



TUGAS AKHIR- MO184804

“ANALISA EKSPERIMEN DAN NUMERIK PERBAIKAN
PANEL PELAT BAJA A36 YANG MENGALAMI DISTORSI
AKIBAT PENGELASAN DENGAN METODE *SPOT
HEATING*”

IDA BAGUS TEDJA PRANA SUKMA
NRP. 0431154000062

DOSEN PEMBIMBING:

Nur Syahroni ST.,MT., Ph.D.

Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



TUGAS AKHIR- MO184804

“EXPERIMENTS AND NUMERICAL ANALYSIS ON A36 STEEL PLATE PANELS REPAIR THAT EXPERIENCE DISTORTION DUE TO WELDING WITH SPOT HEATING METHOD”

**IDA BAGUS TEDJA PRANA SUKMA
NRP. 0431154000062**

DOSEN PEMBIMBING:

Nur Syahroni ST.,MT., Ph.D.

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

Analisa Eksperimen dan Numerik Perbaikan Panel Pelat Baja A36 yang Mengalami Distorsi Akibat Pengelasan dengan Metode *Spot Heating*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

Ida Bagus Tedja Prana Sukma

NRP. 0431154000062

Disetujui Oleh:

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)



2. Ir. Handayani, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)

3. Ir. Imam Rochani M.Sc. (Penguji)

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'I' followed by a horizontal line and a checkmark-like flourish.

4. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc. (Penguji)

A handwritten signature in black ink, featuring a large, stylized 'Y' followed by several loops and a horizontal line.

Surabaya, Juli 2019

ANALISA EKSPERIMEN DAN NUMERIK PERBAIKAN PANEL PELAT BAJA A36 YANG MENGALAMI DISTORSI AKIBAT PENGELASAN DENGAN METODE *SPOT HEATING*

Nama Mahasiswa : **Ida Bagus Tedja Prana Sukma**
NRP : **04311540000062**
Departemen : **Teknik Kelautan FTK-ITS**
Dosen Pembimbing : **Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.**
Ir. Handayanu, M.Sc.Ph.D.

ABSTRAK

Teknik pengelasan saat ini telah dimanfaatkan dan digunakan secara luas dalam berbagai bidang, terutama dalam proses penyambungan batang-batang pada konstruksi struktur yang berbahan dasar baja dan juga konstruksi dalam bidang permesinan. Hal ini disebabkan karena pengelasan memiliki proses yang lebih sederhana, sehingga mampu menekan biaya produksi. Selain itu, pengelasan juga merupakan kunci teknologi dalam berbagai pembangunan struktur baja, seperti kapal, jembatan, hingga *automobile*. Meskipun demikian, terjadinya distorsi akibat pengelasan adalah hal yang sangat sulit dihindari, karena tidak ratanya proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi pada objek las. Selain itu, distorsi juga disebabkan karena terbentuknya lonjakan tegangan (tegangan sisa) selama proses pengelasan. Untuk memperbaiki distorsi, metode *fairing* merupakan suatu metode pemanasan pada pelat dengan dialiri air untuk meluruskan kembali pelat baja yang telah mengalami distorsi. Salah satu metode *fairing* yang sering digunakan adalah *spot heating*. Dengan melaksanakan metode *fairing* dengan pemberian titik pemanasan setempat/lokal (*spot heating*) diharapkan dapat mengurangi distorsi yang dialami pelat baja akibat pengelasan. Berdasarkan hasil dari validasi data eksperimen dan numerik, pemberian *spot heating* sebanyak 52 buah pada spesimen mampu memperkecil distorsi yang terjadi akibat pengelasan.

Kata kunci: *Panel baja A36, distorsi pengelasan, fairing, spot heating*

EXPERIMENTS AND NUMERICAL ANALYSIS ON A36 STEEL PLATE PANELS REPAIR THAT EXPERIENCE DISTORTION DUE TO WELDING WITH SPOT HEATING METHOD

Name : Ida Bagus Tedja Prana Sukma
NRP : 04311540000062
Department : Teknik Kelautan FTK-ITS
Supervisor : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Handayanu, M.Sc.Ph.D.

ABSTRACT

Nowadays, welding technique has been utilized and used widely in various fields, especially in the process of connecting the rods on the construction of structures based on steel and also construction in machining. This is because welding has a simpler process, so it can suppress production costs. In addition, welding is also a key technology in various construction of steel structures, such as ships, bridges, and automobile. However, the occurrence of welding distortion is very difficult to avoid, as it is a inequality result of the heating and cooling process that occurs in the welding object. In addition, distortion is also caused by the formation of voltage spikes (residual voltages) during the welding process. To correct the distortion, the fairing method is a warming method on the plate with water flowing to straighten the steel plates that have undergone distortion. One method of fairing that is often used is the spot heating. By implementing the fairing method with the provision of local/local warming point (spot heating) can reduce the distortion experienced by welding steel plates. Based on the results of the experimental and numeric data validation, the provision of 52 spot heating in the specimen can minimize the distortion caused by welding.

Keywords: *A36 steel panel, distortion welding, fairing, spot Heating*

KATA PENGANTAR

Om Swastyastu, Salam Sejahtera untuk kita semua,

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Ida Sang Hyang Widhi Wasa, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penyusunan dan penulisan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat diperlukan bagi penulis sebagai bahan penyempurnaan laporan selanjutnya. Penulis berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi dalam bidang teknologi kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, Juli 2019

Ida Bagus Tedja Prana Sukma

UCAPAN TERIMA KASIH

Selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis tidak terlepas dari bantuan serta dukungan baik secara moral maupun material dari banyak pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ida Sang Hyang Widhi Wasa, Tuhan Yang Maha Esa.
2. Ayah, ibu, serta seluruh keluarga yang selalu memberikan dukungan selama perkuliahan dan penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen wali, dosen pembimbing Kerja Praktek, dan dosen pembimbing tugas akhir, yang selalu membimbing dan mengarahkan selama proses perkuliahan dan penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Handayanu M.Sc.Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang selalu membimbing dan mengarahkan proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Seluruh staff pengajar Departemen Teknik Kelautan FTK ITS yang sudah banyak memberikan ilmu dan pengetahuan selama proses perkuliahan hingga proses penyusunan tugas akhir ini.
6. Keluarga besar Tritonus P55 L33 Teknik Kelautan 2015 yang selalu memberikan dukungan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan tepat waktu.
7. Serta semua pihak yang telah turut membantu terselesaikannya penelitian ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------------------------------|
| LEMBAR PENGESAHAN | Error! Bookmark not defined. |
| ABSTRAK | ii |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| UCAPAN TERIMA KASIH..... | v |
| DAFTAR GAMBAR | viii |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan..... | 2 |
| 1.4 Manfaat..... | 2 |
| 1.5 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.6 Hipotesis..... | 3 |
| 1.7 Sistematika Laporan | 3 |
| TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | 5 |
| 2.1 Tinjauan Pustaka | 5 |
| 2.2 Dasar Teori..... | 6 |
| 2.2.1 Pengelasan <i>Shielded Metal Arc Welding</i> (SMAW) | 6 |
| 2.2.2 Siklus <i>Thermal</i> Pengelasan | 8 |
| 2.2.3 Distorsi | 11 |
| 2.2.4 Metode <i>Fairing</i> | 13 |
| 2.2.5 Karakteristik Pelat Baja..... | 15 |
| 2.2.6 Karakteristik Pelat Baja ASTM A36..... | 16 |
| 2.2.7 Metode Elemen Hingga..... | 17 |
| METODOLOGI PENELITIAN..... | 29 |
| 3.1 Diagram Alir..... | 29 |
| 3.2 Penjelasan Diagram Alir | 30 |
| ANALISA DAN PEMBAHASAN | 45 |

| | | |
|---------------------------|--|----|
| 4.1 | Ekspерimen..... | 45 |
| 4.1.1 | Pembuatan Spesimen | 45 |
| 4.1.2 | Pengukuran Distorsi sebelum <i>Spot Heating</i> | 45 |
| 4.1.4 | Proses <i>Spot Heating</i> | 46 |
| 4.1.5 | Pengukuran Distorsi setelah <i>Spot Heating</i> | 46 |
| 4.1.3 | Analisis Distorsi Eksperimen..... | 47 |
| 4.2 | Numerik..... | 49 |
| 4.2.1 | Perhitungan Heat Flux..... | 49 |
| 4.2.2 | <i>Boundary Condition</i> | 52 |
| 4.2.3 | Analisa <i>Transient Thermal</i> | 53 |
| 4.2.3 | Analisa <i>Transient Structural</i> | 53 |
| 4.2.4 | Hasil Distorsi Permodelan Numerik sebelum <i>Spot Heating</i> | 53 |
| 4.2.5 | Hasil Distorsi Permodelan Numerik Distorsi setelah <i>Spot Heating</i> | 54 |
| 4.2.6 | Analisis Distorsi Permodelan Numerik..... | 55 |
| 4.3 | Validasi Eksperimen dengan Numerik..... | 57 |
| 4.3.1 | Analisa Hasil Validasi..... | 58 |
| KESIMPULAN DAN SARAN..... | | 61 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 61 |
| 5.2 | Saran..... | 61 |
| LAMPIRAN..... | | 65 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Proses SMAW | 6 |
| Gambar 2.2 Pemindahan logam cair | 7 |
| Gambar 2.3 Permodelan pengelasan SMAW | 8 |
| Gambar 2.4 Siklus Termal Pengelasan | 8 |
| Gambar 2.5 Permodelan posisi pengelasan | 9 |
| Gambar 2.6 Ilustrasi aliran panas secara konveksi | 11 |
| Gambar 2.7 Hubungan tegangan sisa dengan distorsi | 12 |
| Gambar 2.8 Jenis-jenis distorsi | 12 |
| Gambar 2.9 Metode Pemanasan Setempat | 14 |
| Gambar 2.10 Contoh meshing pada plat | 18 |
| Gambar 2.11 Geometri elemen SOLID70..... | 19 |
| Gambar 2.12 Geometri elemen SOLID90..... | 19 |
| Gambar 2.13 Geometri elemen SOLID185..... | 20 |
| Gambar 2.14 Geometri elemen SOLID186 | 20 |
| Gambar 2. 15 Vektor tegangan | 22 |
| | |
| Gambar 3.1 Lanjutan diagram alir pengerjaan tugas akhir | 30 |
| Gambar 3.2 Rencana geometri spesimen | 31 |
| Gambar 3.3 Proses fitting spesimen di PT. PAL INDONESIA | 32 |
| Gambar 3.4 Proses pengelasan SMAW pada spesimen di PT. PAL INDONESIA .. | 33 |
| Gambar 3.5 Hasil spesimen yang sudah selesai | 33 |
| Gambar 3. 6 Pengukuran distorsi menggunakan dial indicator | 34 |
| Gambar 3.7 Dial indicator | 34 |
| Gambar 3.8 Flat table | 35 |
| Gambar 3.9 Titik rencana pengukuran spesimen | 35 |
| Gambar 3.10 Titik pengukuran pada spesimen | 36 |
| Gambar 3.11 Proses pengukuran spesimen sebelum spot heating | 36 |
| Gambar 3.12 Variasi spesimen 1 dan alur pemanasan, posisi tampak atas..... | 37 |
| Gambar 3.13 Variasi spesimen 2 dan alur pemanasan, posisi tampak atas..... | 38 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 3.14 | Variasi spesimen 3 dan alur pemanasan, posisi tampak atas..... | 38 |
| Gambar 3.15 | Stopwatch untuk mengukur waktu pemanasan..... | 39 |
| Gambar 3.16 | Thermometer gun merk Krisbow..... | 40 |
| Gambar 3.17 | Gas LPG | 40 |
| Gambar 3.18 | Torch..... | 41 |
| Gambar 3.19 | Air untuk pendinginan | 41 |
| Gambar 3.20 | Proses pengukuran setelah spot heating | 42 |
| Gambar 3.21 | Permodelan spesimen menggunakan AutoCAD Inventor | 42 |
| Gambar 3.22 | Input model spesimen ke ANSYS | 43 |
| Gambar 4.1 | Peletakkan displacement pada spesimen | 52 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Koefisien efisien tiap jenis pengelasan | 10 |
| Tabel 2.2 Perbandingan antara pemanasan garis dan pemanasan setempat | 15 |
| Tabel 2.3 Komposisi kimia baja A36 | 17 |
| Tabel 3.1 Komposisi kimia baja A36 | 32 |
| Tabel 3.2 Jumlah titik pemanasan pada spesimen..... | 37 |
| Tabel 4.1 Hasil distorsi spesimen 1 | 45 |
| Tabel 4.2 Hasil distorsi spesimen 2..... | 45 |
| Tabel 4.3 Hasil distorsi spesimen 3..... | 46 |
| Tabel 4.4 Hasil spot heating spesimen 1 | 46 |
| Tabel 4.5 Hasil spot heating spesimen 2 | 46 |
| Tabel 4.6 Hasil spot heating spesimen 3 | 47 |
| Tabel 4.7 Analisis distorsi spesimen 1 | 47 |
| Tabel 4.8 Analisis distorsi spesimen 2 | 48 |
| Tabel 4.9 Analisis distorsi spesimen 3 | 48 |
| Tabel 4.10 Hasil permodelan distorsi sebelum spot heating spesimen 1 | 54 |
| Tabel 4.11 Hasil permodelan distorsi sebelum spot heating spesimen 2 | 54 |
| Tabel 4.12 Hasil permodelan distorsi sebelum spot heating spesimen 3 | 54 |
| Tabel 4.13 Hasil permodelan distorsi setelah spot heating spesimen 1 | 55 |
| Tabel 4.14 Hasil permodelan distorsi setelah spot heating spesimen 2 | 55 |
| Tabel 4.15 Hasil permodelan distorsi setelah spot heating spesimen 3 | 55 |
| Tabel 4.16 Analisis distorsi spot heating spesimen 1..... | 56 |
| Tabel 4.17 Analisis distorsi setelah spot heating spesimen 2..... | 56 |
| Tabel 4.18 Analisis distorsi setelah spot heating spesimen 3..... | 57 |
| Tabel 4.19 Validasi hasil distorsi eksperimen dengan permodelan numerik | 57 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknik pengelasan saat ini telah dimanfaatkan dan digunakan secara luas dalam berbagai bidang, terutama dalam proses penyambungan batang-batang pada konstruksi struktur yang berbahan dasar baja dan juga konstruksi dalam bidang permesinan. Perancangan dan cara pengelasan harus memperhatikan kesesuaian antara sifat las dengan kegunaan konstruksi dan lingkungan sekitarnya (Wiryosumarto & Okumura, 1996).

Pengelasan juga merupakan kunci teknologi dalam berbagai pembangunan struktur baja, seperti kapal, jembatan, hingga *automobile*. Namun, distorsi adalah hal yang sangat sulit dihindari dalam pengelasan, karena ketidakrataan pemanasan dan pendinginan objek las (Wei, Dean, & Hidekazu, 2005). Dalam pelaksanaannya, juru las (*welder*) belum memperhatikan hal tersebut dengan seksama, sehingga masih banyak cacat las yang terjadi, serta kekuatan hasil sambungan pada lasan yang belum maksimal.

Distorsi juga disebabkan karena terbentuknya lonjakan tegangan (tegangan sisa) selama proses pengelasan. Adanya tegangan sisa tersebut dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan dan perubahan bentuk struktur dari yang diharapkan (Wijoyo, 2011). Distorsi las dapat dikurangi dengan cara mengatur masukan panas dan panjang pengelasan, meminimalkan tebal pelat, serta penentuan dalam urutan proses pengelasan (Radaj, 1992).

Metode *fairing* merupakan suatu metode pemanasan pada pelat dengan dialiri air untuk meluruskan kembali pelat baja yang telah mengalami distorsi (Rois, Pramudya, & Pranatal., 2018). Pemanasan yang dilakukan akan berdampak pada perubahan sifat mekanik dan struktur material, sehingga pelat baja yang semula mengalami distorsi dapat lurus kembali. Salah satu metode *fairing* yang digunakan

adalah *spot heating*. Metode ini digunakan secara luas dalam perbaikan distorsi, terutama pada struktur yang memiliki pelat tipis (Masubuchi, 2013).

Berdasarkan uraian tersebut, diharapkan *fairing* dengan metode pemberian titik pemanasan (*spot heating*) dapat memperbaiki distorsi yang dialami pelat baja akibat pengelasan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan numerik dan eksperimen metode *spot heating* untuk perbaikan distorsi pada panel pelat baja A36?
2. Berapakah jumlah titik pemanasan yang efektif untuk memperbaiki distorsi pada panel pelat baja A36?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir yang ingin dicapai adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pemodelan numerik dan eksperimen metode *spot heating* untuk perbaikan distorsi panel pelat baja A36.
2. Menganalisis jumlah titik pemanasan yang efektif untuk memperbaiki distorsi pada panel pelat baja A36.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Diharapkan dapat dijadikan acuan untuk pelaksanaan *fairing* dengan metode *spot heating* untuk perbaikan distorsi pelat baja A36.
2. Memberi informasi kepada pembaca mengenai metode *fairing* untuk perbaikan distorsi pada panel pelat baja A36.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan adalah Baja A36
2. Jenis pengelasan yang digunakan adalah SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*).
3. Material benda uji dianggap memiliki struktur rata, bersifat *linear elastic*.
4. Tidak meninjau perubahan struktur mikro yang diakibatkan karena pengelasan maupun *spot heating*.
5. Dikarenakan keterbatasan peralatan, gas yang digunakan untuk pemanasan adalah gas LPG.

1.6 Hipotesis

Distorsi yang disebabkan saat pengelasan dapat diperbaiki dengan *fairing* metode titik pemanasan (*spot heating*) pada panel pelat baja A36.

