

Bab II

Tinjauan Pustaka

2.1 *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis (SIS)*

Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis (SIS) merupakan proses *sistesa material* yang melibatkan pembakaran eksotermik sehingga memperoleh produk dengan kemurnian tinggi dengan fasa metastabil dan densifikasi secara menyeluruh pada produk (Pramono et al, 2016). SIS adalah pengembangan dari *self-propagating high-temperature Synthesis (SHS)* dengan pembakaran yang terkontrol. SHS adalah sebuah metode yang ditemukan pada akhir tahun 1960-an dengan memanfaatkan reaksi eksotermik menghasilkan material khusus (Borisova & Borisov, 2008).

Perbedaan utama SIS dan SHS terletak pada cara pemanasan sampel di temperatur 700°C-1000°C. Sedangkan reaksi pembakaran SHS membutuhkan suhu tinggi di atas 1000°C. Reaksi eksotermik yang terjadi pada SHS berfungsi untuk membentuk ikatan antar permukaan karena energi panas yang diberikan akan masuk ke dalam cetakan khusus SIS sehingga terjadi pembakaran yang terkontrol yang akan mempermudah ikatan antar permukaan yang terbentuk (Prasetyo, 2018).

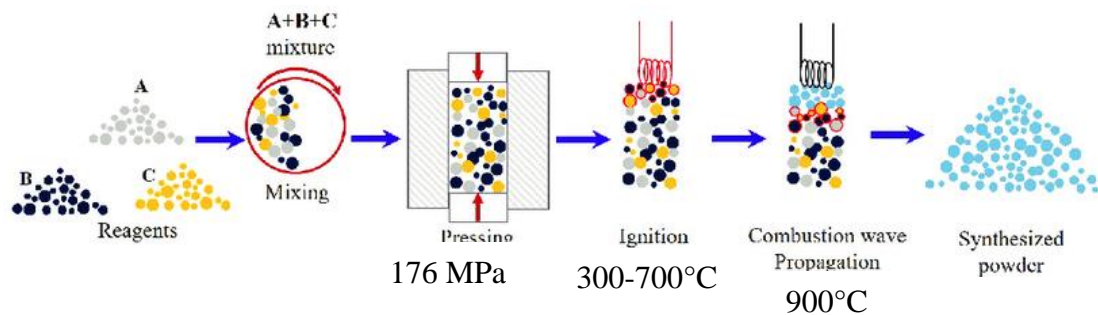
Metode SIS yang banyak dikembangkan saat ini adalah *SIS powder*, *SIS sintering*, *SIS kompaksi*, *SIS metalurgi*, *SIS welding*, dan *gas transport SIS coating*. Metode SIS yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kombinasi dari *SIS sintering* dan *SIS kompaksi*. *SIS sintering* adalah proses pemanasan dengan menggunakan cetakan yang sudah didesain sedangkan *SIS kompaksi* adalah proses penekanan secara mekanik, dilakukannya kompaksi pada sampel untuk menjadi padat diantar serbuk yang terkompaksi.

2.1.1 Proses SIS

Proses SIS dilakukan dengan cara memanaskan sampel pada suhu tinggi yang mengakibatkan pembakaran terkontrol pada sampel. Pemanasan dilakukan dengan cetakan khusus pada temperatur kurang dari 1.000°C.

Proses SIS diketahui memiliki tingkat efisiensi yang tinggi, hal ini dikarenakan pada pembakaran di bawah 1.000°C, SIS dapat menghasilkan material dengan kekuatan yang tinggi, porositas sel terbuka yang lebih baik dengan menambahkan zat pembentuk pori.

Pori yang terbentuk dengan menggunakan metode SIS ini berkisar 1-6 mm dan bentuk pori kecil yang kurang dari 100 µm dengan ketebalan dinding pori 30 µm hingga 400 µm yang bergantung dengan ukuran porinya (Liu, 2014). Metode ini telah digunakan untuk mengembangkan material keramik berpori Al_2O_3 -TiO-TiO₂ menggunakan agen pembentuk pori yang berubah menjadi gas akibat suhu tinggi. Metode SIS juga banyak digunakan pada aplikasi pembentukan komposit berpori sebagai biomaterial yaitu kalsium fosfat (HCaP), NiTi, NiTi-TiC, TiB-Ti, TiC-Ti, sebagai rekayasa jaringan tulang dan juga penghantar obat (Ayer et al, 2007).

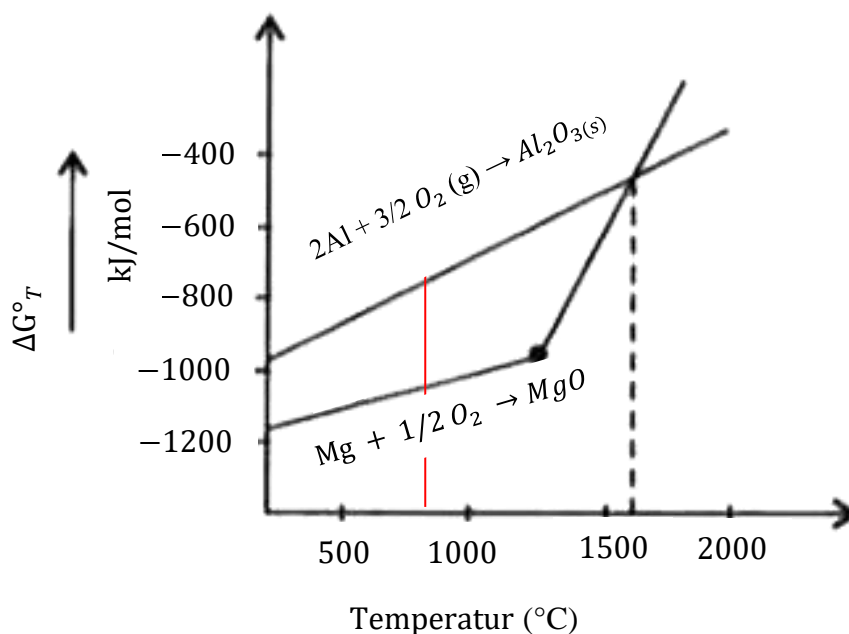


Gambar 2.2 Proses *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* (SIS)

