

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

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Andri Sihotang

3334190084

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

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

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

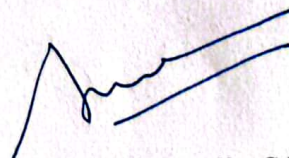
Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T. Ph.D.
NIP: 197608182008011012

Pembimbing II



Anistasia Milandia, S.T., M.T.
NIP: 198203222006042002

LEMBAR PERSETUJUAN

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

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh :

Andri Sihotang

3334190084

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 22 September
2023

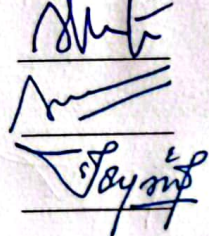
Susunan Dewan Penguji

Ketua Sidang/ Penguji I: Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T. Ph.D

Penguji II : Anistasia Milandia, S.T., M.T.

Penguji III : Suryana, S.T., M.Si.

Tanda Tangan



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



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

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Simulasi Proses *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* (SIS) Untuk Mengetahui Perilaku Reaksi Eksotermis.

Nama Mahasiswa : Andri Sihotang

NIM : 3334190084

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 4 Oktober 2023



ANDRI SIHOTANG
3334190084

ABSTRAK

Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis (SIS) adalah metode proses yang memanfaatkan reaksi eksotermik dengan penambahan tekanan untuk memulai dan mempertahankan pembakaran komponen sehingga dapat menghasilkan nilai porositas yang rendah serta kekerasan yang tinggi. Fenomena perpindahan panas perlu diketahui karena SIS mempunyai kelemahan yaitu tingginya tingkat eksotermik dan laju pembakaran yang sangat cepat dan memerlukan tingkat kontrol yang tinggi. Selain itu, penekanan atau kompaksi perlu dilakukan karena pada metode SIS diharapkan hasil distribusi kerapatan partikel yang homogen. Pada penelitian berfokus untuk mendapatkan temperatur dan waktu yang paling efektif untuk dilakukannya proses pemanasan metode SIS dengan menggunakan *software* ANSYS 2022 R2 berbasis *finite element analysis* untuk mengetahui temperatur dan *heat flux* selama proses pemanasan, menggunakan *software* HSC untuk mengetahui entalpi reaksi eksotermik pembentukan *spinel* (MgAl_2O_4), dan *software chem draw* untuk mengetahui ikatan kimia yang terbentuk pada produk SIS. Simulasi penekanan yang terjadi menggunakan tekanan 166 MPa, 171 MPa, dan 176 MPa dengan waktu 300 detik dan menghasilkan pengaruh terhadap *normal stress*. Simulasi perpindahan panas yang terjadi menggunakan temperatur 750 °C, 850 °C, dan 950 °C dengan waktu proses masing-masing temperatur yaitu 1 jam, 2 jam, dan 3 jam dan menghasilkan pengaruh terhadap *heat flux* dan distribusi temperatur. Sampel yang diberikan tekanan 176 MPa menghasilkan *normal stress* tertinggi yaitu sebesar -144,97 MPa. Sampel yang diproses dalam temperatur 750 °C dengan waktu 3 jam menghasilkan *heat flux* paling rendah di antara variasi temperatur dan waktu proses yang lain yaitu sebesar 0,000016722 W/m² serta distribusi temperatur maksimalnya sebesar 750 °C.

Kata Kunci: *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis*, reaksi eksotermik, simulasi penekanan, perpindahan panas, *heat flux*.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “Simulasi Proses *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* (SIS) Untuk Mengetahui Perilaku Reaksi Eksotermis”. Penyusunan laporan ini dilaksanakan untuk memenuhi persyaratan kelulusan sebagai sarjana Teknik Metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Adhitya Trenggono, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi sekaligus Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT. Untirta.
2. Bapak Prof. Ir. Agus Pramono, S.T., M.T. Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Penelitian hingga penyelesaian Skripsi ini
3. Ibu Anistasia Milandia, ST., MT. selaku Pembimbing II skripsi.
4. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. Selaku Dosen Wali di Jurusan Teknik Metalurgi FT. Untirta.
5. Kedua Orang Tua, adik, serta keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan semangat kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam laporan skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak diharapkan. Penulis berharap agar laporan skripsi ini bermanfaat khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Cilegon, 4 oktober 2023

Andri Sihotang

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	I
LEMBAR PENGESAHAN	II
LEMBAR PERSETUJUAN	III
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	IV
ABSTRAK	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR TABEL	VIII
DAFTAR GAMBAR	IX
Bab I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
Bab II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis (SIS)</i>	6
2.1.1 Proses SIS.....	6
2.1.2 Reaksi SIS	8
2.1.3 Aplikasi SIS	9
2.2 <i>Heat Transfer</i>	10

2.4.1	Konduksi.....	11
2.4.2	Konveksi.....	12
2.4.3	Mekanisme Transfer Panas pada Benda Plat.....	15
2.3	<i>Finite Element Analysis</i>	17
2.4	ANSYS	20
2.5	<i>Thermal Analysis</i>	21
2.6	<i>Material Properties</i>	23
Bab III METODE PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir Simulasi.....	30
3.1.1	Diagram Alir Simulasi Penekanan.....	30
3.1.2	Diagram Alir Simulasi Pemanasan	32
3.2	Alat Penelitian	33
3.3	Prosedur Percobaan	34
3.3.1	Prosedur Simulasi Penekanan	34
3.3.2	Prosedur Simulasi Pemanasan	35
Bab IV Hasil dan Pembahasan		
4.1	Analisa Hasil Tekanan pada Proses SIS.....	43
4.2	Analisa Hasil Temperatur dan Waktu pada Proses SIS	47
4.2.1	Analisa Hasil Simulasi Distribusi Temperatur Variasi Temperatur dan Waktu pada Proses SIS.....	48
4.2.2	Analisa Hasil Distribusi <i>Heat Flux</i>	59
4.2.3	Pengaruh ΔG Terhadap Reaksi dan Pembentukan.....	73
BAB V Kesimpulan dan Saran		
5.1	Kesimpulan	82

5.2 Saran.....	83
----------------	----

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

A. Contoh Perhitungan	88
B. Data Hasil Penelitian	96
C. Gambar Alat dan Bahan	111

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Sifat dan Karakteristik $MgAl_2O_4$	10
Tabel 2.2 Nilai koefisien perpindahan panas film Coefficient pada Fluida	14
Tabel 2.3 Nilai <i>Thermal Conductivity</i> material.....	22
Tabel 2.4 Nilai <i>modulus elastisitas</i> dan jaringan keras HA	24
Tabel 2.5 <i>Properties Aluminium</i>	25
Tabel 2.6 Titanium	26
Tabel 2.7 Magnesium	27
Tabel 3.1 Data penekanan material	28
Tabel 3.2 Data Thermal Material Perpindahan Panas	30
Tabel 4.1 Data Hasil Penekanan.....	40
Tabel 4.2 Data Temperatur Minimum dan Maksimum.....	41
Tabel 4.3 Data <i>Heat Flux</i> Minimum	52
Tabel 4.4 Data <i>Heat Flux</i> Maksimum	54
Tabel 4.5 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan Al_2O_3	65
Tabel 4.6 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan MgO.....	67
Tabel 4.7 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan $MgAl_2O_4$	69
Tabel B.1 Data hasil Penekanan.....	87

Tabel B.2 Data Perubahan Temperatur dan <i>Heat flux</i> dengan temperatur	
Pemanasan 750°C	87
Tabel B.3 Data Perubahan Temperatur dan <i>Heat flux</i> dengan temperatur	
Pemanasan 850°C	88
Tabel B.4 Data Perubahan Temperatur dan <i>Heat flux</i> dengan temperatur	
Pemanasan 950°C	88
Tabel B.5 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi	
Pembentukan Al ₂ O ₃	89
Tabel B.5 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi	
Pembentukan MgO.....	89
Tabel B.6 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi	
Pembentukan MgAl ₂ O ₄	90

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Proses <i>Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis</i> (SIS).	7
Gambar 2.2 Diagram Ellingham.....	8
Gambar 2.3 Perpindahan Panas Konduksi.	11
Gambar 2.4 <i>Convection heat transfer processes</i>	13
Gambar 2.5 <i>Transient Temperatur distributions</i>	16
Gambar 2.6 Proses <i>Meshing</i>	20
Gambar 2.7 <i>Thermal analysis</i> pada <i>Temperature distribution</i>	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Simulasi Penekanan.....	31
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi Pemanasan.....	33
Gambar 4.1 <i>Normal Stress</i> pada Tekanan a) 166MPa; b) 171MPa; c) 176MPa..	37
Gambar 4.2 Grafik <i>Normal Stress</i> terhadap waktu dan geometri.....	39
Gambar 4.3 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 750°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	44
Gambar 4.4 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	47
Gambar 4.5 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 950°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	50
Gambar 4.6 Distribusi <i>Heat Flux</i> dengan Pemanasan 750°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	55

Gambar 4.7 Distribusi <i>Heat Flux</i> dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	57
Gambar 4.8 Distribusi <i>Heat Flux</i> dengan Pemanasan 950°C pada Waktu a) 3600 detik, b) 7200 detik, dan c) 10800 detik.....	60
Gambar 4.9 Grafik <i>Heat Flux</i> Minimum terhadap Temperatur dan Waktu.....	61
Gambar 4.10 Grafik <i>Heat Flux</i> maksimum terhadap Temperatur dan Waktu	62
Gambar 4.11 Struktur Kimia Hidroksiapatit	64
Gambar 4.12 Struktur Kimia Reaksi Pembentukan Al_2O_3	65
Gambar 4.13 Grafik Pembentukan Al_2O_3 dengan temperatur terhadap ΔG	66
Gambar 4.14 Struktur Kimia Reaksi Pembentukan MgO	67
Gambar 4.15 Grafik Pembentukan MgO dengan temperatur terhadap ΔG	68
Gambar 4.16 Struktur Kimia Reaksi Pembentukan $MgAl_2O_4$	69
Gambar 4.17 Grafik Pembentukan $MgAl_2O_4$ dengan temperatur terhadap ΔG ..	70
Gambar 4.18 Verifikasi XRD Hasil SIS.....	71
Gambar B.1 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 750°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik	90
Gambar B.2 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik	93
Gambar B.3 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 950°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik	94
Gambar B.4 Distribusi <i>Heat Flux</i> dengan Pemanasan 750°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	95

Gambar B.5 Distribusi <i>Heat Flux</i> dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik.....	96
Gambar B.6 Distribusi <i>Heat Flux</i> dengan Pemanasan 950°C pada Waktu d) 3600 detik, b) 7200 detik, dan c) 10800 detik.....	97
Gambar B.7 <i>Normal Stress</i> pada Tekanan a)166MPa; b)171MPa; c)176MPa	98
Gambar B.8 Hasil Struktur Kimia dari Chem Draw	99
Gambar B.9 Ikatan Atom Hidroksiapatit.....	99
Gambar B.10 Ikatan Atom Aluminium (III) Oxide.....	100
Gambar B.11 Ikatan Atom Magnesium Oxide	101
Gambar B.12 Ikatan Atom Titanium Oxide	101
Gambar B.13 Ikatan Atom Magnesium Aluminate (Spinel).....	102
Gambar B.14 Ikatan Atom Magnesium Hydride.....	102
Gambar C.1 Laptop	104
Gambar C.2 Computer	104

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

1.5 Sistematis Penulisan

Sistematika penulisan laporan ini terdiri dari lima bab. Bab I berisi latar belakang mengapa proses *self-propagating intermediate temperature syntesis* (SIS) untuk material alumunium, hidroksiapatit, magnesium dan titanium memerlukan simulasi proses yang tepat, tujuan, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian dan sistematis penulisan. Bab II berisi tinjauan pustaka, meliputi teori yang mendukung mengenai *self-propagating intermediate-temperature synthesis* (SIS), termodinamika reaksi pembentukan MgAl_2O_4 , *heat transfer*, *finite element analysis*, ANSYS, *properties material*. Bab III berisi metode simulasi yang digunakan dalam penelitian yang terdiri dari algoritma simulasi, alat dan bahan yang digunakan selama proses penelitian. Bab IV menyajikan data hasil penelitian simulasi dengan data tersebut fenomena apa saja yang terjadi dan memverifikasikannya dengan data pengujian sebenarnya. Bab V berisi kesimpulan

yang menjawab tujuan. Pada skripsi ini juga terdapat daftar pustaka yang berisi referensi-referensi, serta terdapat lampiran yang berisi contoh perhitungan, data hasil penelitian, dan alat yang digunakan.

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).

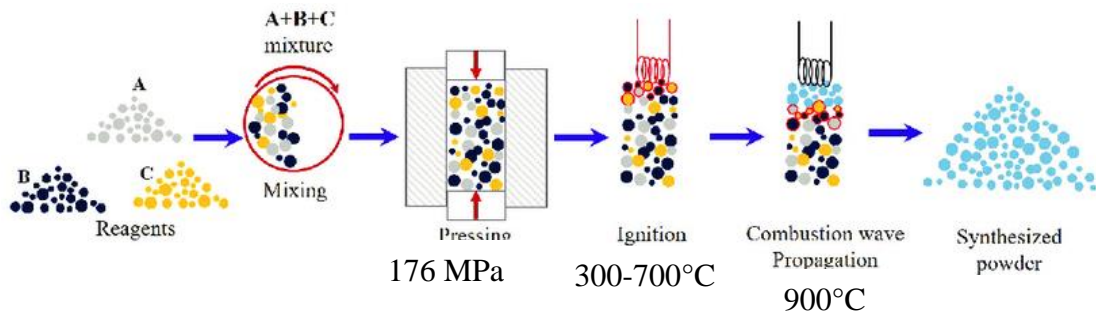
Metode SIS yang banyak dikembangkan saat ini adalah *SIS powder*, *SIS sintering*, SIS kompaksi, SIS metalurgi, *SIS welding*, dan *gas transport SIS coating*. Metode SIS yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kombinasi dari SIS sintering dan SIS kompaksi. SIS sintering adalah proses pemanasan 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).

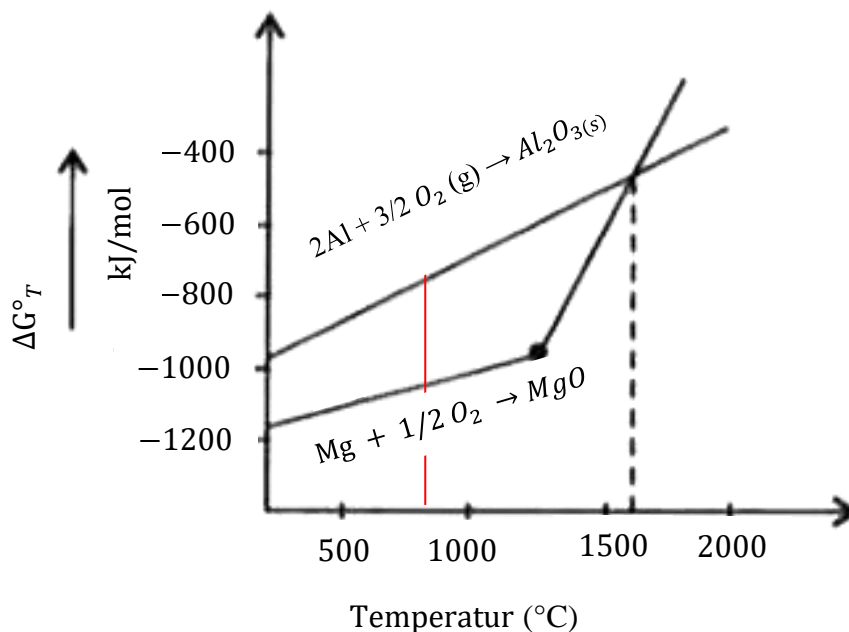


Gambar 2.2 Proses *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* (SIS)

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).



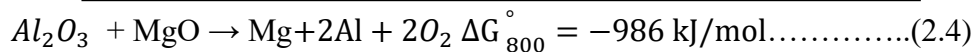
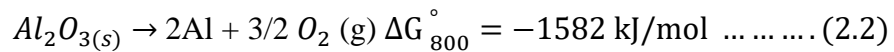
Gambar 2.2 Diagram Ellingham. (Geiger, 1973)

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*

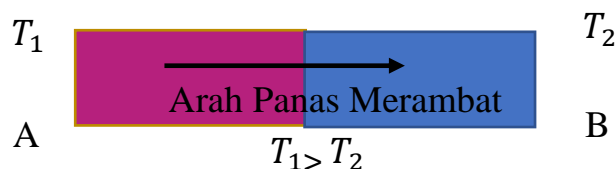
Panas merupakan energi yang dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari dan banyak digunakan pada suatu pekerjaan atau kegiatan. Panas cenderung memiliki sifat dinamis serta berpindah-pindah dan akan mengalami perpindahan karena adanya perbedaan temperatur pada suatu objek atau daerah.

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 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 perantaraannya. 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)

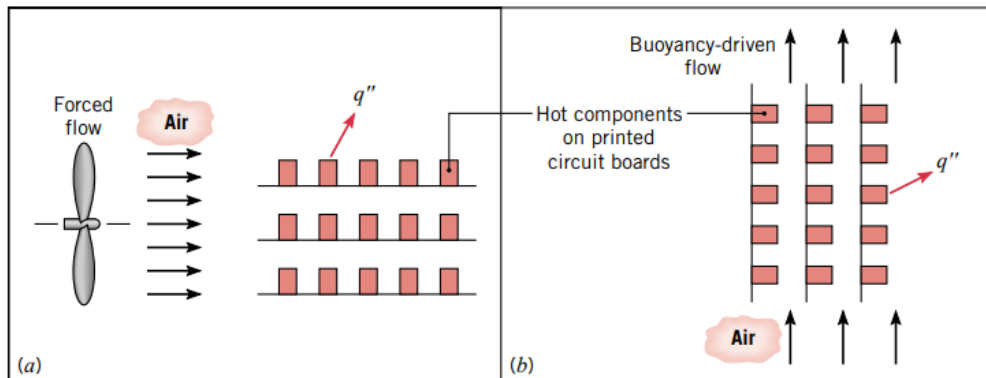
h_c = koefisien konveksi

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

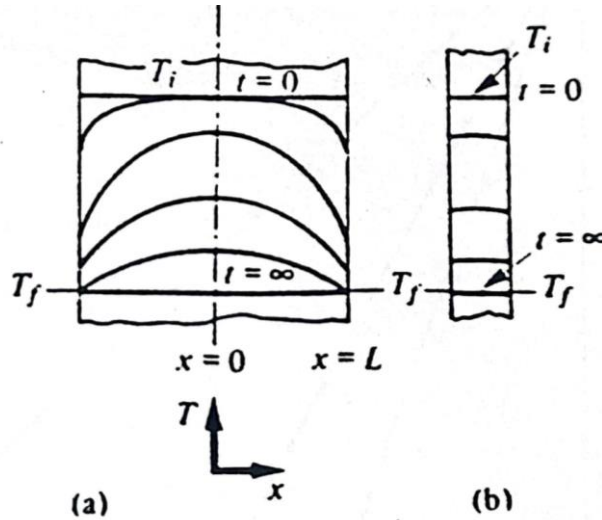
Fluida	<i>Film Coefficient</i> (W/m ² K)
Gas (diam)	15
Gas (mengalir)	15 – 250
Liquid air (diam)	100
Liquid air(mengalir)	100 – 2000
Liquid mendidih	2000 – 35.000
Uap air	2000 – 25.000

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 *transient 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).

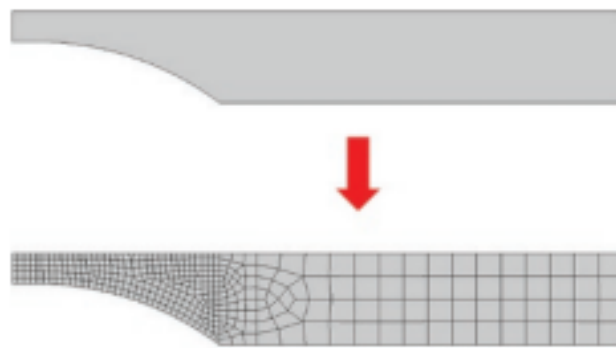
$$[K]_e \{\delta\}_e = \{F\}_e \dots \dots \dots (2.12)$$

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.

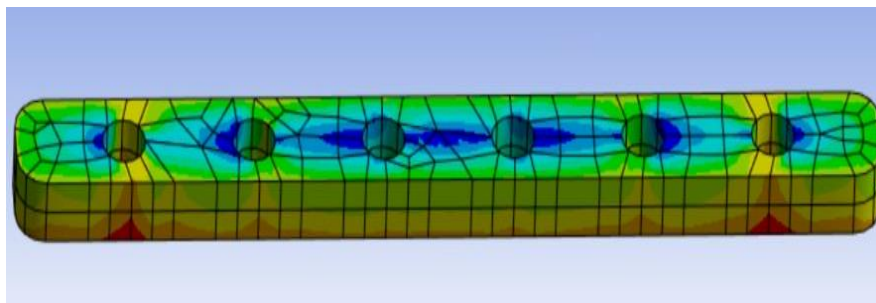
Dalam bidang metalurgi ANSYS digunakan untuk simulasi proses baik untuk fluida maupun simulasi tegangan pada struktur pada bangunan sampai pada proses manufaktur seperti pengecoran logam dan pengelasan berikut adalah pengoprasian yang ada pada ANSYS (Chen, & Liu, 2019). ANSYS bertujuan permodelan FEA 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 (at atmospheric pressure)

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 elastis 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.