1.7 Sistematika Laporan

BAB I PENDAHULUAN

Bab I atau pendahuluan menjelaskan tentang berbagai hal yang melatarbelakangi penulisan tugas akhir ini, seperti perumusan masalah yang perlu diselesaikan, batasan-batasan dalam menangani permasalahan yang dirumuskan, tujuan serta manfaat dari tugas akhir ini, serta hipotesis dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab II akan dibahas mengenai tinjauan pustaka serta dasar teori yang digunakan dalam penulisan tugas akhir ini. Dasar teori berisi tentang pembahasan ilmu pengetahuan oleh para peneliti, persamaan dan rumus, serta code yang digunakan sebagai pedoman penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berikutnya adalah bab III mengenai metodologi penelitian dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) yang membahas mengenai tahapan dan langkah pengerjaan tugas akhir ini serta metode-metode yang digunakan.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab IV menjelaskan berbagai data yang akan digunakan dalam penelitian tugas akhir, memberi penjelasan dan keterangan mengenai segala permodelan yang dilakukan, analisis, pengolahan dan pembahasan dari data hasil luaran permodelan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab V yang menjelaskan kesimpulan dan saran mengenai hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dari penelitian tugas akhir, serta rekomendasi yang diberikan untuk penelitian lebih lanjut. Dalam bab ini juga akan dituliskan jawaban untuk permasalahan yang telah dirumuskan pada bab I.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan hasil tinjauan terhadap penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, terdapat beberapa penelitian yang berkaitan dengan penelitian yang peneliti lakukan. Penelitian pertama yang berhasil peneliti temukan adalah penelitian yang dilakukan oleh (Sulaiman, 2010) yang berjudul “Pengaruh Proses Pelengkungan dan Pemanasan Garis Pelat Baja Kapal AISI E 2512 Terhadap Nilai Kekerasan dan Laju Korosi”. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa pengaruh proses pelengkungan pelat baja bagian sisi lambung kapal dengan bantuan metode pemanasan garis (*line heating*), terhadap temperature, perubahan sifat mekanis baja terutama sifat kekerasan pelat baja serta kerusakan baja akibat korosi. Hasil dari penelitian ini adalah metode *bending line heating* dapat melengkungkan baja AISI E 2512 dengan baik pada suhu 600°C.

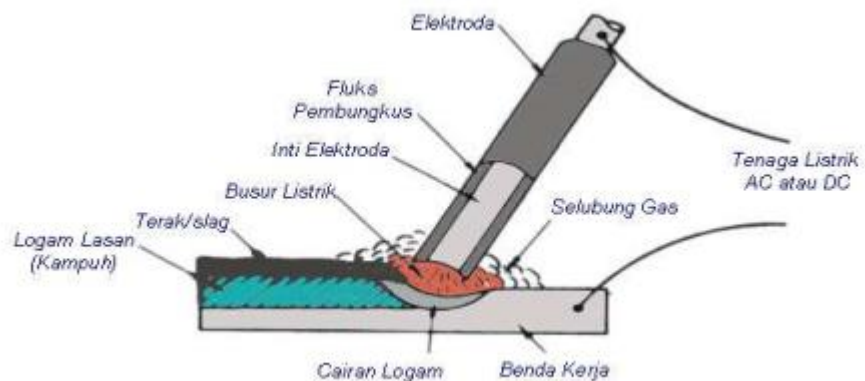
Penelitian berikutnya yang peneliti temukan adalah penelitian yang dilakukan oleh (Kozin, 2012) yang berjudul “Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Roda Kereta Api Buatan Lokal”. Pada penelitian ini, Kozin (2012) membahas metode yang berkaitan dengan metode yang ingin peneliti terapkan, yaitu metode pemanasan setempat (*spot heating*). Hasil dari penelitian ini adalah adanya pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik dari roda kereta api buatan lokal. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan suhu pemanasan, *holding time* pemberian panas, serta metode *quenching* yang digunakan, baik menggunakan udara atau air.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)

Pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dikenal juga dengan istilah *Manual Metal Arc Welding* (MMAW) atau las elektroda terbungkus, adalah suatu proses penyambungan dua keping logam atau lebih menjadi satu sambungan yang tetap, menggunakan sumber panas listrik bahan tambah/pengisi berupa elektroda yang terbungkus.

Pada proses pengelasan SMAW, busur api listrik yang terjadi antara ujung elektroda dan logam induk (*base metal*) akan menghasilkan panas. Panas ini akan mencairkan ujung elektroda dan benda kerja secara setempat. Elektroda yang digunakan berupa kawat yang dibungkus oleh pelindung (fluks). Dengan adanya pencairan ini maka kempuh las akan terisi oleh logam cair yang berasal dari elektroda dan logam induk, terbentuklah kawah cair, lalu mengalami pembekuan maka terjadilah logam lasan (*weldment*) dan terak (*slag*), seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Proses SMAW (Wiryosumarto & Okumura, 1996)

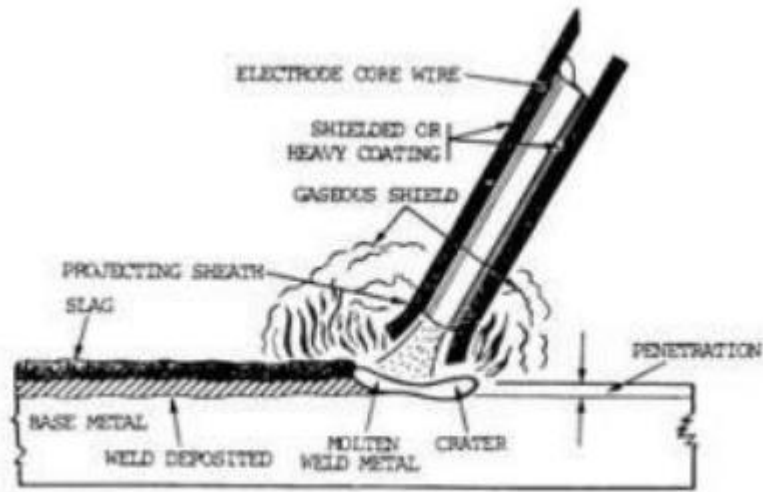
Proses pemindahan logam elektroda terjadi saat ujung elektroda mencair dan membentuk butiran-butiran yang terbawa oleh arus dari busur listrik yang

terjadi. Apabila menggunakan arus listrik yang besar, maka butiran logam cair yang terbawa akan menjadi halus. Sebaliknya, bila arus yang dipakai lebih kecil, maka butirannya akan menjadi lebih besar. Ukuran butiran yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Pemindahan logam cair (Wiryosumarto & Okumura, 1996)

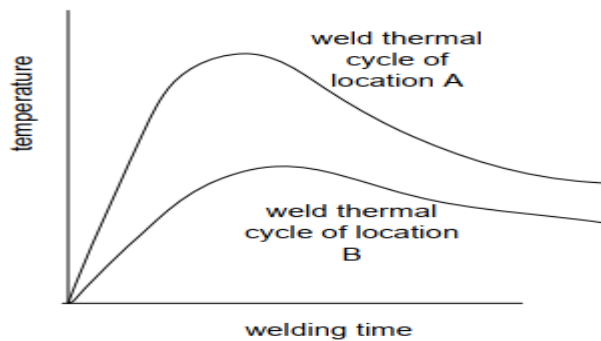
Proses pemindahan logam cair seperti diterangkan diatas sangat mempengaruhi dari sifat-sifat *weldability* dari logam. Secara umum dapat dikatakan bahwa logam yang memiliki *weldability* tinggi apabila pemindahan yang terjadi dengan butiran yang halus, sedangkan proses pemindahan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan juga oleh komposisi bahan *fluks* yang digunakan. Selama proses pengelasan terjadi, fluks yang digunakan sebagai pembungkus elektroda mengalami pencairan dan terapung pada cairan kawah las, kemudian mengalami pembekuan dan menutupi deposit las menjadi terak las (*slag*). *Slag* inilah yang akan melindungi hasil lasan yang baru membeku agar tidak dipengaruhi oleh udara luar (oksidasi). Pada saat itu juga bahan fluks yang terbakar berubah menjadi gas yang berfungsi sebagai pelindung dari udara luar dan juga sebagai pemantap busur. Permodelan pengelasan SMAW dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



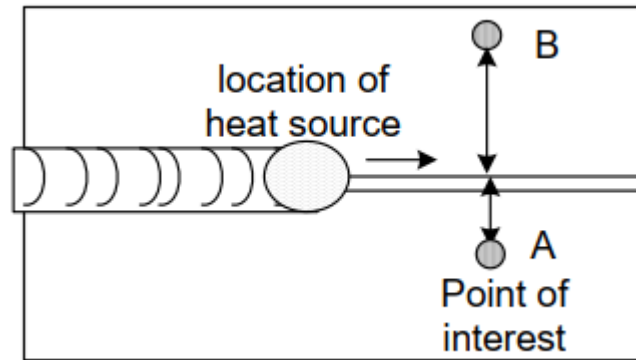
Gambar 2.3 Permodelan pengelasan SMAW (Wiryosumarto & Okumura, 1996)

2.2.2 Siklus *Thermal* Pengelasan

Ketika sebuah benda dikenai proses pengelasan, temperatur di daerah busur las akan mengalami perubahan dengan sangat cepat. Hal ini akan mengakibatkan perbedaan temperatur yang terjadi di daerah sekitar busur las. Selanjutnya, panas akan mengalir ke sekitar daerah pengelasan yang memiliki temperatur lebih rendah, sehingga akan terjadi distribusi panas ke daerah di sekitar alur las. Distribusi temperatur pada setiap titik bagian daerah lasan tidak sama antara satu dengan yang lainnya. Siklus *thermal* selama proses pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.4 Siklus Termal Pengelasan (Pamungkas, 2016)



Gambar 2.5 Permodelan posisi pengelasan (Pamungkas, 2016)

Pemanasan dan pendinginan pada benda las, akan menyebabkan perubahan struktur mikro pada bagian-bagian tertentu pada benda las. Perubahan struktur mikro yang harus diperhatikan adalah di daerah Heat Affected Zone (HAZ). Perubahan struktur mikro akan merubah sifat mekanik dari daerah yang mengalami perubahan tersebut. Sifat dari daerah HAZ akan mempengaruhi kualitas sambungan las, yang mana sifat ini tergantung pada lamanya proses pendinginan. Pemanasan yang terjadi pada saat pengelasan mendapat sumber panas dari elektroda yang digunakan. Nilai sumber panas (*net heat input*) dapat dihitung dengan Persamaan 2.1 dibawah ini:

$$Q = \frac{\eta V I}{v} \quad (2.1)$$

Dimana:

Q : net heat input/effective thermal power (watt)

η : Koefisien efisiensi pengelasan

V : Tegangan busur (volt)

I : Arus listrik (Ampere)

v : Kecepatan pengelasan (mm/s)

Nilai koefisien efisiensi pengelasan akan berbeda untuk setiap jenis pengelasannya. Nilai koefisien efisien pengelasan untuk masing-masing jenis pengelasan dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Koefisien efisien tiap jenis pengelasan

| Jenis Pengelasan | η |
|--------------------------------|-------------|
| SAW – Steel | 0,91 – 0,99 |
| SMAW – Steel | 0,66 – 0,75 |
| FCAW – SS | 0,78 – 0,87 |
| GMAW – CO ₂ ; Steel | 0,75 – 0,93 |
| GMAW – Ar ; Steel | 0,66 – 0,77 |
| GTAW – Ar ; Steel | 0,25 – 0,75 |
| GTAW – He ; Al | 0,50 – 0,80 |
| GTAW – Ar ; Al | 0,22 – 0,46 |

Proses perpindahan atau distribusi panas yang terjadi saat pengelasan adalah proses konduksi dan konveksi. Proses konduksi terjadi pada logam yang menerima panas secara langsung dikarenakan terjadinya sentuhan secara langsung antara logam dan elektroda. Sedangkan proses konveksi terjadi karena permukaan yang terkena langsung dengan udara. Proses konduksi lebih dominan daripada konveksi karena memiliki nilai yang lebih tinggi dan panasnya ditransferkan ke semua arah.

Peristiwa konveksi adalah terjadinya aliran panas menggunakan media perantara fluida. Seperti konduksi, perbedaan suhu pada solid *base metal* dengan fluida pada *weld metal* menyebabkan terjadinya transfer energi dari daerah dengan suhu tinggi ke daerah dengan suhu rendah, seperti yang tertera pada Gambar 2.6. Persamaan *heat transfer* secara konveksi diperoleh dari persamaan Hukum Pendinginan Newton:

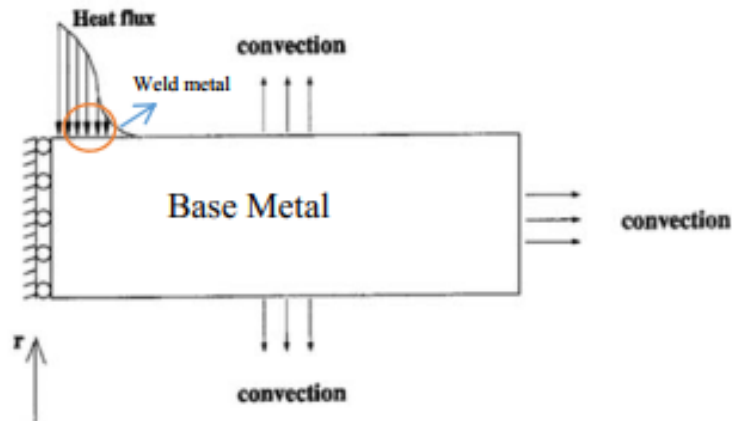
$$Q_h = h (T - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

Keterangan:

Q_h : aliran panas secara konveksi (kW/m²)

h : koefisien konveksi (kW/m²°C)

- T : Temperatur pada permukaan solid ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{∞} : Temperatur fluida pengelasan ($^{\circ}\text{C}$)

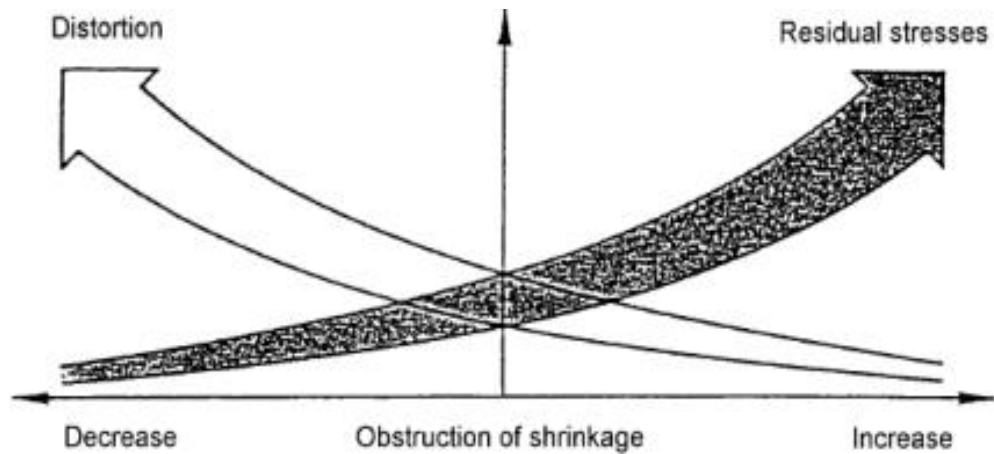


Gambar 2.6 Ilustrasi aliran panas secara konveksi (Pamungkas, 2016)

2.2.3 Distorsi

Distorsi dan tegangan sisa merupakan hal yang sangat erat terjadinya dengan proses pengelasan. Proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi selama pengelasan akan menimbulkan regangan *thermal* antara logam las dan logam induk di sepanjang daerah jalur las. Regangan ini disertai terjadinya perubahan plastis. Tegangan yang ditimbulkan oleh regangan ini akan menyebabkan gaya dalam (*internal force*) sehingga dapat menyebabkan terjadinya *bending*, *buckling*, dan rotasi. *Displacement* ini yang disebut distorsi pada pengelasan.

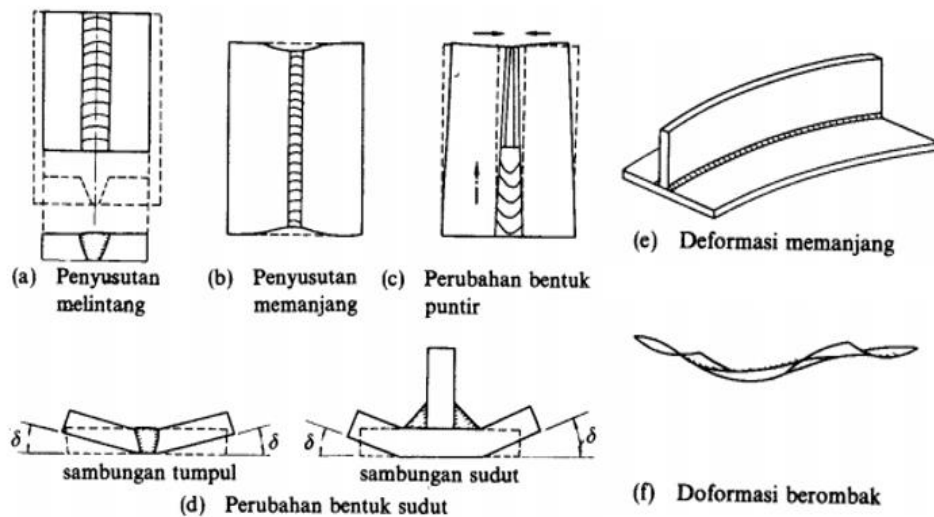
Dalam hal pengelasan, besar tegangan sisa dan distorsi yang terjadi selalu berbanding terbalik, misalnya pada kasus pelat tipis yang cenderung menghasilkan distorsi yang tinggi dan memberikan keuntungan karena tegangan sisa yang dihasilkan rendah. Pada pelat yang tebal, tegangan sisa yang dihasilkan tinggi, namun memberikan keuntungan karena distorsi yang dihasilkan kecil. Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Hubungan tegangan sisa dengan distorsi (Syahroni & Hidayat, 2012)

2.2.3.1 Jenis-jenis Distorsi

Jenis-jenis distorsi atau perubahan bentuk, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 dapat dikelompokkan sebagai berikut



Gambar 2.8 Jenis-jenis distorsi (Wiryo Sumarto & Okumura, 1996)

- a. Penyusutan melintang, yaitu penyusutan yang terjadi secara tegak lurus terhadap garis lurus.

- b. Penyusutan memanjang, adalah penyusutan yang terjadi searah garis las
- c. Perubahan bentuk puntir atau distorsi rotasi, yaitu perubahan yang terjadi dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat.
- d. Perubahan bentuk sudut atau distorsi sudut, yaitu perubahan dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap pelat.
- e. Deformasi memanjang atau distorsi memanjang, yaitu perubahan sudut pada bidang pelat yang berkaitan dengan perluasan termal.
- f. Deformasi berombak atau distorsi *buckling*, yaitu tegangan tekan yang berkaitan dengan panas yang menyebabkan terjadinya ketidakstabilan jika mengenai pelat tipis.

