

Buku Referensi

METALURGI SERBUK
Teknologi dan Sintesis Paduan
Logam

Suprianto

Suherman

Farida Ariani

USU Press

Art Design, Publishing & Printing

Universitas Sumatera Utara, Jl. Pancasila, Padang Bulan,
Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20155

Telp. 0811-6263-737

usupress.usu.ac.id

© USU Press 2023

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang; dilarang memperbanyak menyalin, merekam sebagian atau seluruh bagian buku ini dalam bahasa atau bentuk apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

ISBN

Suprianto

Buku Referensi Metalurgi Serbuk: Teknologi dan Sintesis Paduan Logam/Suprianto; Suherman; Farida Ariani – Medan: USU Press 2023

viii, 221 p; illus : 23 cm

Bibliografi

ISBN:

Dicetak di Medan, Indonesia

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah menganugerahkan berbagai nikmat diantaranya nikmat kesehatan dan kesempatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan buku referensi bidang metalurgi serbuk dengan judul Metalurgi Serbuk, Teknologi dan Sintesis Paduan Logam tepat pada waktunya.

Buku ini berisi mengenai teori dasar Metalurgi serbuk, dari penyiapan serbuk, *mixing*, *sintering* dan aplikasi untuk sintesis beberapa jenis paduan yang berbasis logam diantaranya logam ringan dan komposit, Cu-based dan *refractory alloy*. Diharapkan buku ini dapat memperkaya sumber referensi bagi masyarakat umum dan mahasiswa yang mempelajari teknologi metalurgi serbuk.

Penulis tidak lupa menghaturkan ribuan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu, khususnya tim penelitian yang tergabung di dalam *alloy and processing research center* yang telah banyak mencurahkan waktu untuk membantu penyelesaian buku referensi ini, diantaranya Bagus Prasetyo, Agung Ardiyansyah, Dwiki Rifhardi Siregar dan Dendi Hadiarsa serta rekan-rekan lainnya yang tidak bisa disebutkan namanya satu persatu..

Penulis menyadari buku referensi metalurgi serbuk ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk perbaikan buku ini dimasa yang akan datang maka penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk kesempurnaan buku ini. Demikian yang dapat disampaikan sebagai kata pengantar jika ada kesalahan dalam hal penulisan maka penulis memohon maaf kepada seluruh pembaca.

DAFTAR ISI

| | |
|---|----|
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI | ii |
| DAFTAR GAMBAR | iv |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Pengantar Metalurgi Serbuk | 1 |
| 1.2 Sejarah Perkembangan Metalurgi Serbuk..... | 3 |
| BAB 2 PROSES PEMBUATAN SERBUK..... | 17 |
| 2.1 Pendahuluan..... | 17 |
| 2.2 Teknik Atomisasi..... | 17 |
| 2.3 Teknik Fabrikasi Secara Mekanis..... | 27 |
| 2.4 Metode Kimia dan <i>Electrolitic</i> | 29 |
| BAB 3 <i>MIXING</i> SERBUK LOGAM..... | 38 |
| 3.1 Proses <i>Mixing</i> | 38 |
| 3.2 Pencampuran Kering (<i>dry mixing</i>) Partikel | 43 |
| 3.3 Pencampuran Menggunakan Binder Dan Lubrikasi | 46 |
| 3.4 Pencampuran Menggunakan <i>Mechanical Alloying</i> | 49 |
| BAB 4 <i>AGLOMERATION</i> , PELUMASAN, DAN <i>COATING</i> PARTIKEL | 57 |
| 4.1 Pendahuluan Aglomerasi | 57 |
| 4.2 Aglomerasi Pada Berbagai Jenis Material | 61 |
| 4.3 Lubrikasi Serbuk..... | 63 |
| 4.4 <i>Coating</i> Partikel | 65 |
| BAB 5 PROSES KOMPAKSI..... | 72 |
| 5.1 Pendahuluan..... | 72 |
| 5.2 Penekanan Dingin (<i>Cold Compaction</i>)..... | 75 |
| 5.3 <i>Warm Compaction</i> | 78 |
| BAB 6 KOMPAKSI TEMPERATUR TINGGI..... | 90 |
| 6.1 Pendahuluan..... | 90 |
| 6.2 Penekanan Panas (<i>Hot pressing</i>)..... | 90 |

