

LAPORAN
TEKNIS PENELITIAN

SIMULASI PROSES SELF-PROPAGATING INTERMEDIATE-
TEMPERATURE SYNTHESIS (SIS) UNTUK MENGETAHUI PERILAKU
REAKSI EKSO TERMIS



Disusun oleh :

Anistasia Milandia, ST.,MT

Prof. Agus Pramono, ST.MT, Ph.D

Suryana, ST.,MT

Andri Sihotang

Jurusan Teknik Metalurgi Fakultas Teknik

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Desember 2023

LEMBAR PENGESAHAN

LAPORAN PENELITIAN MANDIRI

SIMULASI PROSES SELF-PROPAGATING INTERMEDIATE-
TEMPERATURE SYNTHESIS (SIS) UNTUK MENGETAHUI PERILAKU
REAKSI EKSOTERMIS

Di setujui oleh :

Ketua Jurusan
Teknik Metalurgi

Adhitya Trenggono, S.T.,M.Sc
NIP. 197804102003121001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji hanya tercurah bagi ALLAH yang telah berkehendak. Sesungguhnya hanya dari kuasa dan kehendakNya semata, semua yang telah diupayakan dapat terlaksana. Dengan penuh ucapan syukur, Laporan Penelitian yang berjudul “SIMULASI PROSES SELF-PROPAGATING INTERMEDIATE-TEMPERATURE SYNTHESIS (SIS) UNTUK MENGETAHUI PERILAKU REAKSI EKSOTERMIS” telah mampu diselesaikan.

Laporan penelitian ini dibuat sebagai pertanggungjawaban penulis terhadap kegiatan penelitian yang dilakukan pada semester genap 2022/2023. Dalam kesempatan ini ucapan terima kasih dan rasa hormat disampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dorongan hingga selesainya Laporan ini, terutama ditujukan kepada :

1. Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Bpk Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc
2. Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Metalurgi, Bapak Faiz Rahman, ST., M.S
3. Mahasiswa yang membantu selama di Laboratorium

Semoga Laporan Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Cilegon, Juni 2023

Anistasia Milandia

DAFTAR ISI	
	Hal.
Halaman Sampul.....	i
Halaman Pengesahan.....	
Kata Pengantar.....	vi
Daftar Isi.....	vii
Bab I PENDAHULUAN.....	6
Bab II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
Bab III METODE PENELITIAN.....	31
Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
Daftar Pustaka	

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis (SIS) merupakan reaksi pembakaran yang terkendali dalam rentang suhu terpilih dari pengembangan *Self-propagating High-temperature Synthesis* (SHS). Metode SHS sudah sejak tahun 1971 oleh A.G. Merzhanov, I dan Borovinskaya. SIS memiliki perbedaan di suhunya di bawah 1000°C, dengan memanfaatkan sebuah cetakan khusus menggunakan variasi temperatur dan penekanan kompaksi pada material komposit berupa hidroksiapatit, aluminium, titanium dan magnesium (Pramono et al., 2022).

Metode SIS memiliki peningkatan temperatur awal ke tinggi dari suplai energi eksternal dan pemanfaatan dari panas internal yang dilepaskan dalam reaksi kimia. Realisasi dari reaksi pembakaran secara cepat dan alami yang menghasilkan produk dan struktur khusus sesuai yang diinginkan, dan kontrol laju proses, temperatur, derajat perubahan dan komposisi dan struktur dari produk dengan variasi pada laju pelepasan panas dan transfer.

Metode SIS memiliki keunggulan dan kelemahan. Keunggulan dari SIS yaitu proses operasi yang relatif mudah dan kebutuhan energi yang rendah untuk produksi material keramik, senyawa intermetalik dan komposit. Selain mempunyai keunggulan, SIS juga mempunyai kelemahan yaitu tingginya tingkat eksotermik dan laju pembakaran yang sangat cepat sehingga memerlukan tingkat kontrol yang tinggi (Ayers dkk, 2007).

Faktor penentu keberhasilan proses SIS salah satunya adalah pada perpindahan panas, penekan dan reaksi eksotermik. Faktor perpindahan panas akan mempengaruhi dari reaksi pembakaran secara cepat dan alami yang menghasilkan produk dan struktur khusus sesuai yang diinginkan. Perpindahan panas mengontrol laju proses pemanasan temperatur di mana laju pemanasan dapat merubah komposisi dan struktur material. Untuk mengontrol laju pembakaran yang sangat

cepat tersebut maka mekanisme perpindahan panas yang terjadi perlu diamati lebih lanjut. Metode SIS dipengaruhi oleh perpindahan panas dengan mekanisme perpindahan panas yaitu konduksi dan konveksi. Selain itu, faktor penekanan dari hasil distribusi kerapatan partikel yang homogen sangat diharapkan pada metode SIS sehingga penekanan atau kompaksi perlu dilakukan (Halverson dkk, 1989).

Dalam reaksi eksotermis pada aluminium dan magnesium akan melebur dan berikatan membentuk $MgAl_2O_4$. Dengan reaksi eksotermis aluminium bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan serta untuk memperbaiki struktur mikro. Sebagai pengikat material hidroksiapatit dan aluminium maka perlu penambahan *wetting agent* berupa magnesium sehingga reaksi menjadi $MgAl_2O_4$ yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan (Pramono et al., 2016).

Metode SIS pertama kali 2018 berbentuk jurnal diteliti oleh Agus Pramono dkk, dengan mengembangkan metode SHS dengan temperatur di bawah $1000^{\circ}C$ dengan sampel *cylinder*. Pada tahun 2021 disimulasikan oleh Nasrul Salim. Pada tahun 2022 diteliti Ni Made Meliana Sari dengan melakukan eksperimen. Pada penelitian ini memiliki keunggulan penelitian pengamatan termodinamika menggunakan simulasi dan geometri. Berbeda dari simulasi sebelumnya simulasi ini menggunakan geometri berbentuk plat menyerupai implan pada tulang.

Pada simulasi SIS penekanan dan temperatur tinggi saat pembakaran di dalam tungku mengakibatkan untuk pengamatan secara langsung sangat sulit dilakukan dan hanya bisa diamati dari karakteristik sampel atau benda yang dihasilkan maka sulitnya mengamati pengaruh perpindahan panas. Perubahan energi pada reaksi pembentukan $MgAl_2O_4$, maka diperlukannya sebuah simulasi untuk menganalisa.

Penelitian ini menggunakan cetakan dan didesain untuk diaplikasikan dengan metode SIS sehingga produk yang dihasilkan berupa *prototype biomaterial*. Hasil simulasi berupa distribusi panas, dan tegangan yang terjadi menggunakan metode *finite element analysis*. Dengan disimulasikannya proses SIS diharapkan dapat diperoleh temperatur, dan waktu terjadinya reaksi eksotermis yang paling

efektif sehingga diperoleh hasil produk SIS yang homogen. Kehomogenan pada produk SIS umumnya dikarenakan pada saat reaksi eksotermis terjadi meminimalisir tingkat porositas seminimal mungkin untuk diperoleh produk yang lebih baik, dalam simulasi hal itu dapat ditandai dengan *heat flux* yang rendah yaitu mendekati 0 W/mm^2 adapun reaksi eksotermis pada pembentukan MgAl_2O_4 dalam simulasi ditandai dengan perubahan entalpi kurang dari nol (Halverson dkk, 1989).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dijadikan bahasan:

1. Bagaimana panas dan distribusi temperatur, dengan variasi temperatur dan waktu proses pada metode *self-propagating intermediate temperature syntesis* (SIS) sulitnya diamati dan sangat cepat sehingga diperlukan simulasi menggunakan *software engineering* berbasis *finite element analysis*?
2. Bagaimana distribusi tegangan dengan variasi penekanan rumit dan banyaknya perhitungan manual berbasis elemen hingga pada setiap titik menjadikan simulasi menggunakan *software engineering* berbasis *finite element analysis*.
3. Bagaimana perubahan energi panas pada reaksi eksotermik dan pembentukan MgAl_2O_4 terhadap variasi temperatur?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Menghitung laju transfer panas, besaran panas dan efektifitas waktu serta karakteristik fisik komposisi material hidroksiapatit, aluminium, magnesium, dan titanium dengan waktu proses pada metode *self-propagating intermediate temperature syntesis* (SIS).

2. Mengetahui dan menghitung distribusi tegangan normal yang terjadi saat proses kompaksi SIS dengan variasi komposisi material hidroksiapatit, aluminium, magnesium, dan titanium.
3. Mengetahui perubahan energi panas pada reaksi eksotermik dan pembentukan MgAl_2O_4 serta menghitung ΔG pada pemanasan dengan variasi temperatur.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup yang penelitian ini adalah:

1. Proses *self-propagating intermediate temperature syntesis* (SIS) dengan bentuk plat.
2. Diasumsikan panjang 15 cm dan tinggi 1,5 cm dengan ketebalan 0,5 cm serta diameter lubang plat 1,5 cm.
3. Dikompaksi pada tekanan 166 MPa, 171 MPa, dan 176 MPa dengan waktu penekanan 5 menit
4. Dipanaskan pada variasi temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C, waktu sehingga dapat diketahui temperatur dan lama waktu pemanasan yang paling efektif untuk proses SIS
4. Metode penyelesaian simulasi menggunakan *finite element analysis*.
5. Simulator yang digunakan adalah ANSYS, AutoCAD, Chemdraw, dan HSC Chemistry

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).

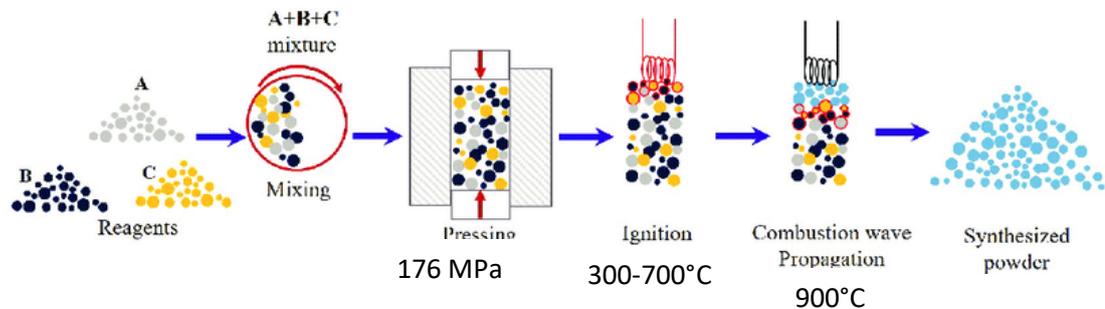
Perbedaan utama SIS dan SHS terletak pada cara pemanasan sampel di temperatur 700°C-1000°C. Sedangkan reaksi pembakaran SHS membutuhkan suhu tinggi di atas 1000°C. Reaksi eksotermik yang terjadi pada SHS berfungsi untuk membentuk ikatan antar permukaan karena energi panas yang diberikan akan masuk ke 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 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO-TiO}_2$ 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).



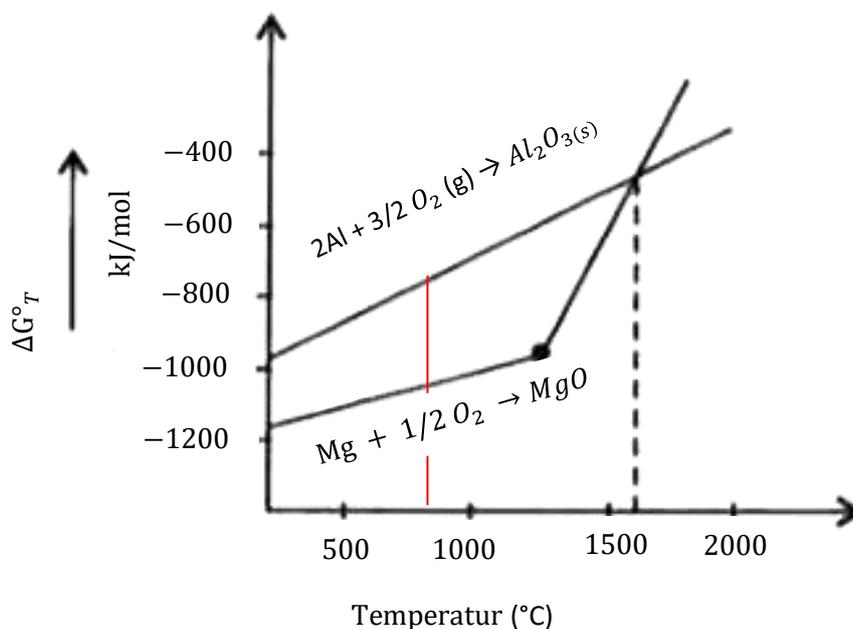
Gambar 2.2 Proses *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* (SIS)

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

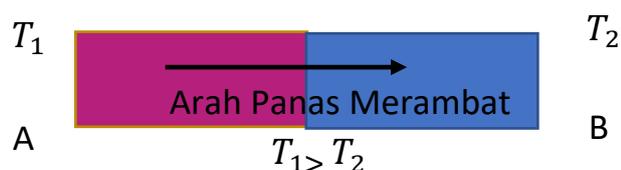
2.2 *Heat Transfer*

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 disentuh 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 ke daerah 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]

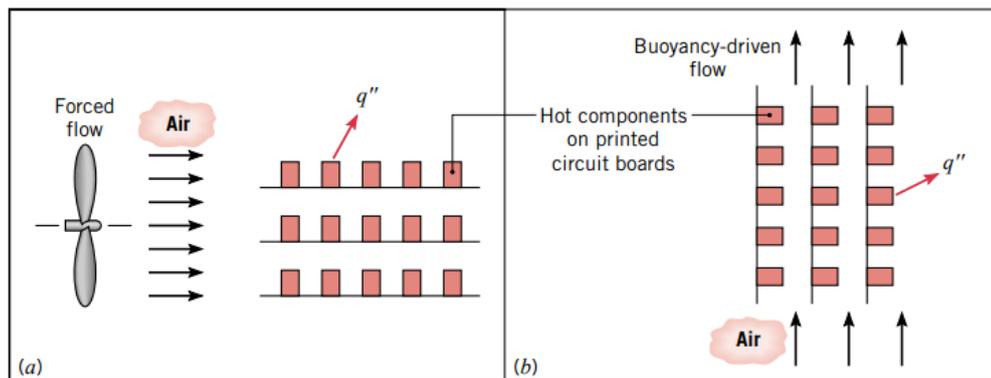
A = luas penampang (m^2)

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).