Gambar 2.2 merupakan skema dari proses SIS yang pada umumnya digunakan untuk membuat paduan dan komposit. Proses SIS dilakukan dengan mencampurkan material kemudian melakukan pemadatan bahan dengan memberikan tekanan 176 MPa lalu dilanjutkan dengan *preheat* / sintering pada temperatur 300-700°C kemudian dilakukan pemanasan pada temperatur tinggi yaitu di atas temperatur 700°C. *Preheat* dilanjutkan dengan proses pembentukan sampai temperatur 900°C menggunakan cetakan khusus sehingga panas terkonsentrasi pada bagian atas sampel (Hussainov, 2020). Metode SIS diketahui jauh lebih sederhana dari metode lainnya.

2.1.2 Reaksi SIS

Reaksi pembentukan pada metode SIS dengan bahan komposit akan melalui proses pemanasan / sintering. Pembakaran dilakukan melibatkan pembakaran eksotermik. Reaksi SIS, juga disebut sebagai *solid state combustion*, menggunakan pembentukan senyawa awal dari zat reaktan untuk mengembangkan reaksi eksotermik, yang menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan dari reaksi eksotermik, lalu secara simultan akan mendorong terjadinya energi pembakaran/sintering yang cukup untuk memulai pembentukan senyawa awal dari campuran reaktan. Reaksi menjadi merambat dan gelombang pembakaran bergerak melalui reaktan mengubahnya menjadi produk akhir. Parameter reaksi SIS bergantung pada ukuran partikel, stoikiometri reaktan, ukuran pelet dan *green density*. Biasanya untuk pemadatan komposit yang lebih baik reaktan SIS dapat dipadatkan di bawah tekanan tinggi pada keadaan cair magnesium sebagai logam pengikat (Kommel, 2008).



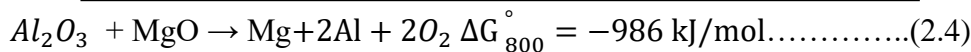
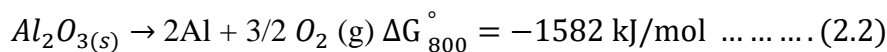
Gambar 2.2 Diagram Ellingham. (Geiger, 1973)

Secara *thermodinamika* proses SIS dapat dijelaskan dengan Gambar 2.2 contoh pada komposit Al dan Mg akan saling bereaksi dan berikatan

membentuk $MgAl_2O_4$. Reaksi eksotermis merupakan reaksi yang terjadi dengan disertai pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan. Reaksi eksoterm (melepaskan kalor) pada umumnya berlangsung spontan (Uphadaya, dan Dube, 1977). Kespontanan reaksi dapat juga dinyatakan dalam energi bebas Gibbs (G), dengan persamaan di bawah ini.

$$\Delta G^\circ = \Delta H - T\Delta S \dots \dots \dots (2.1)$$

Suatu reaksi berlangsung spontan jika dan hanya jika terjadi pengurangan energi bebas (ΔG negatif). Jika positif, maka reaksi itu tidak spontan. Adapun reaksi yang terjadi adalah pembentukan reaksi Al_2O_3 , MgO , dan kemudian membentuk $MgAl_2O_4$ pada temperatur 800° . Berikut adalah persamaan dari pembentukan $MgAl_2O_4$ dan nilai ΔG° :



Berdasarkan persamaan dan perhitungan dapat diketahui bahwa pada pembentukan $MgAl_2O_4$ mempunyai $\Delta G^\circ = -986 \text{ kJ/mol}$. Dari hasil pembentukan reaksi $MgAl_2O_4$ berlangsung spontan karena nilai ΔG° (negatif).

2.1.3 Aplikasi SIS

SIS banyak digunakan untuk membuat komposit keramik tertentu, pembuatan komposit dan senyawa intermetalik metode ini mendapat banyak perhatian sebagai alternatif teknologi tungku konvensional. Material SIS digunakan diberbagai bidang seperti teknik mekanik, kimia, *bioscience*, dirgantara dan industri nuklir. Metode SIS juga telah diaplikasikan untuk pemadatan dinamis material komposit dengan aplikasi struktural tingkat lanjut sehingga menghasilkan material komposit dengan kekerasan dan ketangguhan yang baik. Teknologi SIS memiliki beberapa fitur khusus yaitu sebagai berikut (Levashov, 2016):

- a) Energi panas yang berasal dari reaksi kimia sampel.
- b) Waktu reaksinya singkat
- c) Peralatan digunakan sederhana dengan tungku temperatur tinggi.
- d) Menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi.
- e) Dapat menghasilkan produk dan mikrostruktur yang baik.

$MgAl_2O_4$ banyak dimanfaatkan untuk bahan semen dan gelas aplikasi temperatur tinggi, bahan tungku pemanas (*furnace*) baja, dan bahan keramik transparan untuk peralatan laboratorium, lensa kamera, dan sebagai pelapis lampu dengan aplikasi tekanan tinggi (Dorre dan Hubner, 1984). Di bawah ini merupakan Tabel 1.1 sifat dan karakteristik $MgAl_2O_4$.