| | | |
|---|--|-----|
| 6.3 | <i>Hot extrusion</i> | 93 |
| 6.4 | <i>Spark Plasma Sintering (SPS)</i> | 95 |
| 6.5 | <i>Hot Isostatic pressing (HIP)</i> | 102 |
| 6.6 | <i>Injection molding</i> | 106 |
| BAB 7 PROSES SINTERING | | 115 |
| 7.1 | Pendahuluan | 115 |
| 7.2 | <i>Solid State Sintering</i> | 117 |
| 7.3 | <i>Liquid State Sintering</i> | 119 |
| 7.4 | <i>Sinter Konvensional</i> | 122 |
| 7.5 | <i>Atmosphere Sintering</i> | 123 |
| BAB 8 PADUAN LOGAM RINGAN DAN KOMPOSIT | | 139 |
| 8.1 | Pendahuluan | 139 |
| 8.2 | Paduan <i>binary</i> aluminium | 141 |
| 8.3 | Paduan logam berbasis aluminium..... | 145 |
| 8.4 | Komposit matrik aluminium | 148 |
| 8.5 | Paduan logam berbasis serbuk magnesium (Mg)..... | 150 |
| BAB 9 PADUAN BERBASIS TEMBAGA | | 165 |
| 9.1 | Pendahuluan | 165 |
| 9.2 | Sintesis paduan binary tembaga melalui teknik PM | 167 |
| 9.3 | Sintesis Paduan Tembaga Menggunakan Metode PM... | 170 |
| 9.4 | Sintesis Tembaga sebagai elemen <i>alloys</i> | 173 |
| BAB 10 PADUAN BERBASIS ELEMEN REFRAKTORI | | 187 |
| 10.1 | Pendahuluan | 187 |
| 10.2 | Paduan Berbasis Tungsten | 191 |
| 10.3 | Paduan Berbasis Mo..... | 194 |
| 10.4 | Paduan Berbasis Ta, Nb, Re..... | 195 |
| 10.5 | Refractory sebagai elemen <i>alloy</i> | 200 |
| GLOSARIUM | | 214 |
| INDEX | | 218 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|---|----|
| Gambar 1.1 | Skema tahapan proses metalurgi serbuk..... | 2 |
| Gambar 1.2 | Mekanisme dispersi yang digunakan pada CNT komposit matrik logam | 5 |
| Gambar 1.3 | Skema proses <i>injection molding</i> | 7 |
| Gambar 1.4 | Penelitian yang dilakukan terhadap mekanisme produksi dari MMC 10 tahun terakhir | 11 |
| Gambar 2.1 | Skema proses atomisasi gas tipe horizontal | 18 |
| Gambar 2.2 | Skema proses atomisasi air..... | 21 |
| Gambar 2.3 | Skema proses atomisasi model sentripugal | 25 |
| Gambar 2.4 | Skema proses pembentukan <i>droplet</i> dari ujung <i>disc</i> | 26 |
| Gambar 2.5 | Skema proses pembuatan serbuk menggunakan jar mill..... | 28 |
| Gambar 2.6 | Skema pembuatan serbuk menggunakan electrolytic..... | 32 |
| Gambar 3.1 | Visualisasi kualitas hasil <i>mixing</i> yang berbeda; (a) keadaan tidak bercampur, (b) Kondisi pencampuran yang aktual, (c) Kondisi pencampuran <i>random</i> , dan (d) Kondisi pencampuran yang ideal | 41 |
| Gambar 3.2 | Bentuk peralatan untuk percampuran serbuk; (a) <i>Portable drum mixer</i> , (b) Rotating double mixer, (c) V-shaped mixer | 44 |
| Gambar 3.3 | Komponen utama dari peralatan <i>planetary ball mill</i> (sumber; sumber: <i>high temperature alloying laboratory</i> , NDHU). | 50 |
| Gambar 3.4 | <i>Ball-powder-ball collision</i> yang terjadi antara bola-serbuk-bola dari pencampuran serbuk selama proses MA | 51 |
| Gambar 3.5 | Hasil pengujian XRD sampel serbuk Co-Al-W-Ta-Y2O3 pada berbagai durasi <i>milling</i> | 52 |
| Gambar 4.1 | Ilustrasi serbuk logam mengalami aglomerasi | 57 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Gambar 4.2 | Ilustrasi ikatan cairan yang menyebabkan aglomerasi | 59 |
| Gambar 4.3 | Skema gaya kapiler antara dua partikel dari Ce-oxide yang mengalami aglomerasi | 59 |
| Gambar 5.1 | Contoh cetakan dan pin yang digunakan pada proses kompaksi..... | 73 |
| Gambar 5.2 | Tahapan gerakan pin untuk menekan <i>powder</i> dalam cetakan | 74 |
| Gambar 5.3 | Skema proses pemberian beban pada proses kompaksi..... | 76 |
| Gambar 5.4 | Hubungan antara tekanan kompaksi terhadap densitas paduan | 77 |
| Gambar 5.5 | Band Heater pada proses <i>warm compaction</i> | 79 |
| Gambar 5.6 | Skema proses <i>cold isostatic compaction/Pressing</i> | 81 |
| Gambar 5.7 | Skema tahapan proses <i>cold isostatic compaction</i> | 82 |
| Gambar 6.1 | Skema proses <i>hot pressing</i> | 91 |
| Gambar 6.2 | Skema proses ekstrusi panas dari serbuk..... | 94 |
| Gambar 6.3 | Skema proses spark plasma sintering | 96 |
| Gambar 6.4 | Distribusi publikasi yang berkaitan dengan SPS per negara dalam persen | 98 |
| Gambar 6.5 | (a) Skema dari transport atom <i>pada Nabarro-Herring</i> , dan (b) <i>Coble creep</i> , difusi terjadi sepanjang batas butir..... | 102 |
| Gambar 6.6 | Skema proses <i>hot isostatic pressing (HIP)</i> | 103 |
| Gambar 6.7 | Skema tahapan proses <i>metal injection molding</i> ... | 107 |
| Gambar 7.1 | Pembagian jenis sinter tanpa tekanan | 115 |
| Gambar 7.2 | Ilustrasi dua partikel bentuk <i>sphere</i> mengalami sinter dan terjadinya ikatan antar partikel selama proses | 116 |
| Gambar 7.3 | Skema mekanisme sintering yang terjadi terhadap dua buah partikel berbentuk <i>sphere</i> | 118 |
| Gambar 7.4 | Skema proses sinter konvensional | 123 |
| Gambar 7.5 | Ilustrasi peringkat biaya atmosphere sintering | 126 |
| Gambar 7.6 | Peralatan vacuum furnace..... | 127 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Gambar 7.7 | Hasil uji XRD serbuk setelah di milling 24h untuk; (a) CoAlW, (b) CoAlW-Ta, (c) CoAlW-YO dan (d) CoAlW-Ta-YO. | 129 |
| Gambar 7.8 | Hasil XRD paduan (a) CoAlW, (b) CoAlW-Ta, (c) CoAlW-YO dan (d) CoAlW-Ta-YO setelah sinter, 24 h milling..... | 129 |
| Gambar 7.9 | Skema proses microwave sintering | 132 |
| Gambar 8.1 | Skema proses PM paduan aluminium | 140 |
| Gambar 8.2 | Morfologi permukaan (a) Green compact dan (b) enlarge area dari paduan Al-Cu | 142 |
| Gambar 8.3 | Pengaruh penambahan Cu terhadap kekerasan paduan Al-Cu..... | 143 |
| Gambar 8.4 | Mikrostruktur paduan binary Al-Cu dengan berbagai komposisi: (a) 21wt.%Cu, (b) 27wt.%Cu, (c) 30wt.%Cu, and (b) 33wt.%Cu disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk | 144 |
| Gambar 8.5 | Skema bidang kristal dari magnesium dengan struktur hcp dan CRSS beberapa elemen | 155 |
| Gambar 8.6 | Skema tantangan yang dihadapi untuk sintesis komposit matrik magnesium | 156 |
| Gambar 9.1 | Mikrostruktur paduan Cu-10wt.%Ni-5wt.%W | 171 |
| Gambar 9.2 | Hasil pengujian XRD paduan (Cu/Ni)-5wt.%W dengan rasio berbeda; (a) 90Cu10Ni, (b) 80Cu20Ni, dan (c) 70Cu30Ni..... | 172 |
| Gambar 9.3 | Distribusi elemen paduan equiatomic CoNiFeCrCu model alloy: a) SEM image, b) Co-map, c) Ni-map, d) Fe-map, e) Cr-map, f) Cu-map, g) O-map, h) C-map, dan i) perbesaran dari oxide berbentuk cluster | 176 |
| Gambar 9.4 | Hubungan antara komposisi dan durasi milling terhadap kekerasan based CoNiFeCrCu HEA | 178 |
| Gambar 9.5 | SEM image paduan W based temperatur sintering 1450°C untuk durasi milling; a) 4 jam dan b) 20 jam pembesaran yang berbeda | 179 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Gambar 10.1 | Distribusi penggunaan elemen Rhenium hingga 2011..... | 199 |
| Gambar 10.2 | Mikrostruktur heavy tungsten alloy; a) W3Mo dan b) W12Mo | 201 |
| Gambar 10.3 | Perubahan mikrostruktur pada berbagai paduan (a) CoAlW, (b) CoAlW-Ta, (c) CoAlW-YO, and (d) CoAlW-Ta-YO setelah sinter untuk milling 24 jam | 203 |
| Gambar 10.4 | Hubungan waktu milling dan jumlah <i>coating</i> | 205 |
| Gambar 10.5 | Photo SEM dari <i>coating</i> W2Ti-2Y2O3 dengan (a) BPR of 10:1 dan (b) 40:1 pada 4 jam proses milling | 206 |
| Gambar 10.6 | Kurva load–displacement dari <i>coating</i> (a) W-Co-Y2O3 dan (b) W-Co-TiC | 207 |
| Gambar 10.7 | Distribusi kekerasan pada permukaan substrat dan <i>coating</i> W-2Ti-Y2O3 pada berbagai kedalaman | 208 |
| Gambar 10.8 | Distribusi elemen dari <i>coating</i> W-2Ti-Y2O3 menggunakan teknik EDS mapping | 209 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabel 1.1 | Perkembangan teknologi metalurgi serbuk untuk sintesis material dan paduan periode (1900s-2000s) | 4 |
| Tabel 1.2 | Karakteristik umum dari beberapa senyawa intermetallic | 10 |
| Tabel 2.1 | Sifat fisis beberapa gas pada proses atomisasi | 19 |
| Tabel 3.1 | Jenis-jenis binder digunakan pada metalurgi serbuk | 47 |
| Tabel 3.2 | Jenis-jenis lubricant digunakan pada metalurgi serbuk..... | 49 |
| Tabel 4.1 | Sifat beberapa pelumas serbuk logam yang umum..... | 63 |
| Tabel 6.1 | Temperatur HIP pada berbagai jenis material | 105 |
| Tabel 7.1 | Komposisi dari atmosphere sintering | 124 |
| Tabel 8.1 | Karakteristik beberapa logam ringan | 139 |
| Tabel 8.2 | Sistem penomoran, heat treatable, dan aplikasi berbagai paduan alumunium | 145 |
| Tabel 8.3 | Sistem penamaan untuk paduan magnesium | 150 |
| Tabel 8.4 | Karakteristik beberapa paduan berbasis magnesium | 152 |
| Tabel 8.5 | Perbandingan level CRSS untuk level basal planes dari rasio c/a beberapa bahan dengan struktur HCP (25°C)..... | 155 |
| Tabel 8.6 | Partikel reinforcement komposit matrik paduan Mg | 160 |
| Tabel 9.1 | Konduktivitas elemen pada temperatur ruang | 165 |
| Tabel 9.2 | Paduan Cu dengan berbagai elemen <i>alloy</i> | 166 |
| Tabel 9.3 | Komposisi kimia dari area (i) pada gambar 9.3 paduan CoNiFeCrCu HEA | 177 |
| Tabel 9.4 | Komposisi binder pada area E dari gambar 9.5b | 179 |
| Tabel 10.1 | Karakteristik berbagai elemen refraktori utama dan <i>alloy</i> pada temperatur ruang | 189 |
| Tabel 10.2 | Komposisi fase pada titik A, B, C, dan D di gambar 10.2 | 201 |
| Tabel 10.3 | Kekerasan erbagai paduan berbasis Co-Al-W | 204 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Pengantar Metalurgi Serbuk