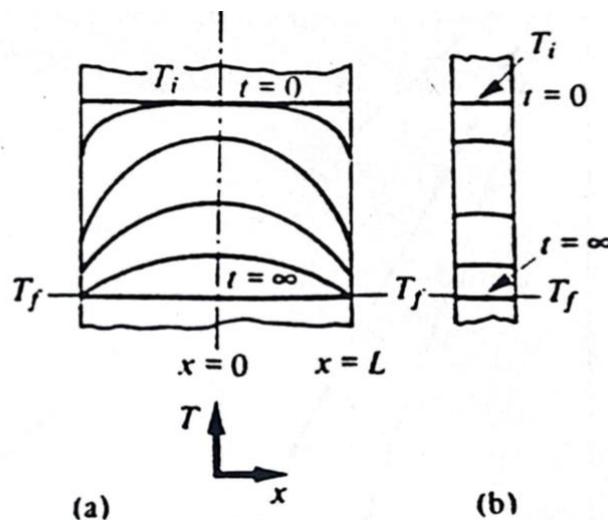
Tabel 2.2 Nilai koefisien *heat transfer film Coefficient* pada Fluida

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 *transient 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_i , 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)

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

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 (°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.

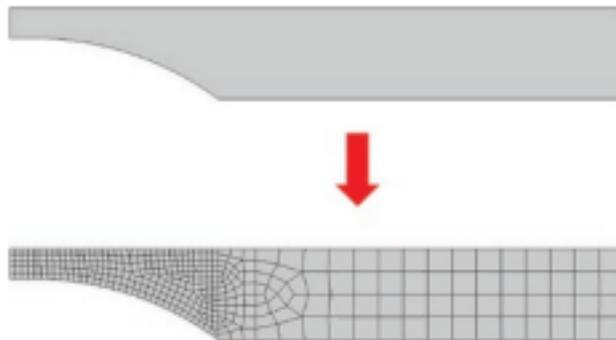
Analisis elemen hingga (FEA) adalah metode yang dominan dalam analisa mekanika struktural. Konsep dasar metode dari FEA adalah pembagian model matematis yang diuraikan menjadi komponen geometri sederhana (*non-overlapping*) yang disebut elemen hingga. Dalam metode FEA semua kompleksitas masalah, seperti 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 element.

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

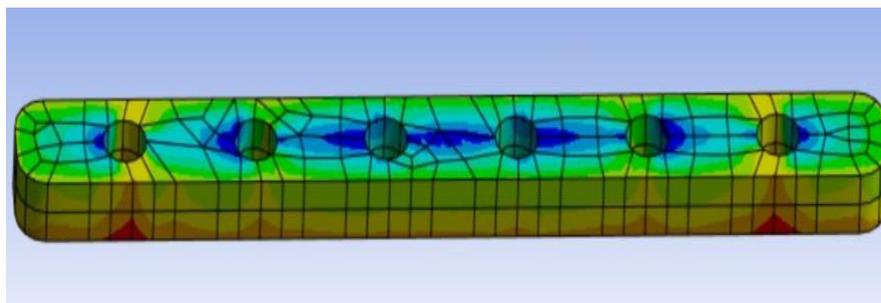
ANSYS adalah sebuah *software* (perangkat lunak) yang digunakan untuk melakukan proses simulasi dengan berbasis *finite element analysis* dengan kemampuan menganalisa dengan cakupan yang luas untuk berbagai jenis masalah tim (Patel & Diwedi, 2015). ANSYS mampu memecahkan persamaan differensial dengan 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 elastis dan jaringan HA.

Tabel 2.4 Nilai modulus elastis 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/m²)</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.

BAB III

Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir

Diagram alir penelitian ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu diagram alir simulasi dan diagram alir verifikasi penelitian. Diagram alir simulasi terdiri dari diagram alir simulasi pemanasan dan diagram alir simulasi penekanaan.

3.1.1 Diagram Alir Penekanan

Pada diagram alir simulasi penekanan atau *compacting* ini menggunakan *software* Ansys 2022 R2 dengan metode *static stress*. Metode *static stress* digunakan karena selama proses beban tekan diasumsikan tetap (tidak berubah secara tiba-tiba) dan juga dalam waktu yang tetap. Simulasi ini menggunakan model geometri plat dalam simulasi penekanan dilihat pada Gambar 3.1, lalu *physical material* data dari cetakan serta material komposit (hidroksiapatit, aluminium, titanium dan magnesium) \ material data dalam simulasi penekanan ini dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Data penekanan material (CES Edupack, 2020).

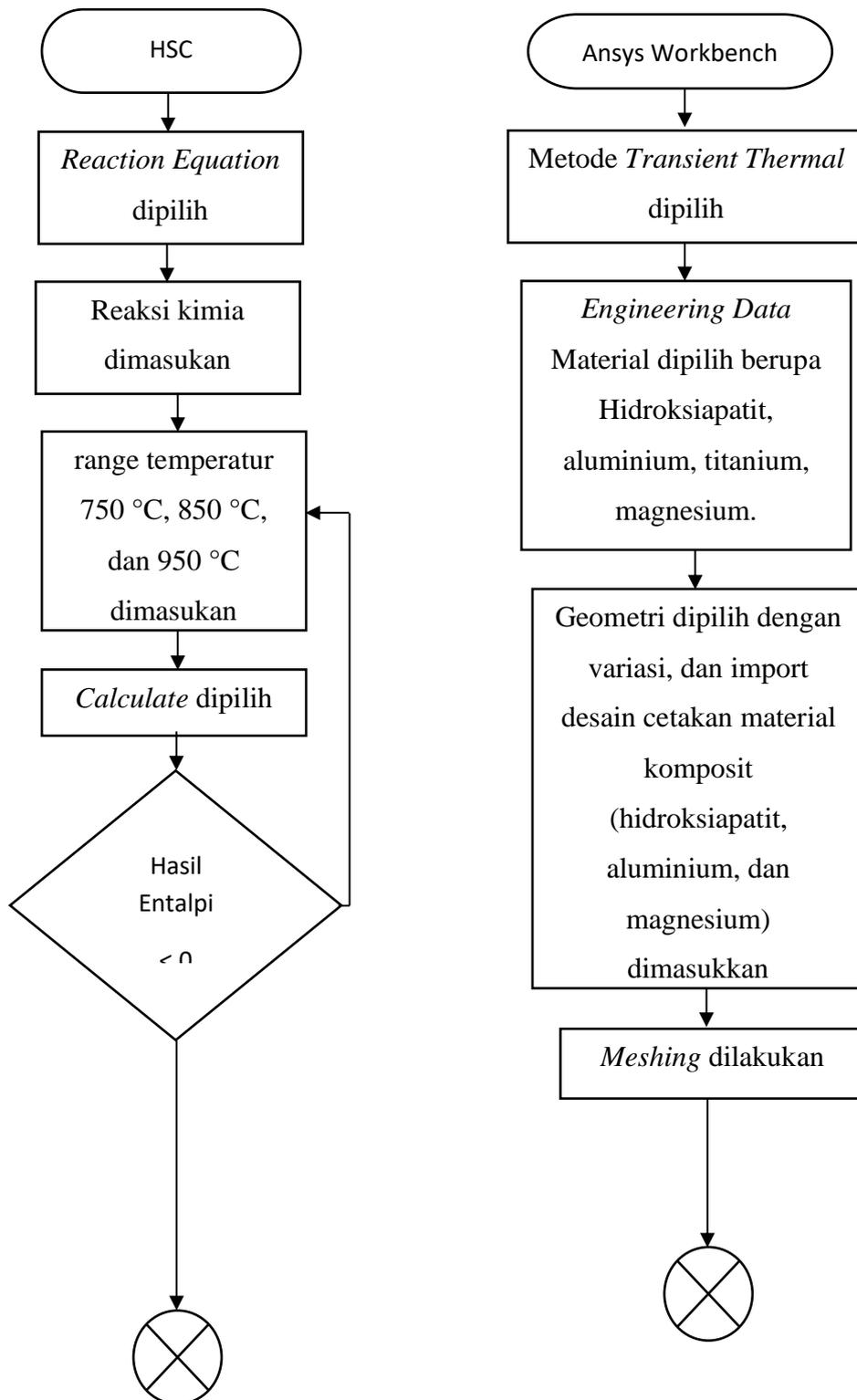
Material	<i>Young's Modulus</i> (MPa)	<i>Poisson's Ratio</i>	<i>Shear Modulus</i> (MPa)	<i>Density</i> (kg/m ³)
Aluminium	69-76	0,32-0,34	26-29	2,65 x10 ³ -27 x10 ³
Hidroksiapatit	10-130	0,25-0,26	45-56	3,05 x10 ³ -3,15 x10 ³
Magnesium	42-47	0,29-0,31	15-18	1,7 x10 ³ -1,87 x10 ³
Titanium	110-120	0,35-0,37	40-45	4,4 x10 ³ -4,8 x10 ³

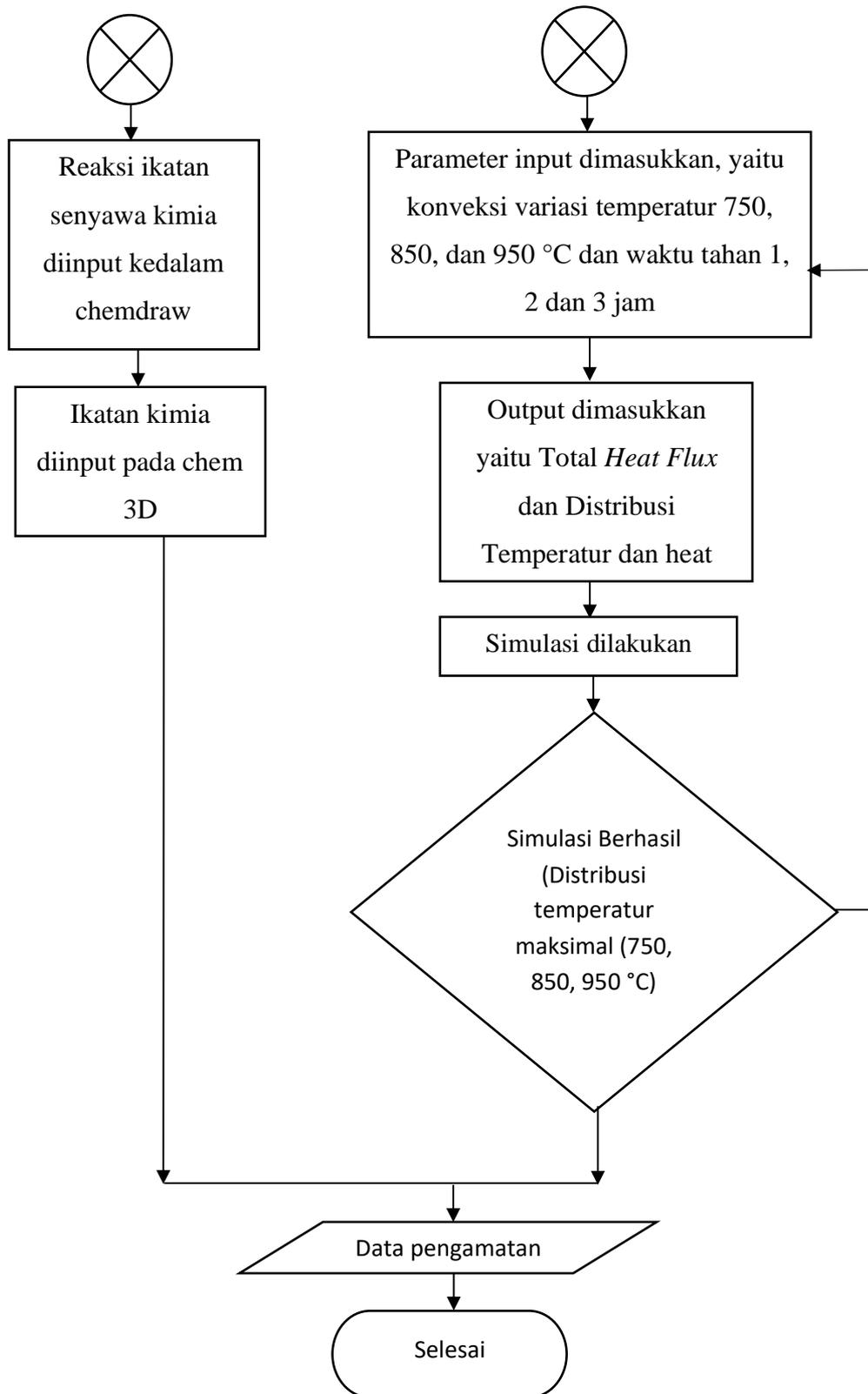
3.1.1 Diagram Alir Simulasi Pemanasan

Simulasi perpindahan panas ini menggunakan *software* HSC dan ANSYS 2022R2 dengan metode *transient thermal*. Proses simulasi dilihat pada Gambar 3.2. Sebelum simulasi dengan metode *transient thermal* dimulai, maka harus diketahui dahulu *engineering data* (hidroksiapatit, aluminium, titanium dan magnesium). *Engineering data* pada simulasi perpindahan panas ini dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data thermal material perpindahan panas (CES Edupack, 2020).

