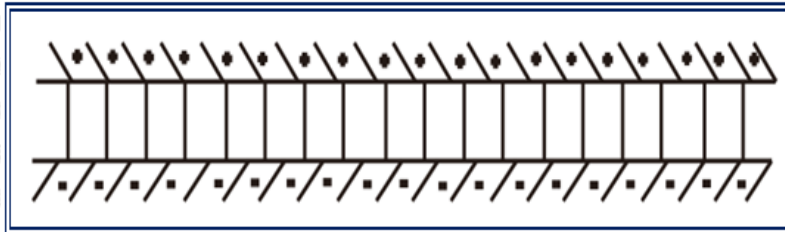
Mekanisme penguncian (*interlocking*) terjadi antara 2 permukaan, yaitu penguat dan matriks. Permukaan yang kasar dapat menyebabkan *interlocking* yang terjadi semakin banyak dan *mechanical bonding* menjadi efektif. Ikatan menjadi efektif jika beban yang diberikan paralel terhadap *interface*. Gambar 2.5 di bawah merupakan mekanisme dari *mechanical bonding*, (Miracle, 2001).



Gambar 2. 5. Mechanical Bonding (Miracle, 2001)

2. Electrostatic Bonding

Electrostatic bonding, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 merupakan proses tarik-menarik antara permukaan yang berbeda tingkat kelistrikan, yaitu adanya muatan positif (+) serta muatan negatif (-) dan terjadi pada skala atomic, (Miracle, 2001). Efektivitas terhadap jenis ikatan ini dapat menurun jika ada kontaminasi permukaan dan kehadiran gas yang terperangkap.



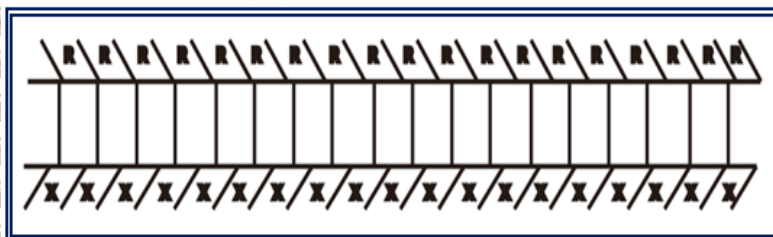
Gambar 2. 6. *Electrostatic Bonding* (Miracle, 2001)

Berdasarkan prinsip *electrical double layer* yang terbentuk dari penggabungan dua material akan menghasilkan gaya tarik-menarik yang memungkinkan material untuk beradhesi dengan baik.

3. *Chemical Bonding*

Chemical bonding, seperti pada Gambar 2.7 dibentuk oleh grup-grup yang bersifat kimia pada permukaan penguat (X) dan matriks (R), (Miracle, 2001). Kekuatan ikatan ditentukan oleh jumlah ikatan kimiawi menurut luas dan tipe ikatan kimia itu sendiri.

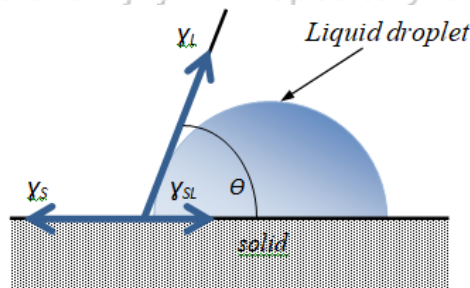
Ikatan kimia ini terbentuk karena adanya *wetting agent*.



Gambar 2. 7. *Chemical Bonding* (Miracle, 2001)

Pembasahan (*wettability*) dihasilkan dari interaksi antarmolekul ketika keduanya terbawa secara bersamaan, sehingga merupakan kontak antara fasa *liquid* dan permukaan fasa solid. Derajat pembasahan dijelaskan dengan sudut kontak (*contact angle*), yaitu sudut antar muka fasa *liquid-vapor* bertemu dengan antar muka fasa *solid-liquid*. Jika pembasahan

sangat baik, maka sudut kontak kecil dan cairan akan menyebar lebih luas sehingga menutupi daerah permukaan. Sudut kontak dengan besar $\geq 90^\circ$ memiliki karakteristik permukaan yang tidak membasahi (*not wettable*), sedangkan untuk sudut kontak dengan besar $\leq 90^\circ$ bersifat membasahi (*wettable*). Pembasahan juga penting dalam daya lekat antar material (*adherence*).



Gambar 2.8. Gaya yang Dihasilkan pada Peristiwa *Wetting* (L. Kang, 2005)

Fasa solid antarmuka dapat dihitung dengan persamaan Young :

$$\gamma_S = \gamma_L \cos \theta + \gamma_{SL} \quad \dots \quad 2.1$$

dengan :

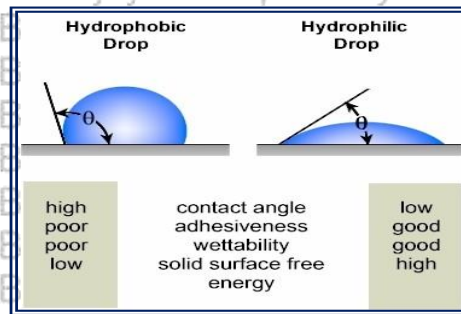
θ = *contact angle*

γ_S = *solid surface free energy*

γ_L = *liquid surface free energy*

γ_{SL} = *solid/liquid interfacial free energy*

Dari rumus persamaan Young dan dari gambar 2.8 di atas, maka nilai sudut kontak (θ) $\leq 90^\circ$ akan menghasilkan nilai cosinus yang semakin besar (mendekati 1), sehingga nilai tegangan permukaan (γ) *liquid-vapor* dijumlah dengan nilai tegangan permukaan (γ) *solid-liquid* akan bernilai sama dengan tegangan *solid-vapour*. Hal ini berarti akan terjadi pembasahan antara permukaan fasa *liquid* dan permukaan fasa *solid* pada sudut kontak (θ) $\leq 90^\circ$. Membasahi permukaan dapat diistilahkan dengan *hydrophilic* dan tidak membasahi permukaan dapat diistilahkan dengan *hydrophobic*, (L. Kang, 2005). seperti diperlihatkan pada gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2. 9. Sudut Kontak Adhesivitas Permukaan Padat
(L. Kang, 2005)

2.2.2. Interface dan Wettability Lapisan Laminat MMC Dengan Pelapisan

Interface sangat berpengaruh terhadap kekuatan, ketangguhan, kekakuan, ketahanan mulur dan degradasi terhadap lingkungan. Interface dapat berupa ikatan atom sederhana, reaksi antar matriks, atau penguatan pada pelapisan. Pada umumnya, interface diusahakan tanpa ketebalan atau volume. MMC terdiri dari komposisi logam dan non-organik material penguat. Interface yang lemah akan menginisiasi terjadinya perambatan retak pada permukaan. Jika matriks lebih lemah dibandingkan tegangan antar muka dan kekuatan partikel penguat, maka retak akan merambat pada matriksnya saja.

Perbedaan keterbasahan dan aglomerasi di dalam bahan komposit berbasis serbuk dapat menurunkan sifat mekanik bahan yang akan dihasilkan, karena ikatan antar muka yang terbentuk antara matriks dan penguat tidak begitu sempurna. Permukaan partikel penguat dapat direkayasa dengan metoda *electroless plating*, yaitu pelapisan dengan mendeposisikan logam pada sebuah substrat pada media larutan polar sebagai agen pereduksinya dan hasilnya berupa lapisan oksida logam tipis yang berperan sebagai pengikat (L. Kang, 2005). Selain untuk meningkatkan keterbasahan, penggunaan metoda *electroless plating* juga dapat mengurangi aglomerasi pada penguat.

2.3. Material

2.3.1. Aluminium

Aluminium merupakan unsur logam ketiga terbanyak di dunia dan terdapat di alam kira-kira sebanyak 8%. Aluminium juga banyak diproduksi karena mudah diperoleh, harganya relatif murah dan memiliki sifat-sifat fisik serta mekanik yang relatif baik. Untuk Aluminium murni merupakan logam putih keperak-perakan memiliki karakteristik yang diinginkan pada logam. Ia ringan, tidak magnetik dan tidak mudah terpercik, merupakan logam kedua paling mudah dalam soal pembentukan, dan keenam dalam soal *ductility* (Włodarczyk, 2008).

Pada komposit laminat hibrid ini, aluminium berperan sebagai matriks yang berfungsi sebagai media transfer beban ke penguat, menahan penyebaran retak dan melindungi penguat dari efek lingkungan. Logam aluminium yang digunakan sebagai matriks memiliki *ductility* yang cukup tinggi. Aluminium serbuk dan paduannya memiliki sifat mampu tekan (*compressibility*) yang cukup tinggi dengan *green density* sekitar 90% dari densitas teorinya (Graham, 2008). Pada Tabel 2.2 ditunjukkan sifat-sifat dari logam aluminium, baik sifat fisik, sifat mekanis maupun sifat lainnya.

Tabel 2. 2. Sifat-sifat Logam Aluminium (Corden, 1994)

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Densitas (T = 20°C)	gram/cm ³	2,7
Nomor Atom	-	13
Berat Atom	gram/mol	26,67
Warna	-	Putih keperakan
Sruktur Kristal	-	FCC
Titik Lebur	°C	660,4
Titik Didih	°C	2467
Jari-jari Atom	Nm	0,143
Jari-jari ionik	Nm	0,053
Nomor Valensi	-	+3
Sifat Mekanis	Satuan	Nilai
Modulus Elastis	GPa	71
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,35
Kekerasan	VHN	19
Kekuatan Luluh	Mpa	25
Ketangguhan	Mpa m	33
Konduktivitas Panas	W/mK	237
Kapasitas Panas	°C ⁻¹	2,08.10 ⁻² (23,6Ppm°)
Koefisien Ekspansi Thermal	10 ⁻⁵ /°C	2,4
Sifat-sifat Lain	Satuan	Nilai
Ketahanan Korosi	-	Sangat baik
<i>Formability & Machinability</i>	-	Baik

2.3.2 Alumina (Al_2O_3)

Penggunaan alumina setiap tahunnya sekitar 65 juta ton, lebih dari 90%-nya digunakan dalam produksi logam aluminium. Aluminium hidroksida digunakan dalam pembuatan bahan kimia pengelolaan air seperti aluminium sulfat, polialuminium klorida, dan natrium aluminat. Penambahan penguat alumina bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan dan ketahanan material komposit. Alumina merupakan salah satu jenis keramik oksida yang keras.

Sifat-sifat mekanis dari material alumina adalah (Corden, 1994) :

- Daya hantar panas yang baik
- Ketahanan terhadap api yang baik
- Ketahanan aus dan tahan terhadap korosi
- Kekerasan yang tinggi

Secara teoritis, kecenderungan meningkatnya fraksi volume dari alumina akan meningkatkan kekuatan tekan. Ini dikarenakan sifat penguatannya yang semakin tinggi dan akibatnya pengikatan antar komponen matriks dan penguat semakin tinggi, sehingga beban mekanis yang diberikan akan mampu ditahan oleh material. Selain itu Aluminium oksida adalah insulator (penghambat) panas dan listrik yang baik. Umumnya Al_2O_3 terdapat dalam bentuk kristalin yang disebut corundum atau α -aluminium oksida. Al_2O_3 dipakai sebagai bahan abrasif dan sebagai komponen dalam alat pemotong, karena sifat kekerasannya. Al_2O_3 yang dihasilkan melalui anodisasi bersifat amorf, namun beberapa proses oksidasi seperti *plasma electrolytic oxydation* menghasilkan sebagian besar Al_2O_3 dalam bentuk kristalin, yang meningkatkan kekerasannya. Sifat-sifat alumina secara umum dapat dilihat pada tabel 2.3. (Corden, 1994).

Tabel 2. 3. Sifat-sifat Alumina.

Sifat Fisik	Satuan	Nilai
Densitas	g/cm^3	3.89
Warna	-	ivory
Struktur Kristal	-	polikristalin
Titik Lebur	$^{\circ}C$	1750
Sifat Mekanik	Satuan	Nilai
Modulus Elastisitas	GPa	375
<i>Poisson's Ratio</i>	-	0,22
Kekuatan Tekan	MPa	379

Kekerasan	Kg/mm ²	1440
Sifat Thermal	Satuan	Nilai
Konduktivitas Panas	W/m °K	35
Koefisien Ekspansi Thermal	10 ⁻⁶ /°C	8.4
<i>Specific Heat</i>	J/kg.K	880
Kapasitas Panas	°C ⁻¹	9.10 ⁻⁶ (6,5 Ppm/°C)

2.3.4. Marmer

Marmer (*marble*) atau bahan pualam merupakan batuan hasil proses metamorfosa atau malihan dari batu gamping yang mengandung karbonat. Pengaruh suhu dan tekanan yang dihasilkan oleh gaya endogen yang menyebabkan terjadi rekristalisasi pada batuan tersebut membentuk sebagai foliasi maupun non foliasi. Akibat rekristalisasi struktur asal batuan membentuk tekstur baru dan keteraturan butir, oleh sebab itu struktur pembentuk batu marmer akan berbeda tergantung pada kondisi alam pada lapisan batuan terbentuk. Marmer Indonesia diperkirakan berumur sekitar 30 – 60 juta tahun atau berumur Kuartar hingga Tersier. Marmer akan selalu berasosiasi keberadaannya dengan batugamping, setiap ada batu marmer akan selalu ada batu gamping, walaupun tidak setiap ada batu gamping akan ada marmer. Karena keberadaan marmer berhubungan dengan proses gaya endogen yang mempengaruhinya baik berupa tekan maupun perubahan temperature yang tinggi (Hamza, 2011). Di Indonesia penyebaran marmer tersebut cukup banyak, salah satunya terdapat di Kabupaten Maros dan Kabupaten Pangkep Sulawesi Selatan. Sebagaimana diketahui bahwa marmer adalah batuan kristalin kasar yang berasal dari batu gamping atau dolomite, batuan ini padat dan kompak serta mempunyai tekstur *Granoblastik*, struktur non foliasi, mineral penyusunannya umumnya terdiri dari kalsit dan sedikit dolomite dan silica. Marmer yang murni berwarna putih, terutama disusun oleh mineral kalsit (*Calcium Carbonate*), merupakan batuan hasil proses metamorfosa dari batu gamping dimana kandungan mineral penyusunnya sangat bervariasi tergantung asal marmer (Ahmed, 2012), oleh karenanya sifat-sifat fisik marmer secara spesifik tidak dapat ditampilkan namun secara umum sebagai gambaran kandungan unsur kimia salah satu jenis marmer dari Kabupaten Pangkep Sulawesi selatan dapat dilihat pada table 2.4*

Tabel 2. 4. Hasil Analisis Kandungan Unsur Kimia Limbah Marmer

No	Parameter	Hasil Uji
1	Silikon dioksida (SiO_2)	0,26 %
2	Kalsium Oksida (CaO)	53,90 %
3	Magnesium Oksida (MgO)	0,19 %

*Sumber : Balai Riset Dinas ESDM Sulawesi Selatan

2.4. Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk merupakan suatu kegiatan yang mencakup pembuatan benda dari serbuk logam melalui penekanan dengan pemanasan pada suhu tinggi. Teknik pemrosesan dengan metalurgi serbuk memiliki kelebihan dibandingkan dengan proses lain, diantaranya (Masuda, 2007) :

- a. Kontrol material lebih mudah sehingga lebih mudah didapatkan sifat mekanik dan sifat fisik sesuai dengan variasi yang kita inginkan.
- b. Produk lebih beraneka ragam, dapat dikombinasikan dengan logam seperti Co, Ni, stainless steel, baja karbon rendah, besi murni, logam-logam refraktori serta karbida. Cara metalurgi serbuk juga dapat membuat bahan *non-ferrous*, campuran bahan logam dan non-logam, bahkan bentuk yang rumit.
- c. Dapat digunakan membuat bantalan swa pelumas (*self lubricating bearing*). *Self lubricating* ini dibuat dengan cara mencelupkan material ke dalam minyak, dan diharapkan minyak dapat menyerap ke pori-pori. Sehingga, kita tidak perlu memberikan pelumas pada benda kerja.
- d. Untuk filtrasi, ini dikarenakan kita dapat membuat bagian serbuk dengan porositas yang dapat dikendalikan, maka dengan porositas tertentu material ini dapat dibuat sebagai filter/penyaring.
- e. Toleransi ukuran ketat, benda jadi sebagai spesimen sesudah disinter pada umumnya memiliki ukuran yang presisi, sehingga tidak diperlukan permesinan lebih lanjut setelah proses sinter.
- f. Memiliki ketahanan aus yang baik, diakibatkan oleh adanya paduan logam-logam atau partikel yang keras, sehingga juga memiliki sifat mampu redam yang baik.

Proses metalurgi serbuk juga memiliki kerbatasan (Narayan, 2014), yaitu:

- Ukuran benda yang dapat dibuat sangat terbatas. Panjang maksimal 15cm dengan luas $0,2\text{m}^2$ dan berat 10 kg. Keterbatasan ini disebabkan oleh homogenisasi pemanasan yang sulit dilakukan jika benda terlalu besar.

- Sifat benda hasil proses metalurgi serbuk lebih rendah dari pada benda pejal dengan material yang sama, ini disebabkan oleh berat jenis produk metalurgi serbuk yang dicapai hanya 95% berat jenis benda pejal.

- Kemurniannya kurang, luas permukaan serbuk relatif tinggi dibandingkan dengan berat serbuk, sehingga mudah teroksidasi dan menyebabkan benda terkontaminasi.

- Korosi, benda produk serbuk memiliki porositas, maka serbuk lebih peka terhadap oksidasi dibanding benda pejal.

- Keterbatasan dalam pembentukan, semakin rumit dan kompleks bentuk produk maka bentuk cetakan semakin rumit dan sulit untuk pembuatan cetakannya.

2.4.1. Karakteristik Serbuk

Karakteristik serbuk dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya ukuran dan distribusi partikel, bentuk partikel, luas permukaan partikel, berat jenis serbuk, mampu alir, kompresibilitas, gesekan antar partikel dan komposisi kimia serbuk (Asif, 2011). Hal-hal tersebut dapat mempengaruhi sifat serbuk dari logam yang akan dihasilkan dan tingkah laku serbuk logam selama pemrosesan.

2.4.1.1. Ukuran dan Distribusi Partikel

Ukuran partikel dapat didefinisikan sebagai ukuran linear dari partikel oleh analisa ayak. Ukuran partikel ini akan sangat menentukan densitas serta porositas juga sifat mekanis dari material serbuk hasil kompaksi (*green body*). Untuk proses metalurgi serbuk, serbuk logam yang sesuai umumnya berukuran antara 0,1 – 1000 μ m. Ada beberapa teknik yang dapat dilakukan untuk menentukan ukuran partikel serbuk, diantaranya dengan pengayakan (*screening*), mikroskop, teknik sedimentasi, hamburan cahaya (*light scattering*), konduktivitas listrik, penghalangan cahaya (*light blocking*) (Neikov, 2009). Beberapa pengaruh ukuran partikel serbuk terhadap karakteristik serbuk, antara lain adalah (Pecharsky, 2005) :

Ukuran partikel yang halus sangat diperlukan untuk kompaksi serbuk yang keras atau getas, karena dengan semakin tingginya gesekan antarpartikel akan membantu meningkatkan kekuatan adhesi *green body*. Serbuk-serbuk yang kasar memiliki kepadatan yang seragam saat dilakukan kompaksi, tetapi luas permukaan kontak antar partikel menjadi kecil yang mengakibatkan proses difusi saat proses sinter kurang baik sehingga menyebabkan banyak pori dan menurunkan sifat mekanik produk. Distribusi ukuran partikel serbuk menyatakan penyebaran serbuk untuk ukuran tertentu dengan tujuan untuk menampilkan hasil pengukuran kerapatan maksimum suatu partikel.

Distribusi ukuran partikel ini sangat menentukan kemampuan partikel dalam mengisi ruang kosong antar partikel untuk mencapai volume terpadat dan pada akhirnya akan menentukan besarnya densitas, porositas dan kekerasan.

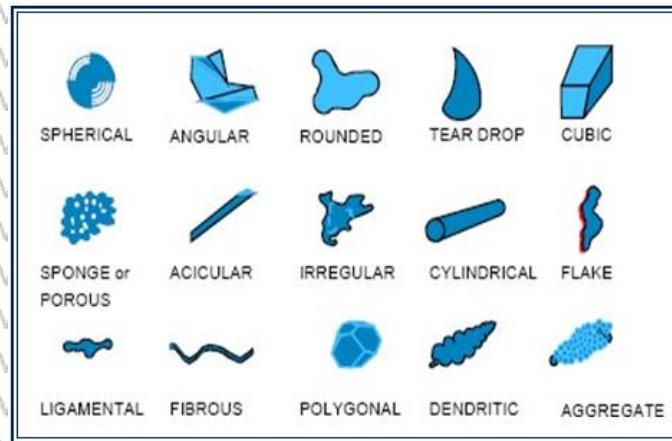
2.4.1.2 Bentuk Partikel Serbuk

Bentuk partikel serbuk sangat mempengaruhi sifat massa serbuk, yaitu efisiensi pemadatan (*packing efisiensi*), mampu alir (*flowability*) dan mampu tekan (*compressibility*). Bentuk partikel serbuk secara umum dapat diklasifikasikan seperti pada Tabel 2.5 yang dapat dilihat pada Gambar 2.10.

Tabel 2. 5. Klasifikasi Bentuk Partikel Serbuk (L. Kang, 2005)

Klasifikasi Partikel Serbuk	Bentuk Partkel Serbuk
<i>Acicular</i>	Jarum
<i>Angular</i>	Poliedral kasar dengan tepi tajam
<i>Dendritic</i>	Kristalin dan bercabang
<i>Fibrous</i>	Serabut yang beraturan atau tidak beraturan
<i>Flaky</i>	Serpihan
<i>Granular</i>	Tidak beraturan dan hampir bulat
<i>Irregular</i>	Tidak beraturan dan tidak memiliki simetri
<i>Nodular</i>	Bulat dan tidak beraturan
<i>Spheroidal</i>	Bulat

Ilustrasi gambar bentuk partikel dapat dilihat pada gambar 2.10 di bawah ini



Gambar 2.10. Bentuk Partikel Serbuk
(L. Kang, 2005)

- Luas Permukaan Partikel

Luas permukaan berhubungan erat dengan kontak antarpartikel yang dapat mempengaruhi proses difusi saat dilakukan proses sinter. Jika luas permukaan partikel besar, kontak antar partikel juga semakin besar sehingga akan meningkatkan mekanisme ikatan antar partikel secara difusi saat proses sinter. Sedangkan jika luas permukaan partikel kecil, kontak antar partikel sedikit sehingga proses difusi saat proses sinter juga kurang baik dan menyebabkan banyak pori.

- Berat Jenis Serbuk

Berat jenis serbuk adalah tingkat kerapatan atau kepadatan dari serbuk. Terdapat istilah lain mengenai berat jenis dalam proses metalurgi serbuk, diantaranya:

- *Theoretical density*, yaitu berat jenis sesungguhnya dari material serbuk ketika material serbuk tersebut ditekan hingga menghasilkan serbuk tanpa pori, (Masuda, 2007)
- *Green density*, yaitu berat jenis serbuk setelah serbuk mengalami penekanan kompaksi untuk proses pemanasan (*sintering*), (German, 1996).
- *Apparent density* atau *bulk density*, yaitu berat per satuan volume dari serbuk dalam keadaan bebas tanpa agitasi.
- *Tap density*, yaitu berat jenis tertinggi yang dicapai dengan vibrasi tanpa aplikasi tekanan luar, (German, 1996). Ketidakhomogenan berat jenis bakal spesimen (*green density*) yang dihasilkan dari proses kompaksi seringkali terjadi, sehingga dilakukan beberapa cara yang dapat mengurangi hal tersebut, seperti :

- Memberi pelumas untuk mengurangi gesekan.
- Mengatur perbandingan dimensi cetakan antara tinggi dengan lebar rongga cetakan (L/D), semakin besar (L/D) maka distribusi akan semakin besar. Oleh karena itu, perbandingan (L/D) sebaiknya kecil sehingga distribusi serbuk akan homogen.
- Meningkatkan rasio penekanan kompaksi agar distribusi serbuk lebih baik.
- Menggunakan penekanan dua arah (*double punch*) agar berat jenis serbuk lebih homogen.
- Melakukan penekanan secara bertahap dimulai dari tekanan terendah kemudian ditingkatkan secara bertahap sampai titik optimum.

Mampu Alir Serbuk (*flowability*)

Mampu alir merupakan karakteristik yang menggambarkan sifat alir serbuk dan kemampuan memenuhi ruang cetak, (Pecharsky, 2008). Pada umumnya, faktor-faktor yang mengurangi gesekan antar partikel atau meningkatkan berat jenis (*apperent density*), seperti partikel bulat dan halus akan meningkatkan mampu alir serbuk, (L. Kang, 2005).

Kompresibilitas

Kompresibilitas adalah perbandingan volume serbuk mula-mula dengan volume benda yang telah ditekan yang nilainya berbeda-beda tergantung distribusi ukuran serbuk dan bentuk serbuknya. Serbuk yang memiliki bentuk lebih teratur, lebih halus dan sedikit porositas antar partikel akan memiliki mampu tekan dan *green density* yang lebih tinggi dibandingkan serbuk yang kasar (Pecharsky, 2008).

2.4.2. Tahapan Proses Metalurgi Serbuk

Tahapan dalam proses metalurgi serbuk, meliputi :

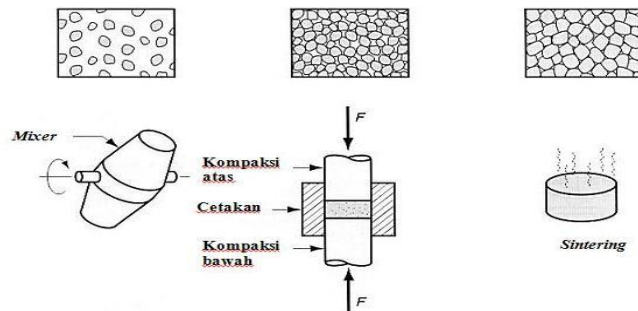
A. Pencampuran (*blending/mixing*)

Pencampuran dan pengadukan partikel serbuk adalah proses bercampurnya serbuk secara sempurna dengan masing-masing besaran komposisi guna menghasilkan serbuk yang homogen. Mekanisme yang terjadi selama proses pencampuran serbuk tergantung dari metoda pencampuran yang digunakan, yaitu (Miracle, 2001):

- Difusi, merupakan pencampuran karena gerak antar partikel serbuk yang dihasilkan oleh perputaran drum pengaduk.
- Konveksi, merupakan pencampuran karena ulir di dalam kontainer berputar pada porosnya.

• Geser, merupakan pencampuran karena menggunakan suatu media pengaduk, dampak negatif pengadukan dan pencampuran terhadap serbuk, diantaranya adalah (Pecharsky, 2008) :

- Partikel logam akan lebih sulit dikompaksi.
- Kontaminasi terhadap serbuk dapat terjadi selama pengadukan dan pencampuran.
- Disain alat pencampur yang buruk dapat mengakibatkan segregasi partikel secara umum dapat digambarkan ilustrasi bentuk butiran dalam tahapan proses penting metalurgi serbuk ditunjukkan pada gambar 2.11 di bawah :



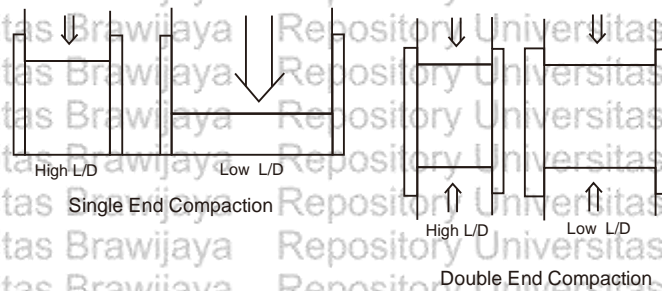
Gambar 2.11. Ilustrasi Bentuk Butiran dalam Tahapan Proses Metalurgi Serbuk (L. Kang 2005)

B. Penekanan (*compaction/pressing*)

Kompaksi adalah suatu proses pembentukan atau pemampatan terhadap serbuk murni, paduan atau campuran dari berbagai jenis serbuk sehingga mempunyai bentuk tertentu dan mempunyai kekuatan yang cukup untuk mengalami proses selanjutnya (Masuda, 2007). Peningkatan penekanan akan menghasilkan penurunan porositas. Ketika tekanan kompaksi dinaikkan, jumlah partikel yang mengalami deformasi plastis akan meningkat. Dengan penekanan yang cukup, seluruh partikel akan mengalami work (*strain*) hardening ketika jumlah porositas berkurang (L. Kang, 2005).

Kompaksi dapat dilakukan melalui *cold compaction* dan *hot pressing* baik dengan penekanan satu arah (*single end compaction*) ataupun penekanan dua arah (*double end punch*).

Pada umumnya, *cold compaction* digunakan untuk serbuk yang mudah teroksidasi, sedangkan *hot pressing* dilakukan untuk serbuk yang tidak mudah teroksidasi. Pada penekanan satu arah, penekan (*punch*) bagian atas bergerak ke bawah, sedangkan pada penekanan dua arah terdapat dua punch, yaitu punch atas dan punch bawah yang bergerak secara bersamaan dengan arah berlawanan. Penekanan satu arah maupun dua arah dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Jenis Kompaksi/ Penekanan
(Kumar, 2010)

Pada saat kompaksi terdapat beberapa tahapan yang terjadi pada serbuk (Pecharsky, 2008) yaitu :

a. Penataulangan partikel serbuk (*rearrangement*)

Saat dimulai penekanan, serbuk mulai mengalami penyesuaian letak pada area yang lebih leluasa atau belum terjadi deformasi pada partikel serbuk tersebut.

Pergerakan dan pengaturan kembali partikel-partikel serbuk akibat adanya penekanan menyebabkan partikel serbuk tersusun lebih rata. Gerakan penyusunan kembali partikel ini dibatasi oleh adanya gaya gesek antar partikel atau antara partikel dengan permukaan cetakan, permukaan penekan dan inti. Pergerakan partikel cenderung terjadi di dalam massa serbuk pada tekanan yang relatif rendah sehingga kecepatan penekanan yang rendah akan memberikan kesempatan pada partikel untuk membentuk susunan yang terpadat.

b. Deformasi elastis partikel serbuk

Tahap ini serbuk mulai bersentuhan dan apabila penekanan dihentikan, maka serbuk akan kembali ke bentuk semula. Umumnya deformasi elastis dapat dilihat dengan dimensi bakalan yang sedikit membesar saat dikeluarkan dari cetakan.

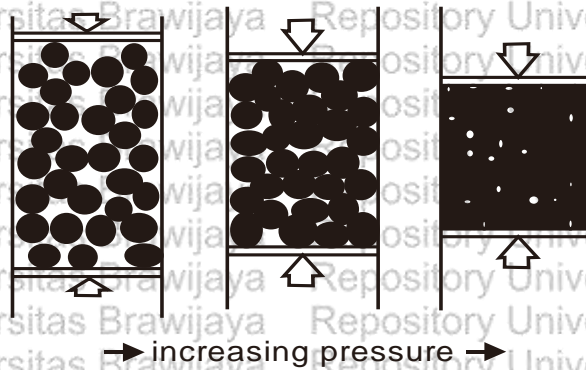
Kecenderungan deformasi elastis meningkat dengan menurunnya nilai modulus elastisitas.

c. Deformasi plastis partikel serbuk

Deformasi plastis merupakan bagian terpenting dari mekanisme pemadatan selama kompaksi berlangsung. Pada tahap ini, semakin tinggi tekanan kompaksi yang diberikan menyebabkan meningkatnya derajat deformasi plastis dan pemadatan yang terjadi. Ada beberapa faktor yang menentukan deformasi plastis, antara lain kekerasan dan perpindahan tegangan antar partikel yang berdekatan dan terjadi peningkatan nilai kekerasan.

d. Penghancuran partikel serbuk

Setelah serbuk mengalami deformasi plastis, serbuk mengalami *mechanical interlocking* (antar butir saling mengunci). Mekanisme ini disebut ikatan *cold weld*, yaitu ikatan antara dua permukaan butiran logam yang bersih yang ditimbulkan oleh gaya kohesi, tidak ada peleburan atau pengaruh panas. Pada umumnya permukaan serbuk akan teroksidasi, namun dibawah permukaan oksida terdapat permukaan yang bersih. Oleh karena itu, diperlukan pemecahan lapisan oksida sebelum terjadi *cold weld*. Ketika serbuk ditekan, berat jenis serbuk naik, porositas menurun karena rongga berkurang. Selain itu, serbuk juga mengalami distribusi berat jenis yang tidak merata, pada bagian atas (dekat *punch*) berat jenis serbuk lebih besar dibandingkan pada bagian tengah. Perilaku serbuk saat kompaksi seiring dengan meningkatnya tekanan kompaksi ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Perilaku Serbuk saat Kompaksi (K. Suresh, 2015)

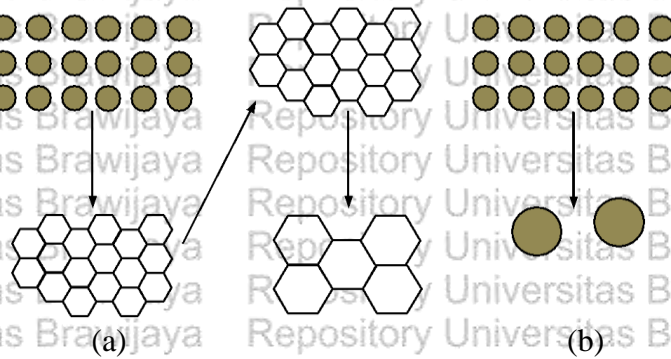
C. Pemanasan (*sintering/consolidation*)

Setelah pembentukan *green body* dengan kompaksi maka dilakukan proses sinter agar bahan komposit menjadi suatu kesatuan yang padat, proses sinter merupakan proses pemanasan, dengan atau tanpa aplikasi tekanan sehingga partikel akan saling berikatan secara kimia menjadi struktur yang kohern (Pecharsky, 2008).

