

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Aluminium adalah material lunak logam paling melimpah di dunia setelah besi. Aluminium adalah elemen paling umum ketiga yang terdiri dari 8% kerak bumi. Fleksibilitas aluminium menjadikannya logam yang paling banyak digunakan setelah baja. Aluminium berasal dari mineral bauksit. Bauksit diubah menjadi aluminium oksida (alumina) melalui Proses *Bayer*. Semua logam aluminium primer diproduksi melalui proses *Hall-Heroult*. Alumina kemudian diubah menjadi logam aluminium menggunakan sel elektrolitik dan *Hall-Heroult Process*. Permintaan aluminium dunia sekitar 29 juta ton per tahun. Sekitar 22 juta ton adalah aluminium baru dan 7 juta ton adalah skrap aluminium daur ulang. Penggunaan aluminium daur ulang secara ekonomi sangatlah menguntungkan lingkungan. Dibutuhkan 14.000 kWh untuk memproduksi 1 ton aluminium baru. Sebaliknya, hanya dibutuhkan 5% dari jumlah ini untuk melebur dan mendaur ulang satu ton aluminium. Tidak ada perbedaan kualitas antara paduan aluminium murni (*aluminium alloys*) dan daur ulang (Alam & Husain Ansari, 2017).

Beberapa paduan aluminium kerap digunakan, salah satunya pada industri otomotif. Karena materialnya yang sangat ringan, bisa diaplikasikan pada industri otomotif, seperti tempa dan cor, sedangkan lembaran aluminium berpotensi untuk digunakan sebagai komponen kendaraan. Ada berbagai peluang untuk menggunakan aluminium dalam *powertrain* otomotif, sasis, dan struktur bodi.

Berbeda dengan baja, aluminium memiliki sifat mampu bentuk yang rendah, terutama pada suhu kamar sehingga lebih sulit untuk dicap. Beberapa peneliti telah melakukan beberapa cara untuk mengetahui proses yang dapat digunakan. Ada dua cara dalam pembuatan struktur bodi aluminium: 1) Dengan *stamping* ke dalam struktur dan 2) Melalui kombinasi banyak proses seperti pengecoran, ekstrusi dan *stamping* dan pengelasan seperti dalam rangka ruang (Ng et al., 2017).

Selain itu, penerapan paduan aluminium juga bisa sebagai bahan struktural dan telah mengalami peningkatan beberapa tahun terakhir karena sifat-sifatnya yang sangat menguntungkan, yaitu rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan fabrikasi, tingkat kemampuan kerja yang tinggi, keuletan yang cukup besar, konduktivitas termal yang sangat baik, ketahanan korosi yang tinggi dan penampilan yang menarik di hasil akhir alami mereka. Kemudahan ekstrusi yang membuat paduan aluminium menjadi bahan struktural serbaguna yang memungkinkan produksi bentuk penampang yang kompleks, cocok untuk struktur yang tidak dapat dikembangkan dari bahan struktural yang lebih konvensional, seperti beton atau baja. Ketahanan korosi yang menonjol membuatnya sangat cocok untuk aplikasi di lingkungan laut tanpa perlindungan permukaan dan dengan biaya perawatan yang rendah. Daya tahannya yang luar biasa memungkinkan struktur yang dapat mempertahankan sifat bawaannya bahkan dalam variasi suhu yang besar (Georgantzia dkk, 2018).

Paduan aluminium adalah komposisi kimia dengan menambahkan unsur lain ke dalam aluminium murni untuk meningkatkan sifat dan kekuatannya. Unsur-unsur lain termasuk tembaga, magnesium, besi, silikon, timah, seng dan mangan

pada tingkat yang digabungkan untuk membuat 15% dari total berat paduan. Paduan membutuhkan pencampuran menyeluruh dari aluminium murni dengan unsur-unsur lain pada bentuk cair. Elemen paduan utama yang ditambahkan ke paduan aluminium memungkinkannya untuk dikategorikan ke dalam beberapa kelompok. Kelompok-kelompok ini mewakili karakteristik material seperti kemampuannya untuk merespons perlakuan mekanis dan termal. Paduan aluminium terutama diberi nomor empat digit, di mana digit pertama mengidentifikasi seri paduan dengan mengkarakterisasi elemen paduan utamanya. Digit pertama (Xxxx) digunakan untuk menggambarkan seri paduan aluminium dan juga akan menunjukkan elemen paduan utama yang ditambahkan ke paduan aluminium. Digit tunggal kedua (xXxx) menunjukkan jumlah modifikasi yang dibuat untuk paduan tertentu, dan digit ketiga (xxXx) dan keempat (xxxX) adalah angka *arbitrer* yang digunakan untuk mengidentifikasi paduan tertentu dalam seri. Contoh: Dalam paduan 6105, angka 6 menunjukkan bahwa elemen paduan utama adalah seri paduan magnesium dan silicon, sedangkan 1 menunjukkan bahwa itu adalah modifikasi pertama dari paduan asli 6005 dan 05 mengidentifikasinya dalam seri 6xxx (Ng et al., 2017).

Paduan aluminium adalah salah satu aplikasi teknik yang disukai yang digunakan untuk berbagai industri seperti mobil, kedirgantaraan, dan unit pemrosesan mineral karena bobotnya yang lebih rendah dan sifat konduktivitas termal yang luar biasa. Komposit ini unggul di alam untuk aplikasi suhu tinggi ketika diperkuat dengan penambahan partikel keramik. Di antara beberapa seri paduan aluminium, paduan aluminium seri 6000 banyak dikembangkan jenisnya,

seperti Aluminium seri Al6060, Al6061 Al6063A, Al6065, Al6081, Al6082, Al6105, Al6162 dan Al6951, di antaranya paduan Al6061 tahan korosi tinggi, menunjukkan kekuatan yang wajar dan banyak ditemukan aplikasi di bidang pekerjaan konstruksi dan aplikasi mobil. Paduan aluminium 7075 memiliki kekuatan lebih tinggi, ketangguhan tinggi dan lebih disukai dalam industri kedirgantaraan dan industri otomotif. Umumnya paduan aluminium dan MMC digunakan secara luas karena kekuatannya yang lebih tinggi, kekakuan, ketahanan aus, ketangguhan patah (Saikrupa et al., 2021).

Aluminium murni tidak memiliki kekuatan tarik yang tinggi. Namun, penambahan elemen paduan seperti mangan, silikon, tembaga dan magnesium dapat meningkatkan sifat kekuatan aluminium dan menghasilkan paduan dengan sifat yang disesuaikan untuk aplikasi tertentu. Aluminium sangat cocok untuk lingkungan yang dingin. Ini memiliki keunggulan dibandingkan baja karena kekuatan tariknya meningkat dengan penurunan suhu sambil mempertahankan ketangguhannya. Baja di sisi lain menjadi rapuh pada suhu rendah. Dan ketahanan korosi pada material paduan aluminium yang terpapar udara, lapisan aluminium oksida terbentuk hampir seketika pada permukaan aluminium. Lapisan ini memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap korosi. Paduan aluminium cukup tahan terhadap sebagian besar asam, akan tetapi kurang tahan terhadap alkali. Konduktivitas termal aluminium sekitar tiga kali lebih besar dari baja. Hal ini membuat aluminium menjadi bahan penting untuk aplikasi pendinginan dan pemanasan seperti penukar panas. Dikombinasikan dengan sifatnya yang tidak

beracun, properti ini berarti aluminium digunakan secara luas dalam peralatan memasak dan peralatan dapur (Alam & Husain Ansari, 2017).

Tabel 2. 1 Designasi Aluminium Sesuai *Aluminum Association (AA)*

No. Seri	Komposisi Paduan
1xxx	Aluminium murni
2xxx	Paduan aluminium – tembaga
3xxx	Paduan aluminium – mangan
4xxx	Paduan aluminium – silika
5xxx	Paduan aluminium – magnesium
6xxx	Paduan aluminium – magnesium – silika
7xxx	Paduan aluminium – seng
8xxx	Paduan aluminium – timah – litium
9xxx	Dsiapkan untuk penggunaan di masa depan

Penamaan atau designasi aluminium dilakukan oleh beberapa asosiasi *engineering* di dunia untuk memudahkan klasifikasi logam paduan aluminium. Salah satunya adalah yang dilakukan oleh *The Aluminium Association (AA)* seperti pada Tabel 2.1. Akan tetapi, penamaan ini juga dilakukan oleh instansi lainnya seperti *Japanese International Standard (JIS)* yang mengklasifikasikan menjadi ADC series.

Seiring dengan tembaga, aluminium memiliki konduktivitas listrik yang cukup tinggi untuk digunakan sebagai konduktor listrik. Meskipun konduktivitas dari paduan konduktor yang umum digunakan (1350) hanya sekitar 62% dari tembaga anil, hanya sepertiga beratnya dan oleh karena itu dapat menghantarkan listrik dua kali lebih banyak jika dibandingkan dengan tembaga dengan berat yang sama. Dari UV hingga inframerah, aluminium merupakan reflektor energi pancaran

yang sangat baik. Reflektifitas cahaya tampak sekitar 80% berarti banyak digunakan dalam perlengkapan lampu. Sifat reflektifitas yang sama membuat aluminium ideal sebagai bahan isolasi untuk melindungi dari sinar matahari di musim panas, sekaligus isolasi terhadap kehilangan panas di musim dingin. Aluminium dapat mengalami deformasi parah tanpa kegagalan. Hal ini memungkinkan aluminium dibentuk dengan menggulung, mengekstrusi, menggambar, permesinan, dan proses mekanis lainnya. Itu juga dapat dilemparkan ke toleransi tinggi. Paduan, pengerjaan dingin, dan perlakuan panas.