BAB III

Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir

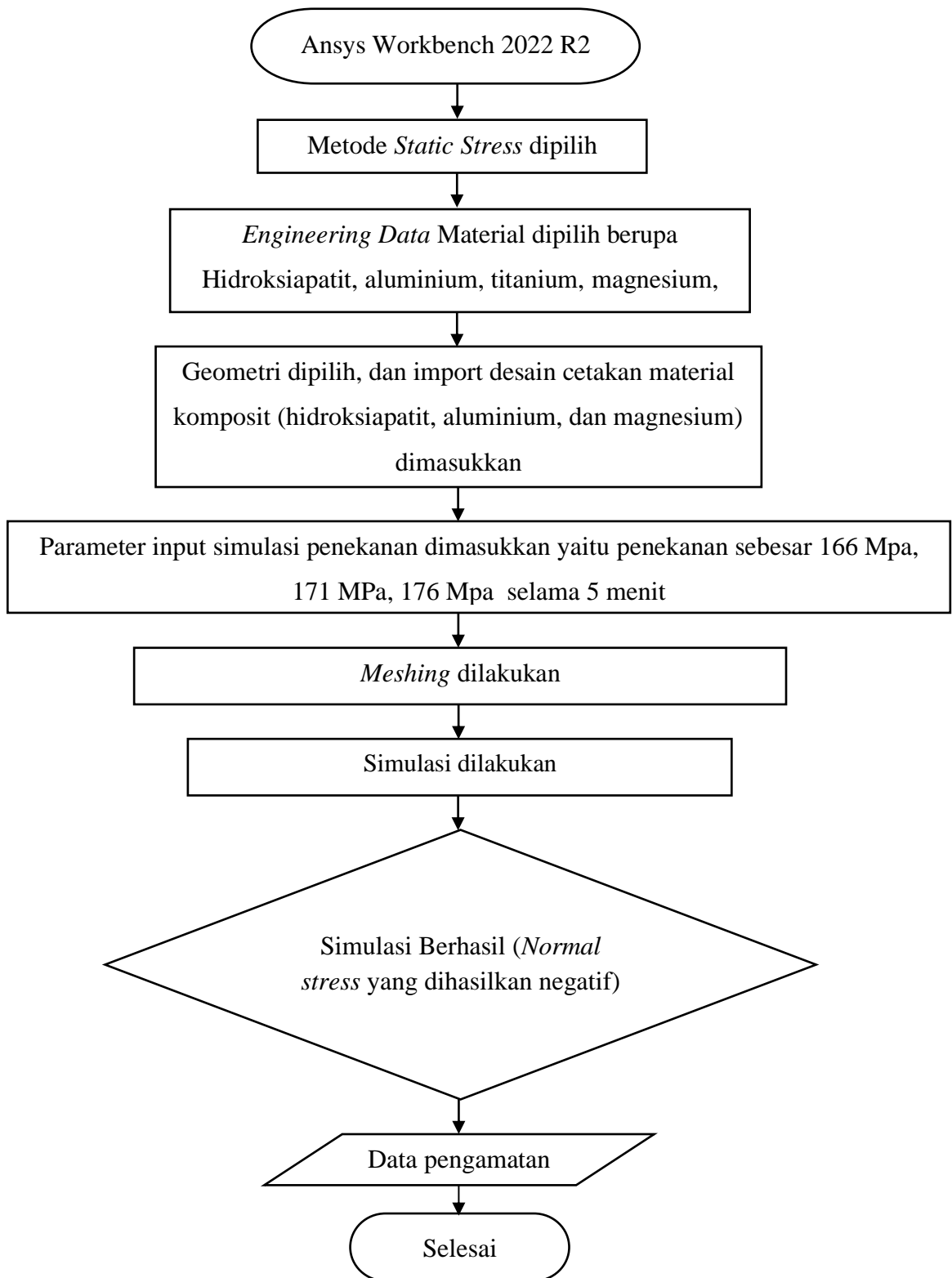
Diagram alir penelitian ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu diagram alir simulasi dan diagram alir verifikasi penelitian. Diagram alir simulasi terdiri dari diagram alir simulasi pemanasan dan diagram alir simulasi penekanaan.

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



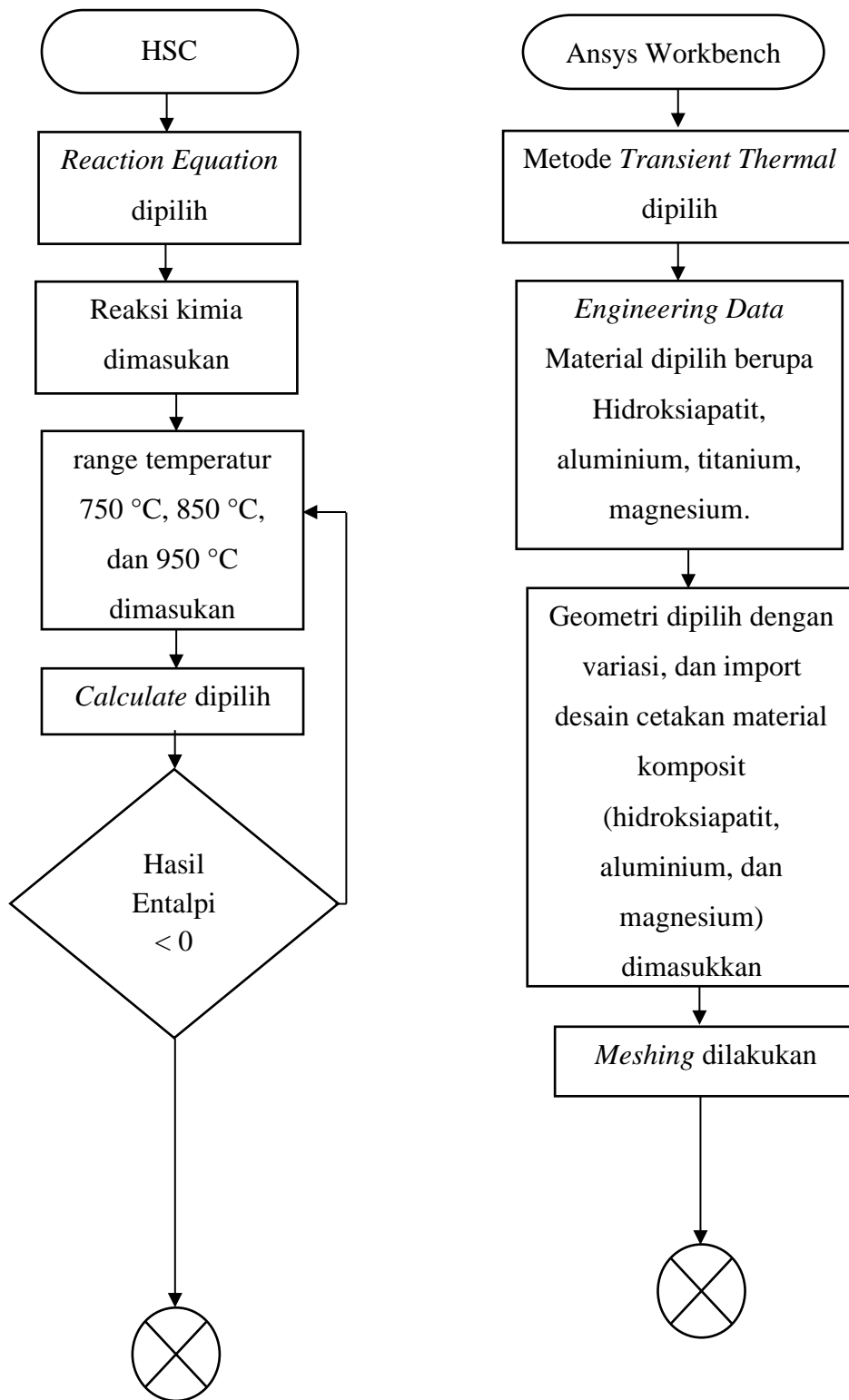
Gambar 3.1 Diagram alir Simulasi Penekanan

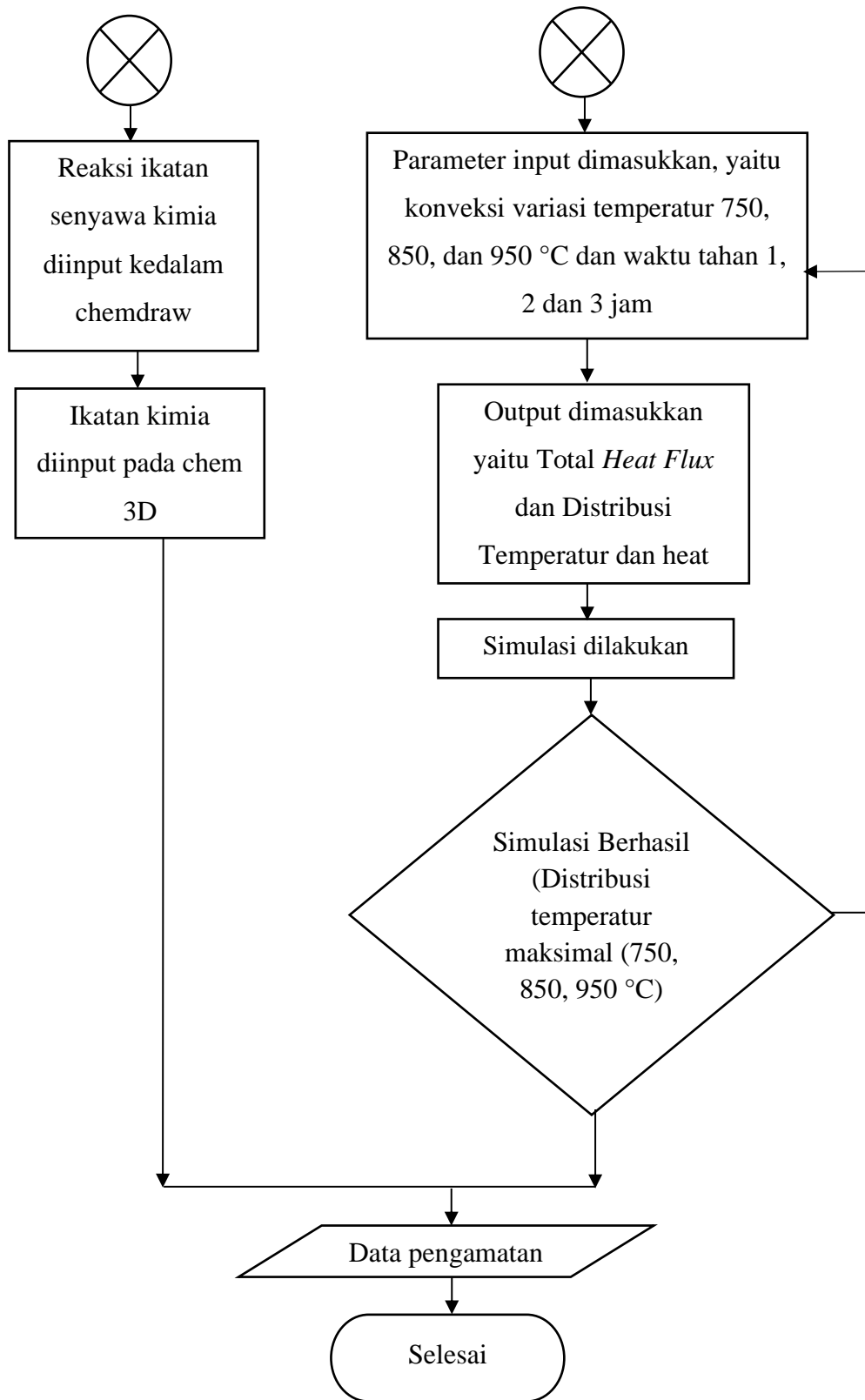
3.1.2 Diagram Alir Simulasi Pemanasan

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

3.2 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan untuk simulasi ini sebagai berikut:

1. Laptop

Spesifikasi laptop yang digunakan dalam simulasi ini adalah :

- a) *Processor* : Intel Core Intel Core i5-8250U (1.6GHz; 6M Cache; up to 3.4 GHz) processor yang sesuai untuk menggunakan berbagai macam *software* desain 3D CAD dan simulasi yang akan menghasilkan grafik desain dengan kualitas baik.
- b) Memori : RAM 16 GB memudahkan proses meshing dan mempercepat proses run solving simulation.
- c) *Storage* : SSD 256GB atau 512GB PCIe NVMe memudahkan dan mempercepat proses pemindahan data *simulation*.

2. Software

- ANSYS 2022 Ver R2

Software ANSYS yang sudah terinstal pada laptop adalah ANSYS 2022 yang di dalamnya terdapat mechanical APDL 2022 dan Workbench 2022, yang berfungsi sebagai analisa simulasi dalam penelitian ini.

- AutoCAD 2021 Ver 24.0

Software AutoCAD yang sudah terinstal pada laptop adalah AutoCAD 2021 Ver 24.064 bit yang di dalamnya terdapat sketch gambar 3D yang fungsinya adalah sebagai konsep untuk menggambar spesimen.

- CES Edupack 2019

Software CES Edupack yang sudah terinstal pada laptop adalah CES Edupack 2019 64 bit yang di dalamnya terdapat *material propertis* dan price yang fungsinya adalah sebagai konsep untuk *material propertis* spesimen.

- Chemdraw

Software chemdraw yang sudah terinstal pada laptop adalah chemdraw 64 bit yang di dalamnya terdapat struktur kristal dan ikatannya yang fungsinya adalah sebagai konsep untuk menggambar ikatan kimia.

- HSC

Software HSC yang sudah terinstal pada laptop adalah HSC Chemistry 7.0 64 bit yang di dalamnya terdapat berbagai proses kimia dan lakukan perhitungan pemrosesan termodinamika dan mineral yang fungsinya adalah sebagai perhitungan aspek termodinamika.

3. Material Properties

- Hidroksiapatit
- Alumunium
- Magnesium
- Titanium

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur yang akan dilakukan pada penelitian ini terdiri dari simulasi penekanan dan simulasi pemanasan

3.3.1 Prosedur simulasi penekanan

1. Memilih modul *Static Stress Structural*
2. Double klik Engineering Data pada *Static Stress* yang dibuat lalu masukkan data material yang digunakan (Hidroksiapatit, Alumunium, Magnesium, dan Titanium).
3. Double klik Geometry, buat geometri bentuk plate dengan dimensi panjang 15 cm, lebar 1,5 cm dan tinggi 0,8 cm dengan volume 18 cm^3 dan variasi geometri lainnya.
4. Data parameter simulasi penekanan dimasukkan yaitu penekanan dimasukkan yaitu penekanan sebesar 171 MPa selama 5 menit.
5. Melakukan proses *Meshing*.
6. Data parameter simulasi penekanan dimasukkan yaitu penekanan dimasukkan yaitu penekanan sebesar 166, 171, 176 MPa selama 5 menit
7. Proses simulasi dilakukan

8. Output hasil simulasi diperoleh berupa *normal stress* dan *total deformation* pada proses penekan atau kompaksi
9. Jika output yang dihasilkan tidak sesuai atau tidak berhasil yaitu *normal stress* yang dihasilkan tidak negatif (-) sehingga menandakan tidak terjadi compressive stress, maka kembali ke langkah 5.

3.3.2 Prosedur Simulasi Pemanasan

1. Memulai *software* HSC
2. Memilih *Reaction Equation*
3. Memasukan Reaksi Kimia
4. Masukan temperatur yang diinginkan
5. Memilih *calculate*
6. Data output hasil Entalpi < 0 diperoleh.
7. Menginput reaksi ikatan senyawa kimia kedalam chemdraw
8. Menginput ikatan kimia pada chem 3D
9. Memulai *software* ANSYS Workbench.
10. Memilih modul *Transient Thermal*.
11. Double klik *Engineering Data* pada modul *Transient Thermal* yang dibuat lalu masukkan data material yang digunakan (Hidroksiapatit, Alumunium, Magnesium, dan Titanium).
12. Double klik *Geometry*, buat geometri bentuk plat dengan dimensi panjang 15 cm, lebar 1,5 cm dan tinggi 0,8 cm dengan volume 18 cm^3 dan variasi geometri.
13. Melakukan proses *Meshing*.
14. Memasukan data parameter input material spesimen komposit, material pendukung hidroksiapatit, alumunium, magnesium, dan titanium temperatur konveksi $750 \text{ }^\circ\text{C}$, $850 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $950 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1, 2 dan 3 jam.
15. Memasukan parameter output yang diinginkan berupa distribusi temperatur dan *heat flux*, kemudian *solving*.
16. Data output *heat flux*, dan distribusi temperatur diperoleh.

17. Jika output yang dihasilkan tidak sesuai atau tidak berhasil yaitu Distribusi temperatur maksimal (750, 850, 950 °C), maka kembali ke langkah 14.
18. Diperoleh data temperatur dan waktu reaksi eksotermik berlangsung

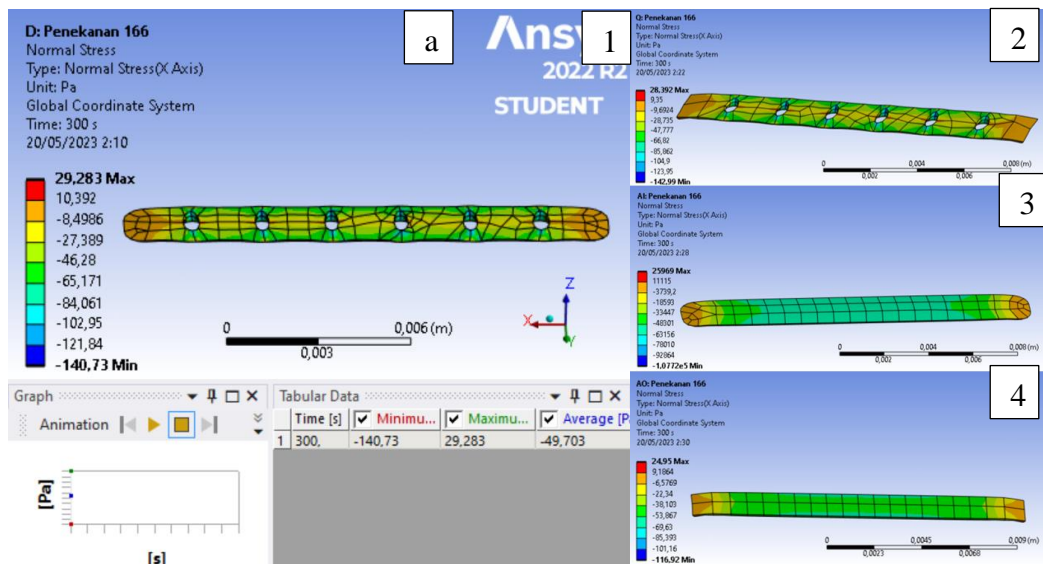
Bab IV

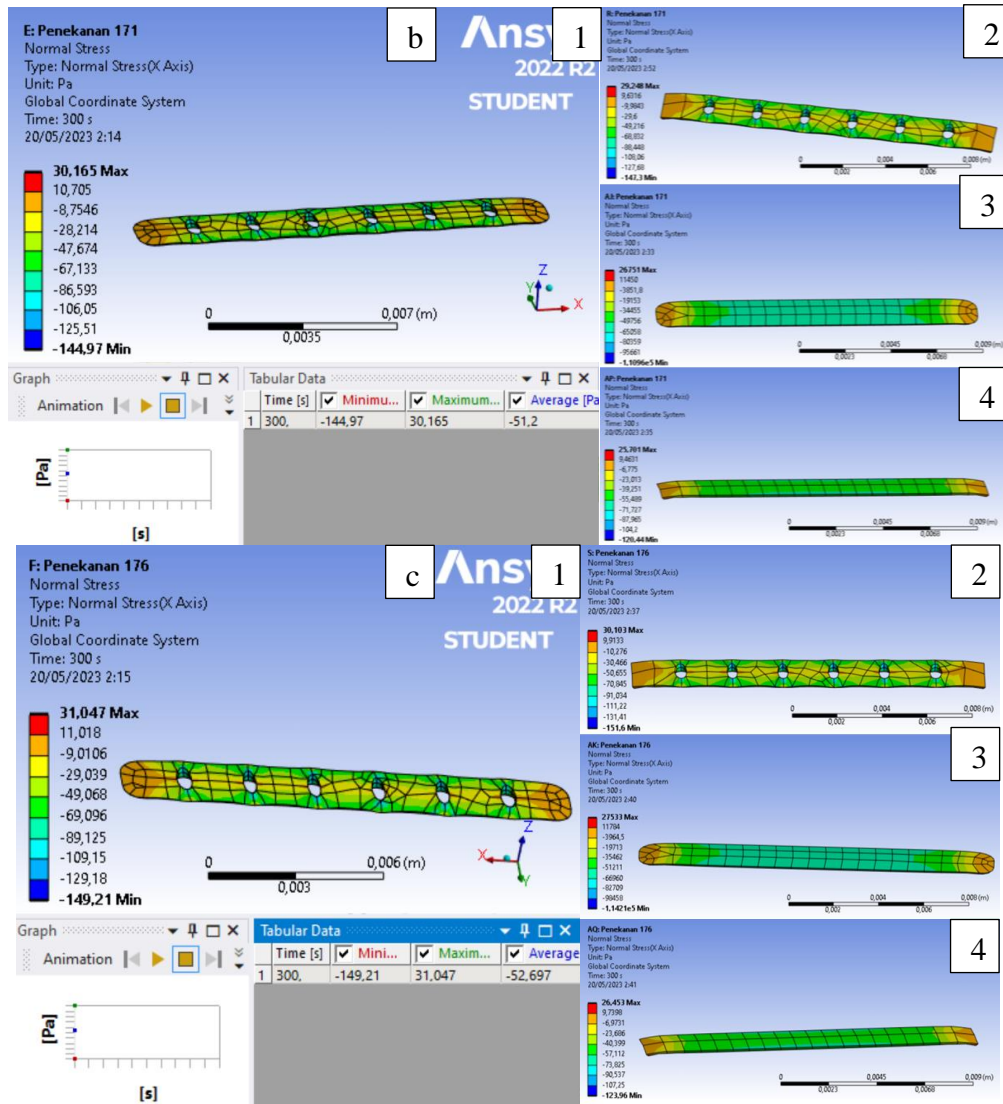
Hasil Dan Pembahasan

4.1 Analisa Hasil Tekanan pada Proses SIS

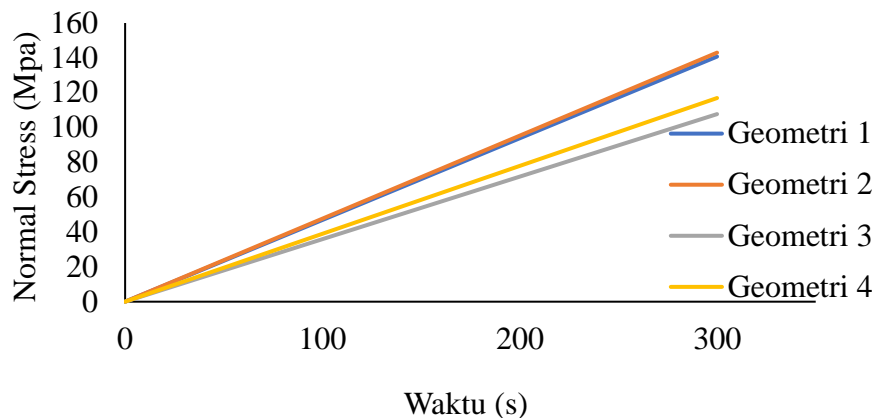
Pada penelitian simulasi penekanan atau kompaksi ini menggunakan *software Ansys 2022 R2* dengan metode *static stress*. Metode *static stress* dipakai karena dalam proses terjadinya penekanan, beban yang diberikan tetap (tidak berubah secara tiba-tiba) dan juga dalam waktu yang tetap. Proses simulasi 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 pemadatan 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	$2,4 \times 10^{-9}$
	171	26,22	$2,3 \times 10^{-9}$
	176	24,3	$2,2 \times 10^{-9}$
2	166	30,1	$2,5 \times 10^{-9}$
	171	28,4	$2,4 \times 10^{-9}$
	176	26,5	$2,3 \times 10^{-9}$
3	166	28	$2,44 \times 10^{-9}$
	171	27	$2,37 \times 10^{-9}$
	176	25	$2,3 \times 10^{-9}$
4	166	26,45	$2,53 \times 10^{-9}$
	171	25,70	$2,46 \times 10^{-9}$
	176	24,95	$2,2 \times 10^{-9}$

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.