Proses sinter biasanya akan diikuti dengan adanya peningkatan sifat mekanik jika dibandingkan dengan material hasil kompaksi yang belum melalui proses sinter.

Tahapan proses sintering merupakan interval perubahan bentuk dimana terjadi penurunan ukuran pori atau rongga. Secara umum proses sinter bertujuan untuk menghilangkan porositas pada material melalui pembakaran (*firing*), dimana terdapat dua kemungkinan mekanisme yang terjadi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.14. Hal ini diakibatkan oleh penyatuan dari partikel-partikel tersebut sehingga dapat meningkatkan densitas produk atau biasa disebut proses densifikasi

(L.Kang, 2005). Gaya penggerak utama pada proses sinter adalah penurunan energi bebas sistem. Ikatan yang terbentuk akan meningkatkan kekuatan dan menurunkan energi dari sistem. Pada proses sinter serbuk terjadi pembentukan padatan serbuk bersamaan dengan perlakuan panas pada temperatur tinggi. Perlu diperhatikan laju sintering aliran viskos dan kristalisasi serta interaksi antara keduanya.



Gambar 2. 14. Mekanisme Pengurangan Energi Permukaan Selama Proses Sinter (a) *densification mechanism* dan (b) *coarsening* (Barsoum, 1997)

Ada dua kemungkinan mekanisme pengurangan energi permukaan selama proses sinter yaitu :

a) *Densification mechanism*, yaitu penghilangan *solid/vapor interface* dan terbentuknya *grain boundary area* yang diikuti dengan *grain growth*. Jika mekanisme ini yang dominan maka ukuran pori akan mengecil dan akhirnya hilang sehingga benda akan menyusut (Gambar 2.14a).

b) *Coarsening mechanism*, terjadi penurunan luas permukaan total (*total surface area*) akibat peningkatan ukuran rata-rata dari partikel. Jika mekanisme ini yang dominan atau lebih cepat maka pori-pori dan partikel akan membesar (*coarsen*) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.14b.

Pada *solid state sintering*, syarat yang harus dipenuhi agar terjadi sinter adalah energi batas butir (γ_{gb}) harus lebih kecil dari dua kali *solid/vapor surface energy* (γ_{sv}), dan dinyatakan dengan persamaan:

$$\gamma_{gb} = 2 \gamma_{sv} \cos \frac{\phi}{2} \quad \dots 2.2$$

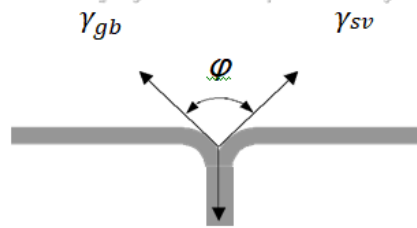
dengan :

γ_{gb} = energi batas butir (*grain boundary energy*)

γ_{sv} = energi permukaan (*solid/vapor surface energy*)

Agar terjadi *densification* maka $\varphi < 180^\circ$ (lihat Gambar 2.15).

Untuk bahan-bahan oksida $\varphi = 120^\circ$ dan nilai $\gamma_{gb} / \gamma_{sv} \approx 1$ sedangkan untuk bahan logam nilai $\gamma_{gb} / \gamma_{sv} \approx 0,25 - 0,5$.

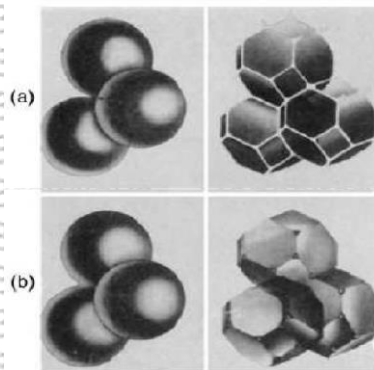


Gambar 2. 15. Sudut Kesetimbangan Dihedral antara *Grain Boundary* dan *solid/vapor Interface*. (Barsoum, 1997)

Faktor yang berpengaruh pada *solid state* sintering adalah temperatur, *green density*, keseragaman struktur mikro, kondisi atmosfer, *impurities*, distribusi dan ukuran partikel bahan yang disinter. Pertambahan temperatur selalu meningkatkan mekanisme *bulk diffusion* yang sangat berperan dalam proses densifikasi. Jika densitas *green body* tinggi maka penyusutannya lebih kecil sehingga lebih sedikit volume pori yang harus dihilangkan. Keseragaman struktur mikro *green body* dapat mencegah aglomerasi atau penggumpalan dari partikel-partikel yang lebih kecil. Kondisi atmosfer memiliki pengaruh yang sangat sensitif terhadap densifikasi *green body* sebab dalam beberapa kasus gas-gas tertentu dapat memacu *coarsening* pada bahan tertentu seperti Fe_2O_3 di lingkungan HCl. Disisi lain gas yang terjebak pada pori akan meningkatkan tekanannya selama penyusutan.

Ketidakhayuan (*impurities*) dalam kondisi tertentu dapat bermanfaat dan berpengaruh terhadap proses sinter (dapat membentuk fasa *liquid*), menghambat *coarsening* dan pertumbuhan butir serta meningkatkan laju difusi (Schulze, 2008). Sintering untuk bahan-bahan oksida dimulai dengan tahap pelapisan (*period of coating*) yaitu pembakaran sampai 1/4 titik lelehnya. Pada tahap ini bahan menyusut tapi sifat-sifat dan kristalnya tidak berubah. Tahap berikutnya adalah pembakaran pada (1/4 – 1/3) titik leleh, butir-butir akan saling melekat dan disebut perioda pelepasan (*period of release*). Pembakaran pada temperatur (1/3 – 1/2) titik lelehnya akan menimbulkan peristiwa difusi yang ditandai adanya penyusutan (*shrinkage*). Pada temperatur di atas 1/2 – 3/4 titik leleh, butir-butir kecil dengan energi permukaan yang lebih besar akan menghilang dan butir yang besar akan semakin besar (L. Kang, 2005). Pemanasan pada temperatur (3/4 – 4/5) titik leleh akan menyebabkan rekristalisasi, dan setelah mencapai 4/5 titik leleh kristal siap untuk mencair dan pada tahapan inilah proses sinter terjadi.

Distribusi ukuran butir yang sempit dapat mencegah pertumbuhan butir yang tidak normal. Pada densifikasi peranan *driving force* adalah mereduksi luas permukaan sehingga partikel dengan luas permukaan awal yang besar membutuhkan *driving force* yang lebih besar. Jika perbandingan luas dan volume partikel meningkat maka gaya elektrostatis dan gaya-gaya permukaan lainnya akan dominan sehingga mengarah pada aglomerasi. Selama pemanasan aglomerasi cenderung tersinter menjadi butiran yang lebih besar yang bukan saja menghambat *driving force* untuk densifikasi tetapi sekaligus menciptakan pori yang besar diantara bagian gumpalan yang tersinter dan sangat sulit untuk dihilangkan. Pada umumnya sintering terjadi melalui tiga tahapan yang merupakan interval perubahan geometri dimana bentuk pori-pori sudah diperoleh secara total atau interval waktu dimana pori yang tersisa bentuknya sudah tetap tinggal mengalami perubahan ukuran (Barsoum, 1997).

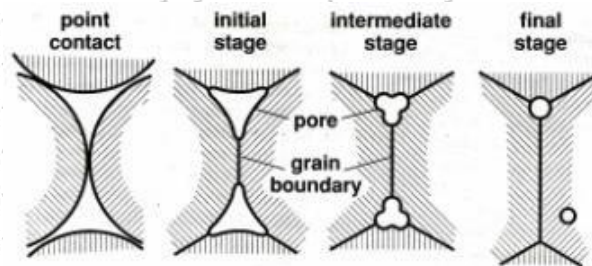


Gambar 2. 16. Idealisasi Pemodelan Tahapan Proses Sinter yang Meliputi (a) *Initial Stage*, (b) *necking* partikel diakhir *initial stage*, (c) *intermediate stage* dan (d) *final stage* (Rahaman, 2003)

Tahapan sintering terdiri dari *initial stage*, *intermediate stage* dan *final stage* seperti diperlihatkan pada Gambar 2.16. Dalam beberapa analisa mengenai sintering dibahas tentang tahapan tambahan (*stage 0*) dimana partikel akan bersentuhan secara spontan pada saat pertama mengalami deformasi plastis sebagai respon terhadap reduksi energi permukaan pada *interface* seperti terlihat pada Gambar 2.16.a. Tahapan ini disebut *Point contact* yang merepresentasikan suatu interval waktu dimana struktur mikro dapat tergambar dengan baik, (L. Kang, 2005). Proses kristalisasi yang terlalu cepat akan menghasilkan derajat kristalin yang tinggi yang akan menghambat proses sinter pada temperatur rendah dan menyebabkan timbulnya porositas yang tidak diinginkan. Optimasi komposisi dan temperatur sinter akan menghasilkan perbedaan struktur mikro dan fase kristalin sehingga karakteristik produk akhir akan berbeda dengan produk dari metode pembuatan yang lain.

❖ Tahapan Proses Sinter

Secara umum terdapat 4 tahapan pada proses sinter sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.17, yaitu :



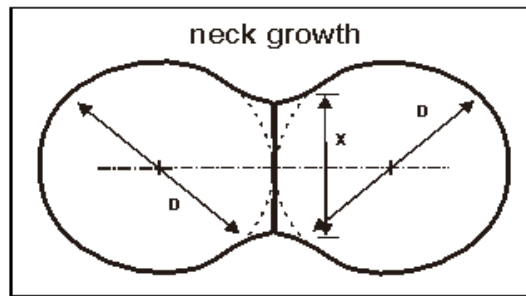
Gambar 2. 17. Perilaku Serbuk pada Tahapan Sintering
(L. Kang, 2005)

a. *Point contact* (ikatan awal partikel)

Di awal tahap ini, partikel bebas membentuk kontak dengan partikel lainnya pada orientasi acak dan tahap adhesi terjadi secara spontan dengan dimulainya pembentukan ikatan sinter. Kekuatan ikatan kontak yang terjadi masih lemah dan belum terjadi perubahan dimensi bakalan. Semakin tinggi berat jenis bakalan maka bidang kontak yang terjadi antarpartikel juga semakin banyak sehingga ikatan yang terjadi pada proses sinter pun semakin besar. Pengotor yang menempel pada batas kontak dapat mengurangi jumlah bidang kontak sehingga kekuatan produk sinter juga menurun.

b. *Initial stage*

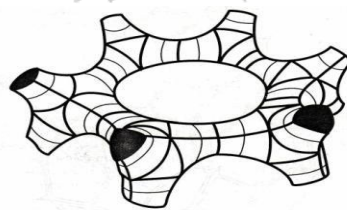
Pada tahapan ini luas kontak antar partikel menjadi bertambah dengan pertumbuhan *necking* secara cepat (Gambar 2.16a dan 2.16b) melalui difusi, perpindahan uap, atau aliran viskos. Pada tahapan ini terjadi perubahan besar pada sudut kontak antar partikel akibat pertumbuhan *necking* yang menyebabkan penyusutan. Untuk serbuk dengan partikel bulat, diperkirakan radius *necking* antar partikel sudah mencapai nilai $(0,4 - 0,5)$ radius partikel dan densitas relatif mengalami peningkatan sekitar $60 - 65 \%$. Pada daerah kontak antarpartikel terjadi perpindahan massa yang menyebabkan terjadinya pertumbuhan leher (Masuda, 2007). Tahap ini berakhir saat rasio ukuran leher (X/D) mencapai $0,3$ (L. Kang, 2005). Pada tahap ini pula pori mulai terpisah karena titik kontak membentuk batas butir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2. 18. Tahapan Pertumbuhan Leher dengan Rasio X/D
(L. Kang, 2005)

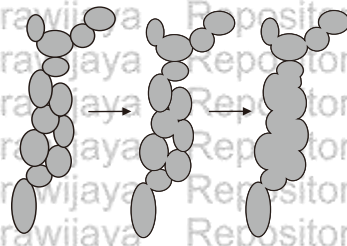
c. *Intermediate stage*

Pada tahap ini terjadi proses pemadatan, pertumbuhan butir dan struktur pori menjadi halus. Geometri batas butir dan pori yang terjadi pada tahap ini tergantung pada laju proses sinter. Awalnya pori terletak pada bagian batas butir yang memberikan struktur pori (Schulze, 2008), tahapan ini dimulai pada saat pori mulai mencapai bentuk yang stabil akibat gaya tarik pada permukaan dan *interfacial*. Hal ini ditandai dengan saluran pori kontinyu yang terdiri dari *three-grain edges* (Gambar 2.16c). Densifikasi yang terjadi diakibatkan oleh penyusutan luas penampang pori, sehingga pori menjadi tidak stabil dan terjebak sehingga terisolasi dan ini merupakan awal dari *final stage*. Tahapan ini secara umum sudah meliputi sebagian besar dari proses sinter dimana densitas relatif akan bertambah dari 65-90% akibat adanya zat yang terdifusi dan mengisi saluran pori. Tahap ini merupakan tahap terpenting dalam penentuan terhadap pemadatan (densifikasi) dan sifat mekanik bakalan sinter. Struktur pori yang terbentuk pada tahap *intermediate stage* dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 19. Struktur Pori pada *Intermediate Stage*
(Miracle, 2001)

Pemadatan yang terjadi pada tahap ini diikuti oleh difusi volume dan difusi batas butir. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan sinter serta semakin kecil partikel serbuk, maka ikatan dan densifikasi yang terjadi juga semakin tinggi. Pertumbuhan butir yang terjadi dapat mengeliminasi jumlah porositas yang ada, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20.



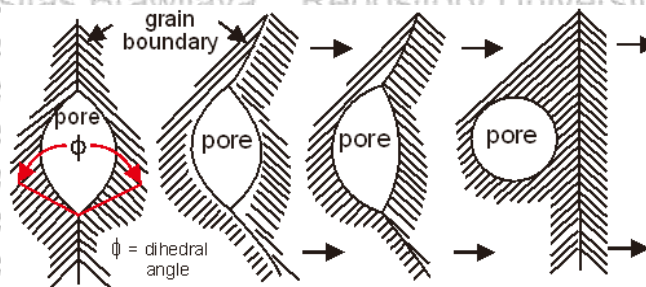
Gambar 2. 20. Pertumbuhan Butir yang Mengeliminasi Porositas
(L. Kang, 2005)

d. *Final stage*

Tahapan terakhir dimulai pada saat pori sudah terjepit dan terisolasi di setiap sudut butir (Gambar 2.16.d) yang ditandai dengan hilangnya saluran pori kontinyu.

Ciri penting dari tahapan ini adalah peningkatan mobilitas pori dan *grain boundary* yang dapat dikontrol jika densitas teoritis sudah diketahui (German, 1996).

Struktur mikro pada tahapan ini dapat dikembangkan melalui beberapa cara sesuai sifat bahan yang diinginkan. Pada tahapan ini proses berjalan lambat. Pemisahan pori pada tahap akhir ini dapat dilihat pada Gambar 2.21 .



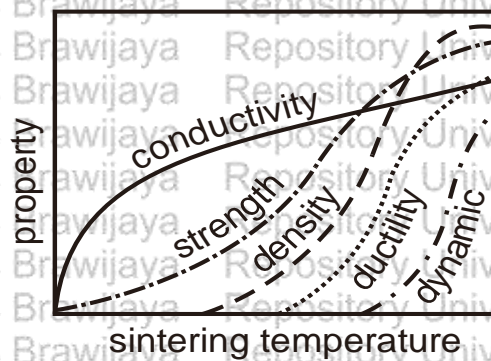
Gambar 2. 21. Pemisahan dan Pembulatan Pori pada *Final Stage*
(Barsoum, 1997)

Pori-pori yang bulat meyusut dengan adanya mekanisme difusi ruah (*bulk diffusion*). Untuk pori yang berada di batas butir, sudut dihedral yang kecil menyebabkan gaya menjadi besar. Setelah batas butir meluncur, pori akan berdifusi ke batas butir sehingga mengalami penyusutan dan proses ini berlangsung lambat. Dengan waktu pemanasan yang berlangsung lama, pengkasaran pori akan menyebabkan ukuran pori rata-rata meningkat, sedangkan jumlah pori akan berkurang. Jika pori memiliki gas yang terperangkap, maka kelarutan gas dalam matriks akan mempengaruhi laju pengurangan pori.

❖ Pengaruh Temperatur Terhadap Proses Sinter.

Temperatur sangat mempengaruhi perpindahan massa pada proses sinter karena

dengan meningkatnya temperatur sinter, akan mendorong terjadinya *interdiffusion* dari serbuk hasil kompaksi (*green compact*) dan meningkatkan kepadatan produk hasil proses sinter. Sehingga dengan semakin meningkatnya temperatur sinter, semakin meningkat pula sifat mekanis komposit yang telah disinter (Schaffer, 2004). Pada Gambar 2.22 ditunjukkan pengaruh temperatur sinter terhadap sifat mekanik dari material.



Gambar 2. 22. Pengaruh Temperatur Sinter Terhadap Sifat Mekanik (Klar, 2007)

Keterbatasan pada ukuran dan bentuk komponen yang dapat dipadatkan serta biaya pembuatan serbuk yang relatif mahal menyebabkan metode ini hanya digunakan pada beberapa kondisi tertentu. Namun akan menjadi menarik jika serbuk aluminium dengan titik leleh yang relatif rendah sebagai matriks atau bahan induk disinter bersama bahan serbuk yang memiliki titik lebur tinggi melalui mekanisme aliran viskos pada temperatur rendah, olehnya beberapa keuntungan dan kekurangan proses sinter yang juga dapat mempengaruhi banyak hal dapat dilihat pada Tabel 2.6. di bawah ini.

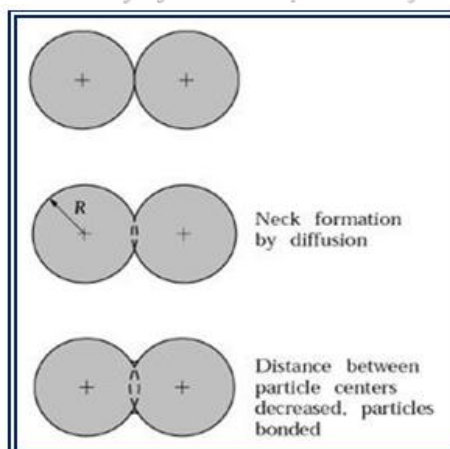
Tabel 2. 6. Pengaruh Proses Sinter (Shatokha, 2012)

Perubahan dengan Peningkatan Proses Sinter	Pengaruh
Penurunan ukuran partikel	<ul style="list-style-type: none"> - Proses sinter lebih cepat - Biaya lebih mahal - Tingkat kelarutan pengotor lebih tinggi - Peningkatan bahaya akibat panas
Peningkatan waktu sinter	<ul style="list-style-type: none"> - Biaya lebih mahal - Pertumbuhan butir dan pengkasaran - Mengurangi produktivitas

Peningkatan temperatur	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Shrinkage</i> yang terjadi lebih besar - Pertumbuhan butir - Biaya lebih mahal - Kepresisian rendah - Sifat semakin baik - Keterbatasan dapur - Pengkasaran pori
Peningkatan <i>green density</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Shrinkage</i> yang terjadi lebih kecil - Porositas lebih kecil - Densitas akhir tinggi - Dimensi seragam
Penambahan paduan dan zat aditif	<ul style="list-style-type: none"> - Kekuatan lebih tinggi - Masalah kehomogenan - Temperatur sinter lebih tinggi

❖ *Solid State Sintering*

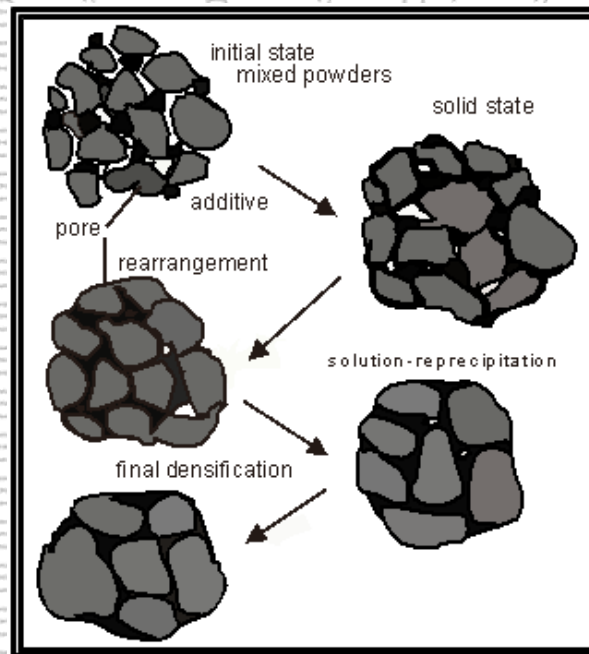
Merupakan pemanasan yang dilakukan dengan melibatkan fasa padat, tanpa melibatkan fasa cair. Ikatan yang terbentuk akibat proses sinter mengurangi energi permukaan dengan memindahkan kembali permukaan bebas, dengan eliminasi kedua dari luas batas butir melalui pertumbuhan butir (Masuda, 2007). Dengan bertambahnya pemanasan, memungkinkan pengurangan volume pori menuju *compact shrinkage*, meskipun pada proses sinter perubahan dimensi tidak diinginkan. Perilaku partikel serbuk selama proses *solid-state sintering* dapat dilihat pada Gambar 2.23 di bawah ini.



Gambar 2. 23. Perilaku Partikel Serbuk saat *Solid State Sintering* (Masuda, 2007)

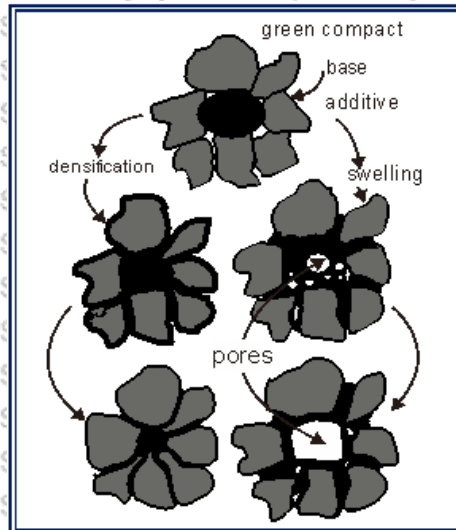
❖ *Liquid Phase Sintering*

Liquid state sintering merupakan proses sinter yang dilakukan pada temperatur tertentu dengan melibatkan fasa cair (L. Kang, 2005). Material logam yang dapat dilakukan proses *liquid phase sintering* harus dapat membentuk lapisan di sekeliling fasa padatan dan cairan logam harus memiliki kelarutan terhadap fasa padat, seperti Fe-Cu, Cu-Sn dan W-Cu. Perilaku partikel serbuk selama proses *liquid-state sintering* terlihat pada Gambar 2.24.



Gambar 2. 24. Perilaku Partikel Serbuk saat Proses *Liquid Phase Sintering* (L. Kang, 2005)

Terdapat dua kelarutan yang tidak boleh diabaikan dalam *liquid phase sintering*, yaitu kelarutan cairan dalam padatan dan kelarutan padatan dalam cairan. Kelarutan cairan dalam padatan yang tinggi tidak disukai karena mendorong fasa cair masuk ke dalam fasa padat. Selanjutnya terbentuk kelarutan yang tidak setimbang sehingga timbul porositas dan terjadi pengembangan selama proses sinter, (Bordia, 2009). Peristiwa timbulnya porositas ini disebut dengan istilah *swelling* seperti diperlihatkan pada gambar 2.25. Sedangkan, kelarutan padatan dalam cairan semakin besar sangat diinginkan karena mendorong fasa padat masuk ke dalam fasa cair sehingga mengisi porositas yang berada didalam matriks. Peristiwa terisinya porositas ini disebut dengan istilah densifikasi (pemadatan) yang juga diperlihatkan pada Gambar 2.25.



Gambar 2. 25. Proses Terjadinya Densifikasi dan *Swelling* pada *Liquid Phase Sintering* (L. Kang, 2005)

2.5. Karakterisasi Bahan Komposit

Saat proses pembentukan komposit berlangsung, ketika itu pula pada saat yang sama struktur bahan komposit tersebut tersusun dan terbentuk. Hal ini berarti ketika struktur tersusun, dengan sendirinya terbentuk sifat-sifat baru bahan komposit yang dihasilkan,

(Bordia, 2009). Pilihan proses manufaktur yang digunakan umumnya merupakan bagian yang berperan menentukan karakteristik struktur komposit dan performa produk yang dihasilkan. Untuk itu dilakukan beberapa pengujian di antaranya pengujian dengan SEM, EDS dan XRD guna mengetahui karakteristik komposit baru yang dihasilkan termasuk terjadinya pola fase struktur mineral yang baru terbentuk dan berbeda dengan struktur mineral bahan dasar pembentuknya, namun pada penelitian ini hanya difokuskan pada karakter yang dihasilkan oleh hasil uji kekerasan dan hasil uji densitas, porositas serta

daya serap air serta morfologi permukaan melalui identifikasi SEM. Untuk memperoleh komposit berkekuatan tinggi, distribusi serat dengan matrik harus merata pada proses pencampuran agar mengurangi timbulnya *void*. Jumlah kandungan serat dalam komposit, merupakan hal yang menjadi perhatian khusus pada komposit berpenguat serat. Untuk menghitung fraksi volume parameter yang harus diketahui adalah densitas resin, densitas penguat, massa matrik dan massa penguat, (Miracle, 2001) Adapun fraksi volume yang ditentukan dengan persamaan :

$$W_f = \frac{W_f}{W_c} = \frac{\rho_f V_f}{\rho_c V_c} \quad \dots 2.3$$

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} W_f = 1 - V_m \quad \dots 2.4$$



Jika selama pembuatan komposit diketahui berat penguat dan berat matrik, serta densitas penguat dan densitas matrik, maka fraksi volume dan fraksi penguat dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + W_m/\rho_m} \quad \dots \quad 2.5$$

dengan :

W_f = fraksi berat penguat

ρ_f = densitas penguat (gr.cm^{-3})

W_m = fraksi berat penguat

ρ_m = densitas komposit (gr.cm^{-3})

V_f = fraksi volume penguat

V_m = fraksi volume matrik

Komposit partikel (*particulate composites*)

Merupakan komposit yang menggunakan partikel serbuk sebagai penguatnya dan terdistribusi secara merata dalam matriknya. Komposit partikel banyak dibuat untuk bahan baku industry. Proses produksi yang mudah juga menjadi salah satu pertimbangan bila komposit akan diproduksi massal. Kelayakan bahan komposit partikel yang telah dibuat dapat diketahui dengan melakukan pendekatan uji validitas. Adapun pendekatan yang dimaksud yaitu dengan mengetahui modulus elastisitas komposit dalam rentang batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*). Berikut ini persamaan matematis yang digunakan :

Upper bound

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad \dots \quad 2.6$$

Lower bound

$$E_c = (E_m V_m)/(V_m E_f + V_f E_m) \quad \dots \quad 2.7$$

dengan :

E_c = modulus elastisitas komposit (MPa)

E_m = modulus elastisitas matriks (MPa)

E_f = modulus elastisitas filler (MPa)

V_m = fraksi volume matriks

V_f = fraksi volume filler

2.6. Densitas, Porositas dan Penyerapan Air

Faktor utama yang menentukan densitas bahan adalah massa dari atom pembentuk dan jenis ikatannya. Aluminium yang mempunyai struktur ikatan ionik akan lebih padat dibandingkan dengan marmer yang mempunyai struktur ikatan kovalen, (Maaze, 2016).

Mengukur densitas aluminium terutama *pure aluminium* adalah relatif mudah. Jika sampel mempunyai bentuk yang seragam maka volume sampel dihitung dari dimensinya sedangkan beratnya dapat diukur dengan menggunakan timbangan yang sensitif. Perbandingan antara massa terhadap volume adalah densitas dari sampel. Metode yang lebih akurat untuk mengukur volume sampel adalah dengan menggunakan prinsip Archimedes. Apabila benda padat dimasukkan ke dalam zat cair maka terjadi perpindahan volume zat cair sebesar volume benda yang tercelup. Jika selisih antara berat benda di udara (w_{air}) dan di dalam zat cair (w_{fluid}) dibagi dengan densitas zat cair (ρ_{fluid}) maka diperoleh volume zat cair yang dipindahkan yang juga sama dengan volume benda yang tercelup (Barsoum, 1997).

Densitas benda dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$W_a = \frac{w_a}{(w_a - w_f)/\rho_f} \quad \dots \quad 2.8$$

dengan :

$$\rho_b = (w_a - w_f)/\rho_f$$

$$\rho_b = \text{densitas sampel uji / bulk density, (g/cm}^3\text{)}$$

$$\rho_f = \text{densitas fluida, (g/cm}^3\text{)}$$

$$w_a = \text{berat benda di udara, (g)}$$

$$w_f = \text{berat benda dalam fluida, (g)}$$

Sedangkan perhitungan fraksi berat, fraksi volume dan kerapatan

Fraksi Berat :

$$w_c = w_m + w_f$$

$$W_m = \frac{w_m}{w_c}$$

$$W_f = \frac{w_f}{w_c}$$

$$W_m + W_f = 1$$

Keterangan :

$$W_c = \text{berat komposit}$$

$$W_f = \text{berat filler}$$

$$W_m = \text{berat matriks}$$



w_f = fraksi berat filler

w_m = fraksi berat matrik

Fraksi Volume :

$$v_c = v_m + v_f$$

Keterangan:

V_c = volume komposit

V_f = volume filler

V_m = volume matriks

v_f = fraksi volum filler

v_m = fraksi volum matriks

$$V_m = \frac{v_m}{v_c}$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}$$

$$V_m + V_f = 1$$

Kerapatan :

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m$$

$$\rho_c = \rho_c \frac{v_f}{v_c} + \rho_m \frac{v_m}{v_c}$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Keterangan:

ρ_c = densitas komposit

ρ_f = densitas filler

ρ_m = densitas matriks

v_f = fraksi volume filler

v_m = fraksi volume matriks

Sebenarnya marmer juga tidak selamanya padat dengan sejumlah pori yang terbuka akan menimbulkan masalah dalam pengukuran densitas. Fluida yang meresap ke dalam pori akan mengurangi volume fluida yang dipindahkan sehingga densitas yang dihasilkan akan lebih tinggi dari nilai sebenarnya. Untuk mengatasi masalah tersebut maka sebelum dilakukan penimbangan dalam fluida sampel biasanya dilapisi dengan *paraffin wax* yang tipis untuk mencegah penetrasi fluida ke dalam pori pada saat penimbangan sampel di dalam fluida. Namun demikian pengujian porositas, densitas dan penyerapan air sesungguhnya dapat pula dilakukan mengacu pada standar ASTM C 20-00.

Karena penelitian ini ditujukan juga untuk menyelidiki kerapatan dan porositas dari spesimen yang telah dihasilkan melalui proses pembentukan metalurgi serbuk, maka

sederhananya pemeriksaan untuk maksud ini dilakukan dengan metoda standar ASTM C20-00. Sebagaimana diketahui bahwa porositas adalah ukuran dari ruang kosong di antara material dan merupakan fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volume, sedangkan densitas (*density*) suatu material secara harafiah merupakan perbandingan antara massa dengan volume total pada material tersebut. (Malaga, 2007) menyatakan suatu logam memiliki dua komponen, komponen padatan dan komponen rongga (pori), keberadaan komponen padatan maupun komponen rongga mempunyai nilai yang beragam pada tiap-tiap material sehingga massa jenisnya berbeda dengan yang lainnya.

Mengacu pada metode ASTM C20-00 dalam menghitung densitas dan porositas dimana spesimen ditimbang dalam keadaan kering untuk memperoleh *dry weight* (D). Untuk menentukan *Suspended Weight* spesimen digantung dengan kawat tembaga di dalam wadah berisi air dimaksudkan agar tidak terjadi kontak langsung antara spesimen dengan dasar wadah yang berisi air yang dididihkan selama 2 jam, spesimen dibiarkan mengalami pendinginan secara alami pada suhu kamar dan didiamkan selama sedikitnya 12 jam, selanjutnya spesimen yg tergantung dalam air ditimbang untuk mendapatkan *suspended weight* (S). Sedangkan *Saturated weight* (berat jenuh, W) dari spesimen didapatkan dengan menimbang kembali spesimen yang telah diangkat dari dalam air yang terlebih dahulu ditiriskan dengan kain lembut, dibolak balik dan dibersihkan agar tidak terdapat lagi air yang menetes dari spesimen.

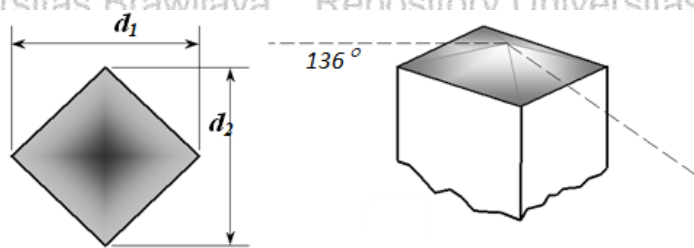
Pangujian dengan menggunakan standar ASTM C 20 ini dapat diperoleh:

$$\begin{aligned}
 \text{Exterior volume, } V_E &= W - S \\
 \text{Volume of open pores, } V_o (\text{cm}^3) &= W - D \\
 \text{Volume of impervious portion, } V_i (\text{cm}^3) &= D - S \\
 \text{Apparent porosity, } P (\%) &= [(W - D)/V_E] \times 100 \quad \dots \quad 2.9 \\
 \text{Water absorbtion, } A (\%) &= [(W - D)/D] \times 100 \quad \dots \quad 2.10 \\
 \text{Apparent specific grafity, } S_g &= D/(D - S) \quad \dots \quad 2.11 \\
 \text{Bulk density, } B (\text{g/cm}^3) &= D/V_E \quad \dots \quad 2.12
 \end{aligned}$$

2.7. Kekerasan (*hardness*) Komposit

Salah satu keunggulan bahan-bahan keramik adalah mempunyai nilai kekerasan yang tinggi. Kekerasan bahan adalah merupakan sifat mekanis yang menunjukkan ketahanan terhadap pembentukan jejak permanen dari hasil penetrasi indenter di permukaannya. Kekerasan dapat pula diartikan sebagai kemampuan bahan terhadap deformasi, goresan (*scratching*) dan pengikisan (*erosion*). Geometri dari ujung indenter akan sangat

berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang diperoleh sebab pada keramik penekanan indenter akan melibatkan terjadinya deformasi plastis dan pembentukan retak. Ada beberapa metode pengujian kekerasan dengan bentuk indenter yang bervariasi yang biasa digunakan untuk menguji kekerasan bahan teknik seperti metode Brinell, Vickers, Rockwell dan Knoop. Pengujian kekerasan dengan metode Brinell menggunakan indenter bulat dari bola baja tidak direkomendasikan untuk bahan keramik sebab sifat getas bahan menyebabkan permukaan yang diinjak rusak sehingga batas ukuran bekas injakan tidak jelas terbaca. Karena bahan keramik memiliki kekerasan yang tinggi maka biasanya digunakan metode pengujian Vickers dengan indenter dari intan berbentuk piramida seperti terlihat pada Gambar 2.26.