Tabel 1.1 Sifat dan Karakteristik $MgAl_2O_4$ (Valdez , Aquiler, 1997)

Struktur	<i>Cubic</i>
Densitas	3,58 – 4,00 gr/cm ³
kekerasan	7,50 – 8,00 GPa
<i>Fracture Toughnes</i>	1,94 – 1,97 MPa m ^{1/2}
<i>Fracture energy</i>	7,00 – 16,9 J/m ³
Titik Leleh (°C)	2135

2.2 *Heat Transfer*

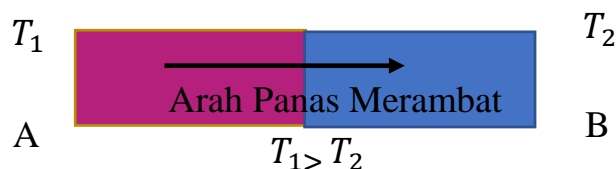
Panas merupakan energi yang dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari dan banyak digunakan pada suatu pekerjaan atau kegiatan. Panas cenderung memiliki sifat dinamis serta berpindah-pindah dan akan mengalami perpindahan karena adanya perbedaan temperatur pada suatu objek atau daerah.

Perpindahan panas (*Heat Transfer*) merupakan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur di antara benda atau material. Energi yang berpindah dinamakan kalor atau panas. Perpindahan panas yang terjadi pada proses SIS dengan mekanisme konduksi dan konveksi (Lewis, et al., 2004). Konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi saat perbedaan suhu antara benda

dengan media penghantar yang umumnya padatan/solid. Sedangkan perpindahan panas secara konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi antara permukaan dan fluida yang bergerak saat berada pada suhu yang berbeda.

2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah suatu proses perpindahan panas yang jika dua benda suhunya disentuhkan dengan yang lainnya maka akan terjadilah perpindahan panas (Ferrari, 2002). Konduksi memiliki mekanisme di mana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar menurut teori kinetik. Suhu elemen suatu zat sebanding dengan energi kinetik rata-rata molekul yang membentuk elemen itu. Energi yang dimiliki oleh suatu elemen zat yang disebabkan oleh kecepatan dan posisi relative molekulnya disebut energi dalam. Perpindahan energi tersebut dapat berlangsung dengan tumbukan elastik (*elastic impact*), misalnya dalam fluida atau dengan pembauran (difusi/*diffusion*) elektron–elektron yang bergerak secara cepat dari daerah yang bersuhu tinggi kedaerah yang bersuhu lebih rendah (misalnya logam). Konduksi merupakan satu–satunya mekanisme di mana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya. Adapun skematik perpindahan panas secara konduksi dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Perpindahan Panas Konduksi

Pada Gambar 2.3 diketahui sebuah batang yang sebelah ujung kiri A dan sebelah ujung kanan B, seperti yang terlihat perbedaan terdapat temperatur dari ujung A dan ujung B. Terjadinya perambatan panas menyebabkan adanya perbedaan temperatur pada titik satu dengan titik

lainnya pada waktu tertentu, perbedaan ini disebut sebagai gradien temperatur. Karena ujung A dipanaskan sehingga temperatur ujung A akan lebih tinggi dibandingkan ujung B. Dengan tercapai kesetimbangan temperatur, maka panas dari ujung A akan mengalir keujung B, sehingga menyebabkan ujung B mengalami kenaikan temperatur (Sears & Zemansky, 1982)

Proses perpindahan panas yang terjadi, dapat dihitung laju perpindahan panasnya menggunakan persamaan yang digunakan untuk menghitung jumlah energi yang berpindah per satuan waktu. Pada mekanisme konduksi, persamaan laju perpindahan panas dikenal sebagai hukum Fourier. Hukum Fourier sebagai persamaan laju perpindahan panas dinyatakan sebagai:

$$q_c = -kA \frac{dt}{dx} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$q_c = k \frac{A}{L} (T_1 - T_2) \dots \dots \dots (2.6)$$

q_c = laju panas konduksi yang berpindah

Ket:

A = luas penampang bidang

L = tebal dinding

k = konduktivitas termal bahan

T = temperatur

Laju perpindahan panas dapat diketahui dari nilai *heat flux* nya. *Heat flux* memiliki arti tingkat perpindahan panas per satuan luas (Bergman dkk, 2011). Untuk mengetahui laju perpindahan panas ataupun *heat flux* nya, maka perlu diketahui dahulu konduktivitas termal dari material tersebut. Persamaan laju perpindahan panas yang diketahui nilai *heat flux* nya dinyatakan sebagai berikut:

$$q = Q.A \dots \dots \dots (2.7)$$

2.2.2 Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan panas atau kalor yang disertai dengan perpindahan bagian zat perantaranya. Konveksi merupakan proses

ketika panas dari satu tempat lain dipindahkan melalui fluida seperti cairan atau gas. Perpindahan kalor secara konveksi disebabkan oleh perbedaan temperatur.

Konveksi terdiri dari dua mekanisme yaitu perpindahan energi sebagai akibat dari pergerakan molekular acak yang disebut konveksi alami dan ada juga energi yang dipindahkan oleh pergerakan secara mikroskopis yang disebut konveksi paksa dari fluida. Perpindahan panas konveksi yang terjadi antara fluida yang bergerak dan batas permukaan, ketika keduanya berada pada temperatur yang berbeda (Yanguo Zhang, 2016).