2.2.4 Metode *Fairing*

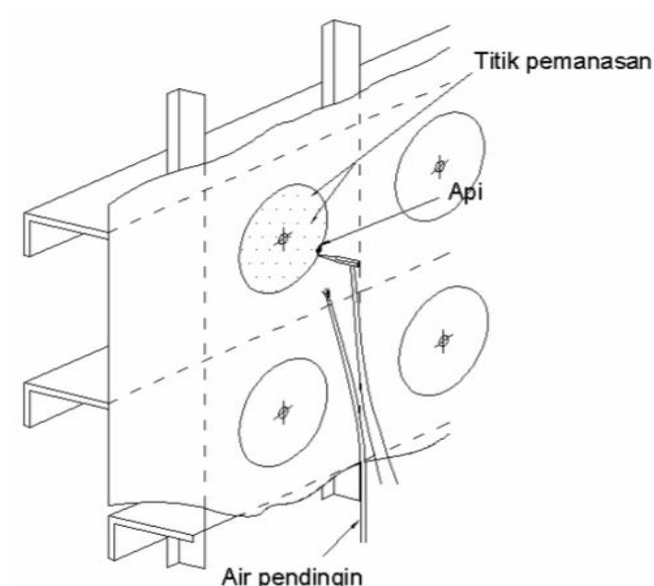
Metode *fairing* merupakan suatu metode pemanasan pada pelat dengan dialiri air untuk meluruskan kembali pelat baja yang telah mengalami distorsi (Rois, Pramudya, & Pranatal., 2018). Menurut Furunaka (2002), metode *fairing* terbagi menjadi 2, yaitu metode garis (*line heating*) dan metode titik (*spot heating*). Metode titik terdiri atas pemanasan lokal pada daerah yang telah ditentukan dengan pemanas (*flame head*) yang sesuai dan dilanjutkan dengan pendinginan cepat (*quenching*). Kepala pemanas (*heating head*) dapat digunakan dalam bentuk desain lubang tunggal (*single orifice*) ataupun lubang majemuk (*multiple orifice*), tergantung pada luas daerah yang akan dikeraskan. Masukan panas yang diterima harus seimbang untuk memperoleh keseragaman temperatur pada keseluruhan daerah tersebut.

Setelah proses pemanasan, benda kerja akan didinginkan dengan metode *immersion quenching*, ataupun *spray quenching*. Pada dasarnya, metode titik tidak membutuhkan peralatan yang sangat kompleks (kecuali penahan benda kerja dan pencatat waktu untuk menyamakan lamanya proses dari masing-masing benda kerja). Walaupun demikian, pengoperasian dapat dilakukan

dengan otomasi antara lain dengan menerapkan *spray quenching* atau *spray bath* yang sama. Media pendingin yang umumnya digunakan pada proses perlakuan panas (Callister Jr, 1994), adalah: air, oli dan udara.

Pendinginan dengan oli sangat cocok untuk perlakuan panas terhadap beberapa paduan baja. Pendinginan dengan menggunakan air, dapat menyebabkan timbulnya retak dan pelengkungan. Sedangkan pendinginan dengan udara kebanyakan dapat menghasilkan struktur *pearlite* (Callister Jr, 1994). Proses pendinginan pada pemanasan titik umumnya dengan menggunakan air, karena tujuan dari proses pemanasan titik adalah untuk memperbaiki pelat yang mengalami distorsi.

Sedangkan pendinginan dengan media oli tidak digunakan karena faktor biaya yang akan dikeluarkan cukup tinggi. Metode *spot heating* dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Metode Pemanasan Setempat (PT. DUMAS Shipyard)

Metode pemanasan garis (*line heating*) dan metode pemanasan titik (*spot heating*) memiliki perbandingan satu sama lain. Perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Perbandingan antara pemanasan garis dan pemanasan setempat (Pribadi & Hendroprasetyo, 1997)

| Parameter | Pemanasan Garis | Pemanasan Setempat |
|--------------------------|-----------------|----------------------|
| Pengerutan | Sedikit | Banyak |
| Hasil Pemanasan | Halus | Masih terdapat bekas |
| Temperatur Pemanasan | Relatif rendah | Tinggi |
| Teknik | Agak Sulit | Mudah |
| Pengerjaan dengan Palu | Tidak ada | Perlu |
| Kerusakan di sekitar HAZ | Sedikit | Banyak |

2.2.5 Karakteristik Pelat Baja

Pelat baja merupakan lembaran baja paduan yang terdiri dari besi dan karbon serta unsur lainnya. Karbon merupakan salah satu unsur yang penting karena dapat mempengaruhi sifat kekerasan dan keuletan baja. Pada industri perkapalan, baja merupakan logam yang banyak digunakan baik dalam bentuk pelat, profil, pipa, balok, batang, dan sebagainya.

Baja yang digunakan pada industri perkapalan memiliki kandungan karbon antara 0,14 % hingga 0,23 %, dan terdiri dari lima tingkatan baja yaitu Grade A-E, dimana proses fabrikasi, inspeksi dan pengujian dilakukan berdasarkan kondisi tertentu dan hasil akhir di sertifikasi oleh biro klasifikasi (*classification societies*). Baja kekuatan tarik tinggi (*high tensile steel*) dibuat agar memiliki sifat mekanis yang lebih tinggi dalam kekerasan (*toughness*), ulet (*ductility*), mudah di las (*weldability*) dan kekuatan (*strength*), dengan penambahan unsur *vanadium, chromium, nickle*, dan *niobium*.

Unsur unsur paduan baja dapat berupa mangan (Mn), nikel (Ni), kromium (Cr), molibden (Mo), silikon (Si) dan lain- lain. Berdasarkan kadar komponen-komponen kimiawi tersebut, ketentuan ASTM menggolongkan material baja menjadi 5 jenis, yaitu:

1. *Carbon steel*, tegangan leleh berkisar antara 33 s/d 36 ksi. Baja ini merupakan baja yang digolongkan berdasarkan kadar karbon yang dikandung. Carbon steel digolongkan menjadi 4 jenis, yaitu low carbon (kurang dari 0,15%), mild carbon (antara 0,15%-0,29%), medium carbon (0,3%-0,59%), dan high carbon (antara 0,6%-1,7%). Tipe carbon steel yang sering dimanfaatkan adalah grade A36 dan Fe37 yang memiliki tegangan leleh nominal $f_y=250$ Mpa.
2. *High strength steel*, tegangan leleh berkisar antara 42-50 ksi. Contoh baja yang tergolong high strength steel adalah A588.
3. *High strength low-alloy steel*, tegangan leleh berkisar antara 40-65 ksi. Contoh baja yang termasuk high strength low-alloy steel adalah A242, A441, Fe52, dsb.
4. *Quenched and tempered carbon steel*, tegangan leleh berkisar antara 50-60 ksi. Contoh baja yang termasuk golongan ini adalah tipe A537.
5. *Alloy steel*, tegangan leleh berkisar antara 90-100 ksi. Contoh baja yang tergolong alloy steel adalah A514 dan A517.

2.2.6 Karakteristik Pelat Baja ASTM A36

ASTM A36 adalah baja ringan dan *hot-rolled* yang paling umum digunakan. Baja ini memiliki sifat pengelasan yang sangat baik dan cocok untuk proses penggilingan, pelubangan, pengeboran dan permesinan. Baja ASTM A36 sering digunakan dalam berbagai bidang konstruksi, diantaranya sebagai berikut:

- Konstruksi pengelasan, kuncian, dan tumpuan pada jembatan, bangunan dan *oil rigs*.
- Digunakan pada pembentukan tangki, pelat dasar, otomotif dan bagian permesinan lainnya.
- Digunakan untuk berbagai bagian yang diperoleh dengan pemotongan api seperti di garasi parkir, trotoar, landasan pendaratan perahu dan parit.

Baja ASTM A36 memiliki komposisi kimia yang terdiri dari Karbon, Fosfor, Sulfur, Silica, Tembaga dan Mangan. Komposisi kimia baja ASTM A36 secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Komposisi kimia baja A36 (ASTM *Standard Specification for Carbon Structural Steel*)

| Bahan | C | P | Fe | S | Si | Cu | Mn |
|---------------|-----------|------|----|------|-------------|------|------|
| Kandungan (%) | 0,25-0,29 | 0,04 | 98 | 0,05 | 0,40 max | 0,20 | 1,03 |

2.2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk membantu menyelesaikan permasalahan dalam berbagai bidang rekayasa seperti geometri, pembebanan, serta sifat-sifat dari material yang tergolong sangat rumit. Hal-hal tersebut sangat sulit untuk diselesaikan dengan metode matematis (Logan, 2000). Pendekatan pada metode elemen hingga menggunakan informasi-informasi pada titik simpul (*node*). Pada proses penentuan titik simpul tersebut yang dikenal dengan nama pendiskritan (*discretization*), sebuah system dibagi menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, kemudian penyelesaian masalah dilakukan pada bagian-bagian tersebut dan selanjutnya digabung kembali sehingga diperoleh solusi yang menyeluruh.

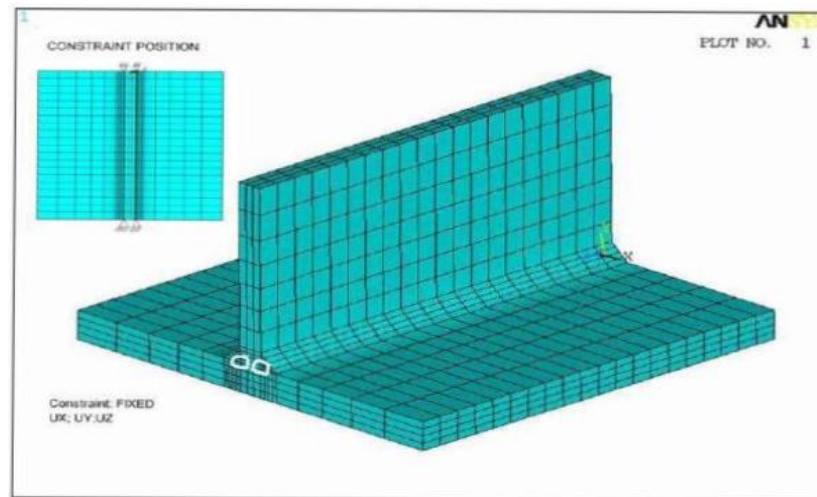
Secara umum tahapan dalam perumusan metode elemen hingga adalah sebagai berikut,

1. Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen

Pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan hasil dari analisis yang dilakukan. Jenis elemen yang dipilih harus sesuai analisis agar dapat menghasilkan hasil analisis yang mendekati keadaan sebenarnya. Hasil analisis yang mendekati keadaan sebenarnya juga tergantung dari pendiskritan yang mana dalam permodelan disebut dengan proses *meshing*. Pemilihan ukuran dalam proses *meshing* harus mewakili keadaan struktur yang sebenarnya.

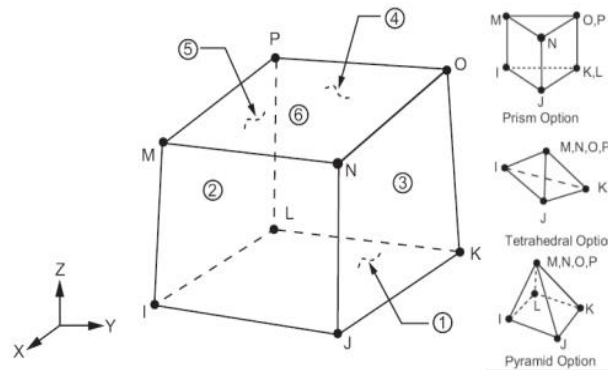
Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas *hard disk* dan *memory* yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* akan semakin banyak, sehingga untuk proses akan lebih berat.

Contoh *meshing* pada sebuah model dapat dilihat pada Gambar 2.10. *Meshing* untuk ukuran elemen kecil biasanya digunakan untuk analisis dengan kondisi yang mengalami perubahan secara drastic. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisis yang perubahannya cenderung konstan.



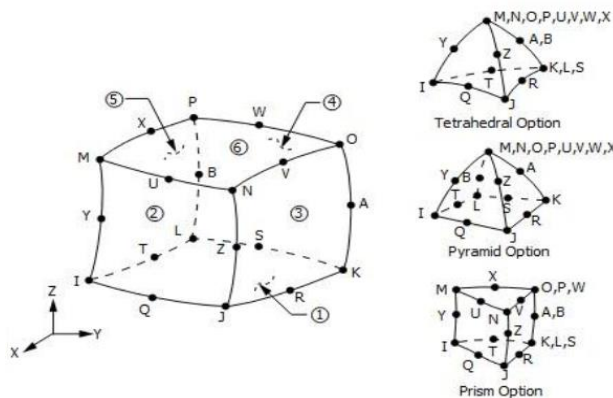
Gambar 2.10 Contoh meshing pada plat (Syahroni & Hidayat, 2012)

Pada analisis *thermal*, jenis elemen yang digunakan adalah SOLID70 dan SOLID90. Elemen SOLID70 memiliki 8 *nodes* dengan masing-masing *node* memiliki satu derajat kebebasan dan temperatur. Contoh elemen SOLID70 dapat dilihat pada Gambar 2.11. Elemen ini memiliki kemampuan menghantarkan panas sehingga dapat digunakan untuk analisis *thermal transient* dan *steady-state*. Elemen SOLID70 dapat digunakan untuk membentuk elemen prisma, *tetrahedral*, dan juga piramida.



Gambar 2.11 Geometri elemen SOLID70 (ANSYS *Mechanical APDL Element Reference*)

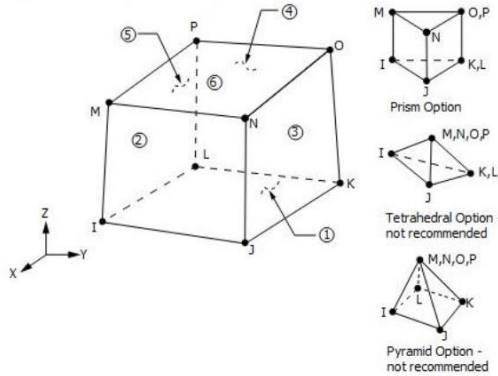
Sedangkan SOLID90 memiliki kemampuan yang sama dengan SOLID70, yang membedakan adalah jumlah *node* pada SOLID90 sebanyak 20 derajat kebebasan seperti pada Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Geometri elemen SOLID90 (ANSYS *Mechanical APDL Element Reference*).

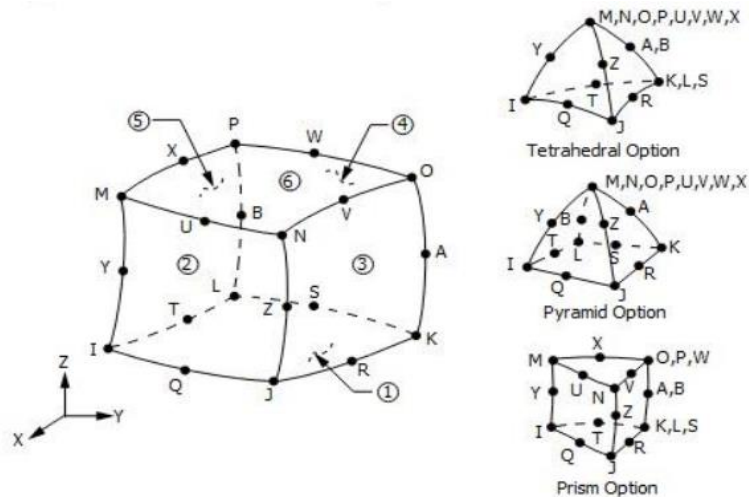
Jenis elemen yang digunakan pada analisis struktural adalah SOLID185 dan SOLID186. Elemen SOLID185 memiliki delapan *nodes* dengan masing-masing *node* memiliki tiga derajat kebebasan. Elemen ini dapat bertranslasi ke arah sumbu x dan y. Elemen ini memiliki kemampuan plastisitas, elastisitas yang tinggi, defleksi dan regangan yang besar.

Elemen SOLID185 dapat membentuk elemen prisma, *tetrahedral*, dan piramida. Elemen SOLID185 dapat dilihat pada Gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Geometri elemen SOLID185 (ANSYS Mechanical APDL *Element Reference*)

Sedangkan untuk elemen SOLID186 adalah elemen solid 3D yang memiliki 20 *nodes* untuk mengetahui perilaku *displacement*, mempunyai kemampuan yang sama dengan SOLID185. Perbedaannya terletak pada jumlah *nodenya* yaitu 20 *nodes* dan tiap *node* memiliki 3 derajat kebebasan seperti yang tampak pada Gambar 2.14 berikut.



Gambar 2.14 Geometri elemen SOLID186 (ANSYS Mechanical APDL *Element Reference*)

2. Pemilihan Fungsi *Displacement*

Menentukan fungsi *displacement* yang didefinisikan pada tiap elemen menggunakan nilai parameter di tiap *node* elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polynomial, *linear quadratic*, kubik, atau deret trigonometri.

3. Definisi hubungan regangan-*displacement* dan tegangan-regangan

Dapat ditentukan hubungan regangan akibat *displacement* yang sudah ditentukan pada tahap-tahap sebelumnya. Hubungan antara tegangan-regangan berikutnya akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen. Besarnya tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan hukum Hooke.

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \quad (2.3)$$

Keterangan:

$\{\sigma\}$: vektor tegangan = $[\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$

$[D]$: matrik kekakuan elastis atau matrik *stress-strain*

$\{\varepsilon^{el}\}$: $\{\varepsilon - \varepsilon^{th}\}$ = vektor regangan elastis

$\{\varepsilon\}$: vektor regangan total = $[\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T$

$\{\varepsilon^{th}\}$: vektor regangan termal

Sehingga persamaan (2.3) dapat dijabarkan seperti persamaan (2.4) berikut,

$$\{\varepsilon^{th}\} = \{\varepsilon^{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (2.4)$$

Pada kasus tegangan sisa model tiga dimensi, maka persamaan regangan termal dapat diubah seperti persamaan (2.5) berikut,

$$\{\varepsilon^{th}\} = \Delta T [\alpha_x \alpha_y \alpha_z 0 0 0]^T \quad (2.5)$$

Keterangan:

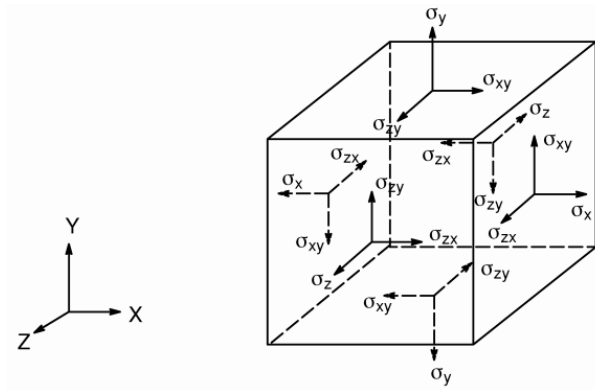
α_x : koefisien ekspansi termal arah sumbu-x

α_y : koefisien ekspansi termal arah sumbu-y

α_z : koefisien ekspansi termal arah sumbu-z

ΔT : perbedaan temperatur ditinjau dengan temperatur referensi

Vektor tegangan yang bekerja pada struktur dapat diilustrasikan pada Gambar 2.15 berikut.