Gambar 2. 26. Skema Pengujian Kekerasan dengan Indentasi Vickers (ASTM C 1327 – 15)

Besarnya sudut antara permukaan piramida yang berhadapan adalah $\theta = 136^\circ$ dan nilai kekerasan Vickers dinyatakan dengan persamaan :

$$H_v = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad \dots 2.13$$

dengan :

VHN = nilai kekerasan Vickers, (MPa)

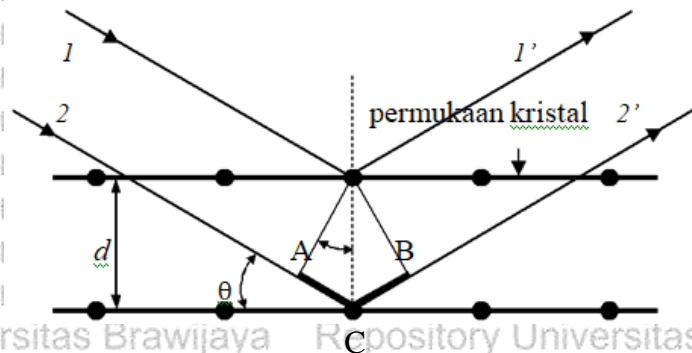
P = beban penekanan, (N)

d = diagonal rata-rata dari bekas injakan, (mm)

2.8. Difraksi Sinar-X Serbuk

Difraksi sinar-X merupakan metode yang digunakan untuk menentukan struktur kristal dari suatu padatan dengan cara hamburan sinar-x yang merupakan radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang sekitar 100 pm, yang dihasilkan dari penembakan logam dengan elektron berenergi tinggi. Pada tahun 1913 W.H. Bragg dan W.L. Bragg melakukan penelitian dengan menggunakan sinar-x, kemudian menghasilkan perumusan yang dikenal sebagai hukum Bragg dengan teknik difraksi sinar-x (XRD). Prinsip dasar dari XRD adalah hamburan elektron yang mengenai permukaan kristal. Bila sinar dilewatkan ke permukaan kristal, sebagian sinar tersebut akan dihamburkan dan sebagian

lagi akan diteruskan ke lapisan berikutnya, (Pecharsky, 2008). Sinar yang dihamburkan akan berinterferensi secara konstruktif (menguatkan) dan destruktif (melemahkan). Interferensi konstruktif terjadi bila berkas sinar-x yang dihamburkan berada dalam keadaan satu fasa. Kondisi satu fasa tercapai apabila jarak $AC + CB$ pada Gambar 2.8 sama dengan harga bilangan bulat (n) dari panjang gelombang radiasi dan dapat ditulis sebagai $AC + CB = n\lambda$, dimana $n =$ orde difraksi.



Gambar 2. 27. Difraksi Sinar-X pada Suatu Kristal

http://www.bruker-axs.de/fileadmin/user_upload/xrfintro/index.html

Dari gambar 2.27, diperoleh nilai $AC + CB = 2d \sin \theta$, maka interferensi konstruktif pada sudut θ (persamaan Bragg) adalah :

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots 2.14$$

dimana :

$n =$ orde berkas sinar yang dihamburkan (1,2,3,.....)

$d =$ jarak antara bidang

$\theta =$ sudut difraksi

$\lambda =$ panjang gelombang sinar-x

Sinar-x akan dipantulkan jika sudut pandang sinar-x sama dengan $2\theta = n\lambda/2d$. Jika sudut (θ) sinar datang tidak memenuhi persamaan $2\theta = n\lambda/2d$ maka akan mengalami interferensi destruktif. Dengan mengetahui data nilai d , sudut (2θ), dan intensitasnya maka dapat diketahui senyawa dan struktur kristal dari sampel dengan membandingkan data tersebut dengan data standar seperti JCPDS atau ICDD. Umumnya informasi data tentang proses difraksi sinar-x oleh sebuah kristal digambarkan dengan grafik $I = f(2\theta)$ dimana profil didalamnya menentukan karakteristik bahan dan senyawa kimianya.

2.9. Penelitian Terdahulu

Berbagai penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan upaya mendapatkan material yang tepat terutama untuk pemanfaatan bahan dasar Aluminium dengan membentuk paduan dari berbagai macam material tambahan agar didapatkan material komposit yang kuat, memiliki kekerasan yang baik serta memiliki sifat-sifat mekanis yang sesuai dengan berbagai keperluan termasuk juga sebagai bahan material sepatu rem (*brake pad*), untuk meningkatkan kemampuan dari bahan aluminium telah diupayakan oleh banyak peneliti di bidang komposit dengan cara memberi bahan penguat keramik seperti alumina (Al_2O_3), silikon karbida (SiC), periklas (MgO) dan lain-lain.

Karena komposit adalah material yang dibuat dengan kombinasi dua atau lebih material yang berbeda yang digabung atau dicampur secara makroskopik untuk membentuk material yang baru dengan syarat terjadi ikatan antara kedua material tersebut. Penguat berperan memberi efek penguatan terhadap komposit dimana penguat ini bersifat kurang ulet, tetapi rigid dan lebih kuat, karena modulus elastisitasnya lebih tinggi daripada matriks. Matriks merupakan bahan dasar yang berperan sebagai penyangga dan pengikat reinforced. Matriks memiliki karakteristik lunak, ulet, berat persatuan volume yang rendah dengan modulus elastisitas yang rendah. Matriks harus memiliki kemampuan mengikat dan atau memberikan ikatan antar muka (*interface bonding*) yang kuat antara matriks dan penguatnya.

Pada umumnya keuletan (*ductility*) dan ketangguhan (*failure toughness*) komposit partikulat akan menurun dengan semakin tingginya fraksi volume penguatnya. Meskipun komposit partikulat memiliki ketangguhan lebih rendah daripada komposit berserat panjang namun komposit ini sering lebih unggul ketahanan aus (*wear resistant*). Berbagai penelitian telah dilakukan diantaranya adalah percobaan pembuatan komposit paduan Aluminium *hybrid* ZA-27 dengan matriks penguat *Silicon Carbide* (SiC) dalam berbagai variasi persentase berat (Kumar, 2018), melalui proses penuangan yang diaduk (*stir casting*) dengan mencairkan paduan Aluminium pada temperatur $800^{\circ}C$ yang dicampur dengan bahan penguat dalam berbagai variasi prosentase berat, 2, 4 dan 6% SiC, dengan prosentase Grafit dan serbuk marmer konstan 2%. Hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan densitas sekaligus bertambahnya porositas sejalan dengan peningkatan prosentase SiC, sedangkan penambahan prosentase berat filler cenderung meningkatkan kekerasan dan kekuatan tekan komposit. Pemanfaatan serbuk marmer sebagai alternative pengganti pasir dalam pembuatan beton (Chetry, 2018) juga dengan penambahan 0,25% dan 0,50% serbuk aluminium telah dilakukan. Campuran beton dicor berbentuk kubus kemudian diuji kekuatan tekan dan menunjukkan hasil bahwa kekuatan tekan secara bertahap meningkat seiring dengan

bertambahnya serbuk marmer serta serbuk Aluminium dan kemudian menurun saat penambahan 15% serbuk marmer dengan persentase Aluminium juga dinaikkan, ini menggambarkan bahwa penambahan serbuk marmer dan Aluminium sebagai penguat terbatas pada komposisi tertentu.

Masih dengan bahan logam induk Aluminium untuk membuat *Metal Matrix Composite* dengan bahan penguat keramik yang dibentuk juga melalui proses pengecoran yang diadakan pada temperatur tertentu (Das, 2014). Ditemukan hasil yang menunjukkan kecenderungan peningkatan densitas, kekerasan, kekuatan tekan dan ketangguhan dengan meningkatnya fraksi penguat, namun sifat ini dapat berkurang dengan adanya porositas pada material komposit. Sedangkan sifat mekanik dari bahan komposit ini dapat ditingkatkan melalui perlakuan panas. Sifat-sifat yang dibahas pada penelitian tersebut juga meliputi perilaku mikrostruktur disamping sifat mekanik yang intinya menemukan hasil makin besar fraksi penguat keramik, makin meningkat kekerasan dan densitas komposit. Penelitian lain terkait penggunaan serbuk marmer sebagai penguat dengan menyelidiki pengaruh pemanasan awal partikel penguat pada kinerja komposit logam aluminium (Sharma, 2020) dengan menggunakan paduan Aluminium Al 6063 sebagai logam induk juga melalui proses pembentukan pengecoran aduk (*stir casting*). Terdapat pengaruh signifikan pemanasan 200°C terhadap kekuatan tarik, kekerasan mikro, dan tingkat keausan yakni terdapat peningkatan kekerasan 29% dan 52% dalam kekuatan tarik dibandingkan dengan komposit yang dibentuk dalam suhu kamar. Penggunaan serbuk marmer sebagai penguat dengan bahan dasar paduan Aluminium yang menghasilkan komposit serbuk Al-Cu-Ni-Marmer yang juga dibuat dengan teknik *Stir casting* (Rajendra, 2018) mempelajari efek partikel serbuk marmer, *Marble Dust* (MD) pada struktur mikro dan sifat mekanik dari komposit tersebut. Prosentase berat total penguat bervariasi sebesar dari 3, 6, 9 dan 12%. Dengan menggunakan SEM dan EDS pada penelitian tersebut nampak pengaruh partikel penguat menjadi terkonfirmasi. Kekerasan dan Kekuatan Tarik meningkat masing-masing sebesar 49,45% dan 22,9% pada 9% berat penguat, sedangkan di atas 9% berat terjadi penurunan kekerasan dan kekuatan tarik yang disebabkan oleh aglomerasi partikel serbuk marmer.

Jauh sebelumnya juga telah dilakukan penelitian untuk membentuk jenis baru komposit, diantaranya upaya mengoptimalkan kinerja pengereman terutama untuk menggantikan penggunaan material serat asbestos, (Ruzaidi, 2011) melakukan penelitian terhadap sebuah material komposit yang baru untuk digunakan sebagai sepatu rem (*brake pad*) yang terbuat dari bahan Palm Ash dan PCB waste bersama bahan metal dan resin thermoset sebagai pengikat, dimana morphology dan sifat-sifat kelelahan material komposit



tersebut menjadi perhatian dalam penelitian ini dan ditemukan kenyataan bahwa material dengan komposisi palm ash terbesar mempunyai ketahanan kelelahan dan sifat mekanis yang lebih baik dan dipandang setara dengan material konvensional seperti brake pad yang terbuat dari serat asbestos. Dalam penelitian tersebut karakterisasi dari *Palm Ash* dilakukan dengan menggunakan XRF, *Malvern Particle Size* dan Scanning Electron Microscope (SEM). Bahan komposit material yang untuk brake pad diperkaya dengan penambahan *pre-mix palm ash*, CaCO_3 , *phenolic resin*, Al_2O_3 , *graphite* dan serat baja lalu dipadatkan hingga 15MPa dan didiamkan selama 5 menit pada temperatur 150°C. dan dinyatakan bahwa kekuatan tekan dan kekuatan impact meningkat seiring meningkatnya kandungan serbuk palm.

Penelitian lain (Ertan, 2011) menginvestigasi peran dan pengaruh *graphite*, *coke* dan *Zns* terhadap material komposit, dalam studi tersebut diteliti karakteristik tribologis dan permukaan dari beberapa komposit non asbestos brake pad yang dilaburi pelumas (*graphite*, *coke*, and *ZnS*) dalam proporsi yang berbeda-beda dan dievaluasi secara eksperimental, koefisien gesek dan sifat-sifat kelelahan masing-masing sampel kemudian diuji dan ditemukan indikasi bahwa *graphite* mempunyai efek positif pada sifat tribologis brake lining, sedangkan komposit yang mengandung *ZnS* dan *Coke* dalam konsentrasi tinggi mempunyai kecenderungan untuk menghasilkan koefisien gesek yang tidak stabil yang tergantung pada temperatur dan siklus pengereman.

Penelitian tentang performa dari bahan komposit yang terbuat dari pemanfaatan bahan keramik pada kinerja sistem pengereman, dimana material serbuk keramik tersebut digunakan sebagai bahan brake pad untuk mengetahui karakteristik gesekan dan ketahanan kelelahannya dalam berbagai beban pengereman, (Mutlu, 2006). Dari penelitian tersebut diperoleh informasi bahwa tidak terdapat hubungan langsung secara proporsional antara kekerasan dan ketahanan kelelahan, namun setiap material sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan terutama oleh temperatur.

Dari serangkaian upaya menemukan material komposit yang mempunyai sifat mekanis yang baik, berbagai penelitian telah dilakukan dan salah satunya digunakan empat macam serat yang telah dimodifikasi yakni jenis *Crude*, *Mercerized*, *Acetilated* dan *Semi carbonized* yang kemudian dievaluasi terhadap kemampuannya menyerap kelembaban, kerapatan dan porositasnya, melalui proses metalurgi serbuk dibuat dari masing-masing keempat jenis material tersebut dengan komposisi kandungan tertentu dan dengan dengan perlakuan khusus berupa pemanasan dan kompresi untuk dipadatkan hingga 32.5 MPa., (Namessan, 2012). Dengan perbandingan berdasarkan perlakuan yang diberikan dengan menggunakan *Least Significance Difference* (LSD) dinyatakan bahwa secara signifikan terdapat perbedaan



atas daya serap air ketika komposisi polyester dinaikkan menjadi 25% dan dijelaskan pula bahwa bahan dasar kenaf (*Hibiscus cannabinus*) akan memiliki kapasitas daya serap air yang cukup tinggi hingga 0.067g dengan porositas 38% dan kerapatan 2.984 gr/cm³.

Upaya pemanfaatan limbah serbuk marmer juga telah dilakukan untuk mengetahui kekuatan, kekerasan serta ketahanan beton karena dipandang akan didapatkan produksi beton yang lebih murah dan lebih tahan lama menggunakan limbah ini dapat memecahkan masalah ekologis dan lingkungan sampai batas tertentu (Pathan, 2014), yang mendapatkan Hasil pengujian yang menunjukkan bahwa limbah marmer mampu meningkatkan kekerasan beton. Penggunaan gabungan dari debu tambang batu dan bubuk lumpur marmer menunjukkan kinerja yang sangat baik karena kemampuan pengisian mikro yang efisien sehingga dapat mengurangi porositas bahan.

Pemanfaatan limbah marmer sebagai penguat bahan komposit dengan menggunakan karet alam (*natural rubber*) (Ahmed, 2012). Penerapan bubuk marmer (*marble slurry*), MS sebagai filler rupanya meningkatkan banyak sifat mekanik komposit seperti kekuatan tarik, modulus elastis, kekuatan sobek, kekerasan, dan ketahanan lentur, sehingga disimpulkan bahwa dengan proporsi tertentu penambahan MS menunjukkan bahwa limbah serbuk marmer dapat digunakan sebagai pengisi alternatif yang sangat ekonomis dalam senyawa karet alam.

Penelitian pengembangan sifat-sifat mekanik aluminium melalui proses metalurgi serbuk dengan empat formulasi laboratorium yang berbeda yang menggunakan serat sabuk kelapa dari fraksi volume 0, 5, 10 dan 15 bersama dengan pengikat, untuk tujuan memperkuat komposit dengan menguji densitas, porositas, analisis struktur mikro, serta kekerasan dengan menggunakan densometer, SEM, hardness tester dan mesin uji universal (Maleque, 2007) yang hasilnya menunjukkan sifat-sifat yang lebih baik dalam hal kepadatan yang lebih tinggi, porositas yang lebih rendah dan kekuatan tekan yang lebih tinggi diperoleh dari komposit serat kelapa 5 dan 10% kandungan serat alami sabuk kelapa, sedangkan pada pengamatan struktur mikro menunjukkan distribusi seragam resin dan serat kelapa dalam matriks yang baik sehingga dapat disimpulkan bahwa 5 dan 10% menunjukkan sifat fisik-mekanis yang lebih baik dibandingkan dengan formulasi lainnya. Oleh karenanya dipandang bahwa sangat terbuka peluang pengembangan dan perbaikan sifat-sifat Aluminium melalui penambahan bahan alami lainnya termasuk percobaan penggunaan serbuk marmer sebagai penguat.

(Mutlu, 2009) pada kesempatan lain melaporkan hasil penelitiannya dalam rangka menyelidiki material komposit pengganti asbestos, dalam studi tersebut digunakan bahan



Rice Straw Dust (RSD) and *Rice Husk Dust* (RHD) untuk menguji karakteristik tribologis dari bahan komposit dan ternyata bahwa RSD dan RHD juga memiliki kandungan silica sehingga mempunyai sifat-sifat menyerupai material keramik. Proses pembentukan RSD dan RHD melalui proses pemisahan butirannya dengan pengeringan kemudian dicampurkan dengan bahan-bahan standar pembuatan brake pad, formula baru ini juga telah diuji dibawah *Friction Assessment and Screening Test* (FAST). Koefisien gesek, laju kelelahan dan penggunaan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk memastikan performa dari material tersebut. Sedangkan penelitian terhadap performa komposit dari bahan keramik pada kinerja sebagai bahan komposit yang dapat memiliki kekerasan dan ketahanan gesek yang baik, dimana material komposit dari keramik tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai bahan brake pad sehingga pengujiannya dilakukan untuk mengetahui karakteristik gesekan dan ketahanan kelelahannya dalam berbagai beban tekan dan beban gesek. Dari penelitian tersebut diperoleh informasi bahwa tidak terdapat hubungan langsung secara proporsional antara kekerasan dan ketahanan kelelahan terhadap proporsi kandungan keramik, namun setiap material sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan terutama temperatur yang terjadi (Mutlu, 2005).

Di kesempatan lain sebagai bagian dari keseluruhan upaya untuk mendapatkan komposit dengan kualitas teknis material yang lebih baik, bahkan hingga menggabungkan begitu banyak unsur tambahan yang digabungkan dalam membentuk material komposit baru dengan harapan menemukan komposisi material yang memiliki sifat mekanis yang baik, dalam penelitian ini digunakan natural zeolit sebagai material baru sebagai penguat komposit, karena zeolite memiliki kandungan silica yang mempunyai sifat mekanis menyerupai keramik, pada formula terbaru material komposit dengan tujuh komposisi kandungan berbeda telah diuji juga dibawah *Friction Assessment and Screening Test* (FAST), pada eksperimen tersebut perubahan koefisien gesek, pengaruh temperatur terhadap permukaan spesimen juga terukur, sedangkan karakterisasi mikro struktur dari keseluruhan komposisi bahan komposit dilakukan pengujian dengan scanning electron microscope (SEM) (Keskin, 2011). MMC dengan penguat partikel keramik ditemukan memiliki kerapatan rendah dan konduktivitas termal yang tinggi dibandingkan dengan material dasarnya yang berupa besi tuang, dengan mempertimbangkan penambahan Al_2O_3 dan SiC untuk membentuk komposit MMC yang kemudian diselidiki dengan beberapa pengujian membukukan hasil yang baik, yakni menunjukkan ketahanan termal yang tinggi, ketahanan aus dan kekerasan yang lebih baik. Investigasi awal menunjukkan bahwa MMC

memperoleh sifat-sifat mekanis yang baik, sifat kekerasan komposit dapat lebih ditingkatkan dengan penambahan Al_2O_3 dan Al_2TiO_5 (Fu, 2012).

Sebagaimana diketahui bahwa pembentukan material dengan metoda metalurgi serbuk mempunyai keterbatasan terutama soal ukuran produk yang dihasilkan, namun sebuah penelitian yang telah dilakukan dengan memproduksi komposit dengan dua metode yang berbeda untuk dibandingkan, yakni pertama dengan metalurgi serbuk yaitu dengan mencampurkan serbuk aluminium EN AW- $AlCu4Mg1(A)$ dengan serbuk keramik Al_2O_3 , kemudian yang kedua adalah dengan metode infiltrasi tekanan pada pori yang terbentuk menggunakan paduan cair EN AC $AlSi12$ yang sebelumnya telah disiapkan melalui proses sinter serbuk keramik Al_2O_3 dengan penambahan bahan pengisi/penutup pori-pori berupa serat karbon. Kedua metode yang dilakukan pada bahan komposit dengan matriks aluminium yang diperkuat oleh partikel keramik dapat diterapkan dalam praktek untuk menghasilkan struktur dan sifat-sifat yang diperlukan. Akan tetapi dari perbandingan kedua metode pembentukan tersebut nampaknya dapat dipastikan bahwa metode metalurgi serbuk lebih menguntungkan meskipun memiliki keterbatasan dalam hal ukuran produk namun komposit yang dihasilkan dapat mendekati bentuk sesungguhnya dengan kata lain hasilnya lebih presisi, sementara metode infiltrasi tekanan memungkinkan untuk menghasilkan produk komposit dengan kualitas permukaan yang baik, tetapi rupanya mengkonsumsi energi lebih banyak sehingga dapat dianggap tidak begitu efisien dibandingkan dengan metode metalurgi serbuk (Fligier, 2008). Metalurgi serbuk juga memungkinkan membuat sifat bahan relatif lebih mudah dikontrol yakni dengan mencampur bahan dengan sifat berbeda dalam berbagai proporsi. Oleh karena material serbuk marmer (*marble*) juga mempunyai kandungan silica dengan sifat mekanik menyerupai keramik maka penelitian ini secara spesifik akan menggunakan serbuk marmer yang selama ini merupakan limbah pengolahan batu marmer dan dipandang hanya dapat dijadikan bahan additive bagi penguatan beton atau bahan konstruksi bangunan lainnya. Disamping itu penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternative pemanfaatan limbah serbuk marmer di Kabupaten Maros Sulawesi Selatan untuk dapat dijadikan bahan komposit yang memiliki sifat-sifat teknis dan sifat mekanis yang baik sehingga dapat turut berkontribusi bagi upaya perbaikan lingkungan dari pencemaran.

2.10. Kontribusi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini nantinya dapat memberikan informasi teknis yang jelas berkaitan dengan komposisi kandungan unsur mineral dari komposit Aluminium-marmer. Dengan

pengujian kekerasan, densitas, porositas serta daya serap air bahan komposit dapat diketahui karakteristik mekanis sehingga mudah disesuaikan dengan berbagai kebutuhan teknis lainnya sekaligus membuka peluang pemanfaatan limbah hasil pengolahan marmer yang banyak terdapat di Kabupaten Maros dan Kabupaten Pangkep, hal ini tentu saja akan turut berkontribusi terhadap usaha-usaha penanggulangan masalah lingkungan, dengan demikian sekiranya ide penelitian ini dapat terwujud dengan baik maka produk komposit ini dapat dikategorikan sebagai *Green Composite*, atau komposit ramah lingkungan.

2.11. Orisinilitas

Pemanfaatan bahan-bahan limbah yang melimpah dan dipandang relatif tidak memiliki nilai ekonomis seperti limbah hasil pengolahan batu alam marmer yang banyak terdapat di Kabupaten Maros Sulawesi Selatan dimaksudkan untuk menjadikan serbuk marmer sebagai material alternatif komposit yakni sebagai komposit partikel (*Particulate Composite Materials*) dimana partikel/butiran serbuk marmer diproses melalui metoda metalurgi serbuk bersama dengan serbuk Aluminium dalam komposisi tertentu. Penelitian interaksi berbagai bahan organik sebagai bahan penguat yang bersumber dari limbah batu alam dengan penggunaan aluminium murni sebagai matriks untuk mendapatkan komposisi ideal belum banyak dilakukan namun pemanfaatan serbuk marmer sebagai unsur utama pengganti bahan asbestos sebagai bahan komposit *brake pad* dengan karakteristik yang sesuai dengan yang diharapkan sejauh ini nampaknya belum dilakukan secara spesifik, terutama agar hasil rekayasa komposit aluminium-marmer dalam penelitian ini dapat memenuhi standar disain yang sesuai dimana bahan cakram (*disk*) tentu saja harus lebih kuat dan memiliki ketahanan aus yang lebih baik dibanding pad sebagai komponen *fast moving*. Bahan komposit yang memanfaatkan material alam semacam serbuk marmer (*marble*) sebagai filler dengan Aluminium alloy sebagai media penguat dalam matrik epoksi secara fundamental belum banyak diteliti, oleh karenanya keaslian penelitian ini bagi perkembangan ilmu pengetahuan terkait dengan pemanfaatan serbuk *marble* sebagai komposit dapat dipertanggung jawabkan, diantaranya karena beberapa hal berikut :

- A. Limbah serbuk marmer (*marble*) hasil pengolahan marmer di Kabupaten Maros, Sulawesi Selatan sejauh ini menjadi masalah lingkungan tersendiri sehingga belakangan ini berbagai upaya pemanfaatannya mulai banyak dilakukan, diantaranya dimanfaatkan sebagai bahan penguat semen, sejauh ini limbah marmer ini belum mendapat tempat sebagai material teknik bernilai jual tinggi

B. Kelayakan kompabilitas penggunaan serbuk marmèr (marble) sebagai penguat komposit berbahan dasar Aluminium murni nampaknya belum diteliti secara spesifik khususnya dalam aspek mikromekanika material yang dapat digunakan sebagai bahan Aluminium Matrix Composites (AMC) yang memiliki ketangguhan menerima beban kompresif, kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi serta memiliki ketahanan aus yang lebih baik.





BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1. Kerangka Berfikir dan Tinjauan Teoritis

Dari berbagai hasil penelitian atas penggunaan serbuk marmer yang umumnya ditujukan sebagai penguat bahan beton pada konstruksi bangunan diperoleh hasil dimana tambahan serbuk marmer mampu meningkatkan kekuatan dan kerapatan serta kekerasan beton, sehingga menimbulkan pertanyaan apakah hal serupa dapat terjadi jika serbuk marmer dijadikan sebagai penguat pada bahan komposit semisal *Aluminium Matrix Composites* (AMC). Penggunaan limbah serbuk marmer sebagai penguat untuk membuat material komposit bersama dengan serbuk Aluminium melalui proses metalurgi serbuk awalnya dimaksudkan sebagai bagian dari upaya menemukan material pengganti asbestos yang membawa masalah lingkungan dan kesehatan sebagai bahan dasar kampas rem (brake pad) pada kendaraan, disamping diharapkan dapat menjadi alternatif baru bagi komposit berbasis aluminium terutama karena kedua material memiliki perbedaan densitas dan temperatur lebur yang cukup tinggi oleh karenanya melalui proses metalurgi serbuk memungkinkan terbentuknya paduan yang memiliki homogenitas dan porositas yang baik dengan mengontrol komposisi campuran kedua materialnya. Dalam perkembangannya (Radzi, 2011) menyatakan bahwa fabrikasi brake pad yang terdiri dari berbagai macam komposisi material harus diarahkan untuk menggantikan material serat asbestos yang mengancam kesehatan manusia. Dalam penelitian tersebut dilakukan karakterisasi bahan komposit serbuk palm (*palm ash*) dengan menggunakan XRF, Malvern Particle Size serta Scanning Electron Microscopy (SEM) ditujukan untuk melihat potensi penggunaan serbuk palm (*palm ash*) untuk menggantikan bahan dasar asbestos sebagai basis pembuatan komposit brake pad.

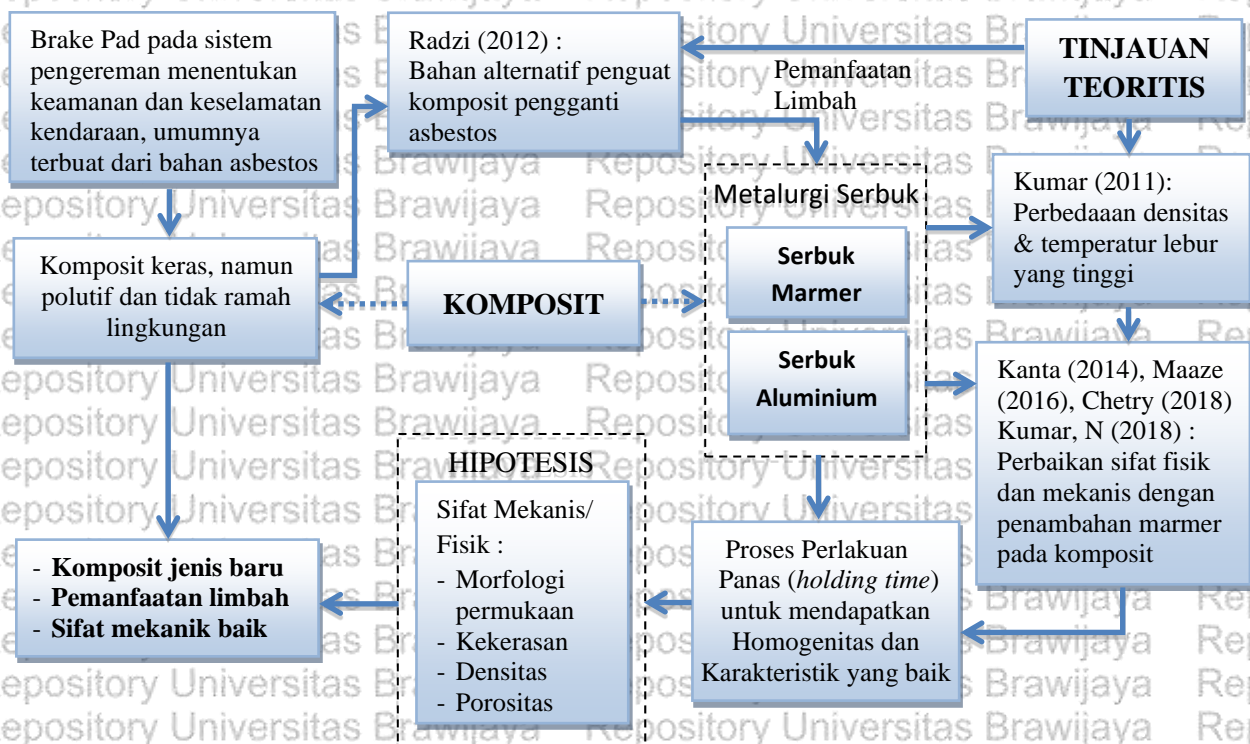
Penelitian terhadap spesimen komposit yang terbuat dari bahan Aluminium dan serbuk kaca sebagai penguat yang divariasikan dari 0% hingga 8% yang dibentuk melalui proses metalurgi serbuk (Kumar, 2011) memberi petunjuk bahwa ketika persentase konten kaca meningkat, parameter kemampuan kerja juga meningkat, yakni penambahan kaca dalam matriks Aluminium mempengaruhi indeks pengerasan regangan komposit, Penambahan kandungan gelas yang lebih tinggi sebagai penguat dalam matriks Aluminium

meningkatkan sifat kekuatan, karena pengurangan ukuran pori atau peningkatan kerapatan relatif. Nilai koefisien kekuatan meningkat dengan meningkatnya penambahan kaca karena densifikasi yang lebih baik dan penurunan ukuran pori. Penelitian tentang pemanfaatan bahan limbah terutama dihasilkan dari industri aluminium dan industri marmer untuk memproduksi batu bata (Maaze, 2016) menunjukkan pengaruh positif dari pencampuran limbah tersebut terutama terhadap sifat fisik dan sifat mekanik batu bata yang dihasilkan dengan kekerasan dan kekuatan tekan yang lebih baik serta lebih ringan. Selanjutnya studi terkait substitusi peran pasir oleh limbah serbuk marmer dalam beton dengan 0%, 5%, 10% dan 15% bubuk marmer, bersama dengan penambahan bubuk limbah aluminium sebesar 0,25% dan 0,50% secara individu juga menunjukkan peningkatan kekerasan dan kekuatan tekan kubus beton sampai batas tertentu (Chetry, 2018).

Efek pemanfaatan partikel serbuk marmer (*marble dust*) sebagai penguat pada partikel paduan Al-Cu-Ni untuk membentuk komposit partikel Al-Cu-Ni-Marmer menunjukkan perbaikan struktur mikro komposit disertai peningkatan kekerasan komposit seiring dengan meningkatnya persentase fraksi berat kandungan serbuk marmer hingga 9% dan mulai mengalami penurunan kekerasan pada saat mencapai 12% kandungan marmer yang diakibatkan oleh efek aglomerasi (Kumar, 2018), sehingga dinyatakan bahwa akumulasi partikel mamer dalam matriks Al-Cu-Ni dapat mengarah pada pembuatan komposit berbiaya rendah dengan peningkatan dalam kekerasan dan kekuatan yang dapat digunakan dalam banyak hal terutama pada aplikasi di bidang otomotif dan kedirgantaraan. Oleh karenanya tingkat kekerasan dan karakteristik material komposit yang terbentuk dalam penelitian yang juga menggunakan serbuk marmer sebagai penguat ini menjadi demikian penting mengingat kualitas sebuah komposit sangat dipengaruhi oleh sifat teknis bahan yang meliputi kekerasan, densitas dan porositasnya.