Material	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/M.C)	Specific Heat (J/kg.C)
Aluminium	2,65x10 ³ -27 x10 ³	110-162	944-982
Hidroksiapatit	3,05 x10 ³ -3,15 x10 ³	1,24-3	870-890
Magnesium	1,7 x10 ³ -1,87 x10 ³	50-125	955-1.060
Titanium	4,4 x10 ³ -4,8 x10 ³	7-14	645-655





Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Pemanasan

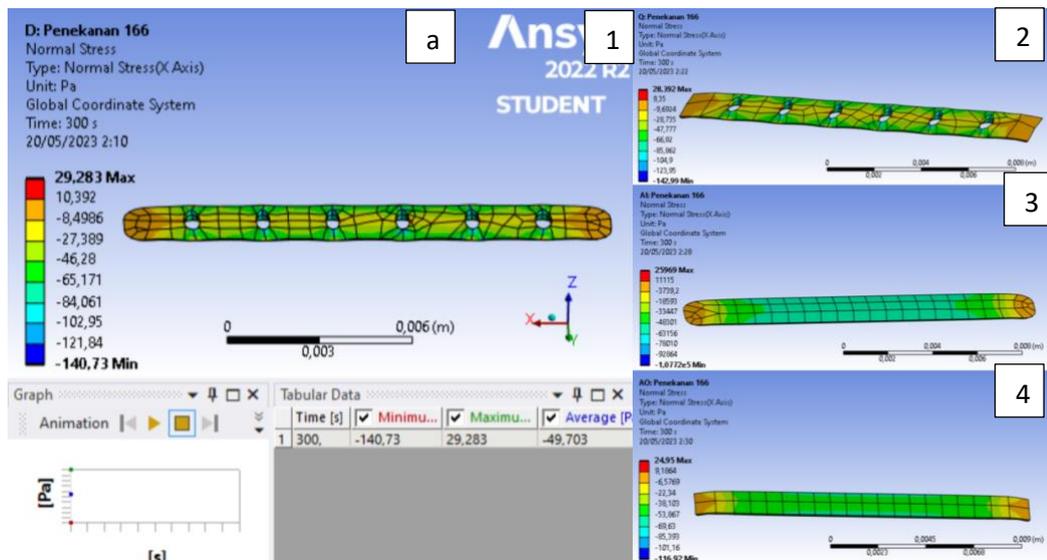
Bab IV

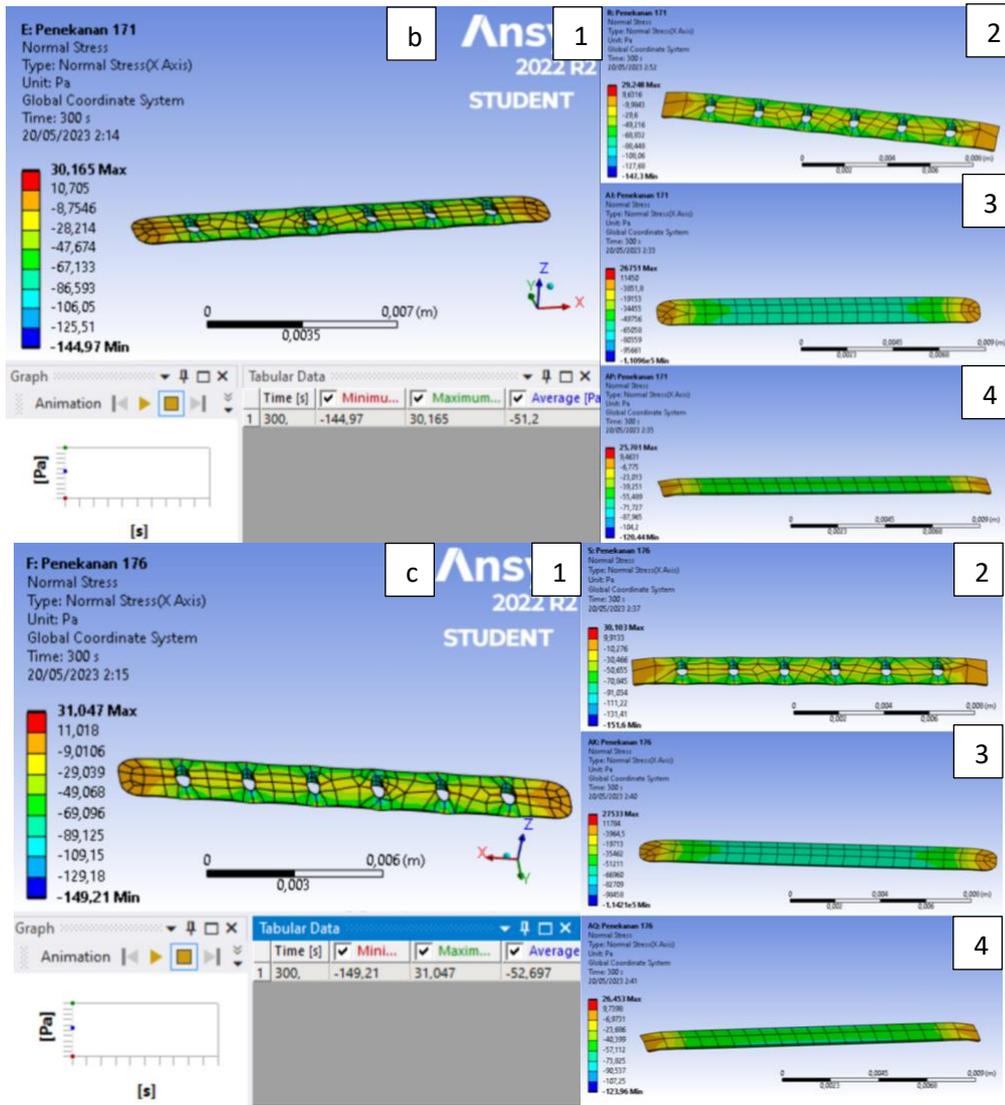
Hasil Dan Pembahasan

4.1 Analisa Hasil Tekanan pada Proses SIS

Pada penelitian simulasi penekanan atau kompaksi ini menggunakan *software Ansys 2022 R2* dengan metode *static stress*. Metode *static stress* dipakai karena dalam proses terjadinya penekanan, beban yang diberikan tetap (tidak berubah secara tiba-tiba) dan juga dalam waktu yang tetap. Proses simulasi ini menggunakan variasi tekanan 166 MPa, 171 MPa, dan 176 MPa dengan waktu 300 detik.

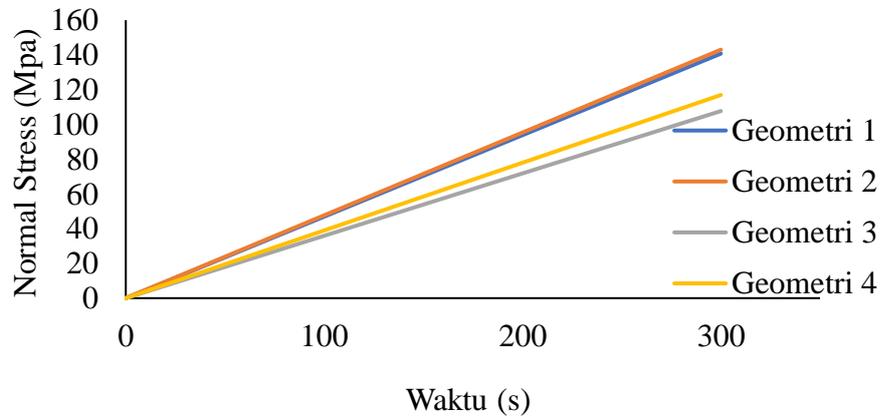
Simulasi penekanan yang telah berlangsung akan menghasilkan suatu output yang dapat dipilih atau ditentukan. Output simulasi penekanan yang diharapkan yaitu menghasilkan pengaruh terhadap *normal stress* yang terjadi pada sampel saat ditekan dengan besaran 166 MPa, 171 MPa, dan 176 MPa. Besarnya beban yang diterima oleh benda uji dibagi oleh luas penampang benda uji untuk mengetahui nilai kuat tekan dari beda uji tersebut. *Normal stress* terbagi menjadi dua bagian yaitu *tensile stress* dan *compressive stress*. Penelitian ini memakai *compressive stress* karena pembebanan yang terjadi bertindak sebagai pepadatan ataupun pengurangan material dalam sumbu yang telah ditentukan, dan tanda negatif (-) menjadi penanda kompresi itu terjadi (Roycastle, 2008).





Gambar 4.1 Normal Stress pada Tekanan a) 166 MPa; b) 171 MPa; c) 176 MPa;

1) geometri 1; 2) geometri 2; 2) geometri 3; 4) geometri 4



Gambar 4.2 Grafik *Normal Stress* Terhadap Waktu dan Geometri

Gambar 4.2 merupakan grafik *normal stress* terhadap waktu dan geometri. Dari grafik garis dapat dilihat yaitu dari detik pertama sampai 300 detik, tekanan 166 MPa jauh lebih rendah nilai *normal stress* nya jika dibandingkan dengan tekanan 171 MPa dan 176 MPa. Pada tekanan 171 MPa nilai *normal stress* yang dihasilkan tidak terlalu jauh dari nilai *normal stress* tekanan 176 MPa. Tekanan 166 MPa saat awal sampel ditekan yaitu saat detik pertama, nilai *normal stress* yang dihasilkan sebesar -3,92 MPa dengan peningkatan setiap detiknya yaitu $\pm 3,192$ MPa. Untuk 171 MPa dan 176 MPa, nilai *normal stress* saat awal sampel ditekan yaitu sebesar -3,284 MPa dan -3,341 MPa dengan masing-masing peningkatan setiap detiknya yaitu $\pm 0,092$ MPa dan $\pm 0,141$ MPa.

Data yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin besar tekanan yang diberikan maka semakin besar juga *normal stress* yang dihasilkan dan semakin padat juga material yang ditekan. Padatnya suatu material komposit dipengaruhi oleh nilai porositas yang dihasilkan seperti pada Table 4.1, karena proses kompaksi dalam SIS akan menentukan tingkat distribusi kerapatan partikel sehingga mempengaruhi terbentuknya porositas yang ada pada keramik matrik komposit SIS. Nilai porositas yang dihasilkan dapat mempengaruhi volume pori-pori yang terdapat pada sampel tersebut.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi Penekanan

Geometri	Penekanan (Mpa)	Porositas (%)	Volume Pori-pori (m^3) kerapatan
1	166	29,1	$2,4x10^{-9}$
	171	26,22	$2,3x10^{-9}$
	176	24,3	$2,2x10^{-9}$
2	166	30,1	$2,5x10^{-9}$
	171	28,4	$2,4x10^{-9}$
	176	26,5	$2,3x10^{-9}$
3	166	28	$2,44x10^{-9}$
	171	27	$2,37x10^{-9}$
	176	25	$2,3x10^{-9}$
4	166	26,45	$2,53x10^{-9}$
	171	25,70	$2,46x10^{-9}$
	176	24,95	$2,2x10^{-9}$

Tabel 4.1 merupakan hasil dari data simulasi dari keempat sampel. Pada sampel geometri 1 diberikan tekanan 166 MPa menghasilkan nilai porositas sebesar 29,3%, sedangkan pada sampel yang diberikan tekanan 176 MPa dan 171 MPa menghasilkan nilai porositas sebesar 27,3% dan 28,22%. Hal ini menunjukkan bahwa pada sampel yang diberikan tekanan 176 MPa menghasilkan nilai porositas terendah sehingga volume pori-pori yang terdapat pada sampel tersebut akan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan sampel yang lain. Data nilai porositas yang dihasilkan tercantum dalam Tabel 4.1.

4.2 Analisa Hasil Temperatur dan Waktu pada Proses SIS

Pada penelitian simulasi pemanasan menggunakan *software Ansys 2022 R2* dengan modul *transient thermal* dan didukung oleh software lainnya seperti autocad, HSC, Chemdraw. Simulasi *transient thermal* adalah suatu metode dengan proses yang digunakan untuk mengetahui sifat perpindahan panas yang terjadi dan dipakai karena dalam terjadinya proses *Self-Propagating Intermediate-*

Temperature Synthesis (SIS) sangat terpengaruh oleh temperatur dan waktu prosesnya. Pada proses simulasi perpindahan panas digunakan variasi temperatur sebesar 750, 850, dan 950°C selama 3600 detik, 7200 detik, dan 10800 detik sehingga didapatkan hasil simulasi pemanasan berupa profil temperatur dan *heat flux*.

4.2.1 Analisa Hasil Distribusi Temperatur Variasi Temperatur dan Waktu pada Proses SIS

Simulasi distribusi temperatur didapatkan hasil temperatur maksimum dan minimum dari variasi temperatur, waktu dan geometri. Pada metode distribusi temperatur menggunakan modul *transient thermal*. Berikut ini adalah data temperatur minimum dan maksimum.

Tabel 4.2 Data Temperatur Minimum dan Maksimum dengan Sampel Variasi Temperatur dan Waktu Pemanasan yang Dihasilkan

Geometri	waktu	Temperatur Minimum (°C)			Temperatur Maksimum (°C)		
		750	850	950	750	850	950
1	3600	701,01	795	891,4	701,2	796,05	891,52
	7200	721,74	822	919,9	724,83	822,23	919,96
	10800	733,1	831,27	929,00	733,04	831,31	929,79
2	3600	690,78	701,44	879,89	691,04	796,32	880,19
	7200	724,88	822,28	920,02	724,96	822,37	920,11
	10800	733,1	831,34	929,75	733,04	831,4	929,89
3	3600	687,64	781,57	883,18	687,96	781,92	876,81
	7200	717,59	814,54	912,00	717,76	814,73	921,2
	10800	728,11	826,08	929,83	728,22	826,2	924,52
4	3600	697,81	782,02	876,9	688,22	728,47	877,38
	7200	717,82	814,78	903,19	718,04	815,02	903,31
	10800	728,27	826,24	924,56	728,41	826,4	924,73

Pada Tabel 4.2 merupakan hasil dari simulasi pemanasan dengan variasi waktu dan temperatur. Hasil yang didapatkan nilai temperatur minimum dan maksimum dari simulasi pemanasan, temperatur minimum disini merupakan temperatur terendah yang terjadi dari hasil simulasi ini. Adapun hasil temperatur minimum dari simulasi pemanasan dengan variasi sampel geometri 1 di temperatur sebesar 750°C, 850°C, dan 950°C selama 3600 detik dengan hasil temperatur minimum sebesar 701,1°C, 795,95°C, dan 891,4°C. Sedangkan pada waktu 7200 detik dengan temperatur minimum sebesar 721,74°C, 822,18°C, dan 919,9°C dan pada waktu 10800 detik didapatkan hasil temperatur minimum sebesar 733,01°C, 831,27°C, dan 929,72°C.