2.1.1 Aluminum – Alloy Die Casting (ADC)

Aluminium *Alloy Die Casting* atau dikenal sebagai ADC merupakan salah satu bentuk penamaan dari logam paduan aluminium. Seri ADC digunakan untuk menentukan seri aluminium yang biasa disintesis dengan menggunakan metode *die casting*. Pada dasarnya, paduan ini merupakan paduan dari logam aluminium dengan silikon yang dimana ditandai dengan angka di penamaannya, salah satunya adalah ADC 12 yang menandakan bahwa paduan terdiri dari ~12% Si sebagai elemen pepadu utama (*main alloying element*). Paduan ADC 12 merupakan salah satu jenis paduan aluminium yang populer. Selain unsur silikon (Si), terdapat juga beberapa elemen pepadu dengan konsentrasi yang rendah seperti tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan besi (Fe). Komposisi umumnya adalah sekitar 9.6-12% Si, 1.0-3.5% Cu, 0.3% Mg, dan 1.0% Fe dengan sisa berupa aluminium. ADC 12 sering digunakan dalam proses pengecoran tekan, terutama dalam pembuatan komponen otomotif dan produk konsumen

karena memiliki sifat mekanis yang baik serta ketahanan terhadap korosi. Beberapa karakteristiknya termasuk kekuatan yang baik, ketahanan terhadap aus, dan kemampuan untuk diolah dengan baik dalam proses pengecoran.

Kekuatan paduan ini dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas atau pemanasan untuk meningkatkan sifat mekanisnya. Ketahanannya terhadap korosi juga membuatnya menjadi pilihan yang baik untuk aplikasi di lingkungan yang mengharuskan ketahanan terhadap elemen-elemen seperti air, udara, dan bahan kimia ringan. Pada penelitian ini menggunakan Aluminium ADC 12, adapun komposisi aluminium ADC 12 menurut standar JIS H 5032 ditunjukkan pada Tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2. 2 Komposisi Paduan Aluminium ADC 12 (JIS H 5032).

Unsur	Kandungan (%)
Cu	1,5 – 3,5
Si	9,6 - 12
Mg	0,3 maks.
Zn	1,0 maks.
Fe	1,3 maks.
Mn	0,5 maks.
Ni	0,5 maks.
Sn	0,2 maks.
Ti	-
Al	Remainder

Adapun sifat fisik aluminium ADC 12 dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2. 3 Sifat Fisik Aluminium ADC 12 (Wang, L., et al., 1995)

No	Properties	Value
1.	Density (g/cm ³)	2.75
2.	Melting range	590
3.	Tensile Strength	300
4.	Elongation (%)	2.5
5.	Hardness (BHN)	80

2.2 Busa Logam (*Metallic Foam*)

Busa adalah hasil dari kombinasi dua fasa yang diciptakan oleh berbagai proses yang sebagian besar meliputi dispersi gas melalui cairan tanpa melarutkan gas sepenuhnya. Ini sangat mirip dengan proses emulsi (kombinasi dua cairan yang tidak dapat bercampur) tetapi memiliki perbedaan bahwa fasa gas harus ada di dalam busa. Busa logam adalah struktur seluler yang terdiri dari logam padat, seringkali aluminium, serta fraksi volume besar dari pori-pori berisi gas. Pori-pori dapat disegel (busa sel tertutup), atau dapat membentuk jaringan yang saling berhubungan (busa sel terbuka). Aplikasi busa logam aluminium adalah aplikasi struktural, penukar panas dan mesin pendingin, peredam suara, aplikasi akustik, penahan api, aplikasi tahan korosi. Busa logam biasanya mempertahankan beberapa sifat fisik dari bahan dasarnya. Busa yang terbuat dari logam yang tidak mudah terbakar akan tetap tidak mudah terbakar dan busa umumnya dapat didaur ulang kembali ke bahan dasarnya. Koefisien ekspansi termal juga akan tetap sama sementara konduktivitas termal kemungkinan akan berkurang (Raut et al., 2011).

Busa logam adalah kelas material baru, yang belum sempurna, dengan kepadatan rendah dan sifat fisik, mekanik, termal, listrik, dan akustik yang baru. Busa logam menawarkan potensi struktur ringan, untuk penyerapan energi, dan manajemen termal; dan beberapa di antaranya, setidaknya, murah. Busa metalik (*metal foams*) adalah kelas material baru, yang tidak dikenal oleh sebagian besar insinyur. Saat ini *metfoam* tidak sepenuhnya dicirikan, dan proses yang digunakan untuk membuatnya tidak terkontrol secara sempurna, menghasilkan beberapa variabilitas sifat. Tetapi bahkan *metallic foam* generasi sekarang memiliki profil properti dengan potensi memikat, dan kontrol pemrosesan meningkat dengan cepat. *Metallic foam* menawarkan peningkatan kinerja yang signifikan dalam struktur yang ringan dan kaku, untuk penyerapan energi yang efisien, untuk manajemen termal dan mungkin untuk kontrol akustik dan lainnya, yang lebih terspesialisasi (Fleck, 2016).

Busa logam (*metallic foams*) terutama yang berbahan dasar logam ringan diketahui memiliki banyak kombinasi menarik dari berbagai sifat seperti kekakuan tinggi sehubungan dengan berat jenis yang sangat rendah atau kekuatan kompresi tinggi yang dikombinasikan dengan karakteristik penyerapan energi yang baik (Banhart, 2010). Busa logam adalah struktur seluler yang terdiri dari bahan padat dengan sebagian besar pori berisi gas berdasarkan volume. Karena struktur selulernya, busa logam memiliki serangkaian sifat mekanik dan fisik yang unik. sifat ini memungkinkan busa logam menjadi sangat efisien dalam beberapa aplikasi teknik, terutama dalam komponen untuk tahan ledakan, tahan api, insulasi termal, panel *sandwich* inti busa, dan peredam suara dan getaran. Selain itu, busa logam

dapat didaur ulang, tanpa masalah pembuangan. Akibatnya, bahan-bahan ini telah menarik perhatian besar dalam beberapa tahun terakhir. Salah satu fitur busa yang luar biasa adalah sifat mekaniknya fleksibel, dan ukuran pori, geometri, kerapatan, dan pilihan bahan busa dapat dikontrol. Ketika digunakan sebagai bahan penyerap energi, busa ini dapat mengalami deformasi *substansial* di bawah tekanan yang hampir konstan. Dengan kemajuan pesat di bidang pertahanan, kedirgantaraan, dan otomotif, terdapat peningkatan permintaan akan material ringan dengan kekuatan khusus yang tinggi, efisiensi bahan bakar yang lebih baik, dan kapasitas penyerapan energi yang tinggi untuk menahan gaya tumbukan. Dengan demikian, sifat mekanik, akustik, listrik, termal, dan kimia yang baik membuatnya ideal untuk aplikasi struktural dan fungsional. Busa logam umumnya terdiri dari aluminium (Al), nikel (Ni), magnesium (Mg), tembaga (Cu), seng (Zn), dan baja. Secara khusus, Al dan paduannya banyak digunakan sebagai bahan yang tidak mudah terbakar untuk insulasi termal dan suara, inti *sandwich*, redaman mekanis, panel ringan dan ketahanan benturan dalam transportasi, *insulator* regangan, dan kontrol getaran (Parveez et al., 2022).

Busa logam adalah bahan yang sangat menantang karena pembuatannya melibatkan terjadinya fase padat, cair, dan gas secara bersamaan pada berbagai suhu dan morfologi busa yang dipadatkan cukup kompleks. Cukup banyak teknologi manufaktur untuk busa logam yang sekarang dikenal. Namun, proses manufaktur busa logam yang dilakukan selama kurun waktu 10 tahun terakhir, masih mengalami ketidakseragaman dan berbagai kekurangan. Untuk meningkatkan proses manufaktur dari busa logam, yaitu dengan cara meningkatkan teknologi

produksi yang lebih andal, mudah dipahami dan dapat dikendalikan. Dalam mengembangkan metode produksi, empirisme biasanya diterapkan daripada mengandalkan pengetahuan ilmiah yang mendalam. Oleh karena itu, pemahaman yang jelas tentang stabilitas busa diharapkan memungkinkan seseorang untuk meningkatkan kualitas busa dan kontrol proses dengan lebih mudah (Babcsán et al., 2003).