Perpindahan panas konveksi terdiri dari dua mekanisme konveksi paksa dan konveksi alami. Berdasarkan sifat alirannya, perpindahan panas konveksi dapat diklasifikasikan menjadi dua macam, yaitu konveksi paksa dan konveksi bebas (alami). Konveksi paksa disebabkan oleh peralatan eksternal, seperti kipas angin, pompa, atau angin di atmosfer. Sebaliknya, pada konveksi bebas (alami), aliran fluida disebabkan gaya apung karena perbedaan massa jenis akibat perbedaan suhu pada fluida. Perpindahan panas secara konveksi antara permukaan dan fluida dapat dihitung menggunakan persamaan: (Frank Kreith, 1997).

$$q_c = h_c \cdot A (\Delta T^4) \dots \dots \dots (2.8)$$

$$q_c = h_c A (T_w - T_f) \dots \dots \dots (2.9)$$

ket:

q_c = laju perpindahan panah konveksi [W]

A = luas penampang (m^2)

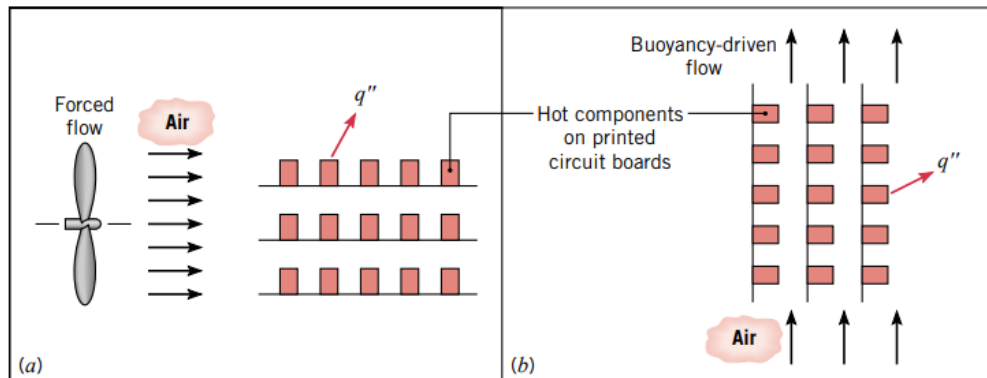
h_c = koefisien konveksi

T_w = suhu permukaan dingin [C]

T_f = suhu fluida [C]

Berdasarkan Persamaan 2.8, berbeda dengan konduksi, untuk mengetahui laju perpindahan panas secara konveksi maka harus diketahui dahulu koefisien perpindahan panas fluidanya. Bila gerakan panas berlangsung semata-mata sebagai akibat dari perbedaan kerapatan yang

disebabkan oleh gradien suhu, maka disebut konveksi bebas atau alamiah (*natural*). Bila gerakan panas disebabkan oleh suatu alat dari luar seperti pompa atau kipas, maka prosesnya disebut konveksi paksa. Gambar di bawah ini adalah konveksi perpindahan panas.



Gambar 2.4 *Convection heat transfer processes.* (a) konveksi paksa. (b) konveksi alami (Hutton, 2004).

Perpindahan panas dengan cara konveksi tergantung pada gerakan fluida maka perpindahan panas konveksi didasarkan pada karakteristik aliran fluida. Konveksi paksa pada Gambar 2.4a disebabkan oleh paksaan dari luar seperti blower, exhaust, dan pompa. Sedangkan konveksi bebas atau konveksi alami disebabkan oleh pergerakan fluida secara alami yang disebabkan perbedaan massa jenis akibat perbedaan temperatur sehingga fluida yang memiliki temperatur lebih tinggi akan terapung (Hutton, 2004).

Perpindahan panas konveksi, di mana perpindahan panas terjadi di antara permukaan sebuah benda padat dengan fluida (cairan dan gas) yang menyentuh permukaan. Berikut adalah perpindahan panas hasil nilai koefisien lihat Tabel 2.2 (Frank Kreith, 1997).

Tabel 2.2 Nilai koefisien *heat transfer film Coefficient* pada Fluida

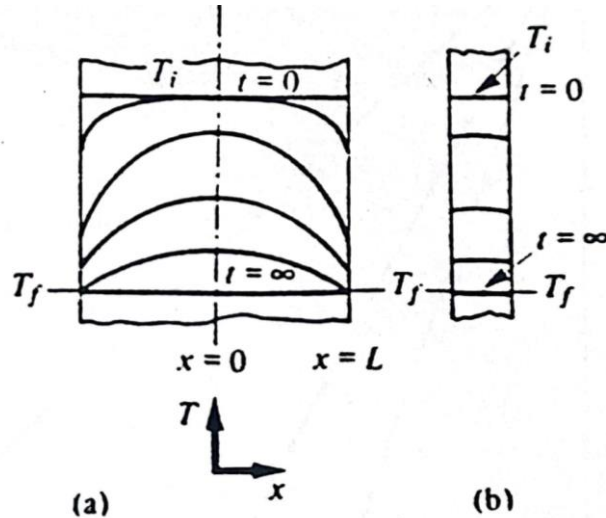
Fluida	<i>Film Coefficient</i> (W/m ² K)
Gas (diam)	15
Gas (mengalir)	15 – 250
Liquid air (diam)	100
Liquid air(mengalir)	100 – 2000
Liquid mendidih	2000 – 35.000
Uap air	2000 – 25.000

2.2.3 Mekanisme Transfer Panas pada Benda Plat

Mekanisme transfer panas pada plat didasari pada profil konstruksi permukaan, *heat transfer* yang digunakan *plate heat exchanger*. Masalah perpindahan panas dapat diklasifikasikan sebagai stabil (*steady state*) atau sementara (transient atau unsteady). Istilah *steady state* menyiratkan tidak ada perubahan dengan waktu pada setiap titik di dalam medium, sementara *transient* menyiratkan variasi dengan ketergantungan terhadap waktu. Oleh karena itu, pada keadaan transient temperatur atau fluks panas tetap tidak berubah dengan waktu selama perpindahan panas melalui suatu medium di lokasi manapun, walaupun kedua dapat bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya.

Pada *transiet system*, *finite dimensions* bagian ini, mempertimbangkan perpindahan kalor konduksi dalam padatan, di mana temperatur bervariasi tidak hanya dengan posisi dalam ruang, tetapi juga mengalami perubahan terus menerus dengan waktu pada setiap posisi. Secara khusus, topik ini sangat penting dalam operasi *quenching* atau pendinginan. Ketika benda padat seperti pelat, mula-mula bersuhu seragam

T, didinginkan oleh fluida bersuhu T_f , distribusi suhu bervariasi dengan waktu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Transient Temperatur distributions* (a) plat tebal (b) plat tipis (Geiger, 1973).