Berdasarkan kerangka berfikir dan tinjauan teoritis diatas maka sebagai pendekatan dalam memecahkan permasalahan dalam penelitian ini dapat dilihat melalui kerangka konsep penelitian seperti pada Gambar 3.1 di bawah ini.





Gambar 3. 1. Kerangka Konsep Penelitian

3.2. Hipotesis

Pada kerangka konsep diatas nampak bahwa pengujian komposit serbuk Aluminium-marmer dilakukan setelah melalui perlakuan panas sebagai bagian dari proses metalurgi serbuk dalam pembentukan spesimen uji. Perlakuan panas ini bertujuan untuk mendapatkan homogenitas dan karakteristik yang baik dari komposit sehingga dapat memenuhi sifat-sifat mekanis/fisik yang diperlukan yaitu morfologi permukaan, kekerasan, densitas dan porositas. Karena dari beberapa penelitian yang melibatkan penambahan marmer sebagai penguat menunjukkan perbaikan sifat mekanis dari bahan komposit maka dengan merujuk pada hasil-hasil penelitian terkait sebelumnya, selanjutnya proses pengujian akan dilakukan berdasarkan hipotesis sebagai berikut:

1. Kekerasan sangat ditentukan oleh besarnya persentase kandungan serbuk marmer pada pembentukan komposit berbahan dasar aluminium, (Rajendra, 2018) meskipun melalui proses pembentukan yang berbeda yakni dengan pengecoran (*stir casting*), disamping itu dikarenakan serbuk marmer mengandung silica yang mempunyai sifat-sifat menyerupai keramik, bahan keramik mempunyai karakteristik yang unik yaitu merupakan senyawa logam dan bukan logam. Senyawa ini mempunyai ikatan ionik atau ikatan kovalen. Jadi sifat-sifatnya berbeda dengan logam. Ikatan ionik menyebabkan bahan keramik mempunyai titik cair yang tinggi dibanding dengan logam atau bahan organik. Biasanya lebih keras dan tahan terhadap perubahan-

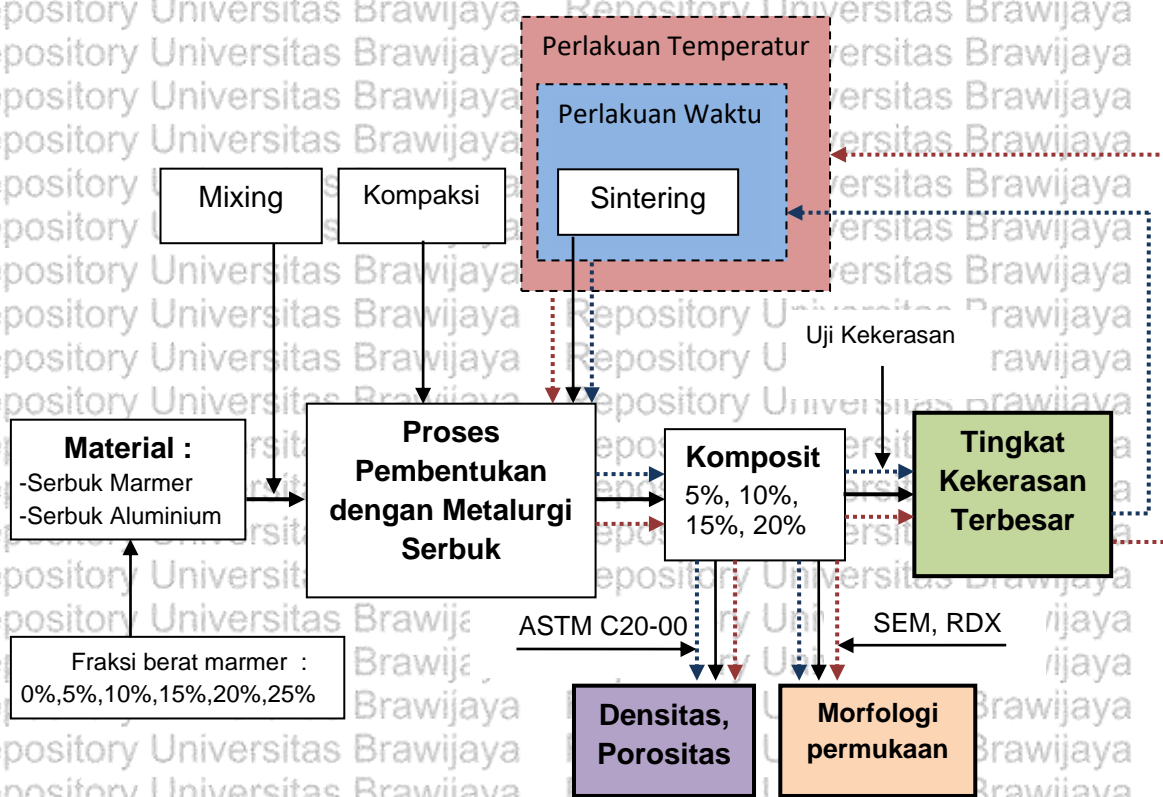
perubahan kimia. (Keskin, 2011). Terdapat pula kecenderungan peningkatan densitas, kekerasan, dengan meningkatnya fraksi berat penguat (Das, 2014).

2. Sebagaimana diketahui bahwa dalam proses metalurgi serbuk faktor temperatur sinter sangat berperan menyatukan ikatan-ikatan partikel campuran tak terkecuali campuran bahan logam dan non-logam (Masuda, 2007). Demikian pula halnya serbuk memiliki bentuk lebih teratur, lebih halus dan sedikit porositas antar partikel sehingga akan memiliki mampu tekan dan *green density* yang lebih tinggi dibandingkan serbuk yang kasar (Pecharsky, 2008) sehingga dengan perlakuan panas terhadap campuran *green body* hasil kompaksi akan menghasilkan komposit dengan sifat mekanik yang baik, kerapatan dan porositas yang juga akan lebih baik.
3. Terdapat hubungan sebab akibat antara lama waktu penahanan (*sintering holding time*) dengan porositas komposit yang terbentuk. Dengan waktu tertentu akan mengakibatkan meningkatnya kekerasan dan densitas dimana porositas komposit menjadi minimum dengan profil mikrostruktur yang lebih baik. Dengan demikian karakteristik komposit sangat ditentukan oleh variable-variabel telah yang diuraikan dalam penelitian ini. Pengaruh signifikan pemanasan dalam pembentukan komposit yang menggunakan partikel serbuk marmer sebagai penguat dalam matriks aluminium Al 6063 menunjukkan peningkatan 29% kekerasan mikro dibandingkan dengan komposit yang dibentuk dalam suhu kamar, (Sharma, 2020).

3.3. Proses Pembentukan dengan Metalurgi Serbuk

Dalam penelitian ini fraksi berat marmer sebagai penguat bahan komposit, temperatur sinter dan lama waktu penahanan saat proses sinter (*holding time*) merupakan variable bebas (*independent variable*), sedangkan tingkat kekerasan, densitas, dan porositas komposit yang terbentuk merupakan variable terikat (*dependent variable*). Penelitian mengenai hubungan antara komposisi/fraksi berat bahan komposit dengan morfologi permukaan, kekerasan, densitas dan porositasnya spesimen dilakukan dengan merekayasa beberapa prosentase perbandingan kandungan serbuk marmer dan serbuk aluminium melalui proses pembentukan metalurgi serbuk (P/M) dimana serbuk marmer dengan ukuran partikel tertentu sebagai penguat dan serbuk Aluminium sebagai bahan dasar dalam berbagai variasi perbandingan fraksi berat untuk mendapatkan komposisi paduan terbaik bahan komposit dengan kekuatan *interfacial* yang tinggi dan akan mendukung peningkatan sifat-sifat mekanis termasuk karakteristik permukaan yang diamati dengan Scanning Electronic Microscopy (SEM).

Adapun skema proses pembentukan produk komposit hingga pada pengujian spesimen diuraikan dan ditunjukkan pada gambar 3.2. di bawah :



Gambar 3. 2. Skema Prosedur Kegiatan Penelitian

BAB IV METODE PENELITIAN

Bahan dan metode penelitian meliputi uraian dan pembahasan tentang bahan dasar yang digunakan, peralatan-peralatan, bentuk dan ukuran spesimen yang dibuat serta jalannya penelitian yang meliputi karakterisasi bahan dasar serta proses pembuatan dan pengujian spesimen.

4.1. Bahan Penelitian

Bahan dasar yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

a. Serbuk marmer (*marble powder*)

Serbuk marmer yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari limbah hasil pemotongan dan pengikisan batu marmer di Kabupaten Maros Propinsi Sulawesi Selatan. Agar nantinya didapatkan campuran yang homogen maka bubuk/serbuk kemudian ditumbuk dan dihaluskan dengan *ball mill* kemudian diayak hingga mesh 200, atau sekitar 37 μm sampai 74 μm



Gambar 4. 1. Serbuk Marmer

b. Serbuk Aluminium

Serbuk Aluminium (*Aluminium powder*) yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari produk MERCK – Germany berbentuk irreguler dan ukuran partikel yang homogen dengan spesifikasi seperti berikut, disertai gambar 4.2 di bawah :

Density : 2.70 g/cm³ (20 °C)

Melting Point : 660 °C

Molar Mass : 26.98 g/mol

Avg Size : < 80 μm

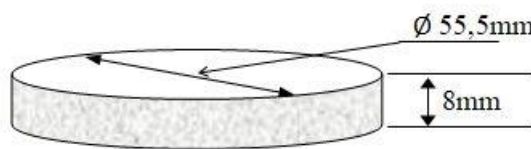


Gambar 4. 2. Serbuk Aluminium

4.2. Bentuk dan Ukuran Spesimen

Spesimen untuk uji karakterisasi (SEM, EDS dan XRD) baik untuk bahan dasar maupun bahan komposit *serbuk marmer* dan serbuk Aluminium menyesuaikan dengan prosedur pengujian dan spesimen *holder* yang dimiliki alat uji yakni dalam bentuk sangat tipis dan preparasi serbuk yang tersedia pada perangkat pengujian. Bentuk dan ukuran spesimen yang dihasilkan dari proses metalurgi serbuk untuk diuji adalah berupa silinder tipis berdiameter 55,5 mm dengan tebal 8mm sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.3 di bawah, ukuran tersebut mengacu pada standar uji yang akan digunakan yakni :

- (a) ASTM C 20 – 00, standar untuk menguji (*apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, dan bulk density*).
- (b) Spesimen hasil sinter.



Gambar 4. 3. Bentuk Spesimen Uji yang Dibuat

4.3. Alat yang Digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini mulai dari karakterisasi bahan sampai pembuatan dan pengujian spesimen antara lain adalah :

- a. *Ball-mill*, digunakan untuk menghaluskan serbuk marmer sampai pada ukuran partikel tertentu. Alat ini milik Laboratorium Bahan Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik UMI Makassar.
- b. *Screen sieve*, digunakan untuk mengayak serbuk marmer (*marble powder*) sehingga diperoleh ukuran besar butir partikel sesuai dengan yang diinginkan. Alat ini milik Laboratorium Bahan Teknik, Jurusan Teknik Sipil UMI Makassar.

- c. Cawan keramik penampungan campuran (*mixed powder*) milik Laboratorium Material Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar.
- d. Alat ukur kekerasan, *Hardness test* merk Affri dipergunakan untuk mengukur kekerasan permukaan komposit milik Laboratorium Ilmu Material Jurusan Teknik Mesin UMI Makassar.
- e. Alat Uji Kekerasan Digital, *Microhardness Tester* merk *TIME* untuk menguji kekerasan penampang milik Laboratorium Pengujian Bahan, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
- f. *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) digunakan untuk menguji komposisi dari bahan yang digunakan pada penelitian ini. Alat ini milik Laboratorium Mikrostruktur, Universitas Negeri Makassar.
- g. *X-Ray Diffractometry* (XRD), digunakan untuk mengetahui fase yang terbentuk dalam benda uji. Alat ini milik Laboratorium Mikrostruktur, Universitas Negeri Makassar.
- h. Timbangan digital type LC 1201S dengan ketelitian sampai 10^{-3} gram, untuk menimbang bahan penelitian yang digunakan. Alat ini milik Laboratorium Material, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar.
- i. Mikroskop optik merk Olympus FM 104 D untuk mengamati bentuk partikel dan mengukur ukuran partikel limbah marmer. Alat ini juga digunakan untuk mengamati ukuran diagonal bekas injakan indentor dari hasil uji kekerasan makro Vickers. Alat ini milik Laboratorium Material Teknik, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar.
- j. Timbangan digital type LC 1201S dengan ketelitian sampai 10^{-3} gram, untuk menimbang bahan penelitian yang digunakan. Alat ini milik Laboratorium Material Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik UMI Makassar.
- k. Cetakan yang terbuat dari *stainless steel* untuk membentuk *green body*, milik Laboratorium Material Teknik, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar.
- l. *Uni-axial hydraulic press* dengan kapasitas maksimum 600 MPa, digunakan untuk melakukan proses kompaksi campuran serbuk marmer dan serbuk Aluminium menjadi *green body*. Alat ini milik Laboratorium Material Teknik, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar.
- m. *Heat treatment furnace* merek Ney-Vulcan, tipe D550, dengan temperature operasi maksimal 1200°C . Alat ini digunakan untuk proses sinter terhadap spesimen komposit Aluminium-marmer. Alat ini milik Laboratorium Material Teknik, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UMI Makassar.



n. Peralatan pendukung (*hand glove*, masker, wadah penyimpanan spesimen, kantong plastik, dll).

4.4. Prosedur Pengujian

Karena penelitian ini dimaksudkan untuk menginvestigasi keterkaitan antara komposisi kandungan serbuk marmer dalam besaran fraksi volume pada komposit Aluminium-marmer yang dibuat dengan metoda metalurgi serbuk, maka spesimen komposit yang dihasilkan ini akan dilakukan uji kekerasan, metalografi dengan SEM, uji densitas dan porositas untuk menentukan karakteristik material komposit, termasuk perubahan komposisi kandungan unsur-unsur kimia setelah melalui pencampuran dan pemanasan dalam temperatur serta lama waktu sinter pembentukan yang telah didapatkan dalam penelitian ini, oleh karenanya uji komposisi perlu dilakukan terhadap bahan dasar yakni pada serbuk Aluminium dan serbuk Marmer untuk kemudian disandingkan dengan hasil uji komposisi pada specimen komposit yang telah terbentuk dan dianggap sebagai komposisi dengan perlakuan panas terbaik berdasarkan hasil uji kekerasan, densitas dan porositas yang terlebih dahulu dilakukan.

Penelitian dibagi dalam beberapa tahapan yang dimulai dengan pengadaan bahan dan pembuatan *raw material* yang meliputi kegiatan menghaluskan dan mengayak serbuk limbah marmer kemudian dilanjutkan dengan persiapan pembuatan spesimen melalui proses metalurgi serbuk dan pengujian sifat-sifat bahan dasar marmer dan Aluminium. Diagram tahap alir jalannya penelitian secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 4.7.

4.4.1. Tahap persiapan dan karakterisasi bahan penelitian

Dua jenis bahan dasar yakni Aluminium serbuk “*MERCK*” produk Germany berbentuk irreguler dan ukuran partikel yang homogen sedangkan serbuk marmer yang digunakan sebagai penguat diperoleh dari limbah hasil pemotongan batuan marmer di Kabupaten Maros Propinsi Sulawesi selatan, untuk mendapatkan ukuran partikel serbuk marmer yang halus merata maka limbah marmer terlebih dahulu dihaluskan lagi dengan *ball-mill* lalu diayak hingga mesh 200. Selanjutnya dilakukan karakterisasi terhadap serbuk marmer dan serbuk Aluminium untuk mengetahui bentuk struktur mikro dengan SEM, komposisi kimia dianalisa dengan EDS dan komposisi fase diamati dengan XRD sehingga nantinya setelah diperoleh spesimen komposit Aluminium-marmer dengan komposisi fraksi berat terbaik untuk tingkat kekerasan dan densitas terbaik juga akan dilakukan analisis pola SEM dan XRD lalu membandingkannya dengan pola XRD masing-masing material dasar yakni pada serbuk Aluminium dan serbuk marmer, karena dari keseluruhan proses yang dilakukan, material dasar yang digunakan perlu dikarakterisasi, termasuk analisis ukuran partikel,

analisis serbuk dengan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Energy Dispersive X-Ray (EDX) technique sebagaimana yang telah diuraikan diatas agar struktur mikro dan data elemental bahan dasar tersebut dapat dikompilasi guna dijadikan referensi dalam menganalisis formulasi produk komposit yang dihasilkan sehingga akan lebih mudah dalam pengembangannya.

4.4.2. Tahap Pembuatan Spesimen

Penelitian dilanjutkan dengan pembuatan *green body* pada berbagai variasi komposisi campuran antara serbuk marmer dengan serbuk Aluminium dalam fraksi berat. Fraksi berat yang digunakan seperti ditunjukkan pada table 4.1 dibawah (kecuali Spesimen A) lalu dimixing/blending menggunakan tabung khusus sederhana selama masing-masing 1 jam untuk mendapatkan campuran yang homogen, komposisi serbuk yang bervariasi harus terdistribusi merata sehingga perlu dilakukan pencampuran guna meratakan distribusi material pada pembuatan paduan. Bahan bahan yang berbeda jenisnya atau berbeda titik leburnya harus tercampur merata agar dihasilkan benda dengan sifat yang homogen.

Tabel 4. 1. Perbandingan Fraksi Berat Komposit

Campuran	Rasio perbandingan komposisi						
	A	B	C	D	E	F	G
Marmer (%)	0	5	10	15	20	30	40
Aluminium (%)	100	95	90	85	80	70	60

Campuran dalam berbagai komposisi fraksi berat yang dianggap sudah homogen kemudian dikompaksi menjadi *green body* menggunakan cetakan dari bahan *stainless steel* pada berbagai variasi tekanan kompaksi dilakukan masing-masing 100 MPa, 200 MPa, 250 MPa, 300MPa, 350 MPa dan 400 MPa. Namun kenyataannya hanya pada tekanan kompaksi 300 MPa spesimen dapat terbentuk dengan baik, dimana pada tekanan lebih yang lebih kecil spesimen tidak dapat terbentuk dengan baik dan presisi, sedangkan pada tekanan kompaksi melebihi 300 MPa, spesimen berbentuk lapisan-lapisan yang tidak beraturan (*irregular layer*), sehingga diputuskan semua campuran dikompaksi dengan tekanan 300 MPa.

Selanjutnya setiap *green body* dari masing-masing fraksi berat kemudian dilakukan pre-sinter pada temperatur 200°C untuk menyesuaikan dan mendapatkan kesetimbangan struktur antara unsur campuran. *Green body* yang terbentuk sangat peka terhadap getaran dan sangat mudah patah/pecah saat dipindahkan, hal ini akan menyulitkan penyusunannya ke dalam *furnace chamber*, untuk mengatasi hal tersebut maka *green body* yang terbentuk kemudian ditata di atas batu tahan api setelah proses kompaksi selesai untuk seterusnya dimasukkan ke dalam *furnace* untuk memulai proses sinter. Dalam penelitian ini dilakukan proses sinter

tanpa tekanan pada variasi temperatur 500°C, 600°C, 650°C dan 700°C dengan laju pemanasan 5°C/menit dan dipertahankan selama 180 menit kemudian didinginkan secara alami dalam tungku. Dari proses sinter tersebut didapatkan hasil pembentukan berdasarkan komposisi masing-masing fraksi berat yang sangat beragam sesuai besarnya temperatur sinter, spesimen komposit yang dihasilkan dapat dilihat pada table 2 di bawah. Dari hasil tersebut selanjutnya diputuskan untuk melakukan kembali proses sinter berdasarkan temperatur dengan hasil terbaik untuk kemudian dapat divariasikan lama durasi waktu pemanasan (*holding time*) yakni 120 menit, 180 menit dan 240 menit guna mengamati dan menguji hasil-hasilnya sesuai standar uji sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian ini, yakni morfologi permukaan, kekerasan, densitas dan porositas dari spesimen yang dihasilkan. (tahapan pembuatan spesimen komposit sebagian ditunjukkan pada gambar 1, 2 dan 3 lampiran 6)

Tabel 4. 2. Perbandingan Hasil Proses Pembentukan dengan Metalurgi Serbuk Berdasarkan Fraksi Berat dan Variasi Temperatur Sinter yang Dilakukan dengan Durasi Sinter 180 Menit

No	Fraksi berat marmar	Produk Komposit Temperatur Sinter				Keterangan
		500°C	600°C	650°C	700°C	
1	0%	Buruk	Baik/rapuh	Baik	Baik/hangus	presisi
2	10%	Buruk	Baik/rapuh	Baik	Baik/hangus	Presisi
3	15%	Buruk	Baik/rapuh	Baik	Baik/hangus	Presisi
4	20%	Buruk	Baik/rapuh	Baik	Baik/hangus	Presisi
5	25%	Buruk	Baik/rapuh	Baik/rapuh	Buruk	Baik/tidak presisi
6	30%	Buruk	Buruk	Buruk	Buruk	Gagal/rapuh
7	40%	Buruk	Buruk	Buruk	Buruk	Gagal/rapuh

4.5. Metode Pengujian.

4.5.1. Metode Pengambilan Data

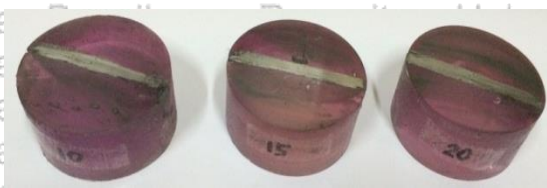
Komposit yang dihasilkan dari proses metalurgi serbuk kemudian diuji berdasarkan prosedur pengambilan data sebagai berikut :

1. Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Material Teknik UMI Makassar menggunakan mesin Uji merk *AFFRI MX 206* dan didapatkan data kekerasan permukaan dalam skala Brinnell (BHN), pada setiap permukaan spesimen dilakukan uji kekerasan pada 10 titik yang dipilih secara acak untuk kemudian dirata-ratakan, gambar specimen dari variasi 3 komposisi fraksi berat dapat dilihat pada gambar 4.6.
2. Setelah melalui uji kekerasan permukaan, pengujian kekerasan penampang dilanjutkan di Laboratorium Pengujian Bahan Universitas Brawijaya Malang dengan mesin Uji

Digital Microhardness Tester merk *TIME* terlebih dahulu dengan memotong/membelah spesimen menjadi dua bagian, separuh bagian dibentuk menyerupai silinder menggunakan resin dengan diameter 60 mm dan membentuk specimen seperti pada gambar 4.4, dibawah agar memudahkan pengujian kekerasan pada penampang spesimen.

3. Setengah bagian kedua dari spesimen dipersiapkan untuk pengujian densitas, porositas serta daya serap air berdasarkan prosedur pengujian standar ASTM C20-00.
4. Menyiapkan sampel spesimen dari berbagai komposisi fraksi berat untuk dilakukan uji SEM, EDS dan RDX, termasuk pada bahan dasar yakni pada serbuk marmer dan serbuk Aluminium yang dimaksudkan untuk mengamati morfologi, karakteristik komposit serta perubahan komposisi kandungan kimia dari keadaan awal bahan dasar hingga terbentuk menjadi komposit Aluminium-marmer.
5. Campuran *green body* dengan fraksi volume yang terbaik sesuai point 1 diatas yang telah dikompaksi kemudian disinter dengan masing-masing pada suhu 550°C, 600°C, dan 650°C di dalam Furnace Ney VULCAN D-550 yang ditahan selama 3 jam, guna memastikan hasil pengujian dan pengamatan pada point 1 tersebut diatas.
6. Dibuat lagi campuran dengan komposisi fraksi berat sebagaimana hasil yang didapatkan pada point 5 diatas untuk dicetak/dikompaksi menjadi beberapa buah spesimen komposit untuk disinter pada suhu terbaik dengan variasi waktu penahanan (*sintering holding time*) masing-masing selama 120, 180 dan 240 menit.
7. Spesimen komposit hasil sintering pada point 6 tahap diatas kemudian kembali dilakukan uji kekerasan untuk mengetahui komposit dengan lama waktu penahanan berapa yang memiliki tingkat kekerasan terbaik, densitas terbaik dan porositas terendah.
8. Dari keseluruhan komposit yang dihasilkan dapat ditentukan masing-masing Karakteristik komposit, meliputi morfologi permukaan spesimen, tingkat kekerasan, baik permukaan maupun kekerasan penampang, densitas, porositas serta daya serap air yang dapat menjadi pertimbangan bagi material kebutuhan teknis lainnya.
9. Mengolah data dan membahas hasil penelitian yang dilakukan. Menganalisis keterkaitan antara variable penelitian untuk memastikan kontribusinya terhadap perbaikan sifat-sifat mekanis/fisis komposit (analisis data eksperimental).
10. Membuat pembahasan atas fenomena yang ditemui sepanjang pengujian kemudian menarik kesimpulan dari hasil pengolahan data yang dilakukan.
11. Publikasi hasil penelitian.





Gambar 4. 4. Spesimen yang Dibentuk Silinder untuk Pengujian Penampang

4.5.2 Tahap Pengujian Spesimen

Pada tahap ketiga dilakukan pengujian spesimen yang meliputi pengujian kekerasan, kerapatan, porositas dan komposisi unsur kimia, fase, struktur mikro dan pengamatan morfologi. Uraian dari setiap pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Pengujian kekerasan

Sebagaimana telah diuraikan bahwa uji kekerasan dilakukan terhadap specimen komposit pada kedua sisi permukaan arah tekanan kompaksi yakni pada bidang lingkaran dengan mengambil data pada masing-masing 5 titik yang tersebar secara acak pada bidang permukaan secara bolak balik untuk selanjutnya dirata-ratakan, gambar spesimen komposit ditunjukkan pada gambar 4.6. Permukaan benda uji yang telah dipoles diindentasi secara perlahan untuk menghindari adanya beban kejut kemudian dipertahankan sekitar 10 – 15 detik. Bekas injakan indenter diukur dengan menggunakan mikroskop pada skala pembesaran tertentu dan diamati bilamana terdapat potensi perambatan retak yang terjadi apakah *median crack* atau *Palmqvist crack*.

Selanjutnya untuk pengujian kekerasan pada penampang spesimen, dilakukan dengan memotong/membelah spesimen menjadi dua bagian, separuh bagian dibentuk menyerupai silinder menggunakan resin dengan diameter 60 mm (gambar 4.4), posisi penampang setengah spesimen berada pada sisi penampang silinder yang kemudian digosok dan dihaluskan lalu ditempatkan pada perangkat uji kekerasan dalam pembacaan skala Vickers. Gambar pengujian laboratorium dapat dilihat pada lampiran 7 (gambar 4, 5 dan 6)



Gambar 4. 5. Spesimen Komposit dalam Berbagai Fraksi Berat

b. Pengujian densitas, porositas dan serapan air

Pengujian densitas, porositas dan serapan air mengacu pada standar ASTM C 20 (*Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*). Spesimen ditimbang dalam keadaan kering (*dry weight*) kemudian dimasukkan ke dalam air dan dididihkan selama 2 jam, selama proses pendidihan harus dijaga agar spesimen tetap terendam di dalam air. Setelah mendidih kemudian didinginkan sedikitnya selama 12 jam pada temperatur ruangan dan dijaga agar tetap terendam di dalam air. Selanjutnya ditimbang berat spesimen ketika masih terendam dalam air. Setelah menghitung berat spesimen ketika masih tergantung dalam air (*suspended weight*), setiap spesimen kemudian diusap/dilap secara perlahan-lahan dengan linen lembut yang dilembabkan atau kain kapas untuk menghilangkan semua tetesan air dari permukaan spesimen untuk selanjutnya spesimen ditimbang di udara untuk menentukan *saturated weight* (W). Untuk menjaga akurasi hasil penelitian maka dilakukan pengelapan spesimen dengan menggulung spesimen secara halus pada kain basah, yang sebelumnya sudah dipenuhi dengan air (jenuh) dan kemudian agak ditekan hanya cukup untuk menghilangkan air yang akan menetes dari kain. Pembersihan secara berlebihan akan menyebabkan kesalahan dengan menarik air dari pori-pori spesimen. Hasil yang diperoleh kemudian diterapkan ke persamaan (2.8, 2.9, 2.10, 2.11) sehingga diperoleh *exterior volume specimen* (V), *volume of open pores*, *volume of impervious portion*, *apparent porosity* (P), *water absorption* (A), *apparent specific gravity* (Sg) dan *bulk density* (B).

c. Pengujian SEM, EDS dan XRD

Untuk mengetahui morfologi dan komposisi kimia dari Aluminium-marmer maka dilakukan uji SEM-EDS. Preparasi sampel mengacu pada prosedur dan *specimen holder* yang dimiliki alat uji. Pada uji SEM-EDS spesimen dipotong tipis dengan ketebalan ± 2 mm dan ditempelkan pada *specimen holder* lalu dibersihkan dengan *hand blower*. Spesimen kemudian dilapisi dengan *gold-paladium* menggunakan *ion sputtering* JFC-1100. Selanjutnya spesimen diletakkan pada *mandrel* dan dimasukkan ke dalam *electron vacuum chamber* dan dilakukan pengamatan *image* pada layer SEM. Setelah diperoleh *image* yang sesuai maka dilakukan pemotretan. Fase kristalin yang terbentuk dalam spesimen diamati dengan XRD menggunakan radiasi Copper K-Alpha1 dengan $\lambda = 1,54060$ A. Setiap unsur atau senyawa memiliki pola difraksi yang unik (*a unique diffraction pattern*) yang dikenal seperti sidik jari (*fingerprint*). Sampel uji XRD

dipersiapkan dalam bentuk serbuk dan pengujian dilakukan pada sudut 2θ dari $3^\circ - 70^\circ\text{C}$ dengan kondisi operasi 30 mA, 40 kV. Data yang diperoleh berupa jarak antar bidang, intensitas dan sudut 2θ yang kemudian dicocokkan dengan data pola difraksi sinar X dari kartu JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*), atau hasil penelitian lain yang telah dilakukan, sehingga fase kristalin yang terdapat dalam sampel dapat diidentifikasi.

4.6. Metode Penelitian

Penelitian tentang pemanfaatan bahan limbah pengolahan marmer untuk dijadikan sebagai penguat bahan Aluminium ini ditujukan untuk dapat membuat jenis komposit baru yang dapat memperbaiki sifat-sifat dasar aluminium yang dikenal *ductile*, oleh karenanya dengan penambahan bahan marmer melalui proses metalurgi serbuk secara eksperimental diharapkan dapat diperoleh material komposit yang memiliki sifat mekanik terutama kekerasan bahan yang lebih baik dari bahan utamanya. Penelitian mengenai hubungan antara komposisi/fraksi berat bahan komposit dengan morfologi permukaan, kekerasan, densitas dan porositasnya spesimen dilakukan dengan melakukan rekayasa variasi persentase fraksi berat kandungan serbuk marmer dan serbuk aluminium dimana temperatur sinter dan lama waktu penahanan saat proses sinter (*holding time*).

Secara teoritis data dan ketentuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Untuk menyeragamkan ukuran partikel serbuk marmer maka digunakan ayakan hingga mesh 200. atau sekitar $37\ \mu\text{m}$ sampai $74\ \mu\text{m}$
- Untuk mendapatkan varian komposisi kandungan marmer, maka fraksi volume di awal penelitian 5%, 10%, 15%, 20%, 30%
- Tekanan yang terjadi pada saat kompaksi dalam proses pembentukan:

$$P = F/A$$

dengan : P = Tekanan persatuan luas pada campuran

F = Gaya tekan dies

A = Luas permukaan komposit

$$A = \pi r^2 = \pi(27,75)^2 = 2418\ \text{mm}^2$$

- Proses sintering dengan menggunakan tungku elektrik pada tahap awal dilakukan selama 3 jam dengan temperatur sekitar melting point bahan dasar. Aluminium dengan kemurnian $\approx 100\%$, melting point $T = 660^\circ\text{C}$

Sedangkan melting point Aluminium alloy, $T = 463 \div 671 \text{ } ^\circ\text{C}$

- Uji kekerasan dengan Brinell Hardness test pada masing-masing 5 titik secara acak pada permukaan spesimen
- Uji kekerasan dengan skala Vickers pada masing-masing 10 titik secara acak pada penampang spesimen.
- Uji metalografi untuk mengetahui morfologi dan komposisi kimia dari spesimen dilakukan uji SEM-EDS dan XRD.
- Uji Densitas, porositas serta daya serap air dengan metode standar ASTM C20-00.