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa pada waktu 3600 detik geometri 1, 2, 3 dan 4, dari data Tabel 4.2 yang diperoleh temperatur masih terus meningkat secara signifikan untuk mencapai temperatur pada variasi yang artinya energi belum terdistribusi merata sehingga temperatur spesimen masih akan terus meningkat hingga mencapai temperatur maksimum yang mendekati temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C. Pada waktu 7200 detik geometri 1, 2, 3 dan 4 masih belum tercapai temperatur maksimum sehingga masih terjadi peningkatan temperatur yang akhirnya akan diperoleh temperatur maksimum pada waktu 10800 detik. Sedangkan pada waktu 10800 detik peningkatan temperatur yang terjadi tidak terlalu signifikan, karena temperatur minimum ini sangat mendekati temperatur maksimum dari keempat geometri tersebut.

Hasil distribusi temperatur dari simulasi pemanasan adalah temperatur maksimum. Temperatur maksimum merupakan temperatur tertinggi yang tercapai dari hasil simulasi distribusi temperatur. Adapun hasil temperatur maksimum dari simulasi pemanasan dengan variasi temperatur sebesar 750°C, 850°C, dan 950°C selama 3600 detik dengan hasil temperatur minimum sebesar 701,2°C, 796,05 °C, dan 891,52°C. sedangkan pada waktu 7200 detik dengan temperatur minimum sebesar 724,83°C, 822,23°C, dan 919,96°C. Pada waktu 10800 detik didapatkan hasil temperatur minimum sebesar 733,04°C, 831,31°C, dan 929,79°C.

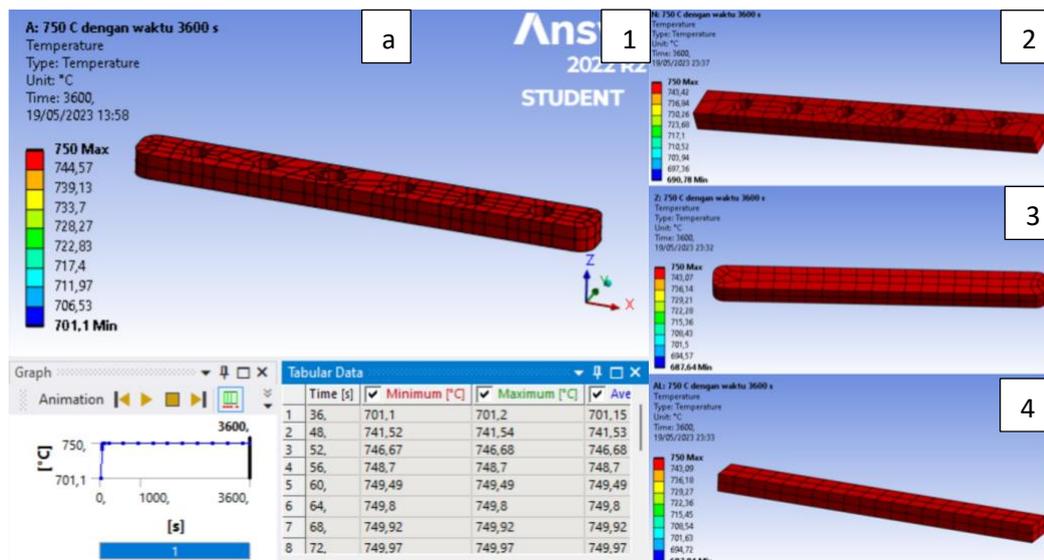
Dari hasil simulasi pada variasi waktu 7200 detik keempat geometri masih belum tercapai temperatur maksimum sehingga masih terjadi peningkatan temperatur yang akhirnya akan diperoleh temperatur maksimum pada waktu 10800 detik. Pada waktu 10800 detik hasil temperatur maksimumnya paling mendekati variasi temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C tetapi peningkatan temperatur yang terjadi tidak terlalu signifikan, sehingga tercapai temperatur maksimum, dan juga dapat dilihat selisih temperatur maksimum dan minimum pada waktu 10800 detik memiliki selisih yang sangat sedikit sehingga dapat dikatakan bahwa temperatur pada sampel telah terdistribusi merata dari variasi temperatur dengan temperatur maksimum.

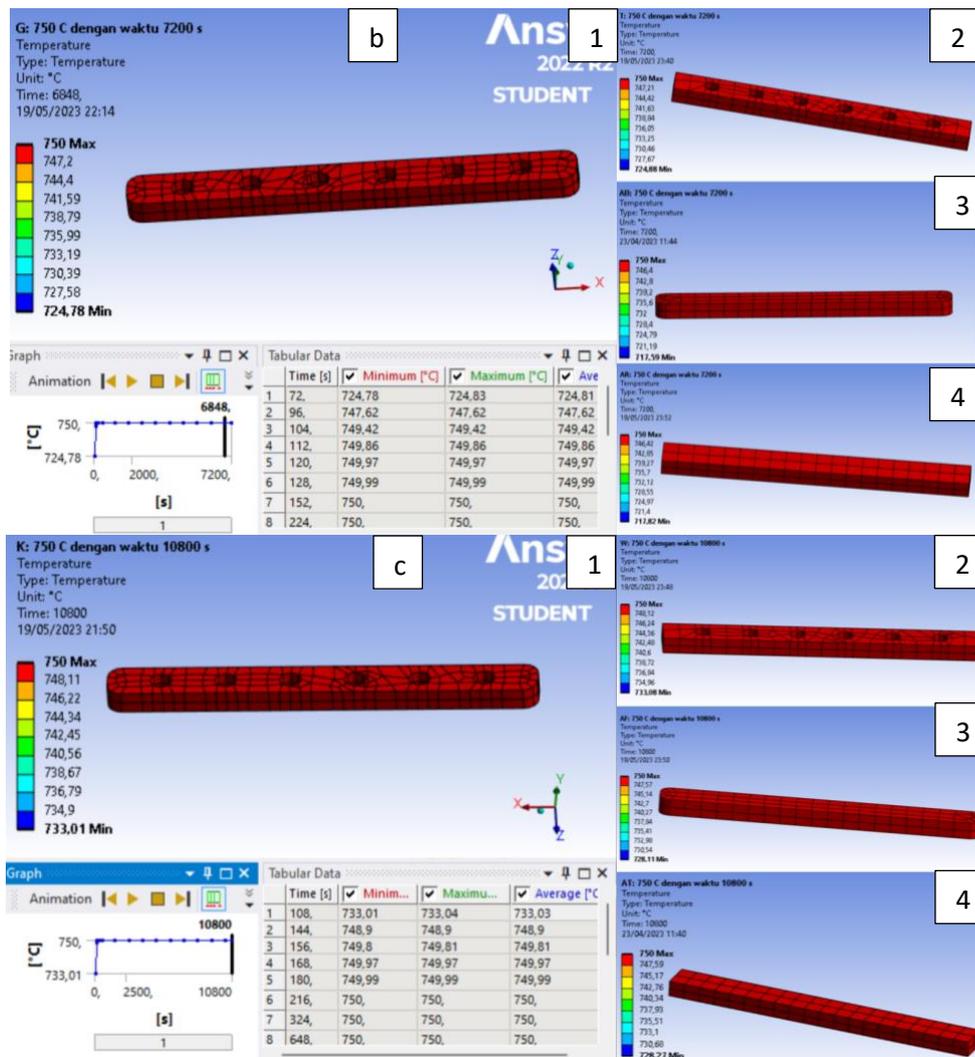
Pada hasil distribusi temperatur pada sampel dengan variasi geometri nilai minimum dan maksimumnya cukup tinggi pada geometri 1 secara keseluruhan dan hanya terpaut tipis pada perbedaaan. Dan untuk seluruh geometri terjadi peningkatan yang tidak jauh beda dari geometri lain. Perbedaan geometri berpengaruh pada proses simulasi pemanasan dan didapatkan hasil temperatur minimum dan maksimum yang berbeda walau nilainya mendekati satu sama lain geometri. Ini juga menjadi pengaruh ketika perbedaan geometri mempengaruhi nilai temperaturnya.

Dibandingkan dengan geometri lainnya dengan variabel waktu dan temperatur didapatkan pada waktu 3600 temperatur minimal dan maksimal ada di geometri 1 dengan temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C dengan hasil temperatur minimum sebesar 701,1°C, 795,95°C, 891,4°C dan maksimum sebesar 701,2°C, 796,05 °C, dan 891,52°C. Sedangkan pada 7200 detik ada di geometri 2 variasi temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C dengan hasil tempertatur minimum sebesar 724,88°C, 822,28°C, 920,02°C dan temperatur maksimumnya sebesar 724,96°C, 822,37°C, 920,11°C. lalu pada waktu 10800 detik ada di geometri 1 variasi temperatur 750°C, 850°C, dan 950°C dengan hasil tempertatur minimum sebesar 733,01°C, 831,27°C, dan 929,72°C dan hasil temperatur maksimumnya sebesar 733,01°C, 831,27°C, dan 929,72°C. Dapat disimpulkan bahwa pada hasil pada temperatur minimum dan maksimum di waktu 3600 detik, 7200 detik dan 10800 detik diperoleh temperatur paling tertinggi dari keempat geometri dari 3600 detik

masih terus meningkat secara signifikan untuk mencapai temperatur serta paling mendekati pada variasi meskipun energi belum terdistribusi merata sehingga temperatur spesimen masih akan terus meningkat hingga tercapai temperatur maksimum yang mendekati ada di geometri 1 dan 2.

Pada temperatur minimum dan maksimum dapat diamati bahwa selisih temperatur setiap waktunya terus berubah, semakin lama waktu pemanasan maka selisih temperatur minimum dan maksimum akan semakin sedikit, dan semakin tinggi temperatur maka selisih temperatur minimum dan maksimum akan semakin berkurang. Dari hasil simulasi pemanasan pada waktu 3600 detik memiliki selisih temperatur yang cukup besar yaitu sekitar $0,19^{\circ}\text{C}$, $1,05^{\circ}\text{C}$, dan $0,12^{\circ}\text{C}$ yang artinya pada waktu tersebut distribusi temperaturnya belum merata, sedangkan pada waktu 7200 detik memiliki selisih temperatur sebesar $3,09^{\circ}\text{C}$, $0,23^{\circ}\text{C}$, dan $0,06^{\circ}\text{C}$ yang artinya temperatur masih belum stabil dan masih dapat terus meningkat. Dan pada waktu 7200 detik memiliki selisih temperatur yang paling sedikit yaitu $0,06^{\circ}\text{C}$, $0,004^{\circ}\text{C}$, dan $0,79^{\circ}\text{C}$. Maka didapatkan hasil temperatur simulasi memiliki nilai selisih terkecil yaitu dua angka dibelakang koma sehingga dalam simulasi ini waktu yang paling efektif adalah selama dua jam karena distribusi temperaturnya sudah merata di seluruh bagian.





Gambar 4.3 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 750°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik 1) geometri 1; 2) geometri 2; 2) geometri 3; 4) geometri 4

Gambar 4.3 menunjukkan hasil distribusi temperatur pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 750°C dan geometri 1, 2, 3 dan 4. Pada gambar bagian a, b dan c menggunakan variasi sampel geometri 1, 2, 3 dan 4. Pada bagian a adalah pemanasan pada temperatur 750°C dengan variasi waktu 3600 detik dengan hasil selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian a sebesar 3,9°C, 0,74°C, 0,32°C, dan 0,41°C. lalu selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian b sebesar 0,09°C, 0,08°C, 0,17°C, dan

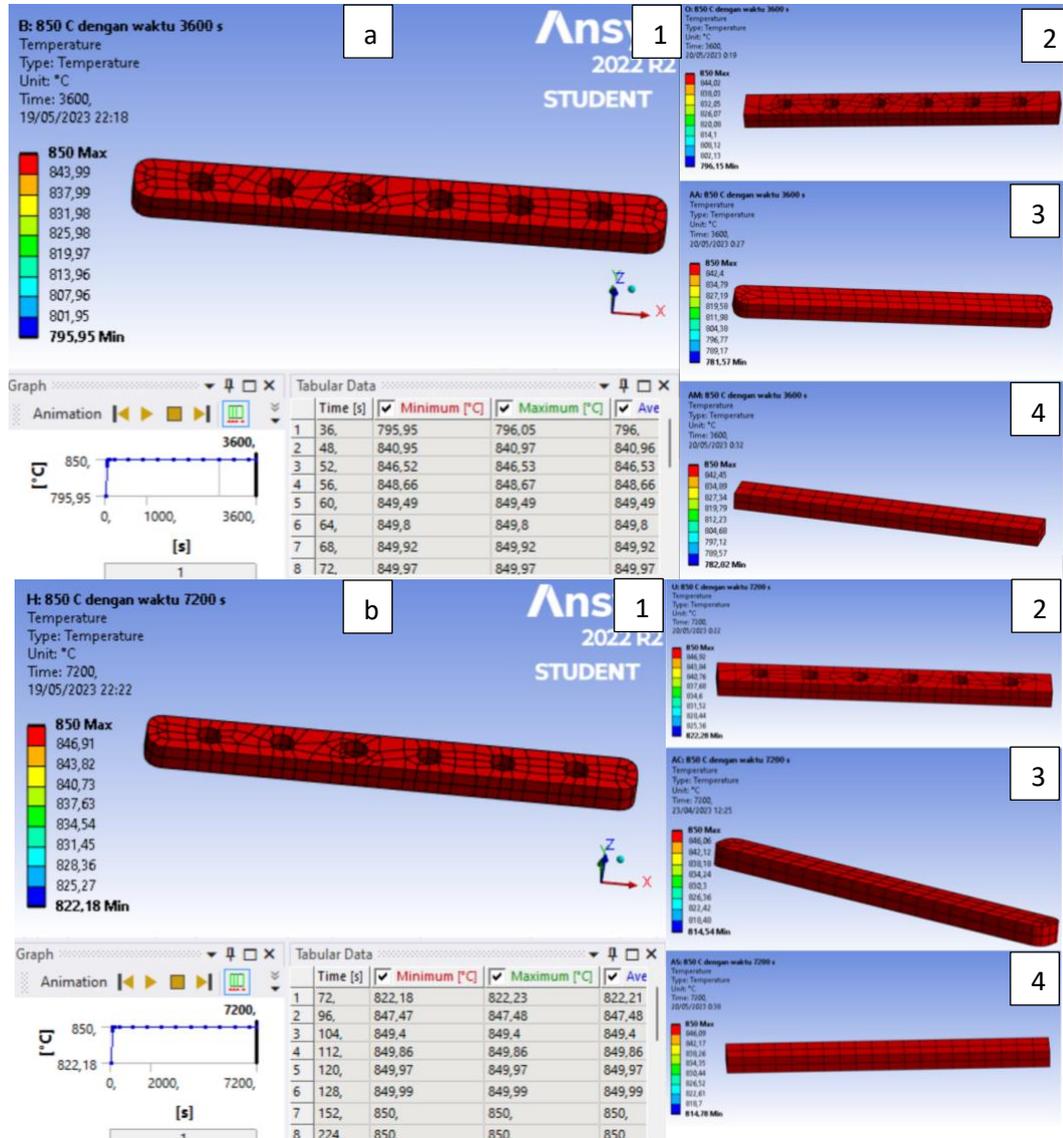
0,24°C. sedangkan selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian c sebesar 0°C, 0,06°C, 0,11°C, dan 0,22°C.