Teknologi metalurgi serbuk merupakan teknik fabrikasi material atau paduan yang sangat menjanjikan baik itu logam maupun non logam. Penerapan teknologi *powder metallurgy* (PM) dapat menjadi alternatif produksi suatu komponen yang tidak bisa dilakukan oleh metode lainnya. Metode PM memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan teknik produksi yang lain, sehingga penerapannya sangat luas pada berbagai bidang keteknikan, *aerospace*, biomedis, dll. Beberapa kelebihan teknologi metalurgi serbuk diantaranya adalah:

- Produksi yang mendekati bentuk asli (*near net shape*).
- Sintesis dua atau lebih jenis material berbeda dapat dilakukan.
- Menghindari material yang terbuang.
- Sesuai untuk penerapan produksi massal.
- Dapat diterapkan untuk pembuatan komponen yang berukuran kecil.
- dll.

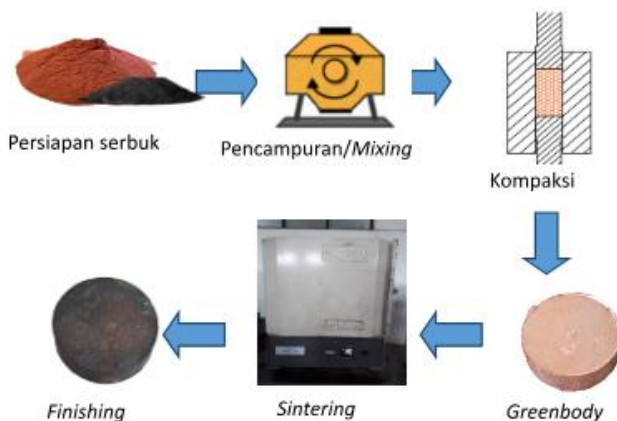
Selain kelebihan yang dimiliki, teknik ini juga memiliki beberapa keterbatasan dalam penerapan, diantaranya:

- Biaya peralatan dan serbuk relatif mahal.
- Bentuk yang kompleks akan lebih sulit diproduksi menggunakan teknologi PM.
- Sebagian serbuk logam mudah teroksidasi dan kontaminasi.
- Keterbatasan dalam memproduksi part/komponen yang relatif besar.
- dll.

Berdasarkan kelebihan dan kekurangan teknologi ini sejak awal telah mendorong berbagai studi lanjutan untuk memperbaiki berbagai keterbatasan yang dimiliki. Secara umum produksi suatu material menggunakan teknologi ini terdiri 4 proses utama, yaitu:

1. Persiapan serbuk, dilakukan untuk mendapatkan rasio komposisi serbuk yang akan disintesis.
2. Pencampuran/*mixing*, dilakukan untuk mendapatkan distribusi partikel penyusun yang lebih homogen.
3. Kompaksi, dilakukan untuk memadatkan serbuk menjadi *green compact* sehingga memudahkan penanganan.
4. *Sintering*, proses ini dilakukan pada temperatur tinggi dengan tujuan memperoleh densifikasi yang lebih baik diantara partikel penyusun.
5. *Finishing*, tahapan lanjutan setelah bulk material diperoleh yang melibatkan proses pemeriksaan kualitas maupun perlakuan lebih lanjut jika dibutuhkan.

Skema tahapan proses metalurgi serbuk secara garis besar ditampilkan pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Skema tahapan proses metalurgi serbuk

1.2 Sejarah Perkembangan Metalurgi Serbuk

Metalurgi serbuk saat ini sudah sangat berkembang dan diterapkan pada berbagai bidang keteknikan. Teknologi ini dimulai semenjak 300 B.C. dengan adanya pengembangan *iron sponge* yang berasal dari Mesir, India, dan Afrika. Setelah periode masehi yaitu A.D. 1200 pembuatan *Cementing platinum grains* dikembangkan menggunakan teknik PM di *south america*. Pengembangan platinum *powder* untuk berbagai tujuan terus dikembangkan pada periode 1781~1859 di berbagai negara eropa seperti Prancis, Jerman, Rusia, dan Inggris. Lebih lanjut, *Composite metals* (diawal 1900-an), *Intermetallics*, dan *metal-matrix composites* (1990-an) telah dikembangkan menggunakan teknologi PM^[1]. Pada awal perkembangannya komposit logam terdiri dari bahan penyusun berbasis logam *refractory* yang memiliki karakteristik titik cair cukup tinggi seperti tungsten dipadukan dengan logam yang memiliki titik cair lebih rendah (Co, Fe, Ni, dll) pada berbagai komposisi. Namun, pada beberapa dekade terakhir paduan W dengan logam ringan seperti Al-W berhasil dilakukan menggunakan teknologi PM yang hasilnya memperlihatkan kenaikan densitas, kekerasan, dan kekuatan tarik seiring dengan kenaikan (5-20%) *wt.%* tungsten^[2].

Pembuatan bearing berbasis material serbuk dimulai pada tahun 1870 di Amerika Serikat (USA). Metode ini dapat mensintesis jenis *self lubrication bearing* yang penerapannya sangat luas di berbagai bidang diantaranya otomotif (1920-an)^[1]. *Bearing* jenis ini memiliki berbagai keuntungan diantaranya penghematan dalam proses perawatan suatu peralatan dan mengurangi dampak negatif dari dihasilkannya oli bekas. Teknik PM ini terus dikembangkan untuk mensintesis berbagai jenis material diantaranya *Cemented carbides* (1915-1930) yang dikenal memiliki kekerasan yang cukup tinggi dan tahan terhadap keausan sehingga sesuai dipergunakan sebagai bahan pemerkuat jika dipadukan dengan logam lainnya dan digunakan untuk *coating* pada berbagai jenis paduan logam. Nilai kekerasan yang cukup tinggi menempatkan *cemented carbide* seperti *tungsten carbide* (WC) dengan *binder* dari *copper* (Cu) menjadi material yang potensial

sebagai *cutting tools* (1923), pada tahun 1927 perkakas potong telah tersedia di pasaran German dibawah Krupp AG^[3]. Teknologi PM terus berkembang untuk sintesis berbagai jenis material dan paduan, setelah tahun 1900 hingga 2000s disajikan pada tabel 1.1.