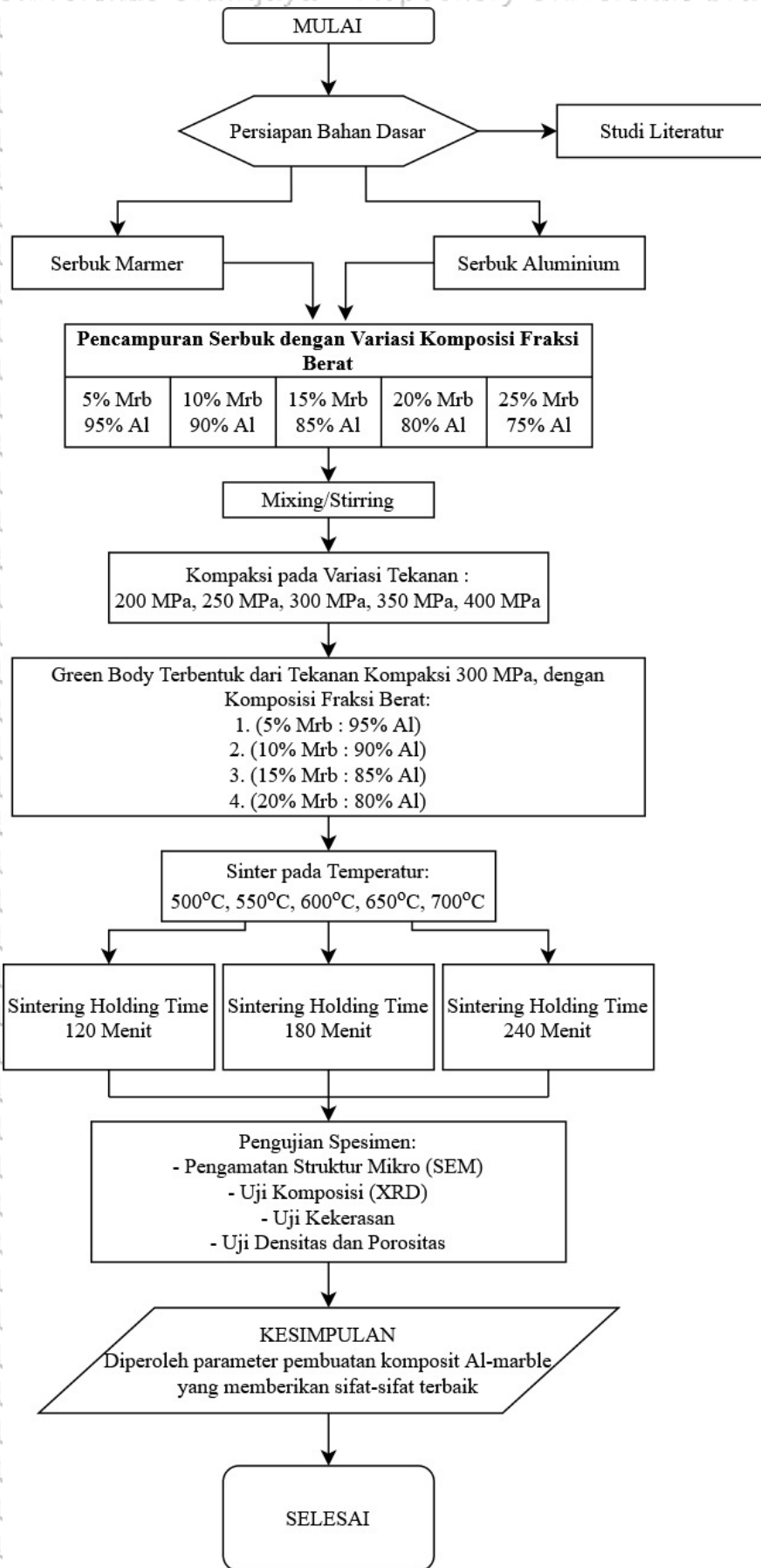
4.6.1. Variabel Penelitian

Guna mendapatkan gambaran lengkap berkaitan Karakteristik dari bahan komposit serbuk Aluminium–Marmer dalam proporsi perbandingan komposisi yang ditetapkan, maka terlebih dahulu harus dinyatakan variable-variabel yang dilibatkan :

- a. Variabel bebas : yakni variable yang ditetapkan berdasarkan ketentuan umum yang merujuk kepada metoda dan hasil penelian terdahulu, dalam hal ini adalah :
 - Komposisi fraksi berat campuran serbuk marmer dan serbuk paduan Aluminium
 - Temperatur sinter.
 - Lama waktu pemanasan sinter (*Holding time*)
- b. Variabel terikat : yakni variable yang diperoleh berdasarkan ketentuan atau persyaratan dalam pembentukan dengan proses metalurgi serbuk, dalam hal ini ini tingkat kekerasan, morfologi, densitas serta porositas dari komposit.
- c. Variabel terkontrol : yakni variable yang ditetapkan disesuaikan dengan standar Yang berlaku dan dapat diatur bilamana dibutuhkan untuk mendapatkan hasil yang maksimal, dalam hal ini adalah tekanan kompaksi, volume atau dimensi spesimen, dan treatment proses pendinginan misalnya thermal shock waktu pemanasan pada saat proses *sintering* metalurgi serbuk.

4.6.2. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian secara keseluruhan mulai dari persiapan, pembuatan, pengujian dan karakterisasi spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.6 di bawah :



Gambar 4.6. Diagram Alir Penelitian

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Karakterisasi Komposit dan Bahan Dasar.

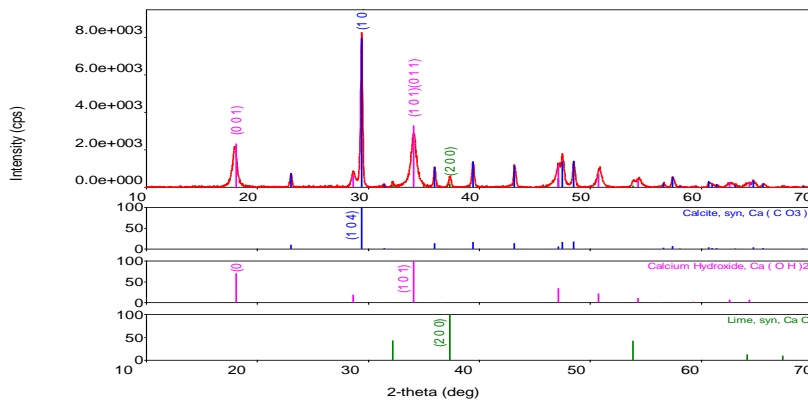
Karakteristik limbah hasil pemotongan dan pengikisan marmer (*marble*) sangat dipengaruhi oleh daerah asal batuan tersebut sebagaimana diketahui marmer merupakan hasil metamorfosa dari batu gamping yang akibat pengaruh suhu dan tekanan yang dihasilkan oleh gaya endogen menyebabkan terjadinya rekristalisasi membentuk berbagai foliasi atau non foliasi, oleh karena sebelum dilakukan pencampuran dalam proses metalurgi serbuk yang didalamnya terdapat proses pemanasan maka perlu diketahui unsur-unsur kimia pembentuknya sehingga dapat dibandingkan dengan komposisi unsur-unsur kimia setelah mengalami pencampuran dan pemanasan dalam proses sinter, hal inilah menjadikan salah satu alasan mengapa diperlukan perlakuan panas saat proses sinter dalam durasi waktu yang divariasikan 120 menit, 180 menit dan 240 menit. Proses karakterisasi yang dilakukan meliputi uji SEM, EDS dan XRD baik terhadap serbuk marmer maupun terhadap serbuk aluminium untuk memastikan kemurnian aluminium. Foto SEM dilakukan untuk mengamati morfologi komposit yang dihasilkan sedangkan EDS dilakukan untuk mengetahui analisis kuantitatif dari unsur-unsur yang terkandung di dalamnya. Fase kristalin yang terkandung di dalam komposit juga dianalisis dengan menggunakan XRD.

Untuk bahan dasar marmer, hasil uji komposisi ditunjukkan pada table 5.1. di bawah :
(hasil-hasil analisis lengkap atas uji komposisi dapat dilihat pada lampiran 1)

Tabel 5. 1. Hasil Uji Komposisi Unsur Kimia Marmer

No	Nama Unsur	Persentase kandungan
1	<i>Calcite</i> , CaCO_3	49,6%
2	<i>Calcium Hydroxide</i> , CaOH_2	47,7%
3	<i>Lime</i> , CaO	2,61%

Berdasarkan hasil pengujian dengan XRD seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.1. diperoleh data hasil pengamatan dimana *Calcite* (CaCO_3) nampak dominan bersama dengan *Calcium Hydroxide* (CaOH_2) dengan kandungan masing-masing sebesar 49,6% dan 47,7%, sedangkan sisanya adalah Lime (CaO). Unsur *Calcite* (CaCO_3) dengan peak difraksi pada sudut $2\theta = 29,398^\circ$, sementara *Calcium Hydroxide* (CaOH_2) dengan peak difraksi pada sudut $2\theta = 34,063^\circ$ dan $18,016^\circ$, dan CaO peak difraksi pada $2\theta = 37,32^\circ$.



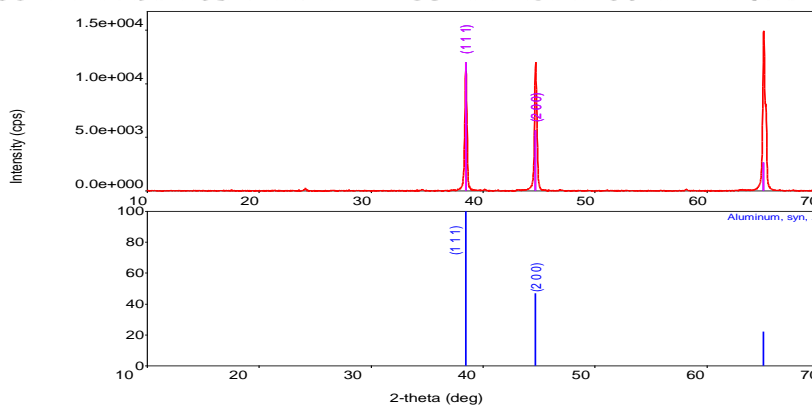
Gambar 5. 1. Pola XRD untuk Bahan Dasar Serbuk Marmer

Untuk bahan dasar Aluminium sebagaimana disebutkan bahwa dalam penelitian ini menggunakan serbuk Aluminium murni produk Merck, Germany. Dari hasil uji komposisi ditunjukkan pada table 5.2., sedangkan hasil-hasil lengkap atas uji komposisi Aluminium yang digunakan dapat dilihat pada lampiran 2.

Tabel 5. 2. Kandungan Serbuk Aluminium Hasil Uji Komposisi

No	Nama Unsur	Persentase kandungan
1	Aluminium, Al	100%

Sedangkan berdasarkan hasil pengujian dengan XRD diperoleh gambar grafik seperti gambar 5.2 dibawah :



Gambar 5. 2. Pola XRD untuk Bahan Dasar Serbuk Aluminium

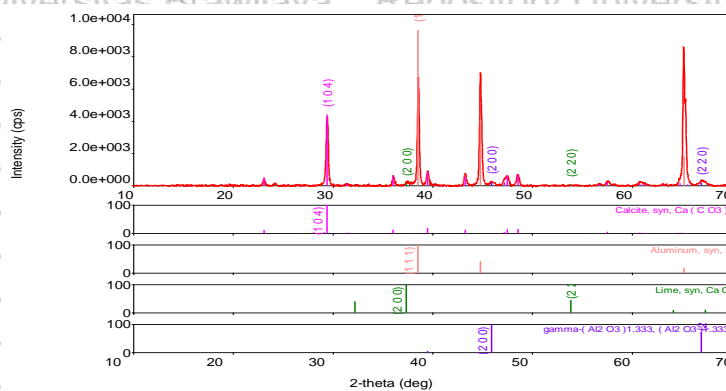
Dari hasil pengujian XRD yang ditunjukkan pada gambar 5.2. diatas diperoleh data hasil pengamatan dimana Aluminium dengan kandungan 100% dengan peak difraksi pada $2\theta = 65,95^\circ, 44,69^\circ$ dan $38,46^\circ$.

Sebagaimana diuraikan sebelumnya bahwa berdasarkan pengamatan dan uji kekerasan maka ditetapkan spesimen komposit dengan fraksi berat marmer 20% dalam penelitian ini adalah yang paling baik dan paling layak untuk dilakukan penelitian lebih lanjut terkait karakteristik, sifat fisis dan sifat mekanis berdasarkan perlakuan panas yang diterimanya, oleh karenanya dari hasil uji komposisi ditemukan persentase kandungan unsur-unsur kimia yang ditunjukkan pada table 5.3, di bawah :

Tabel 5. 3. Komposisi Kandungan Kimia Komposit

No	Nama Unsur	Persentase kandungan
1	Calcite, $CaCO_3$	11,60%
2	Aluminium, Al	84,9 %
3	Lime, CaO	0,81 %
4	Alumina, Al_2O_3	2,7 %

Sedangkan pola difraksi dari hasil uji XRD pada spesimen komposit Aluminium-marmer terlihat fase bentukannya seperti yang ditunjukkan oleh gambar 5.3 berupa grafik peak to peak, dengan identifikasi fasa berupa Aluminium, calcite, alumina dan Lime yang merupakan hasil reaksi dalam interaksi antar bahan dasar selama proses metalurgi serbuk dimana terjadi perubahan pola kandungan unsur kimia yang signifikan dari bahan dasar, hal mana diakibatkan oleh perlakuan yang diterima oleh *green body* baik oleh tekanan kompaksi maupun akibat pelakuan panas, (Ghazi, 2011), (Masuda, 2007), dimana pada bahan dasar marmer, Calcite ($CaCO_3$) sebesar 49,6% berubah dan tereduksi menjadi sebesar 11,6%, dengan peak difraksi Calcite pada sudut $2\theta = 29,425^\circ$. Demikian halnya dengan terbentuknya fase baru Alumina (Al_2O_3) sebesar 2,7% dengan peak difraksi pada sudut $2\theta = 67,00^\circ$ dan $45,90^\circ$, sebagai konsekuensinya persentase kandungan Aluminium juga tereduksi menjadi 84,9% dengan peak difraksi pada sudut $2\theta = 38,54^\circ$, $44,79^\circ$ dan $65,17^\circ$ sedangkan $CaO = 0,81\%$ dengan peak difraksi pada $2\theta = 37,36^\circ$ dan $56,71^\circ$.



Gambar 5. 3. Pola XRD untuk Komposit Aluminium - Marmer

Hasil-hasil analisis kualitatif maupun kuantitatif lengkap pada sampel spesimen Komposit Aluminium-marmer dengan lama waktu penahanan 4 jam dapat dilihat pada lampiran 3.

Sedangkan pola grafik bentukan komposisi lengkap atas uji komposisi terhadap komposit beserta masing-masing bahan dasarnya dapat dilihat pada lampiran 4a, 4b. dan 4c.

5.2. Pengujian Kekerasan

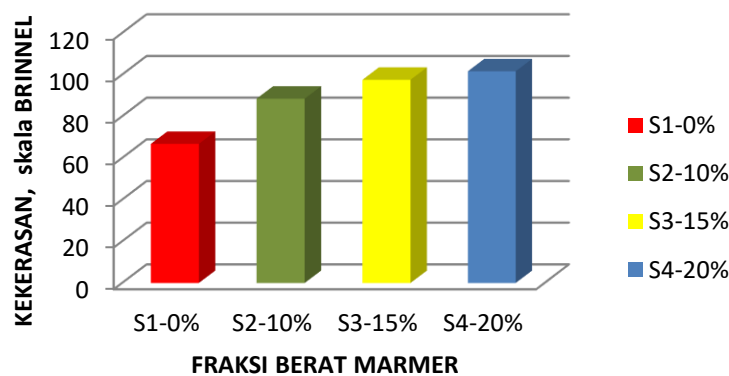
Nilai kekerasan suatu bahan menunjukkan ketahanan terhadap pembentukan jejak permanen akibat tumbukan dari hasil penetrasi indenter di permukaannya. Pengujian kekerasan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dalam arah tegak lurus permukaan bidang bulat atau dengan kata lain sejajar dengan arah tekanan kompaksi saat proses pembentukan, selain itu juga dilakukan pengujian kekerasan dalam arah penampang spesimen agar dapat diketahui apakah spesimen komposit mempunyai tingkat kekerasan yang sama dalam segala arah guna dapat dijadikan sebagai rekomendasi pada kepentingan penggunaan secara teknis maupun dalam pengembangannya.

Sebagaimana diuraikan pada bab metodologi sebelumnya bahwa dari berbagai komposisi fraksi berat yang telah dilakukan untuk membentuk spesimen komposit sebagaimana ditunjukkan pada table 2 di depan nampak bahwa komposisi fraksi berat 10%, 15% dan 20% marmer yang dapat terbentuk dengan baik melalui proses sinter dengan temperatur 650°C selama 180 menit yang dapat dilihat pada gambar spesimen 4.5 di depan. Nilai kekerasan rata-rata yang diperoleh dari pengujian kekerasan permukaan ditunjukkan pada Gambar 5.4., sedangkan nilai kekerasan dalam arah penampang ditunjukkan pada gambar 5.5 di bawah.

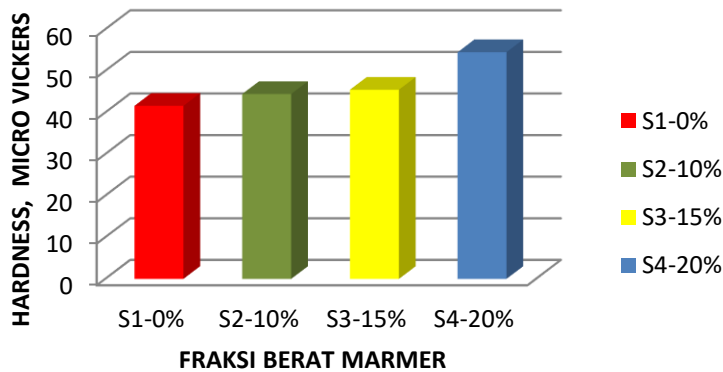
Dari gambar 5.4. dibawah dimana didapatkan nilai rata-rata kekerasan permukaan terbesar yakni sebesar 98,67 BHN pada komposit dengan fraksi berat 20% marmer, hal mana menunjukkan kecenderungan meningkatnya kekerasan pada sisi permukaan seiring bertambahnya fraksi berat serbuk marmer yang digunakan sebagai penguat komposit, hal ini akibat interaksi Calcium Carbonate (CaCO_3) dengan Aluminium yang menghasilkan Alumina (Al_2O_3), sedangkan Calcite sendiri diketahui merupakan mineral karbonat dan polimorf kalsium karbonat yang paling stabil (CaCO_3) dengan skala kekerasan mineral Mohs didefinisikan nilai 3 (Kemperl, 2009). Dalam kasus ini meskipun dari proses metalurgi serbuk pada pembuatan spesimen komposit ini terdapat kenyataan bahwa diatas 20% fraksi berat marmer mengakibatkan spesimen tidak terbentuk dengan baik bahkan sangat rapuh (gambar 5.6) hal ini kemungkinan terjadi karena ikatan antar partikel serbuk tidak dapat

terjalin secara memadai selama proses sinter mengingat meskipun titik leleh kedua bahan campuran sangat berbeda namun melampaui perbandingan campuran dimana partikel Aluminium tidak dapat mengikat partikel serbuk marmer secara utuh menyeluruh (Kumar, 2010) dan (Delavari, 2011).

Pada pengujian kekerasan penampang didapatkan nilai rata-rata kekerasan terbesar yakni sebesar 46,83 VHN juga pada spesimen komposit dengan fraksi berat 20% marmer seperti terlihat dari gambar grafik no.4.5 di bawah, hal ini menunjukkan kekerasan penampang juga berkorelasi dengan bertambahnya kandungan marmer pada batas tertentu, nilai kekerasan selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 3.



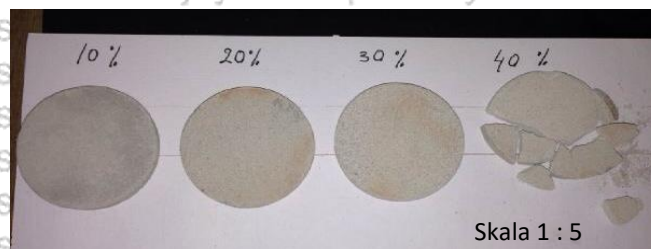
Gambar 5. 4. Grafik Tingkat Kekerasan Permukaan masing-masing Spesimen



Gambar 5. 5. Grafik Tingkat Kekerasan Penampang masing-masing Spesimen

Terkait dengan pengaruh temperatur sinter secara umum terlihat bahwa nilai kekerasan akan meningkat jika temperatur sinter dan persentase kandungan serbuk marmer dalam spesimen ditingkatkan dalam batas tertentu mengingat dalam proses pembentukan spesimen melalui metode metalurgi serbuk diperoleh hasil bahwa komposisi 30% dan 40% *green body* tetap dapat dibuat namun setelah melalui proses sinter spesimen sangat rapuh bahkan pada komposisi 40% fraksi berat marmer, spesimen komposit langsung pecah saat

dikeluarkan dari furnace (gambar 5.7). Pada temperatur sinter diatas 650°C spesimen mengalami kecenderungan berubah warna menjadi lebih gelap bahkan pada temperature 700°C spesimen komposit menjadi hangus membentuk karbon berwarna gelap seperti ditunjukkan pada gambar 5.8, dan permukaan nampak jelas berpori kasar seperti ditunjukkan pada lampiran 8 (gambar 8), hal ini disebabkan karena temperatur sinter sudah melampaui titik leleh aluminium sekitar 660°C , (Włodarczyk, 2008). Proses sinter pada temperatur sekitar 605°C selama 2 jam dengan pendinginan alami hingga suhu kamar terhadap metal matriks komposit berbahan matriks Aluminium dengan bahan penguat serbuk gelas telah dilakukan dengan hasil yang baik namun terdapat kecenderungan terjadinya pembentukan karbon berlebihan diatas temperatur titik leleh aluminium, (Kumar, 2010). Oleh karenanya penggunaan temperature sinter sebesar 650°C menjadi pilihan yang tepat untuk proses sinter specimen komposit berpenguat serbuk marmer ini yang juga dilanjutkan dengan pendinginan alami sampai mencapai suhu kamar di dalam furnace.



Gambar 5. 6. Spesimen dari Berbagai Komposisi Fraksi Berat setelah Disinter

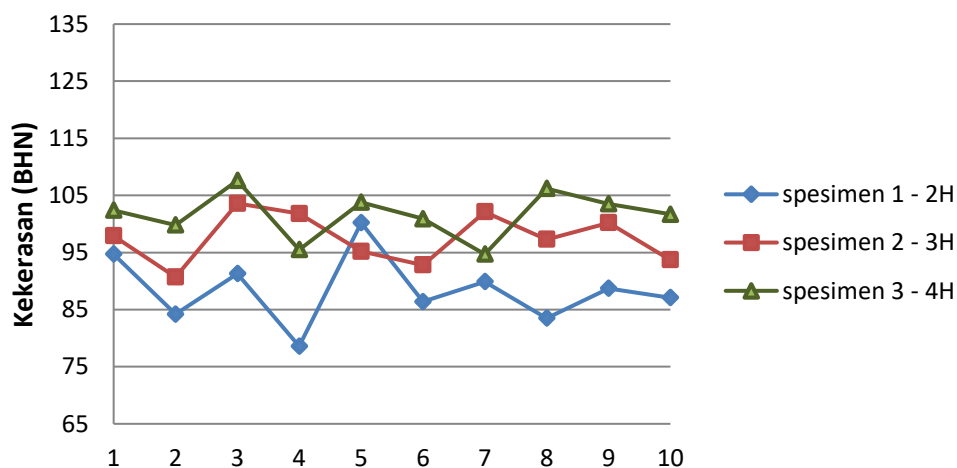


Gambar 5. 7. Spesimen Komposit yang Telah Disinter pada Temperatur 700°C

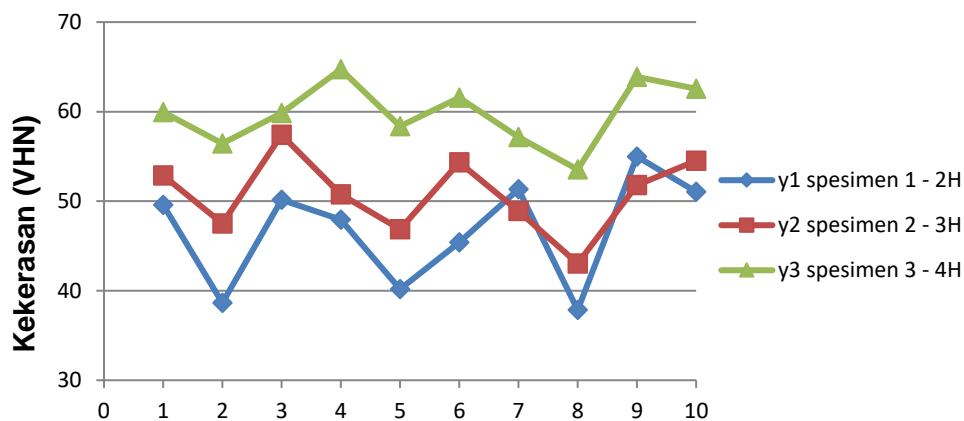
Selanjutnya dari hasil uji kekerasan tersebut diketahui bahwa spesimen komposit dengan fraksi berat marmer 20% adalah komposit yang memiliki tingkat kekerasan terbesar, dimana dalam proses sinter pembentukannya dengan temperature 650°C telah mengalami waktu penahanan pemanasan (*holding time*) selama 180 menit. Sebagaimana diketahui bahwa lama waktu penahanan selama proses sinter juga berpengaruh terhadap sifat mekanis material komposit, (Masuda, 2007) maka kemudian dibuat *green body* dengan komposisi fraksi berat marmer sebesar 20% untuk disinter dengan temperatur yang sama yakni 650°C namun dengan perbedaan durasi waktu penahanan (*holding time*) masing-masing 120, 180

dan 240 menit guna mengetahui pengaruh waktu pemanasan terhadap kekerasan material komposit. Dari hasil uji kekerasan pada permukaan didapatkan hasil sebagaimana dapat dilihat pada gambar 5.8., sedangkan hasil pengujian kekerasan terhadap penampang spesimen yang telah mengalami pemanasan dengan lama waktu pemanasan bervariasi tersebut dapat dilihat pada gambar 5.9. Data pada sumbu absis yang ditampilkan pada grafik adalah urutan titik penekanan pada uji kekerasan yang ditentukan secara acak agar didapatkan besaran rata-rata kekerasan pada bidang spesimen yang diuji, sedangkan data lengkap hasil uji kekerasan baik pada permukaan maupun pada penampang dapat dilihat pada lampiran 4.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil uji komposisi yakni pada table 5 diatas dimana terdapat unsur baru berupa *Alumina* (Al_2O_3) sebesar 2,7% yang merupakan hasil reaksi dan penguraian *Calcite* ($CaCO_3$), *Calcium Hydroxide* ($CaOH_2$) dengan Aluminium (Al) yang nampak pula pada pola XRD yang ditunjukkan pada gambar grafik 5.3. Sebagaimana diketahui bahwa Alumina merupakan salah satu jenis keramik yang memiliki sifat fisik yang stabil, tahan panas dan tahan korosi. Keunggulan sifat-sifat alumina lainnya adalah keras, memiliki ketahanan kimia serta ketahanan listrik yang baik. Dengan keunggulan sifat-sifat tersebut alumina banyak digunakan pada komponen permesinan seperti alat potong, pompa, turbin gas, katup-katup dan digunakan dalam berbagai bidang, diantaranya pada industri metalurgi sebagai bahan refraktori, batu tahan api, isolasi penguat, sebagai komponen elektronika seperti isolator rangkaian sirkuit (Barsoum, 1997).



Gambar 5. 8. Grafik Tingkat Kekerasan Permukaan masing-masing Spesimen dalam Berbagai Variasi Lama Waktu Pemanasan



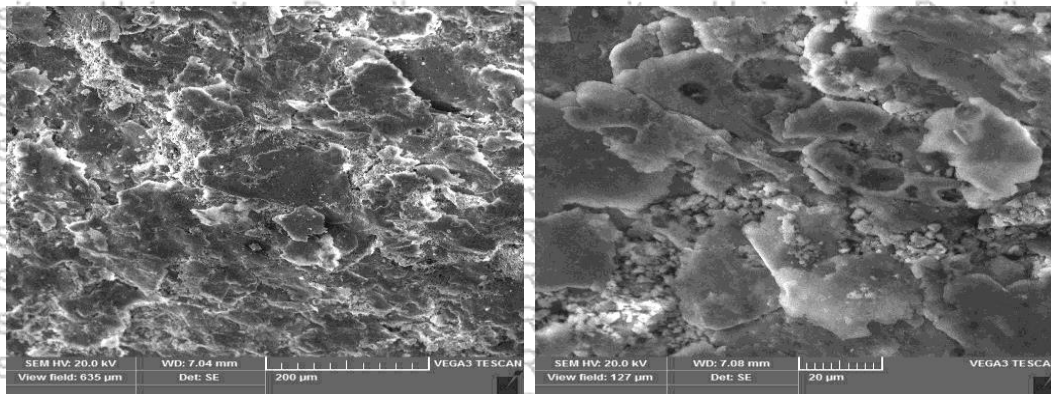
Gambar 5. 9. Grafik Tingkat Kekerasan Penampang masing-masing Spesimen dalam Berbagai Variasi Lama Waktu Pemanasan

Dari kedua grafik yang ditampilkan diatas (gambar 5.8 dan 5.9) masing-masing secara individual menunjukkan perbedaan kekerasan pada setiap titik penekanan hal mana disebabkan oleh homogenitas ikatan setiap unsur dalam komposit tidak sepenuhnya merata pada seluruh bidang yang dikenakan tekanan oleh indenter pada saat uji kekerasan, disebabkan karena sulitnya untuk mencapai homogenitas distribusi partikel yang sempurna dalam proses pembentukan komposit baik melalui metalurgi serbuk maupun dengan metode pengecoran yang diaduk (*stir casting*) dengan matriks aluminium (Das, 2014). Dengan mengamati hasil foto SEM pada gambar 5.10., 5.11., dan 5.12. terlihat jelas struktur serat permukaan komposit, dimana terdapat kemungkinan indenter tepat mengenai unsur aluminium yang dikenal lebih lunak sehingga tingkat kekerasan lebih rendah dibanding saat indenter persis menekan bidang unsur Calcite atau Alumina.

Dari rata-rata hasil pengujian secara umum yang ditampilkan pada gambar 5.8. dan 5.9 nampak bahwa lama waktu sinter tetap mempunyai kontribusi bagi peningkatan kekerasan baik pada sisi permukaan (arah penekanan kompaksi) maupun terhadap kekerasan penampang, hal mana dari grafik tersebut menunjukkan adanya perbedaan tingkat kekerasan dari setiap spesimen yakni terlihat bahwa tingkat kekerasan dari komposit dengan lama proses sinter 240 menit adalah spesimen yang memiliki kekerasan paling tinggi yakni sebesar 101,61 BHN dibanding spesimen yang mengalami proses sinter lebih singkat. Sedangkan kekerasan yang diukur pada sisi penampang juga menunjukkan kecenderungan yang sama yakni tingkat kekerasan dari spesimen yang mengalami masa pemanasan lebih lama cenderung memiliki tingkat kekerasan yang lebih besar yakni 59,81 VHN (gambar 5.9).

5.3. Morphology dengan uji SEM

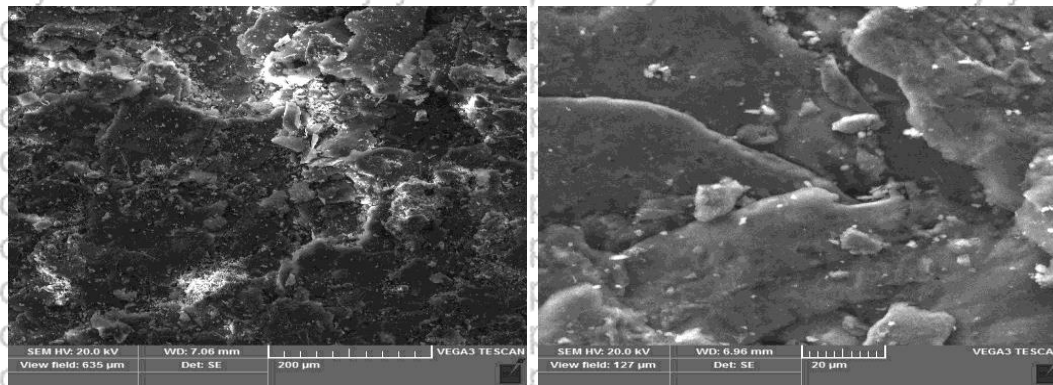
Gambar mikrostruktur dari permukaan dari spesimen komposit dengan fraksi berat marmer 20% yang telah melalui proses sintering pada 650°C masing-masing selama 120, 180 dan 240 menit diambil melalui uji SEM dengan pembesaran $200\mu\text{m}$ dan $20\mu\text{m}$ ditunjukkan pada gambar 5.10, 5.11 dan 5.12. Spesimen komposit yang dengan lama waktu pemanasan 240 menit nampak memiliki struktur dan kontur lapisan serat permukaan yang lebih rapat dan cenderung lebih teratur, hal mana dimungkinkan karena partikel pembentuk material memiliki kesempatan lebih lama untuk membentuk/menyusun struktur yang lebih padat dan setimbang, (Ruzaidi, 2011) dan (Maleque, 2012). Selengkapnya foto SEM untuk setiap komposit dengan komposisi fraksi marmer 10%, 15% dan 20% dapat dilihat pada lampiran 4. Secara umum karakteristik permukaan pada setiap komposit yang disinter pada temperatur 650°C dengan masing-masing waktu penahanan (*holding time*) 120 menit, 180 menit dan 240 menit terlihat dengan jelas terdapat perbedaan struktur lapisan dan morfologi permukaan akibat respon unsur-unsur pembentuk yang berbeda akibat perbedaan lama waktu pemanasan seperti diuraikan diatas.



a)

b)

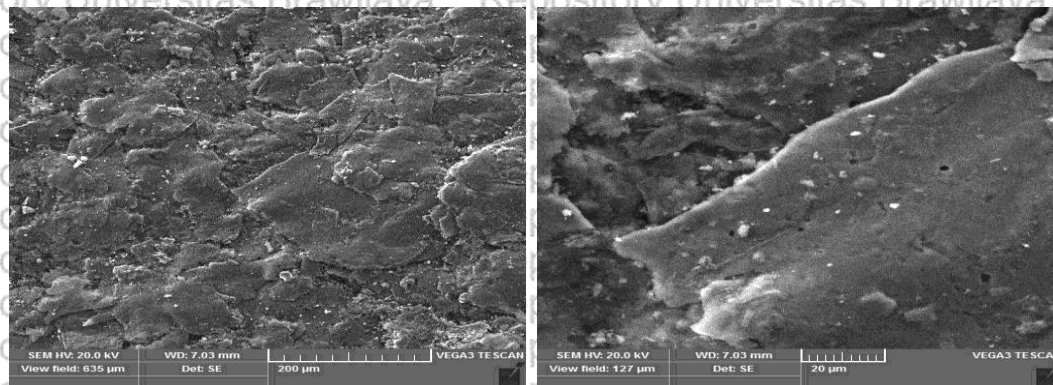
Gambar 5. 10. Foto Hasil SEM Permukaan Spesimen dengan Fraksi Berat 20% - 2H. a) $200\mu\text{m}$ dan b) $20\mu\text{m}$



a)

b)

Gambar 5. 11. Foto Hasil SEM Permukaan Specimen dengan Fraksi Berat 20% - 2H. a) 200 µm dan b) 20 µm



a)

b)

Gambar 5. 12. Foto Hasil SEM Permukaan Spesimen dengan Fraksi Berat 20% - 4H. a) 200 µm dan b) 20 µm

Dari pengamatan keseluruhan specimen dengan waktu pemanasan berbeda menunjukkan campuran bahan aluminium-marmer tersebar dengan baik namun sangat jelas terdapat beberapa jejak pori-pori terutama pada pemanasan 120 menit (2H), meskipun ukuran partikel yang relative sama pada semua setiap bahan campuran specimen tetapi gambar mikro yang dihasilkan dari foto SEM ditunjukkan relative lebih banyak pori yang ditemukan dalam specimen yang dipanaskan selama 120 dan 180 menit dibandingkan dengan specimen yang disinter lebih lama yakni 240 menit (gambar 5.12). Dipastikan bahwa keberadaan pori-pori tersebut disamping dikontrol oleh besarnya kandungan fraksi marmer, tentu saja dipengaruhi oleh temperatur sinter dan lama waktu pemanasannya (Schaffer, 2004). Pori-pori nampaknya berkurang dengan meningkatnya waktu pemanasan (*holding time*) pada saat proses sinter.