Pada Gambar 2.5 (a) pelat tipis, dan/atau konduktivitas termalnya tinggi, maka gradien suhu di dalam pelat dapat diabaikan, dan dapat menganggap suhu hanya sebagai fungsi waktu. Pada *steady-state*, aliran panas dua-dimensi yaitu untuk *semi-infinite plate*. Pelat dilambangkan *semi-infinite* karena salah satu dimensinya, y , tidak terbatas. Masalah pada metode pemisahan variabel yang sering digunakan untuk menyelesaikan persamaan konduksi menggambarkan pelat pada bidang xy memanjang ke $y = \infty$ dengan rusuk di $x = 0$, $x = L$, dan $y = 0$.

Distribusi temperatur pada pelat yang sangat tipis dapat diabaikan, atau dapat mempertimbangkan panjang di mana gambar termal identik di semua bidang. Pada bentuk plat sendiri dibedakan pada *transiet system*, *finite dimensions* (Geiger, 1973). Mekanisme transfer panas pada plat tipis akan memeriksa kapan kriteria ini terpenuhi pada persamaan.

$$hL/k \leq 0,1, \dots\dots\dots(2.10)$$

Ket:

h = Tebal

L = Lebar

k = konstanta

Dengan menemukan bahwa Persamaan 2.10 berikut tercapai pada plat tipis. Untuk situasi ini keseimbangan panas mengambil bentuk yang agak sederhana, dengan menyamakan laju panas yang hilang oleh pelat dengan laju perpindahan panas ke fluida. Untuk konduksi panas, persamaan laju sebagai hukum Fourier. Untuk bidang dinding satu dimensi ditunjukkan memiliki distribusi temperatur $T(x)$, persamaan laju dinyatakan: (Holman, J.P, 2010)

$$q = -k \cdot A \frac{dt}{dx} \dots\dots\dots(2.11)$$

Ket:

q = Laju aliran panas dengan cara konduksi

k = Konduktivitas termal bahan (W/m K)

A = Luas penampang

$\frac{dt}{dx}$ = Gradien suhu pada penampang ($^{\circ}C$)

2.3 *Finite Element Analysis*

Finite element analysis (FEA) merupakan metode Analisis Elemen Hingga, FEA pertama kali dikembangkan oleh Courant pada awal tahun 1940-an namun mulai populer diperkenalkan oleh (Turner et al, 1956). FEA adalah teknik komputasi yang digunakan untuk mencari solusi perkiraan untuk berbagai masalah teknik "dunia nyata" yang memiliki domain kompleks yang tunduk pada kondisi batas umum. Prinsip kerja dari FEA adalah mengubah permasalahan yang kompleks akibat banyaknya parameter yang menyebabkan suatu permasalahan memiliki pemecahan masalah dengan angka yang tak hingga. Fenomena fisik biasanya terjadi dalam rangkaian materi (padat, cair, atau gas) yang melibatkan beberapa variabel medan. Variabel lapangan bervariasi dari titik ke titik, sehingga memiliki jumlah solusi yang tak terbatas dalam domain (Madenci & Erdogan, 2015).

FEA adalah teknik numerik untuk mencari solusi pada masalah nilai batas. Teknik ini menggunakan metode (kalkulus variasi) untuk meminimalkan fungsi kesalahan dan menghasilkan solusi yang baik. Analoginya dengan gagasan bahwa jika menghubungkan banyak garis lurus kecil dapat menghasilkan lingkaran yang lebih besar.

Analisis elemen hingga (FEA) adalah metode yang dominan dalam analisa mekanika struktural. Konsep dasar metode dari FEA adalah pembagian model matematis yang diuraikan menjadi komponen geometri sederhana (*non-overlapping*) yang disebut elemen hingga. Dalam metode FEA semua kompleksitas masalah, seperti bentuk yang bervariasi, kondisi batas dan beban dipertahankan sebagaimana adanya tetapi solusi yang diperoleh adalah perkiraan. FEA sebagai metode matriks analisis struktural. Saat ini metode ini digunakan tidak hanya untuk analisis mekanika padat, tetapi bahkan dalam analisis aliran fluida, perpindahan panas, medan listrik dan magnet. Metode ini digunakan secara luas untuk analisis dan desain kapal, pesawat terbang, pesawat luar angkasa, motor listrik, dan mesin panas.

Sifat material dalam FEA digunakan untuk membantu membangun atau membentuk persamaan sistem. Persamaan yang digunakan berbeda-beda bergantung dari jenis sistem yang dianalisis. Salah satu contohnya adalah analisis dari sistem perubahan struktur yang terdapat pada *solid mechanics*, untuk mengetahui perpindahan akibat gaya yang diberikan pada perhitungan matematika. Secara matematika, dapat dibuat sebuah persamaan yang dapat dilihat pada persamaan (2.12) (Bhavikatti, 2005).

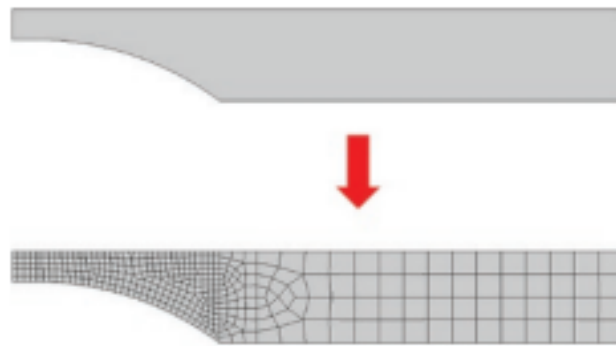
$$[K]_e \{\delta\}_e = \{F\}_e \dots \dots \dots (2.12)$$

Dengan menggunakan Persamaan (2.12) dapat diketahui nilai dari tegangan, regangan, momen, dan lainnya berdasarkan *boundary conditions* dan sifat dari element yang digunakan. Secara umum, FEA dapat dilakukan dengan tahapan-tahapan yaitu sebagai berikut (Chen & Liu, 2019; Bhavikatti, 2005):

1. Analisis masalah dengan menentukan variabel-variabel yang dibutuhkan untuk setiap element yang akan digunakan, seperti variabel bebas, variabel

tetap, dan variabel terikat yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi, beberapa variabel tersebut seperti dimensi geometri, temperatur, tekanan, gaya, dan lain sebagainya.