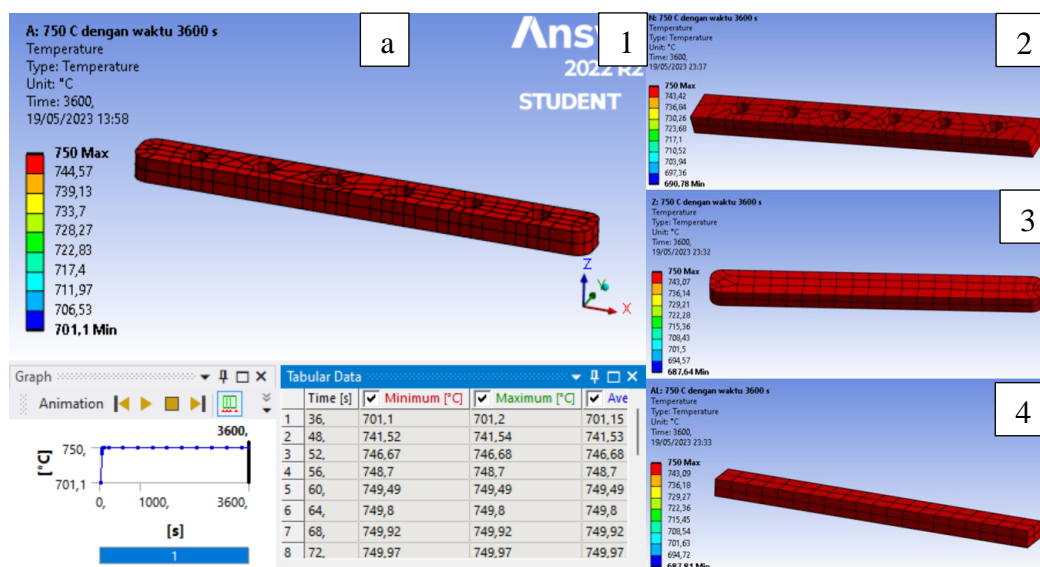
Dari hasil simulasi pada variasi waktu 7200 detik keempat geometri masih belum tercapai temperatur maksimum sehingga masih terjadi peningkatan temperatur yang akhirnya akan diperoleh temperatur maksimum pada waktu 10800 detik. Pada waktu 10800 detik hasil temperatur maksimumnya paling mendekati variasi 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.

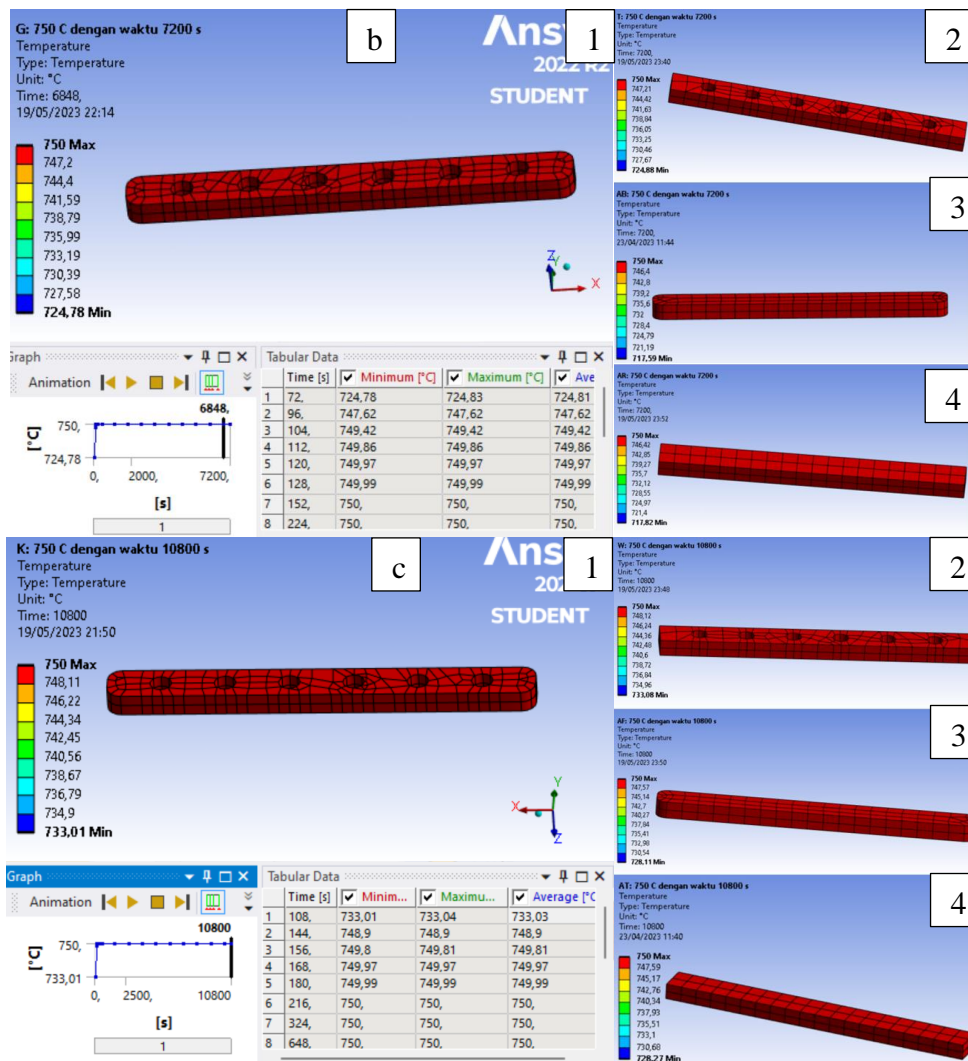
Pada hasil distribusi temperatur pada sampel dengan variasi geometri nilai minimum dan maksimumnya cukup tinggi pada geometri 1 secara keseluruhan dan hanya terpaut tipis pada perbedaannya. Dan untuk seluruh geometri terjadi peningkatan yang tidak jauh beda dari geometri lain. Perbedaan geometri berpengaruh 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 temperatur 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 temperatur 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

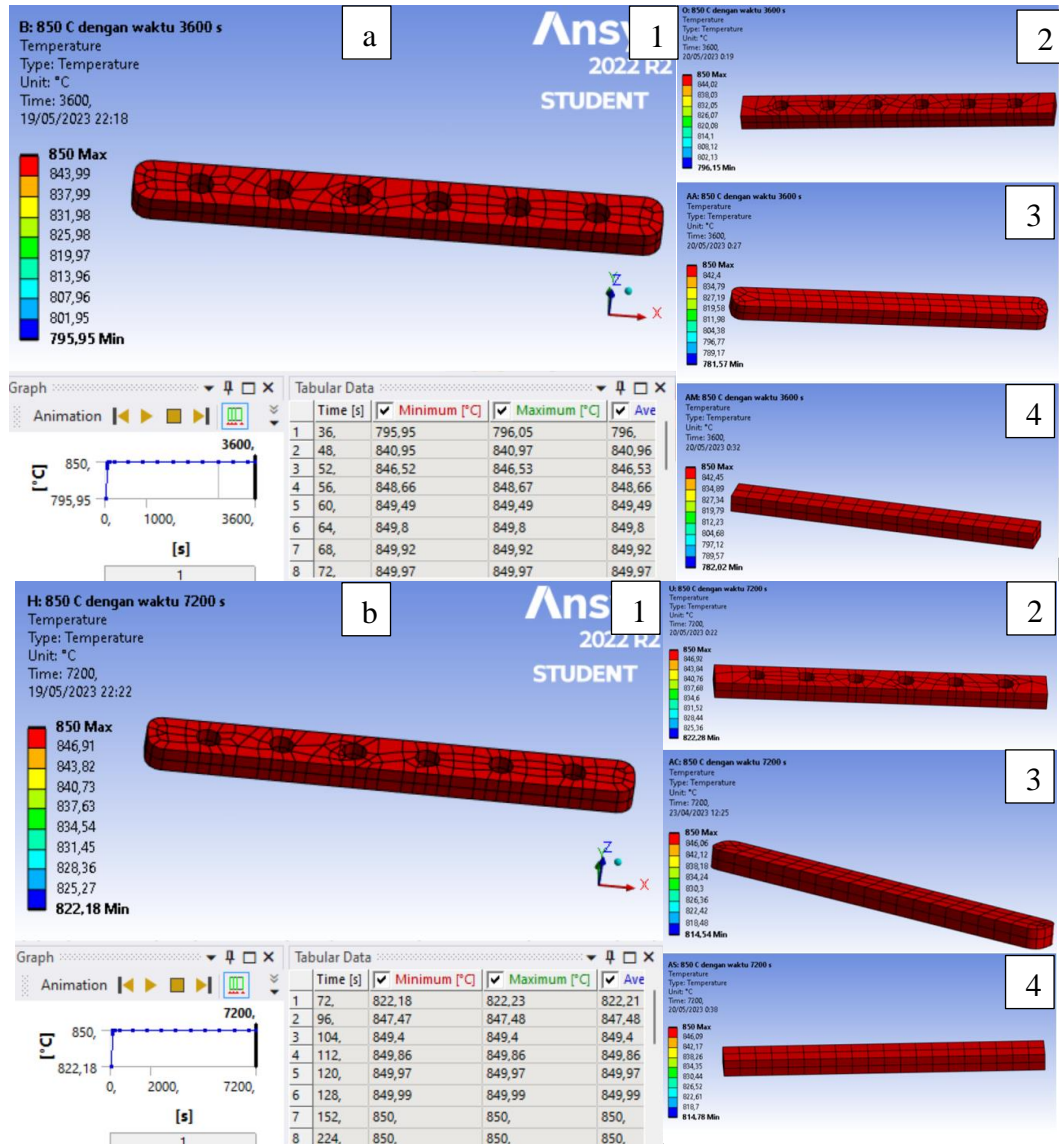
0,24°C. sedangkan selisih pemanasan minimum dan maksimum pada bagian c sebesar 0°C, 0,06°C, 0,11°C, dan 0,22°C.

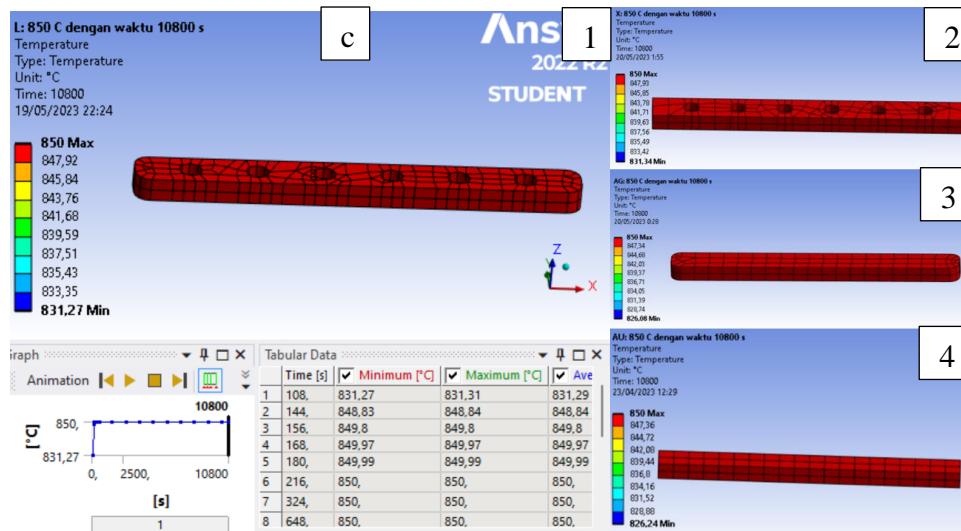
Data yang didapatkan dengan perbedaan sampel geometri menunjukkan terjadinya fenomena perpindahan panas yang menunjukkan terjadinya perbedaan dari sampel yang ada dan geometri 1 mendominasi perpindahan panas lebih besar dari pada geometri 2, 3 dan 4. Selain itu perbedaan selisih temperatur setiap setengah 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; 3) geometri 3; 4) geometri 4

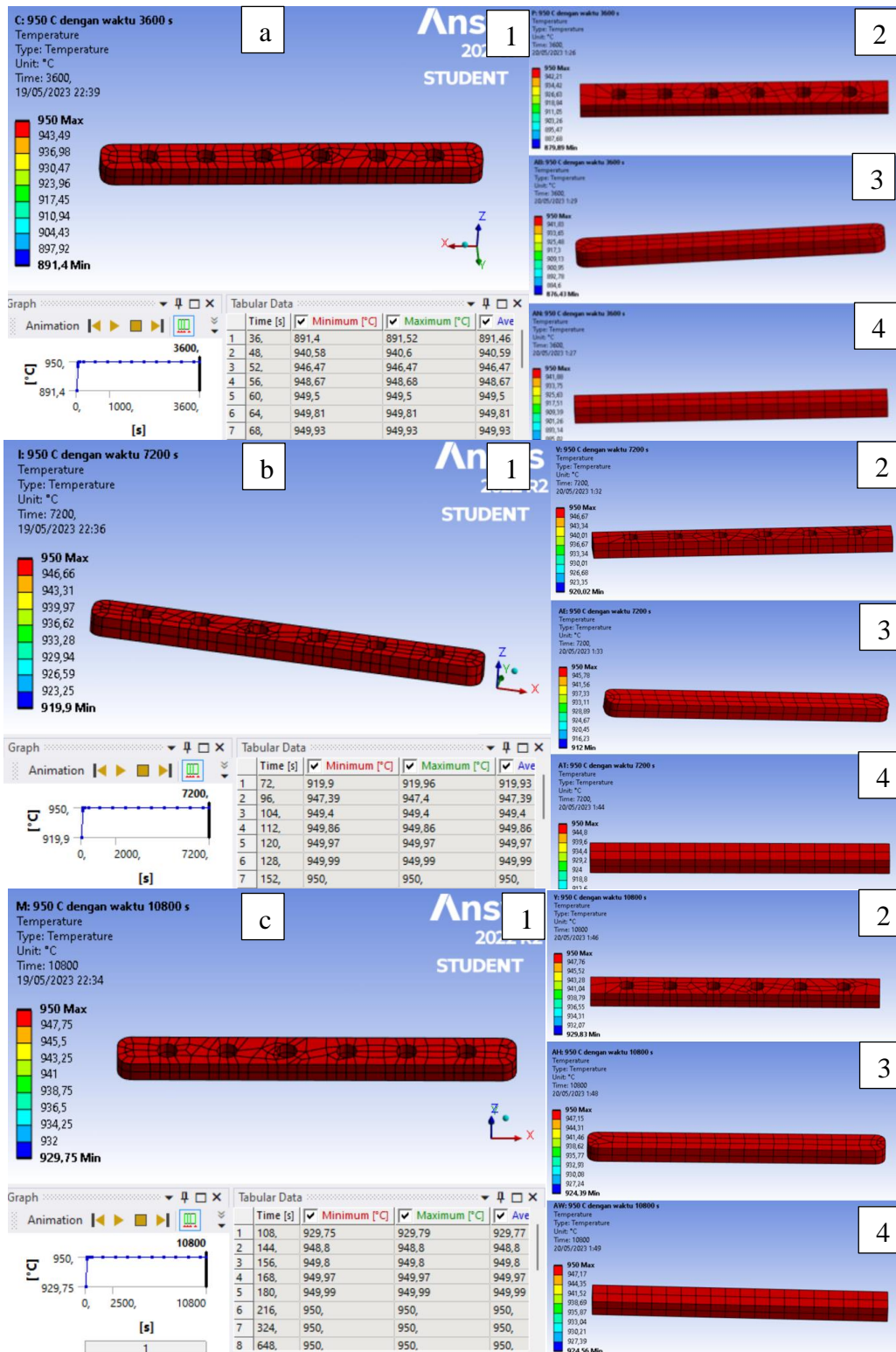
Dari Gambar 4.3 dapat dilihat distribusi temperatur pada waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan temperatur pemanasan sebesar 850°C dan geometri 1, 2, 3 dan 4. Pada gambar a, b dan c menggunakan variasi sampel geometri 1, 2,3 dan 4. Pada bagian a adalah pemanasan pada temperatur 850°C dengan variasi 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> s 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/m², sedangkan pada waktu 7200 detik dengan *heat flux* minimum sebesar 0,000016793, 0,0000186, dan 0,00002027 W/m² dan pada waktu 10800 detik didapatkan hasil temperatur minimum sebesar 0,000016722, 0,00001823, dan 0,0001972 W/m².

Dari hasil penelitian didapatkan hasil *heat flux* tertinggi sebesar 0,000021067 W/m² 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/m². 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.