5.4. Pengujian Densitas, Porositas (ASTM C 20-00)

Sifat utama dari bahan teknik yang dihasilkan dari proses pembakaran atau pemanasan dalam suhu tinggi adalah densitas, porositas dan daya serap air, oleh karenanya sifat-sifat tersebut banyak digunakan sebagai salah satu persyaratan dalam mengevaluasi dan membandingkan kualitas produk sekaligus merupakan bagian dari standar dalam pemilihan dan penggunaan produk teknik utamanya bagi material yang banyak digunakan dalam berbagai bidang industri terutama yang dihasilkan melalui proses pemanasan tak terkecuali termasuk spesimen komposit Aluminium-marmer yang dibuat dalam penelitian ini.

Sebagaimana diuraikan pada bab terdahulu bahwa densitas, porositas, daya serap air serta specific gravity material komposit ini diukur/dihitung berdasarkan prosedur standar ASTM C 20-00.

Pada tahap awal pengujian ingin dihitung densitas, porositas dan daya serap air pada spesimen komposit dengan komposisi fraksi berat yang berbeda yakni 10%, 15% dan 20% yang dihasilkan oleh proses sinter dengan temperature 650°C seragam selama 180 menit guna mengetahui pengaruh fraksi berat terhadap kerapatan, porositas maupun daya serap air yang hasilnya dapat dilihat pada table 5.4 dan 5.5 di bawah :

Tabel 5. 4. Hasil Pengukuran Berdasarkan Cara ASTM C.20-00 dalam Berbagai Fraksi Berat Marmer

No.	Weight fraction of marble (%)	Dry Weight, D (g)	Suspended weight, S (g)	Saturated weight, W (g)
1.	10	8,32	5.39	8.12
2.	15	8.05	5.31	8.37
3.	20	7,96	5.22	8.63

Dari persamaan 2.8, 2.9, 2.10 dan 2.11, diperoleh hasil perhitungan densitas, porositas, daya serap air serta specific gravity untuk masing-masing komposit dengan fraksi berat marmer 10%, 15% dan 20% yang dapat dilihat pada table 5.5.

Tabel 5. 5. Hasil Perhitungan Densitas, Porositas dan Daya Serap Air pada Spesimen dengan Komposisi Kandungan Marmer Berbeda

Weight fraction of marble (%)	exterior volume (cm ³)	Volume Of open pores (cm ³)	Volume Of impervious portion (cm ³)	apparent porosity (%)	water absorption (%)	apparent specific gravity (gr/cm ³)	bulk density (gr/cm ³)
10	3.13	0.48	2.26	17.73	8.62	2.28	2.69
15	3.25	0.55	2.58	18.44	8.83	2.62	2.57
20	3.41	0.67	2.74	19.65	9.05	2.90	2.33

Adapun hasil pengujian dan perhitungan densitas, porositas, daya serap air serta berat spesifik bahan specimen komposit Aluminium-marmer dalam komposisi campuran terbaik yang dihasilkan yakni fraksi berat marmer 20% dengan temperatur sinter 650°C dalam berbagai variasi lama waktu penahanan pemanasan (*holding time*) diberikan pada table 5.4 dan 5.5, sedangkan gambar 5.14 menampilkan diagram yang menggambarkan besaran densitas bahan komposit dalam hubungannya dengan lama waktu penahanan pemanasan yakni 120, 180 dan 240 menit. Gambar 5.15 memperlihatkan porositas bahan juga dalam hubungannya dengan lama pemanasan, selanjutnya gambar 5.16 menampilkan diagram besaran daya serap air bahan berkaitan dengan lama waktu pemanasan. Kemudian pengaruh lama waktu pemanasan sinter terhadap nilai berat spesifik bahan digambarkan dalam diagram pada gambar 5.17. Secara umum peningkatan temperatur sinter akan meningkatkan densitas bahan (Namessan, 2012), demikian pula dengan lama waktu pemanasan proses sinter dan persentase kandungan serbuk marmer dalam specimen. Di sisi lain titik leleh serbuk aluminium lebih rendah dibanding serbuk marmer sehingga aluminium yang terlebih dahulu mencair akan mengisi rongga di antara partikel marmer yang sekaligus berfungsi sebagai matrik pengikat di antara partikel marmer. Hal tersebut juga akan mereduksi pori di dalam bahan dan meningkatkan densitas bahan. Terdapat hal yang menarik jika memperhatikan hasil-hasil pengujian densitas dan porositas khususnya pada specimen dengan fraksi berat marmer yang berbeda dimana pada specimen dengan persentase fraksi berat marmer yang lebih tinggi (20%) diperoleh densitas yang lebih rendah dengan porositas yang lebih tinggi, hal ini diakibatkan oleh kandungan karbon yang belum terbakar dalam marmer yang mempengaruhi densifikasi bahan sebab terjadi pembentukan gas selama pembakaran/pemanasan. Gelembung gas tersebut akan terjebak dalam bahan dan berubah menjadi pori pada saat specimen telah didinginkan. Peningkatan persentase pori dalam bahan akibat beberapa senyawa yang sudah mencair mulai terbakar dan membentuk gelembung gas yang terperangkap dalam bahan dan berubah menjadi pori setelah specimen didinginkan (Zamri, 2011).

(Pecharsky, 2005) menyatakan bahwa pada tahap awal dari proses sinter terjadi perubahan besar pada sudut kontak antar partikel akibat pertumbuhan necking yang terus meningkat dari 0 sampai mendekati 0,2 % sehingga menyebabkan penyusutan. Untuk serbuk dengan partikel bulat, diperkirakan radius necking antar partikel sudah mencapai nilai 0,4 sampai 0,5 radius partikel dan densitas relatif mengalami peningkatan hingga mencapai 60% hingga 65%. Pada tahap intermediate penggabungan antar butir terus terjadi sehingga membentuk *continuous pore channels* dan densitas relatif meningkat dari 65% sampai 95%

sehingga rongga mulai hilang dari *cylindrical channels*. Pada tahap akhir *continuous pore channels* menghilang dan berubah bentuk menjadi *individual pore*.

Di lain pihak bilamana perlakuan yang diterapkan pada spesimen saat proses sintering pada temperatur 650°C dengan lama waktu pemanasan yang berbeda maka kenyataan membuktikan bahwa spesimen dengan persentase kandungan serbuk marmer 20%, mengalami peningkatan densitas dengan trend positif yakni dari 120 menit ke 180 menit terdapat kenaikan densitas $0,20\text{gr}/\text{cm}^3$ sedangkan dari 180 menit ke 240 menit terjadi peningkatan densitas sebesar $0,24\text{gr}/\text{cm}^3$ sehingga menjadikan spesimen dengan *holding time* 240 menit memiliki densitas terbesar yakni sebesar $2,57\text{ gr}/\text{cm}^3$.

Sebagaimana diketahui bahwa densitas dan porositas pada spesimen juga sangat dipengaruhi oleh temperatur sinter, tekanan kompaksi serta persentase kandungan serbuk marmer, namun dalam hal ini didalam serangkaian percobaan pada pelaksanaan proses kompaksi dalam penelitian ini dijumpai kendala bahwa maksimal tekanan kompaksi yang dapat dilakukan pada campuran serbuk Aluminium-marmer ini adalah 300MPa, sesuatu yang unik dan memerlukan pendalaman karena saat kompaksi dilakukan melebihi tekanan 300MPa maka spesimen tidak dapat terbentuk dengan baik, rapuh membentuk lapisan-lapisan yang tidak teratur (*irregular layer*), sedangkan bilamana tekanan kompaksi dibawah tekanan tersebut spesimen tidak terbentuk dengan baik dan tidak presisi bahkan sangat mudah pecah terhambur tak berbentuk. Oleh karenanya dapat dianggap bahwa peningkatan tekanan kompaksi tidak selalu memberi pengaruh positif karena tergantung kepada komposisi dan jenis *green body* yang akan dibentuk. Peningkatan densitas *green body* akibat interaksi unsur pembentuk dalam campuran menjadikan temperatur akan berperan mereduksi pori dalam bahan sebab partikel yang lebih kecil akan terdistribusi dan mengisi pori yang ada di sekitarnya sehingga mengurangi penyusutan pada saat sintering, (Kumar, 2010). Dengan merujuk kepada hasil-hasil perhitungan densitas dan porositas seperti yang ditampilkan pada gambar 5.13 dan 5.14 mengindikasikan peningkatan temperatur sinter dan durasi waktu pemanasan juga nampaknya sangat berperan mereduksi pori, utamanya pada spesimen karena kandungan unsur pengikat dalam hal ini serbuk aluminium yang sudah mencair akan mengalir dan mengisi pori yang ada dalam bahan. Dengan kata lain bahwa spesimen dengan persentase kandungan serbuk aluminium yang besar maka nilai porositas akan menurun pada temperatur sinter 650°C terutama pada durasi pemanasan yang paling lama dalam hal ini 240 menit, hal ini disebabkan karena partikel aluminium sudah sepenuhnya mencair dan mereduksi seluruh pori dalam bahan. Nilai porositas tertinggi pada penelitian ini adalah 23,06% diperoleh dari spesimen yang mempunyai penambahan kandungan serbuk marmer

paling besar dengan masa pemanasan paling singkat (120 menit), sedangkan hubungan antara lama durasi masa pemanasan (*holding time*) dengan berat spesifik material komposit adalah berbanding lurus dimana semakin lama masa pemanasan maka semakin besar harga berat spesifik material, hal ini tentu saja diakibatkan oleh makin panjangnya kesempatan bagi bahan pengikat dalam hal ini aluminium untuk mengisi dan menempati celah pori dan menemukan ikatan dengan keseimbangan yang lebih baik, (L. Kang, 2005) terutama karena bahan matriks pengikat memiliki titik leleh yang jauh lebih rendah dari bahan penguatnya.

Penyerapan air (*water absorption*) pada spesimen sangat dipengaruhi oleh porositas yang ada dalam bahan, serapan air pada spesimen adalah persentase berat air yang mampu diserap oleh bahan jika direndam dalam air. Marmer memiliki pori dengan ukuran yang beragam, semakin besar pori maka semakin besar pula serapan air pada bahan marmer. Sepatutnya dengan tekanan kompaksi yang cukup besar 300MPa akan mampu meningkatkan memperbaiki densitas dari *green body* serta sanggup mereduksi pori dalam bahan sebab partikel yang lebih kecil akan mudah terdistribusi dan mengisi rongga yang ada di sekitarnya sehingga mengurangi penyusutan pada saat dilakukan proses sinter.

Pada setiap komposisi fraksi berat campuran yang diamati, dijumpai bahwa serapan air tertinggi diperoleh pada spesimen dengan masa pemanasan paling singkat atau spesimen dengan komposisi fraksi berat marmer paling besar (Gambar 5.15) atau dapat dilihat pada table 5.5., sebab akan terdapat porositas dalam bahan lebih besar pada proses sinter yang lebih singkat sebagaimana diuraikan sebelumnya. Sesungguhnya peningkatan temperatur sinter juga akan mereduksi pori utamanya pada spesimen dengan persentase kandungan serbuk marmer yang lebih tinggi sebab partikel Aluminium yang sudah mencair akan lebih mudah mengalir dan mengisi pori yang ada dalam bahan, hal ini akan mengakibatkan densitas meningkat dan serapan air menurun terutama pada spesimen dengan persentase kandungan fraksi berat marmer yang tinggi, namun sayangnya dalam penelitian ini terdapat kendala (*sintering constraint*) berupa keterbatasan dan ketidakmampuan *green body* hasil kompaksi merespon temperatur sinter melebihi temperatur lebur aluminium berapapun perbandingan komposisi campurannya.

Pada setiap komposisi campuran dijumpai bahwa serapan air tertinggi diperoleh pada spesimen dengan masa penahanan pemanasan (*holding time*) paling singkat sebab porositas dalam bahan lebih besar pada komposit yang sama. Peningkatan temperatur sinter serta panjangnya masa pemanasan sinter juga akan mereduksi pori utamanya pada spesimen dengan persentase kandungan serbuk marmer yang rendah sebab partikel aluminium yang sudah mencair akan mengalir dan mengisi pori yang ada dalam bahan. Hal ini akan

mengakibatkan densitas meningkat dan serapan air menurun terutama pada spesimen dengan lama durasi pemanasan saat proses sinter yang lebih lama.

Dari spesimen yang disinter pada temperature 650°C dengan variasi lama waktu penahanan (*holding time*) masing-masing dengan 120 menit, 180 menit dan 240 menit diperoleh hasil pengujian dan perhitungan porositas dan densitas seperti terlihat di bawah :

Tabel 5. 6. Hasil Pengujian Porositas Berdasarkan Standar ASTM C,20-00

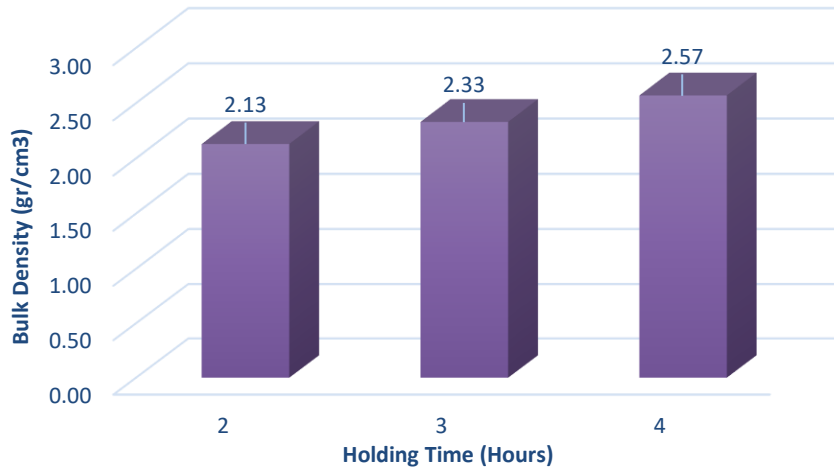
No.	Holding time	Dry Weight, D (g)	Suspended weight, S (g)	Saturated weight, W (g)
1.	120 minute	7,94	5.07	8.80
2.	180 minute	7,96	5.22	8.63
3.	240 minute	8.02	5.43	8.55

Hasil perhitungan ketiga spesimen komposit yang telah disinter masing-masing selama 120 menit, 180 menit dan 240 menit secara lengkap dapat dilihat pada tabel 5.7 di bawah :

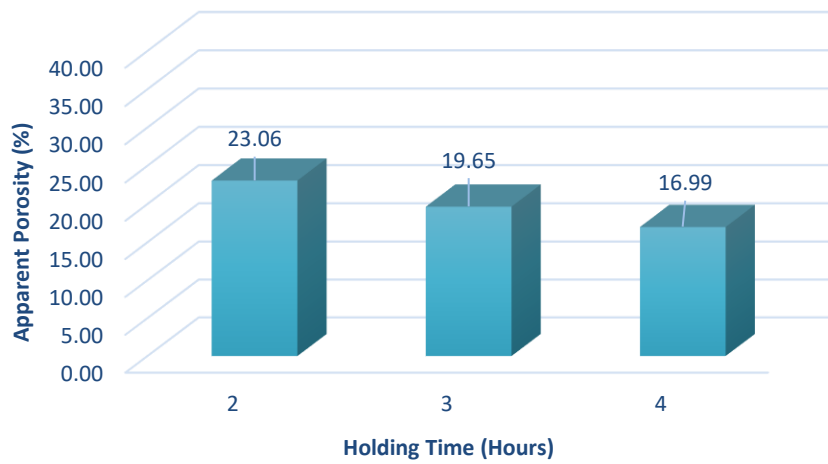
Tabel 5. 7. Hasil Perhitungan Lengkap Ketiga Spesimen yang Telah Diuji Densitas dan Porositas

<i>Holding time Of 650°C sintering temp.</i>	<i>exterior volume (cm³)</i>	<i>Volume Of open pores (cm³)</i>	<i>Volume Of impervious portion (cm³)</i>	<i>apparent porosity (%)</i>	<i>water absorption (%)</i>	<i>apparent specific gravity (gr/cm³)</i>	<i>bulk density (gr/cm³)</i>
120 minute	3.73	0.86	2.87	23.06	10.84	2.76	2.13
180 minute	3.41	0.67	2.74	19.65	9.05	2.90	2.33
240 minute	3.12	0.53	2.59	16.99	6.61	3.09	2.57

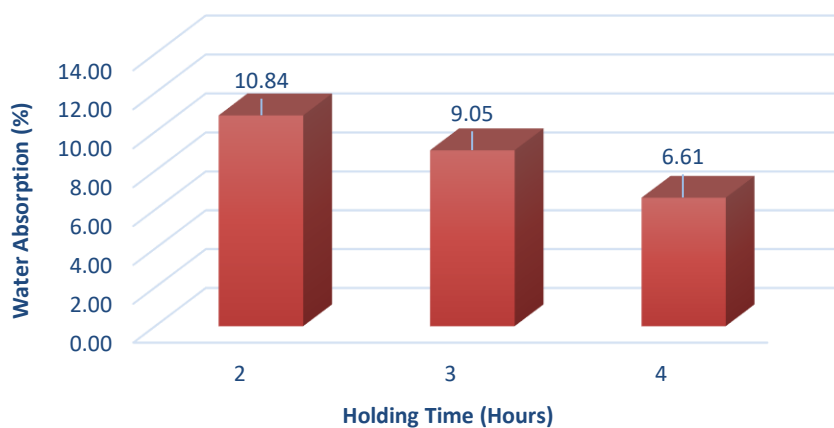
Berdasarkan persamaan untuk menghitung persentase porositas spesimen didapatkan 16.99% untuk spesimen dengan lama penahanan temperatur sinter 240 menit dimana merupakan nilai terkecil dibandingkan spesimen dengan lama pemanasan masing-masing 120 menit dan 180 menit (gambar 5.14). Hal ini terjadi akibat terdapat waktu pemanasan lebih lama yang memungkinkan aluminium memiliki kesempatan yang baik mengisi pori-pori atau rongga celah ikatan partikel. Untuk hasil perhitungan daya serap air didapatkan nilai terbesar 10.84% pada spesimen dengan lama waktu pemanasan 120 menit (gambar 5.15), demikian halnya dengan perhitungan densitas didapatkan 2.57% pada spesimen dengan lama pemanasan 240 menit sebagai nilai terbesar dibandingkan spesimen-spesimen lainnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5.13. Selanjutnya pada grafik gambar 5.16 nampak bahwa spesimen dengan lama waktu pemanasan 240 menit merupakan spesimen dengan spesifik gravity terbesar yakni 3.09 gr/cm³



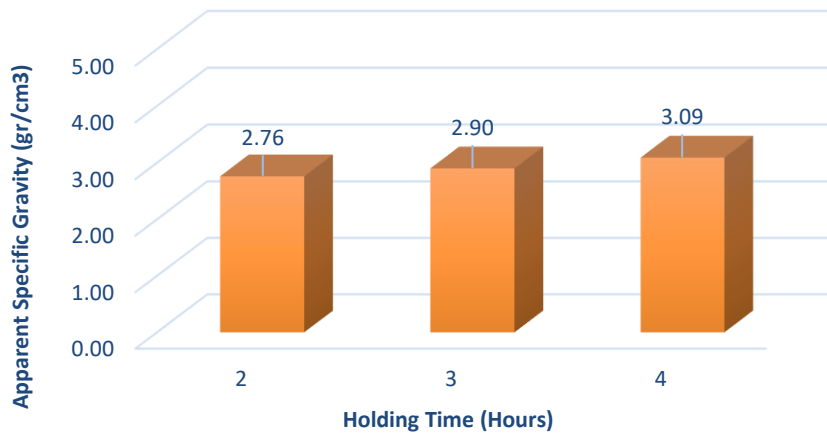
Gambar 5. 13. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Densitas Material



Gambar 5. 14. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Porositas Material

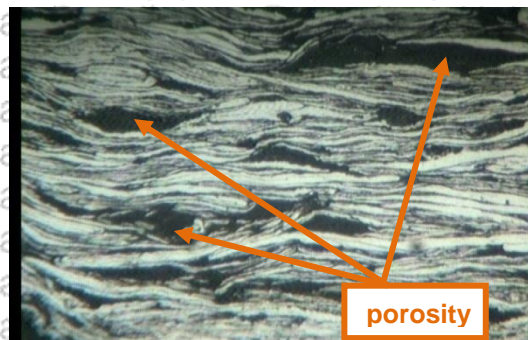


Gambar 5. 15. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Daya Serap Air Material

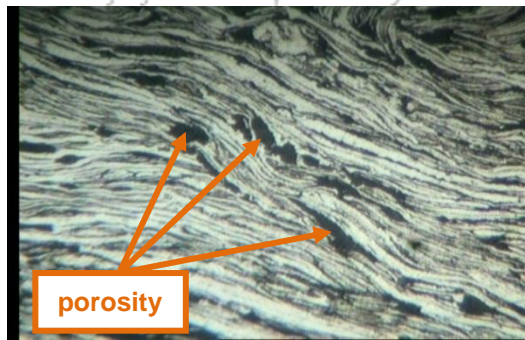


Gambar 5. 16. Grafik Hubungan antara Lama Waktu Pemanasan dengan Berat Spesifik Material

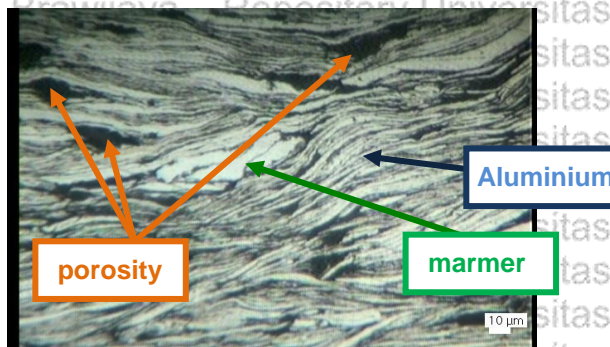
Dari tabel 5.7 hasil perhitungan lengkap uji porositas, nampak bahwa spesimen yang telah melalui proses sinter selama 240 menit memiliki porositas yang paling sedikit dan dengan densitas terbesar, hal ini memungkinkan terjadi karena serbuk aluminium mempunyai waktu yang cukup untuk membentuk ikatan atom, (Kumar, 2010). Secara fisik juga dapat dilihat dari foto mikro penampang komposit masing-masing pada gambar 5.17, 5.18 dan 5.19. Demikian halnya dengan hasil perhitungan daya serap air menunjukkan spesimen dengan lama pemanasan terbesar memiliki serapan air paling kecil, dalam kaitan ini dapat pula dilihat foto mikro masing-masing spesimen yang menunjukkan porositas seperti pada gambar di bawah :



Gambar 5. 17. Porositas pada Penampang dengan Lama Waktu Sinter 120 Menit



Gambar 5.18. Porositas pada Penampang dengan Lama Waktu Sinter 180 Menit



Gambar 5.19. Porositas pada Penampang dengan Lama Waktu Sinter 240 Menit

Dari berbagai sifat fisis material komposit yang dihitung berdasarkan prosedur ASTM C.20-00 nampaknya porositas bahan yang mengalami penurunan signifikan atas perubahan lama waktu proses sinter pada temperatur sinter 650°C ini, yakni dari 23,06% bila disinter selama 120 menit lalu berubah porositasnya menjadi 19,65% saat lama waktu proses sinter dilakukan selama 180 menit, kemudian porositas bahan akan berkurang banyak saat spesimen komposit disinter dalam waktu yang lebih lama yakni selama 240 menit yang menghasilkan porositas bahan sebesar 16,99% sehingga secara umum dapat dinyatakan bahwa porositas dapat berkurang hampir 50% dengan melakukan proses sinter yang lebih lama atau dengan penambahan masa sinter sebanyak 2 jam atau 120 menit, sehingga dapat dinyatakan bahwa meskipun persentase kandungan serbuk marmer cukup tinggi dalam hal ini porositas yang tinggi dan densitas rendah dapat diperbaiki secara gradual dengan penambahan masa pemanasan proses sinter. Serapan air tertinggi dalam penelitian ini adalah 10,84% diperoleh pada specimen dengan komposisi 20% marmer dengan temperatur sinter 650°C dan masa holding time 120 menit, sedangkan nilai terendah adalah 6,61% yang diperoleh dari specimen yang sama namun dengan masa holding time proses sinter 240 menit. Terjadinya perubahan pada densitas, porositas dan daya serap air akibat temperatur perlakuan panas diyakini sebagai hasil dari pelunakan fase aluminium untuk pembentukan fase alumina dalam sistem yang disertai dengan perkembangan dan pelepasan secara bersamaan dari gas pada temperatur tinggi, (Cheng, 2003), sebagai contoh reduksi sebagian

CaCO_3 menjadi Al_2O_3 dengan melibatkan pelepasan molekul diatomic gas H_2 yang dihasilkan dari dekomposisi *Calcium Hydroxide*, CaOH_2 dari marmer. Al_2O_3 yang dihasilkan melalui anodisasi bersifat amorf, namun sebagian Al_2O_3 dalam bentuk kristalin, yang dapat meningkatkan kekerasannya (Malaga, 2007).

Di sisi lain *amorphous structure* menempati volume spesifik tertentu yang kemudian oleh pemanasan sebagian membentuk *crystalline structure*. Jika aluminium dipanaskan sampai temperatur tertentu maka volumenya terlebih dahulu akan meningkat kemudian terjadi kristalisasi sehingga mengakibatkan penurunan volume spesifik (Malaga, 2007).

Berdasarkan uraian di atas maka ukuran pori sisa (*residual pore*) adalah tergantung pada temperature dan lama proses pemanasan, oleh karena itu maka sifat fisik dan mekanik bahan komposit *aluminum-marmer* akan meningkat akibat pertambahan waktu penahanan dalam perlakuan panas yang menyebabkan porositas dan serapan air menurun dan densitas volumetrik meningkat, (Cheng, 2004).

Dari penelitian yang menggunakan matriks paduan Aluminium ZA-27 dengan komposisi kimia (Al-25%, Cu-2%, Mg-0.01%, dan Zn), menggunakan penguat *Silicon Carbide* (SiC), Grafit dan serbuk marmer (Kumar, 2018), komposit bermatriks aluminium (AMC) yang dibentuk melalui proses pengecoran yang diaduk (*stir casting*) dengan mencairkan paduan Aluminium pada temperatur 800°C yang dicampur dengan bahan penguat dalam berbagai variasi prosentase berat, 2, 4 dan 6% SiC, serta dengan prosentase Grafit dan serbuk marmer konstan 2%. Diperoleh hasil yang menunjukkan peningkatan densitas sekaligus bertambahnya porositas, bertambahnya prosentase berat penguat ternyata efektif meningkatkan densitas namun porositas bertambah, sedangkan peningkatan prosentase filler cenderung menaikkan nilai kekerasan, kekuatan tekan, dan kekuatan impak.

Meningkatnya perhatian dalam pemanfaatan limbah marmer menyebabkan banyaknya dilakukan penyelidikan terkait peluang serbuk marmer digunakan sebagai material penguat terutama atas bahan yang dipandang memiliki batasan dalam penggunaan untuk banyak aplikasi, seperti halnya dengan Aluminium. *Aluminium Metal Matrix Composites* (AMMCs) telah menunjukkan peningkatan substansial dalam sifat mekanik dan tribologi.

Dengan menggunakan partikel keramik sebagai penguat untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan komposit serta mengurangi keuletan secara signifikan. SiC, MgO, Zircon, TiC, dan Al_2O_3 , (Kumar, 2018). Nilai kekerasan dapat ditingkatkan dengan peningkatan penguat hingga 9% fraksi berat dan kekerasan menurun untuk berat partikel serbuk marmer mencapai 12%. Penurunan kekerasan ini bisa disebabkan oleh aglomerasi partikel serbuk marmer yang mengurangi ikatan antar muka antara bahan penguat dan matriks.



Studi terhadap komposit dengan matriks Aluminium yang menggunakan keramik sebagai bahan penguat (Das, 2014), menguatkan pandangan banyak peneliti yang menunjukkan distribusi seragam dari partikel yang diperkuat dengan aglomerasi lokal di beberapa tempat, saat komposit dalam proses pembentukan dimana kekerasan dan densitas komposit meningkat seiring dengan meningkatnya fraksi penguat, namun sifat ini dapat berkurang dengan adanya porositas. Hasil observasi tersebut juga menunjukkan bahwa kekerasan komposit bermatriks aluminium dapat ditingkatkan dengan meningkatkan fraksi bahan penguat atau dengan memperkecil ukuran partikel penguat, namun demikian kehadiran porositas mempengaruhi kekerasan dan densitas komposit yang diperkuat keramik, juga bisa ditingkatkan dengan perlakuan panas dan lama pemanasan.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

1. Dari keseluruhan komposisi fraksi berat campuran Aluminium-marmer yang telah dibentuk dengan metoda metalurgi serbuk, didapatkan komposisi 20% fraksi berat serbuk marmer adalah yang terbentuk dengan baik dan presisi pada temperatur sinter 650°C , dengan kerapatan yang paling kecil yakni 2.33 gr/cm^3 dan porositas terbesar 19.65% (table 5.5) bila dibandingkan dengan komposit dengan kandungan marmer yang lebih kecil. Akan tetapi dengan nilai kekerasan permukaan komposit tertinggi sebesar 98,67 BHN menunjukkan kecenderungan meningkatnya kekerasan seiring bertambahnya fraksi berat serbuk marmer yang digunakan sebagai penguat komposit, hal ini akibat interaksi *Calcium Carbonate* (CaCO_3) dengan Aluminium yang menghasilkan *Alumina* (Al_2O_3), dimana Calcite sendiri diketahui merupakan mineral karbonat dan polimorf kalsium karbonat yang paling stabil dengan skala kekerasan mineral Mohs yang didefinisikan nilai 3.
2. Dari hasil pengujian spesimen komposit dengan fraksi berat marmer 20% dapat diketahui bahwa dengan temperatur sinter optimal pada 650°C diperoleh spesimen komposit memiliki sifat-sifat mekanis yang baik dibandingkan dengan komposit dengan variasi temperatur dibawahnya, hal mana membuktikan bahwa temperatur sangat mempengaruhi perpindahan massa pada proses sinter karena dengan meningkatnya temperatur sinter akan mendorong terjadinya interdiffusion dari serbuk hasil kompaksi (*green compact*) yang meningkatkan kepadatan dan memperbaiki porositas produk hasil proses sinter, sehingga dengan meningkatnya temperatur sinter sampai batas tertentu, semakin meningkat pula sifat mekanis komposit terutama kekerasan komposit yang telah disinter.
3. Lama waktu sinter (*holding time*) ternyata berpengaruh signifikan terhadap perbaikan sifat-sifat komposit Aluminium-marmer, dimana terdapat kecenderungan kekerasan dan densitas meningkat dengan semakin panjangnya durasi waktu sinter, hal ini terjadi karena dengan waktu penahanan pemanasan yang lebih lama memberikan kesempatan lebih baik untuk mendorong terjadinya penyatuan ikatan dari partikel-partikel campuran



lebih baik untuk mendorong terjadinya penyatuan ikatan dari partikel-partikel campuran bahan sehingga dapat meningkatkan densitas (*densification*). Pada proses sinter ini terjadi pembentukan padatan ikatan serbuk berupa *Aluminium Oxide* (Al_2O_3) yang merupakan salah satu jenis keramik oksida (*oxide ceramics*) yang merupakan hasil uraian sebagian dari *Calcium Carbonate* ($CaCO_3$) dan unsur Aluminium yang ikut berkontribusi meningkatkan kekerasan komposit. Oleh karenanya pada komposit dengan fraksi berat 20% marmer didapatkan memiliki kekerasan 101,61 BHN dengan densitas sebesar $2,57 \text{ gr/cm}^3$ dengan porositas terkecil 16,99% pada komposit yang disinter selama 240 menit dibandingkan dengan komposit yang disinter dalam waktu yang lebih singkat.

6.2. Saran

1. Untuk mencapai waktu penahanan (*holding time*) yang optimum pada saat proses sinter maka perlu dicari waktu penahanan dengan interval yang lebih kecil dari 60 menit terutama diantara 180 sampai 240 menit atau bahkan dikembangkan hingga selama 300 menit.
2. Untuk pengembangan selanjutnya perlu dilakukan penelitian lanjutan apakah variasi proses pendinginan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan dan densifikasi komposit Aluminium-marmer mengingat pada beberapa penelitian sebelumnya dijumpai indikasi peningkatan kekerasan komposit terutama yang diperkuat Alumina (Al_2O_3) akibat *thermal shock*.
3. Penting untuk senantiasa dicari cara untuk meningkatkan persentase penggunaan serbuk marmer sebagai penguat dalam dalam matriks komposit Aluminium, apakah dengan menggunakan bahan tambahan sebagai *bonding agent*.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, Khalil., Nizami, Shaikh Sirajuddin., Raza, Nudrat Zahid., Shirin, Khaula., 2012. Cure Characteristics, Mechanical and Swelling Properties of Marble Sludge Filled EPDM Modified Chloroprene Rubber Blends, International journal of Advances in Materials Physics and Chemistry, 2012, vol. 2, pp. 90-97.