Gambar 2.15 Vektor tegangan (ANSYS Mechanical APDL Element Reference)

Matriks kekakuan $[D]^{-1}$ dapat dilihat pada persamaan (2.6) berikut:

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Keterangan:

E_x : modulus elastisitas arah x

ν_{xy} : *poisson ratio major*

ν_{yx} : *poisson ratio minor*

G_{xy} : modulus geser bidang x-y

G_{yz} : modulus geser bidang y-z

G_{xz} : modulus geser bidang x-z

Untuk material isotropik maka,

$$E_x = E_y = E_z$$

$$\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz}$$

$$\nu_{yx} = \nu_{zx} = \nu_{zy}$$

4. Penentuan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Dalam penentuan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat menggunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum. Pengembangan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen dipengaruhi oleh nilai koefisien kekakuan. Pada analisis *thermal* pengelasan, matriks kekakuan elemen yang digunakan didasarkan pada hukum Fourier yaitu,

$$\frac{kA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \text{ atau } k^{(e)} \theta^{(e)} = q^{(e)} \quad (2.7)$$

dimana,

θ : vektor termal

k : karakteristik matrik elemen

q : vektor elemen gaya

5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas

Pada tahap ini didapatkan matriks kekakuan global yang bersifat *singular*. Untuk menghilangkan singularitasnya, digunakan kondisi batas. Matriks kekakuan global didapatkan dari gabungan antara persamaan elemen pada tahap empat menggunakan metode kekakuan langsung.

6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui

Pada tahapan ini didapatkan hasil besaran yang diperlukan, namun hasil tersebut tidak didapat secara langsung dari tahap sebelumnya. Derajat kebebasan dapat dicari dengan metode eliminasi (misalkan metode *gauss*) dan iterasi (misalkan metode *gauss-siedel*).

7. Penentuan regangan dan tegangan elemen

Untuk perhitungan regangan dan tegangan yang terjadi pada elemen berdasarkan hasil dari tahap keenam.

8. Penampilan hasil

Hasil yang didapat menggunakan analisa dari metode elemen hingga akan ditampilkan dalam bentuk grafis sehingga memperoleh pembacaan hasil.

2.2.8 Analisis *Transient Thermal* dengan ANSYS Workbench Mechanical

Analisis *transient thermal* memiliki fungsi untuk menentukan suhu ataupun berbagai parameter *thermal* yang memiliki variasi terhadap waktu. Analisis ini akan menampilkan distribusi suhu (panas) yang mampu menyebabkan terjadinya kegagalan suatu struktur maupun material. Hasil analisis *thermal* dapat digunakan untuk melakukan analisis *structural* yang berkaitan dengan beban-beban yang terdapat pada struktur maupun material yang dianalisis.

Analisis *transient thermal* terdiri dari 2 jenis, yaitu analisis linier maupun non-linier. Umumnya analisis non-linier terjadi akibat suhu yang sangat

bergantung pada property yang dimiliki material seperti konduktivitas termal, *specific heat*, massa jenis, serta suhu yang bergantung pada koefisien konveksi maupun efek radiasi. Mayoritas material memiliki *property thermal* yang bervariasi terhadap suhu, oleh karena itu maka proses analisis *transient thermal* non-linier sering digunakan. Langkah-langkah analisis *transient thermal* pada *software* ANSYS Workbench Mechanical secara umum adalah sebagai berikut:

1. Memilih jenis analisis, yaitu *transient thermal analysis*. Dalam satu jenis analisis, terdapat satu sistem analisis independen yang merepresentasikan satu jenis analisis tertentu yang memiliki beberapa parameter seperti properti geometri dan model. Beberapa jenis analisis memiliki hasil akhir yang mampu dijadikan bahan dasar untuk melakukan analisis lain, seperti halnya hasil *transient thermal analysis* mampu dijadikan bahan dasar analisis struktural.
2. Menetapkan data *engineering* sesuai jenis analisis yang dipilih. Pada analisis *transient thermal*, data yang harus ditetapkan yaitu konduktivitas termal, massa jenis, dan *specific heat*. Data *engineering* yang ditetapkan sehubungan dengan properti material dapat berupa linier atau non linier, konstan atau *temperature-dependent*, serta *isotropic* atau ortotropik.
3. Melampirkan data geometri. ANSYS memiliki keterbatasan berupa ketidakmampuan untuk melakukan permodelan geometri. Oleh karena itu, permodelan geometri harus dilakukan di *software* permodelan pendukung yang hasilnya mampu diimpor ke ANSYS dengan beberapa ketentuan sesuai dengan jenis analisis yang dilakukan. Beberapa *software* permodelan yang hasilnya mampu diimpor ke ANSYS yaitu DesignModeler, CAD, dan SolidWorks.
4. Menetapkan parameter jenis analisis. Analisis *transient thermal* memiliki parameter yang harus ditentukan yaitu massa titik termal (*thermal point mass*). Massa titik termal memiliki fungsi untuk menunjukkan kapasitansi termal dari suatu material atau struktur yang sedang dianalisis. Massa titik

termal mempunyai 3 pilihan sifat yang mampu mengatur interaksinya dengan struktur atau material yang sedang dianalisis, yaitu meliputi *isothermal*, *coupled*, dan *heat-flux distributed*.

5. Menentukan jenis sambungan. Setelah mengimpor permodelan geometri serta menentukan parameter sesuai jenis analisis yang dipilih, maka langkah selanjutnya ialah menentukan jenis sambungan yang mampu mempertahankan struktur atau material yang sedang dianalisis. Pada analisis *transient thermal*, jenis sambungan yang digunakan ialah *contact*.
6. Mengaplikasikan *mesh controls* dan *preview mesh*. Ketika melakukan *meshing*, jika suhu dalam analisis yang dipilih digunakan dalam analisis struktural, maka *meshing* yang digunakan haruslah identik. Oleh karena itu, pemilihan dalam *meshing* harus benar-benar diperhatikan agar analisis struktural dapat berjalan lancar.
7. Menetapkan pengaturan analisis. Pengaturan analisis *transient thermal* yang harus diperhatikan yaitu waktu berakhirnya analisis, durasi setiap langkah analisis, dan penetapan langkah tambahan jika dibutuhkan.
8. Menentukan kondisi inisial. Kondisi inisial dalam analisis *transient thermal* meliputi distribusi suhu pada waktu $(t) = 0$, dan suhu inisial yang pada umumnya sebesar 22°C atau $71,6^{\circ}\text{F}$.
9. Mengaplikasikan beban yang terdapat pada analisis *transient thermal*, yaitu suhu, konveksi, radiasi, laju panas, *perfectly insulated*, *heat flux*, *internal heat generation*, *imported temperature*, dan *imported convection coefficient*.
10. Melakukan *running* analisis.
11. Memperoleh hasil analisis. Setelah hasil analisis muncul, maka hasil tersebut dapat divisualisasikan dengan cara mengkontur ataupun menganimasikannya untuk meninjau ulang respon struktur atau material yang telah dianalisis.

2.2.9 Analisis *Transient Structural* dengan ANSYS Workbench Mechanical

Analisis *transient structural* terdiri dari 2 jenis, yaitu analisis secara linier dan non-linier. Tujuan dari analisis *transient structural* adalah mendapatkan respon dinamis material akibat beban yang bergantung pada waktu. Langkah-langkah analisis *transient structural* pada *software* ANSYS Workbench Mechanical secara umum adalah sebagai berikut:

1. Memilih jenis analisis, yaitu *transient structural analysis*.
2. Menetapkan data *engineering* sesuai jenis analisis yang dipilih. Pada analisis *transient structural*, data yang harus ditetapkan yaitu properti material. Properti material dapat berupa bentuk linier atau non-linier, isotropik atau ortotropik, dan konstan atau *temperature dependent*. Modulus Young berkenaan dengan kekakuan serta massa jenis juga harus ditetapkan dalam langkah ini.
3. Melampirkan data geometri. Data yang dilampirkan merupakan data geometri yang telah dimodelkan di *software* permodelan seperti DesignModeler, CAD, dan SolidWorks.
4. Menetapkan parameter jenis analisis. Analisis *transient structural* memiliki parameter yang harus ditentukan yaitu massa titik (*point mass*). Massa titik dalam hal ini yaitu berupa bagian kaku (*rigid*) dari struktur atau material yang sedang dianalisis yang terhubung ke seluruh komponen sistem struktural melalui sambungan (*joints*). Beban yang digunakan ialah percepatan dan kecepatan rotasional.
5. Menentukan jenis sambungan. Pada analisis *transient structural*, jenis sambungan yang digunakan ialah *contact*, *springs*, dan *joints*.
6. Mengaplikasikan *mesh controls* dan *preview mesh*. Pada jenis analisis jenis *transient structural*, mesh harus cukup sesuai untuk merepresentasikan mode shape tertinggi yang diinginkan.
7. Menetapkan pengaturan analisis. Pengaturan analisis *transient structural* yang harus diperhatikan yaitu defleksi yang besar, durasi setiap langkah

analisis, waktu tunggu yang diperlukan untuk dapat melakukan analisis selanjutnya berdasarkan hasil akhir, modifikasi kriteria konvergensi, penentuan koefisien kekakuan, koefisien massa, dan *numerical damping*, serta pengaturan hasil akhir analisis untuk dapat digunakan sebagai bahan dasar jenis analisis berikutnya.

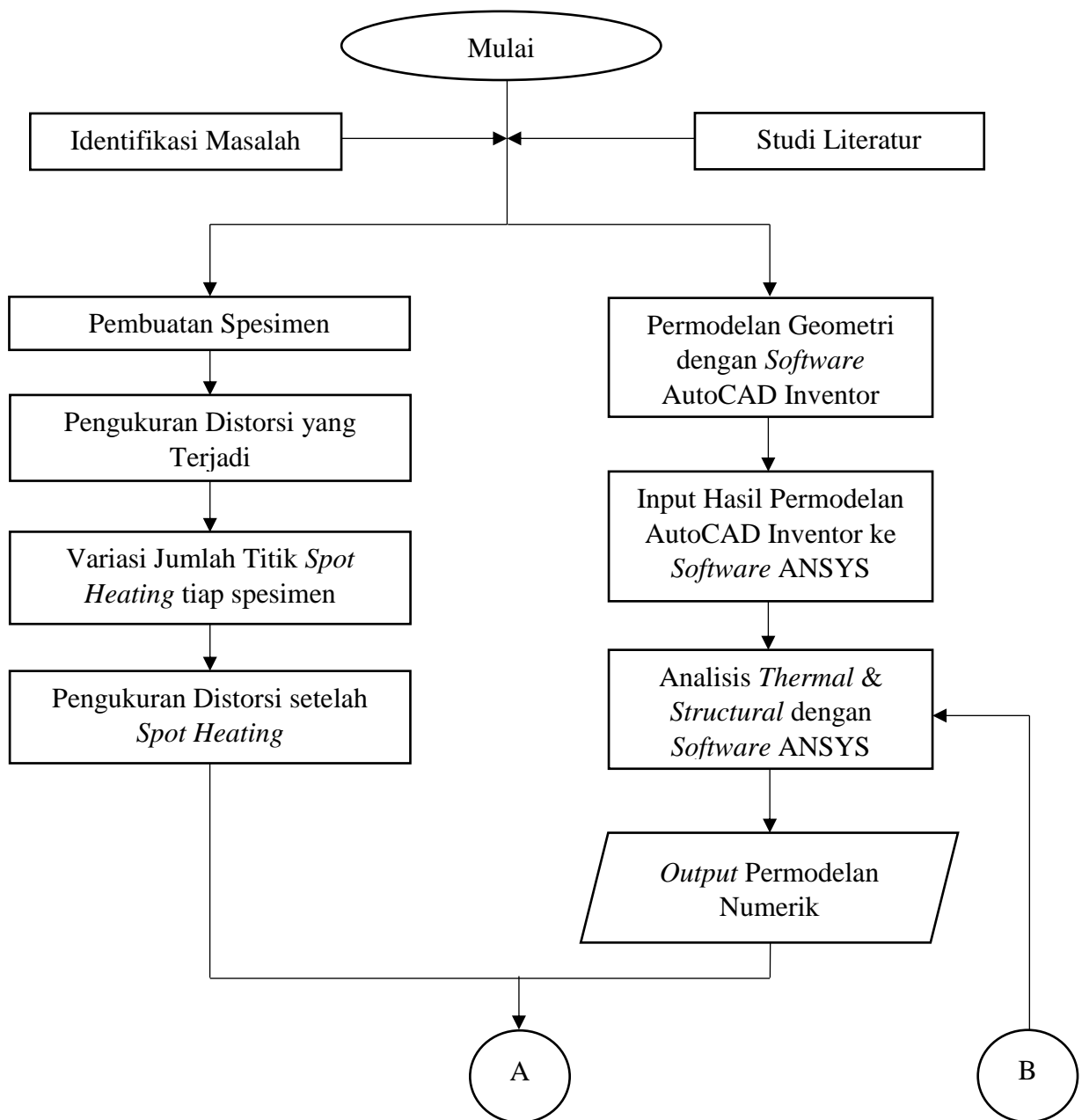
8. Menentukan kondisi inisial. Kondisi inisial yang harus ditentukan diantaranya waktu $(t) = 0$, serta displasemen dan kecepatan harus nol.
9. Mengaplikasikan beban yang terdapat pada analisis *transient structural* harus memiliki nilai yang konstan serta bervariasi terhadap waktu.
10. Melakukan *running* analisis
11. Memperoleh hasil analisis. Setelah hasil analisis muncul, maka hasil tersebut dapat divisualisasikan dengan cara mengkontur ataupun menganimasikannya untuk meninjau ulang respon struktur atau material yang telah dianalisis

BAB III

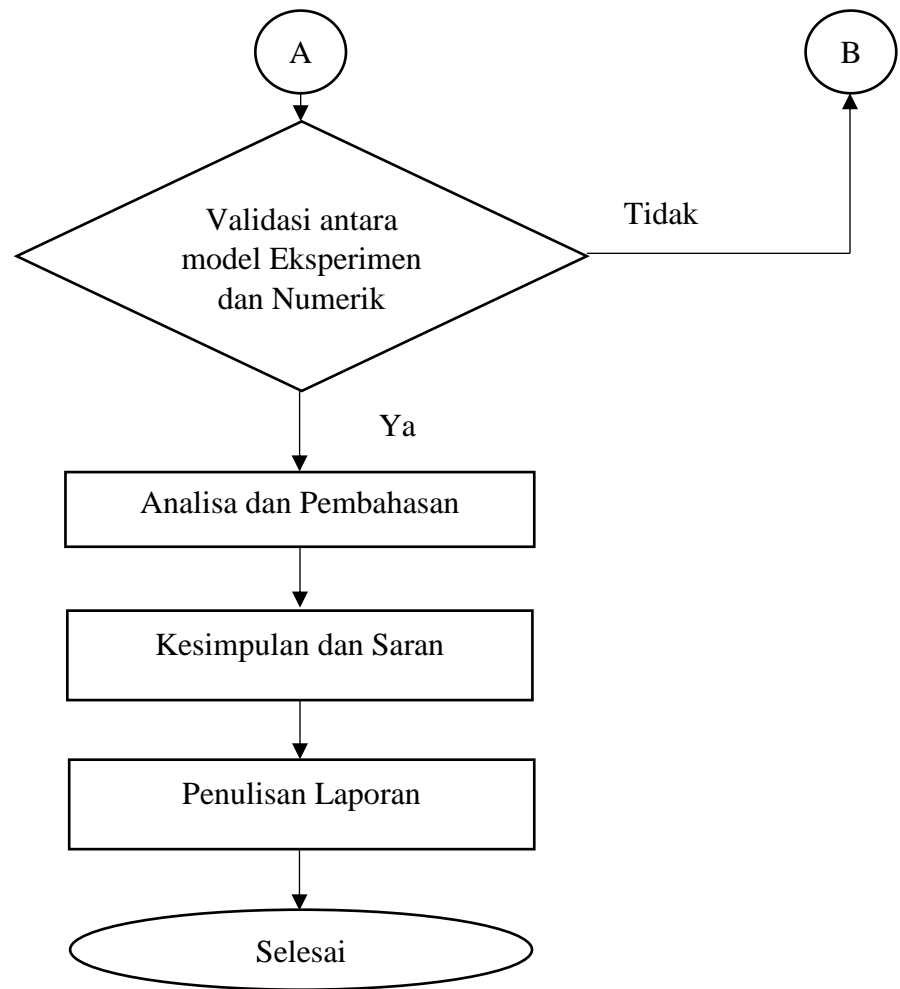
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Untuk memudahkan proses pengerjaan tugas akhir ini, maka digunakan metode diagram alir (*flow diagram*) seperti pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram alir pengerjaan tugas akhir



Gambar 3.1 Lanjutan diagram alir pengerjaan tugas akhir

3.2 Penjelasan Diagram Alir

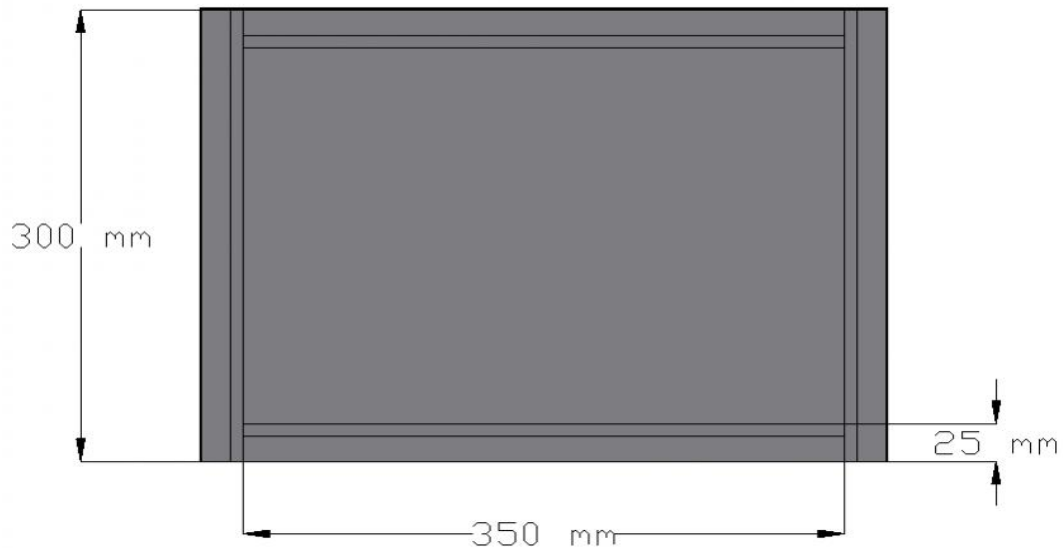
1. Identifikasi Masalah

Pada tahap awal penelitian dilakukan identifikasi masalah yang telah didapatkan, berupa tujuan, manfaat, dan apakah memungkinkan jika dilakukan penelitian lebih lanjut.