Sifat mekanik busa logam, terutama kekuatan tekan dan kapasitas penyerapan energinya, bergantung pada struktur sel, porositas, dan kerapatan relatifnya. Tegangan dataran tinggi telah ditemukan memiliki nilai yang lebih tinggi pada porositas bervariasi dari 60% sampai 70%, sedangkan kapasitas penyerapan energi lebih tinggi untuk nilai porositas yang lebih tinggi. Pengaruh morfologi pori terhadap kuat tekan busa Al menyimpulkan bahwa bentuk pori busa memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap sifat mekaniknya daripada ukuran pori. Selain itu, penambahan partikel TiH_2 ke busa Al meningkatkan ekspansi busa maksimum secara signifikan karena fasa padat menurunkan ketebalan dinding sel minimum, memungkinkan ekspansi yang lebih besar sebelum sel pecah dan runtuh. Ini menghasilkan tegangan bukti yang lebih tinggi, kekuatan luluh dan lebih banyak penyerapan energi untuk regangan tertentu dibandingkan dengan busa Al murni (Parveez et al., 2022). Nilai porositas yang lebih tinggi dapat mengurangi kapasitas penyerapan energi, dikarenakan rongga yang saling berhubungan, sehingga memungkinkan cairan atau gas dapat mengalir melalui material tersebut (Alhusseny et al., 2018). Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan busa dengan porositas yang optimal. Dalam studi lain, porositas yang mengalami penurunan

dengan peningkatan densitas busa dan deformasi seragam dalam kompresi dan pengerasan yang sama dengan material tanpa tekanan yang tinggi. Sifat tekan dan perilaku penyerapan energi metalurgi serbuk fabrikasi busa Al yang diperkuat dengan serat kaca ditemukan bergantung pada fraksi volume serat kaca dan fraksi porositas. Selain itu, kuat tekan busa komposit lebih tinggi dibandingkan dengan busa Al murni (Parveez et al., 2022).

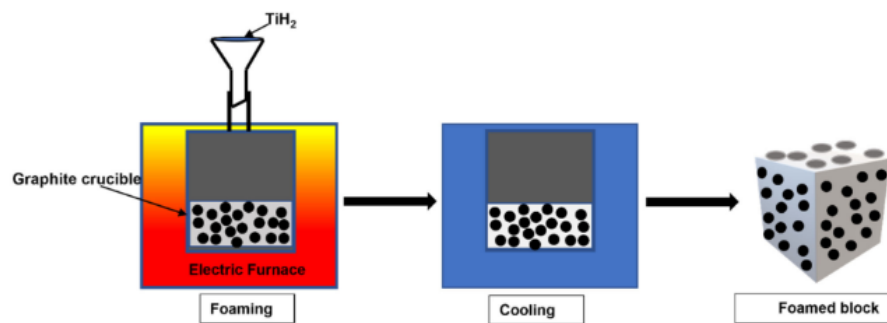
2.2.1 Karakteristik *Metallic Foam*

Metal foam memiliki beberapa karakteristik khusus yang membedakannya dengan material lain. Karakteristik ini menjadi ciri khas dan kelebihan dari metal foam itu sendiri. Beberapa karakteristik dari metal foam antara lain adalah strukturnya yang berpori. Meskipun memiliki struktur berpori (*porous structure*), *metallic foam* tetap dapat mempertahankan kekakuan dan kekuatan, sementara tetap ringan. Kombinasi ini menjadikan *metallic foam* cocok untuk aplikasi di mana kekuatan dan berat ringan sangat dibutuhkan. Selain itu, dengan sifatnya yang berpori *metallic foam* dapat digunakan untuk meredam suara karena struktur pori-porinya dapat menyerap gelombang suara. Hal ini menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi di mana isolasi suara atau penyerapan suara diperlukan. *Metallic foam* juga memiliki kemudahan dalam manufakturnya, dimana material ini dapat disintesis melalui berbagai metode manufaktur, termasuk teknik injeksi gas, ekstrusi logam cair, atau teknik paduan logam dengan agen penghasil gas yang menjadikannya lebih

fleksibel dalam menghasilkan berbagai bentuk dan ukuran busa logam (Rodinger, Coric, & Danko, 2023).

2.3 Teknik Pembuatan *Metallic Foaming*

Busa logam terutama diproduksi menggunakan teknik fasa cair (atau *melt foaming*) atau fasa padat (*powder metallurgy*). Metode *melt foaming* sangat populer karena menghasilkan busa yang relatif murah dengan sifat yang diinginkan. Kualitas busa tergantung pada berbagai parameter, seperti komposisi, suhu proses pembentukan, waktu penahanan dan kondisi pendinginan, ukuran, distribusi dan fraksi volume partikel penstabil busa yang diperkuat (misalnya, SiC, Al₂O₃, dll.). Selama proses *foaming*, beberapa bahan pembusa dan gas injeksi yang umum termasuk TiH₂, CaCO₃, zirkonium hidrida, dolomit (CaMg(CO₃)₂), dll. Partikel penstabil seperti Ca, ZrB₂, CaO, Al₂O₃, dll., juga ditambahkan ke dalam lelehan. Misalnya penambahan CaCO₃, CaCO₃ akan terurai karena terjadinya proses dekomposisi dan membentuk padatan CaO dan Al₂O₃ in-situ, serta CO₂ dan gas reaktif CO. Akibat adanya penambahan CaCO₃, dapat mempengaruhi nilai densitas dan porositas dari busa logamnya. Kandungan dari CaCO₃ dapat menurunkan densitas dan meningkatkan porositas dikarenakan leburan logam yang telah melalui proses peleburan akan menghasilkan lebih banyak gas di dalam lelehannya selama proses pengecoran logam berlangsung. Dalam proses *melt foaming*, campuran serbuk komposit ditempatkan dalam krus grafit dan dilebur menggunakan tanur hambatan listrik, yang dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini (Parveez et al., 2022).

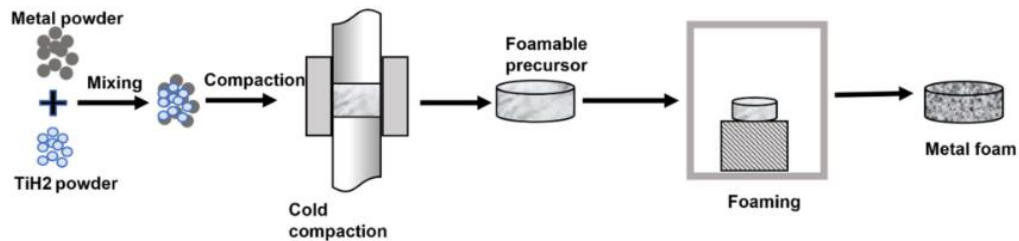


Gambar 2. 1 Skematik Teknik *Melt Foaming* (Parveez et al., 2022).

Selain itu, Lelehan tersebut kemudian diaduk terus menerus agar bahan pembusa dan partikel penstabil tersebar merata. *Crucible* disimpan dalam tungku untuk mempertahankan suhu yang dibutuhkan untuk menguraikan TiH_2 dan melepaskan gas dan gelembung. Lelehan berbusa dikeluarkan dari tungku dan didinginkan di udara. Teknik ini digunakan untuk membuat busa komposit A356/20SiC dengan berbagai porositas dan ukuran sel dengan TiH_2 sebagai bahan peniup (Parveez et al., 2022).

Pada teknik *powder metallurgy*, bubuk logam dicampur dengan beberapa fraksi massa bahan pembusa seperti serbuk TiH_2 atau penahan ruang dalam *mixer* bubuk. Serbuk campuran kemudian dipadatkan dingin, menggunakan pemadatan uniaksial, dalam cetakan baja perkakas yang dilumasi pada tekanan yang diperlukan untuk mencapai kerapatan hijau prekursor. Spesimen prekursor kemudian dibawa ke tungku, sehingga prosedur pembusaan berlangsung di bawah suhu tinggi untuk *compacts* hijau dengan *foaming agent*, sedangkan untuk *compacts* dengan *space holder*, porositas diperoleh dengan proses pelindian diikuti dengan *sintering*. Serbuk metalik dan *foaming agent* seperti titanium hydride powder dicampur

kemudian dipadatkan dingin, dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini (Parveez et al., 2022).



Gambar 2. 2 Skematik Teknik *Powder Metallurgy* (Parveez et al., 2022).

Sampel yang dipadatkan ini kemudian ditempatkan di dalam tungku untuk *sintering* di mana titanium hidrida terurai, menghasilkan rongga bertekanan tinggi. Ini mengembang dengan aliran semi-padat, dan logam membengkak, membentuk busa yang mengisi cetakan sebelum mendinginkan dan menstabilkannya. Proses tersebut menghasilkan komponen yang memiliki bentuk yang mirip dengan cetakan tetapi memiliki densitas yang relatif lebih rendah. Logam seperti timah, kuningan, seng, timah, dan perunggu juga dapat dibuat busa dengan menggunakan parameter proses dan bahan pembusa yang benar. Kekuatan kompresi busa seng secara signifikan lebih rendah pada kerapatan yang sama tetapi serupa pada porositas yang sama (Parveez et al., 2022). *Foaming agent* juga dapat dibuat menggunakan limbah kulit telur, karena kulit telur tersusun dari kalsium karbonat (CaCO_3) yang melimpah yaitu kurang lebih 98,2 % dan kalsium sekitar 28% dari total bobot kulit (King Ori, 2011).