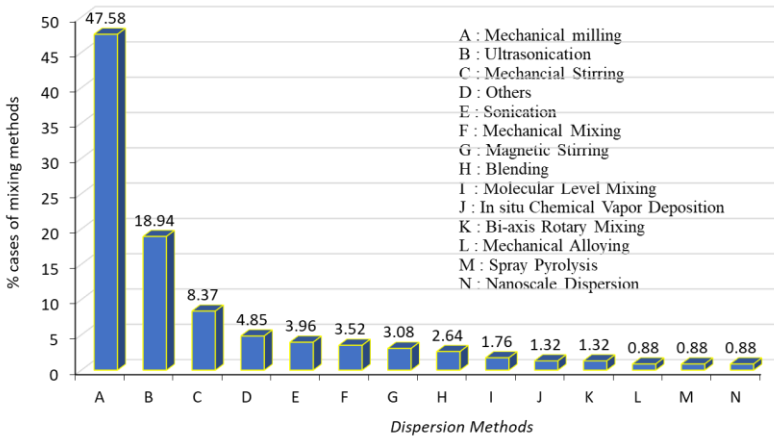
Tabel 1. Perkembangan teknologi metalurgi serbuk untuk sintesis material dan paduan periode (1900s-2000s)

| Tahun | Penerapan | Ref. |
|---------------|---|------|
| 1900s | Bahan komposit logam | [1] |
| 1920s | Bahan porous, dan <i>self lubricating bearings</i> | |
| 1950s - 1960s | <i>dispersion-strengthened products</i> | |
| 1970s | <i>Baja perkakas (tool steel)</i> , dan <i>superplastic superalloys</i> | |
| 1980s | <i>Rapid solidification</i> dan teknologi <i>powder injection molding(PIM)</i> | |
| 1990s | <i>Intermetallics</i> , komposit matrik logam (<i>MMC</i>), <i>spray forming</i> , serbuk dengan <i>nanoscale</i> | [4] |
| 2000s | <i>High entropy alloys (HEAs)</i> | |

Dispersion-strengthened products

Metalurgi serbuk memiliki kelebihan dalam mensintesis paduan yang memiliki titik cair yang jauh berbeda dan kehomogenan distribusi partikel yang baik. Era (1950-1960)-an merupakan periode awal pengembangan produk yang diperkuat menggunakan mekanisme *dispersion*. Penguatan model dispersi dapat dilakukan melalui penambahan *fibre ceramic*, serbuk, karbon *nanotube (CNT)*, *nanodiamond (ND)*, dan *oxides dispersion strengthening (ODS)*. Studi mengenai penguatan model dispersi berkembang hingga saat ini, F. Zhang, dkk., pada tahun 2017 menggunakan ND untuk memperkuat Titanium yang digunakan sebagai material biomedis melalui teknologi PM^[5]. Penggunaan ODS dalam memperkuat baja yang produknya digunakan untuk aplikasi energi nuklir melalui mekanis metalurgi serbuk telah dilakukan pada tahun 2022^[6].

Sintesis *dispersion strengthening* dari karbon *nanotube* umumnya dilakukan menggunakan teknik *mechanical alloying*, lihat gambar 1.2.



Gambar 1.2 Mekanisme dispersi yang digunakan pada CNT komposit matrik logam [7].

Tool steels, dan superplastic superalloys

Baja perkakas (*tool steels*) merupakan jenis material yang dibuat secara khusus untuk aplikasi tertentu di bidang keteknikan seperti pemotongan logam. Komponen *tool steels* dikembangkan menggunakan teknologi metalurgi serbuk di era tahun 1970-an, dan terus dikembangkan melalui berbagai penelitian hingga saat ini. Produk ini memiliki kekuatan, ketahanan aus, kekerasan dan ketangguhan yang cukup baik. Hal ini diyakini dipengaruhi oleh keberadaan elemen *alloy*, perlakuan panas dan pemilihan metode produksi yang benar. Karakteristik material ini juga dipengaruhi oleh struktur yang terbentuk, dimana mikrostruktur yang lebih homogen dapat dicapai melalui penerapan teknologi metalurgi serbuk.

Superalloy umumnya dikembangkan untuk dapat melayani pada temperatur tinggi, seperti di turbin, roket dan *heat exchanger*. Dimana sifat yang paling penting dari material ini adalah kemampuan untuk menerima beban walaupun dioperasikan mendekati titik *melt* dari

material tersebut^[8]. Material ini secara umum terdiri dari Ni, Ni-Fe, dan Co-based *superalloy* yang dikombinasikan dengan elemen-elemen lain seperti Cr, Al, Ti, B, Zr, Mg, dan C untuk mendapatkan karakteristik yang diinginkan. *Superalloy* telah dikembangkan sejak lama (1940-an) hingga saat ini, melalui penggunaan berbagai teknologi diantaranya pengecoran diterapkan lebih awal dan metalurgi serbuk di era tahun 1970-an^[1]. Keterbatasan yang dimiliki teknologi pengecoran logam telah mendorong metode PM diterapkan untuk memproduksi paduan seperti Rene 95, MERL 76, dan Astroloy dengan *grade* atau kekuatan yang tinggi dimulai pada tahun 1970-an^[9]. Pengembangan *wrought Ni-based* kombinasi *oxide dispersion strengthening* (ODS) *blade alloy* telah dimulai pada tahun 1985, penerapan ODS melalui teknologi metalurgi serbuk menghasilkan struktur butir yang halus dengan sifat *superplastic*^[10].

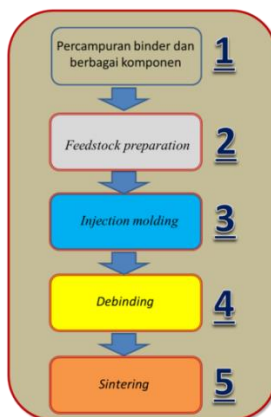
Rapid solidification dan powder injection molding

Penerapan teknologi metalurgi serbuk terus dikembangkan untuk memproduksi material paduan yang memiliki mikrostruktur dengan butir yang halus (*fine grain*) dan homogen memiliki kekuatan tinggi. Era tahun 1980-an merupakan awal teknologi *powder Rapid Solidification Technique* (RST) diterapkan pada pembuatan paduan. Teknik ini pada awalnya dikembangkan oleh perusahaan aluminium amerika (Alcoa), metode RST telah digunakan untuk memproduksi berbagai paduan diantaranya Al-Zn-Mg, dispersi fase *intermetallic*, paduan 7091 yang mengandung cobalt, dan paduan lainnya^[11]. Periode tahun 1985-1987 R. Ray dan S.C. Jha telah mengembangkan paduan dengan komposisi Al-2.7Li-5.3Mg-0.22Zr, Al-4.4Cu-0.6Mo-0.5Mg-0.6Zr-1Ni, Al-8Fe-2Mo, dan Al-6.4Zn-2.42Mg-1.49Cu-0.4Co menggunakan teknik RST^[12]. Z. Cai, dkk. pada tahun 2015 juga telah mengembangkan paduan Al-Si dengan komposisi (22-50wt.%) melalui penerapan *rapid solidification* dan teknologi metalurgi serbuk untuk mendapatkan densifikasi dan mikrostruktur lebih baik yang terbebas dari porositas untuk berbagai komposisi Si^[13]. Selain aluminium, paduan berbasis magnesium seperti Mg-Zn-RE yang

memiliki kekuatan tinggi dan *ductility* yang baik telah berhasil disintesis menggunakan teknik RS, hal ini telah dilaporkan oleh Y. Kawamura pada tahun 2006^[14]. Penerapan RST pada sintesis Mg-5Sn telah dilakukan pada tahun 2016, dihasilkannya senyawa *intermetallic* Mg₂Sn dengan distribusi mikrostruktur yang halus dan seragam (*uniform*) yang berimbas kepada perbaikan sifat mekanis paduan^[15]. Pada era yang sama penggunaan teknologi metalurgi serbuk juga dikembangkan menggunakan *injection molding* untuk sintesis suatu material baik logam maupun non logam seperti polimer.