Ahmed, Khalil., Nizami, Shaikh Sirajuddin., Raza, Nudrat Zahid., Mahmood, Khalid., 2012. Mechanical, swelling, and thermal aging properties of marble sludge natural rubber Composites, International Journal of Industrial Chemistry, 3:21.

ASM Hand Book. 2002. Production and sintering practices in powder metal technologies and Applications. vol. 07: ASM International; p. 468–503.

ASTM C1327-15. 2019. Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics, Annual Book of ASTM Standards, Volume 15.01, Developed by Subcommittee: C28.01, ASTM International, Philadelphia, USA.

ASTM C20-00. 2000. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water, Annual Book of ASTM Standards, Volume 15.01, ASTM International, Philadelphia, USA.

Ali, Mohd Radzi, Baharin, Shamsul., AZ, Jamaludin, Nur Hidayah., Ruzaidi, C.M. 2011. Fabrication and Mechanical Properties of Composite Palm ash Mixed With Phenolic Resins, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(11): 291-296

Asif, Mohammad., Chandra, K., Misra, P.S..2011. Development of Iron Based Brake Friction Material by Hot Powder Preform Forging Technique used for Medium to Heavy Duty Applications. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol.10, No.3, pp.231-244.

Barsoum, M.W., 1997, *Fundamental of Ceramics*, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.

Bordia, Rajendra K., Olevsky, Eugene A., 2009. Advances of Sintering Science and Technology, Ceramic Transactions vol. 9. A Collection of Papers Presented at the International Conference on Sintering, November 16-20, 2009. La Mia, California A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

Callister, W.D., 2007, Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York

Cantisani, Emma., Canova, Roberta. Fratini, Fabio. Manganelli, Carlo Del Fa, Mazzuoli, Roberto and Molli, Giancarlo. 2000. Relationships between microstructures and physical properties of white Apuan marbles: inferences on weathering durability. Mineralogy, Crystallography, Geochemistry, Ore Deposits, Petrology, Volcanology. 69, 3, 257- 268.

Cheng, T.W., and Chen, Y.S., 2003. On Formation of CaO–Al₂O₃–SiO₂ Glass–ceramics by Verification of Incinerator Fly Ash, Chemosphere 51, pp. 817–824.



Chetry, Priya., Goyal, Er. Ritu., Science, Er. Manjit Kaur. 2018. Influence of Marble and Aluminium Waste Powder on the Performance of Concrete, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 7 Issue 08.

Corden, Ron., Alcan., Banbuoy. 1994. Aluminium; Physical properties, characteristic and Alloys. EAA- European Aluminium Association.

Das, Dipti Kanta., Mishra, P. Chandra., S, Saranjit., Kumar T, Ratish., 2014, Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites - a review, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 1:12.

Delavari, M., Salarvand, A., Rahi, A., Shahri, F. 2011. The effect of powder metallurgy process parameters on mechanical properties of micro and nano-iron powder International Journal of Engineering, Science and Technology, volume. 3, No. 9, pp. 86-94.

Demirel, Bahar. 2010. The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(9), pp. 1372-1380, 18 August, 2010.

Ertan, Rukiye & Yavuz, Nurettin. 2011. The effects of graphite, coke and ZnS on the tribological and surface characteristics of automotive brake friction materials, Journal of Industrial Lubrication and Tribology, Volume 63.4 : 245–253.

FU, P.R.K., Gorin, A., Sujan Z. OO, D. 2012. On the Problem of Novel Composite Materials Development for Car Brake Rotor, International Journal of Engineering and Physical Sciences 6, 2012.

German, Randall M., Messing, Gary L., Cornwall, Robert G., 1996. Sintering Technology, The Pennsylvania State University Handbook; Marcel Dekker, Inc. 270 Madison Avenue, New York.

German R.M., 1994, "Powder Metalurgy Science", 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey.

Ghazi, A.A.S., Chandra, K., Misra, P.S., 2011. Development and Characterization of Fe-Based Friction Material Made by Hot Powder Preform Forging for Low Duty Applications, Journal of minerals & materials characterization & engineering Vol. 10, No.13, pp.1205-1212.

Graham, Withers., 2008, Utilizing Fly Ash Particles to Reduce Low Cost Metal Matrix Composites", Ultalite, Melbourne, Australia.

Hamza, Rania A., El-Haggar, Salah., & Khedr, Safwan. 2011. Marble and Granite Waste: Characterization and Utilization in Concrete Bricks. International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, Vol. 1, no. 4.

Jaafar, Talib Ria., Selamat, Mohamad Soib., & Kasiran, Ramlan., 2010. Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development. Journal of Powder Metallurgy.

Kemperl, J., and Maček, J., 2009, Precipitation of calcium carbonate from hydrated lime of variable reactivity, granulation and optical properties, International Journal of Mineral processing. Process., 93 (1), pp. 84–88.



Keskin, Ahmet., 2011. Investigation of using natural zeolite in brake pad. Journal of Scientific Research and Essays Vol. 6.23 : 4893-4904.

Klar, Erhard., Samal, Prasan K. 2007. Powder Metallurgy Stainless Steels: Processing, Microstructures and Properties. ASM International; p1-4. DOI: 10.1361/pmss, p.223.

K, Suresh., Mahendran, Krupashankara, M.S., Avinash, 2015. Influence of Powder Composition & Morphology on Green Density for Powder Metallurgy Processes, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 1.

Kumar, D.R., Loganathan, C., Narayanasamy, R., 2010. Effect of glass in Aluminium matrix on workability and strain hardening behavior of powder metallurgy composite, Elsevier Technical report of Materials and Design 32: 2413-2422.

Kumar, Dheeraj., Mital, Arun., Kumar, Ashiwani., 2018. Physical and Mechanical Characterization and Experimental Analysis Silicon Carbide, Graphite and Marble dust Reinforced of ZA-27 Aluminium Alloy Hybrid Composite for Bearing Material Application, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) Vol. 9, Issue 9, pp. 1333-1341.

Kumar, N, Rajendra., R, Saravanan., R, Sellamuthu., 2018. Effect of Marble Dust on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu-Ni/Marble Dust Particles Composites, International Journal of Pure and Applied Mathematics Vol. 118 No.24.

L. Kang, Suk-Joong. 2005, Sintering, Densification, Grain Growth, and Microstructure, Elsevier Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803.

Maaze, Rihan., Kumar, Vinod., Mishra, Sandeep Kumar. 2016, Influence of Marble and Aluminium Waste Powder on the Performance of Bricks, International Journal of Engineering Development and Research IJEDR | Volume 4, Issue 2.

Malaga, Catarina-Starzec*, Lindqvist, Jan E., Scouenborg Bjorn. 2007. Experimental study on the variation in porosity of marble as a function of temperature, Proceeding. International conference the conservation of cultural heritage for sustainable development, Goteborg-Sweden.

Maleque, M.A., Atiqah A., Talib R.J. and Zahurin H.. 2012. New Natural Fibre Reinforced Aluminium Composite For Automotive Brake Pad. International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), Vol. 7 (2012), No. 2, 166-170.

Masuda, Hiroaki. Higashitani, Ko. Yoshida, Hideto. 2007, Powder Technology Fundamentals of particles, power beds and particle generation., CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742.

Miracle, Daniel B. & Donaldson, Steven L. 2001. Composites, ASM Handbook. Vol. 2. ASM International Handbook.

Mutlu, I., Eldogan, O., Findik, F. 2005. Production of ceramic additive automotive brake lining and investigation of its braking characterization, Journal of Industrial Lubrication and Tribology, Volume 57. 2.: 84-92.



Mutlu, I., Oner C., Cevik I. and Findik F.. 2007. Wear performance of some phenolic composites with boric acid. *Journal Industrial Lubrication and Tribology* 59/1 (2007) 38-45.

Mutlu, Ibrahim. 2009. Investigation of tribological properties of brake pads using rice straw and rice husk dust. *Journal of applied science* 9. 2 : 377-381.

Namesan, N., J.N. Maduako, S.A Iya. 2012. Effect of polyester and filler on water absorption behaviour, density and porosity of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) fibre reinforced brake pads, *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS* Vol: 12 No: 03 : 33-44.

Narayan, S. & Rajeshkannan, A. 2014. Workability Behaviour of Powder Metallurgy Aluminium Composites, *Journal of Powder Technology*, Hindawi Publishing Corp. Volume 2014, Article ID 368721.

Neikov, Oleg D. et al. 2009. *Handbook of Non-ferrous Metal Powder, Technologies and Applications*, Elsevier, First edition. 1000 AE Amsterdam.

Pathan, Prof. Veena G., Pathan, Prof. MD. Gulfam., 2014. Feasibility and Need of use of Waste Marble Powder in Concrete Production, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, pp. 23-26.

Pecharsky, Vitalij K. & Zavaliy, P.Y. 2008. *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials* (Springer, ed.). United States of America: Springer Science+Business Media, Inc.

Rahaman, M.N. 2003. *Ceramic Processing and Sintering*, Marcel Dekker, Inc., Madison Avenue, New York.

Rohatgi, P.K., Schultz, B.F., Daoud, A., Zhang, W.W. 2010. *Tribological performance of A206 aluminum alloy containing silica sand particles*. Elsevier, *Journal of Tribology International* 43; 455–466.

Ruzaidi, C.M., Kamarudin, H., Shamsul, J.B., Al Bakri, A. Mustafa and Alida A. 2011. Morphology and Wear Properties of Palm Ash and PCB Waste Brake Pad. *International Conference on Asia Agriculture and Animal*

Sarpün, H., Özkan, V., Tuncel, S., 2009. Ultrasonic determination of elastic modulus of Marbles relation with porosity and Cao%, *Proceeding The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing “Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”*. Ljubljana, Slovenia, 119-125.

Schaffer, G.B. 2004. Powder Processed Aluminium Alloys, *Journal of Materials Forum*, Institute of Materials Engineering Australasia Ltd. vol 28, pp: 65-73.

Sharma, Vipin Kumar., Chaudhary, Sumit., Singh, Ramesh Chandra., Sonia, Vikas., Goel, Vinayak. 2020. Reusing marble dust as reinforcement material for better mechanical performance: studies on compositing aluminum matrix , *Journal of IOP Science Materials Research Express*, Volume 6, Number 1215.

Shatokha, Volodymyr, 2012, *Sintering – Methods and Products*, Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.

Schulze, Dietmar. 2008. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and*



Flow, English translation based on German edition “Schulze: Pulver und Schüttgüter”
Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Shirule, Prof. P.A., Rahman, Ataur., Gupta, Rakesh. D. 2012. Partial Replacement of
Cement with Marble Dust Powder, Research Paper, International Journal of Advanced
Engineering Research and Studies E-ISSN2249-8974 IJAERS/Vol.I/ Issue III/ April-
June, 2012/175-177.

Włodarczyk - Fligier, A., Dobrzański, L. A., Kremzer, M., Adamiak, M. 2008.
Manufacturing of aluminium matrix composite materials reinforced by Al_2O_3
particles, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering,
volume 27, issue 1, pp. 99-102.

Y. B. Zamri, Y.B, Shamsul, J.B., Amin, M.M, 2011. Potential of palm oil clinker as
reinforcement in aluminium matrix composites for tribological applications,
International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), Vol.6 (2011),
No.1, 10-17.



GLOSSARIUM

Aglomerasi : kumpulan dari dua atau lebih partikel atau agregat yang dilekatkan secara bersama oleh gaya kohesif yang relatif lemah yang disebabkan oleh ikatan kimia yang lemah atau muatan elektrostatik permukaan yang dihasilkan dari proses penanganan atau pengolahan. Aglomerasi akan menurunkan kekuatan sebab apabila menyusut lebih cepat pada saat sintering dapat menimbulkan *void* di sekitar aglomerasi.

AMC : Aluminium Matrix Composite, yaitu komposit berbahan dasar aluminium, atau komposit dengan matriks Aluminium

Amorphous : fase dalam bahan termoplastik yang memiliki rantai molekul acak, dimana pada proses pemanasan hanya terjadi proses pelunakan membentuk fase semi-padat.

ASTM : *American Society for Testing and Materials*, sebuah lembaga standar pengujian material yang berada di West Conshohocken Pennsylvania, USA.

Bahan Dasar : Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini yang meliputi serbuk marmer dan serbuk Aluminium murni

Bahan Teknik : Zat yang digunakan dalam produk teknik yang meliputi logam, keramik, gelas, polimer, semikonduktor serta zat alamiah seperti kayu dan batu tetapi umumnya tidak mencakup makanan, sandang dan obat-obatan.

Batas butir : daerah kristalin acak antara butir.

Besar butir : diameter butir statistik pada penampang sembarang.

CMC's Ceramic Matrix Composites : adalah salah satu jenis bahan komposit bermatriks keramik dengan penguatan partikel seperti alumina (Al_2O_3),



silika (SiO_2) dan silikon karbida (SiC).

Difraksi (sinar-x) : deviasi berkas sinar-x oleh susunan atom yang teratur

Distribusi butir : Sebaran butir dari serbuk *raw material*.

Fase : Bagian dari sistem bahan yang homogen secara fisik.

Final Stage : Tahap akhir dalam proses sintering yang ditandai dengan hilangnya struktur pori dan munculnya batas butir.

Green body : Serbuk yang dipadatkan dari hasil kompaksi sebelum dipanaskan dalam proses sintering

Holding time : Lama waktu penahanan yang diberikan pada saat proses sinte

Initial stage : Tahap awal proses sintering ditandai dengan penyusunan kembali formasi leher, yang meliputi penyusunan kembali partikel dan formasi leher awal di titik kontak antar partikel, penyusunan kembali formasi partikel setelah mengalami pergerakan untuk meningkatkan jumlah titik kontak dan pada akhirnya membentuk ikatan pada titik kontak tersebut

Intermediate stage : Tahapan proses sintering dimana pertumbuhan leher terus berlanjut yang diikuti dengan pertumbuhan butir dan pertumbuhan pori. Perubahan fisik selama tahapan ini adalah pertumbuhan ukuran leher antar partikel, porositas berkurang, pusat partikel semakin dekat secara bersama-sama, penyusutan setara dengan jumlah berkurangnya porositas, batas butir mulai berpindah sehingga butir mulai bertumbuh, terbentuknya saluran yang saling berhubungan (*continues channel*) dan berakhir ketika porositas terisolasi.

Interlocking : Proses yang berlangsung dimana antar butir saling mengunci

Kekerasan Bahan : Merupakan sifat mekanis yang menunjukkan ketahanan terhadap pembentukan jejak permanen dari hasil penetrasi



indentor di permukaannya. Kekerasan dapat pula diartikan sebagai kemampuan bahan terhadap deformasi permanen, goresan (*scratching*) dan pengikisan (*erosion*).

Kompaksi : Suatu proses dimana serbuk dimasukkan ke dalam cetakan kemudian diberi gaya eksternal untuk memadatkan serbuk dan menghasilkan padatan dengan bentuk dan ukuran yang tepat.

Komposit : Material yang tersusun dari gabungan antara dua atau lebih bahan penyusun pada skala makroskopik untuk membentuk material baru yang lebih bermanfaat

Komposit Al-marble : bahan komposit dari campuran Aluminium dan serbuk marmer (*marble*) yang dibuat melalui proses *pressureless sintering*

Komposisi campuran : Perbandingan persentase campuran (fraksi berat) antara Aluminium dan serbuk marmer dalam pembuatan *green body*

Kristalin : Fase dalam bahan termoplastik yang memiliki rantai molekul yang teratur. Bahan kristalin memiliki panas laten yaitu energi yang dibutuhkan untuk mengubah fase padat menjadi cair

Matriks : *body constituent* yang memberi bentuk pada komposit, disamping berfungsi untuk melindungi *reinforcement* maka matriks harus dapat mentransfer beban dengan baik ke *reinforcement*

Metoda Konvensional : Yaitu metode pembuatan *glass ceramics* yang melibatkan dua tahapan perlakuan panas yang disebut tahap pengintian (*nucleation*) dan tahap pertumbuhan kristal (*crystal growth*).

MMC : Metal Matrix Composites, Komposit dengan matriks jenis logam (*metal*)

Particle size : Dimensi linear dari sebuah partikel biasanya dinyatakan



dengan diameter yang digunakan untuk karakterisasi ukuran partikel. Dimensinya dapat ditentukan dengan salah satu dari beberapa teknik yang berbeda yang meliputi sedimentasi, pengayakan, pengukuran *micrometric* atau pengukuran langsung

Pozzolan : Sifat dari bahan *silica* dan *alumina* pada saat dicampur dengan kapur dan air maka akan membentuk senyawa yang bersifat mengikat (*cementitious*).

Polimer : Bahan bukan logam terdiri dari makromolekul yang terdiri dari banyak satuan yang berulang-ulang.

Porositas : Fraksi volume dari pori yang terkandung dalam suatu benda padat dan biasanya dinyatakan dalam persen.

Prinsip Archimedes : Apabila benda padat dimasukkan ke dalam zat cair maka terjadi perpindahan volume zat cair sebesar volume benda yang tercelup.

Reinforcement : *Structural constituent* yang menentukan internal struktur dari komposit. *Reinforcement* komposit harus mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibanding matriks sehingga dapat berfungsi sebagai penahan beban.

Sintering : Proses pembentukan mekanisme ikatan antar partikel serbuk melalui perlakuan panas sehingga membentuk produk padat.

Sintering serbuk : Metode pembentukan padatan serbuk yang diikuti dengan perlakuan panas pada temperatur tinggi. Adanya keterbatasan pada ukuran dan bentuk komponen yang dapat dipadatkan serta biaya pembuatan serbuk yang relatif mahal sehingga metode ini hanya digunakan pada beberapa kondisi tertentu

Tekanan kompaksi : Nilai tekanan yang diberikan pada saat proses pembebanan untuk memadatkan serbuk (pembentukan *green body*) sebelum dilakukan proses pemanasan dengan sintering.



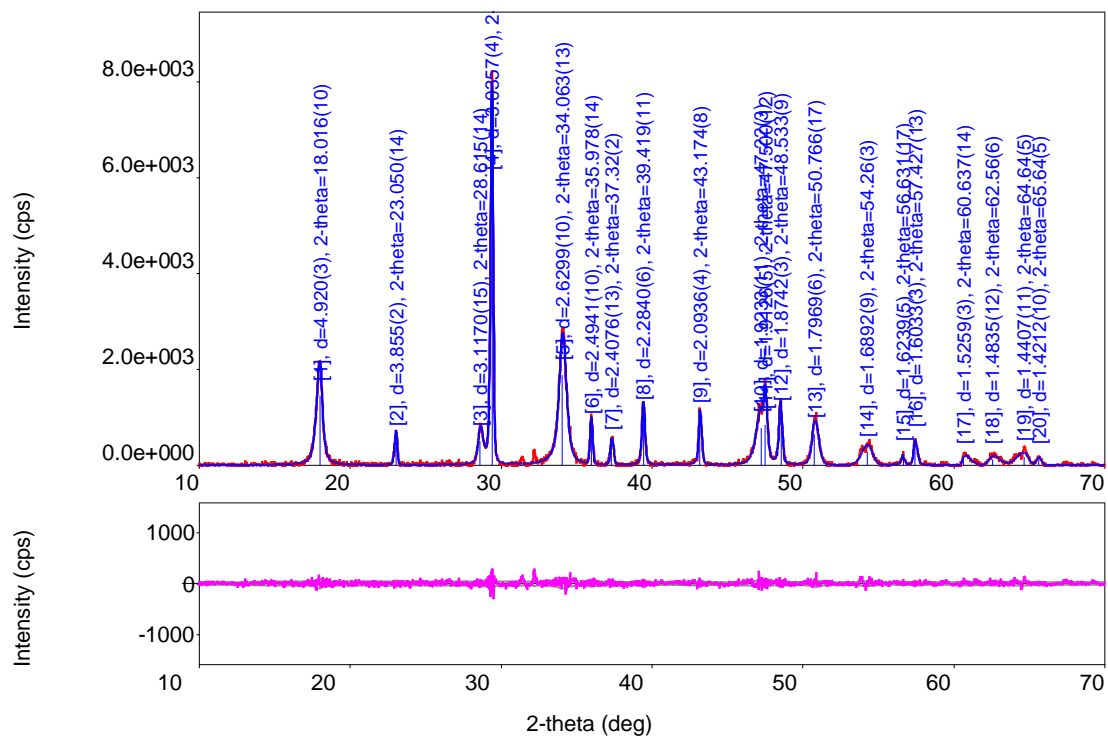
Publikasi ilmiah dari penelitian dalam naskah Disertasi ini :

1. *Effect of Heavy Fraction on Hardness and Morphology fo Aluminium-marble Powder Metallurgy Composite*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 14, no. 14, Juli 2019
2. *The Effect of Sintering Holding Time on Aluminium–Marble Composite Hardness, Density and Porosity* - Journal of Southwest Jiaotong University, Received: January 15, 2020 ▪ Review: February Accepted: April 17, 2020, Volume 55. No.2.

General Information

Analysis date	2015/03/13 13:03:01	Measurement date	2015/03/10 12:42:15
Sample name	TEST SAMPLE	Operator	Dilla
File name	Serbuk Marmer.raw		
Comment			

Measurement profile



Measurement conditions

X-Ray	30 kV , 15 mA	Scan speed / Duration time	4.0000 deg./min.
Goniometer		Step width	0.0200 deg.
Attachment		Scan axis	2Theta/Theta
Filter	Kb filter	Scan range	10.0000 - 70.0000 deg.
CBO selection slit		Incident slit	1.25 deg.
Diffrected beam mono		Length limiting slit	-
Detector	MiniFlex2 counter	Receiving slit #1	1.25 deg.
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	0.3mm

Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Calcite, syn	Ca (C O3)	0.469	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	01-086-0174
Calcium Hydroxide	Ca (O H)2	0.251	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	01-081-2041
Lime, syn	Ca O	0.661	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	00-048-1467

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Calcite, syn	Ca (C O3)	167 : R-3c,hexagonal	ICDD (PDF-2/Release 2011	01-086-0174
Calcium Hydroxide	Ca (O H)2	164 : P-3m1	ICDD (PDF-2/Release 2011	01-081-2041
Lime, syn	Ca O	225 : Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2011	00-048-1467

Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	18.016(10)	4.920(3)	1452(70)	0.457(9)	908(10)	0.63(4)	1.76(18)
2	23.050(14)	3.855(2)	500(41)	0.194(11)	115(5)	0.23(3)	1.5(4)
3	28.615(14)	3.1170(15)	507(41)	0.370(18)	231(8)	0.46(5)	0.78(11)
4	29.398(4)	3.0357(4)	5857(140)	0.188(3)	1369(13)	0.234(8)	1.44(12)
5	34.063(13)	2.6299(10)	1885(79)	0.562(12)	1477(17)	0.78(4)	0.90(9)
6	35.978(14)	2.4941(10)	755(50)	0.177(10)	142(7)	0.19(2)	1.3(4)
7	37.32(2)	2.4076(13)	419(37)	0.216(15)	100(6)	0.24(4)	0.8(3)
8	39.419(11)	2.2840(6)	1048(59)	0.190(9)	264(5)	0.252(19)	1.1(2)
9	43.174(8)	2.0936(4)	987(57)	0.164(11)	225(5)	0.228(18)	0.86(19)
10	47.22(3)	1.9233(11)	789(51)	0.69(4)	690(31)	0.87(10)	1.3(2)
11	47.500(12)	1.9126(5)	852(53)	0.18(2)	191(31)	0.22(5)	0.8(2)
12	48.533(9)	1.8742(3)	1025(58)	0.212(10)	274(6)	0.27(2)	1.9(3)
13	50.766(17)	1.7969(6)	657(47)	0.489(13)	377(9)	0.57(5)	0.74(11)
14	54.26(3)	1.6892(9)	287(31)	0.82(2)	250(9)	0.87(13)	1.25(18)
15	56.631(12)	1.6239(5)	186(25)	0.15(2)	43(3)	0.23(5)	1.8(11)
16	57.427(13)	1.6033(3)	468(40)	0.202(16)	121(4)	0.26(3)	1.0(3)
17	60.637(14)	1.5259(3)	143(22)	0.58(4)	88(7)	0.62(14)	0.20(10)
18	62.56(6)	1.4835(12)	136(21)	0.78(5)	113(7)	0.83(18)	0.55(17)
19	64.64(5)	1.4407(11)	178(24)	0.89(5)	169(7)	0.95(17)	2.1(5)
20	65.64(5)	1.4212(10)	130(21)	0.31(5)	42(4)	0.33(8)	1.7(11)

	Function name	Shift axial displacement
	param0	0
	param1	0
	param2	0
Calcite, syn	Scale factor	s 21.0(10)
	FWHM	U 0.1531
		V -0.1033
		W 0.0519
	Asym. factor	A0 1.1114
		A1 2.8627
	Decay rate factor	etaL0/mL0 0.7759
		etaL1/mL1 -0.3983
		etaL2/mL2 -0.0000
		etaH0/mH0 0.5270
		etaH1/mH1 -0.2386
		etaH2/mH2 0.0000
	Preferred orientation March-Dollase	h 0
		k 0
		l 0
	March coefficient	1.000000
Calcium Hydroxide	Scale factor	s 21.8(7)
	FWHM	U 1.9811
		V -0.6309
		W 0.2662
	Asym. factor	A0 0.4927
		A1 1.5052
	Decay rate factor	etaL0/mL0 -0.4992
		etaL1/mL1 0.0000
		etaL2/mL2 0.0000
		etaH0/mH0 0.4717
		etaH1/mH1 0.0000
		etaH2/mH2 0.0000
	Preferred orientation March-Dollase	h 0
		k 0
		l 0
	March coefficient	1.000000
Lime, syn	Scale factor	s 1.3(2)



FWHM	U	0.0000
	V	1.0625
	W	0.0001
Asym. factor	A0	0.0000
	A1	0.0000
Decay rate factor	etaL0/mL0	0.4610
	etaL1/mL1	-0.4367
	etaL2/mL2	0.0000
	etaH0/mH0	0.0004
	etaH1/mH1	-0.0000
	etaH2/mH2	0.0000
Preferred orientation March-Dollase	h	0
	k	0
	l	0
	March coefficient	1.00000

Lattice constants

Angular correction

Analysis results

Data set name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)
Serbuk Marmer	4.987560	4.987560	17.064797	90.000000	90.000000	120.000000
Serbuk Marmer	3.595380	3.595380	4.901768	90.000000	90.000000	120.000000
Serbuk Marmer	4.811305	4.811305	4.811305	90.000000	90.000000	90.000000

Phase name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)	V(A ³)
Calcite, syn	4.987560	4.987560	17.064797	90.000000	90.000000	120.000000	367.627506
Calcium Hydroxide	3.595380	3.595380	4.901768	90.000000	90.000000	120.000000	54.874793
Lime, syn	4.811305	4.811305	4.811305	90.000000	90.000000	90.000000	111.375250

Crystallite size and lattice strain

Williamson-Hall method

Data set name

Crystallite size(A)

Strain(%)

Phase name

Crystallite size(A)

Size distribution

Strain(%)

Distribution type

Calcite, syn

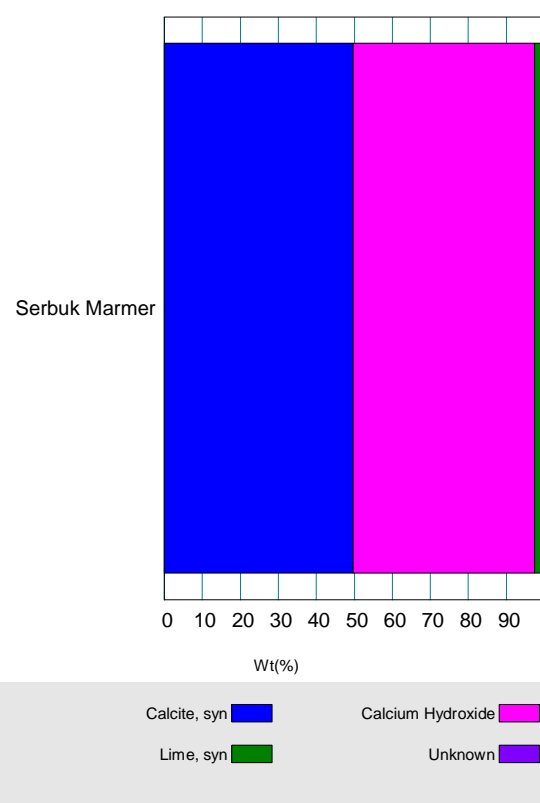
Calcium Hydroxide

Lime, syn

CSSGraph.emf

Quantitative analysis results (RIR)

Phase name	Content(%)
Calcite, syn	49.6(5)
Calcium Hydroxide	47.7(5)
Lime, syn	2.61(16)

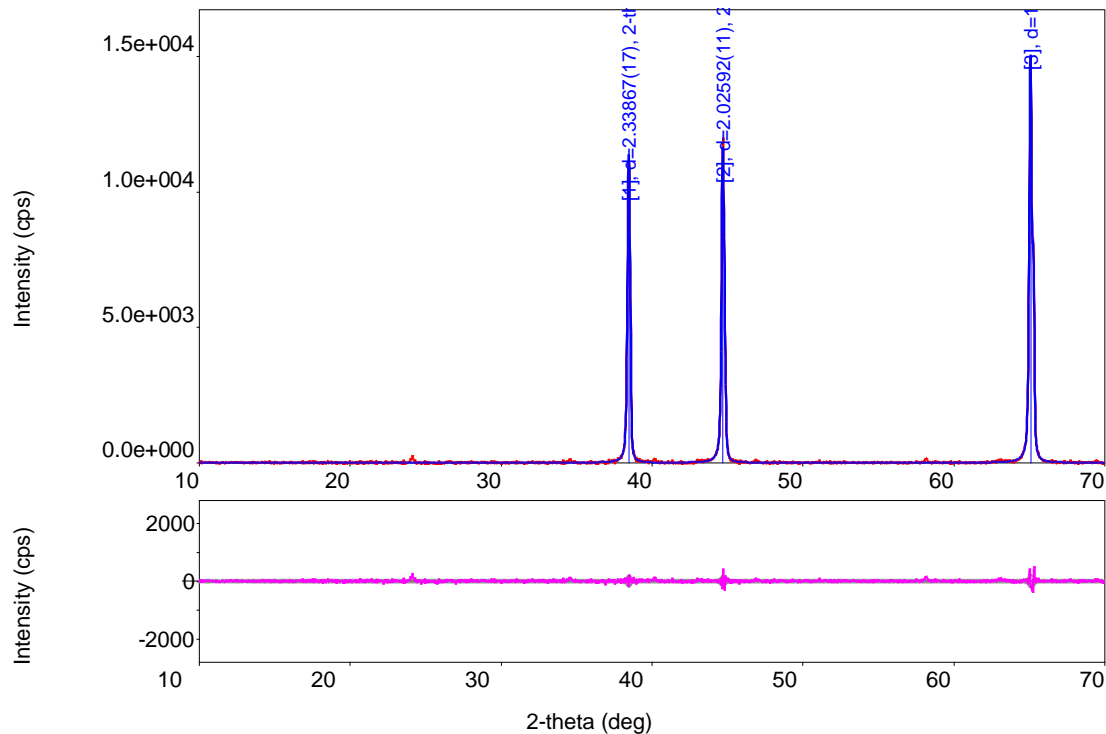


Analysis Results

General Information

Analysis date	2015/03/10 14:51:36	Measurement date	2015/03/10 13:36:10
Sample name	TEST SAMPLE	Operator	Dilla
File name	Serbuk Aluminium.raw		
Comment			

Measurement profile



Measurement conditions

X-Ray	30 kV , 15 mA	Scan speed / Duration time	4.0000 deg./min.
Goniometer		Step width	0.0200 deg.
Attachment		Scan axis	2theta/theta
Filter	Kb filter	Scan range	10.0000 - 70.0000 deg.
CBO selection slit		Incident slit	1.25 deg.
Diffracted beam mono.		Length limiting slit	-
Detector	MiniFlex2 counter	Receiving slit #1	1.25 deg.
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	0.3mm

Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Aluminum, syn	Al	0.765	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	00-004-0787
Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Aluminum, syn	Al	225 : Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2011	00-004-0787

Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	38.461(3)	2.33867(17)	9102(174)	0.171(2)	2006(12)	0.220(6)	1.36(9)
2	44.694(3)	2.02592(11)	9794(181)	0.178(2)	2258(12)	0.231(5)	1.08(6)
3	65.0947(18)	1.43176(3)	13955(216)	0.1751(19)	3207(16)	0.230(5)	1.25(5)

Parameters used for WPPF

Profile parameter

Common parameter	Background	Data	Serbuk Aluminium
		Function name	B-spline
		param0	201.98898692252064
		param1	237.47316474291969
		param2	236.62681092221115
		param3	571.40670802207148
		param4	410.51385201793784
		param5	405.77067162636263
		param6	421.82610720482091
		param7	389.06323711726759
		param8	394.80474690808256
		param9	271.01888158574997
		param10	282.99229041050489
		param11	255.2461090147726
		param12	280.27546055911108
		param13	334.58770227828768
		param14	264.33688978687121
		param15	308.64665342345876
		node0	10
		node1	15.619999999999999
		node2	21.239999999999998
		node3	26.859999999999999
		node4	31.699999999999999
		node5	36.539999999999999
		node6	41.380000000000003
		node7	46.219999999999999
		node8	50.659999999999997
		node9	55.100000000000001
		node10	59.539999999999999
		node11	63.020000000000003
		node12	66.5



	node13	70
Common parameter	Peak shift	
	Function name	Shift axial displacement
	param0	0
	param1	0
	param2	0
Aluminum, syn	Scale factor	s 41(130)
	FWHM	U 0.0000
		V 0.0016
		W 0.0298
	Asym. factor	A0 0.1914
		A1 0.0000
	Decay rate factor	etaL0/mL0 0.5799
		etaL1/mL1 0.0366
		etaL2/mL2 0.0000
		etaH0/mH0 0.3312
		etaH1/mH1 0.1878
		etaH2/mH2 0.0000
	Preferred orientation March-Dollase	h 0
		k 0
		l 0
	March coefficient	1.000000