2.4 Aplikasi *Metallic Foaming*

Busa logam mencakup berbagai aplikasi seperti yang disebutkan dalam Tabel 2.2 di bawah ini, dan penggunaan baru muncul setiap saat. Distributor *foam* Alporas Eropa (Gleich) dari Shinko mengembangkan alat pengangkat vakum untuk produsen skala besar (Pilkington) produk kaca lembaran menggunakan proses kaca apung. Mengganti seluruh bagian Al produk kaca lembaran menggunakan proses kaca apung. Mengganti seluruh bagian Al alat dengan busa Alporas mengurangi bobot dari 82 menjadi 32 kg. Dengan demikian, alat ini menjadi berguna saat dirubah secara manual. Meskipun alat busa diproduksi dalam skala kecil, yaitu lima hingga enam buah per tahun, busa Al ini dapat bertahan pada suhu setinggi 400°C karena ketahanan panasnya yang lebih tinggi. Kemampuan mesinnya yang luar biasa semakin mendorong penggunaan bahan ini. Alpora sel tertutup lainnya (inti busa Al) dibuat menjadi balok komposit dengan menanamkan busa paduan $AlZn_{10}Si_8Mg$ sepenuhnya di kulit paduan $AlZn_{10}Si_8Mg$ yang lebih padat menggunakan teknik pengecoran pasir (Parveez et al., 2022).

Tabel 2. 4 Pengaplikasian *Metallic Foaming*

<i>Foams</i>	Aplikasi
Mg	Implan tulang
<i>Metallic foam</i>	<i>Heat exchanger</i>
Ni-Cu	Elektroda untuk superkapasitor
Al7075 dan 6061 alloy	Boks pengirim obat-obatan
Al alloy ($AlSi_{12}$)	<i>Foaming</i> pengikat elemen

Baja A356	Pelindung radiasi
Al foam	Struktur bodi kapal

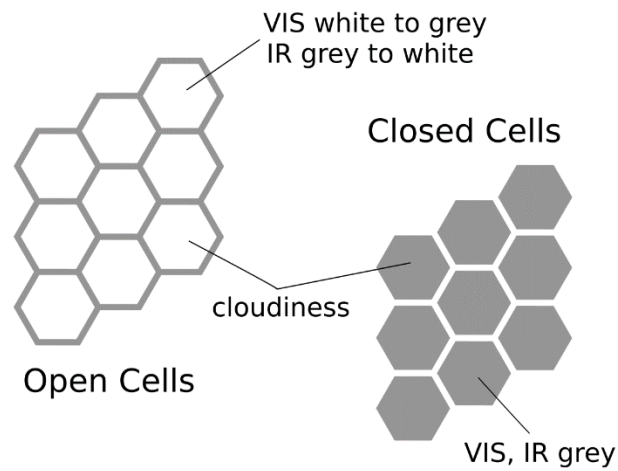
Busa logam itu sendiri dapat memantulkan sinar transversal yang mampu meredam frekuensi getaran hingga 370 Hz dengan gesekan internal atau antarmuka yang tergelincir antara inti dan kulit. Bagian ini dilengkapi dengan 700 mesin sejauh ini. Dalam rentang frekuensi ini, redaman suara hingga 60% tercapai. sistemnya memenuhi kebutuhan pelanggan berdasarkan kerangka kerja yang sama. Selain itu, inti busa Al untuk penyerap energi tumbukan dikembangkan dengan ekstrusi campuran bubuk, yang diikuti dengan penanaman cangkang karet dengan busa. Peredam ini diproduksi dalam ratusan unit untuk operator dan pabrikan trem lainnya (Parveez et al., 2022).

2.5 Peredam Suara (*Sound Absorber*)

Dalam dunia industri, peredam suara menjadi faktor penting untuk mengurangi tingkat kebisingan yang dihasilkan oleh mesin-mesin, peralatan, atau proses-proses produksi. Penggunaan peredam suara bertujuan untuk melindungi karyawan, mengurangi dampak negatif pada lingkungan kerja, serta mematuhi regulasi dan standar keselamatan yang berlaku. Terdapat beberapa material yang digunakan dalam membuat material *noise absorber*, antara lain adalah bahan berpori, logam berlubang, dan karet elastomer. Material berpori seperti busa akustik, wol mineral, atau serat kaca digunakan untuk menyerap dan memantulkan gelombang suara, mengurangi pantulan dan intensitas suara yang keluar. Sementara itu, logam berlubang seperti baja atau aluminium dengan lubang-lubang tertentu dapat meredam suara dengan cara membiarkan gelombang suara masuk dan

menyerapnya di dalam material tersebut. Karet dan Material Elastomerik merupakan material yang paling umum digunakan untuk isolasi getaran serta mengurangi transmisi suara dari satu komponen mesin ke komponen lainnya.

Pada dasarnya, peredam suara memiliki prinsip mengubah gaya. Ketika gelombang suara bertemu dengan material peredam suara, energinya diubah menjadi getaran mekanis di dalam material tersebut dan kemudian berubah menjadi energi panas akibat gesekan antar partikel di dalam material. Material dengan struktur berpori atau serat-serat memiliki kemampuan yang baik untuk menyerap suara (Raut et al., 2011). Dikenal beberapa istilah dalam peredam suara, seperti *closed cell* dan *open cell*. *Open cell* dan *closed cell* adalah dua jenis struktur yang umumnya ditemukan pada material peredam suara, terutama pada material berpori seperti busa atau *foam* yang digunakan untuk tujuan tersebut. *Open cell foam* memiliki struktur yang terbuka atau pori-pori yang saling terhubung satu sama lain. Karena pori-porinya yang terbuka, material ini cenderung lebih baik dalam menyerap suara. Gelombang suara masuk ke dalam pori-pori dan kemudian diubah menjadi energi panas melalui gesekan antar partikel di dalam material. Sementara itu, *Closed cell foam* memiliki struktur pori-pori yang tertutup, artinya pori-pori tersebut tidak saling terhubung. Sel jenis ini cenderung lebih padat dan kuat secara mekanis karena struktur pori-porinya yang tertutup.



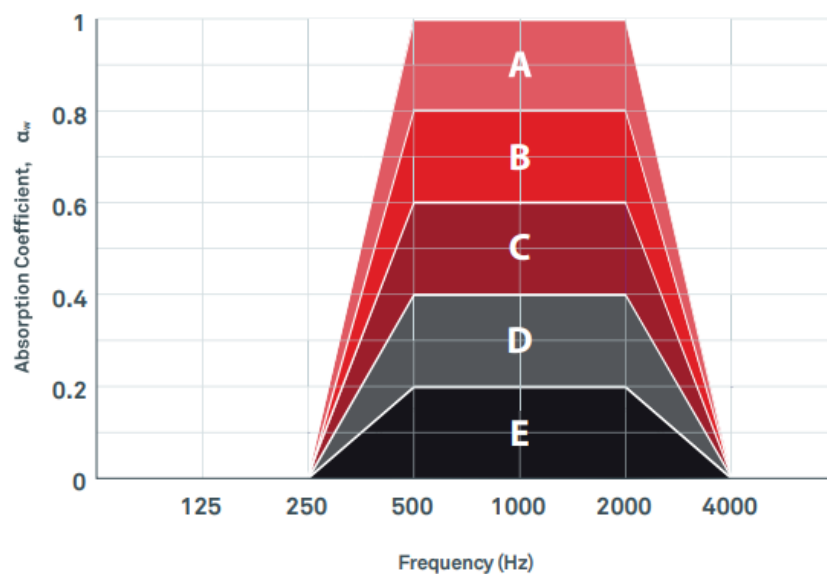
Gambar 2.3 Skema *Open* dan *Closed Cell* (Carbajo et al., 2023)

Dalam dunia pekerjaan, *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) mengizinkan standar suara yang layak dalam waktu kerja 8 jam sehari adalah 85 dB. Hal ini ditujukan untuk meringankan *stress* dan gangguan mental para pekerja. Apabila intensitas suara yang didapatkan lebih dari standar yang ditetapkan, maka diperlukan adanya isolator untuk mencegah kebisingan lebih lanjut. Salah satunya adalah dengan menerapkan material *sound absorber* pada beberapa titik tertentu yang menjadi pusat kebisingan (Carbajo et al., 2023).

Adapun Mekanisme *Metal Foam* dalam menyerap suara adalah dengan adanya pori yang terbentuk, gelombang suara yang dipancarkan akan masuk ke dalam pori tersebut kemudian dikonversi menjadi energi lainnya, biasanya menjadi energi kalor. Ketika material berpori menyerap energi suara, terjadi gesekan antara gelombang suara dengan permukaan material yang menyebabkan suara menjadi terserap (Khotimah, 2015).

2.5.1 Nilai Koefisien Alpha pada Lingkungan

Dalam lingkungan sehari-hari, suara atau kebisingan menjadi problem utama yang dapat mengganggu kinerja seseorang ataupun sebuah organisasi. Oleh karena itu, diberlakukanlah penggunaan *noise reductor* atau *sound absorber* untuk mengurangi dampak kebisingan dari lingkungan kerja. Dalam standar BS EN ISO 354, dijelaskan bahwa nilai koefisien *alpha* yang dibutuhkan pada material bergantung kepada lingkungan yang ditempatinya. Kapasitas peredam suara ini dibedakan menjadi kelas A - E, dimana kelas A merepresentasikan kelas dengan nilai *alpha* tertinggi (paling menyerap suara) yang berkisar antara 0.8 sampai dengan 1, sementara itu untuk nilai E merepresentasikan kelas dengan nilai *alpha* paling rendah dengan nilai *alpha* pada interval 0 – 0,2 seperti pada Gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2. 4 Klasifikasi Kelas Peredam Suara BSEN IS O 354

Dari nilai ini, diperoleh rata-rata nilai alpha dan kelas absorpsi pada beberapa lingkungan yang melibatkan banyak orang. Rata-rata penggunaan nilai *alpha* tersebut direpresentasikan pada Tabel 2.3 di bawah ini dimana nilai tersebut merupakan nilai aproksimasi nilai akustik pada sebuah lingkungan. Nilai ini tidak diatur dalam standar melainkan merupakan pertimbangan pada bagian HSE dari sebuah instansi yang melibatkan kalkulasi mengenai jumlah orang terlibat, luas ruangan, dan banyak faktor lain.