Powder injection molding (PIM) telah mulai pada era tahun 1970-an, akan tetapi publikasi untuk paten pertama baru diperoleh pada tahun 1976 oleh Rivers dan Wicch di tahun 1980, dimana *thermal plastic binder* diterapkan^[16]. Teknologi *powder* ini merupakan teknik produksi yang dapat digunakan untuk benda yang kompleks, presisi, dan komponen dengan *near-net-shape*. Lebih lanjut, J.G.Gutiérrez, dkk^[17] telah menyampaikan bahwa proses metalurgi serbuk terdiri dari empat tahapan utama seperti diperlihatkan pada gambar 1.3.

Pada proses percampuran *powder* dan binder dapat dilakukan dengan berbagai variasi, dimana percampuran dilakukan menggunakan peralatan seperti *extruder* dan *mixer*. Pemilihan binder yang sesuai akan mempengaruhi kualitas produk hasil *injection molding* (IM).



Gambar 1.3 skema proses *injection molding*

Kriteria *binder* ^[18] yang digunakan untuk teknologi IM, diantaranya:

- Memiliki temperatur cair yang rendah dan pembekuan yang cepat.
- Memiliki kekuatan yang cukup ($\geq 4 \text{ MPa}$), viskositas rendah ($\leq 10 \text{ Pa s}$), dan fluiditas yang baik pada temperatur pencetakan.
- Bersifat *passive* secara kimia dan kemampuan untuk membasahi partikel pada sudut kontak yang rendah ($<5^\circ$).
- Mudah dihilangkan setelah proses pembentukan tanpa meninggalkan residu.
- Mudah dijumpai dipasaran dan terjangkau.

Penggunaan mesin *injection molding* selalu mempertimbangkan kontrol terhadap *compressibility*, viskositas, dan toleransi setiap tahapannya. *Debinding* merupakan proses pelepasan *binder* dari benda yang dicetak. Tahapan akhir dari proses ini adalah *sintering*, pemanasan dilakukan terhadap *green material* untuk mendapatkan ikatan antar partikel dengan temperatur bergantung kepada jenis *powder* atau penyusun paduan. Namun perlu diperhatikan kemungkinan terbentuknya porositas, meminimalisir porositas dan kekuatan *adhesif* yang kuat diantara partikel akan mempengaruhi kekuatan material.

Proses *powder injection molding* memiliki beberapa keuntungan dalam penggunaannya mensintesis suatu material atau paduan, diantaranya adalah:

- Peningkatan *compressibility/homogeneity* serbuk.
- Perbaikan pengisian cetakan dan proses pelubrikan.
- Produk dengan kepresisian tinggi dan kompleks dapat diproduksi dengan teknologi PIM.
- Kualitas permukaan yang baik.
- Dapat diterapkan pada semua jenis logam dan beberapa jenis bahan keramik dapat diproses dengan metode ini.

Material seperti *Titanium alloy*, *stainless steel* dan *ceramic* telah dikembangkan menggunakan teknologi *injection molding* semenjak 1980-an^[18]. Pembuatan material yang terdiri dari serbuk komposit Ti-48Al-4W telah dilakukan pada tahun 2022 menggunakan teknik PIM, dimana memperlihatkan bahwa sifat mekanis dipengaruhi oleh distribusi partikel dan proses *sintering*^[19].

Intermetallics dan Metal-Matrix Composites (MMC)

Intermetallics memiliki karakteristik yang keras dan getas/*brittle*, hal ini menyebabkan fase ini sering dikombinasikan dengan serbuk yang lebih ulet/*ductile*. Fase *intermetallic* terbentuk dari *ordered arrangement* atom-atom logam, seperti Ni₃Al, FeAl, dan TiAl, yang ketiganya mulai dikembangkan pada era 1980-1990-an. Pengembangan material ini terus dilakukan hingga pada era 1995-2000-an, dimana paduan yang lebih kompleks (Ti-Al-Logam transisi - logam BCC) dikombinasikan dengan material semi logam seperti Si, B, dan C^[20]. Kombinasi berbagai elemen *alloy* tersebut dilakukan untuk perbaikan sifat mekanis paduan seperti keuletan, *oxidation resistance* dan *creep*. Ti₃Al *intermetallic* memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi merupakan material yang sangat potensial untuk mensubsitusi *superalloy* yang digunakan pada komponen *stator support ring* dari mesin turbin dapat diproduksi menggunakan teknologi metalurgi serbuk^[21]. R.A.R. Diaz, dkk. (2021) telah menggunakan Fe-*intermetallic* untuk memperkuat komposit matrik aluminium^[22]. *Intermetallic* banyak dipergunakan pada berbagai paduan sebagai *reinforced* material, hal ini dikarenakan memiliki beberapa karakteristik yang menguntungkan. Beberapa sifat dari senyawa *intermetallic* seperti diperlihatkan pada tabel 1.2.

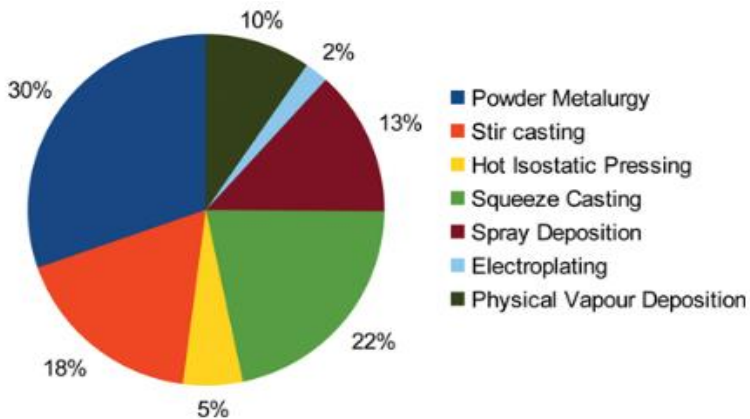
Bahan komposit merupakan material yang sangat menjanjikan, hal ini dikarenakan memiliki beberapa kelebihan diantaranya; temperatur kerja, kekuatan kekakuan, konduktivitas panas, ketahanan abrasi, mulur, dan kestabilan dimensi yang baik^[25]. Studi mengenai bahan komposit sudah dimulai pada tahun 1940-an dengan penggunaan bahan polymer sebagai matrix diperkuat *fiber glass*. Namun, pengembangan material *metal matrix composite* (MMC) baru

dimulai pada tahun 1960-an, dengan pembuatan komposit *based* logam ringan yang memiliki kekuatan lebih tinggi dibanding komposit *polymer*.