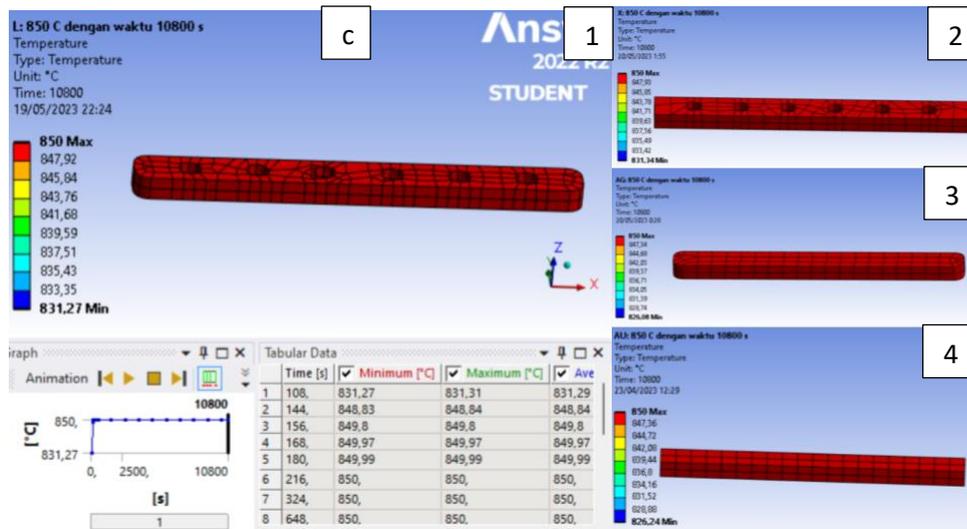
Data yang didapatkan dengan perbedaan sampel geometri menunjukkan terjadinya fenomena perpindahan panas yang menunjukkan terjadinya perbedaan dari sampel yang ada dan geometri 1 mendominasi perpindahan panas lebih besar dari pada geometri 2, 3 dan 4. Selain itu perbedaan selisih temperatur setiap setengah jam terus mengalami penurunan yang cukup signifikan. Sehingga berdasarkan penelitian (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021) dapat dikatakan bahwa dalam penelitian ini waktu 10800 detik merupakan waktu yang efektif untuk pemanasan dalam proses SIS dikarenakan dalam waktu 10800 detik telah mencapai keseragaman warna temperatur dari selisih yang ingin dicapai pada sampel geometri 1 sebesar 0°C dan geometri 2 sebesar 0,06°C.

Pada hasil simulasi pengamatan temperatur pada bagian kiri sampel 1 sebesar 701,1°C, 724,78°C, dan 733,01°C dan pada gambar sebelah kanan sampel geometri 2, 3, dan 4 dengan temperatur 743,42°C, 746,4°C, 747,59°C. Hasil temperatur pada sampel geometri 1 lebih besar dibanding temperatur pada sampel geometri 2, geometri 3, dan geometri 4 dengan selisih 1,15°C, 0,8°C, dan 0,13°C. Hasil ini menunjukkan bahwa pada waktu 10800 detik temperatur pada sampel sudah terdistribusi merata karena propagasi penuh terhadap sampel sehingga meningkatkan terjadinya reaksi disetiap bagian sampel (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021).

Dalam hasil ini didapatkan hasil data bahwa pada waktu 10800 detik temperatur tertinggi berada pada sampel geometri 1 yang berarti panas maksimum masuk melalui bagian atas bolong sampel, dan temperatur terendah berada pada alas dan atap sampel, dan sampel memiliki temperatur kurang dari temperatur sampel geometri 1 dan lebih dari sampel 2, 3, dan 4 yang menunjukkan propagasi sampel terjadi, dan sampel membuktikan terjadinya reaksi secara eksotermik. Meskipun selisih temperatur sampel tidak terlalu signifikan terhadap keempat sampel geometri, hal ini dikarenakan pada bagian bawah alas dan atas sampel yang lebih tidak terbuka bagian atas sampel sehingga temperaturnya sedikit lebih rendah dibanding sampel geometri 1. Sehingga dari penelitian ini dapat diketahui bahwa

metode SIS ini mendukung terjadinya propagasi pada sampel (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021).





Gambar 4.4 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik; 1) geometri 1; 2) geometri 2; 2) geometri 3; 4) geometri 4

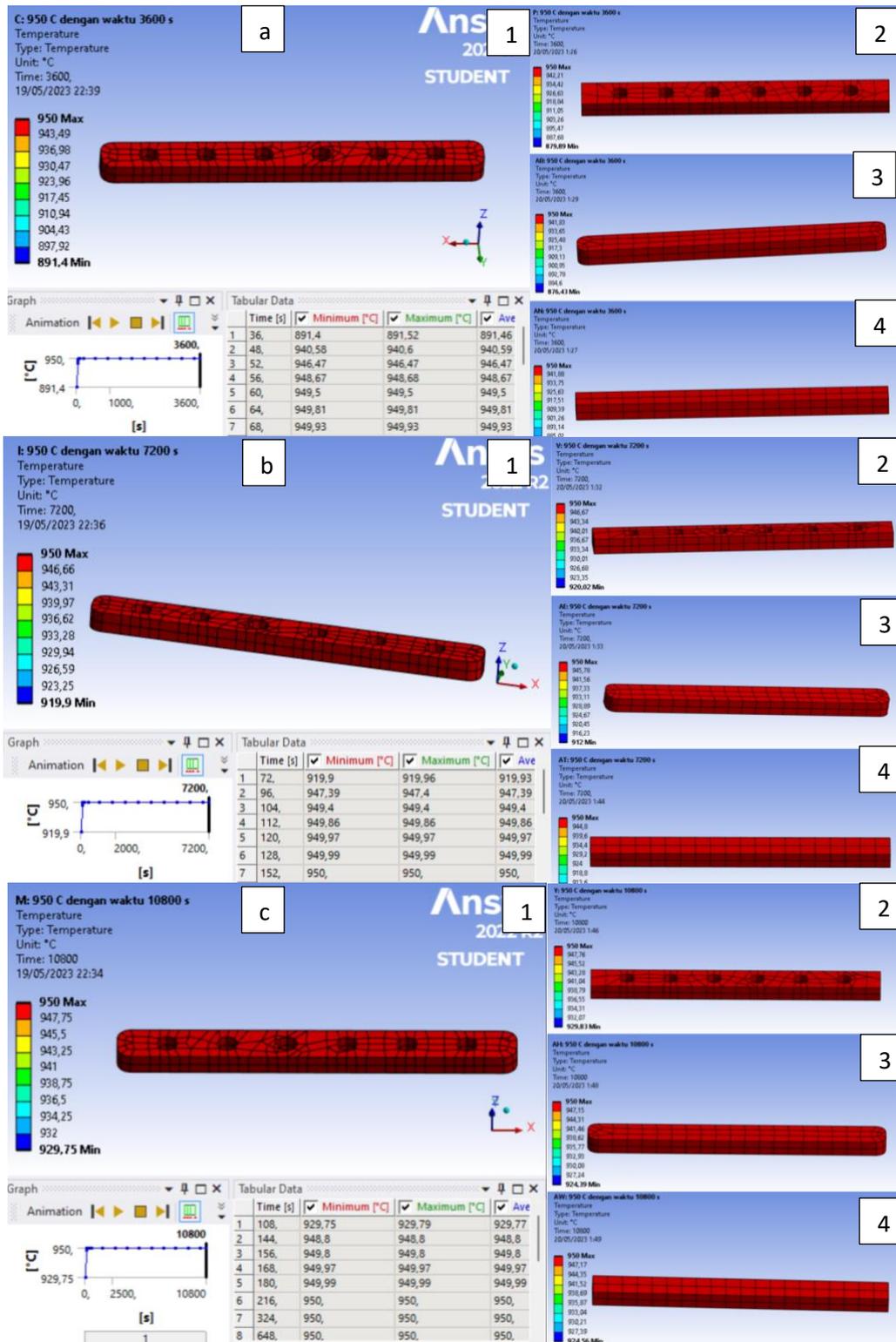
Dari Gambar 4.3 dapat dilihat distribusi temperatur pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 850°C dan geometri 1, 2, 3 dan 4. Pada gambar a, b dan c menggunakan variasi sampel geometri 1, 2,3 dan 4. Pada bagian a adalah pemanasan pada temperatur 850°C dengan variasi waktu 3600 detik dengan hasil selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian a sebesar 1,05°C, 4,88°C, 0,24°C, dan 0,45°C. lalu selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian b sebesar 0,23°C, 0,09°C, 0,19°C, dan 0,24°C. Sedangkan selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian c sebesar 0,04°C, 0,14°C, 0,12°C, dan 0,16°C.

Data yang didapatkan dengan perbedaan sampel geometri menunjukkan terjadinya fenomena perpindahan panas yang menunjukkan terjadinya proses propagasi thermal dari ujung atas penutup sampel 1 yang kemudian merambat menuju bagian bawah alas sampel sehingga terjadi proses propagasi pada sampel komposit pada proses SIS. Selain itu perbedaan selisih temperatur setiap setengah jam terus mengalami penurunan yang cukup signifikan. Sehingga berdasarkan penelitian (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021) dapat dikatakan bahwa dalam penelitian ini waktu 10800 detik merupakan waktu yang efektif untuk pemanasan

dalam proses SIS dikarenakan dalam waktu 10800 detik telah mencapai keseragaman warna temperatur yang ingin dicapai pada tiap bagian penutup sampel.

Hasil simulasi pengamatan temperatur pada sampel geometri 1 didapatkan hasil temperatur sebesar 823,99°C, 846,91°C, dan 847,92°C dan sampel geometri 2, 3 dan 4 dengan temperatur sebesar 844,02°C, 846,06°C, dan 847,36°C. temperatur geometri 1 dan geometri 2, geometri 3, dan geometri 4 memiliki selisih yang tidak terlalu signifikan yaitu sebesar 0,03°C, 2,07°C, dan 0,56°C. Hasil ini menunjukkan bahwa pada waktu 10800 detik temperatur pada sampel sudah terdistribusi merata karena propagasi penuh terhadap sampel sehingga meningkatkan terjadinya reaksi di setiap bagian sampel (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021).

Dalam hasil ini didapatkan hasil data bahwa pada waktu 10800 detik temperatur tertinggi berada pada sampel a yang berarti panas maksimum masuk melalui bagian atas sampel dan lubang, dan temperatur terendah berada pada alas sampel, dan memiliki temperatur kurang dari temperatur yang menunjukkan propagasi sampel terjadi, dan sampel menyimpan dan melepaskan energi panas yang membuktikan terjadinya reaksi secara eksotermik, sehingga sampel juga memberikan energi panas. Meskipun selisih temperatur sampel tidak terlalu signifikan terhadap keempat sampel geometri, hal ini dikarenakan pada bagian bawah sampel yang lebih tidak terbuka terhadap bagian atas sampel sehingga temperaturnya sedikit lebih tinggi dibanding bagian atas sampel. Sehingga dari penelitian ini dapat diketahui bahwa metode SIS ini mendukung terjadinya propagasi (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021).



Gambar 4.5 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 950°C pada Waktu
a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik; 1) geometri 1; 2) geometri 2; 2)
geometri 3; 4) geometri 4

Gambar 4.5 distribusi temperatur pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 950°C dan geometri 1, 2, 3 dan 4. Pada gambar a, b dan c menggunakan variasi sampel geometri 1, 2,3 dan 4. Pada bagian a adalah pemanasan pada temperatur 950°C dengan variasi waktu 3600 detik dengan hasil selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian a sebesar $0,12^{\circ}\text{C}$, $1,3^{\circ}\text{C}$, $6,37^{\circ}\text{C}$, dan $0,48^{\circ}\text{C}$. lalu selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian b sebesar $0,06^{\circ}\text{C}$, $0,09^{\circ}\text{C}$, $0,2^{\circ}\text{C}$, dan $0,12^{\circ}\text{C}$. sedangkan selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian b sebesar $0,79^{\circ}\text{C}$, $0,14^{\circ}\text{C}$, $0,31^{\circ}\text{C}$, dan $0,17^{\circ}\text{C}$.

Data yang didapatkan dengan perbedaan sampel geometri menunjukkan terjadinya fenomena perpindahan panas yang menunjukkan terjadinya proses propagasi thermal dari ujung atas sampel yang kemudian merambat menuju bagian bawah sampel sehingga terjadi proses propagasi pada sampel komposit pada proses SIS. Selain itu perbedaan selisih temperatur setiap setengah jam terus mengalami penurunan yang cukup signifikan. Sehingga berdasarkan penelitian (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021) dapat dikatakan bahwa dalam penelitian ini waktu 10800 detik merupakan waktu yang efektif untuk pemanasan dalam proses SIS dikarenakan dalam waktu 10800 detik telah mencapai keseragaman warna temperatur yang ingin dicapai pada tiap sampel geometri dari 1, 2, 3 dan 4.