Tabel 2. 5 Rekomendasi Nilai Alpha Untuk Lingkungan

Lingkungan	Alpha Rekomendasi	Kelas Absorpsi
Perkantoran	0,2 – 0,5	E – D
<i>Workshop Pabrik</i>	0,3 – 0,7	D – B

2.6 Standar Frekuensi Suara

Dalam praktiknya, suara penggunaan dan kehadiran suara dalam dunia kerja diatur dalam beberapa standar yang disepakati oleh dunia internasional. Standar suara yang diizinkan dalam industri dan kehidupan sehari-hari merupakan hal penting dalam mempertahankan kesehatan dan kenyamanan manusia. Organisasi kesehatan seperti WHO dan lembaga regulasi di berbagai negara telah menetapkan batasan-batasan terkait tingkat kebisingan yang diperbolehkan. Standar ini bertujuan untuk melindungi pendengaran manusia dari efek negatif yang diakibatkan oleh paparan suara berlebihan. Kebisingan tingkat rendah di sektor

industri atau lingkungan sehari-hari bisa memiliki dampak serius pada kesehatan. Paparan suara yang tinggi dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan pendengaran, stres, gangguan tidur, dan bahkan masalah kesehatan mental. Kesehatan pekerja dalam industri seperti konstruksi, manufaktur, atau sektor transportasi sangat rentan terhadap bahaya suara berlebihan. Di kehidupan sehari-hari, kebisingan dari lalu lintas, alat-alat elektronik, atau lingkungan perkotaan juga dapat berkontribusi pada risiko kesehatan yang serupa.

Intensitas suara yang diizinkan atau batasan kebisingan yang diperbolehkan bervariasi tergantung pada standar dan regulasi di berbagai negara serta konteks paparan suara tersebut. Sebagai contoh, di bagian Amerika umumnya batas kebisingan yang diperbolehkan untuk lingkungan kerja atau industri berkisar antara 80 hingga 85 decibel (dB) selama 8 jam kerja (Torras, 2017). Paparan suara di atas level ini, terutama dalam jangka waktu yang lama, dapat menyebabkan kerusakan pendengaran yang permanen. Dalam kehidupan sehari-hari, berbagai negara juga memiliki regulasi terkait kebisingan lingkungan. Misalnya, di daerah perkotaan, batas kebisingan malam hari mungkin berkisar antara 45 hingga 55 dB untuk memastikan kenyamanan tidur. Penting untuk diingat bahwa setiap penilaian terhadap kebisingan harus mempertimbangkan tidak hanya tingkat decibelnya tetapi juga durasi paparan, frekuensi, dan jenis suara (misalnya, suara yang berulang atau suara tajam dapat lebih mengganggu daripada suara yang terus-menerus).

2.7 *Metallic Foaming* Sebagai Penyerap Gelombang Suara

Penyerapan suara sangat penting karena meminimalkan kebisingan yang datang dari dalam ke luar – gym, kantor, musik, tepuk tangan, dll. Dan sebaliknya

– suara dari mobil, pesawat terbang, perusahaan industri, dll. Suara ini diserap oleh bahan yang digunakan untuk penyerapan suara aplikasi. Misalnya: wol mineral, busa akustik plastik, bahan akustik kayu, dan bahan bitumen. Setiap jenis menyerap suara dengan cara yang berbeda. Wol mineral dan busa akustik plastik adalah penyerap berpori dan menyerap suara dengan mekanisme kehilangan kental akibat gesekan ketika molekul udara yang bergetar dipaksa melalui pori-pori dan berinteraksi dengan serat atau dinding pori. Peredam ini bagus untuk penyerapan frekuensi tinggi (Nosko & Kováčik, 2017).

Perilaku penyerapan suara diperiksa dan dikorelasikan dengan hambatan aliran udara untuk busa aluminium dengan ukuran pori dan bukaan pori yang dapat dikontrol dalam penelitian ini. Sampel aluminium foam diproduksi dengan proses infiltrasi tekanan udara menggunakan partikel *spherical sodium chloride* (NaCl) sebagai material *space holder* yang dibuat dengan cara mensinter serbuk NaCl. Pembukaan struktur sel tertutup dari Al berbasa padat disediakan oleh retakan berukuran mikrometer memanjang domain eutektik yang dibuat oleh perlakuan panas akhir yang mencakup pemanasan di bawah suhu solidus diikuti dengan pendinginan air. Jenis baru dari busa titanium seluler, yang porositas totalnya dicapai setinggi 86% -90% dan pori-pori utama berskala milimeter bulat, baru-baru ini berhasil disiapkan dengan metode pembusaan yang ditingkatkan untuk melelehkan bubuk logam. Busa titanium ini menunjukkan kinerja penyerapan suara yang baik, dan koefisien penyerapan suaranya bisa lebih dari 0,4 pada rentang frekuensi gelombang suara 3150–6300 Hz dan bahkan melebihi 0,9 pada frekuensi resonansi (Raut et al., 2011).

Perilaku penyerapan suara dari busa Al bersel terbuka yang diproduksi oleh proses infiltrasi, dan mekanisme yang terlibat. Busa menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam penyerapan suara dibandingkan dengan busa Al bersel tertutup, karena hambatan alirannya yang tinggi. Sebuah metodologi diusulkan untuk merancang bahan berserat berpori dengan penyerapan suara yang optimal di bawah pita frekuensi yang ditetapkan. Bahan tersebut diasumsikan memiliki kerangka yang kaku dan susunan serat heksagonal (Raut et al., 2011). Oleh karena itu, biasanya ada cukup ruang di industri bangunan, panel aluminium tebal yang disusun khusus yang terbuat dari busa aluminium dapat berhasil digunakan sebagai pengganti lembaran aluminium dan baja sederhana dengan berat konstan atau bahkan lebih sedikit. Struktur sel yang unik adalah alasan bahwa pada berat konstan panel busa aluminium lebih kaku dan kuat. Selain itu, busa aluminium dapat digunakan dalam suasana reaktif dan lembab, tahan api, memiliki daya tahan lama, dapat didaur ulang dengan baik, dapat menahan sendiri dan struktur berporinya menawarkan tingkat kemampuan penyerapan suara yang baik. Dari alasan ini busa aluminium sudah digunakan secara industri dalam panel penyerap suara (Nosko & Kováčik, 2017).

Busa logam yang memiliki sel setengah terbuka dikatakan memiliki kapasitas penyerap suara. Diketahui bahwa mereka memiliki kapasitas redaman dan frekuensi getaran alami yang lebih tinggi daripada padatan yang mereka buat panel *sandwich* dengan inti busa logam menawarkan potensi yang signifikan untuk manajemen getaran dan akustik, tetapi ini tidak sama dengan penyerapan suara. Penyerapan suara berarti gelombang suara insiden tidak dipantulkan atau

ditransmisikan; energinya diserap dalam materi. Ada banyak cara di mana hal ini dapat terjadi: (i) dengan kehilangan viskositas saat gelombang tekanan memompa udara masuk dan keluar dari rongga di penyerap, (ii) dengan redaman elastis termal, (iii) dengan resonator tipe *Helmholtz*, (iv) dengan *vortex shedding* dari ujung yang tajam, (v) dengan peredaman mekanis langsung pada material itu sendiri, dan seterusnya. Berbeda dengan busa elastis seperti wol kaca, kekakuan kerangka logam yang relatif besar menunjukkan bahwa efek mekanisme, (v) pada penyerapan suara biasanya kecil pada busa logam. Kontribusi mekanisme, dan (iv) terhadap penyerapan bunyi juga dapat diabaikan jika tidak ada aliran rata-rata yang diasosiasikan dengan bunyi atau amplitudo tekanan bunyi tidak terlalu tinggi sehingga membatalkan linearitas (Lu et al., 1999).

Proses dimulai dengan inisiasi pori ketika bahan mentah aluminium atau paduannya dipanaskan. *Foaming agent* yang terkandung dalam bahan akan melepaskan gas pada suhu tinggi, menciptakan gelembung mikroskopis dalam logam cair. Selama fase *melting*, logam cair yang mengandung gelembung gas ditekan melalui cetakan, sehingga gelembung gas didistribusikan secara merata di dalam logam cair melalui tekanan dan aliran material. Pada tahap pembekuan, aluminium mengalami pembekuan cepat, dan selama proses ini, gelembung gas terperangkap dalam matriks aluminium yang membeku. Pembekuan yang cepat adalah elemen kunci untuk memastikan struktur pori tetap tertutup dan distribusi pori yang merata. Setelah pembekuan, sampel aluminium *foam* diambil untuk analisis mikrostruktur. Metode seperti mikroskop optik atau mikroskop elektron digunakan untuk memeriksa dan mengukur karakteristik struktur mikro, termasuk

ukuran pori, distribusi pori, dan bentuk pori. Informasi dari struktur mikro memberikan wawasan tentang bagaimana pori-pori ini terbentuk dan apakah mereka tetap tertutup secara efektif. Berdasarkan analisis struktur mikro, busa aluminium dapat mengalami langkah-langkah pemrosesan lanjutan seperti perlakuan panas untuk meningkatkan sifat mekanis dan strukturalnya. Proses ini juga dapat mempengaruhi struktur mikro dan distribusi pori, memberikan kontrol lebih lanjut terhadap sifat-sifat material yang diinginkan (Nosko & Kováčik, 2017).