Tabel 1.2 Tabel 1-Karakteristik umum dari beberapa senyawa intermetallic^{[23][24]}.

| <i>Intermetallic</i> | <i>Crystal structure</i> | <i>Crystal ordering Temperature (C°)</i> | <i>Melting Point (C°)</i> | <i>Density (g/cm³)</i> | <i>Young's modulus (Gpa)</i> |
|----------------------|--------------------------|--|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Ni ₃ Al | L1 ₂ (fcc) | 1,39 | 1,39 | 7.50 | 179 |
| NiAl | B2 (bcc) | 1,64 | 1,64 | 5.86 | 294 |
| Fe ₃ Al | D0 ₃ (bcc) | 540 | 1,54 | 6.72 | 141 |
| | B2 (bcc) | 760 | 1,54 | - | - |
| FeAl | B2 (bcc) | 1,25 | 1,25 | 5.56 | 261 |
| Ti ₃ Al | D0 ₁₉ (hcp) | 1,1 | 1,6 | 4.2 | 145 |
| TiAl | L1 ₀ | 1,46 | 1,46 | 3.91 | 176 |
| | (tetragonal) | | | | |
| TiAl ₃ | D0 ₂₂ | 1,35 | 1,35 | 3.4 | - |
| | (tetragonal) | | | | |
| NiTi | Martensite | <i>Transformati on</i> | 1,3 | 6.45 | 28-41 |
| | Autensite | temp -200°C to 110°C | 1,3 | 6.45 | 83 |

Hingga tahun 2015 telah dilaporkan proses fabrikasi MMC yang menggunakan teknologi serbuk mencapai 30% dari keseluruhan metode yang digunakan, distribusi studi yang telah dilakukan ditampilkan pada gambar 1.4.



Gambar 1.4 Penelitian yang dilakukan terhadap mekanisme produksi dari MMC 10 tahun terakhir ^[26].

Pembuatan MMC dengan teknologi metalurgi serbuk diikuti proses sinter terus dikembangkan pada periode berikutnya, seperti penggunaan partikel pemerkuat pada MMC (1980-1990)^[27]. Beberapa partikel yang sering dipergunakan pada sintesis MMC diantaranya; *silicone carbide*, *titanium carbide*, *chromium carbide*, dan *boron carbide*. Penambahan partikel karbida pada matrik komposit seperti aluminium cenderung meningkatkan kekerasan material. Lebih lanjut, sifat mekanis seperti kekuatan, keuletan dan ketahanan aus material MMC dipengaruhi oleh ukuran skala mikro atau nano partikel yang digunakan sebagai pemerkuat, D. Zhou, dkk. (2014) melaporkan bahwa keberadaan nano partikel menghasilkan sifat mekanis yang sangat baik pada suatu material^[28]. P.K. Rohatgi^[29] menyatakan pembuatan MMC menggunakan teknologi metalurgi serbuk memiliki beberapa keuntungan, yaitu:

- Proses pembuatan MMC menggunakan teknologi PM dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah jika dibandingkan dengan metode *liquid metallurgy* seperti pengecoran.

- Metode metalurgi serbuk dapat menjadi solusi dalam menyiapkan komposit yang sulit dibuat menggunakan teknik pencairan.
- Teknik ini efektif digunakan untuk produksi komponen dengan ukuran relatif kecil. Namun, biaya PM relatif mahal bila dibandingkan dengan teknik *liquid metalurgy* dalam hal pembuatan komposit diperkuat partikel seperti Al-SiC.

Berbagai kelebihan yang dimiliki teknik PM mendorong dilakukannya berbagai penelitian yang berkaitan dengan MMC berbasis bahan serbuk (*powder*) terus dikembangkan, seperti kombinasi Fe₂O₃ dan aluminium serbuk menggunakan teknik *spark plasma sintering* (SPS) pada berbagai komposisi material pemerkuat memperlihatkan perbaikan nilai kekerasan seiring dengan kenaikan % partikel telah dilaporkan pada tahun 2018^[30]. Penggunaan aluminium komposit pada bidang otomotif telah dilakukan sejak lama, I. Romanov, dkk. (2019) menyatakan bahwa kombinasi partikel keramik dengan aluminium menghasilkan perbaikan sifat mekanis serta penurunan biaya (*cost*) mendorong penggunaan lebih luas material MMC pada bidang otomotif^[31].

High entropy alloys (HEAs)

HEAs merupakan terobosan baru dalam pengembangan paduan logam yang dikembangkan di awal tahun 2000-an. Paduan ini terdiri dari minimum lima elemen penyusun, namun memiliki potensi terbentuknya fase *solid solution*. Dimulai pada periode 2004 hingga tahun 2013 sintesis paduan ini didominasi oleh *bulk material* seperti pengecoran, penggunaan teknologi metalurgi serbuk baru digunakan di era tahun 2010-an^[32]. Pembuatan HEA menggunakan elemen-elemen transisi dari sistem periodik unsur yang terdiri dari Cr, Co, Fe, Ni, Mn, dan Al telah dilakukan di tahun 2014 melalui teknik *mechanical alloying*^[33]. Penelitian lainnya M.A. Matara, dkk., tahun 2015 telah mensintesis elemen Cr, Cu, Fe, Ni, Mn, dan Al hasilnya

menyatakan bahwa mikrostruktur yang cukup homogen diperoleh namun segregasi elemen seperti Cr masih terjadi^[34].

Tahun 2016 penggunaan teknologi ini telah dilakukan untuk mensintesis paduan HEA yang berbasis pada *refractory element* seperti W, Nb, Mo, Ta, dan V melalui teknologi *mechanical alloying*, hasilnya diperoleh struktur yang halus diperkuat oleh fase precipitat^[35]. J. Pan, dkk., pada tahun 2018 menggunakan teknologi metalurgi serbuk untuk membuat paduan HEA berbasis *refractory element* (Ti, Nb, Mo, Ta, W) dengan komposisi *equiatomic* dan *non equiatomic*, peneliti ini telah melaporkan terbentuk struktur BCC dengan struktur kristal yang berukuran nanometer dengan kekuatan tekan yang sangat tinggi serta keberadaan Ti dapat memperbaiki regangan patah dari paduan tersebut^[36]. Pemanfaatan HEA yang disintesis menggunakan teknologi metalurgi serbuk tidak hanya fokus pada *bulk* material, namun beberapa penelitian telah memanfaatkan teknologi ini untuk *coating* pada material tertentu. C.L. Chen dan Suprianto pada tahun 2020 telah meneliti mengenai teknik pelapisan baja menggunakan HEA yang tersusun dari elemen Al, Cu, Ni, Fe, dan Cr. Hasilnya diperoleh lapisan yang memiliki kekerasan yang lebih tinggi pada permukaan area dekat *interface* bila dibandingkan dengan daerah substrat yang berbahan dasar baja^[37].