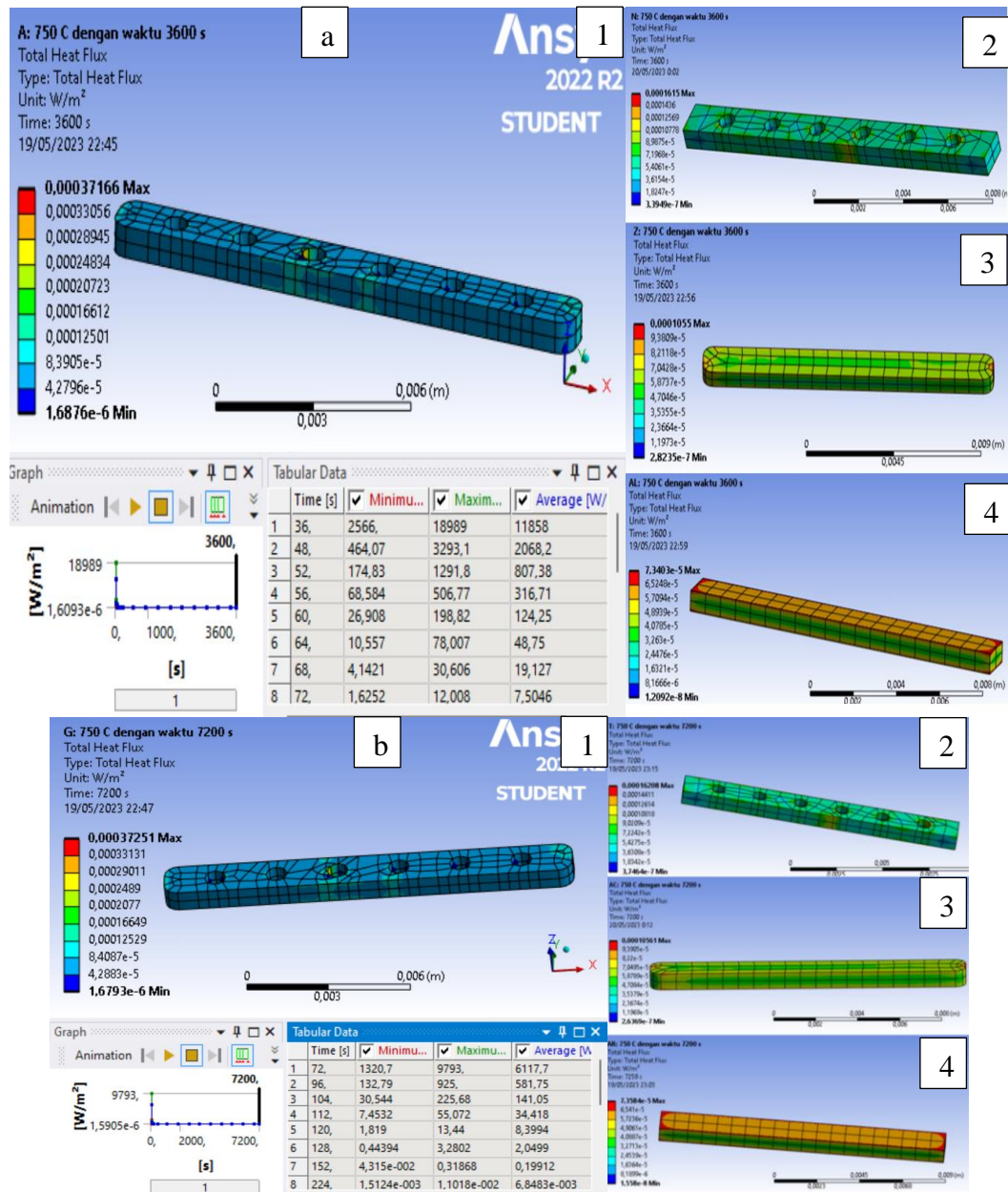
Tabel 4.4 Data *Heat Flux* Maksimum Sampel Variasi Temperatur dan Waktu Pemanasan

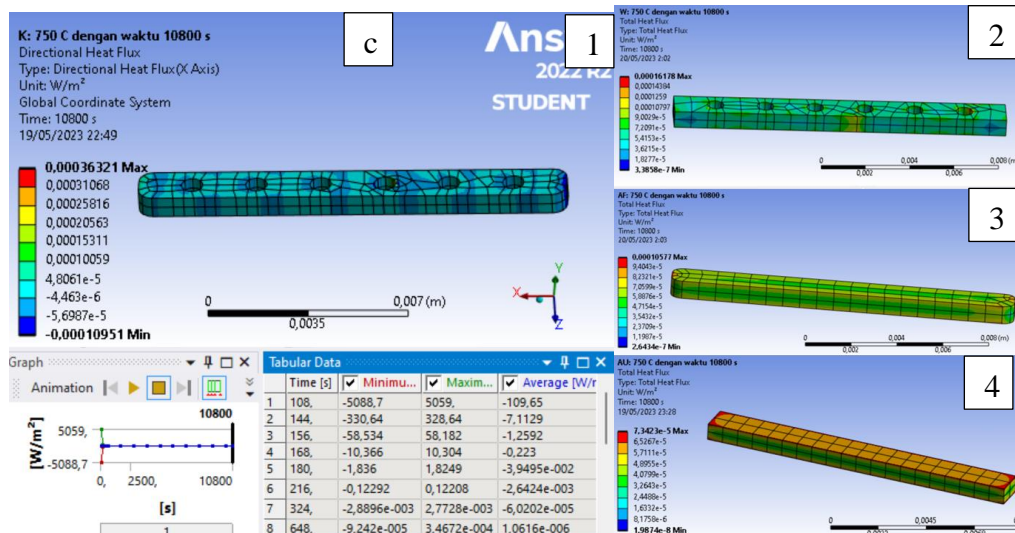
Geometri	Waktu (Detik)	<i>Heat fluks</i> Maksimum (W/m^2)		
		750°C	850°C	950°C
1	3600	20986	18986	22742
	7200	9793	10801	11681
	10800	6597	7271	7857
2	3600	29186	22449	34538
	7200	12109	13247	14195
	10800	8936	9769	10462
3	3600	23299	25139	27483
	7200	12109	13247	14195
	10800	8179	8939	9566
4	3600	25574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





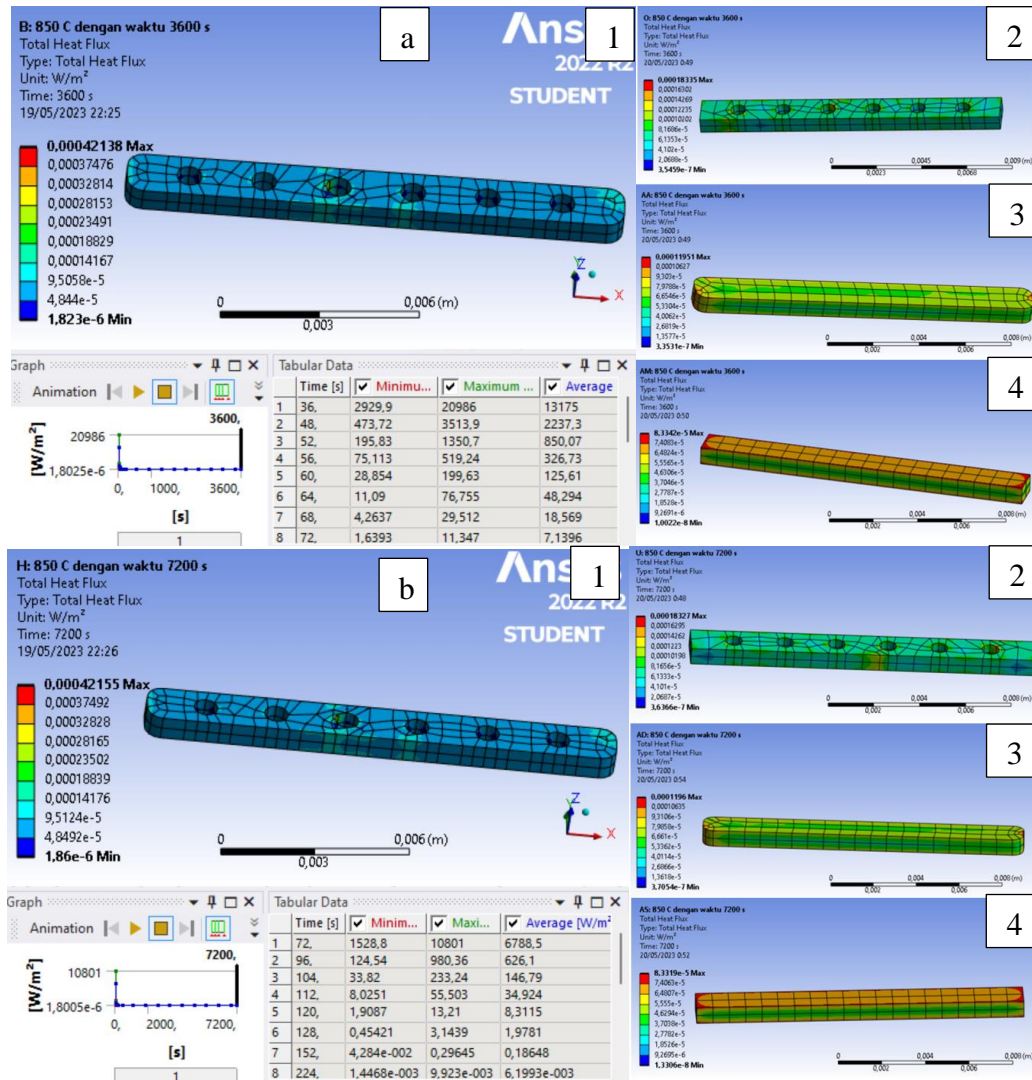
Gambar 4.6 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 750°C pada Waktu

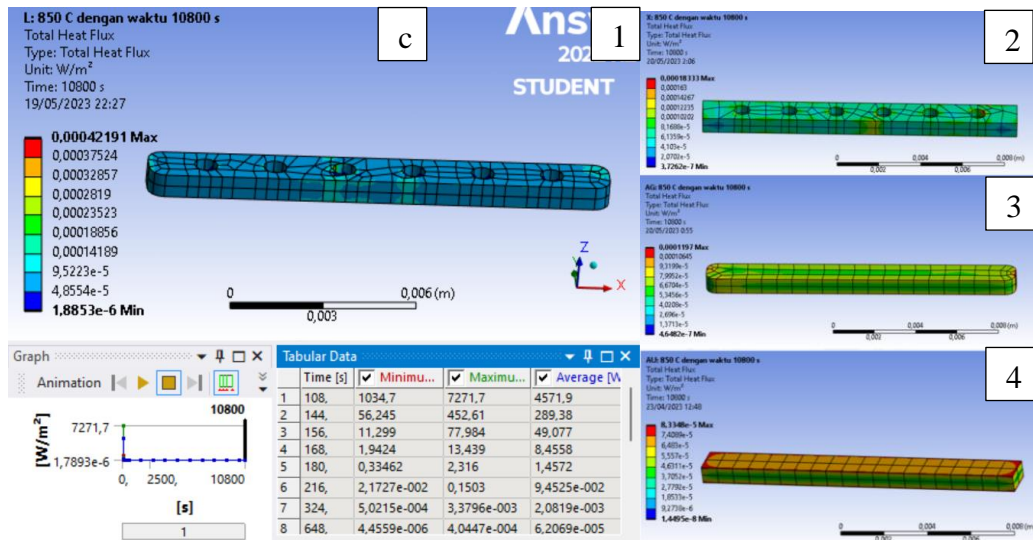
a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik; 1) geometri 1; 2) geometri 2; 3) geometri 3; 4) geometri 4

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.



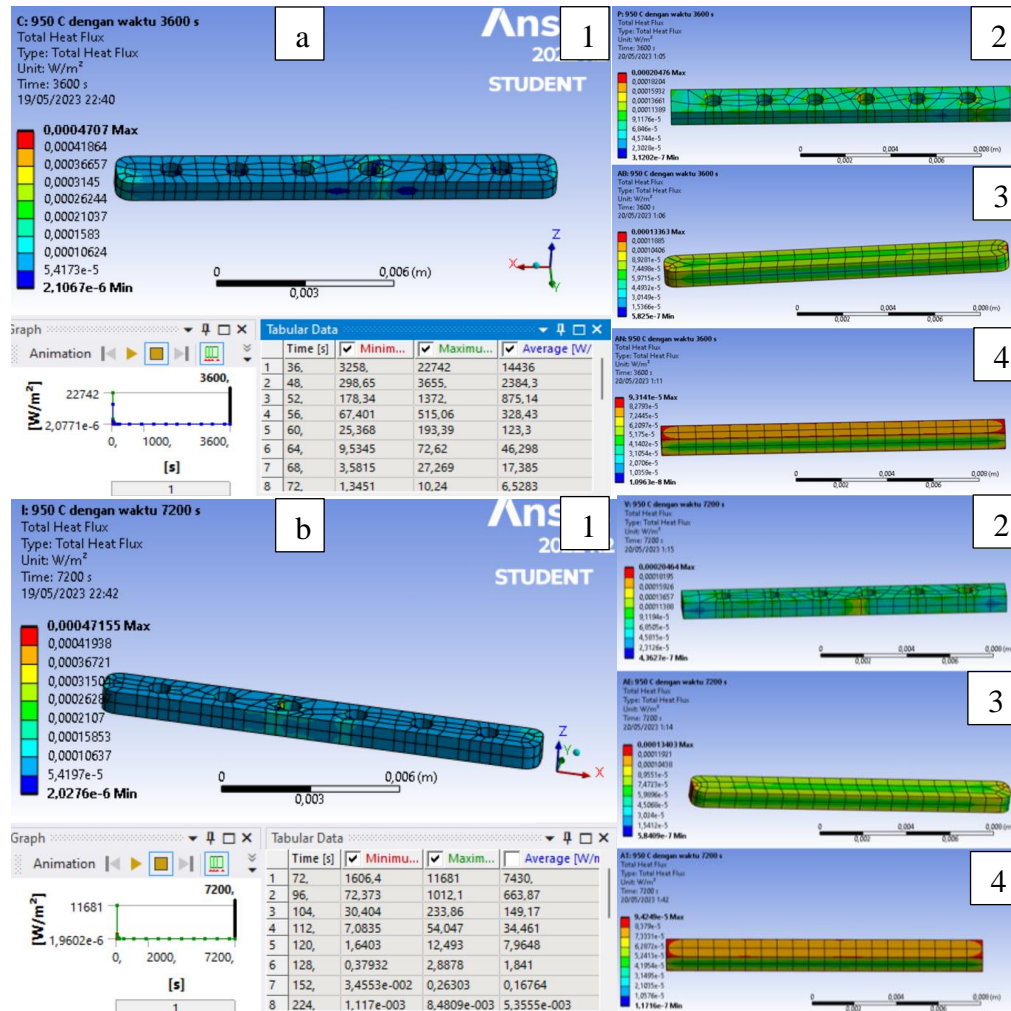


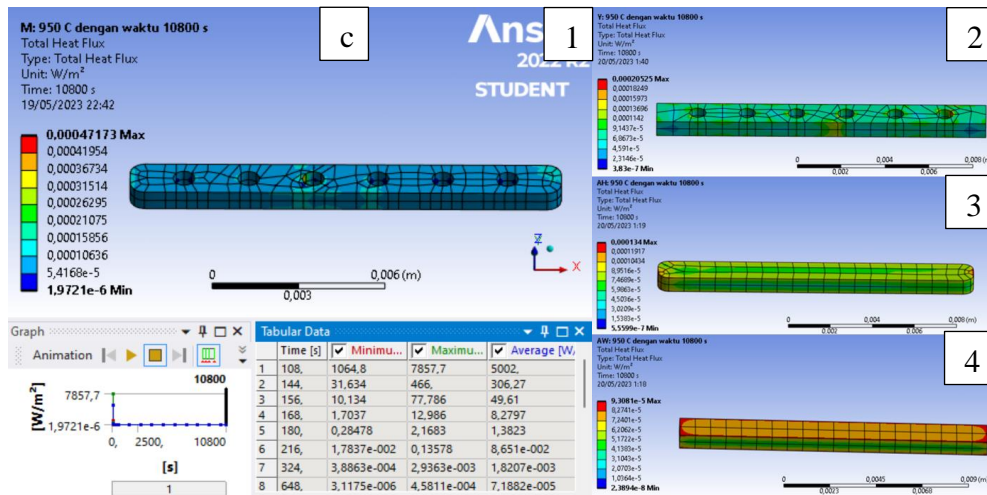
Gambar 4.7 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 850°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik; 1) geometri 1; 2) geometri 2; 2) geometri 3; 4) geometri 4

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.





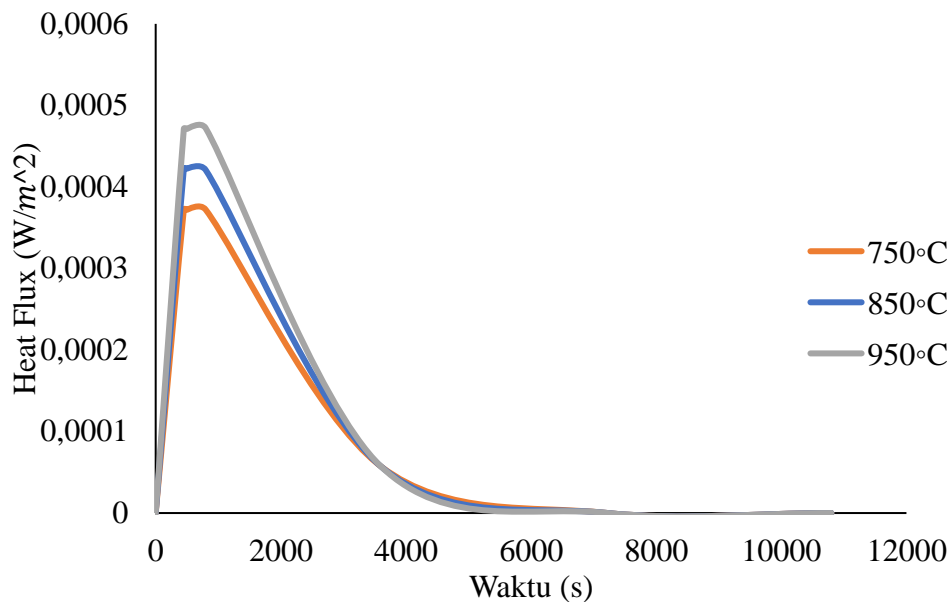
Gambar 4.8 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 950°C pada Waktu

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

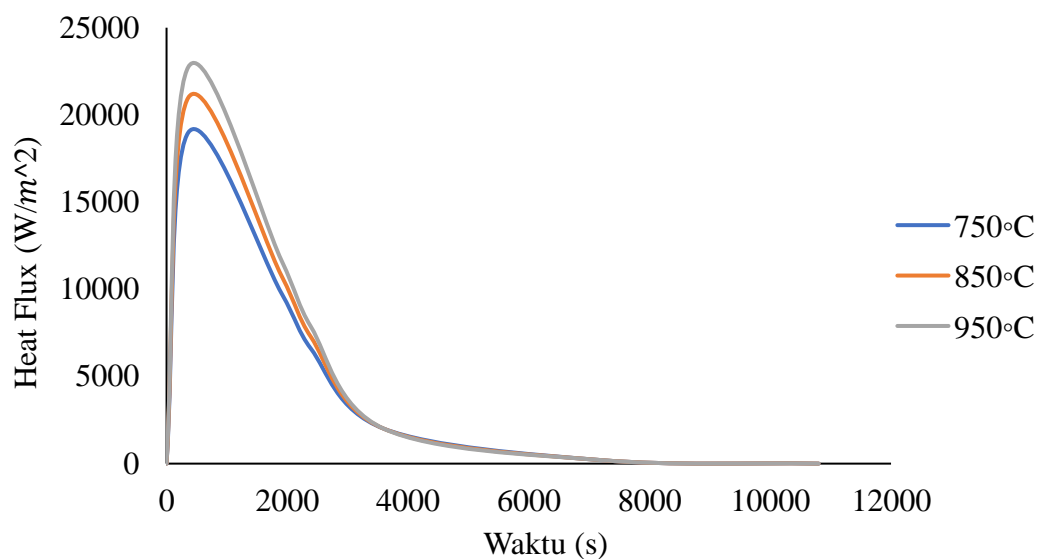


Gambar 4.9 Grafik *Heat Flux* Minimum terhadap Temperatur dan Waktu

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.

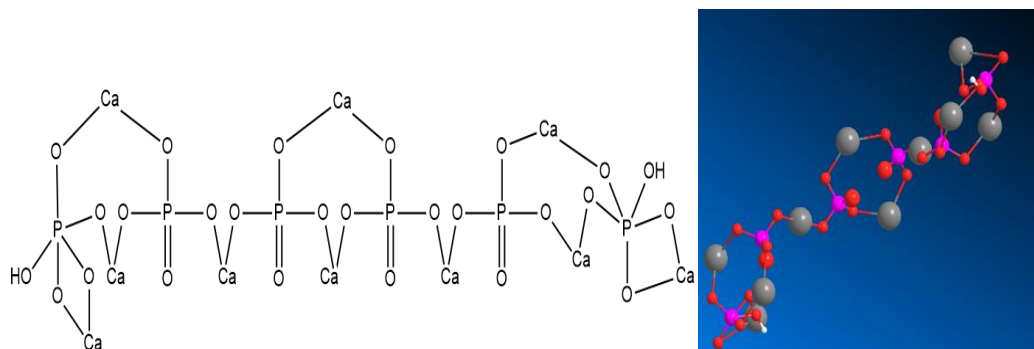
Kemudian setelah 3000 detik, spesimen mengalami penurunan *heat flux* yang tidak terlalu signifikan sehingga peningkatan temperatur yang terjadi tidak terlalu signifikan. Kemudian pada waktu 960 detik menghasilkan keadaan *heat flux* yang hampir sama dengan keadaan awal. Hal ini berarti waktu terlalu 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.

4.2.3 Pengaruh ΔG Terhadap Reaksi dan Pembentukan

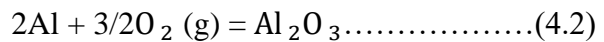
Pada metode *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* (SIS) menggunakan sampel implan tulang dengan menggunakan material komposit. Pada SIS material yang digunakan adalah aluminium, magnesium, titanium dan hidroksiapatit. Pada proses metode SIS aluminium dan magnesium akan melebur dan berikatan membentuk $MgAl_2O_4$. Diketahui bahwa pada temperatur $660.3^\circ C$ aluminium akan melebur, dan pada temperatur $2500^\circ C$ aluminium akan menguap sehingga baik pada temperatur 750 , 850 , dan $950^\circ C$ aluminium akan melebur. Sedangkan temperatur lebur magnesium sebesar $650^\circ C$, dan temperatur uap pada temperatur $1090^\circ C$, sehingga pada temperatur 750 , 850 , dan $950^\circ C$ magnesium juga melebur. Al_2O_3 dan MgO akan bereaksi membentuk $MgAl_2O_4$ (Spinel).