Pada hasil simulasi pengamatan temperatur pada bagian bawah sampel didapatkan hasil temperatur sebesar $855,23$, $876,13$, dan $879,4^{\circ}\text{C}$ dan bagian atas sampel dengan temperatur sebesar $855,37$, $876,15$, dan $879,4^{\circ}\text{C}$. Temperatur bagian atas dan bawah sampel memiliki selisih yang tidak terlalu signifikan yaitu sebesar $0,14$, $0,02$, dan 0°C . Hasil ini menunjukkan bahwa pada waktu 10800 detik temperatur pada sampel sudah terdistribusi merata karena propagasi penuh terhadap sampel sehingga meningkatkan terjadinya reaksi di setiap bagian sampel (Luo Cheng, dan Zhang Yanson. 2021).

Dalam hasil distribusi temperatur didapatkan hasil data bahwa pada waktu 10800 detik temperatur tertinggi. Temperature tertinggi berada pada ujung atas penutup sampel. Panas maksimum masuk melalui bagian atas sampel, dan temperatur terendah berada pada alas sampel. Sampel memiliki temperatur kurang

dari temperatur alas sampel yang menunjukkan propagasi sampel terjadi, dan sampel menyimpan dan melepaskan energi panas yang membuktikan terjadinya reaksi secara eksotermik.

4.2.2 Analisa Hasil Distribusi *Heat Flux*

Simulasi perpindahan panas yang telah berlangsung akan menghasilkan suatu output yang dapat dipilih atau ditentukan. Output simulasi perpindahan panas yang diharapkan yaitu menghasilkan pengaruh terhadap total *heat flux* yang terjadi pada sampel saat dipanaskan di furnace pada temperatur dan waktu yang divariasikan. *Heat flux* adalah tingkat perpindahan panas per satuan luas, jadi semakin kecil nilai *heat flux* maka semakin merata distribusi panasnya (Bergman dkk, 2011).

Tabel 4.3 Data *Heat Flux* Minimum Sampel Variasi Temperatur dan Waktu Pemanasan

Geometri	Waktu (Detik)	<i>Heat flux</i> Minimum (W/m^2)		
		750 °C	850 °C	950 °C
1	3600	0,000016876	0,000018853	0,000021067
	7200	0,000016793	0,0000186	0,00002027
	10800	0,000016722	0,00001823	0,0001972
2	3600	0,000033949	0,000037262	0,0000383
	7200	0,000033864	0,000036366	0,0000333627
	10800	0,000033858	0,000035459	0,000031202
3	3600	0,000028235	0,000046482	0,000058409
	7200	0,000026434	0,000037054	0,00005825
	10800	0,00002636	0,00003531	0,000055599
4	3600	0,000024622	0,000014495	0,000023894
	7200	0,000019874	0,000013306	0,000011716
	10800	0,000012092	0,000014495	0,000010963

Tabel 4.3 merupakan hasil *heat flux* minimum dari simulasi pemanasan, *heat flux* minimum disini merupakan *heat flux* terendah yang terjadi dari hasil simulasi ini. Adapun hasil temperatur minimum dari simulasi pemanasan dengan variasi temperatur sebesar 750, 850, dan 950°C selama 3600 detik pada geometri 1 dengan hasil *heat flux* minimum sebesar 0,000016876, 0,000018853, dan 0,000021067 W/m^2 , sedangkan pada waktu 7200 detik dengan *heat flux* minimum sebesar 0,000016793, 0,0000186, dan 0,00002027 W/m^2 dan pada waktu 10800 detik didapatkan hasil temperatur minimum sebesar 0,000016722, 0,00001823, dan 0,0001972 W/m^2 .

Dari hasil penelitian didapatkan hasil *heat flux* tertinggi sebesar 0,000021067 W/m^2 pada temperatur 950°C dengan waktu 3600 detik hal ini berarti bahwa proses SIS dengan temperatur 950°C pada waktu 3600 detik masih kurang stabil, yang artinya masih ada distribusi panas yang masih belum merata atau pada sampel tersebut lebih berpeluang untuk meningkatnya temperatur. Sedangkan *heat flux* terendah terjadi pada temperatur 750°C dengan waktu selama 10800 detik sebesar 0,000016722 W/m^2 . yang berarti bahwa pada keadaan ini paling stabil, temperatur sudah terdistribusi merata keseluruhan bagian sampel dan sampel lebih terhomogenisasi dengan baik. Pada keempat geometri memiliki hasil masing masing yang berbeda.

Dari hasil percobaan didapatkan hasil *heat flux* tertinggi di geometri 1. Membuktikan desain geometri 1 keadaannya masih kurang stabil. Pada geometri 1 distribusi panas masih belum merata, atau pada sampel tersebut lebih berpeluang untuk meningkatnya temperatur. Sedangkan hasil *heat flux* terendah di geometri 4 keadan paling stabil dan temperatur sudah terdistribusi merata ke seluruh bagian sampel dan lebih terhomegenisasi dengan baik.

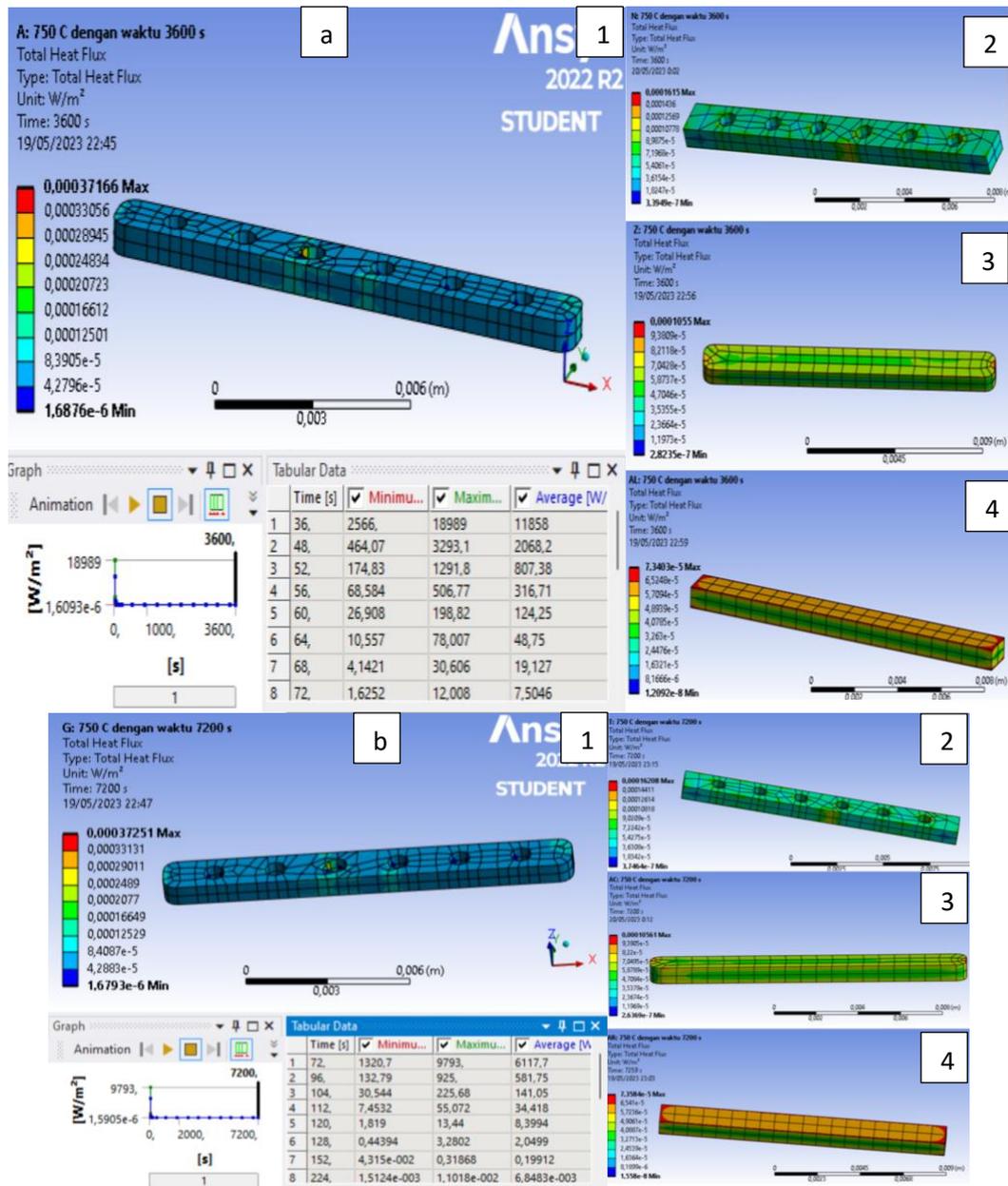
Tabel 4.4 Data *Heat Flux* Maksimum Sampel Variasi Temperatur dan Waktu Pemanasan

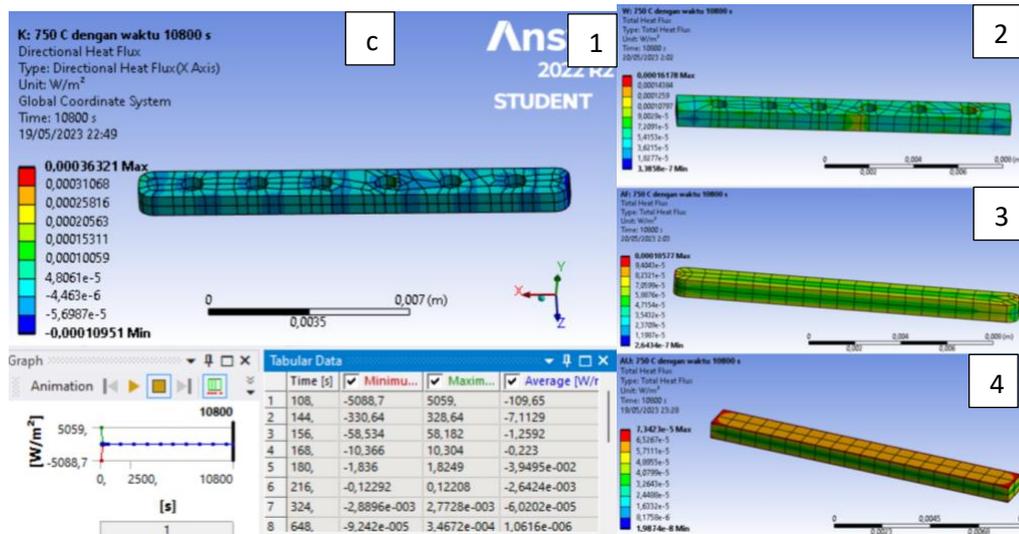
Geometri	Waktu (Detik)	<i>Heat fluks</i> Maksimum (W/m^2)		
		750°C	850°C	950°C
1	3600	20986	18986	22742
	7200	9793	10801	11681
	10800	6597	7271	7857
2	3600	29186	22449	34538
	7200	12109	13247	14195
	10800	8936	9769	10462
3	3600	23299	25139	27483
	7200	12109	13247	14195
	10800	8179	8939	9566
4	3600	25574	27955	30062
	7200	13231	14481	19243
	10800	8936	9769	10462

Tabel 4.4 merupakan hasil *heat flux* maximum dari simulasi pemanasan, *heat flux* maximum disini merupakan *heat flux* tertinggi yang terjadi dari hasil simulasi ini. Adapun hasil *heat flux* maximum dari simulasi pemanasan dengan variasi temperatur sebesar 750, 850, dan 950°C selama 3600 detik dengan hasil *heat flux* maximum sebesar 20986, 18986, dan 22742 W/m^2 . Sedangkan pada waktu 7200 detik dengan *heat flux* maximum sebesar 232,96, 224,31, dan 214,63 W/m^2 . dan pada waktu 10800 detik didapatkan hasil temperatur masimum sebesar 6597, 7271 dan 7857 W/m^2 .

Hasil penelitian didapatkan hasil *heat flux* tertinggi sebesar 22742 W/m^2 pada temperatur 3600 detik hal ini berarti bahwa proses SIS dengan temperatur 950°C pada waktu 3600 detik masih kurang stabil, yang artinya masih ada distribusi panas yang masih belum merata atau pada sampel tersebut lebih

berpeluang untuk meningkatnya temperatur. Sedangkan *heat flux* terendah terjadi pada temperatur 950°C dengan waktu selama 10800 detik yang berarti bahwa pada keadaan ini paling stabil, temperatur sudah terdistribusi merata keseluruhan bagian sampel dan sampel lebih terhomogenisasi dengan baik.