Daftar Pustaka

- [1] Donald G. White, *Powder Metal Technologies and Applications*. ASM Handbook, 1998.
- [2] K. H. K. Srinivasu Rokkala, Y. Phaneendra, B. N. Dhanunjaya Rao, "Synthesis and Characterization of Aluminium-Tungsten Metal-Metal Composite Through Powder Metallurgy," *Advanced Science and Technology Letters*, vol. 147, no. December, pp. 427–432, 2017.
- [3] K. Tsuda, "History of Development of Cemented Carbides and Cermet," *SEI TECHNICAL REVIEW*, no. April, pp. 16–20, 2000.
- [4] Y. Chen, Y. Hu, C. Hsieh, J. Yeh, and S. Chen, "Competition between elements during mechanical alloying in an octonary multi-principal-element alloy system," vol. 481, pp. 768–775, 2009.
- [5] F. Zhang, S. Liu, P. Zhao, T. Liu, and J. Sun, "Titanium/nanodiamond nanocomposites : E f f ect of nanodiamond on microstructure and mechanical properties of titanium," *Materials & Design*, vol. 131, no. June, pp. 144–155, 2017.
- [6] J. Wang, S. Liu, B. Xu, J. Zhang, and M. Sun, "Research progress on preparation technology of oxide dispersion strengthened steel for nuclear energy."
- [7] S. Alanazi, "CNTs Reinforce Metallic Matrix Composite : A Review On CNTs Percentage, Types, Matrixes, And Production Methods," vol. 20, no. 1, pp. 1–7, 2022.
- [8] R. C. Reed, *The Superalloys Fundamentals and Applications*. New York: cambridge university press, 2006.
- [9] R. Reed, "Powder Metallurgy and Superalloys," *materials technology TMS*, no. February, pp. 1–2, 2007.
- [10] C. T. Sims, "A History of Superalloy Metallurgy for Superalloy Metallurgists," *Superalloys 1984 (Fifth International Symposium)*, pp. 399–419, 1984.
- [11] J. R. Pickens and M. M. Laboratories, "High-Strength Aluminum P / M Alloys," vol. 2, pp. 200–215.
- [12] S. Allo, "Advanced Metallurgy Powder Aluminum Technology Alloys via Rapid Solidification - Phase II."
- [13] Z. Cai, C. Zhang, R. Wang, C. Peng, K. Qiu, and Y. Feng, "Preparation of Al – Si alloys by a rapid solidi fi cation and powder metallurgy route," *JMADE*, vol. 87, pp. 996–1002, 2015.

- [14] Y. Kawamura, "Rapidly Solidified Powder Metallurgy Mg-Zn-RE Alloys with Long Period Order Structure," in *Powder Metallurgy world congress*, 2006, pp. 1269–1270.
- [15] Z. Cui, Y. Chen, W. Ding, C. Wang, S. Xiao, and P. Cheng, "High Strength Mg-5Sn Alloy Prepared by Rapidly Solidified Powder Metallurgy," in *2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering*, 2016, no. Ame, pp. 339–343.
- [16] K. R. Jamaludin, "Powder injection moulding, its outstanding features and development," no. 4.
- [17] J. González-gutiérrez, G. B. Stringari, and I. Emri, "Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts," 2011.
- [18] G. Wen, P. Cao, B. Gabbitas, D. Zhang, and N. Edmonds, "Development and Design of Binder Systems for Titanium Metal Injection Molding : An Overview."
- [19] M. Krinitcyn, A. Pervikov, D. Kochuev, and M. Lerner, "Powder Injection Molding of Ti-Al-W Nano / Micro Bimodal," pp. 1–13, 2022.
- [20] D. G. Morris and M. A. Muñoz-morris, "intermetallics : past , present and future," vol. 498, no. c, pp. 498–501, 2005.
- [21] W. Kaysser, "Achievements and prospects of advanced materials processed by powder technology To cite this version : HAL Id : jpa-00251725," 1993.
- [22] R. Ademar, S. Rub, G. Segura, and L. Reyes, "applied sciences The Synthesis of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Fe-Al Intermetallic Compounds by Ball Milling and Consolidation," pp. 1–19, 2021.
- [23] N. Cinca, C. Roberto, C. Lima, and J. Maria, "An overview of intermetallics research and application : Status of thermal spray coatings," vol. 2, no. 1, pp. 75–86, 2013.
- [24] S. Liu CT, *Ordered Intermetallics. Properties and selection: nonferrous alloys and special purpose materials*, 10th ed. Ohio: ASM International: Metals handbook, 1990.
- [25] J. V Foltz, *Metal-Matrix Composites*, vol. 2. ASM Handbook, 1990.
- [26] H. S. P. Preetkanwal Singh Bains, Sarabjeet Singh Sidhu, "Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites : A Review," no. October 2016, 2015.
- [27] A. J. CYRIAC, "Metal Matrix Composites: History, Status, Factors And Future," no. July, pp. 1–248, 2011.

- [28] D. Zhou, F. Qiu, H. Wang, and Q. Jiang, "Manufacture of Nano-Sized Particle-Reinforced Metal Matrix Composites : A Review," vol. 27, no. 5, pp. 798–805, 2014.
- [29] P. K. Rohatgi, "Metal-matrix Composites," *Defence Science Journal*, vol. 43, no. 4, pp. 323–349, 1993.
- [30] B. Mallik, K. Sikdar, and D. Roy, "Synthesis and Characterization of Aluminium Base in situ Metal Matrix Composites by Spark Plasma Sintering," vol. 7, no. 1, pp. 14–19, 2018.
- [31] I. Romanov, E. Romanova, and E. Chernyshov, "Prospects for using aluminum matrix composite materials in the automotive industry," vol. 00059, 2019.
- [32] M. C. Gao, J. W. Yeh, P. K. Liaw, and Y. Zhang, "Preface," *High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications*, pp. v–vii, 2016.
- [33] C. Wang, W. Ji, and Z. Fu, "Mechanical alloying and spark plasma sintering of CoCrFeNiMnAl high-entropy alloy," *Advanced Powder Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 1334–1338, 2014.
- [34] A. Matara *et al.*, "AlCrCuFeNiMn High Entropy Alloy Obtained By Powder Metallurgy Route," vol. 77, 2015.
- [35] B. C. Kang, S. W. Kuk, W. J. Lim, H. J. Ryu, and S. H. Honga, "Powder metallurgical processing of refractory high entropy alloys," *World PM 2016 Congress and Exhibition*, pp. 2–7, 2016.
- [36] J. Pan, T. Dai, T. Lu, X. Ni, J. Dai, and M. Li, "Microstructure and mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and Ti₈Nb₂₃Mo₂₃Ta₂₃W₂₃ high entropy alloys prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering," *Materials Science and Engineering A*, vol. 738, no. September, pp. 362–366, 2018.
- [37] C.-L. Chen and Suprianto, "Surface & Coatings Technology Microstructure and mechanical properties of AlCuNiFeCr high entropy alloy coatings by mechanical alloying," *Surface & Coatings Technology*, vol. 386, no. 1, p. 125443, 2020.

BAB 2

PROSES PEMBUATAN SERBUK

2.1 Pendahuluan

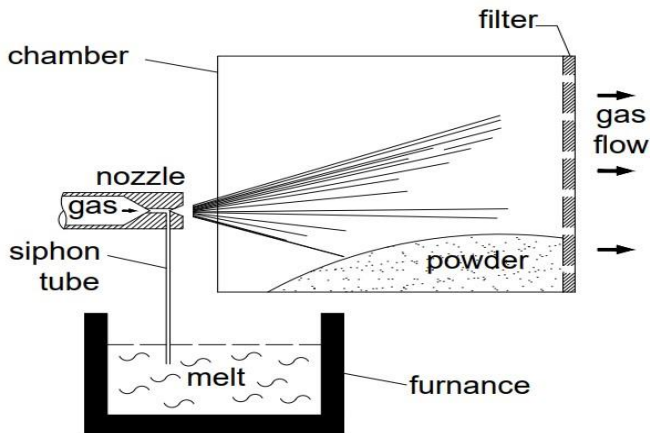
Teknologi metalurgi serbuk hingga saat ini masih terus dikembangkan dan penerapan yang begitu luas pada berbagai bidang seperti *mechanical*, *coating*, *biomaterial*, dan *aerospace* menyebabkan metode ini diyakini sangat menjanjikan dimasa yang akan datang. Tahapan awal dari proses metalurgi serbuk adalah persiapan serbuk. Kualitas serbuk yang digunakan sangat menentukan *performance* paduan yang disintesis menggunakan PM. Pengetahuan yang memadai mengenai teknik pembuatan serbuk tidak bisa diabaikan, hal ini penting dikarenakan dengan memiliki pengetahuan yang cukup maka pemilihan teknik produksi dapat dilakukan dengan benar terhadap material yang berbeda. Lebih lanjut, dalam proses produksi kualitas serbuk yang dihasilkan seperti bebas dari kontaminasi, ukuran partikel yang sesuai dan kemurnian penting menjadi pertimbangan. Beberapa teknik produksi serbuk logam diantaranya adalah atomisasi, mekanis, kimia dan *electrolytic*.