Mekanisme penyerapan busa diproduksi melalui infiltrasi tekanan negatif dan bekerja berdasarkan prinsip memasukkan suara ke struktur terbuka. Suara memasuki struktur dan menggetarkan untaian internal, sehingga energi akustik diserap oleh disipasi pada untaian yang bergetar. Lebih banyak energi suara dihamburkan dalam struktur dan kemampuan penyerapan ditingkatkan ketika ukuran pori per satuan luas meningkat. Peningkatan ukuran pori per satuan luas dicapai dengan penurunan diameter granul selama pembuatan. Kemampuan penyerapan suara tergantung pada porositas juga. Jika porositas terlalu rendah, sebagian besar gelombang suara dipantulkan. Jika porositas terlalu tinggi, gelombang suara menembus struktur dan energi yang diserap berkurang. Porositas ideal untuk penyerapan suara yang baik diperkirakan secara eksperimental menjadi 75-80%. Di mana mekanisme penyerapan suara dijelaskan melalui getaran untaian, bahwa struktur pori terlalu kaku untuk getaran untaian dan kemampuan penyerapan sebagian besar tergantung pada resistivitas aliran struktur. Resistivitas aliran yang diatur oleh ukuran pori dan lubang yang menghubungkannya juga bergantung pada

ketebalan sampel. Untuk menyerap suara pada frekuensi yang lebih rendah, celah udara harus diterapkan antara struktur dan dinding kaku (Nosko & Kováčik, 2017).

Jika ukuran pori terlalu rendah (0,5 mm ke bawah) penyerapan awal disebabkan oleh hilangnya viskositas dan tidak ada mekanisme resonator rongga yang terjadi karena resistivitas aliran struktur yang tinggi. Jika ukuran pori lebih tinggi (1,5 - 2,5 mm) resonator rongga terjadi karena kontribusi kehilangan viskos yang lebih rendah dan kemampuan gelombang suara melewati struktur. Namun, sampel dengan pori yang lebih kecil dapat disesuaikan dengan mekanisme resonator rongga jika ketebalannya lebih rendah daripada sampel dengan pori yang lebih besar. Peningkatan celah udara di belakang sampel memindahkan koefisien penyerapan suara ke frekuensi yang lebih rendah tanpa perubahan dalam rentang frekuensi yang diserap di atas 50% dari koefisien penyerapan suara. Juga jika ketebalan sampel meningkat, kemampuan penyerapan struktur berbusa meningkat karena peningkatan hambatan aliran. Pada Peredam Suara, penyerapan akan bertambah seiring dengan bertambahnya ketebalan, terutama pada frekuensi rendah, efisiensi bahan peredam berpori akan semakin membaik dengan terjadinya penambahan terhadap ketebalan (Doelle, 1999).

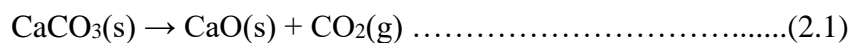
2.8 *Foaming Agent*

Dalam proses pembuatan *metallic foam* dengan metode *gas-releasing particle decomposition* dibutuhkan *foaming agent* yang merupakan senyawa yang berperan sebagai penghasil gas dengan mekanisme dekomposisi senyawa di dalam lelehan. Pemilihan suatu senyawa sebagai *foaming agent* dilihat dari sisi termodinamika meliputi temperatur dekomposisi, densitas, *wettability* dan biaya.

Senyawa yang baik digunakan sebagai *foaming agent* adalah yang memiliki temperatur dekomposisinya tidak berbeda jauh dengan temperatur lebur logam yang akan digunakan yang apabila temperatur dekomposisi *foaming agent* terlalu rendah, reaksi akan terjadi lebih cepat saat serbuk dimasukkan ke dalam lelehan hingga waktu yang dibutuhkan *foaming agent* untuk terdispersi pada lelehan tidak cukup, dan apabila temperatur dekomposisi terlalu tinggi, *foam* yang terbentuk dapat runtuh sebelum terjadi solidifikasi sehingga proses menjadi tidak ekonomis. *Foaming agent* sebaiknya memiliki densitas yang nilainya tidak berbeda jauh dengan lelehan logam dengan memiliki wettability yang baik agar dapat terdispersi dengan sempurna saat dilakukan pengadukan (Anfilov, N. V., et al., 2015)

2.8.1 CaCO₃ Sebagai Foaming Agent

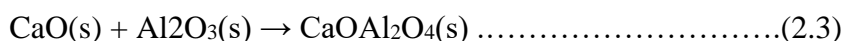
Senyawa karbonat yang biasa digunakan sebagai *foaming agent* untuk pembuatan aluminium foam adalah kalsium karbonat (CaCO₃) dengan densitas 2,71 g/cm³ dan rentang temperatur dekomposisi 650 – 780°C. Selama proses pembuatan aluminium foam, senyawa CaCO₃ akan terdekomposisi dan menghasilkan CaO solid dan gas CO₂ yang merupakan pembentuk poros. Mekanisme dari pembentukan gas CO₂ dari CaCO₃ dapat ditunjukkan dengan persamaan reaksi (1).



Dalam kondisi pengadukan dengan kecepatan tinggi, lelehan aluminium akan bereaksi dengan oksigen dari udara yang akan menghasilkan senyawa Al₂O₃ seperti pada persamaan reaksi (2).



Selanjutnya, CaO juga akan bereaksi dengan Al₂O₃ membentuk kalsia alumina seperti pada persamaan reaksi (3)



Kalsia alumina berperan selain untuk meningkatkan viskositas lelehan juga menstabilkan rongga pori yang terbentuk oleh gas CO₂ yang terperangkap selama proses solidifikasi (Sutarno, 2015).

2.8.2 Kulit Telur Sebagai *Foaming Agent* CaCO₃

Telur merupakan makanan yang banyak dikonsumsi di Indonesia. Produksi telur yang semakin meningkat menimbulkan semakin banyaknya limbah kulit telur yang dihasilkan. Masih kurangnya upaya masyarakat untuk memanfaatkan limbah kulit telur, disebabkan karena sejauh ini limbah tersebut sangat mudah terkontaminasi oleh mikroorganisme. Kulit telur tersebut masih sangat sulit didegradasi oleh mikroorganisme sehingga memungkinkan dapat menjadi bahan pencemar bagi lingkungan (Kusumaningrum dan Rahayu, 2018). Pemanfaatan limbah kulit telur terus dilakukan oleh para peneliti untuk mengurangi pencemaran lingkungan dan juga untuk memberikan nilai jual. Penelitian yang akan dilakukan pada kali ini adalah dengan memanfaatkan kandungan CaCO₃ yang terdapat pada kulit telur (*shell*).

Menurut Badan Pusat Statistik (2018- 2020), produksi telur di Indonesia dari tahun ketahun semakin meningkat dan pada tahun 2020 sementara mencapai 5.044.394,99 ton (BPS, 2020). Semakin maju perkembangan ilmu pengetahuan banyak peneliti yang memanfaatkan

limbah kulit telur. Kandungan gizi kulit telur yang tidak kalah dengan kandungan telurnya tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber suplemen kalsium bagi kesehatan masyarakat di Indonesia (Puspitasari dan Swasono, 2018). Komposisi kulit telur secara umum terdiri atas: air (1,6%) dan bahan kering (98,4%). Dari total bahan kering yang ada, dalam kulit telur terkandung unsur mineral (95,1%) dan protein (3,3%). Berdasarkan komposisi mineral yang ada, maka kulit telur tersusun atas kristal CaCO_3 (98,43%); MgCO_3 (0,84%) dan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (0,75%) (Kusumaningrum dan Rahayu, 2018). Komposisi nutrisi kulit telur dapat secara lengkap dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 6 Komposisi Kulit Telur (Warsy, dkk., 2016)

Nutrisi	Kandungan pada Kulit Telur
	(% berat)
Air	29 – 35 %
Protein	1,4 – 4 %
Lemak murni	0,10 – 0,20 %
Kalsium	35,1 – 36,4 %
Kalsium Karbonat (CaCO_3)	90,9 – 98,43%
Fosfor	0,12 %
Sodium	0,15 – 0,17 %
Magnesium	0,37 – 0,40 %