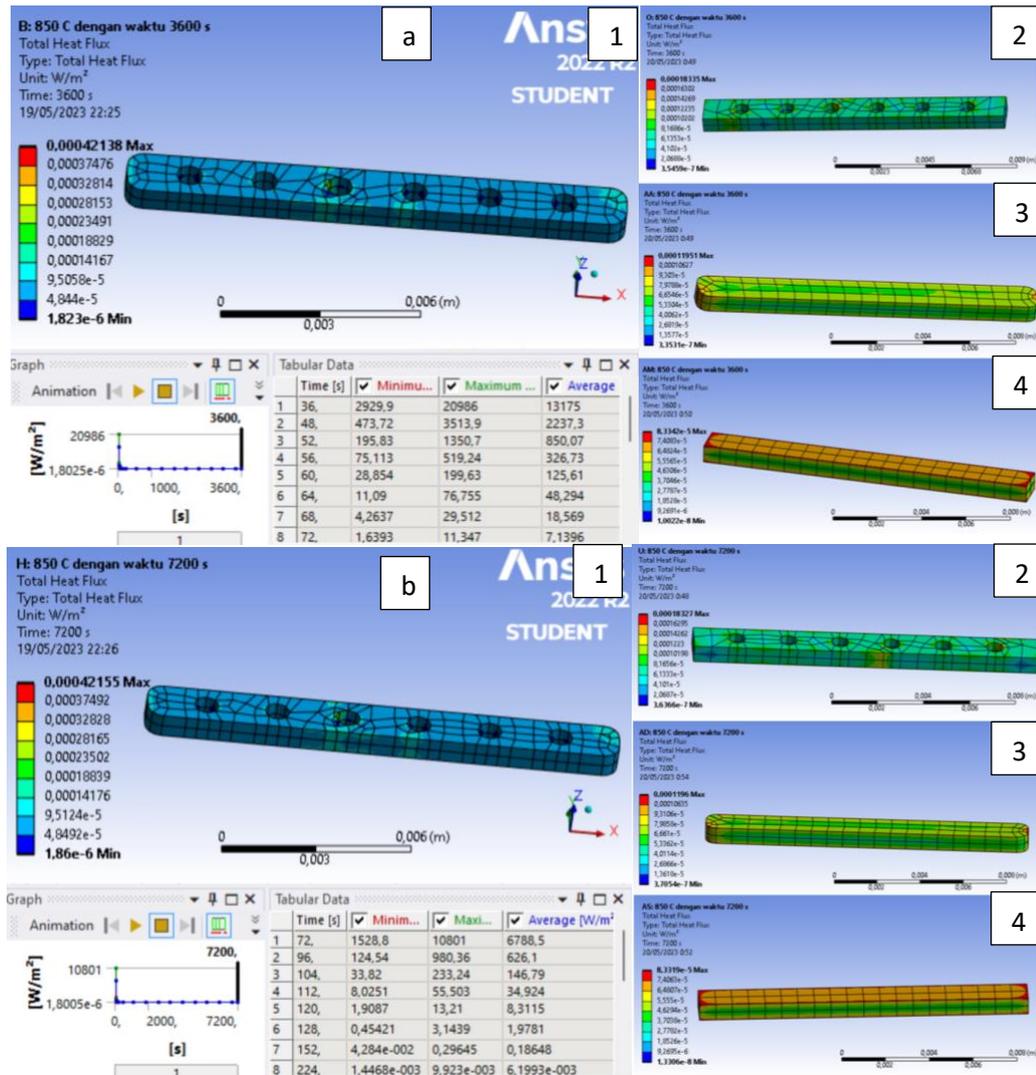
Gambar 4.6 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 750°C pada Waktu

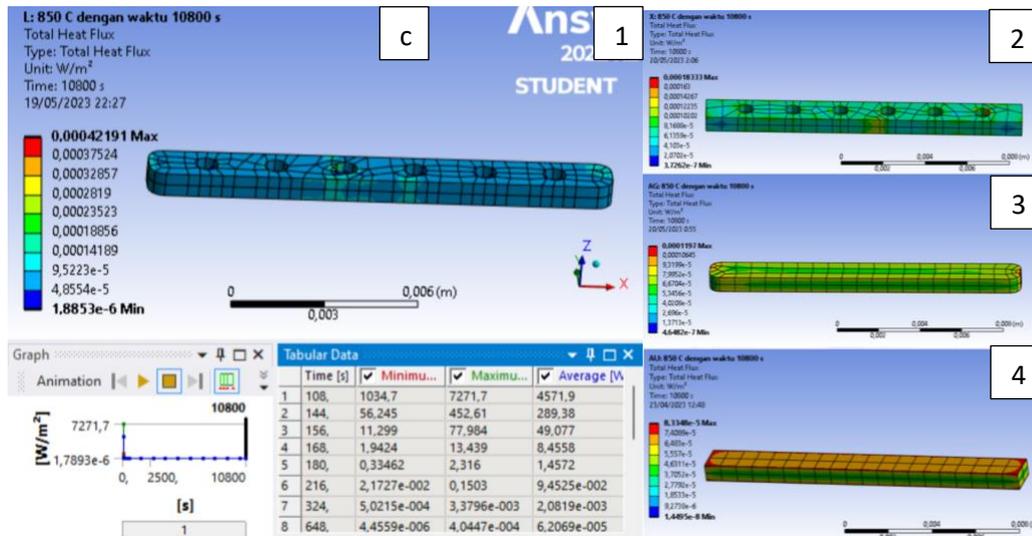
a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik; 1) geometri 1; 2) geometri 2; 3) geometri 3; 4) geometri 4

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat besarnya *heat flux* pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 750°C, Pada gambar a, b dan c menggunakan variasi sampel geometri 1, 2,3 dan 4. Pada bagian a adalah besarnya *heat flux* pada temperatur 750°C dengan variasi waktu 3600 detik dengan hasil nilai *heat flux* pada bagian kiri sampel merupakan nilai *heat flux* terendah pada hasil simulasi ini sehingga pada kondisi aktualnya proses propagasi dalam pemanasan ini terjadi dengan baik karena distribusi pada bagian ini panas terdistribusi merata sehingga seluruh bagian sampel dapat bereaksi dan berikatan dengan baik. Sedangkan nilai *heat flux* maximum terjadi pada bagian sudut antara penutup sampel, hal ini menunjukkan bahwa pada bagian tersebut panas kurang terdistribusi merata dan juga mengindikasikan terjadinya propagasi dari bagian atas sampel menuju bagian bawah sampel.

Pada hasil simulasi pengamatan *heat flux* pada bagian kanan sampel 2, 3 dan 4 didapatkan nilai *heat flux* sebesar 0,000033858 W/m², 0,00002636, dan 0,000012092 W/m² dan bagian kanan sampel dengan *heat flux* maksimum sebesar 8936, 8179, dan 8936 W/m². Dari hasil ini didapatkan nilai *heat flux* terendah pada bagian atas sampel yang berarti pada bagian atas sampel panas terdistribusi merata

dibanding bagian bawah sampel, sedangkan pada bagian bawah sampel panas kurang terdistribusi merata sehingga dapat menyebabkan kerapuhan pada bagian ujung sudut sampel. Selain itu selisih *heat flux* bagian sampel pada waktu 10800 detik semakin stabil dibanding waktu 3600, dan 7200 detik yang menandakan pada keadaan ini *heat flux* semakin homogen dibanding waktu 3600, dan 7200 detik.



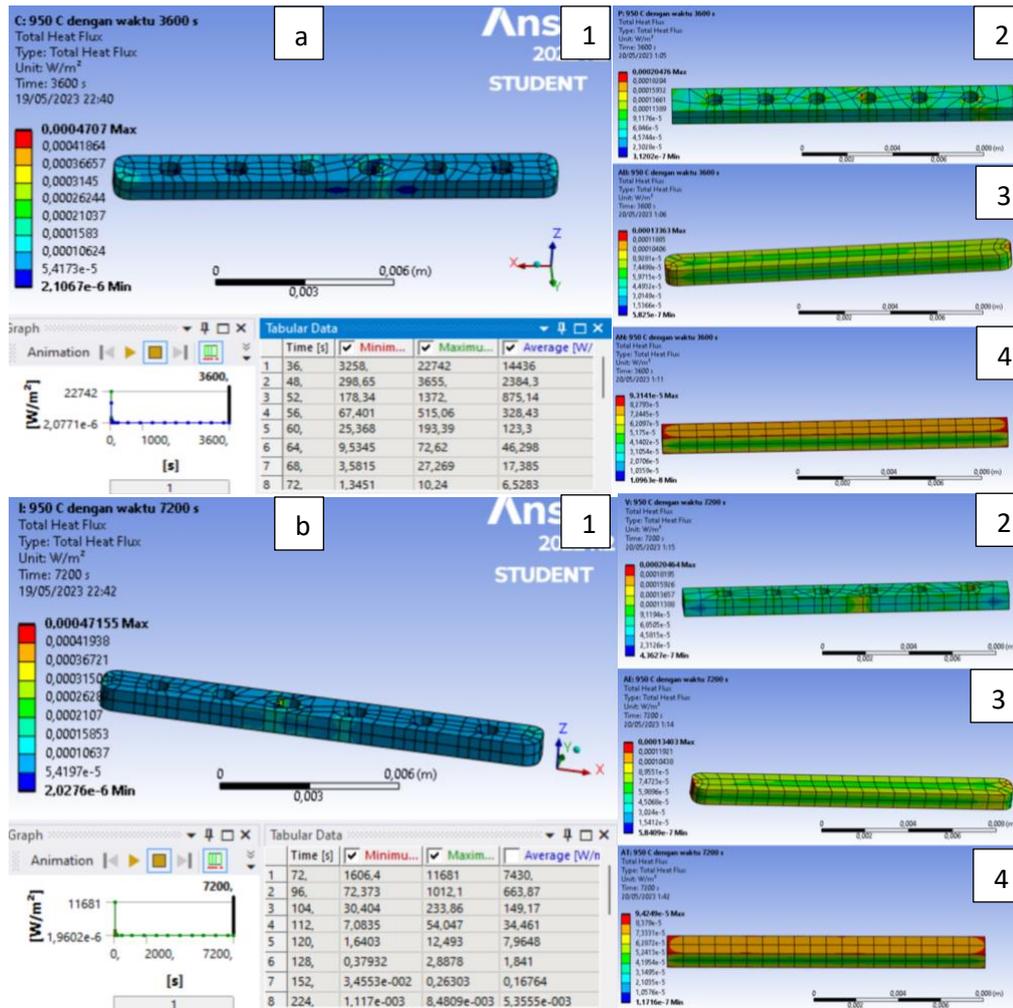


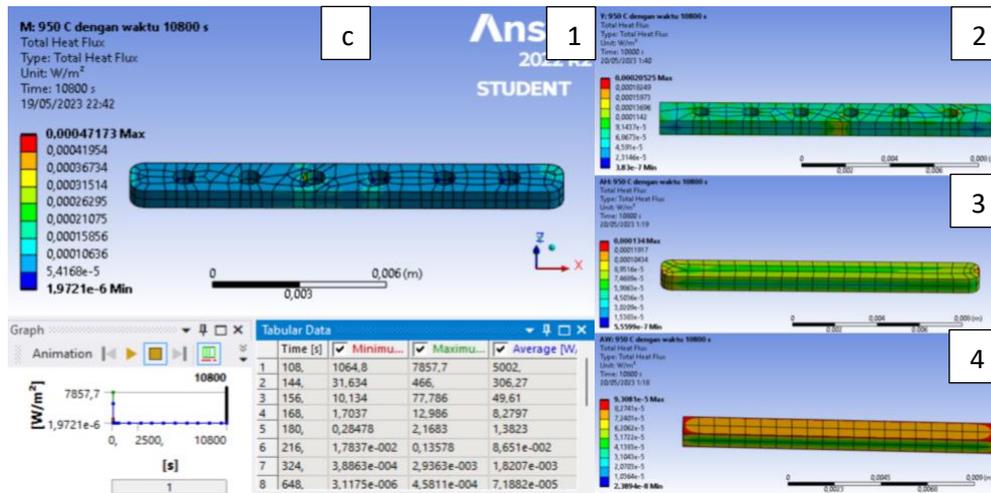
Gambar 4.7 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik; 1) geometri 1; 2) geometri 2; 2) geometri 3; 4) geometri 4

Dari Gambar 4.7 dapat dilihat besarnya *heat flux* pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 850°C, Pada bagian a adalah besarnya *heat flux* pada temperatur 850°C dengan variasi waktu 3600 detik dengan hasil nilai *heat flux* pada bagian kiri sampel geometri 1 merupakan nilai *heat flux* terendah pada hasil simulasi ini sehingga pada kondisi aktualnya proses propagasi dalam pemanasan ini terjadi dengan baik karena distribusi pada bagian ini panas terdistribusi merata sehingga seluruh sampel dapat bereaksi dan berikatan dengan baik. Sedangkan nilai *heat flux* maximum terjadi pada bagian sudut antara atas sampel, hal ini menunjukkan bahwa pada bagian tersebut panas kurang terdistribusi merata dan juga mengindikasikan terjadinya propagasi dari bagian atas sampel menuju bagian bawah alas sampel.

Hasil simulasi pengamatan *heat flux* pada bagian kiri sampel geometri 2, 3, dan 4 didapatkan nilai *heat flux* sebesar 0,000037262 W/m², 0,000046482 W/m², dan 0,000014495 W/m² dan bagian kiri sampel maksimum dengan *heat flux* sebesar 22449, 12109, dan 8936,1 W/m². Dari hasil ini didapatkan nilai *heat flux* terendah pada bagian kiri sampel geometri 2, 3, dan 4 yang berarti pada bagian atas sampel panas terdistribusi merata dibanding bagian bawah sampel, sedangkan pada

bagian bawah sampel panas kurang terdistribusi merata sehingga dapat menyebabkan kerapuhan pada bagian ujung sudut sampel. Selain itu selisih *heat flux* bagian sampel pada waktu 10800 detik semakin stabil dibanding waktu 3600, dan 7200 detik yang menandakan pada keadaan ini *heat flux* semakin homogen dibanding waktu 3600, dan 7200 detik.





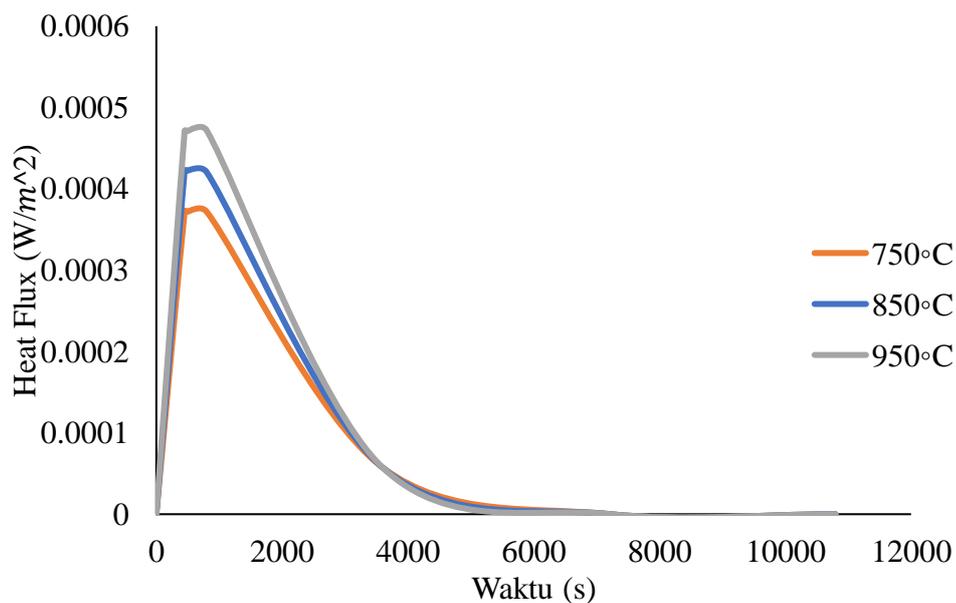
Gambar 4.8 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 950°C pada Waktu

- a) 3600 detik, b) 7200 detik, dan c) 10800 detik, 1) geometri 1; 2) geometri 2; 3) geometri 3; 4) geometri 4

Dari Gambar 4.8 dapat dilihat besarnya *heat flux* pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 950°C, Pada bagian a adalah besarnya *heat flux* pada temperatur 950°C dengan variasi waktu 3600 detik dengan hasil nilai *heat flux* pada bagian kiri sampel geometri 1 merupakan nilai *heat flux* terendah pada hasil simulasi ini sehingga pada kondisi aktualnya proses propagasi dalam pemanasan ini terjadi dengan baik karena distribusi pada bagian ini panas terdistribusi merata sehingga seluruh bagian sampel dapat bereaksi dan berikatan dengan baik. Sedangkan nilai *heat flux* maximum terjadi pada bagian sudut antara atas sampel, hal ini menunjukkan bahwa pada bagian tersebut panas kurang terdistribusi merata dan juga mengindikasikan terjadinya propagasi dari bagian atas sampel menuju bagian bawah alas sampel.