2.2 Teknik Atomisasi

2.2.1. Atomisasi Gas/*Gas Atomization* (GA)

Produksi serbuk menggunakan atomisasi gas banyak diterapkan pada sintesis berbagai elemen diantaranya; Nickel, Titanium, Tin, Cr, Al, Fe-C, dll. Berbagai jenis serbuk dengan ukuran partikel berkisar 20-300 μ m telah dihasilkan. Mekanisme produksi serbuk *refractory* hingga saat ini masih menjadi tantangan, dikarenakan temperatur *melting* yang sangat tinggi (>2000 $^{\circ}$ C) dan potensi pembentukan fase *intermetallic* yang rapuh dapat terjadi, namun proses *ultrasonic atomization* dan atomisasi gas model induksi elektroda dapat dipergunakan untuk serbuk berbasis Mo, Ti, Si^[1]. Teknologi ini dapat menghasilkan produk yang homogen dan bentuk partikel berbentuk *spherical*. Pada prinsipnya proses atomisasi terdiri dari beberapa tahapan yaitu pencairan logam di dalam *furnace*, atomisasi, dan

solidifikasi. Konsep peralatan atomisasi seperti diperlihatkan pada 2.1, dari gambar terlihat secara garis besar komponen peralatan atomisasi terdiri dari *furnace*, *nozzle*, *chamber*, dan *collector*^[2]. Proses pencairan dapat dilakukan menggunakan dapur induksi, *arc*, *plasma*, dan *electron beam*. Penggunaan gas argon atau *vacum furnace* untuk mencegah oksidasi yang berlebihan pada logam saat mencair. Proses pemotongan cairan logam untuk pembentukan *droplet* dilakukan dengan aliran gas *inert* berkecepatan tinggi yang keluar melalui *nozzle*, beberapa jenis gas yang sering digunakan pada atomisasi seperti diperlihatkan pada Tabel 2.1. Selain menggunakan aliran gas, pemisahan cairan logam ini dapat dilakukan menggunakan input energi yang berasal dari energi rotasi, *supersaturation gas*, *ultrasonic* vibrasi, tekanan *hydrostatic*, dll.



Gambar 2.1 Skema proses atomisasi gas tipe horizontal^[2].

Tabel 2.1 Sifat fisis beberapa gas pada proses atomisasi ^{[3][4]}.

| | <i>Physical properties at 273 K</i> | | |
|----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| | | $k \times 10^3$ | $\mu \times 10^{-5}$ |
| Gas | $\rho, \text{ kg m}^{-3}\dagger$ | $W \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | $N \text{ s m}^{-2}$ |
| He | 0.176 | 149.8 | 1,87 |
| Ar | 1.761 | 17.7 | 2,1 |
| N ₂ | 1.233 | 26.2 | 1,66 |

† At 0.1 MPa Pressure

Proses tranformasi fase dari liquid ke solid (serbuk) selama proses atomisasi gas dibagi menjadi tiga tahapan ^{Formatting Citation}, yaitu:

- 1) Tahapan *primary* dari pemisahan cairan logam, logam menerima energi kinetik dan momentum yang tinggi dari aliran gas berkecepatan tinggi.
- 2) Tahapan *secondary*, terjadinya pemisahan ikatan antara cairan sebagai akibat dari kenaikan tekanan dinamis.
- 3) Solidifikasi atau proses pendinginan, pada tahapan ini terdapat dua proses yaitu speroidisasi dan solidifikasi. Tahap ini terjadi pelepasan panas dari *droplet* ke lingkungan, mekanisme pelepasan panas terjadi melalui radiasi, konveksi maupun pendinginan melalui kontak. Lebih lanjut, bentuk akhir dari serbuk akan dipengaruhi oleh laju pembekuan *droplet*.

Selain bentuk serbuk, ukuran dari partikel yang dihasilkan pada proses produksi merupakan hal yang penting mempengaruhi sifat material. Ukuran partikel serbuk yang halus dihasilkan dengan mengatur beberapa parameter selama proses atomisasi, yaitu:

- 1) Kecepatan fluida atomisasi yang tinggi
- 2) Diameter *droplet* yang kecil
- 3) Cairan memiliki densitas tinggi dengan viskositas rendah serta tegangan permukaan.

Proses produksi serbuk terkadang membutuhkan proses lanjutan untuk mendapatkan karakteristik serbuk sesuai yang diinginkan. Proses

penghilangan oksida, *degassing*, pemisahan serbuk berdasarkan ukuran dapat dilakukan untuk mendapatkan serbuk yang lebih baik. Usaha untuk mendapatkan kualitas yang baik tidak terlepas dari pengaruh berbagai parameter dari proses atomisasi gas, beberapa parameter operasional yang dimaksud adalah: jenis gas yang digunakan, *residual atmosphere*, tekanan gas, kecepatan gas, temperatur gas dan cairan logam, geometri *nozzle*, tipe paduan, laju pengaliran logam cair, dan energi yang diberikan kepada logam, dimana energi yang lebih besar akan menghasilkan ukuran partikel yang lebih halus^[2]. A. Unal telah melakukan penelitian mengenai pengaruh laju aliran logam terhadap ketebalan film pada ujung *nozzle* dan perlambatan kecepatan gas jet, dimana keduanya akan menentukan pembentukan droplet dari proses atomisasi serbuk aluminium AA2014^[3].

Penggunaan jenis dan temperatur gas yang berbeda juga diyakini berpengaruh terhadap kualitas serbuk yang dihasilkan. C. Chui, dkk., melaporkan bahwa penggunaan gas Argon pada proses atomisasi menghasilkan lebih banyak partikel yang berbentuk *sphere* dan porositas dari partikel material *duplex stainless steel* dibanding dengan N₂^[6]. Keberadaan porositas pada serbuk akan menurunkan *properties* dari produk metalurgi serbuk, pada atomisasi paduan Fe₇₆Si₉B₁₀P₅ hal ini dapat diturunkan secara signifikan dengan penggunaan campuran gas Ar-7% H₂^[7]. Berdasarkan data pada tabel 2.1 memperlihatkan bahwa gas helium memiliki konduktivitas *thermal* lebih baik dibanding dengan Ar dan N₂, pemanfaatan gas ini untuk proses atomisasi akan menyebabkan laju pelepasan panas yang lebih cepat yang pada akhirnya *droplet* lebih cepat dingin.

2.1.1. Atomisasi air/*water atomization (WA)*

Proses atomisasi air sangat luas penggunaannya untuk produksi berbagai serbuk diantaranya Fe, Al, Cu, Ni, Zn, Co, dll. Prinsi teknologi WA pada dasarnya hampir sama dengan atomisasi gas, yang membedakan hanya karakteristik dari fluida yang digunakan. Perbedaan ini akan menghasilkan laju pendinginan yang berbeda dari