Lattice constants

Angular correction

Analysis results

Data set name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)
Serbuk Aluminium	4.050670	4.050670	4.050670	90.000000	90.000000	90.000000

Phase name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)	V(A^3)
Aluminum, syn	4.050670	4.050670	4.050670	90.000000	90.000000	90.000000	66.463123

Crystallite size and lattice strain

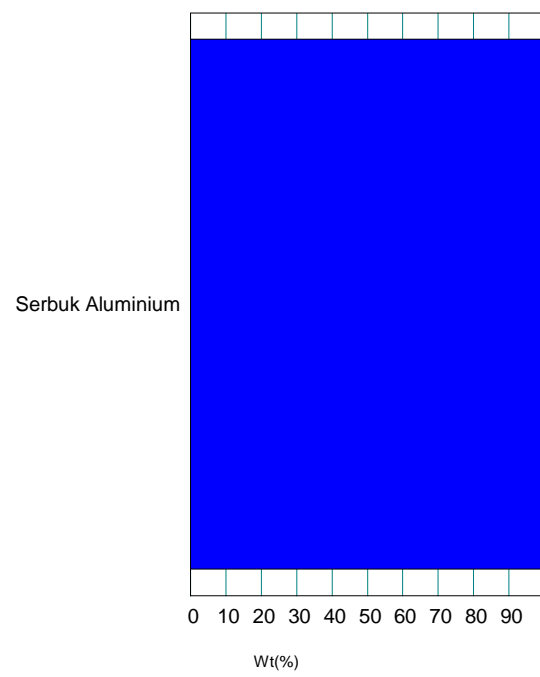
Williamson-Hall method

Data set name	Crystallite size(A)	Strain(%)
Phase name	Crystallite size(A)	Strain(%)
Aluminum, syn	-	-

CSSGraph.emf

Quantitative analysis results (RIR)

Phase name	Content(%)
Aluminum, syn	100.0(5)

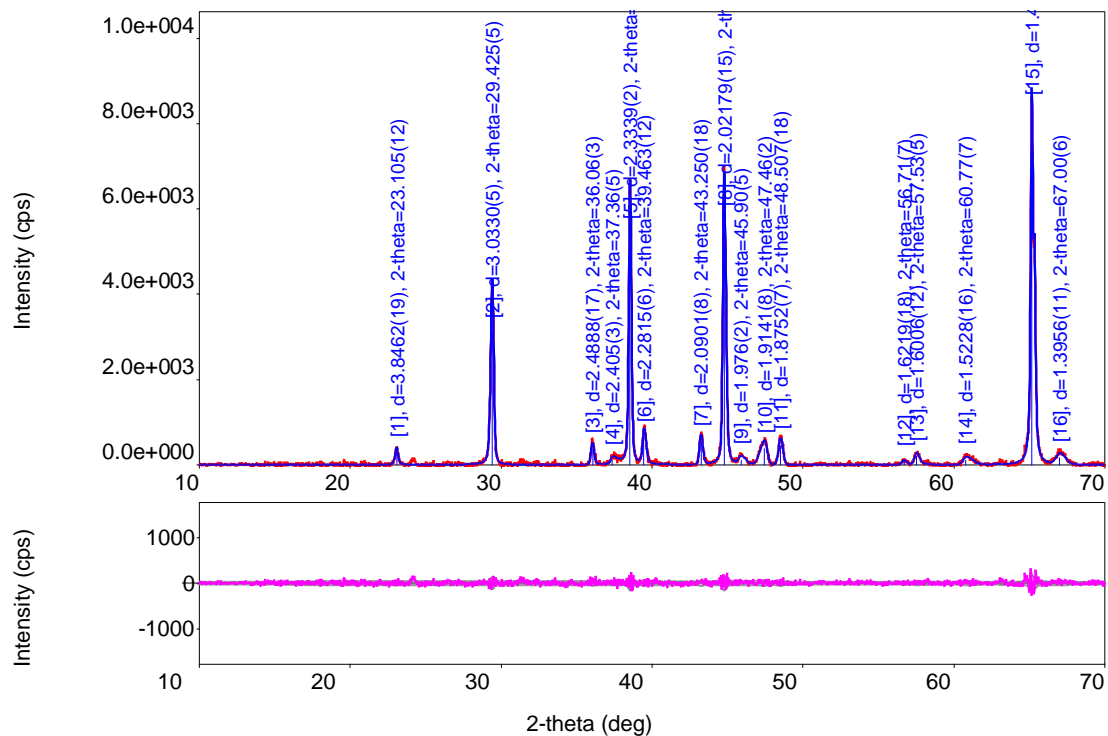


Lampiran Analysis Results

General Information

Analysis date	2015/03/13 16:09:43	Measurement date	2015/03/10 12:24:49
Sample name	TEST SAMPLE	Operator	Dilla
File name	20% 650 4H.raw		
Comment			

Measurement profile



Measurement conditions

X-Ray	30 kV , 15 mA	Scan speed / Duration time	4.0000 deg./min.
Goniometer		Step width	0.0200 deg.
Attachment		Scan axis	2Theta/Theta
Filter	Kb filter	Scan range	10.0000 - 70.0000 deg.
CBO selection slit		Incident slit	1.25 deg.
Diffrected beam mono.		Length limiting slit	-
Detector	MiniFlex2 counter	Receiving slit #1	1.25 deg.
Scan mode	CONTINUOUS	Receiving slit #2	0.3mm

Qualitative analysis results

Phase name	Formula	Figure of merit	Phase reg. detail	DB card number
Calcite, syn	Ca (C O3)	0.476	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	01-085-0849
Aluminum, syn	Al	0.851	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	01-071-4625
Lime, syn	Ca O	1.649	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	01-070-5490
gamma-(Al2 O3)1.333	(Al2 O3)1.333	0.876	ICDD (PDF-2/Release 2011 RDB)	01-075-0921

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number
Calcite, syn	Ca (C O3)	167 : R-3c,hexagonal	ICDD (PDF-2/Release 2011	01-085-0849
Aluminum, syn	Al	225 : Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2011	01-071-4625
Lime, syn	Ca O	225 : Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2011	01-070-5490
gamma-(Al2 O3)1.333	(Al2 O3)1.333	225 : Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2011	01-075-0921

Peak list

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	23.105(12)	3.8462(19)	289(31)	0.185(18)	77(5)	0.27(5)	2.7(6)
2	29.425(5)	3.0330(5)	3085(101)	0.227(3)	867(8)	0.281(12)	1.53(13)
3	36.06(3)	2.4888(17)	388(36)	0.21(2)	98(6)	0.25(4)	1.3(7)
4	37.36(5)	2.405(3)	119(20)	0.55(7)	85(9)	0.71(19)	0.29(15)
5	38.543(4)	2.3339(2)	5419(134)	0.163(3)	1141(11)	0.211(7)	1.23(12)
6	39.463(12)	2.2815(6)	643(46)	0.233(11)	194(6)	0.30(3)	0.79(14)
7	43.250(18)	2.0901(8)	552(43)	0.215(14)	137(6)	0.25(3)	1.3(4)
8	44.790(4)	2.02179(15)	5717(138)	0.178(4)	1323(10)	0.231(7)	1.22(10)
9	45.90(5)	1.976(2)	129(21)	0.51(5)	70(6)	0.54(13)	0.6(2)
10	47.46(2)	1.9141(8)	395(36)	0.515(17)	216(7)	0.55(7)	2.1(4)
11	48.507(18)	1.8752(7)	471(40)	0.304(12)	152(5)	0.32(4)	1.0(2)
12	56.71(7)	1.6219(18)	85(17)	0.30(8)	32(5)	0.37(13)	1.4(12)
13	57.53(5)	1.6006(12)	214(27)	0.33(5)	91(8)	0.42(9)	1.1(7)
14	60.77(7)	1.5228(16)	132(21)	0.70(6)	99(10)	0.75(19)	0.4(2)
15	65.175(3)	1.43018(6)	8313(166)	0.167(3)	1978(16)	0.238(7)	0.87(8)
16	67.00(6)	1.3956(11)	179(24)	0.67(5)	127(10)	0.71(15)	0.7(3)



		node13	70
Common parameter	Peak shift	Function name	Shift axial displacement
		param0	0
		param1	0
		param2	0
Calcite, syn	Scale factor	s	12.6(4)
	FWHM	U	0.8626
		V	-0.4593
		W	0.1115
	Asym. factor	A0	1.0967
		A1	2.6945
	Decay rate factor	etaL0/mL0	0.2416
		etaL1/mL1	0.0000
		etaL2/mL2	0.0000
		etaH0/mH0	0.4527
		etaH1/mH1	0.0000
		etaH2/mH2	0.0000
	Preferred orientationMarch-Dollase	h	0
		k	0
		l	0
		March coefficient	1.000000
Aluminum, syn	Scale factor	s	24(77)
	FWHM	U	0.0000
		V	-0.0015
		W	0.0296
	Asym. factor	A0	0.8015
		A1	1.6419
	Decay rate factor	etaL0/mL0	0.0000
		etaL1/mL1	0.3183
		etaL2/mL2	0.0000
		etaH0/mH0	0.4203
		etaH1/mH1	0.2670
		etaH2/mH2	0.0000
	Preferred orientationMarch-Dollase	h	0
		k	0
		l	0



		March coefficient	1.000000
Lime, syn	Scale factor	s	1.1(7)
	FWHM	U	0.0000
		V	0.0000
		W	0.3967
	Asym. factor	A0	-0.8462
		A1	0.0000
	Decay rate factor	etaL0/mL0	0.2413
		etaL1/mL1	0.0000
		etaL2/mL2	0.0000
		etaH0/mH0	0.2489
		etaH1/mH1	0.0000
		etaH2/mH2	0.0000
	Preferred orientation March-Dollase	h	0
		k	0
		l	0
		March coefficient	1.000000
gamma-(Al2 O3)1.333	Scale factor	s	1.07(10)
	FWHM	U	0.0000
		V	0.2949
		W	0.0001
	Asym. factor	A0	-0.1431
		A1	0.3318
	Decay rate factor	etaL0/mL0	0.3205
		etaL1/mL1	0.0000
		etaL2/mL2	0.0000
		etaH0/mH0	0.3303
		etaH1/mH1	0.0000
		etaH2/mH2	0.0000
	Preferred orientation March-Dollase	h	0
		k	0
		l	0
		March coefficient	1.000000

Lattice constants

Angular correction

Analysis results

Data set name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)
20% 650 4H	4.979110	4.979110	17.074668	90.000000	90.000000	120.000000
20% 650 4H	4.043573	4.043573	4.043573	90.000000	90.000000	90.000000
20% 650 4H	4.810626	4.810626	4.810626	90.000000	90.000000	90.000000
20% 650 4H	3.949196	3.949196	3.949196	90.000000	90.000000	90.000000

Phase name	a(A)	b(A)	c(A)	alpha(deg)	beta(deg)	gamma(deg)	V(A^3)
Calcite, syn	4.979110	4.979110	17.074668	90.000000	90.000000	120.000000	366.594901
Aluminum, syn	4.043573	4.043573	4.043573	90.000000	90.000000	90.000000	66.114354
Lime, syn	4.810626	4.810626	4.810626	90.000000	90.000000	90.000000	111.328096
gamma-(Al2 O3	3.949196	3.949196	3.949196	90.000000	90.000000	90.000000	61.592257

Crystallite size and lattice strain

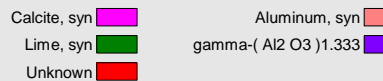
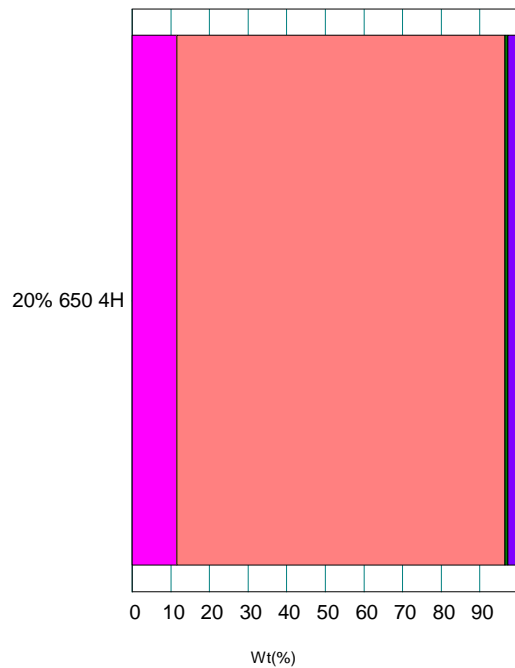
Williamson-Hall method

Data set name	Crystallite size(A)	Strain(%)
Phase name	Crystallite size(A)	Strain(%)
Calcite, syn	-	-
Aluminum, syn	-	-
Lime, syn	-	-
gamma-(Al2 O3	-	-

CSSGraph.emf

Quantitative analysis results (RIR)

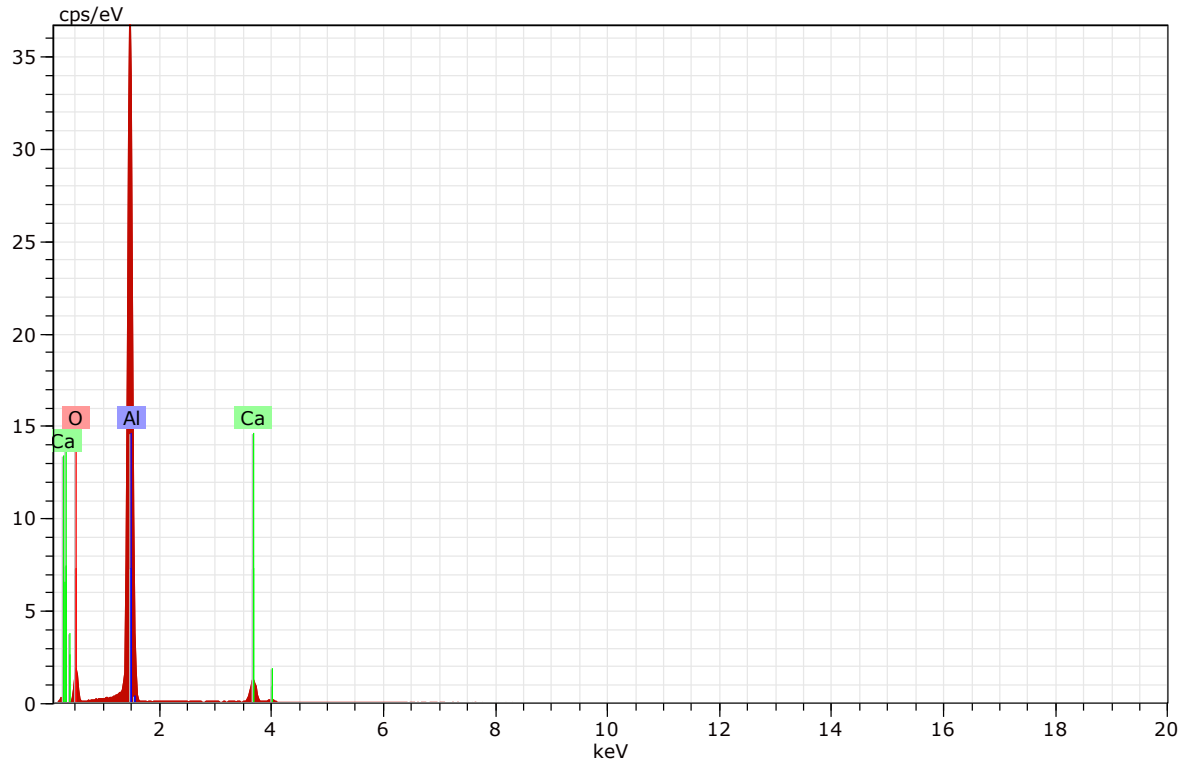
Phase name	Content(%)
Calcite, syn	11.60(11)
Aluminum, syn	84.9(7)
Lime, syn	0.81(8)
gamma-(Al2 O3)1.333	2.7(2)



20%-600-3H



Tescan Vega3SB/Fisika_UNM



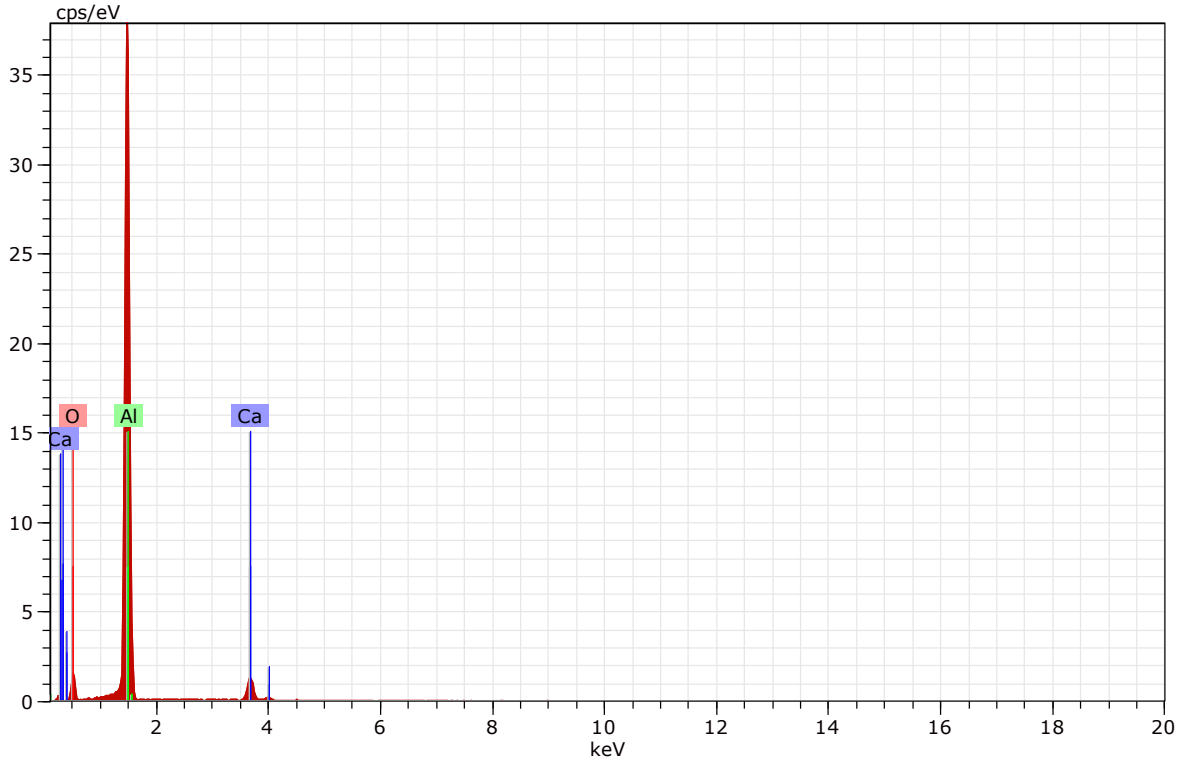
Spectrum: test

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	70.37	46.21	59.66		0.00	36.75
Aluminium	76.82	50.45	38.62	Al2O3	95.32	11.14
Calcium	5.09	3.34	1.72	CaO	4.68	0.62
<hr/>						
Total:	152.28	100.00	100.00			

20%-650-3H



Tescan Vna3SR/Fisika I INM



Spectrum: test

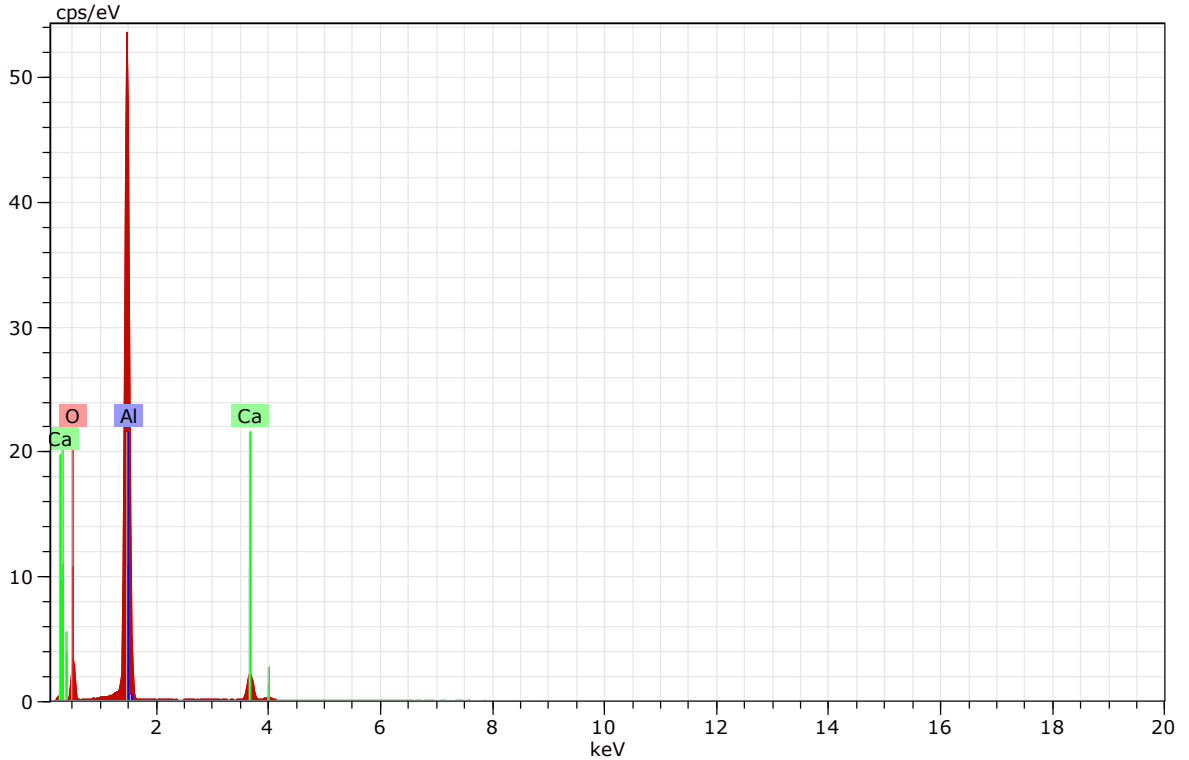
Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. [wt.%]	C Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	71.48	46.17	59.64		0.00	38.79
Aluminium	77.95	50.36	38.57	Al2O3	95.15	11.30
Calcium	5.37	3.47	1.79	CaO	4.85	0.64

Total:	154.79	100.00	100.00			

20%-700-3H



Tescan Vega3SB/Fisika_UNM



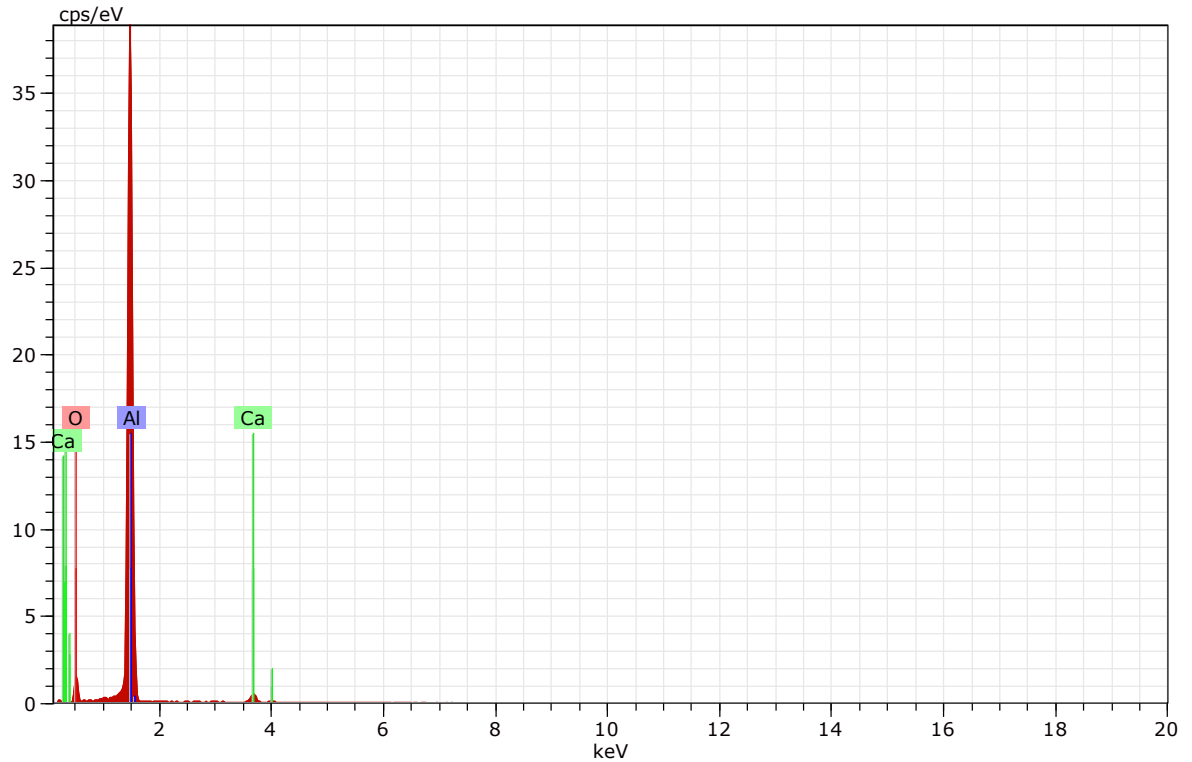
Spectrum: test

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	71.22	45.98	59.56		0.00	33.23
Aluminium	77.13	49.79	38.25	Al2O3	94.09	11.16
Calcium	6.55	4.23	2.19	CaO	5.91	0.72
<hr/>						
Total:	154.90	100.00	100.00			

20%-650-2H



Tescan Vega3SB/Fisika_UNM



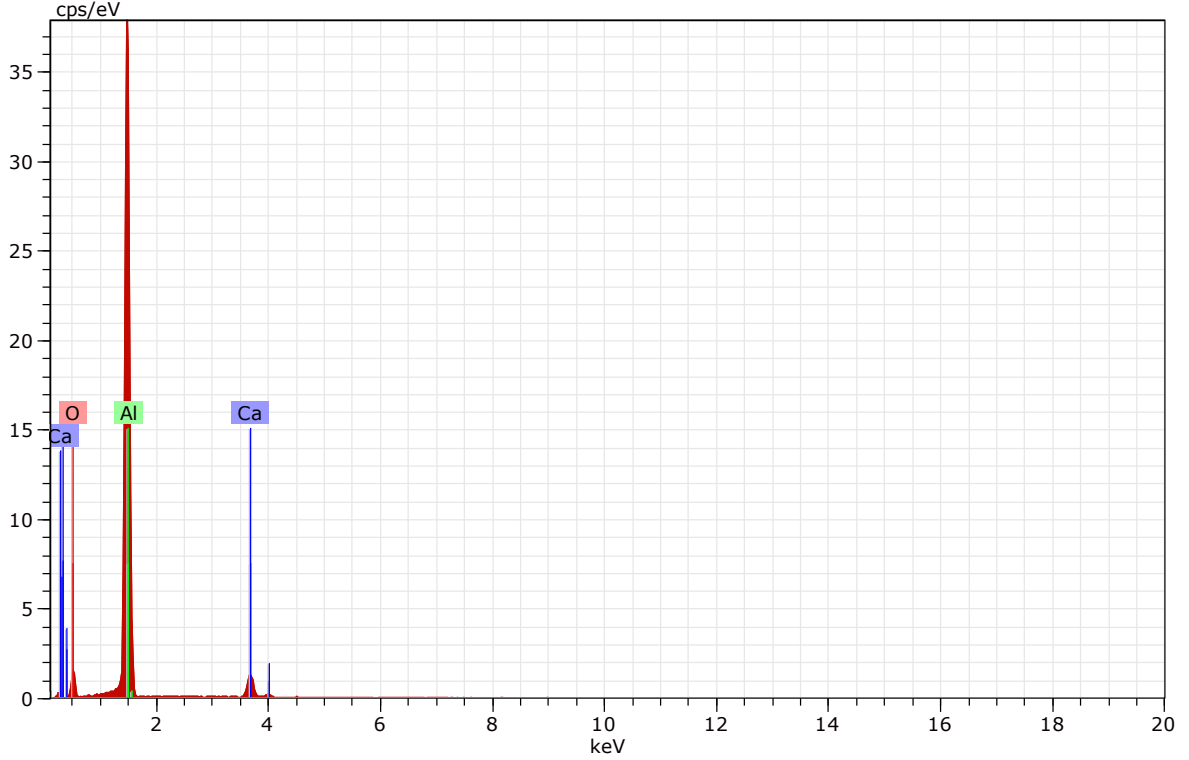
Spectrum: test

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. [wt.%]	C Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	84.57	46.72	59.86		0.00	46.16
Aluminium	93.97	51.91	39.44	Al ₂ O ₃	98.09	13.61
Calcium	2.47	1.37	0.70	CaO	1.91	0.40
Total:		181.01	100.00	100.00		

20%-650-3H



Tescan Vna3SR/Fisika I INM



Spectrum: test

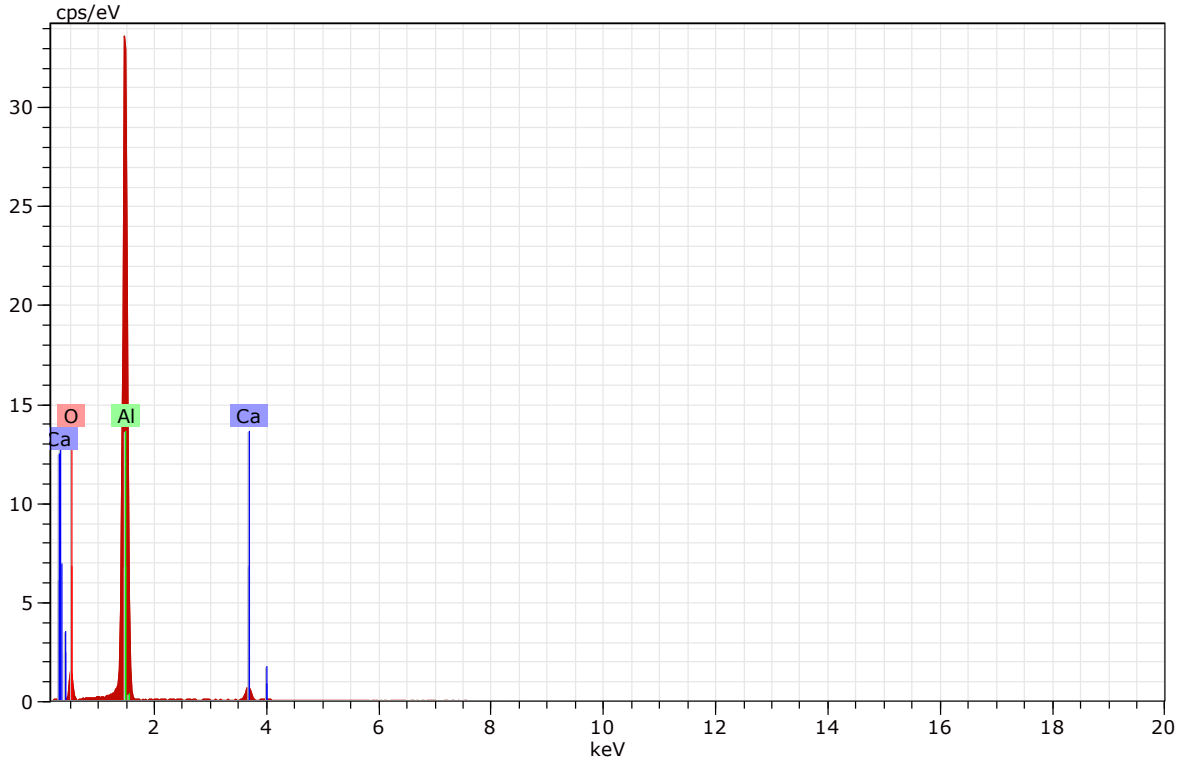
Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. [wt.%]	Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	71.48	46.17	59.64		0.00	38.79
Aluminium	77.95	50.36	38.57	Al2O3	95.15	11.30
Calcium	5.37	3.47	1.79	CaO	4.85	0.64

Total:	154.79	100.00	100.00			

20%-650-4H



Tescan Veeaa3SB Fisika UNM



Spectrum: test

Element	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	norm. Comp. [wt.%]	C Error (3 Sigma) [wt.%]
Oxygen	83.80	46.53	59.78		0.00	45.62
Aluminium	92.51	51.37	39.14	Al2O3	97.06	13.41
Calcium	3.79	2.10	1.08	CaO	2.94	0.53
Total:		180.09	100.00	100.00		



Lampiran 6

Persiapan pembeentukan spesimen komposit



Gambar 1 Campuran dalam berbagai fraksi berat yang siap dimixing/blending



Gambar 2. Persiapan kompaksi



Gambar 3. Spesimen komposit setelah disinter



Lampiran 7

Proses pengujian kekerasan dan pengambilan foto mikro



Gambar 4. Pengujian kekerasan permukaan

Gambar 5. Pengujian kekerasan penampang



Gambar 6. Pengambilan gambar untuk foto mikro penampang



Lampiran 8

Spesimen Komposit Aluminium-marmer yang dihasilkan



Gambar 7. Spesimen komposit dengan berbagai waktu penahanan pada temperatur sinter 650°C.



Gambar 8. Tampilan permukaan spesimen yang disinter pada temperatur 700°C