2. Pembuatan geometri yang akan disimulasikan, pembuatan desain geometri bisa menggunakan *software* berbasis CAD (*Computer Aided Design*) seperti AutoCAD, Inventor, CATIA, SketchUP, Solidwork dan lain-lain, atau bisa menggunakan fitur CAD bawaan pada *software* CAE jika tersedia
3. Mereduksi ukuran elemen dengan membaginya menjadi beberapa bagian kecil (*meshing*). fungsi dari *meshing* otomatis dapat mempercepat dan menentukan bentuk dan ukuran *meshing* dalam mereduksi elemen. Contoh *meshing* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Proses *Meshing* (Chen & Liu, 2019)

4. Menentukan data batasan masalah berupa variabel bebas dan variabel terkontrol ke dalam *software* FEA seperti tegangan, temperatur, tekanan, gaya, waktu proses, serta *boundary conditions* yang digunakan pada setiap elemen.
5. Memasukan data batasan masalah berupa variabel bebas dan variabel terkontrol kedalam *software* FEA seperti tegangan, temperatur, tekanan, gaya, waktu proses, serta *boundary conditions* yang digunakan pada setiap elemen.
6. Perhitungan (*solving*) untuk mendapatkan nilai dari variabel terkontrol dicari dilakukan untuk setiap elemen.

7. Penggabungan nilai dari hasil perhitungan FEA sehingga didapatkan nilai secara menyeluruh dari beberapa variabel yang diinginkan.
8. Melakukan analisa terhadap hasil dari simulasi (*post processing*) yang di dapat, sehingga didapatkan kesimpulan dari tujuan dilakukannya simulasi FEA.

2.4 ANSYS

ANSYS adalah sebuah *software* (perangkat lunak) yang digunakan untuk melakukan proses simulasi dengan berbasis *finite element analysis* dengan kemampuan menganalisa dengan cakupan yang luas untuk berbagai jenis masalah tim (Patel & Diwedi, 2015). ANSYS mampu memecahkan persamaan differensial dengan cara memecahnya menjadi elemen- elemen yang lebih kecil. Pada awalnya program ini bernama STASYS *structural analysis system*, kemudian berganti nama menjadi ANSYS yang ditemukan pertama kali oleh Dr. John Swanson pada tahun 1970. ANSYS digunakan karena pada dasarnya perhitungan yang dilakukan pada *finite element analysis* untuk perhitungan dengan jumlah yang sangat banyak maka diperlukan sebuah *software* agar perhitungan menjadi lebih cepat dan lebih teliti.

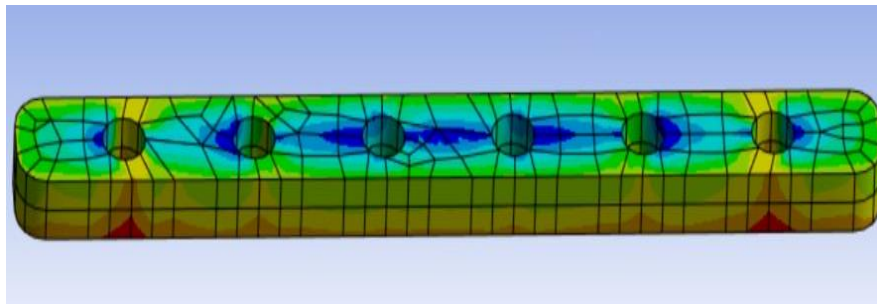
Dalam bidang metalurgi ANSYS digunakan untuk simulasi proses baik untuk fluida maupun simulasi tegangan pada struktur pada bangunan sampai pada proses manufaktur seperti pengecoran logam dan pengelasan berikut adalah pengoprasian yang ada pada ANSYS (Chen, & Liu, 2019). ANSYS bertujuan permodelan FEA secara numerik memecahkan masalah mekanis perhitungan numerik. Masalah yang termasuk analisa struktur statis dan dinamis baik linear dan non-linear, distribusi panas dan masalah cairan dan masalah elektromagnetik. ANSYS mempersatukan struktur dan material yang bersifat non-linear. Keunggulan ANSYS dibandingkan dengan *software* berbasis FEA lainnya, di mana

ANSYS memiliki keunggulan pada proses *meshing* yang dapat dilakukannya. Proses *meshing* yaitu suatu proses pada system di ANSYS membentuk sampel lebih presisi, ukurannya lebih kecil. Proses *meshing* yang bisa menghasilkan bentuk lebih kecil dan presisi memungkinkan solusi persamaan lebih baik. Selain *meshing*, banyaknya paket aplikasi yang ditawarkan juga menjadi salah

satu keunggulan tersendiri untuk ANSYS. ANSYS Workbench, dua jenis analisis termal dapat dilakukan yaitu *Thermal analysis Steady-State* dan *Transient*.

2.5 *Thermal Analysis*

Thermal analysis adalah suatu metode dengan proses yang digunakan untuk mengetahui sifat perpindahan panas yang terjadi suatu proses. Perpindahan panas dari *thermal analysis* terjadi dari sistem yang memiliki temperatur tinggi ke sistem dengan temperatur yang lebih rendah. *Thermal analysis* digunakan untuk menentukan distribusi temperatur dan besaran termal. Distribusi termal menghasilkan perolehan panas, *gradien termal*, dan *fluks termal* (Tickoo Sam, 2016). Di bawah ini adalah gambar *Thermal analysis* pada *Temperature distribution*.