2. Studi Literatur

Pada tahap ini berisi tentang kegiatan yang berkaitan dengan mencari, mengkaji, serta mengumpulkan materi dan informasi yang terkait dan relevan untuk dijadikan acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

3. Pembuatan Spesimen



Gambar 3.2 Rencana geometri spesimen

Pembuatan spesimen untuk pengerjaan tugas akhir ini memiliki bentuk seperti pada Gambar 3.2 diatas. Spesimen yang dibuat sebanyak 3 buah. Spesifikasi pengelasan dari setiap spesimen mengacu pada Welding Procedure Specification (WPS) dari PT. PAL INDONESIA yang tertera pada Lampiran I. Untuk komposisi baja A36 yang digunakan, dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Komposisi kimia baja A36 (ASTM *Standard Spesification for Carbon Structural Steel*)

| Bahan | C | P | S | Si | Cu | Mn |
|---------------|------|------|------|----------|------|----|
| Kandungan (%) | 0,25 | 0,04 | 0,05 | 0,40 max | 0,20 | - |

Proses pembuatan spesimen diawali dengan proses *fitting*, yaitu pengukuran untuk penyesuaian ukuran antara bentuk pada model dengan keadaan spesimen sebenarnya. Proses *fitting* dilakukan oleh *fitter* di Bengkel Pipa Niaga PT. PAL INDONESIA. Proses *fitting* dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



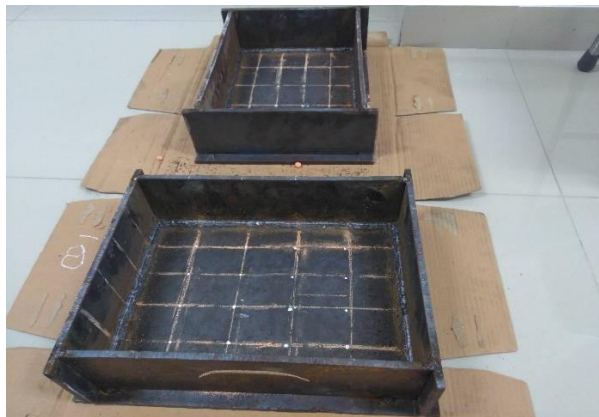
Gambar 3.3 Proses *fitting* spesimen di PT. PAL INDONESIA

Setelah proses *fitting* selesai dilakukan, selanjutnya dilakukan pengelasan SMAW pada spesimen. Pengelasan SMAW dilakukan di Bengkel Kapal Niaga PT. PAL INDONESIA. Pengelasan SMAW yang dilakukan mengacu pada *welding procedure specification* yang tercantum pada **Lampiran 1**. Proses pengelasan SMAW dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Proses pengelasan SMAW pada spesimen di PT. PAL INDONESIA

Setelah proses pengelasan, maka spesimen telah selesai dibuat. Hasil spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut ini.

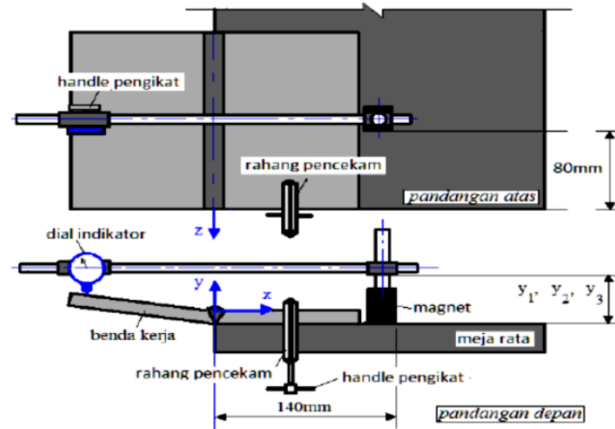


Gambar 3.5 Hasil spesimen yang sudah selesai

4. Pengukuran Distorsi setiap Spesimen

Pengukuran ini berguna untuk mengetahui hasil distorsi akibat pengelasan dari 3 spesimen yang telah dibuat. Pengukuran ini menggunakan alat *dial indicator* dengan ketelitian 0,01 mm. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Reparasi

Mesin PPNS. Spesimen diukur pada meja uji rata (*flat table*) dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Pengukuran distorsi menggunakan *dial indicator* (Wibowo, Ilman, & Iswanto,2016)

Perlengkapan yang digunakan selama proses pengukuran berupa *dial indicator* dan *flat table*, dapat dilihat pada Gambar 3.7 dan 3.8 berikut.

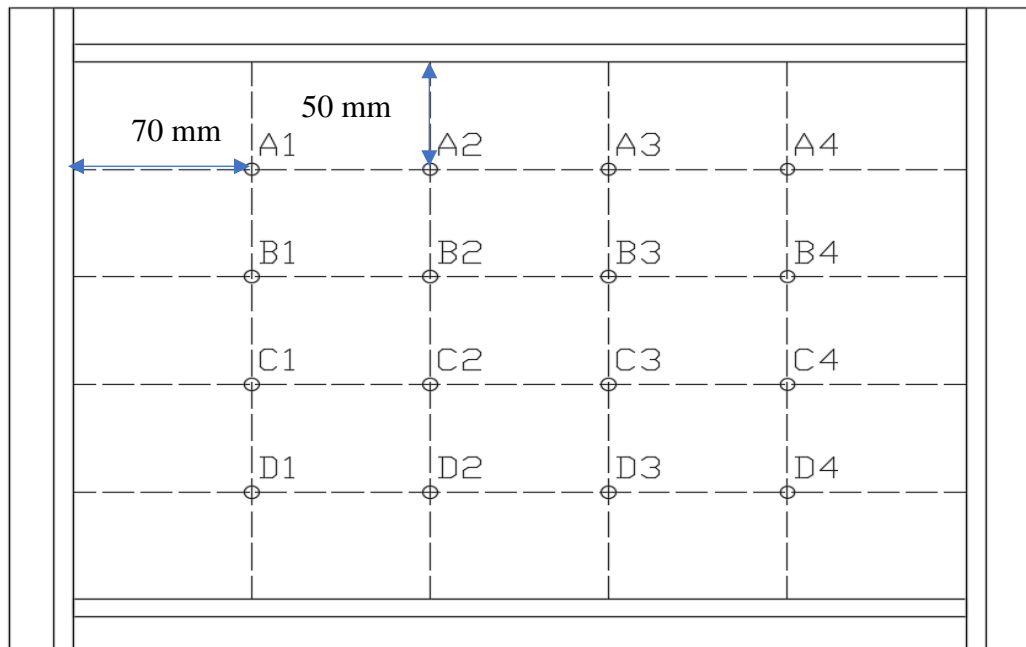


Gambar 3.7 *Dial indicator*



Gambar 3.8 Flat table

Titik pengukuran pada setiap spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.9 dan 3.10 berikut ini.

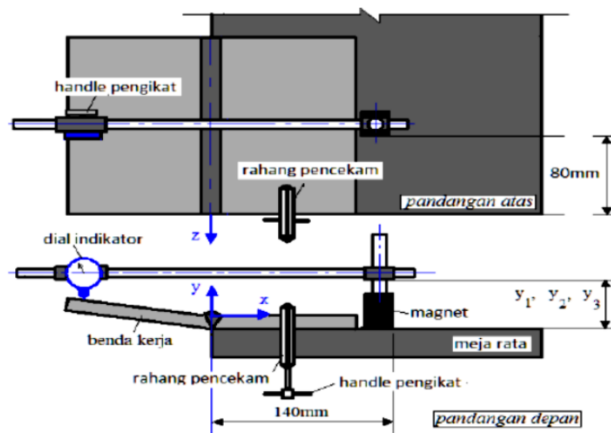


Gambar 3.9 Titik rencana pengukuran spesimen



Gambar 3.10 Titik pengukuran pada spesimen

Setelah dilakukan penentuan titik ukur pada spesimen, dilakukan pengukuran spesimen pada masing-masing titik. Proses pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.11 berikut.



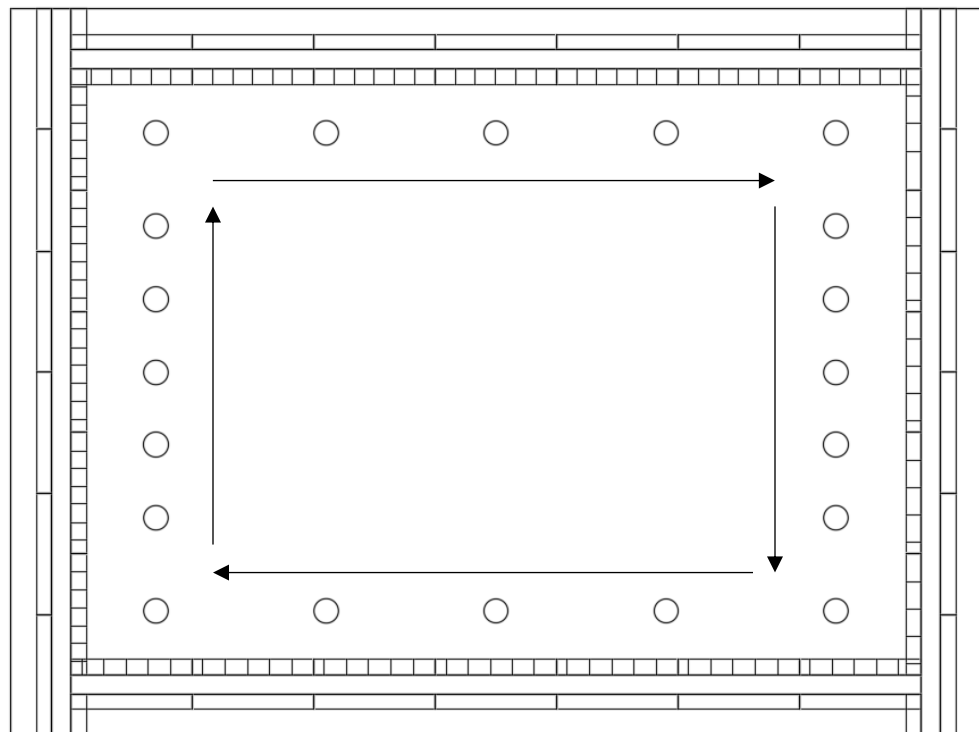
Gambar 3.11 Proses pengukuran spesimen sebelum *spot heating* (Wibowo, Ilman, & Iswanto, 2016)

5. *Spot heating* dengan variasi jumlah titik

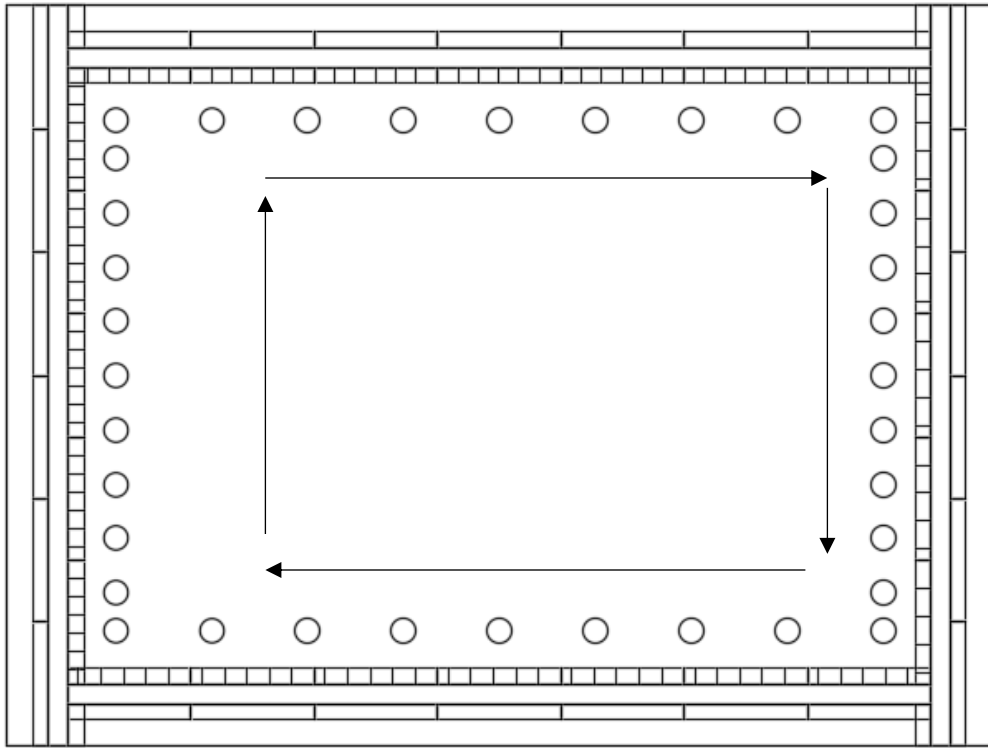
Hasil pengukuran distorsi yang sudah diperoleh akan diperbaiki dengan metode *spot heating* yang divariasikan pada jumlah titik pemanasan. Variasi dari setiap spesimen dan urutan pemanasan (*heating sequence*) dapat dilihat pada Gambar 3.12 hingga Gambar 3.14. Semua gambar dilihat dari tampak atas dan penandaan *dot* adalah titik yang akan diberikan *spot heating*. Jumlah titik pemanasan dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Jumlah titik pemanasan pada spesimen

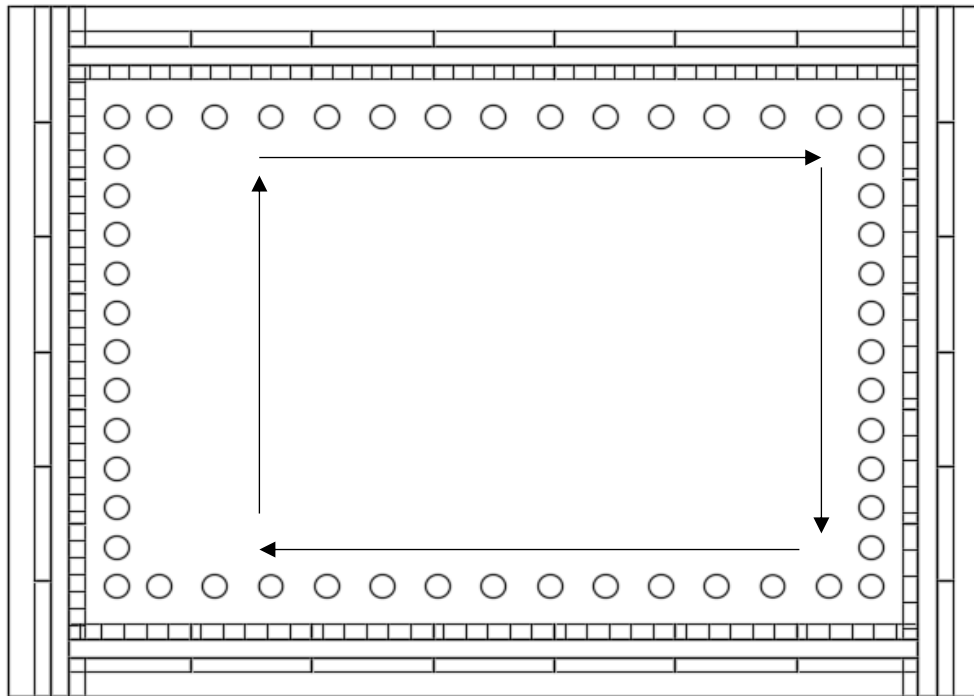
| Spesimen | Jumlah Titik Pemanasan |
|------------|------------------------|
| Spesimen 1 | 20 |
| Spesimen 2 | 36 |
| Spesimen 3 | 52 |



Gambar 3.12 Variasi spesimen 1 dan alur pemanasan, posisi tampak atas



Gambar 3.13 Variasi spesimen 2 dan alur pemanasan, posisi tampak atas



Gambar 3.14 Variasi spesimen 3 dan alur pemanasan, posisi tampak atas

Parameter saat perlakuan *spot heating* pada ketiga spesimen diatas, masing-masing memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Heat input dari *flame head* = 200 °C
- Durasi pemanasan = 30 detik

Peralatan yang digunakan dalam proses *spot heating* terdiri dari *stopwatch*, *Thermometer Gun* Krisbow, gas LPG, *torch* untuk pemanasan, serta air untuk pendinginan.

Stopwatch digunakan untuk melakukan pengukuran waktu pemanasan *spot heating*. Durasi pemanasan pada masing-masing titik adalah 30 detik. Stopwatch yang digunakan selama proses *spot heating* dapat dilihat pada Gambar 3.15 berikut.



Gambar 3.15 Stopwatch untuk mengukur waktu pemanasan.

Perlengkapan berikutnya adalah *thermometer gun*, yang digunakan untuk melakukan pengukuran suhu pemanasan pada setiap titik pemanasan. *Thermometer* ini menggunakan *infrared* sensor untuk mendeteksi suhu di permukaan pelat. Suhu yang diukur saat pemanasan berkisar 200 °C. *Thermometer gun* yang digunakan saat proses *spot heating* dapat dilihat pada Gambar 3.16 berikut.



Gambar 3.16 *Thermometer gun* merk Krisbow

Gas LPG digunakan sebagai sumber pemanasan *spot heating*. Gas LPG ini adalah milik Laboratorium Produksi Teknik Perkapalan FTK-ITS. Gas LPG yang digunakan selama pemanasan dapat dilihat pada Gambar 3.17 berikut.