Pada proses SIS ini digunakan titanium berperan sebagai *reinforce material* (material penguat). Pada proses ini material titanium tidak melebur karena titanium akan melebur pada temperatur $1668^\circ C$, sehingga pada proses SIS dengan temperatur 750 , 850 , dan $950^\circ C$, titanium tidak melebur. Pada material hidroksiapatit berperan sebagai matrix komposit dalam metode SIS ini. Berdasarkan (Warastuti dan Abbas, 2011) Hidroksiapatit memiliki rumus kimia $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ dengan struktur kimia seperti pada Gambar 4.11



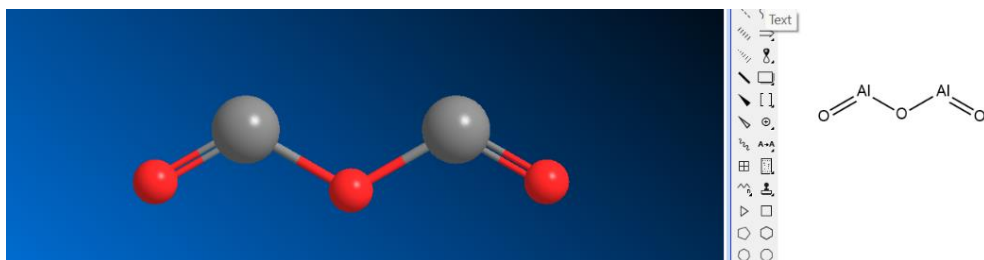
Gambar 4.11 Struktur Kimia Hidroksiapatit (Warastuti dan Abbas, 2011)

Reaksi yang terjadi pada proses SIS adalah pembentukan Al_2O_3 , MgO , dan kemudian membentuk MgAl_2O_4 , seperti pada Persamaan 4.2, 4.3, dan 4.5. Dalam penelitian ini menggunakan software chemdraw untuk mengetahui ikatan kimia yang terjadi dalam reaksi ini, dan juga menggunakan software HSC untuk mengetahui entalpi pembentukan yang terjadi dalam proses pemanasan ini dengan temperatur pemanasan sebesar 750, 850, dan 950 °C sehingga didapatkan data pada Tabel 4.5, 4.6, dan 4.7



Tabel 4.5 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan Al_2O_3

$2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 (\text{g}) = \text{Al}_2\text{O}_3$			
T (°C)	ΔH (kJ)	ΔS (J/K)	ΔG (kJ)
750	-1693,428	-332,408	-1353,325
850	-1692.438	-331.486	-1320.130
950	-1691,339	-330,548	-1287,028

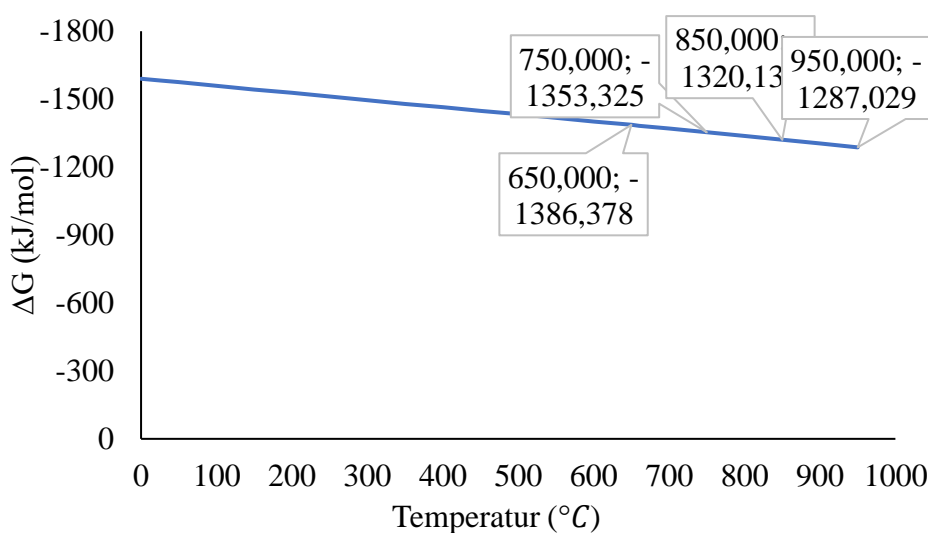


Gambar 4.12 Struktur Kimia Reaksi Pembentukan Al_2O_3

Dapat dilihat dari Persamaan 4.2 merupakan persamaan reaksi pembakaran aluminium menggunakan temperatur tinggi sehingga aluminium bereaksi dengan oksigen membentuk Al_2O_3 . Dari Gambar 4.12 hasil skematik penggambaran ikatan atom pada pembentukan Al_2O_3 terbentuk dari reaksi aluminium dengan oksigen. Reaksi pembentukan Al_2O_3 didapatkan hasil berupa ΔH (perubahan entalpi), ΔS berikut dapat

diketahui bahwa pada temperatur (perubahan entropi) dan ΔG (perubahan energi bebas Gibbs).

Dari hasil ini didapatkan data hasil perubahan entalpi variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan Al_2O_3 sebesar -1692.748, -1692.438, dan -1692.120 kJ. Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C terjadi secara eksotermik karena perubahan entalpi bernilai negatif yang artinya reaksi melepaskan energi atau kalor. Sedangkan ΔS atau perubahan entropi merupakan ketidakteraturan suatu system dalam dimensi energi per temperatur dengan satuan J/K (Joule per Celcius). Dari hasil ini didapatkan data hasil perubahan entropi variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan Al_2O_3 sebesar -331.765, -331.486, dan -331.205 J/C.



Gambar 4.13 Grafik Pembentukan Al_2O_3 dengan temperatur terhadap ΔG

Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C terjadi ketidakteraturan sehingga menyebabkan sistem akan mengeluarkan energi untuk mencapai keteraturan tersebut, sehingga terjadi reaksi eksotermik (Uphadaya, dan Dube, 1977). Dan ΔG atau perubahan energi bebas Gibbs yang merupakan potensial termodinamika yang dapat digunakan untuk menghitung kerja reversibel

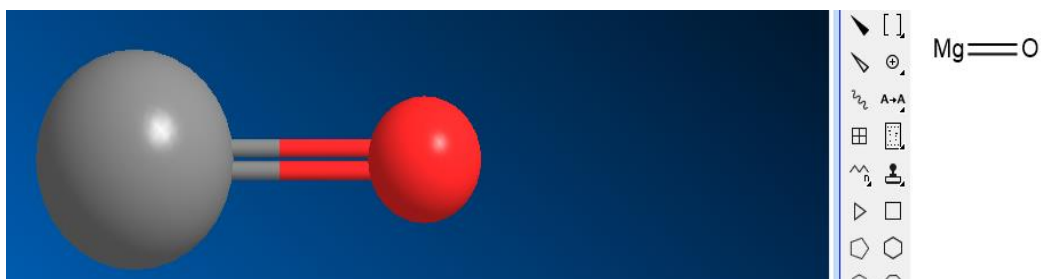
maksimum yang dapat dilakukan oleh sistem termodinamika pada suhu dan tekanan konstan (isotermal, isobarik) dengan dimensi energi

Pada pembentukan Al_2O_3 pada gambar 4,13 titik lelehnya ada pada temperature 650°C dengan ΔG sebesar $-1386,378$. Apabila energi bebas Gibbs yang dihasilkan bernilai negatif maka reaksi akan berlangsung spontan menghasilkan produk, sedangkan apabila energi bebas Gibbs bernilai positive maka reaksi tidak berlangsung spontan, sehingga memerlukan energi dari luar. Dari hasil penelitian ini didapatkan data hasil perubahan energi bebas Gibbs variasi temperatur $750, 850,$ dan 950°C untuk pembentukan Al_2O_3 sebesar $-1330.079, -1320.130,$ dan -1310.190 kJ. Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur $750, 850,$ dan 950°C akan terjadi reaksi secara spontan untuk pembentukan Al_2O_3 (Uphadaya, dan Dube, 1977).



4.6 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan MgO

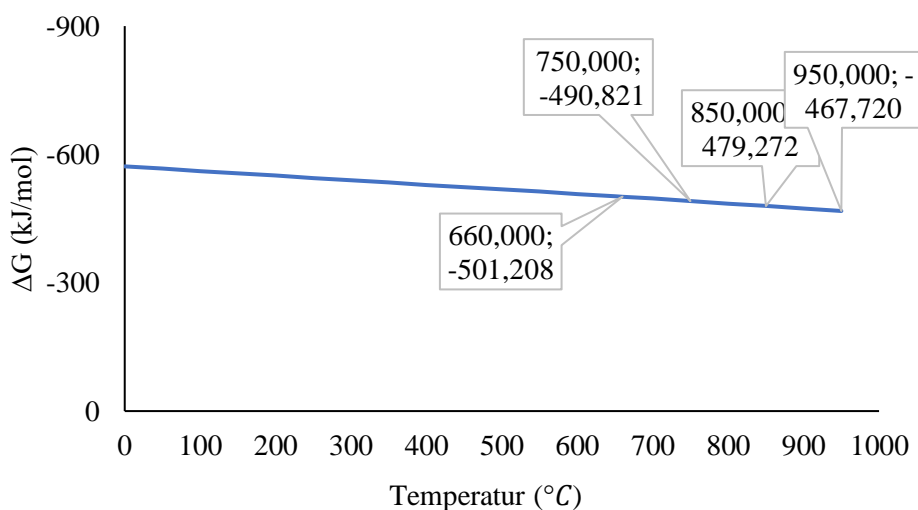
Mg + 1/2 O ₂ (g) = MgO			
T (°C)	ΔH (kJ)	ΔS (J/C)	ΔG (kJ)
750	-608,946	-115,452	-490,821
850	-609.010	-115.512	-479.272
950	-609,037	-115,536	-467,719



Gambar 4.14 Struktur Kimia Reaksi Pembentukan MgO.

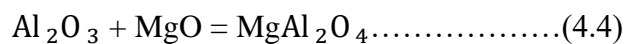
Dapat dilihat dari Persamaan 4.3 merupakan persamaan reaksi pembakaran magnesium menggunakan temperatur tinggi sehingga magnesium bereaksi dengan oksigen membentuk MgO. Dari Gambar 4.14 hasil skematik penggambaran ikatan atom pada pembentukan MgO terbentuk dari reaksi magnesium dengan oksigen. Reaksi pembentukan MgO didapatkan hasil berupa ΔH (perubahan entalpi), ΔS (perubahan entropi) dan ΔG (perubahan energi bebas Gibbs). Dari simulasi HSC hasil ini didapatkan data hasil perubahan entalpi variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan MgO sebesar -608.995, -609.010, dan -609.022 kJ.

Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C terjadi secara eksotermik karena perubahan entalpi bernilai negatif yang artinya reaksi melepaskan energi atau kalor. Ketika entropi bernilai negatif maka entropi lingkungan berkurang atau lingkungan mendapat keteraturan. Dari hasil ini didapatkan data hasil perubahan entropi variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan MgO sebesar -115.499, -115.512, dan -115.523 J/K.



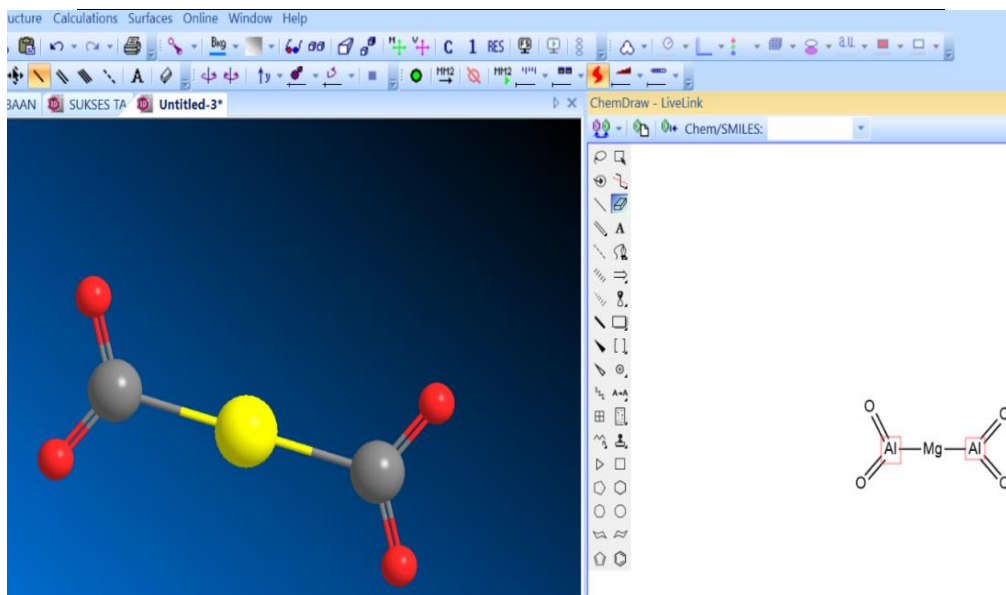
Gambar 4.15 Grafik Pembentukan MgO dengan temperatur terhadap ΔG

Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C terjadi ketidakteraturan sehingga menyebabkan sistem akan mengeluarkan energi untuk mencapai keteraturan tersebut, sehingga terjadi reaksi eksotermis (Uphadaya, dan Dube, 1977). Pada pembentukan MgO titik leleh ada pada temperatur 660°C dengan ΔG sebesar -501,208. Dari hasil penelitian ini didapatkan data Gambar 4.15 hasil perubahan energi bebas Gibbs variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan MgO sebesar -482.738, -479.272, dan -475.807 kJ. Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C akan terjadi reaksi secara spontan untuk pembentukan MgO (Uphadaya, dan Dube, 1977).



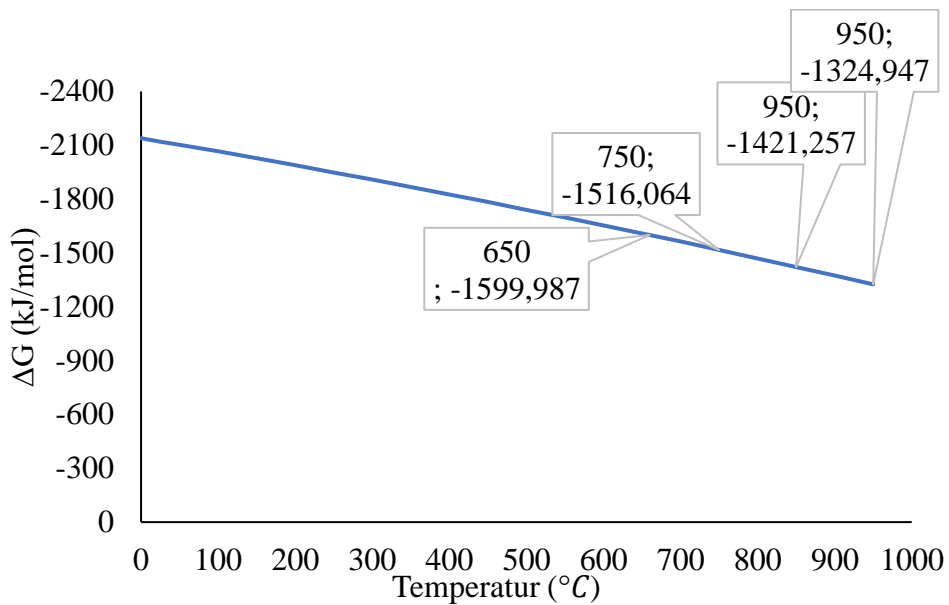
Tabel 4.7 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi

Pembentukan MgAl_2O_4			
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} = \text{MgAl}_2\text{O}_4$			
T (°C)	ΔH (kJ)	ΔS (J/C)	ΔG (kJ)
750	-2477,937	-940,110	-1516,063
850	-2494,758	-955,795	-1421,257
950	-2511,655	-970,206	-1324,947



Gambar 4.16 Struktur Kimia Reaksi Pembentukan MgAl_2O_4

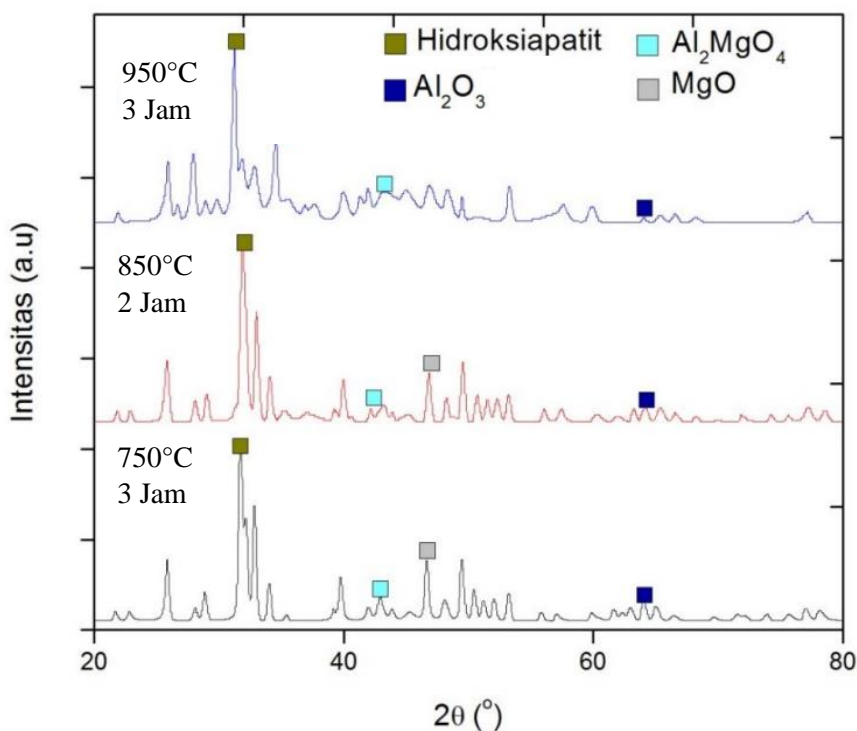
Dapat dilihat Persamaan 4.4 menjelaskan reaksi antara Al_2O_3 dan MgO membentuk MgAl_2O_4 (spinel). Dari Gambar 4.16 hasil skematik penggambaran ikatan atom pada pembentukan MgAl_2O_4 (spinel) terbentuk dari reaksi pembakaran temperatur tinggi Al_2O_3 dan MgO , Reaksi pembentukan MgAl_2O_4 didapatkan hasil berupa ΔH (perubahan entalpi), ΔS (perubahan entropi) dan ΔG (perubahan energi bebas Gibbs). Dari hasil ini didapatkan data Tabel 4.7 hasil perubahan entropi variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan MgAl_2O_4 sebesar -940.110, -955.795, dan -970,206 J/K.



Gambar 4.17 Grafik Pembentukan MgAl_2O_4 dengan temperatur terhadap ΔG

Dari hasil simulasi HSC ini didapatkan data Gambar 4.17 hasil perubahan entalpi variasi temperatur 750, 850, dan 950°C untuk pembentukan MgAl_2O_4 ΔG sebesar -1516.063, -1421.257, dan -1324.947. Pada pembentukan titik leleh pada temperatur 650°C dengan ΔG sebesar -1599,987. Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C terjadi secara eksotermik karena perubahan entalpi bernilai negatif yang artinya reaksi melepaskan energi atau kalor.

Gambar 4.6 mengilustrasikan terjadinya perpindahan panas dari sampel sebagai *system* menuju alas sebagai lingkungan di mana temperatur maksimum terjadi pada sampel yang kemudian panas tersebut mengalir menuju seluruh geometri yang menunjukkan keadaan ini terjadi reaksi eksotermis (Uphadaya, dan Dube, 1977). Dari hasil data tersebut dapat disimpulkan bahwa proses SIS dengan temperatur 750, 850, dan 950°C terjadi ketidakteraturan sehingga menyebabkan sistem akan mengeluarkan energi untuk mencapai keteraturan tersebut, sehingga terjadi reaksi eksotermis (Uphadaya, dan Dube, 1977).



Gambar 4.18 Verifikasi XRD Hasil SIS (Ni Made, 2021)

Pengaruh perpindahan panas yang terjadi pada kesembilan sampel dapat dilihat dengan uji X-Ray Diffraction (XRD) karena dapat mengetahui fasa yang terbentuk pada proses SIS. Pada uji XRD ini dilakukan metode sampling yaitu dengan menguji sampel pada waktu proses yang sama dan temperatur yang berbeda. Hasil XRD pada Gambar 4.18 menunjukkan fasa yang terbentuk yaitu fasa hidroksiapatit, aluminium oxide, magnesium oxide dan magnesium hydride. Material yang digunakan dalam penelitian (Ni Made, 2021) menggunakan material

komposit berupa Hidroksiapatit 75%, Aluminium hasil pemurnian 10%, Magnesium 5%, dan Titanium 10% yang kemudian diproses menggunakan metode *Self-Propagating Intermediate-Temperature Synthesis* sehingga didapatkan hasil XRD produk dengan kadar hidroksiapatit.

BAB V

Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh dari hasil simulasi *simulasi self-propagating intermediate temperature synthesis* (SIS) dengan menggunakan ANSYS metode *Finite element analysis* (FEA) ini maka disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada proses *simulasi self-propagating intermediate temperature synthesis* (SIS) pada temperatur pemanasan paling efektif adalah dengan menggunakan temperatur 750°C karena menghasilkan *heat flux* terendah di setiap waktu 3600, 7200, dan 10800 detik dengan nilai *heat flux* sebesar 0,00037244, 0,00037196, dan 0,00037205 W/m² dan waktu pamasan paling efektif simulasi SIS adalah dengan pemanasan selama 10800 detik karena panas sudah terdistribusi merata dengan temperatur homogen disetiap elemen sampel dengan selisih temperatur kurang dari 0.001 °C
2. Pada proses *simulasi self-propagating intermediate temperature synthesis* (SIS) Pada keempat sampel yang diberikan tekanan 176 MPa dengan waktu penekanan 300 detik menghasilkan -149,21 MPa, -131, 6 MPa, -114,2 MPa dan -123,96 MPa dan pada geometri 1 tertinggi hasil dari *normal stress*.
3. Pada proses simulasi *self-propagating intermediate temperature synthesis* dengan pemanasan menggunakan temperatur 750°C, 850°C, dan 950 °C terjadi reaksi secara eksotermik dengan ditandai perubahan entalpi bernilai negatif yaitu sebesar -1693,428 kJ/mol, -1693,428 kJ/mol kJ/mol, dan -1693,428 kJ/mol untuk pembentukan Al₂O₃ -608,946, -609.010 kJ/mol, dan -609,037 kJ/mol untuk pembentukan MgO, dan -2477,937 kJ/mol, -2477,937 kJ/mol, dan -2477,937 kJ/mol untuk pembentukan MgAl₂O₄.