Gambar 2.7 *Thermal analysis* pada *Temperature distribution*.

Analisis termal adalah istilah umum yang mendefinisikan metode yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan pengaruh waktu dan temperatur di mana perubahan fisik suatu zat dipanaskan atau didinginkan. Setiap metode didefinisikan sesuai dengan jenis perubahan fisik yang dianalisis (Pinem, 2017). Saat mengevaluasi karakteristik material, perlu menggunakan metode berbeda atau kombinasi beberapa teknik tergantung pada tujuannya. Definisi analisis termal dalam hubungan antara sifat sampel dan suhunya saat sampel dipanaskan atau didinginkan secara terkendali.

Dalam FEM, konduksi dimodelkan dengan menyelesaikan persamaan keseimbangan panas yang dihasilkan untuk temperatur di bawah kondisi batas termal yang ditentukan. Konveksi dimodelkan sebagai beban permukaan dengan koefisien perpindahan panas yang ditentukan pengguna dan temperatur tertentu dari

fluida di sekitarnya. Sifat material seperti densitas, konduktivitas termal, dan panas spesifik diperlukan sebagai parameter input untuk analisis termal transien, sedangkan analisis termal kondisi tunak hanya membutuhkan konduktivitas termal sebagai input material. Untuk analisis tegangan termal, parameter input material meliputi *modulus young*, *rasio Poisson*, dan koefisien ekspansi termal (Chen & Xiaolin, 2019). Penting untuk menghitung jumlah energi yang ditransfer per satuan waktu dan untuk itu memerlukan penggunaan persamaan laju. Untuk konduksi panas, persamaan laju dikenal sebagai hukum Fourier, yang dinyatakan untuk satu dimensi. Adapun nilai *thermal conductivity* pada berbagai bahan dapat dilihat pada Tabel 2.3 (Lewis, et al., 2004) dan (CES Edupack).

Tabel 2.3 Nilai *Thermal Conductivity material*

Material	<i>Thermal Conductivity</i> (W/m ² K at 20 °C)
<i>Metals:</i>	
<i>Pure silver</i>	410
<i>Pure copper</i>	385
<i>Pure aluminium</i>	200
<i>Pure iron</i>	73
<i>Alloys:</i>	
<i>Stainless steel (18% Cr, 8% Ni)</i>	16
<i>Aluminium alloy (4.5% Cr)</i>	168
<i>Aluminum foil/bubble</i>	38
Magnesium	78
Titanium	22
<i>Non metals:</i>	
<i>Plastics</i>	0,6
<i>Wood</i>	0,2
<i>Liquid:</i>	
<i>Water</i>	0,6
<i>Gases:</i>	
<i>Dry air</i>	0,025 (<i>at atmospheric pressure</i>)

Thermal analysis pada FEA dengan metode yang berbeda-beda, di antaranya adalah *thermal analysis* dalam keadaan kesetimbangannya (*steady-state analysis*) dan *thermal analysis* memiliki fungsi terhadap waktu (*transient analysis*).

2.6 Material Properties

Material properties adalah data dari suatu material berupa *mechanical properties* seperti *elongasi* dan *tensile strength*, *physical properties* seperti densitas dan titik lebur. Material properties mempunyai sifat-sifat yang mencirikannya, umumnya sifat tersebut dibagi menjadi tiga sifat: sifat mekanik, sifat fisik dan sifat teknologi. Sifat-sifat itu akan mendasari dalam pemilihan material. Sifat material memiliki ciri yang dimiliki suatu material yaitu *physical, production, mechanical, aesthetic, thermal, economic, electrical, magnetic* dan *environmental*. Dalam perancangan suatu komponen atau produk adalah berdasarkan sifat-sifat yang dimiliki oleh bahan tersebut yang sesuai dengan fungsi dan prinsip kerja dari komponen yang dirancang. Material properties yang dimanfaatkan dari suatu material adalah sifatnya (Bhaduri, 2018).

1. Sifat mekanik

Sifat mekanik material, merupakan salah satu faktor terpenting yang mendasari pemilihan bahan dalam suatu perancangan. Sifat mekanik dapat diartikan sebagai respon atau perilaku material terhadap pembebanan yang diberikan, dapat berupa gaya, torsi atau gabungan keduanya. Dalam prakteknya pembebanan pada material terbagi dua yaitu beban statik dan beban dinamik. Perbedaan antara keduanya hanya pada fungsi waktu dimana beban statik tidak dipengaruhi oleh fungsi waktu sedangkan beban dinamik dipengaruhi oleh fungsi waktu. Untuk mendapatkan sifat mekanik material, biasanya dilakukan pengujian mekanik. Pengujian mekanik pada dasarnya bersifat merusak (*destructive test*), dari pengujian tersebut akan dihasilkan kurva atau data yang mencirikan keadaan dari material tersebut.

A. Hidrosiapatit

Hidroksiapatit (HA) adalah mineral apatit dan mempunyai struktur kimia $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Senyawa ini dikenal baik untuk aplikasi

biomedis sebagai tulang buatan dan gigi karena struktur kimia yang sama dengan komponen mineral pada tulang (Rimondini, 2004). HA merupakan salah satu material yang diklasifikasikan sebagai material bioaktif dan memiliki sifat osteointegrasi, osteokonduksi, osteoinduksi, dan osteogenesis, ketika digunakan sebagai *bone graft*. Sifat-sifat inilah yang harus dipenuhi oleh suatu bone graft yang ideal. Berikut adalah nilai modulus elastisitas dan jaringan HA.

Tabel 2.4 Nilai modulus elastisitas dan jaringan keras HA (CES Edupack, 2020).