Pada hasil simulasi pengamatan *heat flux* pada bagian kanan sampel didapatkan nilai *heat flux* minimum sebesar 0,0000383 W/m², 0,000058409 W/m², dan 0,000023894 W/m². Dan nilai *heat flux* maksimum sampel dengan temperatur sebesar 34538, 14195, dan 10462 W/m². Dari hasil ini didapatkan nilai *heat flux* terendah pada bagian atas sampel yang berarti pada bagian atas sampel panas terdistribusi merata dibanding bagian bawah alas sampel, sedangkan pada bagian bawah alas sampel panas kurang terdistribusi merata sehingga dapat menyebabkan

kerapuhan pada bagian ujung sudut sampel. Selain itu selisih *heat flux* bagian sampel pada waktu 10800 detik semakin stabil dibanding waktu 3600, dan 7200 detik. Keadaan *heat flux* pada waktu 10800 detik semakin homogen dibanding waktu 3600, dan 7200 detik. Selain hasil simulasi berupa visualisasi pengamatan pada gambar diatas, dalam penelitian ini juga memberikan hasil berupa grafik *heat flux* yang terjadi setiap waktunya seperti pada gambar dibawah ini.

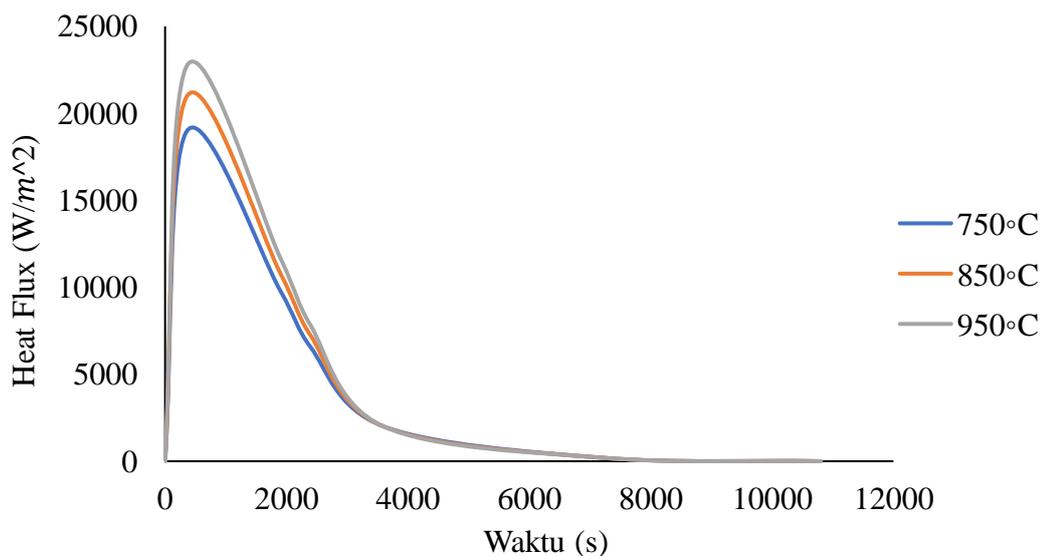


Gambar 4.9 Grafik *Heat Flux* Minimum terhadap Temperatur dan Waktu

Gambar 4.9 merupakan perubahan *heat flux* minimum dari hasil simulasi pemanasan dengan variasi temperatur sebesar 750, 850, dan 950°C, pada 60 detik pertama pemanasan spesimen memiliki *heat flux* sebesar 0,000149, 0,0001599, dan 0,0001652 W/m² kemudian mengalami peningkatan yang signifikan sampai *heat flux* sebesar 0,000016722 W/m², 0,00001823 W/m², dan 0,0001972 W/m² pada menit kedua atau 120 detik, dan kemudian *heat flux* specimen menurun. kemudian setelah 120 detik kurva *heat flux* mengalami penurunan yang signifikan yang mengindikasikan bahwa spesimen masih mengalami perpindahan panas yang cukup cepat sampai kisaran waktu 3000 detik di mana pada keadaan waktu tersebut energi panas terus mengisi spesimen sampai ujung bawah spesimen dengan cepat seiring dengan peningkatan temperatur yang signifikan, kemudian setelah 3200 detik, spesimen mengalami penurunan *heat flux* yang tidak terlalu signifikan

sehingga peningkatan temperatur yang terjadi tidak terlalu signifikan. Kemudian pada waktu 960 detik menghasilkan keadaan *heat flux* yang hampir sama dengan keadaan awal. Hal ini berarti waktu terlalu lama untuk menyamakan keadaan *heat flux* pada specimen dengan keadaan awal membutuhkan waktu selama 960 detik.

Dapat diasumsikan bahwa keadaan ini akan memulai terjadinya reaksi antara aluminium dengan magnesium sehingga membentuk ikatan spinel ($MgAl_2O_4$). Meskipun pada awalnya nilai *heat flux* specimen yang menggunakan pemanasan dengan temperatur $750^\circ C$ lebih besar dibanding menggunakan temperatur $750^\circ C$ dan $850^\circ C$, namun pada menit ke-70 atau 4200 detik temperatur $950^\circ C$ menghasilkan *heat flux* yang lebih rendah dibanding $750^\circ C$ dan $850^\circ C$. Hal ini menunjukkan semakin tinggi temperatur yang digunakan maka *heat flux* yang dihasilkan akan semakin rendah dengan waktu minimal yang diperlukan selama 70 menit. Sehingga mulai menit ke-70 *heat flux* pada temperatur $950^\circ C$ menjadi *heat flux* terendah karena distribusi panasnya sudah merata sehingga baik untuk proses SIS ini. Data yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur dengan waktu proses yang lebih lama akan menghasilkan *heat flux* yang rendah juga, sehingga distribusi panas di sampel akan lebih merata dan sampel akan lebih terhomogenisasi dengan baik.



Gambar 4.10 Grafik *Heat Flux* maksimum terhadap Temperatur dan Waktu

Gambar 4.10 merupakan perubahan *heat flux* maximum dari hasil simulasi pemanasan dengan variasi temperatur sebesar 750, 850, dan 950°C, pada 1 menit pertama pemanasan spesimen memiliki *heat flux* sebesar 4090 W/m², 5693 W/m², dan 7378 W/m² kemudian mengalami peningkatan yang signifikan sampai *heat flux* sebesar 18986 W/m², 20986 W/m², dan 22742 W/m² pada menit kedua atau 120 detik, dan kemudian *heat flux* specimen menurun. kemudian setelah 120 detik kurva *heat flux* mengalami penurunan yang signifikan yang mengindikasikan bahwa spesimen masih mengalami perpindahan panas yang cukup cepat sampai kisaran waktu 3000 detik di mana pada keadaan waktu tersebut energi panas terus mengisi spesimen sampai ujung bawah spesimen dengan cepat seiring dengan peningkatan temperatur yang signifikan.

Kemudian setelah 3000 detik, spesimen mengalami penurunan *heat flux* yang tidak terlalu signifikan sehingga peningkatan temperatur yang terjadi tidak terlalu signifikan. Kemudian pada waktu 960 detik menghasilkan keadaan *heat flux* yang hampir sama dengan keadaan awal. Hal ini berarti waktu terlalu lama untuk menyamakan keadaan *heat flux* pada specimen dengan keadaan awal membutuhkan waktu selama 960 detik. Dapat diasumsikan bahwa keadaan ini akan memulai terjadinya rekasi antara Aluminium dengan magnesium sehingga membentuk ikatan spinel (MgAl₂O₄).

Nilai *heat flux* specimen yang menggunakan pemanasan dengan temperatur 950°C lebih besar dibanding menggunakan temperatur 750°C dan 850°C. Namun pada menit ke-60 atau 3600 detik temperatur 950°C menghasilkan *heat flux* yang lebih rendah dibanding 850°C dan 750°C. Hal ini menunjukkan semakin tinggi temperatur yang digunakan maka *heat flux* yang dihasilkan akan semakin tinggi dengan waktu minimal yang diperlukan selama 70 menit. Sehingga mulai menit ke-70 *heat flux* pada temperatur 950°C menjadi *heat flux* terendah karena distribusi panasnya sudah merata sehingga baik untuk proses SIS ini. Data yang diperoleh menunjukkan sampel yang terhomogenisasi dengan baik yaitu pada temperatur 750 °C dan waktu proses 2 jam dengan nilai *heat flux* yang dihasilkan sebesar 0.000016793 W/m² dan distribusi temperatur pada seluruh bagian sampel sebesar 849,96 °C.

DAFTAR PUSTAKA

Ayers, R., D. Burkes., G. Gottoli. "The Application of Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Engineered Porous Composite Biomedical Materials." Journal: Materials and Manufacturing Processes, vol. 22, no. 4, pp 481-488, 2007

ANSYS Inc, 2019. ANSYS R3 Documentation Help, 2019.

Barbero, Ever J. *Finite element analysis of composite materials using ansys*. Taylor & Francis Group. International Standard Book Number-13: 978-1-4665-1690-8 (eBook – PDF) 37-45, 2014.

Bergman, Theodore L., Incopera, Frank P., Dewitt, David P. & Lavine, Adrienne S. dkk. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Edition". John Wiley & Sons Inc, 2011.

Bhaduri, A. Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys, 2018.

Bhavikatti, S. S. Finite Element Analysis. New Delhi: New Age International, 2005.

BMI RESEARCH. Indonesia Medical Devices Report; 2015.
<http://store.bmiresearch.com/indonesia-medical-devices-report.html>

Borisova, A. L. & Borisov, Yu S., "Self-propagating High-temperature Synthesis for The Deposition of Thermal-sprayed Coatings". Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 47, Nos. 1-2, 2008

Chen, & Liu. Finite Element Modeling and Simulation With ANSYS Workbench. New York: Taylor & Francis Group, 2019.

Chiu, H.-C., Y.-C. Hsieh, Y.-H. Kao, and M. Lee. The determinants of email receivers' disseminating behaviors. Journal of Advertising Research 47, no. 4: 524–34, 2007.

Ferrari, T. B., Hara, S. H., Aziani, J. L., Rocha, L., de Paula, E. & Mulato, M. "Undergraduate Study of Thermal Conductivity of Metals" Universidade de Sao Paulo, Brazil, 2002.

Francis W. Sears, Mark W. Zemansky, Hugh D. Young. University physics, part I. California: Addison-Wesley Publishing Company, 1982.

Groover, Mikell P. "Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems 4th Edition". John Wiley & Sons Inc, 2010

Hatch, J.E. Aluminum Properties and Physical Metallurgy. Chapter 5, ASM International, 1, 134-199, 1984.

Halverson, Danny C., Pyzik, Aleksander J., Aksay, Ilhan A. & Snowden, William E. "Processing of Boron Carbide-Aluminum Composites" Journal of the American Ceramic Society, Vol. 72 No. 5, 1989.

H,S Carslaw and J.C, Jaeger, Conduction of Heat in Solid, second edition, Oxford University Press, page 290-310, 1959.

Hutton, D. V. Fundamentals of Finite Element Analysis. New York: McGraw-Hill, 122, 2004.

J.P. Holman. Perpindahan kalor. Erlangga, 23, 1997.

Kaur, Gurbinder. "Bioactive Glasses Potential Biomaterials for Future Therapy" Springer International Publishing, Switzerland, 2017.

Kommel, L., Kimmari. Solid Phase's Transformations in Boron Carbide Based Composites during Heat Treatment Solid State Phenomena, Trans Tech Publications 138 pp. 175 – 180, 2008.

Kreith, Frank., Manglik, Raj M. & Bohn, Mark S. "Principles of Heat Transfer 7th Edition" Cengage Learning Inc, 2011.

Levashov, E. A. dkk. Self-propagating high-temperature synthesis of advanced materials and coatings. *International Materials Reviews*. 62 (4). Pp 203 – 239, 2016.

Madenci, E., & Guven, I. The finite element method and applications in engineering using ANSYS, second edition. In *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, Second Edition*. New York : Springer, 2015.

Nachev, S., De Rango, P., Skryabina, N., Skachkov, A., Aptukov, V., Fruchart, D. & Marty, P., " Mechanical Behavior of Highly Reactive Nanostructured MgH₂". *International Journal of Hydrogen Energy* 1-10, 2015.

Narasaraju, T. S. B., and Phebe, D. E., "Review, some physicochemical aspects of hydroxyapatite." *Journal of Materials Sciences*, Vol. 31, pp. 1–21.

Pramono, A., Timuda, G., Rifai, G., & Khaerudini, D. (2022). Synthesis of spinel-hydroxyapatite composite utilizing bovine bone and beverage can. *Crystals*, 12(1), 96. <https://doi.org/10.3390/cryst12010096>, 1996.

Pramono, Agus, Lembit Kommel, Lauri Kollo dan Renno Veinthal. 2016. The Aluminum Based Composite Produced by Self Propagating High Temperature Synthesis. *Materials Science*. Vol 22 (1). 41-43.