5.2 Saran

Saran untuk hasil *simulasi self-propagating intermediate temperature synthesis* (SIS) dengan menggunakan software ANSYS 2022 R2 metode *Finite element analysis* (FEA) untuk mengetahui reaksi eksotermis adalah dengan melakukan proses simulasi dengan variasi ukuran dan model lain pada sampel dalam katalog alat medis untuk mengetahui pengaruh ukuran sampel terhadap homogenisasi thermal produk.

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.

Pramono, Agus, Lembit Kommel, Lauri Kollo dan Renno Veinthal. The Aluminum Based Composite Produced by *Self Propagating High Temperature Synthesis*. *Materials Science*. Vol 22 (1). 41-43. 2018

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>

Pinem, M.D. "ANSYS: Menganalisis Berbagai Permasalahan Dalam Ilmu Keteknikan". Informatika, 2017

Pramanik, Sumit, Avinash Kumar Agarwal, and K. N. Rai. "Development of High Strength Hydroxyapatite for Hard Tissue Replacement." *Journal: Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, vol. 19, no. 1, pp. 46–51. 2005.

Rimondini, L., Nicolò, N-A., Milena, F., Gaetano G., Matilde, T., dan Giardino, R., In Vivo Experimental Study On Bone Regeneration In Critical Bone Defects Using An Injectable Biodegradable PLA/PGA Copolymer. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Patholog*, Bologna : Instituti Ortopedic Giardino, 2004.

Roland W. Lewis, Perumal Nithiarasu, Kankanhalli N. Seetharamu. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 38-45. 2004.

Roncati, Dario. "Iterative Calculation of The Heat Transfer Coefficient". *Progettazione Ottica Roncati*, Italy, 2013.

Roylance, David. "Mechanical Properties of Materials". Massachusetts Institute of Technology, 2008.

Sahari, G. N. Anastasia. "Komposit Matriks Keramik Al₂O₃/Al Hasil Proses Directed Melt Oxidation (DIMOX)". Universitas Indonesia, 2012.

Sam Tickoo. *ANSYS Workbench 14.0: A Tutorial Approach*. Department of Mechanical Engineering Technology Purdue University Calumet Hammond, Indiana, USA, 2016.

Subrahmanyam. J. & Vijayakumar, M. "Self-propagating high-temperature synthesis" Chapman & Hall, Jakarta, 1992.

Staton, David A. & Cavagnino, Andrea. "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models". Institute of Electrical and Electronics Engineers, Torino, 2008.

Syarif, Dani Gustaman. " Nanopartikel dan Nanofluida Perpindahan Panas: Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi" BATAN Press, 2016.

Tin-Oo, M.M., Gopalakrishnan, V., Samsudin, A.R., Al-Salihi, K.A., dan Shamsuria, O., Antibacterial Property of Locally Produced Hydroxyapatite, Archives of Orofacial Sciences: 41-44, 2007.

Uphadhaya. G. S. Dube. R. K. Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics. England : Oxford, 1977.

Yanguo Zhang, Qinghai Li, Hui Zhou. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces (Academic Press), 2016.

Zhu, L., Luo, D., & Liu, Y. Effect of the nano/microscale structure of biomaterial scaffolds on bone regeneration. International Journal of Ora, 2020.

Zulfia, A. & Ariati, M. "Pengaruh Suhu Pemanasan dan Waktu Tahan Terhadap Karakterisasi Material Komposit Logam Al/SiC Hasil Infiltrasi Tanpa Tekanan". Universitas Indonesia, 2006.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

A.1 Perhitungan kriteria

$$hL/k \leq 0,1$$

$$0,5 \cdot 1,5 / 45 \leq 0,1$$

$$0,0167 \leq 0,1$$

A. 2 Perhitungan Entalpi Reaksi

- Pembentukan Al_2O_3

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S$$

- a) Temperatur 750°C

$$\Delta H = -1353,325\text{kJ} + (1023\text{ K} - 332,408\text{ J/K})$$

$$\Delta H = -1693,428\text{ kJ}$$

- b) Temperatur 850°C

$$\Delta H = -1320,130\text{ kJ} + (1123\text{ K} - 331,486\text{ J/K})$$

$$\Delta H = -1692,438\text{ kJ}$$

- c) Temperatur 950°C

$$\Delta H = -1287,028\text{ kJ} + (1223\text{ K} - 330,548\text{ J/K})$$

$$\Delta H = -1691,339\text{kJ}$$

- Pembentukan MgO

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S$$

- a) Temperatur 750°C

$$\Delta H = -490,821 + (1023\text{ K} - 115,452\text{ J/K})$$

$$\Delta H = -608,946\text{ kJ}$$

b) Temperatur 850°C

$$\Delta H = -479.272 \text{ kJ} + (1123 \text{ K} - 115.512 \text{ J/K})$$

$$\Delta H = -609.010 \text{ kJ}$$

c) Temperatur 950°C

$$\Delta H = -467,719 \text{ kJ} + (1223 \text{ K} - 115,536 \text{ J/K})$$

$$\Delta H = -609,037 \text{ kJ}$$

• Pembentukan MgAl_2O_4

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S$$

a) Temperatur 750°C

$$\Delta H = -1516,063 \text{ kJ} + (993 \text{ K} - 940,110 \text{ J/K})$$

$$\Delta H = -2477,937 \text{ kJ}$$

b) Temperatur 850°C

$$\Delta H = -1421,257 \text{ kJ} + (1123 \text{ K} - 955,795 \text{ J/K})$$

$$\Delta H = -2494,758 \text{ kJ}$$

c) Temperatur 950°C

$$\Delta H = -1324,947 \text{ kJ} + (1153 \text{ K} - 970,206 \text{ J/K})$$

$$\Delta H = -2511,655 \text{ kJ}$$

A3. Perhitungan Nilai Koefisien Perpindahan Panas Fluida

• Temperatur 750°C

a) Perhitungan Grasshof Number

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{1/303 \times 9.81 \times (1023 - 303) \times 0.12^3}{(1.6 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 1.57 \times 10^8$$

b) Perhitungan Prandtl Number

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{1005 \times (1.86 \times 10^{-5})}{0.024}$$

$$Pr = 0.77875$$

c) Perhitungan Rayleigh Number

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Ra = 1.57 \times 10^8 (0.77875)$$

$$Ra = 1.22 \times 10^8$$

d) Perhitungan Nusselt Number

$$Nu = a \cdot Ra^{1/3}$$

$$Nu = 0.525 (1.22 \times 10^8)^{1/3}$$

$$Nu = 64$$

e) Perhitungan koefisien perpindahan panas fluida

$$h = Nu \cdot k / L$$

$$h = \frac{64 \times 0.024}{0.12}$$

$$h = 12,8$$

• Temperatur 850°C

a) Perhitungan Grasshof Number

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{1/303 \times 9.81 \times (1123 - 303) \times 0.12^3}{(1.6 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 1.79 \times 10^8$$

b) Perhitungan Prandtl Number

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{1005 \times (1.86 \times 10^{-5})}{0.024}$$

$$Pr = 0.77875$$

c) Perhitungan Rayleigh Number

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Ra = 1.73 \times 10^8 (0.77875)$$

$$Ra = 1.4 \times 10^8$$

d) Perhitungan Nusselt Number

$$Nu = a \cdot Ra^3$$

$$Nu = 0.525(1.4 \times 10^8)^3$$

$$Nu = 40$$

e) Perhitungan koefisien perpindahan panas fluida

$$h = Nu \cdot k / L$$

$$h = \frac{40 \times 0.024}{0.12}$$

$$h = 8$$

• Temperatur 950°C

a) Perhitungan Grasshof Number

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3}{\mu^2}$$

$$Gr = \frac{1/303 \times 9.81 \times (1223 - 303) \times 0.12^3}{(1.6 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 2.01 \times 10^8$$

b) Perhitungan Prandtl Number

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{1005 \times (1.86 \times 10^{-5})}{0.024}$$

$$Pr = 0.77875$$

c) Perhitungan Rayleigh Number

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$Ra = (2.01 \times 10^8) \times 0.77875$$

$$Ra = 1,57 \times 10^8$$

d) Perhitungan Nusselt Number

$$Nu = a \cdot Ra^3$$

$$Nu = 0.525(1,57 \times 10^8)^3$$

$$Nu = 56$$

e) Perhitungan koefisien perpindahan panas fluida

$$h = Nu \cdot k L$$

$$h = \frac{56 \times 0.024}{0.12}$$

$$h = 11.2$$

A.4 Perhitungan Volume Pori-pori

a) Tekanan 166 MPa

$$\bullet \rho = \frac{M}{V}$$

$$V = \frac{M}{\rho}$$

$$V = 1,936 \text{ 1,548} = 1,251 \text{ cm}^3$$

$$\blacklozenge \text{ Volume bulk} = 1,251 \text{ cm}^3$$

$$\bullet \phi = V_{\text{pori-pori}} / V_{\text{bulk}} \times 100\%$$

$$V_{\text{pori-pori}} = \phi \cdot V_{\text{bulk}}$$

$$V_{\text{pori-pori}} = 0,198 \cdot 1,251 = 0,248 \text{ cm}^3$$

$$V = \frac{M}{\rho} 2,032 \text{ 1,622} = 1,253 \text{ cm}^3$$

$$\blacklozenge \text{ Volume bulk} = 1,253 \text{ cm}^3$$

$$\bullet \phi = \frac{V_{\text{pori-pori}}}{V_{\text{bulk}}} \times 100\%$$

$$V_{\text{pori-pori}} = \phi \cdot V_{\text{bulk}}$$

$$V_{\text{pori-pori}} = 0,311 \cdot 1,253 = 0,220 \text{ cm}^3$$

b) Tekanan 171 MPa

$$\bullet \rho = M / V$$

$$V = M / \rho$$

$$V = 2,051 \cdot 1,615 = 1,270 \text{ cm}^3$$

$$\diamond \text{ Volume bulk} = 1,270 \text{ cm}^3$$

$$\bullet \phi = \frac{V_{\text{pori-pori}}}{V_{\text{bulk}}} \times 100\%$$

$$V_{\text{pori-pori}} = \phi \cdot V_{\text{bulk}}$$

$$V_{\text{pori-pori}} = 0,286 \cdot 1,270 = 0,23 \text{ cm}^3$$

c) Tekanan 176 MPa

$$\bullet \rho = \frac{M}{V}$$

$$V = \frac{M}{\rho}$$

$$V = \frac{2,032}{1,622} = 1,253 \text{ cm}^3$$

$$\diamond \text{ Volume bulk} = 1,253 \text{ cm}^3$$

$$\bullet \phi = \frac{V_{\text{pori-pori}}}{V_{\text{bulk}}} \times 100\%$$

$$V_{\text{pori-pori}} = \phi \cdot V_{\text{bulk}}$$

$$V_{\text{pori-pori}} = 0,311 \cdot 1,253 = 0,220 \text{ cm}^3$$

LAMPIRAN B
DATA HASIL PENELITIAN

Lampiran B. Data Hasil Penelitian

Tabel B.1 Data hasil Penekanan

Geometri	Penekanan	Porositas	Volume Pori-pori (m^3)
	(Mpa)	(%)	kerapatan
1	166	29,1	$2,4 \times 10^{-9}$
	171	28,22	$2,3 \times 10^{-9}$
	176	27,3	$2,2 \times 10^{-9}$
2	166	30,1	$2,5 \times 10^{-9}$
	171	29,5	$2,4 \times 10^{-9}$
	176	28,4	$2,3 \times 10^{-9}$
3	166	28	$2,44 \times 10^{-9}$
	171	27	$2,37 \times 10^{-9}$
	176	26	$2,3 \times 10^{-9}$
4	166	26,45	$2,53 \times 10^{-9}$
	171	25,70	$2,46 \times 10^{-9}$
	176	24,95	$2,2 \times 10^{-9}$

Tabel B.2 Data Perubahan Temperatur dan *Heat flux* dengan temperatur Pemanasan 750°C

Geometri	Waktu (Detik)	Tempertur (°C)		Heat Fllux (W/m^2)	
		Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
1	3600	701,01	702,2	0,00037244	20986
	7200	721,74	724,83	0,00037196	9793
	10800	733,1	733,04	0,00037205	6597
2	3600	690,78	691,04	0,00016154	29186
	7200	724,88	724,96	0,00016154	12109
	10800	733,1	733,04	0,00016176	8936

3	3600	687,64	687,96	0,00010532	23299
	7200	717,59	717,76	0,00010572	12109
	10800	728,11	728,22	0,00010576	8179
4	3600	697,81	688,22	0,000073708	25574
	7200	717,82	718,04	0,000073584	13231
	10800	728,27	728,41	0,000073545	8936

Tabel B.3 Data Perubahan Temperatur dan *Heat flux* dengan temperatur Pemanasan 850°C

Geometri	Waktu (Detik)	Tempertur (°C)		Heat Fllux (W/m ²)	
		Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
1	3600	795	796,05	0,00042242	18986
	7200	822	822,23	0,00042244	10801
	10800	831,27	831,31	0,00042069	7271
2	3600	701,44	796,32	0,00018339	22449
	7200	822,28	822,37	0,00018332	13247
	10800	831,34	831,4	0,00018316	9769
3	3600	781,57	781,92	0,00011955	25139
	7200	814,54	814,73	0,00011961	13247
	10800	826,08	826,2	0,0001197	8939
4	3600	782,02	728,47	0,000083345	27955
	7200	814,78	815,02	0,000082523	14481
	10800	826,24	826,4	0,000083275	9769

Tabel B.4 Data Perubahan Temperatur dan *Heat flux* dengan temperatur Pemanasan 950°C

Geometri	Waktu (Detik)	Tempertur (°C)		Heat Fllux (W/m ²)	
		Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
1	3600	891,4	891,52	0,00047135	22742
	7200	919,9	919,96	0,00047112	11681

	10800	929	929,79	0,00047201	7857
2	3600	879,89	880,19	0,00020472	34538
	7200	920,02	920,11	0,00020493	14195
	10800	929,75	929,89	0,0002051	10462
3	3600	883,18	876,81	0,00013357	27483
	7200	912	921,2	0,00013352	14195
	10800	929,83	924,52	0,00013341	9566
4	3600	876,9	877,38	0,000092974	30062
	7200	903,19	903,31	0,000093694	19243
	10800	924,56	924,73	0,000093045	10462

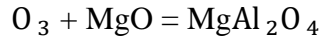
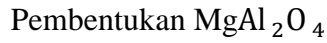
Tabel B.5 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan Al_2O_3

$2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 (\text{g}) = \text{Al}_2\text{O}_3$			
T (°C)	ΔH (kJ)	ΔS (J/K)	ΔG (kJ)
750	-1693,428	-332,408	-1353,325
850	-1692,438	-331,486	-1320,130
950	-1691,339	-330,548	-1287,028

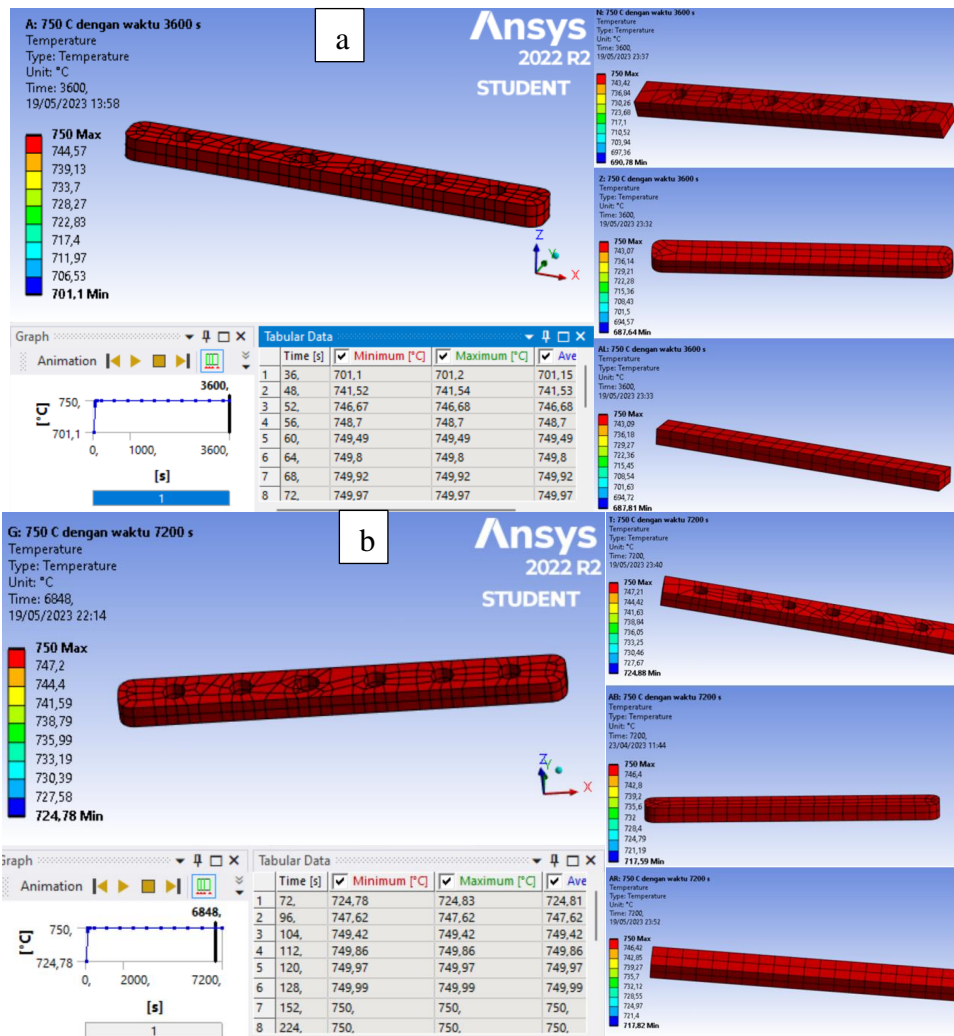
Tabel B.6 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi Pembentukan MgO

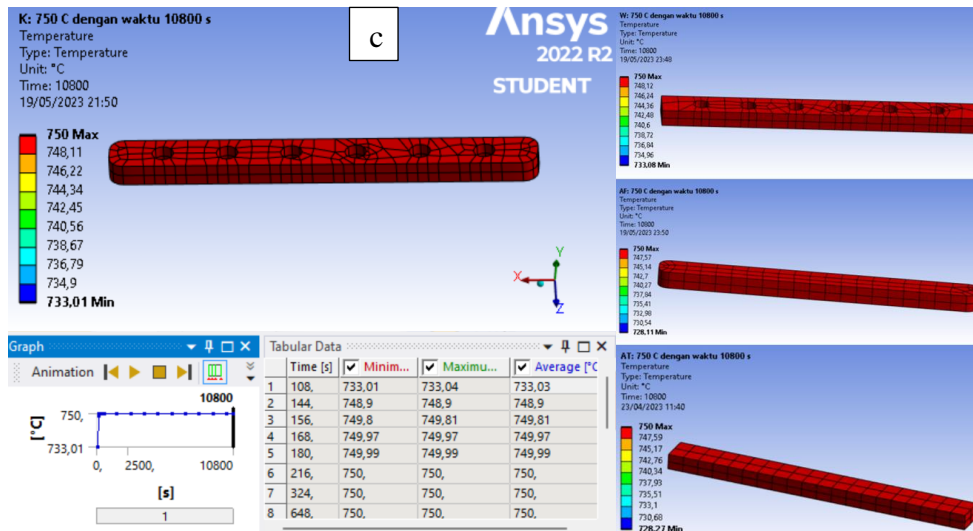
$\text{Mg} + 1/2 \text{O}_2(\text{g}) = \text{MgO}$			
T (°C)	ΔH (kJ)	ΔS (J/K)	ΔG (kJ)
750	-608,946	-115,452	-490,821
850	-609,010	-115,512	-479,272
950	-609,037	-115,536	-467,719