<i>Modulus elastis (GPa)</i>	40-117
<i>Compressive strength (MPa)</i>	294
<i>Bending strength (MPa)</i>	147
<i>Kekerasan (Vickers, GPa)</i>	3,43
<i>Poisson's ratio</i>	0,27
<i>Densitas (gram/Cm²)</i>	3,16
<i>Melting Point (°C)</i>	1227

Meskipun HA memiliki sifat osteogenik dan osteokonduktif yang merupakan meregenasi tulang. HA merupakan bahan yang sangat rapuh dan sulit untuk diproduksi dalam berbagai bentuk dan ukuran. Oleh karena itu, HA sering juga dikombinasikan dengan polimer sintetik atau alami agar dapat meniru lingkungan alami tulang, memungkinkan integrasi prosthesis yang lebih baik atau meningkatkan sifat mekaniknya. Dari Tabel 2.4 Nilai modulus elastisitas dan jaringan keras, HA meningkatkan sifat komposit material meliputi *tensile strength*, *stiffness*, *toughness*, *fatigue resistance*, *thermal stability*, dan permeabilitasnya.

B. Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai sifat tahan terhadap korosi dan mampu mempunyai alir yang baik sehingga banyak digunakan dalam aplikasi alat-alat rumah tangga, otomotif, maupun industri saat ini (Hatch, J.E, 1984). Aluminium berasal dari mineral bauksit yang diubah menjadi aluminium oksida (alumina) melalui proses Bayer. Alumina kemudian diubah menjadi logam aluminium menggunakan sel elektrolisis. Aluminium memiliki beberapa sifat seperti ringan, konduktivitas termal yang tinggi, konduktivitas listrik yang baik, serta memiliki ketahanan terhadap korosi sehingga aluminium banyak dimanfaatkan salah satunya sebagai kaleng pengemas makanan dan minuman (Vargel, 2004). Dalam penelitian ini aluminium digunakan dalam komposit sebagai *reinforce*, dan berikut ini merupakan *material properties* dari aluminium pada Tabel 2.5:

Tabel 2.5 *Properties Aluminium* (CES Edupack, 2020)

Numerical values		
<i>Yield stress</i>	(MPa)	280
<i>Ultimate tensile strength</i>	(MPa)	327
<i>Strength coefficient</i>	K (MPa)	447
<i>Strain hardening exponent</i>	n	0,095
<i>Young's modulus</i>	(GPa)	68
<i>Percent elongation</i>	A (%)	12
<i>Hardness</i>	Hv50	95

c. Titanium

Titanium memiliki sifat kombinasi dari kekuatan tinggi, kekakuan, ketangguhan, kerapatan rendah, dan ketahanan korosi yang baik yang

diberikan oleh berbagai paduan titanium pada suhu sangat rendah hingga tinggi, memungkinkan penghematan berat pada struktur ruang angkasa dan aplikasi performa tinggi. Titanium memiliki sifat yang reaktif dan dapat membentuk lapisan oksida sebagai pelindung ketahanan terhadap korosi.

Titanium diaplikasikan sebagai biomaterial karena memiliki beberapa keunggulan yaitu kekuatan yang tinggi, modulus elastisitas yang tinggi, relatif ringan, superplastis, biokompatibel, dan memiliki sifat *shape memory effect*. Keunggulan lain dari logam implan titanium adalah dapat menempel pada jaringan tulang tanpa bantuan dari jaringan lunak antara implan dan tulang pada tingkat mikroskopis atau disebut juga dengan sifat *osseointegrasi* (Fitriani et al., 2019). Di bawah ini merupakan material properties dari titanium

Tabel 2.6 *Properties Titanium* (CES Edupack, 2020)

Property	Value
<i>Density (ρ)</i>	4,43 x10
<i>Yield strength (R_e)</i>	880 MPa
<i>Tensile strength (R_m)</i>	950 MPa
<i>Modulus of elasticity E</i>	113,8 GPa
<i>Shear modulus (G)</i>	44 GPa
<i>Poissin ration (ν)</i>	0,342
<i>Longitudinal velocity of sound</i>	5068,4 m/s
<i>Transversal velocity of sound</i>	3151,6 m/s

d. Magnesium

Paduan magnesium juga memiliki konduktivitas termal yang sangat tinggi selain reflektifitas yang tinggi. Magnesium digunakan sebagai *wetting agent* dalam komposit hidroksiapatit (HAp) untuk berperan sebagai pemulihan porositas dan sebagai penguat ikatan pada masing-

masing elemen. Berikut ini merupakan material properties dari magnesium.

Tabel 2.7 Properties Magnesium (CES Edupack, 2020)

Properties (Unit)	Pure Mg
<i>Ionisation energy (Ev)</i>	7,6
<i>Specific heat (J/(kg·K))</i>	1360
<i>Specific heat of fusion (J/kg)</i>	$3,7 \times 10^5$
<i>Melting point (K)</i>	650
<i>Boiling point (K)</i>	1090
<i>Viscosity (Pa·s)</i>	0,00125
<i>Surface tension (N/m)</i>	0,559
<i>Thermal conductivity (W/(m·K))</i>	78
<i>Thermal diffusivity (m²/s)</i>	$3,73 \times 10^{-5}$
<i>Expansion co-efficient (1/K)</i>	25×10^{-6}
<i>Density (kg/m³)</i>	360
<i>Elastic modulus (N/m²)</i>	$4,47 \times 10^{10}$
<i>Vapour pressure (Pa)</i>	360

2. Sifat Fisik

Sifat fisik adalah sifat penting yang kedua dalam pemilihan material. Sifat fisik adalah kelakuan atau sifat-sifat material yang bukan disebabkan oleh pembebanan seperti pemanasan, pendinginan dan arus listrik yang lebih mengarah pada struktur material. Sifat fisik material antara lain: temperatur cair, konduktivitas panas dan panas spesifik.