Gambar 3.17 Gas LPG

Torch digunakan untuk memanaskan titik-titik pada spesimen. *Torch* tersambung dengan tabung gas LPG untuk menghasilkan panas. *Torch* yang digunakan selama proses pemanasan *spot heating* dapat dilihat pada Gambar 3.18 berikut.



Gambar 3.18 *Torch*

Yang terakhir adalah air. Air digunakan sebagai pendingin spesimen setelah *spot heating* selesai dilakukan. Pemberian air dilakukan dengan cara penyiraman pada titik-titik yang selesai dipanaskan. Air yang digunakan selama proses *spot heating* dapat dilihat pada Gambar 3.19 berikut ini.

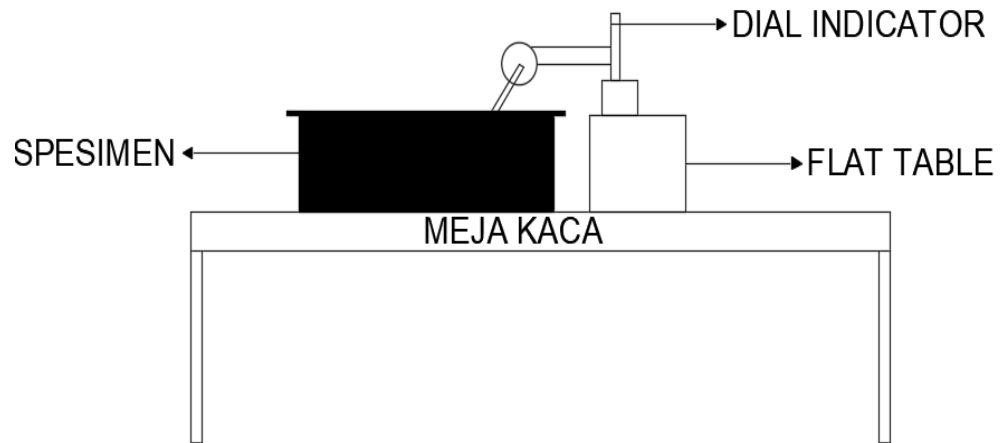


Gambar 3.19 Air untuk pendinginan

6. Pengukuran distorsi setelah *spot heating*

Setelah melakukan *spot heating* dengan variasi jumlah titik, maka dilakukan pengukuran ulang pada masing-masing spesimen. Pengukuran dilakukan menggunakan alat *dial indicator* pada *flat table*. Pengukuran dilakukan untuk

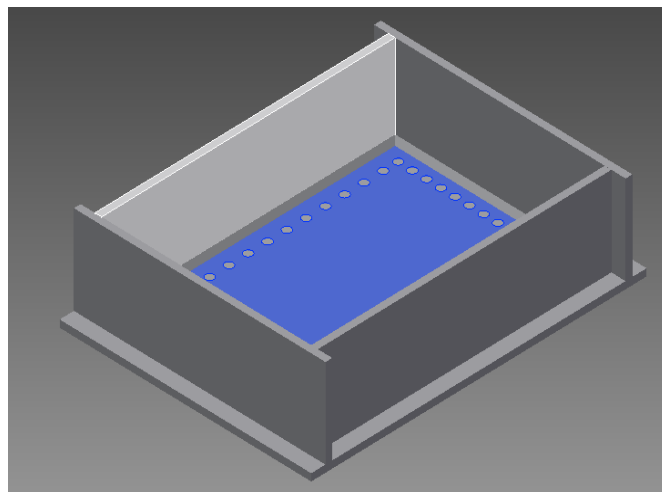
melihat perubahan distorsi yang terjadi setelah diberikan *spot heating*. Proses pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3.20 berikut.



Gambar 3.20 Proses pengukuran setelah spot heating

7. Permodelan Geometri dengan *Software* AutoCAD Inventor

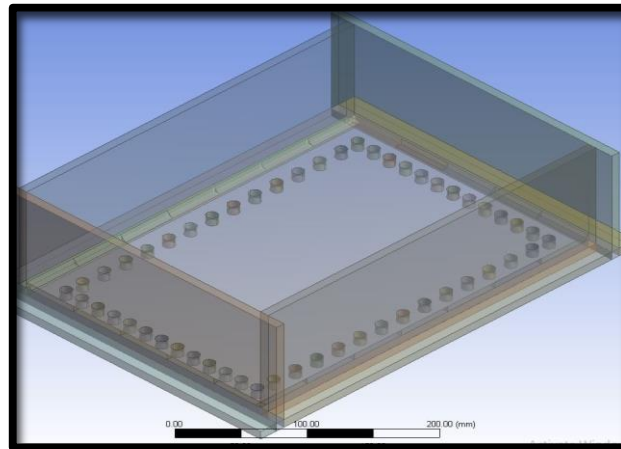
Software AutoCAD Inventor digunakan untuk membuat dan merancang bentuk geometri dari spesimen sesuai dengan data yang ada. Hasil dari permodelan 3D dapat dilihat pada Gambar 3.21 berikut ini.



Gambar 3.21 Permodelan spesimen menggunakan AutoCAD Inventor

8. Input Hasil Geometri *Software* AutoCAD Inventor ke ANSYS

Hasil permodelan geometri pada *software* AutoCAD Inventor selanjutnya diinputkan pada *software* ANSYS. Hasil *input* bentuk geometri pada ANSYS harus tampak sama dengan bentuk geometri pada AutoCAD Inventor seperti pada Gambar 3.22 berikut.



Gambar 3.22 Input model spesimen ke ANSYS

9. Permodelan *Transient Thermal*

Analisis ini berfungsi untuk menentukan suhu maupun berbagai parameter thermal yang memiliki variasi terhadap waktu.

10. Permodelan *Transient Structural*

Tujuan dari analisis *transient structural* adalah mendapatkan respon dinamis material akibat beban yang bergantung pada waktu.

11. Validasi antara Eksperimen dengan Numerik

Validasi ini dilakukan untuk menyesuaikan hasil antara metode *spot heating* eksperimen dengan permodelan *spot heating* secara numerik.

12. Analisa Hasil dan Pembahasan

Setelah validasi antara eksperimen dengan numerik, berikutnya dilakukan analisa dan pembahasan tentang perubahan distorsi yang terjadi setelah dilakukan *spot heating*.

13. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini ditarik kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian lebih lanjut mengenai topik yang berkaitan.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Eksperimen

4.1.1 Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen untuk tugas akhir ini dilakukan di Bengkel Pipa Kapal Niaga yang berlokasi di PT. PAL INDONESIA. Proses pengelasan yang digunakan mengacu pada *welding procedure specification* (WPS) dari PT. PAL INDONESIA, yang tercantum pada **Lampiran I**.

4.1.2 Pengukuran Distorsi sebelum *Spot Heating*

Setelah spesimen selesai dilas, dilakukan pengukuran terhadap distorsi yang terjadi pada spesimen menggunakan alat *dial indicator*. Pengukuran dilakukan pada meja datar (*flat table*). Hasil pengukuran distorsi, dilambangkan dengan delta (Δ), pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.1 hingga Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.1 Hasil distorsi spesimen 1

| Spesimen 1 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | -0,12 mm | -0,23 mm | -0,30 mm | -0,35 mm |
| B | -0,14 mm | -0,21 mm | -0,30 mm | -0,34 mm | |
| C | 0,09 mm | -0,09 mm | -0,25 mm | -0,41 mm | |
| D | 0,19 mm | 0,17 mm | 0,15 mm | -0,09 mm | |

Tabel 4.2 Hasil distorsi spesimen 2

| Spesimen 2 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | -0,31 mm | -0,41 mm | -0,49 mm | -0,55 mm |
| B | -0,26 mm | -0,45 mm | -0,52 mm | -0,56 mm | |
| C | -0,13 mm | -0,24 mm | -0,35 mm | -0,57 mm | |
| D | -0,15 mm | -0,11 mm | -0,17 mm | -0,27 mm | |

Tabel 4.3 Hasil distorsi spesimen 3

| Spesimen 3 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | A | -0,24 mm | -0,38 mm | -0,51 mm | -0,57 mm |
| | B | -0,60 mm | -0,58 mm | -0,54 mm | -0,85 mm |
| | C | -0,21 mm | -0,32 mm | -0,43 mm | -0,43 mm |
| | D | -0,10 mm | -0,23 mm | -0,18 mm | -0,31 mm |

4.1.4 Proses *Spot Heating*

Pemanasan dilakukan pada suhu $\pm 200^{\circ}\text{C}$ menggunakan torch yang dialiri dengan gas LPG. Pemanasan dilakukan dengan waktu 30 detik di masing-masing titik pemanasan.

4.1.5 Pengukuran Distorsi setelah *Spot Heating*

Setelah spesimen selesai diberikan *spot heating*, dilakukan pengukuran terhadap distorsi yang terjadi pada spesimen menggunakan alat *dial indicator*. Hasil pengukuran distorsi pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.4 Hasil spot heating spesimen 1

| Spesimen 1 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | A | 0,15 mm | 0,23 mm | 0,12 mm | 0,15 mm |
| | B | 0,43 mm | 0,41 mm | 0,35 mm | 0,45 mm |
| | C | 0,26 mm | 0,60 mm | 0,59 mm | 0,41 mm |
| | D | 0,25 mm | 0,37 mm | 0,35 mm | 0,33 mm |

Tabel 4.5 Hasil *spot heating* spesimen 2

| Spesimen 2 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | A | 0,08 mm | 0,18 mm | 0,21 mm | 0,14 mm |
| | B | 0,25 mm | 0,13 mm | 0,24 mm | 0,30 mm |
| | C | 0,32 mm | 0,24 mm | 0,25 mm | 0,38 mm |
| | D | 0,12 mm | 0,33 mm | 0,30 mm | 0,21 mm |

Tabel 4.6 Hasil *spot heating* spesimen 3

| Spesimen 3 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | A | 0,15 mm | 0,21 mm | 0,09 mm | 0,11 mm |
| | B | 0,35 mm | 0,31 mm | 0,82 mm | 0,12 mm |
| | C | 0 mm | 0,68 mm | 0,44 mm | 0,71 mm |
| | D | 0,28 mm | 0,17 mm | 0,36 mm | 0,25 mm |

4.1.3 Analisis Distorsi Eksperimen

Setelah pengukuran selesai dilakukan, berikutnya dilakukan analisis hasil distorsi untuk mengetahui besarnya penyimpangan Δ dari normal, yaitu 8 mm yang merupakan tebal pelat baja A36, yang selanjutnya dilambangkan dengan $\% \Delta$. Berikut adalah rumus perhitungan untuk analisis hasil distorsi:

$$\% \Delta = \frac{\Delta}{8 \text{ mm}} \times 100\%$$

Keterangan:

- $\% \Delta$ = Besarnya distorsi dari normal (%)
- 8 mm = Tebal pelat dasar, acuan titik normal
- Δ = Hasil pengukuran distorsi (mm)

Tabel 4.7 Analisis distorsi spesimen 1

| Titik | Δ as welded (mm) | $\% \Delta$ | Δ Spot (mm) | $\% \Delta$ |
|------------------------|-------------------------|-------------|--------------------|-------------|
| A1 | -0.12 | -1.50 | 0.15 | 1.88 |
| A2 | -0.23 | -2.88 | 0.04 | 0.50 |
| A3 | -0.3 | -3.75 | -0.01 | -0.13 |
| A4 | -0.35 | -4.38 | -0.02 | -0.25 |
| B1 | -0.14 | -1.75 | 0.19 | 2.38 |
| B2 | -0.21 | -2.63 | 0.13 | 1.63 |
| B3 | -0.3 | -3.75 | 0.03 | 0.38 |
| B4 | -0.34 | -4.25 | 0.04 | 0.50 |
| C1 | 0.09 | 1.13 | 0.26 | 3.25 |
| C2 | -0.09 | -1.13 | 0.18 | 2.25 |
| C3 | -0.25 | -3.13 | 0.13 | 1.63 |
| C4 | -0.41 | -5.13 | 0.02 | 0.25 |
| D1 | 0.19 | 2.38 | 0.25 | 3.13 |
| D2 | 0.17 | 2.13 | 0.37 | 4.63 |
| D3 | 0.15 | 1.88 | 0.25 | 3.13 |
| D4 | -0.09 | -1.13 | 0.12 | 1.50 |
| Rata-Rata Distorsi | | -1.742 | Rata-Rata Distorsi | 1.664 |
| Perubahan Distorsi (%) | | 3.406 | | |

Tabel 4.8 Analisis distorsi spesimen 2

| Titik | Δ as welded (mm) | % Δ | Δ Spot (mm) | % Δ |
|------------------------|-------------------------|------------|--------------------|------------|
| A1 | -0.31 | -3.88 | -0.02 | -0.25 |
| A2 | -0.41 | -5.13 | -0.05 | -0.63 |
| A3 | -0.49 | -6.13 | -0.15 | -1.88 |
| A4 | -0.55 | -6.88 | -0.05 | -0.63 |
| B1 | -0.26 | -3.25 | 0.14 | 1.75 |
| B2 | -0.45 | -5.63 | 0.13 | 1.63 |
| B3 | -0.52 | -6.50 | -0.12 | -1.50 |
| B4 | -0.56 | -7.00 | -0.12 | -1.50 |
| C1 | -0.13 | -1.63 | 0.16 | 2.00 |
| C2 | -0.24 | -3.00 | 0.11 | 1.38 |
| C3 | -0.35 | -4.38 | 0.04 | 0.50 |
| C4 | -0.57 | -7.13 | -0.12 | -1.50 |
| D1 | -0.15 | -1.88 | 0.12 | 1.50 |
| D2 | -0.11 | -1.38 | 0.14 | 1.75 |
| D3 | -0.17 | -2.13 | 0.1 | 1.25 |
| D4 | -0.27 | -3.38 | 0.06 | 0.75 |
| Rata-Rata Distorsi | | -4.328 | Rata-Rata Distorsi | 0.289 |
| Perubahan Distorsi (%) | | 4.617 | | |

Tabel 4.9 Analisis distorsi spesimen 3

| Titik | Δ as welded (mm) | % Δ | Δ Spot (mm) | % Δ |
|------------------------|-------------------------|------------|--------------------|------------|
| A1 | -0.24 | -3.00 | 0.04 | 0.50 |
| A2 | -0.38 | -4.75 | -0.05 | -0.63 |
| A3 | -0.51 | -6.38 | -0.12 | -1.50 |
| A4 | -0.57 | -7.13 | -0.08 | -1.00 |
| B1 | -0.21 | -2.63 | 0.05 | 0.63 |
| B2 | -0.31 | -3.88 | 0.91 | 11.38 |
| B3 | -0.42 | -5.25 | 0.82 | 10.25 |
| B4 | -0.55 | -6.88 | -0.06 | -0.75 |
| C1 | -0.11 | -1.38 | 0 | 0.00 |
| C2 | -0.32 | -4.00 | 0.12 | 1.50 |
| C3 | -0.25 | -3.13 | 0.05 | 0.63 |
| C4 | -0.43 | -5.38 | -0.01 | -0.13 |
| D1 | -0.1 | -1.25 | 0.14 | 1.75 |
| D2 | -0.07 | -0.88 | 0.17 | 2.13 |
| D3 | -0.18 | -2.25 | 0.11 | 1.38 |
| D4 | -0.24 | -3.00 | 0.03 | 0.38 |
| Rata-Rata Distorsi | | -3.820 | Rata-Rata Distorsi | 1.656 |
| Perubahan Distorsi (%) | | 5.477 | | |

4.2 Numerik

4.2.1 Perhitungan Heat Flux

Pada *software* ANSYS sumber panas yang digunakan adalah *heat flux*. Begitu pula dengan proses pengelasan, beban yang akan diterima oleh *base metal* adalah beban dari *heat flux*. Faktor-faktor yang mempengaruhi *heat flux* antara lain arus listrik, tegangan dan kecepatan pengelasan. Perhitungan *heat flux* pada pengelasan SMAW dapat dilihat pada perhitungan berikut.

| | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Kuat Arus (I) | = 80 ~ 90 A |
| Voltase (V) | = 19 V |
| Efisiensi SMAW (η) | = 0,75 |
| Diameter Elektrode | = 2.6 mm |
| Luas penampang elektroda (A_e) | = 5,3066 mm ² |
| Kecepatan pengelasan (1) | = 4,44 mm/sec stiffener 350 mm |
| Kecepatan pengelasan (2) | = 4,56 mm/sec stiffener 300 mm |

Perhitungan *heat flux* pada pengelasan SMAW untuk filler

Dimensi pelat model yang digunakan, yaitu

| | |
|---|----------|
| P | = 400 mm |
| l | = 300 mm |
| t | = 8 mm |

Spesifikasi kampuh las masing-masing *layer*,

| | |
|-------------------|-------------|
| <i>Leg length</i> | = 5,657 mm |
| Pembagian elemen | = 24 elemen |

Lebar 1 elemen seluruh kampuh las = $[(leg\ length)^2 + (leg\ length)^2]^{1/2}$

$$= 8,00 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang satu elemen} = 50 \text{ mm}$$

Perhitungan *heat input* bersih (1):

$$\begin{aligned} Q_{\text{net}} &= \frac{\eta V I}{v} \\ &= \frac{0,75 \times 19 \text{ V} \times 85 \text{ A}}{4,44 \text{ mm/sec}} \\ &= 272,80 \text{ watt} \end{aligned}$$

Perhitungan *heat input* bersih (2):

$$\begin{aligned} Q_{\text{net}} &= \frac{\eta V I}{v} \\ &= \frac{0,75 \times 19 \text{ V} \times 85 \text{ A}}{4,56 \text{ mm/sec}} \\ &= 265,625 \text{ watt} \end{aligned}$$

Perhitungan luas permukaan *weld bead* yang dilalui selama 1 detik didapat dari perkalian sisi miring *weld bead* dengan jarak tempuh selama 1 detik (4,44 mm), dan (4,56 mm) sebagai berikut:

$$A_{\text{wb}} \text{ untuk 1 detik pengelasan (1)} = [(leg \ length)^2 + (leg \ length)^2]^{1/2} \times 3,22 \text{ mm}$$

$$= 8 \text{ mm} \times 4,44 \text{ mm}$$

$$= 35,52 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{wb}} \text{ untuk 1 detik pengelasan (2)} = [(leg \ length)^2 + (leg \ length)^2]^{1/2} \times 3,78 \text{ mm}$$

$$= 8 \text{ mm} \times 4,56 \text{ mm}$$

$$= 36,48 \text{ mm}^2$$

Sehingga *heat flux* q1 dapat dihitung:

$$\begin{aligned}q1 &= \frac{Q_{net}}{A_{wb}} \\ &= \frac{272,80 \text{ watt}}{35,52 \text{ mm}^2} \\ &= 7,68 \text{ watt/mm}^2\end{aligned}$$

Sehingga *heat flux* q2 dapat dihitung:

$$\begin{aligned}q2 &= \frac{Q_{net}}{A_{wb}} \\ &= \frac{265,625 \text{ watt}}{36,48 \text{ mm}^2} \\ &= 7,28 \text{ watt/mm}^2\end{aligned}$$

Sesuai perhitungan diatas, diketahui beban *heat flux* yang dikenakan pada setiap elemen pada model berdasarkan perhitungan diatas adalah sebesar 7,68 watt/mm² pada pengelasan *stiffener* 350 mm dan 7,28 watt/mm² pada pengelasan *stiffener* 300 mm. Beban ini dikenakan secara transien atau berjalan sesuai fungsi waktu.