Tabel B.7 Data Hasil Entalpi, Entropi, dan Energi Bebas Gibbs Reaksi

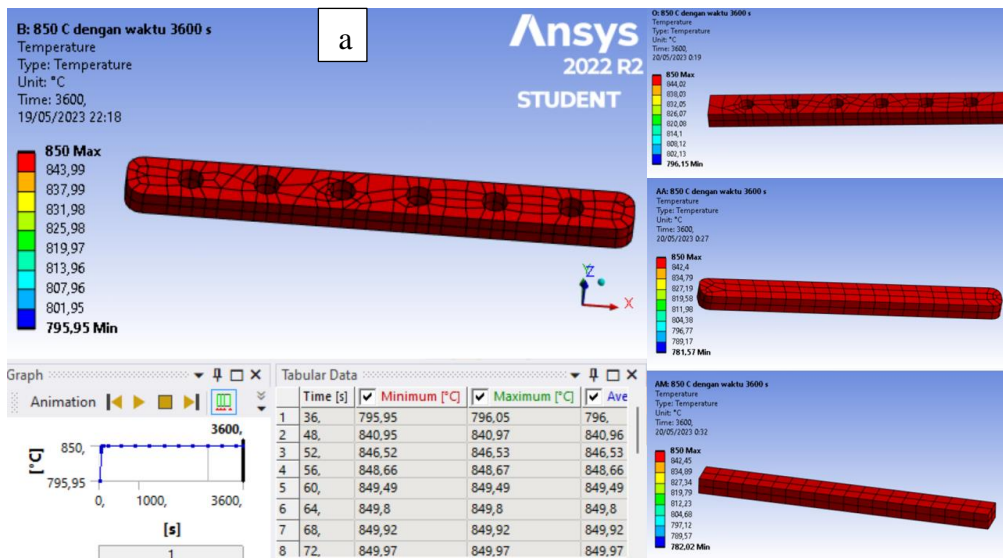


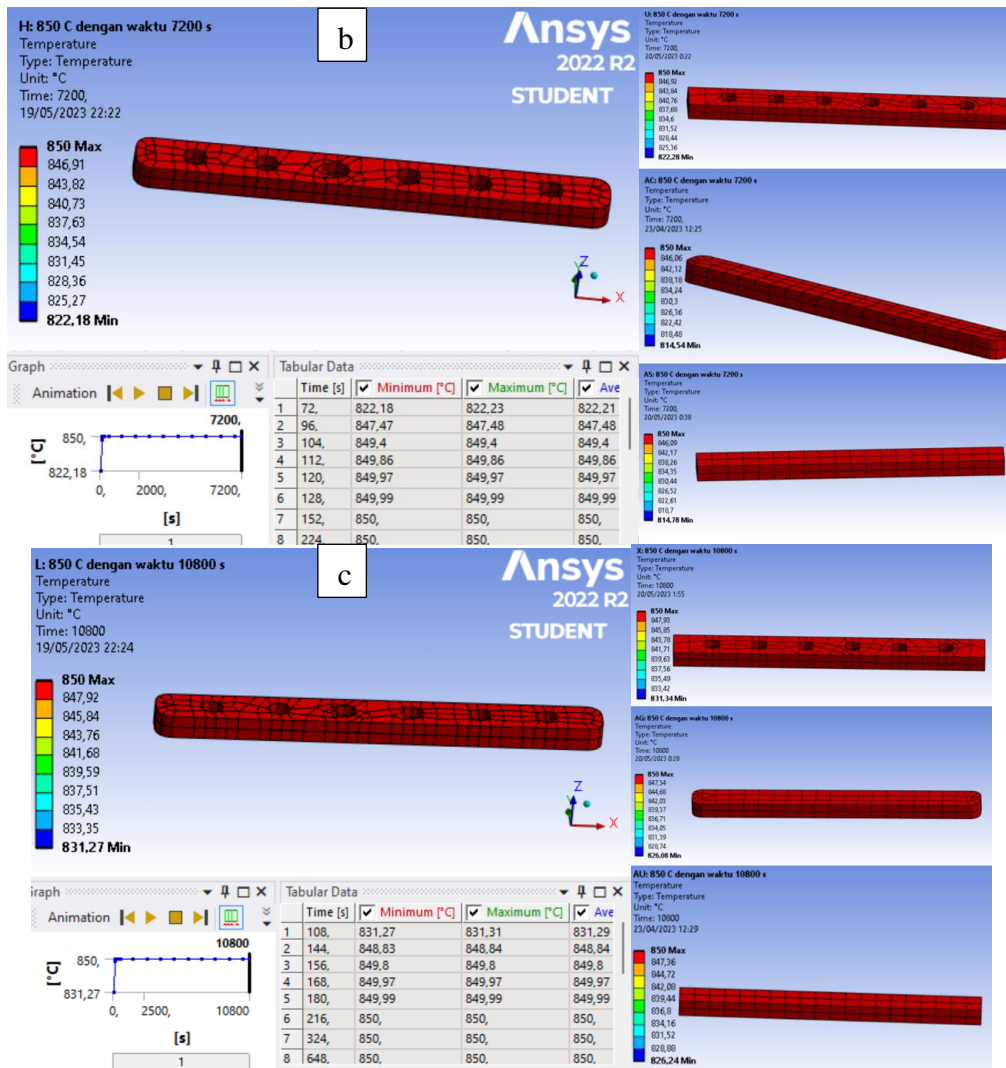
T (°C)	ΔH (kJ)	ΔS (J/K)	ΔG (kJ)
750	-2477,937	-940,110	-1516,063
850	-2494,758	-955,795	-1421,257
950	-2511,655	-970,206	-1324,947



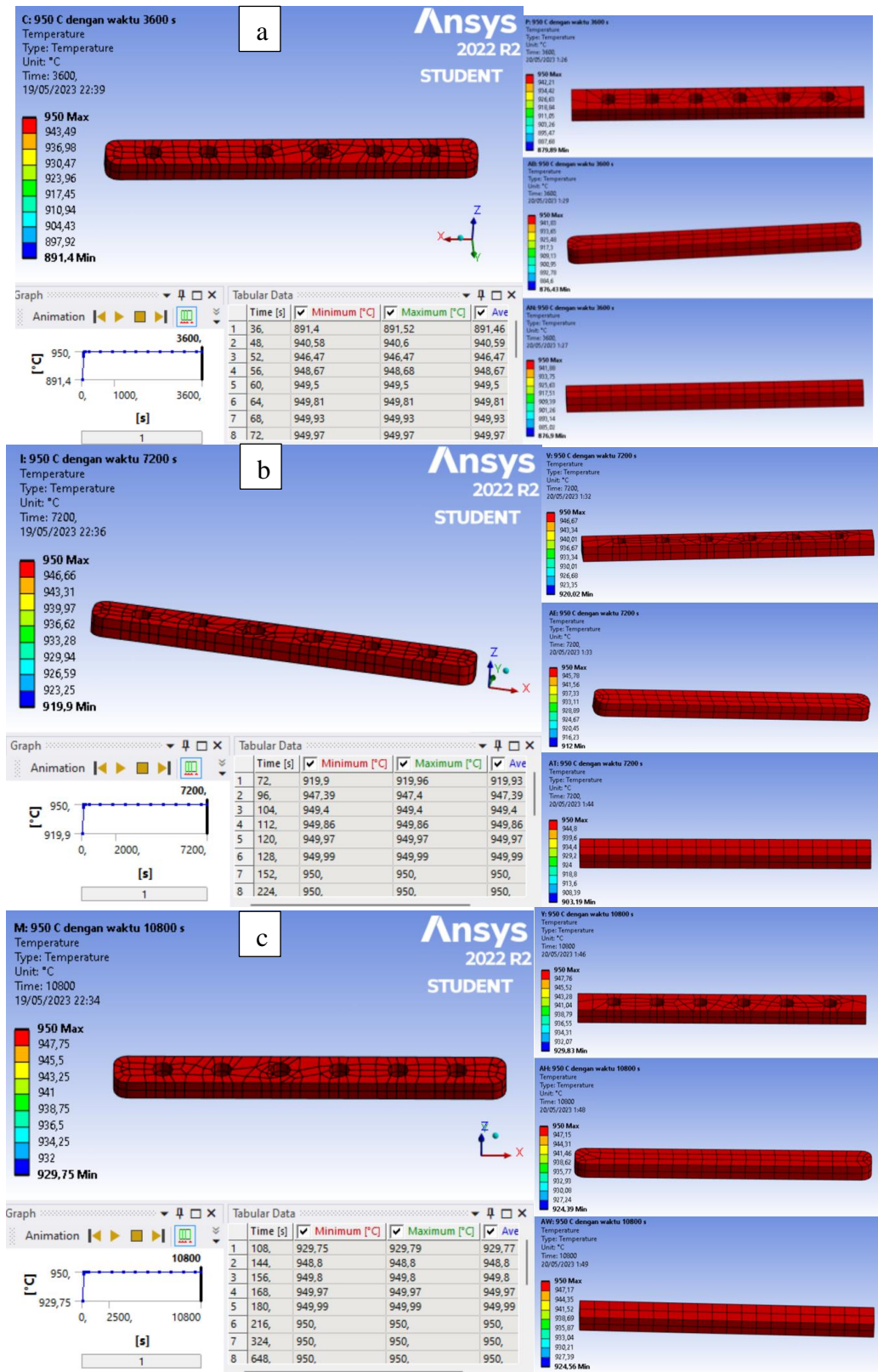


Gambar B.2 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 750°C pada Waktu
 a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik



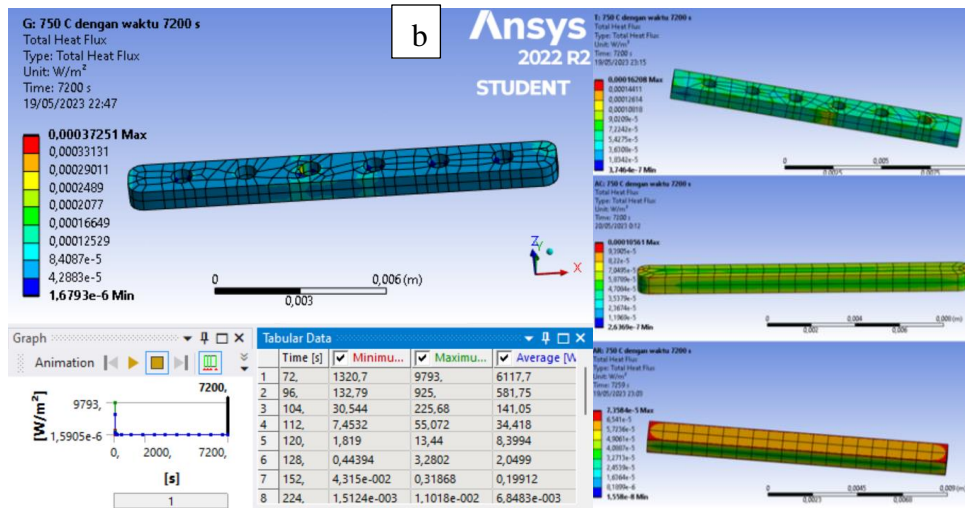
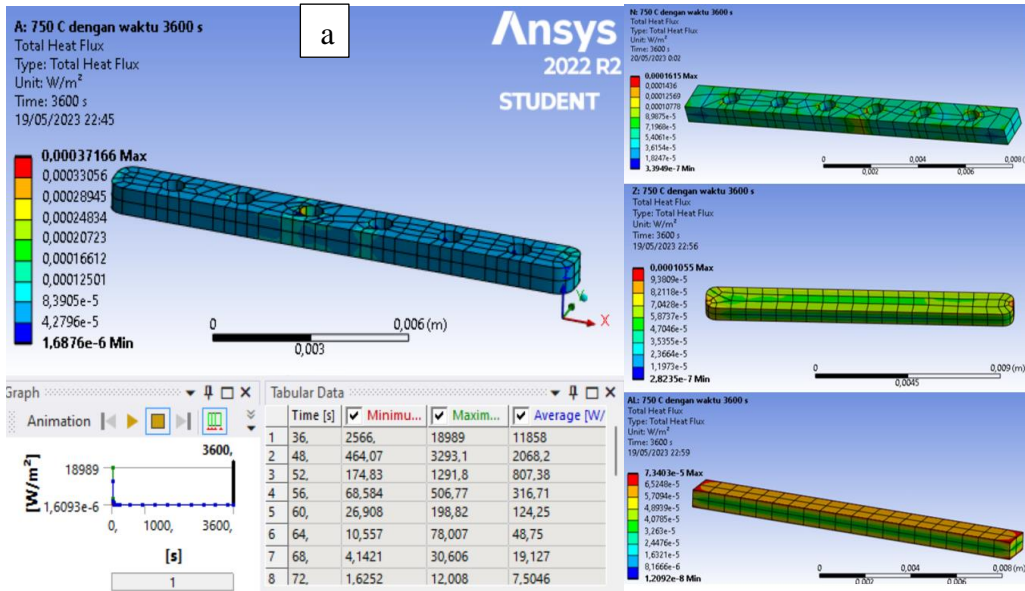


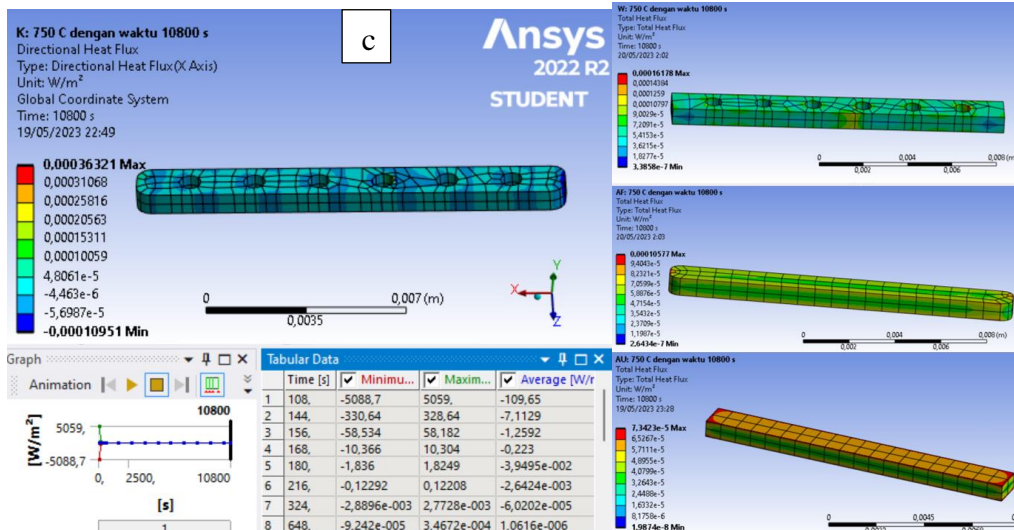
Gambar B.2 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 850°C pada Waktu
 a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik



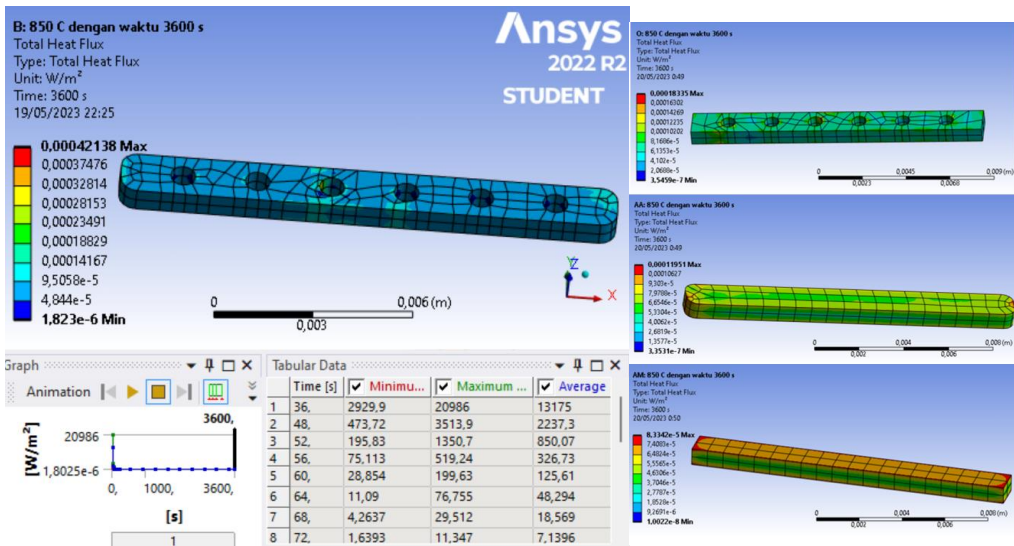
Gambar B.3 Distribusi Temperatur dengan Pemanasan 950°C pada Waktu a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik

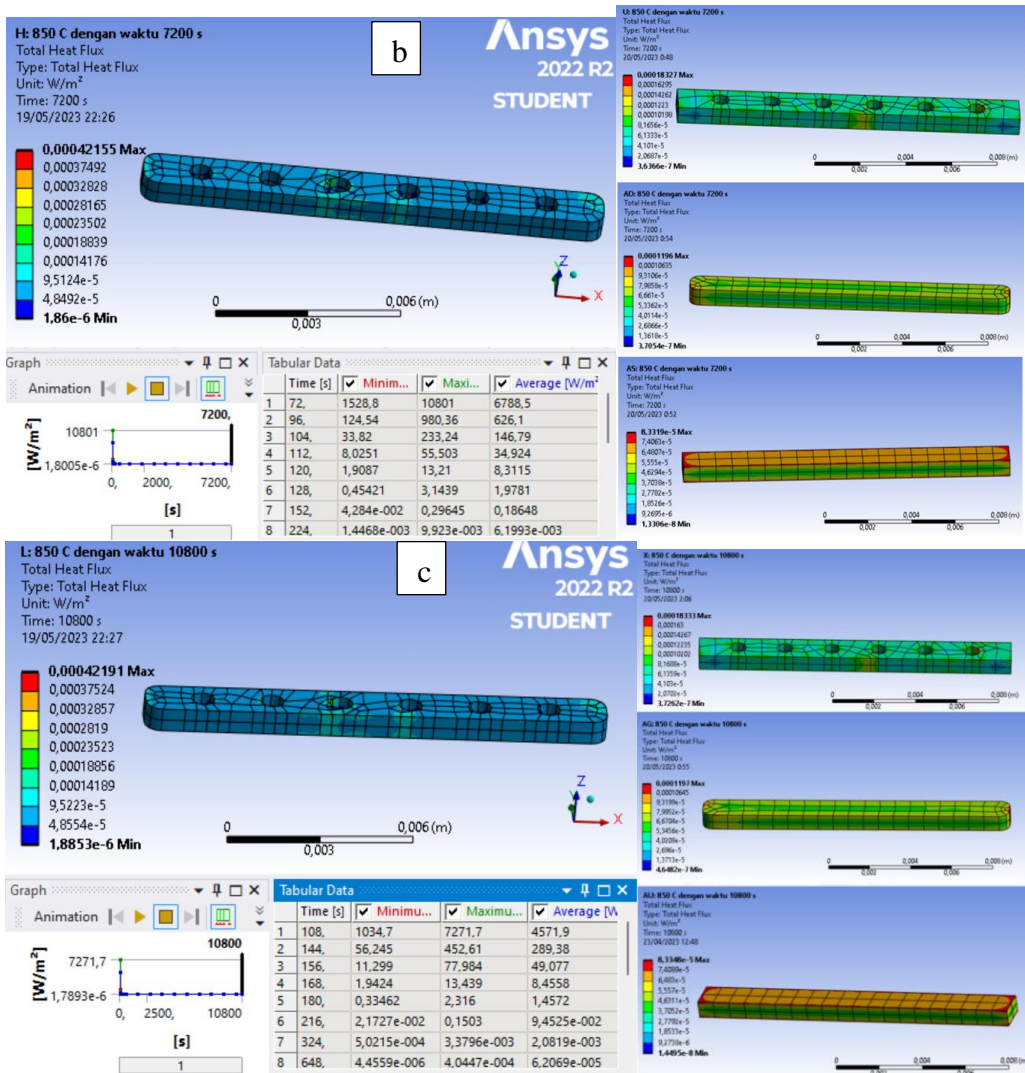
Heat Flux



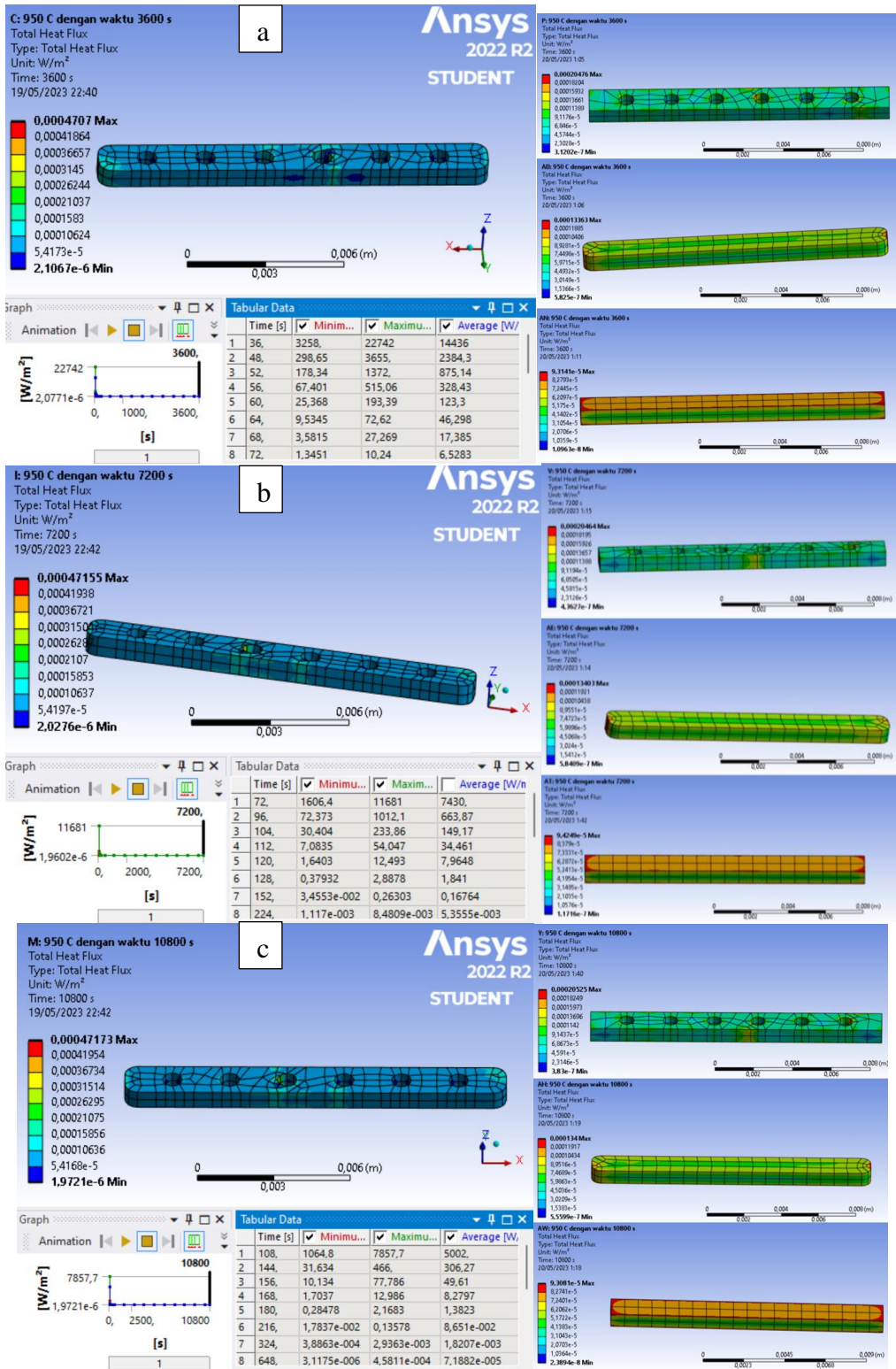


Gambar B.4 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 750°C pada Waktu
 a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik

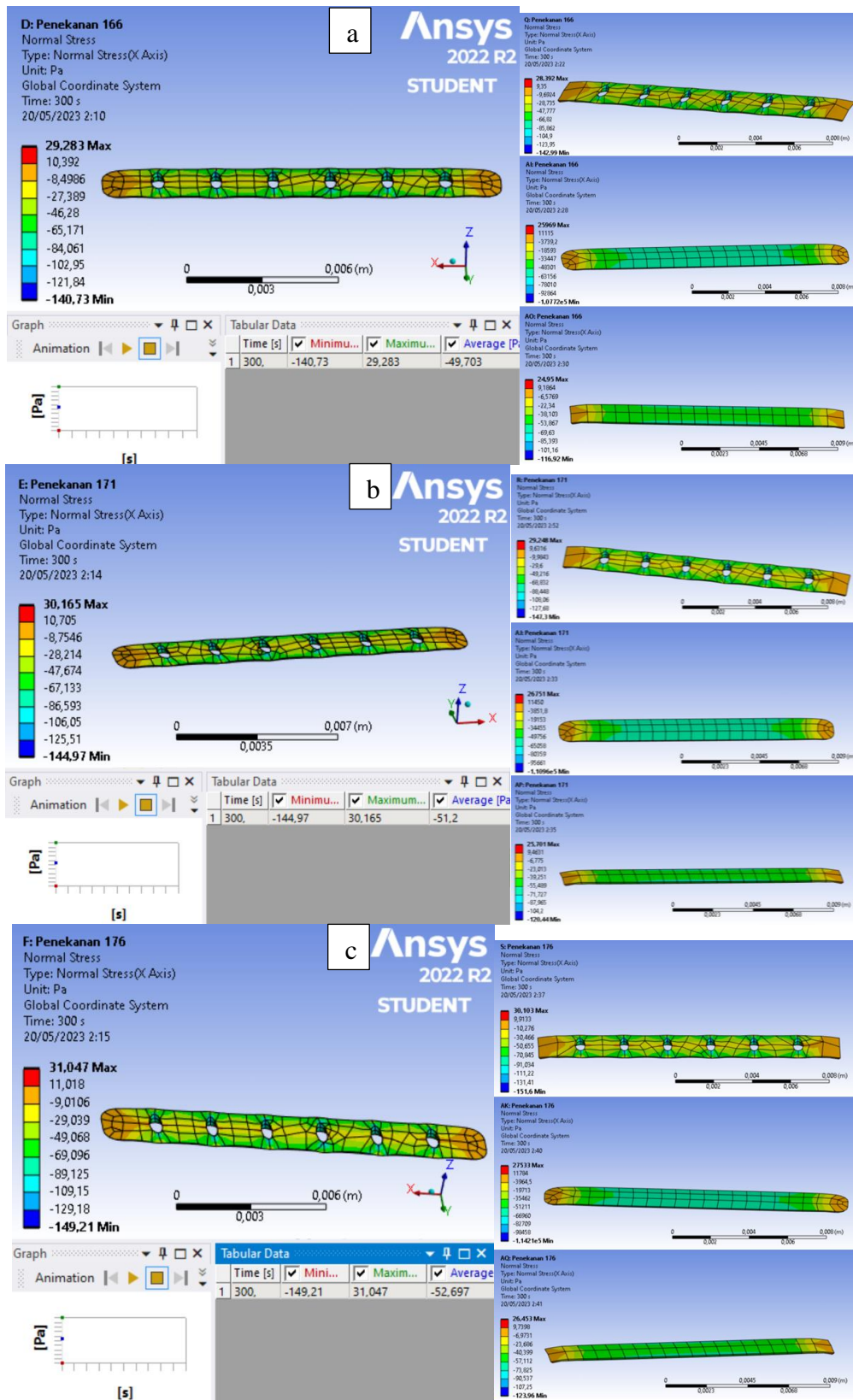




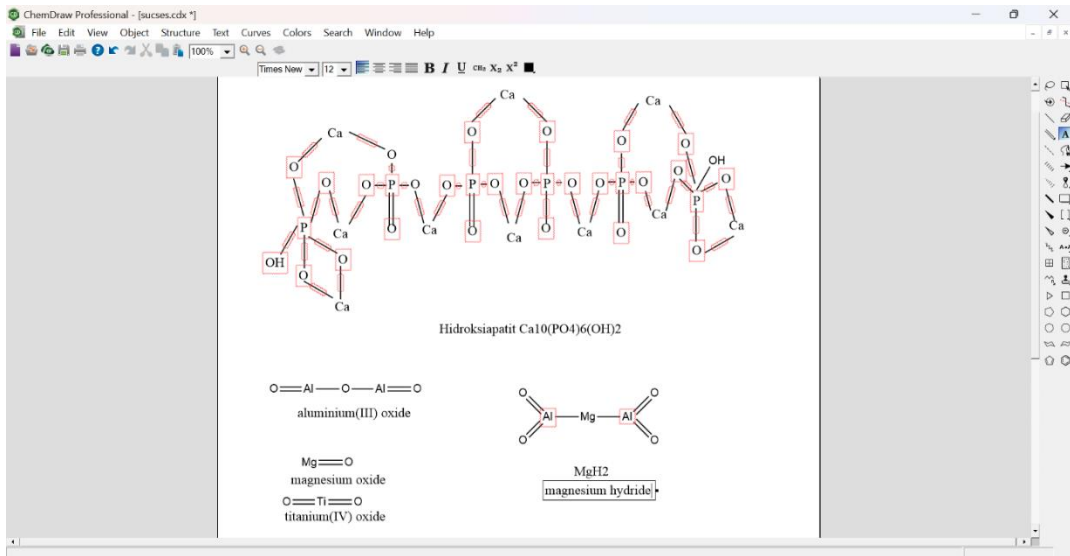
Gambar B.5 Distribusi *Heat Flux* dengan Pemanasan 850°C pada Waktu
a)3600 detik, b)7200 detik, dan c)10800 detik



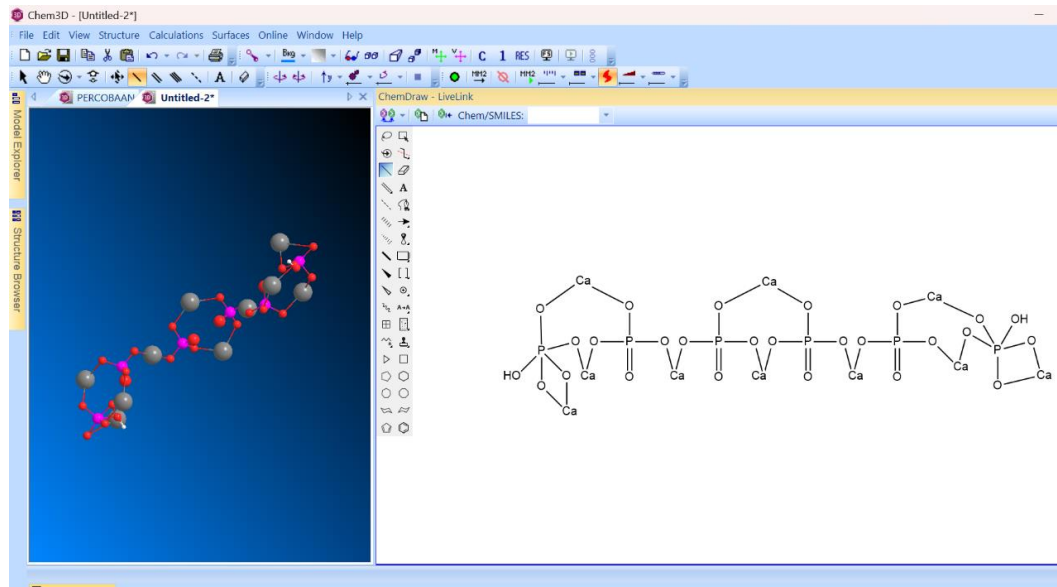
Gambar B.6 Distribusi Heat Flux dengan Pemanasan 950°C pada Waktu
d) 3600 detik, b) 7200 detik, dan c) 10800 detik



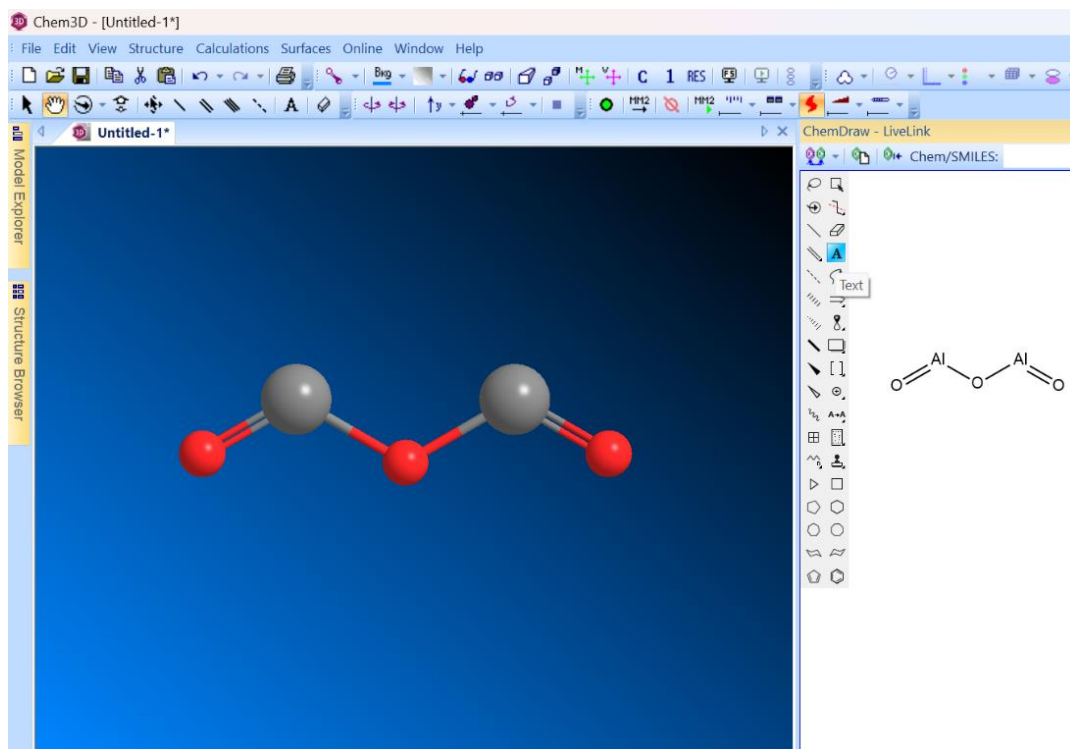
Gambar B.7 Normal Stress pada Tekanan a) 166 MPa; b) 171 MPa; c) 176 MPa



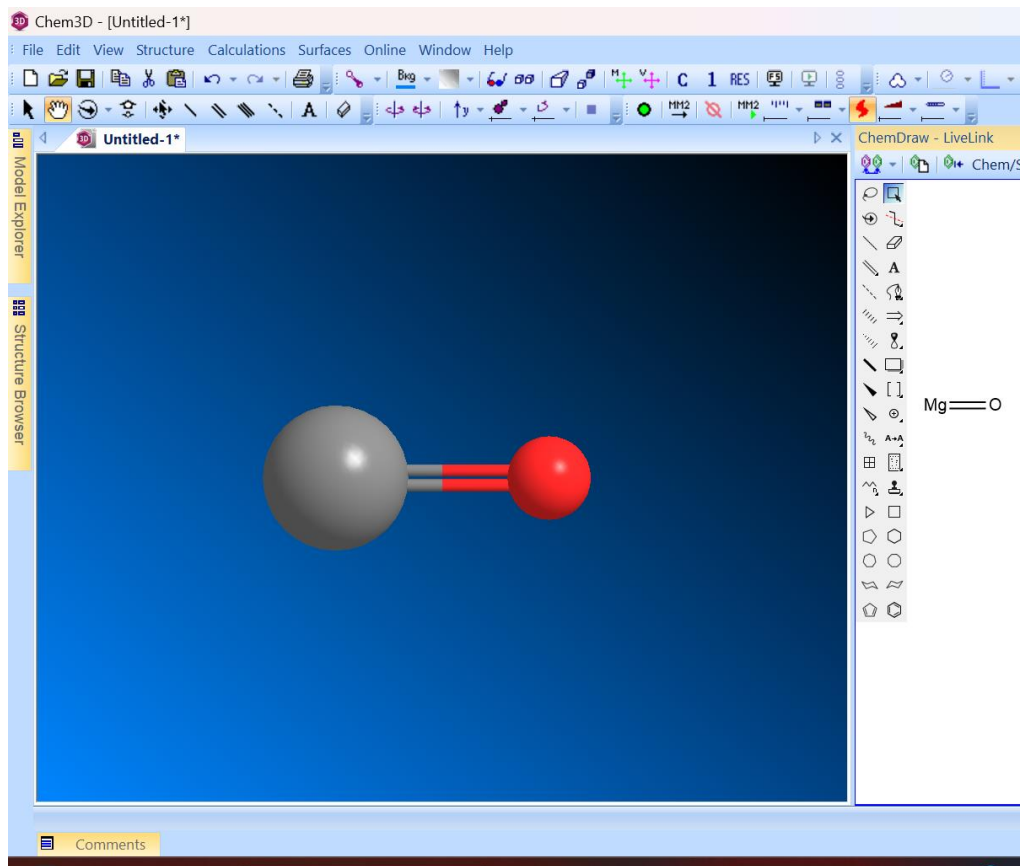
Gambar B.8 Hasil Struktur Kimia dari Chem Draw



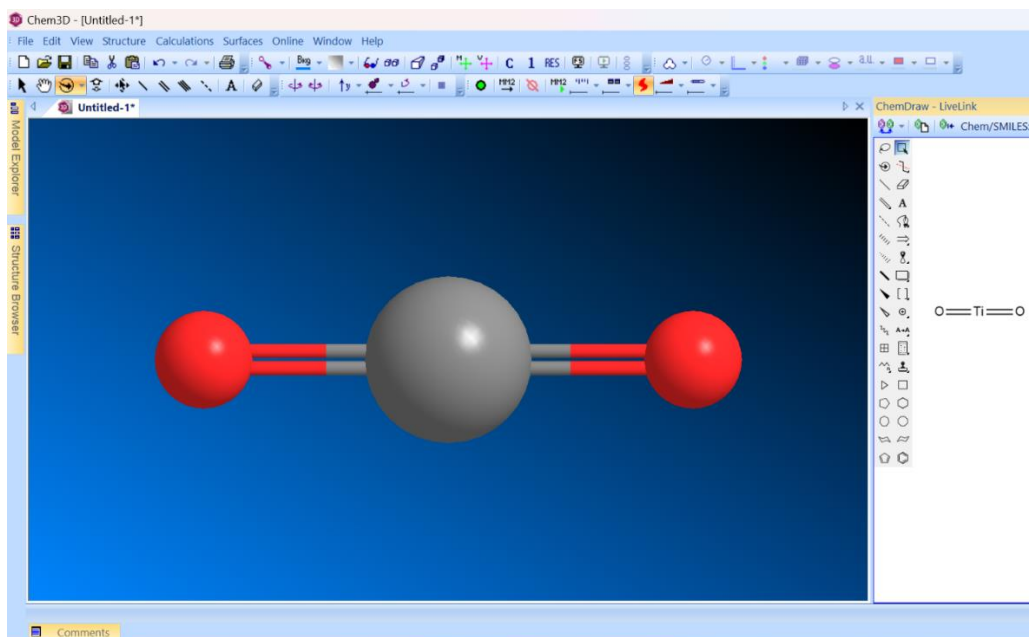
Gambar B.9 Ikatan Atom Hidroksiapatit



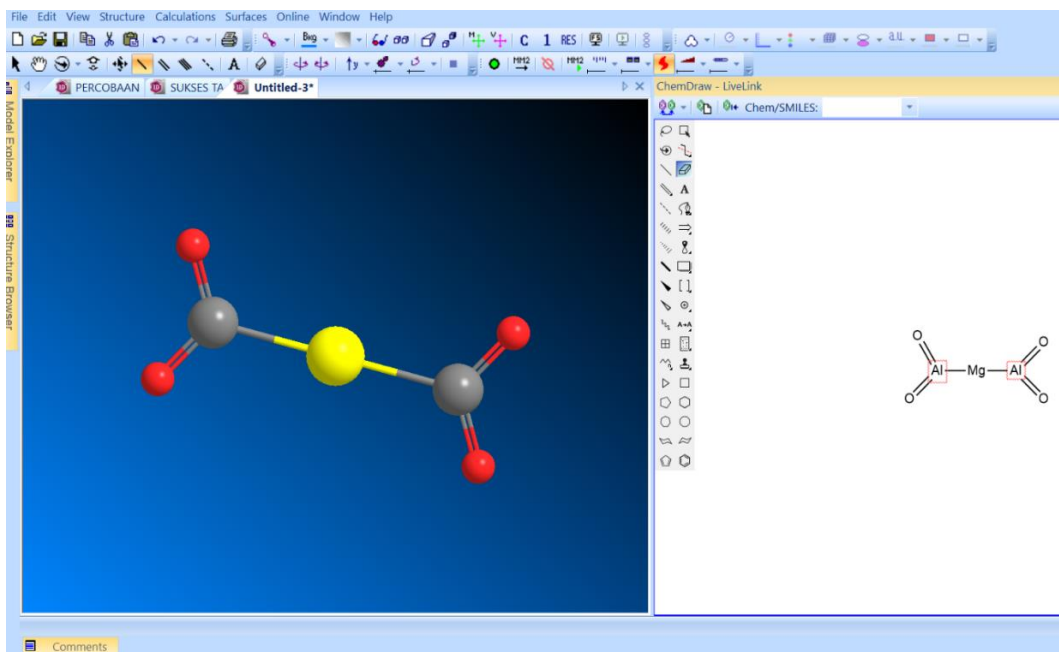
Gambar B.10 Ikatan Atom Aluminium (III) Oxide



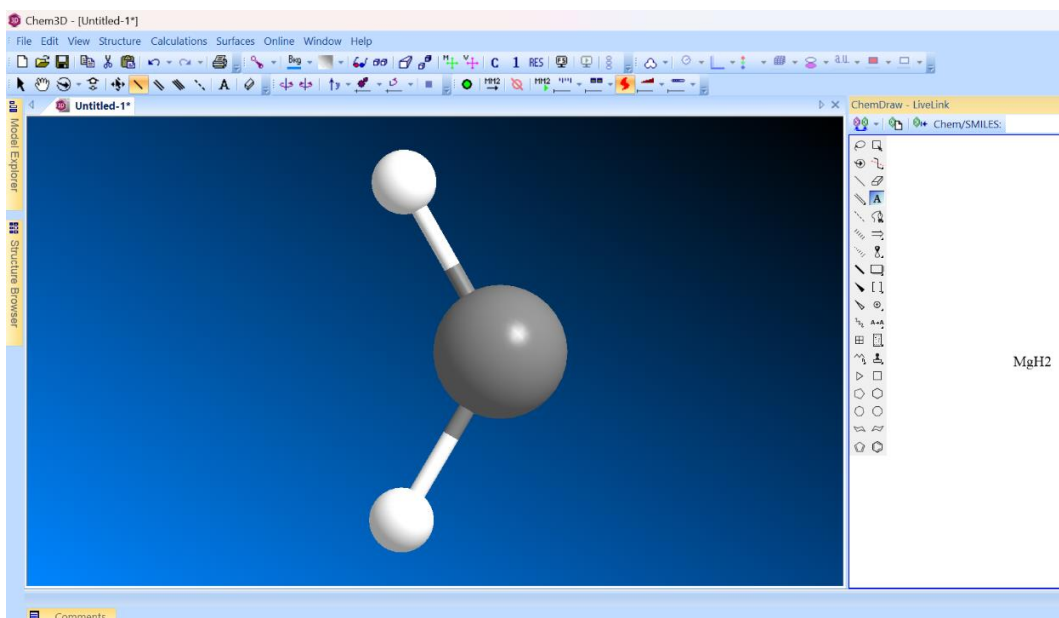
Gambar B.11 Ikatan Atom Magnesium Oxide



Gambar B.12 Ikatan Atom Titanium Oxide



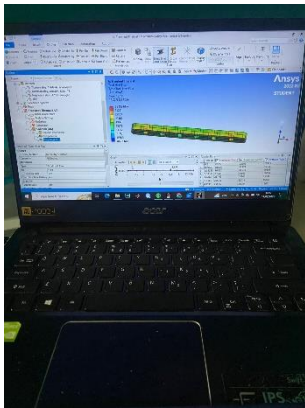
Gambar B.13 Ikatan Atom Magnesium Aluminate (Spinel)



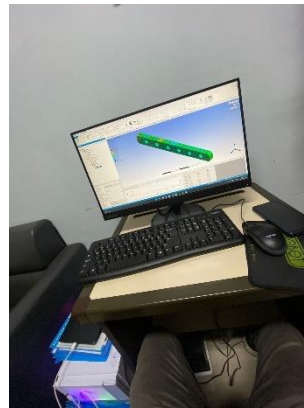
Gambar B.14 Ikatan Atom Magnesium Hydride

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan



Gambar C.1 Laptop



Gambar C.2 Computer