Pottasium	0,10 – 0,13 %
Sulfur	0,09 – 0,19 %
Alanin	0,45 %
Arginin	0,56 – 0,57 %

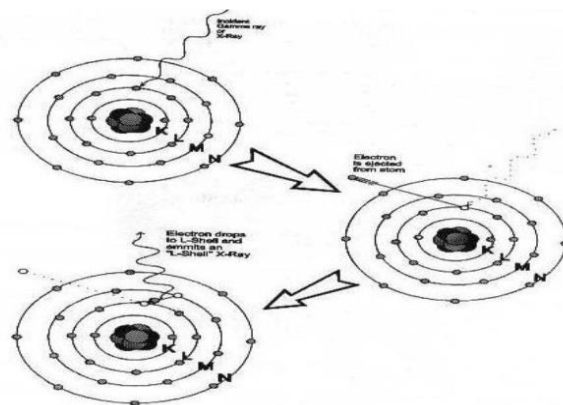
Kulit telur dapat digunakan sebagai agen pembentuk busa (*foaming agent*) dalam pembuatan kalsium karbonat (CaCO_3). Ketika kulit telur terkena suhu tinggi, protein yang terdapat dalam kulit telur mengalami dekomposisi dan menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2). Gas CO_2 tersebut dapat berperan sebagai agen pembentuk busa atau pembentuk pori dalam pembuatan CaCO_3 . Dalam konteks pembuatan aluminium *foam*, CaCO_3 adalah bahan yang penting dalam pembentukan pori dalam struktur foam. Dalam proses tersebut, kulit telur dapat digunakan untuk memberikan sumber gas CO_2 yang diperlukan untuk membentuk pori-pori dalam CaCO_3 . Pada suhu yang tepat, CO_2 yang dihasilkan dari dekomposisi kulit telur akan bereaksi dengan kalsium dalam bentuk larutan untuk membentuk kalsium karbonat. Penggunaan kulit telur sebagai agen pembentuk busa dalam pembuatan CaCO_3 adalah salah satu metode yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam industri material seperti pembuatan aluminium *foam*. *Foaming agent* yang digunakan yaitu CaCO_3 dari limbah kulit telur ayam, karena pada kulit telur ayam tersusun dari kalsium karbonat (CaCO_3) yang melimpah yaitu kurang lebih 98,2 % dan kalsium sekitar 28% dari total bobot kulit (King Ori, 2011). *Foaming agent* yang

digunakan dalam fabrikasi metal foaming agent dapat bervariasi tergantung pada kebutuhan dan jenis material yang digunakan. Salah satu bahan yang telah digunakan sebagai agen pengembang dalam pembuatan *metallic foaming agent* adalah CaCO_3 yang berasal dari limbah kulit telur ayam. Limbah kulit telur ayam mengandung kalsium karbonat (CaCO_3), yang merupakan senyawa kimia yang dapat melepaskan gas karbon dioksida (CO_2) saat dipanaskan. Gas CO_2 ini dapat bertindak sebagai agen pengembang dalam proses pembentukan pori-pori dalam busa logam. Penggunaan limbah kulit telur ayam sebagai sumber CaCO_3 untuk agen pengembang dalam metal foaming agent memiliki beberapa keuntungan, antara lain sumber bahan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, biaya yang relatif rendah, dan potensi pengolahan limbah yang lebih efisien (Jintao., et al., 2021).

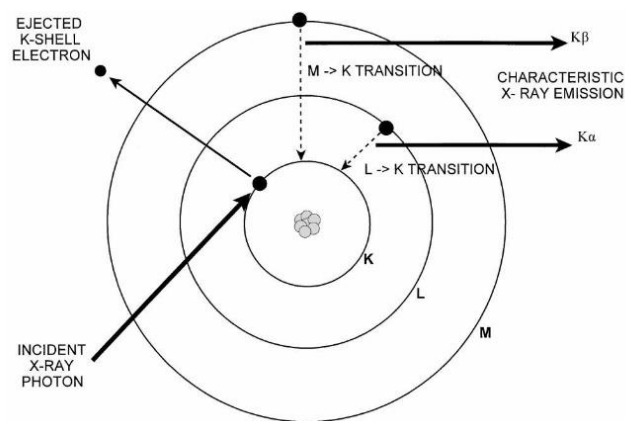
2.9 Karakterisasi XRF

Dasar-dasar XRF terletak pada atom-atom sampel penerima yang memancarkan energi berbeda ketika dieksitasi oleh sinar-X. Foton yang tereksitasi memungkinkan analisis kualitatif dan kuantitatif sebagian besar elemen dalam sampel tertentu. Pertama, sinar-X mengeluarkan atom dari kulit bagian dalam. Atom dari kulit terluar mengisi kulit dalam (K atau L). Atom yang tereksitasi melepaskan energi di wilayah sinar-X dari panjang gelombang saat kembali ke keadaan dasar. Foton yang dilepaskan dengan energi setara dengan perbedaan antara dua kulit yang berbeda. Misalnya, transisi dari kulit L ke kulit K menghasilkan garis spektral, yang disebut K, sedangkan transisi dari kulit M ke

kulit K menghasilkan garis spektral, yang disebut $K\beta$. Dengan demikian, setiap elemen memiliki garis karakteristik yang berbeda dalam spektrum karena setiap jenis transisi orbit menghasilkan sinar-X yang berbeda. XRF menunjukkan bahwa ketika atom tertentu tereksitasi, mereka melepaskan energi dalam bentuk fluoresensi saat mereka kembali ke keadaan tidak tereksitasi. Foton yang dipancarkan kemudian dideteksi oleh instrumen. Pada Gambar 2.3 memberikan gambaran tentang dasar-dasar teori XRF (Lim, 2013).



Gambar 2. 5 Proses Dari Karakterisasi XRF (Lim, 2013).



Gambar 2. 6 Mekanisme dari Karakterisasi XRF (Lim, 2013).

XRF dapat digunakan untuk mendeteksi sebagian besar unsur dalam tabel periodik mulai dari Na hingga U dan bahkan unsur-unsur dengan nomor atom (Z) yang lebih tinggi, meskipun pendeteksian unsur-unsur dengan Z rendah memerlukan penggunaan vakum atau gas pembersih helium. Instrumen XRF portabel lapangan modern, bagaimanapun, telah meningkatkan detektor *solid state* dengan resolusi energi yang cukup untuk analisis multi-elemen dengan sedikit masalah interferensi spektral, dan tidak memerlukan pendinginan nitrogen cair. Banyak model telah dikembangkan dan dipasarkan untuk aplikasi khusus seperti analisis Pb dalam cat. Dalam keadaan normal, deteksi positif sampel dikonfirmasi oleh beberapa garis fluoresensi dengan energi berbeda yang dapat diperluas untuk menunjukkan resolusi penganalisis yang terbatas. Namun, interpretasi spektrum XRF yang mengandung banyak tumpang tindih garis fluoresensi bisa menjadi sangat rumit karena keterbatasan mendasar detektor dalam membedakan foton dengan energi serupa (Lim, 2013).

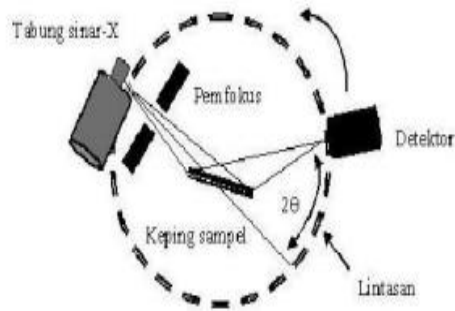
2.10 Karakterisasi XRD

X-Ray Diffraction adalah teknik analisis yang cepat terutama digunakan untuk identifikasi fasa dari bahan kristal dan dapat memberikan informasi tentang dimensi sel satuan Max von Laue, pada tahun 1912, menemukan bahwa zat kristal bertindak sebagai tiga dimensi kisi-kisi difraksi untuk panjang gelombang sinar X. Difraksi sinar-X sekarang menjadi teknik umum untuk studi struktur kristal dan jarak atom. Difraksi sinar-X didasarkan pada interferensi konstruktif dari monokromatik sinar-X dan sampel kristal.

Sinar-X dihasilkan oleh tabung sinar katoda, disaring untuk menghasilkan radiasi monokromatik, collimated untuk berkonsentrasi, dan diarahkan ke sampel. Interaksi sinar dengan sampel menghasilkan interferensi konstruktif ketika kondisi memenuhi hukum Bragg. Hukum ini berkaitan dengan panjang gelombang radiasi elektromagnetik untuk sudut difraksi kisi dan jarak dalam sampel kristal. Difraksi sinar-X kemudian terdeteksi, diproses dan dihitung. Konversi puncak difraksi dengan jarak d memungkinkan identifikasi mineral karena mineral masing-masing memiliki satu set unik jarak d . Biasanya, hal ini dicapai dengan perbandingan jarak d dengan pola referensi standar (Taqiyah, 2012).

X-ray difraktometer terdiri dari tiga elemen dasar: sebuah tabung sinar-X, pemegang sampel, dan detektor sinar-X. Sinar-X dihasilkan dalam tabung sinar katoda dengan memanaskan *filament* untuk menghasilkan elektron, mempercepat elektron menuju target dengan menerapkan tegangan dan membombardir 2-5 bahan target dengan elektron. Ketika elektron memiliki energi yang cukup untuk mengeluarkan *electron shell* dalam diri bahan target, karakteristik spectrum sinar-X dihasilkan. Spektrum ini terdiri dari beberapa komponen $K\alpha$ yang paling umum dan $K\beta$. $K\alpha$ terdiri dari $K\alpha_1$ dan $K\alpha_2$. $K\alpha_1$ memiliki panjang gelombang lebih pendek dan dua kali intensitas sebagai $K\alpha_2$.