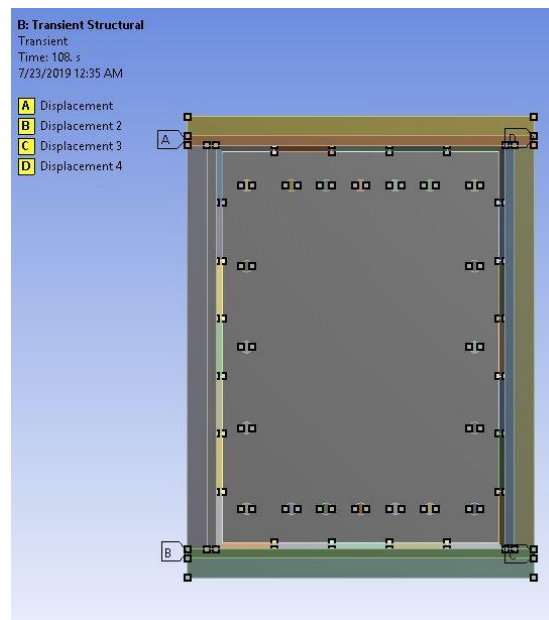
Selain beban *heat flux*, kondisi batas juga harus dimasukkan ke dalam pembebanan permodelan. Kondisi batas ini merupakan keadaan nyata bahwa antara permukaan pelat dengan udara mengalami kontak langsung. Kondisi batas ini adalah beban konveksi, maka itu perlu dimasukkan koefisien yang digunakan untuk memasukkan factor konveksi ke dalam permodelan. Koefisien yang harus dimasukkan dalam perhitungan adalah sebagai berikut:

- *Film coefficient* = 1,5e⁻⁰⁰⁵ W/m°C
- *Ambient temperature* = 22 °C

Film coefficient merupakan koefisien faktor konveksi yang terjadi antara logam yang dipanaskan dengan udara. Sedangkan *ambient temperature* adalah temperatur ruang yang terjadi pada saat pengelasan dilakukan.

4.2.2 *Boundary Condition*

Boundary condition yang digunakan dalam analisa *transient structural* adalah *displacement*. *Displacement* ditentukan dengan mengunci daerah atau bagian yang tidak terpengaruh oleh perubahan bentuk yang disebabkan oleh beban termal. Daerah yang dikunci dengan *displacement* ini harus sesuai dengan kondisis nyata spesimen pada saat eksperimen, daerah mana yang tidak mengalami perubahan bentuk merupakan daerah yang harus dikunci. Penguncian dilakukan dengan memasukan nilai 0 pada *coordinate system* pada sumbu x, y dan z agar tidak terjadi perpindahan pada titik atau daerah tersebut. Peletakkan *displacement* pada setiap spesimen adalah sama, sebanyak 4 buah seperti pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Peletakkan displacement pada spesimen

4.2.3 Analisa *Transient Thermal*

Setelah selesai melakukan input data geometri dan perhitungan heat flux, langkah berikutnya adalah melakukan permodelan *transient thermal* pada lembar kerja ANSYS Mechanical. Analisis ini berfungsi untuk menentukan suhu maupun berbagai parameter *thermal* yang memiliki variasi terhadap waktu. Hasil yang akan diperoleh yaitu distribusi suhu (panas) yang mampu memicu terjadinya kegagalan suatu material. Hasil analisis ini dapat digunakan untuk melakukan analisis *transient structural* yang berkaitan dengan beban-beban yang terdapat pada material analisis.

Untuk melakukan analisa *transient thermal*, penulis menggunakan bantuan *software* ANSYS Workbench 16.0. Langkah-langkah untuk melakukan analisa *transient thermal* dapat dilihat pada **Lampiran III**.

Hasil dari analisis *transient thermal* masing-masing spesimen dapat dilihat pada **Lampiran V** hingga **Lampiran X**.

4.2.3 Analisa *Transient Structural*

Data hasil analisa *transient thermal* berikutnya akan dimasukkan kedalam analisa berikutnya, yaitu analisa *transient structural*. Analisis *transient structural* terdiri dari 2 jenis, yaitu analisis secara linier dan non-linier. Tujuan dari analisis *transient structural* adalah mendapatkan respon dinamis material akibat beban yang bergantung pada waktu.

Untuk melakukan analisa *transient structural*, penulis menggunakan bantuan *software* ANSYS Workbench 16.0. Langkah-langkah untuk melakukan analisa *transient structural* dapat dilihat pada **Lampiran IV**. Hasil dari analisis *transient structural* masing-masing spesimen dapat dilihat pada **Lampiran V** hingga **Lampiran X**.

4.2.4 Hasil Distorsi Permodelan Numerik sebelum *Spot Heating*

Setelah berhasil melakukan analisis *transient thermal* dan *transient structural* proses pengelasan, maka penulis memperoleh hasil distorsi sebelum

spot heating. Hasil distorsi yang diperoleh pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.10 hingga 4.12 berikut.

Tabel 4.10 Hasil permodelan distorsi sebelum *spot heating* spesimen 1

| Spesimen 1 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | A | -0,09 mm | -0,18 mm | -0,25 mm | -0,26 mm |
| | B | -0,04 mm | -0,14 mm | -0,22 mm | -0,27 mm |
| | C | 0,03 mm | -0,05 mm | -0,12 mm | -0,22 mm |
| | D | 0,09 mm | 0,07 mm | 0,05 mm | -0,06 mm |

Tabel 4.11 Hasil permodelan distorsi sebelum *spot heating* spesimen 2

| Spesimen 2 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | A | -0,19 mm | -0,30 mm | -0,38 mm | -0,40 mm |
| | B | -0,14 mm | -0,25 mm | -0,34 mm | -0,41 mm |
| | C | -0,06 mm | -0,14 mm | -0,22 mm | -0,35 mm |
| | D | 0,01 mm | -0,01 mm | -0,05 mm | -0,18 mm |

Tabel 4.12 Hasil permodelan distorsi sebelum *spot heating* spesimen 3

| Spesimen 3 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| | A | -0,21 mm | -0,33 mm | -0,41 mm | -0,43 mm |
| | B | -0,14 mm | -0,26 mm | -0,35 mm | -0,42 mm |
| | C | -0,07 mm | -0,15 mm | -0,23 mm | -0,37 mm |
| | D | 0 mm | -0,02 mm | -0,06 mm | -0,19 mm |

4.2.5 Hasil Distorsi Permodelan Numerik Distorsi setelah *Spot Heating*

Setelah berhasil melakukan analisis *transient thermal* dan *transient structural* proses *spot heating*, maka penulis memperoleh hasil distorsi setelah *spot heating*, dilambangkan dengan delta (Δ). Hasil distorsi yang diperoleh pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.13 hingga Tabel 4.15 berikut.

Tabel 4.13 Hasil permodelan distorsi setelah *spot heating* spesimen 1

| Spesimen 1 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | A | 0,25 mm | 0,30 mm | 0,30 mm | 0,25 mm |
| | B | 0,25 mm | 0,30 mm | 0,29 mm | 0,23 mm |
| | C | 0,23 mm | 0,26 mm | 0,26 mm | 0,19 mm |
| | D | 0,18 mm | 0,21 mm | 0,21 mm | 0,17 mm |

Tabel 4.14 Hasil permodelan distorsi setelah *spot heating* spesimen 2

| Spesimen 2 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | A | 0,14 mm | 0,18 mm | 0,20 mm | 0,20 mm |
| | B | 0,13 mm | 0,18 mm | 0,19 mm | 0,19 mm |
| | C | 0,11 mm | 0,14 mm | 0,15 mm | 0,13 mm |
| | D | 0,08 mm | 0,10 mm | 0,10 mm | 0,08 mm |

Tabel 4.15 Hasil permodelan distorsi setelah *spot heating* spesimen 3

| Spesimen 3 | Bagian | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | A | 0,26 mm | 0,36 mm | 0,40 mm | 0,40 mm |
| | B | 0,25 mm | 0,35 mm | 0,40 mm | 0,41 mm |
| | C | 0,21 mm | 0,30 mm | 0,34 mm | 0,35 mm |
| | D | 0,16 mm | 0,21 mm | 0,24 mm | 0,24 mm |

4.2.6 Analisis Distorsi Permodelan Numerik

Setelah pengukuran permodelan selesai dilakukan, berikutnya dilakukan analisis hasil distorsi untuk mengetahui besarnya penyimpangan Δ dari normal, yaitu 8 mm yang merupakan tebal pelat baja A36, yang selanjutnya dilambangkan dengan $\Delta(\%)$.

Berikut adalah rumus perhitungan untuk analisis hasil distorsi:

$$\Delta(\%) = \frac{\Delta}{8 \text{ mm}} \times 100\%$$

Keterangan:

$\% \Delta$ = Besarnya distorsi dari normal (%)

8 mm = Tebal pelat dasar, acuan titik normal

Δ = Hasil pengukuran distorsi (mm)

Hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 4.16 hingga Tabel 4.18 berikut.

Tabel 4.16 Analisis distorsi *spot heating* spesimen 1

| Titik | Δ as welded (mm) | % Δ | Δ Spot ANSYS | Δ Spot (mm) | % Δ |
|------------------------|-------------------------|------------|---------------------|--------------------|------------|
| A1 | -0.09 | -1.13 | 0.15 | 0.06 | 0.75 |
| A2 | -0.18 | -2.25 | 0.19 | 0.01 | 0.13 |
| A3 | -0.25 | -3.13 | 0.19 | -0.06 | -0.75 |
| A4 | -0.26 | -3.25 | 0.17 | -0.09 | -1.13 |
| B1 | -0.04 | -0.50 | 0.16 | 0.12 | 1.50 |
| B2 | -0.14 | -1.75 | 0.19 | 0.05 | 0.63 |
| B3 | -0.22 | -2.75 | 0.20 | -0.02 | -0.25 |
| B4 | -0.27 | -3.38 | 0.16 | -0.11 | -1.38 |
| C1 | 0.03 | 0.38 | 0.15 | 0.18 | 2.25 |
| C2 | -0.05 | -0.63 | 0.17 | 0.12 | 1.50 |
| C3 | -0.12 | -1.50 | 0.18 | 0.06 | 0.75 |
| C4 | -0.22 | -2.75 | 0.15 | -0.07 | -0.88 |
| D1 | 0.09 | 1.13 | 0.12 | 0.21 | 2.63 |
| D2 | 0.07 | 0.88 | 0.14 | 0.21 | 2.63 |
| D3 | 0.05 | 0.63 | 0.15 | 0.2 | 2.50 |
| D4 | -0.06 | -0.75 | 0.11 | 0.05 | 0.63 |
| Rata-Rata Distorsi | | -1.297 | Rata-Rata Distorsi | | 0.719 |
| Perubahan Distorsi (%) | | 2.016 | | | |

Tabel 4.17 Analisis distorsi setelah *spot heating* spesimen 2

| Titik | Δ as welded (mm) | % Δ | Δ Spot ANSYS | Δ Spot (mm) | % Δ |
|------------------------|-------------------------|------------|---------------------|--------------------|------------|
| A1 | -0.19 | -2.38 | 0.06 | -0.13 | -1.63 |
| A2 | -0.3 | -3.75 | 0.07 | -0.23 | -2.88 |
| A3 | -0.38 | -4.75 | 0.08 | -0.3 | -3.75 |
| A4 | -0.4 | -5.00 | 0.08 | -0.32 | -4.00 |
| B1 | -0.14 | -1.75 | 0.05 | -0.09 | -1.13 |
| B2 | -0.25 | -3.13 | 0.07 | -0.18 | -2.25 |
| B3 | -0.34 | -4.25 | 0.07 | -0.27 | -3.38 |
| B4 | -0.41 | -5.13 | 0.07 | -0.34 | -4.25 |
| C1 | -0.06 | -0.75 | 0.05 | -0.01 | -0.13 |
| C2 | -0.14 | -1.75 | 0.06 | -0.08 | -1.00 |
| C3 | -0.22 | -2.75 | 0.06 | -0.16 | -2.00 |
| C4 | -0.35 | -4.38 | 0.06 | -0.29 | -3.63 |
| D1 | 0.01 | 0.13 | 0.03 | 0.04 | 0.50 |
| D2 | -0.01 | -0.13 | 0.04 | 0.03 | 0.38 |
| D3 | -0.05 | -0.63 | 0.04 | -0.01 | -0.13 |
| D4 | -0.18 | -2.25 | 0.04 | -0.14 | -1.75 |
| Rata-Rata Distorsi | | -2.664 | Rata-Rata Distorsi | | -1.938 |
| Perubahan Distorsi (%) | | 0.727 | | | |

Tabel 4.18 Analisis distorsi setelah *spot heating* spesimen 3

| Titik | Δ as welded (mm) | % Δ | Δ Spot ANSYS | Δ Spot (mm) | % Δ |
|------------------------|-------------------------|------------|---------------------|--------------------|------------|
| A1 | -0.21 | -2.63 | 0.12 | -0.09 | -1.13 |
| A2 | -0.33 | -4.13 | 0.16 | -0.17 | -0.02 |
| A3 | -0.41 | -5.13 | 0.17 | -0.24 | -0.03 |
| A4 | -0.43 | -5.38 | 0.17 | -0.26 | -0.03 |
| B1 | -0.14 | -1.75 | 0.12 | -0.02 | 0.00 |
| B2 | -0.26 | -3.25 | 1.15 | 0.89 | 0.11 |
| B3 | -0.35 | -4.38 | 1.17 | 0.82 | 0.10 |
| B4 | -0.42 | -5.25 | 0.17 | -0.25 | -0.03 |
| C1 | -0.07 | -0.88 | 0.10 | 0.03 | 0.00 |
| C2 | -0.15 | -1.88 | 0.13 | -0.02 | 0.00 |
| C3 | -0.23 | -2.88 | 0.15 | -0.08 | -0.01 |
| C4 | -0.37 | -4.63 | 0.15 | -0.22 | -0.03 |
| D1 | 0 | 0.00 | 0.08 | 0.08 | 0.01 |
| D2 | -0.02 | -0.25 | 0.10 | 0.08 | 0.01 |
| D3 | -0.06 | -0.75 | 0.11 | 0.05 | 0.01 |
| D4 | -0.19 | -2.38 | 0.10 | -0.09 | -0.01 |
| Rata-Rata Distorsi | | -2.844 | Rata-Rata Distorsi | | -0.066 |
| Perubahan Distorsi (%) | | 2.778 | | | |

4.3 Validasi Eksperimen dengan Numerik

Setelah dilakukan pengukuran pada ketiga spesimen, baik sebelum dan sesudah *spot heating*, maka dilakukan validasi perubahan distorsi yang terjadi pada setiap spesimen. Validasi ini berguna untuk membandingkan hasil eksperimen dengan permodelan numerik, dan juga untuk mengetahui jumlah titik pemanasan yang paling efektif untuk mengurangi besarnya distorsi yang terjadi akibat pengelasan. Analisa perubahan distorsi eksperimen yang terjadi ditampilkan pada Tabel 4.19 berikut ini.

Tabel 4.19 Validasi hasil distorsi eksperimen dengan permodelan numerik

| PERUBAHAN DISTORSI | | | |
|--------------------|----------------|-------------|-----------|
| SPESIMEN | EKSPERIMEN (%) | NUMERIK (%) | ERROR (%) |
| 1 | 3,406 | 2,016 | 40,83 |
| 2 | 4,617 | 0,727 | 84,26 |
| 3 | 5,477 | 2,778 | 49,27 |

4.3.1 Analisa Hasil Validasi

Berdasarkan hasil validasi antara eksperimen dengan permodelan numerik pada Tabel 4.19, didapatkan hasil perubahan distorsi pada masing-masing spesimen. Pada spesimen 1, perubahan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 3,406% dan pada permodelan numerik sebesar 2,016%, dengan margin error sebesar 40,83%. Pada spesimen 2, perubahan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 4,617%, dan pada permodelan numerik adalah 0,727%, dengan margin error 84,26%. Pada spesimen 3, perubahan distorsi yang terjadi pada eksperimen adalah 5,477%, dan pada permodelan numerik adalah 2,778%, dengan margin error sebesar 49,27%.

Berdasarkan hasil perubahan distorsi pada eksperimen pengelasan, dapat ditarik kesimpulan bahwa spesimen 3 dengan variasi 52 titik pemanasan memiliki perubahan distorsi yang sangat signifikan dibanding spesimen 1 dan spesimen 2. Namun untuk memastikan hasil tersebut sesuai, maka dilakukan permodelan numerik berbasis metode elemen hingga. Permodelan numerik ini bertujuan karena masih ada kemungkinan bahwa hasil eksperimen kurang akurat, dikarenakan banyak faktor yang dapat mempengaruhi hasil eksperimen, seperti keahlian juru las (welder) dan juga kondisi disekitar bengkel pengelasan saat proses eksperimen sedang berlangsung.

Setelah melakukan pengumpulan data eksperimen, maka dilakukan permodelan numerik untuk masing-masing spesimen. Pada permodelan didapatkan hasil bahwa spesimen 3 dengan variasi 52 titik pemanasan menghasilkan perubahan distorsi yang signifikan dibandingkan dengan spesimen 1 dan spesimen 2. Hal ini disebabkan karena pada spesimen 3 memiliki 52 titik pemanasan, sehingga persebaran panas lebih merata dan lebih luas, sehingga dapat menjangkau seluruh bagian panel pelat yang mengalami distorsi akibat pengelasan. Sedangkan, pada spesimen 1 dengan variasi 20 titik pemanasan dan spesimen 2 dengan variasi 36 titik pemanasan, persebaran panas

kurang merata di seluruh bagian panel pelat, terutama yang mengalami distorsi akibat pengelasan.