Sebuah catatan *detector* dan proses pada sinyal sinar-X terjadi yang kemudian mengubah sinyal menjadi tarif hitungan yang kemudian dikeluarkan melalui perangkat seperti printer atau monitor computer. *X-ray Diffraction* paling banyak digunakan untuk identifikasi bahan kristalin seperti mineral dan senyawa anorganik (Pratapa et al, 2010).



Gambar 2. 7 Mekanisme Karakterisasi XRD (<https://rolanrusli.com>).

2.11 Pengujian Densitas dan Porositas

Pengujian densitas bertujuan untuk menentukan kondisi sampel dalam penyerapan air, densitas, porositasnya dan berat jenis dari sampel. Pengukuran densitas, porositas, dan berat jenis adalah alat untuk menentukan tingkat kematangan benda, atau untuk menentukan sifat struktural yang mungkin diperlukan untuk aplikasi tertentu (ASTM C373-88, 2006). Sedangkan pengujian porositas dilakukan untuk kita mengetahui berapa banyak ruang kosong yang terbentuk pada sampel. Sampel perlu dilakukan proses pengeringan pada temperatur 105°C agar kadar air didalamnya sepenuhnya hilang. Pengeringan spesimen hingga massa konstan dan penentuan massanya dapat dilakukan sebelum atau sesudah spesimen diresapi dengan air. Biasanya massa kering ditentukan sebelum impregnasi. Namun, jika spesimen rapuh atau bukti menunjukkan bahwa partikel terlepas selama impregnasi, spesimen harus dikeringkan dan ditimbang setelah massa tersuspensi dan massa jenuh telah ditentukan. Berikut adalah persamaan 2.4 yang digunakan untuk menghitung densitasnya.

$$\rho = \frac{m}{\pi \times r^2 \times t} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

ρ = Massa jenis aluminium *foam* (g/cm³)

m = Massa sampel (g)

$\pi r^2 t$ = Volume tabung (cm³)

Setelah itu, hasil yang diperoleh dari pengujian densitas, dimasukkan kembali untuk menghitung porositas yang terbentuk didalam sampel dengan persamaan 2.5 berikut ini (Sutarno et al., 2015).

$$\% \text{Porositas} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{Al foam}}}{\rho_{\text{Al}}}\right) \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

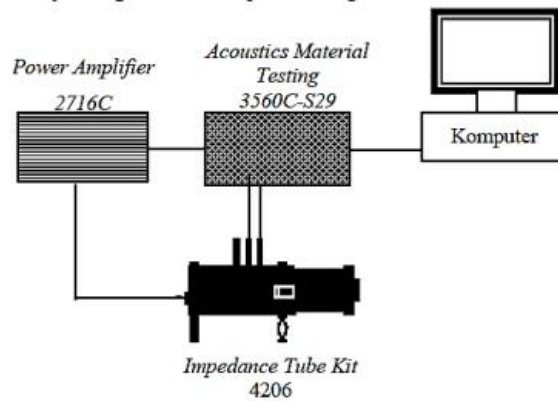
%Porositas = Persentase Porositas (%)

$\rho_{\text{Al Foam}}$ = densitas aluminium *foam* (g/cm³)

ρ_{Al} = densitas aluminium ADC 12 (2,74 g/cm³)

2.12 Pengujian *Impedance Tube Testing* (ITT)

Untuk *metallic foam*, sifat akustik diukur dengan menentukan impedansi input spesimen menggunakan tabung impedansi yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Bentuk gelombang akustik dihasilkan di satu ujung dari *metal foam* ditempatkan di ujung lain tabung. Penghentian ujung menampilkan piston yang dapat digerakkan yang memungkinkan untuk menciptakan kedalaman udara yang sewenang-wenang di bagian belakang busa logam jika perlu (Arjunan et al., 2019).



Gambar 2. 8 Skematik Pengujian ITT

Susunan alat terdiri dari :

1. *Acoustic Material Testing* 3560C-S29 : Untuk menganalisa sinyal yang diterima mikrofon
2. *Power Amplifier* 2716C : Untuk menguatkan gelombang bunyi
3. *Impedance Tube Kit* 4206 : Sebagai tempat pengukuran kemampuan absorpsi suara sampel.
4. Komputer : Untuk mengolah dan menampilkan data hasil pengujian.

Sumber suara adalah gelombang sinus yang diputar melalui pengeras suara yang diprakarsai oleh generator nada dalam rentang frekuensi 125 hingga 5000 Hz. Respon akustik yang direkam oleh mikrofon kemudian diperkuat dan dianalisis melalui penganalisa frekuensi. Pola gelombang berdiri yang dihasilkan dalam tabung adalah hasil nilai koefisien serap suara oleh busa logam. Kemudian koefisien penyerapan suara (α) kemudian dapat dihitung menggunakan Persamaan.

(2.6)

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

α = Koefisien penyerapan suara

W_a = Intensitas suara yang diserap oleh sampel (*Absorbed Sound*).

W_i = Intensitas suara sebelum melewati sampel (*Incident Sound*).

Nilai α menyatakan energi suara datang yang diserap oleh tabung impedansi termasuk sampel busa logam. Pengujian absorpsi suara bertujuan untuk mengetahui kemampuan material untuk menyerap suara. Kualitas material penyerap suara ditentukan dari harga α (koefisien penyerapan bahan terhadap bunyi)(Arjunan et al., 2019). Semakin besar nilai α maka semakin baik kemampuan material tersebut dalam menyerap suara. Nilai α berkisar dari 0 sampai 1. Jika α bernilai 0 maka tidak ada bunyi yang diserap oleh material tersebut atau seluruh bunyi dipantulkan sedangkan jika α bernilai 1 maka seluruh bunyi yang datang diserap oleh material tersebut (Khotimah, 2015).

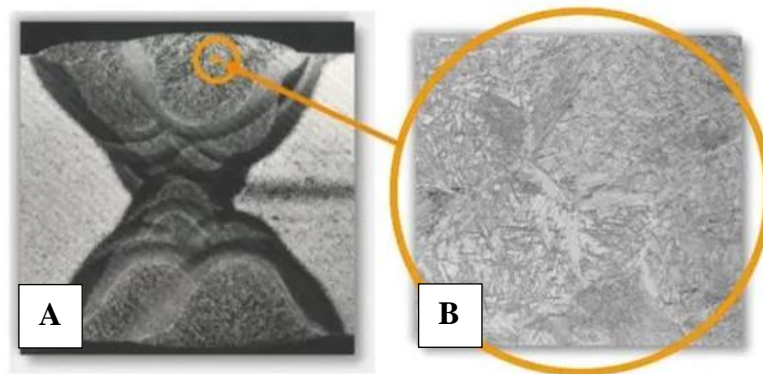
Dimensi spesimennya berbentuk lingkaran dengan diameter 9,8 cm dan ketebalan bervariasi 5,6 dan 7 cm. Bentuk sampel yang akan diuji dapat dilihat pada Gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2. 9 Sketsa Sampel Aluminium *Foam*

2.13 Pengujian Metalografi

Dalam menguji spesimen secara makroskopis, digunakanlah pengujian metalografi dalam praktiknya. Metalografi adalah perpaduan ilmu dan seni yang mempelajari tentang struktur mikroskopis logam dan paduan menggunakan mikroskop optik, mikroskop elektron atau jenis mikroskop lainnya. Kinerja dan sifat material terutama sifat mekanik logam ditentukan oleh struktur mikro, dengan menganalisis struktur mikro material maka kinerja dan keandalan saat digunakan dapat dipahami dengan lebih baik. Terdapat dua jenis pengujian metalografi, dimana mencakup kepada *macro examination* dan *micro examination* (ASM International, 2004). Kedua pengujian ini mempelajari mengenai struktur dari material yang dimana masing-masing memiliki tujuan yang berbeda. Pada *macro examination*, biasanya dilakukan untuk mengamati visual terhadap cacat pada permukaan material. Observasi ini dilakukan dengan skala perbesaran kurang dari 5x. Sementara itu, untuk *micro examination*, pengujian dilakukan dengan mengamati struktur butir (*grain structure*) dan cacat pada skala butir.



Gambar 2. 10 Inspeksi Metalografi
(A) Struktur Makro; (B) Struktur Mikro

Pengujian metalografi melibatkan beberapa standar yang digunakan dalam ranah internasional. Standar-standar ini mengatur mengenai designasi dari nominal ukuran butir, cara perhitungan, dan jenis-jenis pengujian yang dilakukan. Standar analisis metalografi atau mikrostruktur mencakup, tetapi tidak terbatas pada, jenis analisis Grain size (ASTM E112, E930, E1181), Analisis fasa (ASTM E566), dan *Micro crack and porosity*.

Tujuan dari pengujian metalografi sendiri secara *engineering* adalah mengidentifikasi dan memahami struktur mikroskopis dari material logam seperti butir logam, batas butir, dan fasa-fasa yang ada. Hal ini memberikan wawasan tentang bagaimana material tersebut terorganisir secara mikroskopis. Selain itu, pengujian metalografi juga dapat mengevaluasi kualitas dan kondisi material dan mendeteksi cacat atau perubahan struktural yang mungkin terjadi selama proses produksi atau pengolahan. Salah satu aplikasinya, pengujian dapat membantu dalam mengidentifikasi retakan, porositas, atau inhomogenitas dalam struktur logam, dan dapat mengetahui mengenai struktur pori dari suatu material (ASM International, 2004)