Terjadinya distorsi akibat proses pengelasan memang tidak dapat dihindari, namun demikian, dengan *fairing* menggunakan metode *spot heating* diharapkan distorsi yang terjadi pada struktur dapat diperbaiki. Umur dan ketahanan struktur juga diharapkan dapat bertahan lebih lama dibandingkan dengan kondisi struktur yang mengalami distorsi sudut yang lebih besar yang diakibatkan proses pengelasan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Berdasarkan hasil validasi antara hasil eksperimen dengan permodelan numerik, pada spesimen 1 dengan variasi 20 titik pemanasan, menghasilkan perubahan distorsi sebesar 3,406% pada eksperimen dan sebesar 2,016% pada permodelan numerik, dengan *margin error* 40,83%. Pada spesimen 2 dengan variasi 36 titik pemanasan, menghasilkan perubahan distorsi sebesar 4,617% pada eksperimen dan sebesar 0,727% pada permodelan numerik, dengan *margin error* 84,26%. Pada spesimen 3 dengan variasi 52 titik pemanasan, menghasilkan perubahan distorsi sebesar 5,477% pada eksperimen dan sebesar 2,778% pada permodelan numerik, dengan *margin error* 49,27%. Masih tingginya perbedaan hasil antara eksperimen dan permodelan numerik dikarenakan asumsi bahan yang bersifat *linear elastic*.
2. Berdasarkan hasil validasi antara hasil eksperimen dengan permodelan numerik, spesimen 3 dengan variasi 52 titik pemanasan mampu memberikan perubahan distorsi yang efektif. Hal itu dikarenakan dengan 52 titik pemanasan, maka persebaran panas lebih merata dan dapat menjangkau lebih luas pelat yang mengalami distorsi akibat pengelasan.

5.2 Saran

Selama proses penyusunan penelitian ini, banyak *trial & error* yang telah dilakukan untuk menyesuaikan permodelan numerik semirip mungkin dengan hasil yang diperoleh saat eksperimen. Sebagai tindak lanjut, apabila topik tugas akhir ini hendak diteliti kembali, mohon untuk melakukan saran-saran berikut ini:

1. Melakukan pengukuran distorsi pelat baja setelah pembelian, sebelum dilakukan eksperimen lebih lanjut.
2. Melakukan analisa struktur mikro, agar hasil kekuatan struktur yang disebabkan proses *spot heating* dapat dianalisa dengan akurat.
3. Menggunakan *meshing sensitivity* agar hasil permodelan numerik yang diperoleh menjadi lebih akurat.
4. Memperbesar ukuran spesimen, terutama jarak antar *stiffener* agar disesuaikan sesuai *code* yang berlaku untuk pengukuran distorsi, yaitu setiap 500 mm x 500 mm.
5. Menggunakan *gas oxyacetylene* untuk proses *spot heating* agar suhu dapat mencapai 500°C sesuai *standard*.
6. Menentukan *timeline* pengerjaan penelitian yang teratur, agar mampu menganalisis dengan waktu yang terjadwal sehingga mendapatkan hasil yang lebih maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. (1999). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. United States: ASTM International.
- Callister Jr, W. D. (1994). *Material Science and Engineering 3rd Edition*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Furunaka Jica, S. (2002). *Buku Pedoman untuk Fairing*. Palembang, Indonesia.
- Kozin, M. (2012). *Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Roda Kereta Api Buatan Lokal*. Salemba: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
- Logan, D. L. (2000). *A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition*. Canada.
- Masubuchi, K. (2013). *Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences*. 2013: Elsevier.
- Pribadi, T. W., & Hendroprasetyo, W. (1997). *Pengaruh Proses Pembentukan Cara Panas (Flame Heating Technique) pada Kekuatan Mekanis Pekat Baja Kelas A-BKI Produksi Krakatau Steel*. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan - ITS.
- Radaj, D. (1992). *Heat Effects of Welding : Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin: Springer-Verlag.
- Rois, M. A., I.S, P., & P., E. (2018). Study Analisis Pekerjaan Fairing pada Lambung Kapal di PT. PAL Indonesia. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan VI*, 93-99.
- Smallman, R., & Bishop, R. (2000). *Modern physical metallurgy and materials engineering*. New York: Hill International Book Company.

- Sulaiman. (2010). *Pengaruh Proses Pelengkungan dan Pemanasan Garis Pelat Baja*. Semarang: Program Pascasarjana Universitas Diponegoro.
- Syahroni, N., & Hidayat, M. I. (2012). *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stress and Distortions*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- The Lincoln Electric Company. (1973). *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Toronto, Canada: The Lincoln Electric Company.
- Wei, L., Dean, D., & Hidekazu, M. (2005). Prediction of Welding Distortion of Large Structures. *Measurement of Inherent Deformation in Typical Weld Joints Using Reverse Analysis*.
- Wibowo, H., Ilman, M., & Iswanto, P. (2016). Analisa Heat Input Pengelasan terhadap Distorsi, Struktur Mikro dan Kekuatan Mekanis Baja A36. *Jurnal Rekayasa Mesin Vol.7, No.1*, 5-12.
- Wijoyo. (2011). *Minimisasi Distorsi Sambungan Las Dengan Pemberian Flame Heating Selama Proses Pengelasan*. Semarang: Universitas Wahid Hasyim.
- Wiryosumarto, H., & Okumura, T. (1996). *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

LAMPIRAN

LAMPIRAN I
WELDING PROCEDURE
SPEKIFIKASI

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION

PREQUALIFIED QUALIFIED BY TESTING

| | |
|--|--|
| Company Name : PT. PAL INDONESIA WPS No. : PAL GE-189-WPS Welding Process(es) : SMAW+FCAW Supporting PCF No.(s) : PAL GE-169-PQR Applicable Code : AWS D1.1 / D1.1M : 2010 | Revision No. : 0 Date : August 9, 2014 Type : Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semi-Automatic <input checked="" type="checkbox"/> Machine <input type="checkbox"/> Automatic <input type="checkbox"/> |
|--|--|

JOINT DESIGN USED

Type : TYK connection branch member and Fillet

Single Double Weld

Backing : Yes No Backing Material : _____

Root Opening : Min 3 mm

Root Face Dimension : max 1 mm

Groove Angle : 37.5° (+10°, -0°)

Back Gouging : Yes No

Method : _____

POSITION

Position of Groove : All Position

Fillet : All Position

Vertical Progression : Uphill
Downhill

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current : AC DCEP DCEN

Transfer Mode : Spray Arc

BASE METALS

Material Spec. : All material as specified in AWS D1.1 table 3.1 group II or equivalent

Thickness : Groove : 3 - 12 (Non Impact)
 B - 12 (Impact)

 Fillet : Any Size

Diameter (Pipe) : 4" (100 mm) and Over

TECHNIQUE

Stringer or Weave Bead : Stringer and Weave

Multipass or Single Pass (per side) : Multipass

Number of Electrodes : Single Electrode

FILLER METALS

AWS Specification : A5.1 : A5.20

A No. : 1 : 1

F No. : 4 : 6

AWS Classification : E 7018 : E 717-9C-J

Brand Name : LB-52U (Kobe) or Equivalent ;
Dual Shield # 71H (ESAB) or Equivalent

Note

- Maximum weaving shall not exceed 3 times of electrode core diameter or 12 mm whichever is least (for SMAW)
- NDT should be conducted 48 hours after welding completion.
- Preheat for permanent tack weld shall be 50° C higher than specified in WPS which maximum 300° C
- Welding of each weld shall be continuous.

In the case that welding must be discontinue, this shall not take place before at least a half of the final weld thickness is achieved.

SHIELDING

Flux : N/A

Electro-Flux (class) : N/A

Gas : 99.95% CO2

Composition : N/A

Flow Rate : 10 - 25 LPM

Gas Cup Size : N/A

PREHEAT

Preheat Temp., Min. : Ambient (T 3 to 20 mm)
85°C (T over 20 thru 38 mm)
110°C (T over 38 thru 65 mm)
150°C (T over 65 mm)

Interpass Temp., Min. : As Preheat Above Max. 181 °C

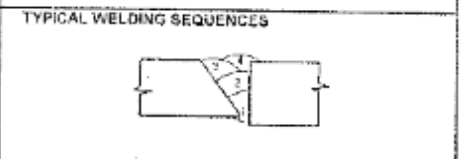
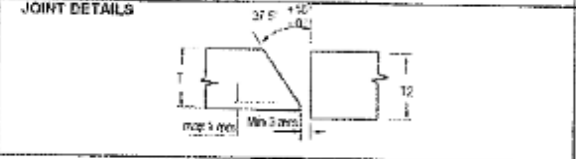
Preheat Method : By heating torch or heating pad

Control Method : Digital, Temperature Indicating Crayon or Infrared Thermometer

POST WELD HEAT TREATMENT

Temp : None

Time : None



| WELDING PARAMETERS | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------------|--|----------|-----------------|-----------|-----------------------|--------------------|---------------|------|---------|-----------------|
| Pass or Weld Layer(s) | Process | Filler Metals | | Dia (mm) | Current | | Travel Speed (mm/min) | Heat Input (KJ/mm) | Shielding Gas | | Remark | |
| | | Class | | | Type & Polarity | Amps (A) | | | Volts (V) | Type | | Flow Rate (LPM) |
| 1st | SMAW | E7018 | | 2.6 | DCEP | 80 - 80 | 15 - 25 | 35 - 55 | 1.0 - 2.0 | CO2 | 10 - 25 | |
| 2nd | FCAW | E717-9C-J | | 1.2 | DCEP | 180 - 200 | 16 - 26 | 50 - 130 | 1.5 - 2.5 | CO2 | 10 - 25 | |
| Cap | FCAW | E717-9C-J | | 1.2 | DCEP | 150 - 190 | 17 - 26 | 85 - 125 | 1.6 - 2.0 | CO2 | 10 - 25 | |

Certified by,
PT. PAL INDONESIA



BAMBANG HARI ROESSANTOSO
WELDING ENGINEER

Approved by Migas

No. Reg 667/175-29/WP/2014



Bambang Hari Roessantoso
Welding Engineer

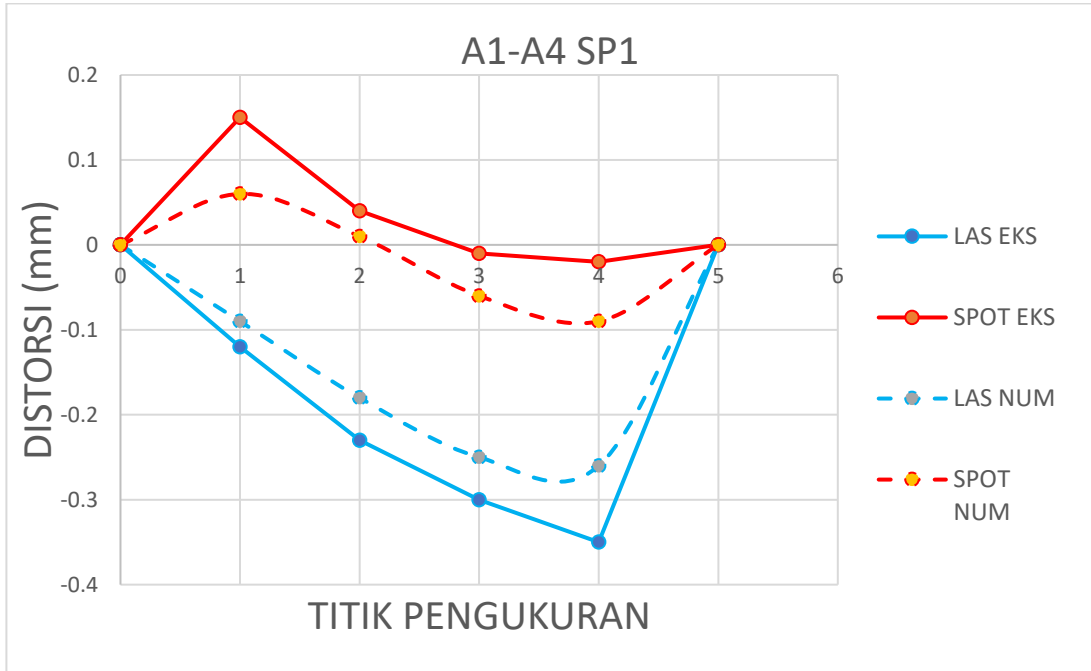
MIGAS
No. 1458/2014 100703 2007

- Longitudinal Stiffener
 - Jarak antar Longitudinal Stiffener = 200 mm
 - Tinggi web = 100 mm
- Transversal Stiffener
 - Jarak antar Transversal Stiffener = 200 mm
 - Tinggi web = 100 mm
- Material
 - Tipe Baja = A36
 - Ketebalan = 8 mm
 - Ukuran pelat = 300 mm x 400 mm
- Kondisi Pengelasan (PT. PAL INDONESIA (PERSERO), 2014)
 - Proses pengelasan = SMAW
 - Posisi las = 2F
 - Jenis sambungan = T-Joint
 - *Current* = 85 A
 - Tegangan = 19 V
 - *Weld Size* = 0,25 in.
 - *Arc Speed* = 55 mm/min
 - Electrode Class = E7016
 - Electrode Size = 2.6 mm

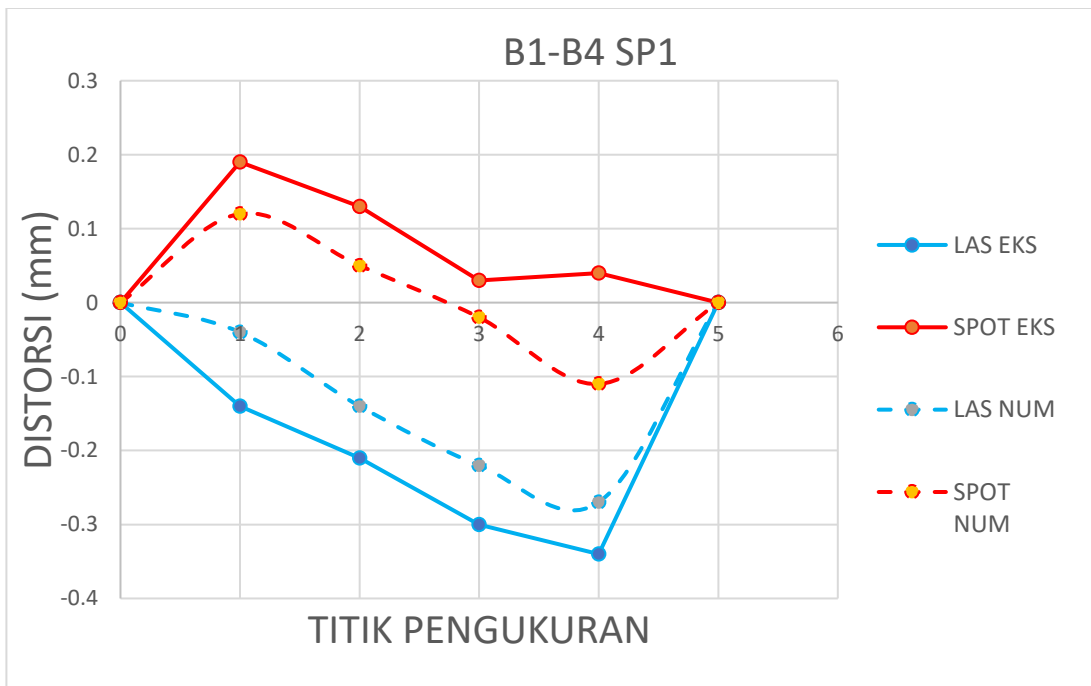
LAMPIRAN II
GRAFIK ANALISA
PERUBAHAN DISTORSI

SPESIMEN 1

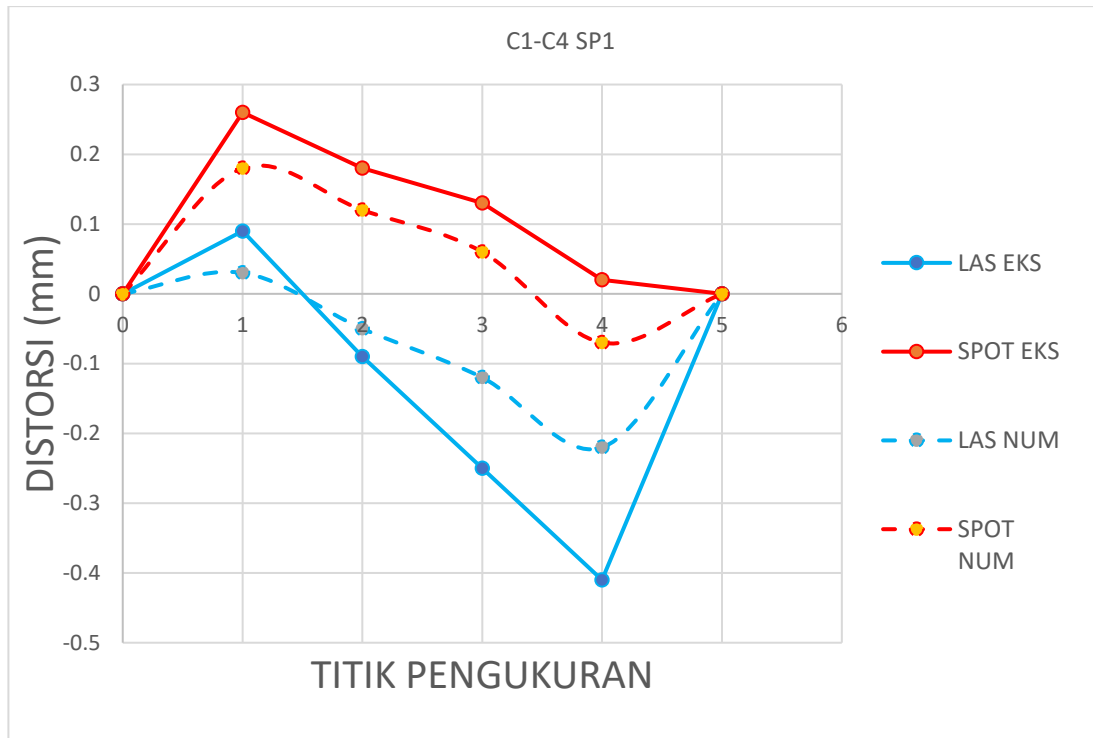
- TITIK A1-A4



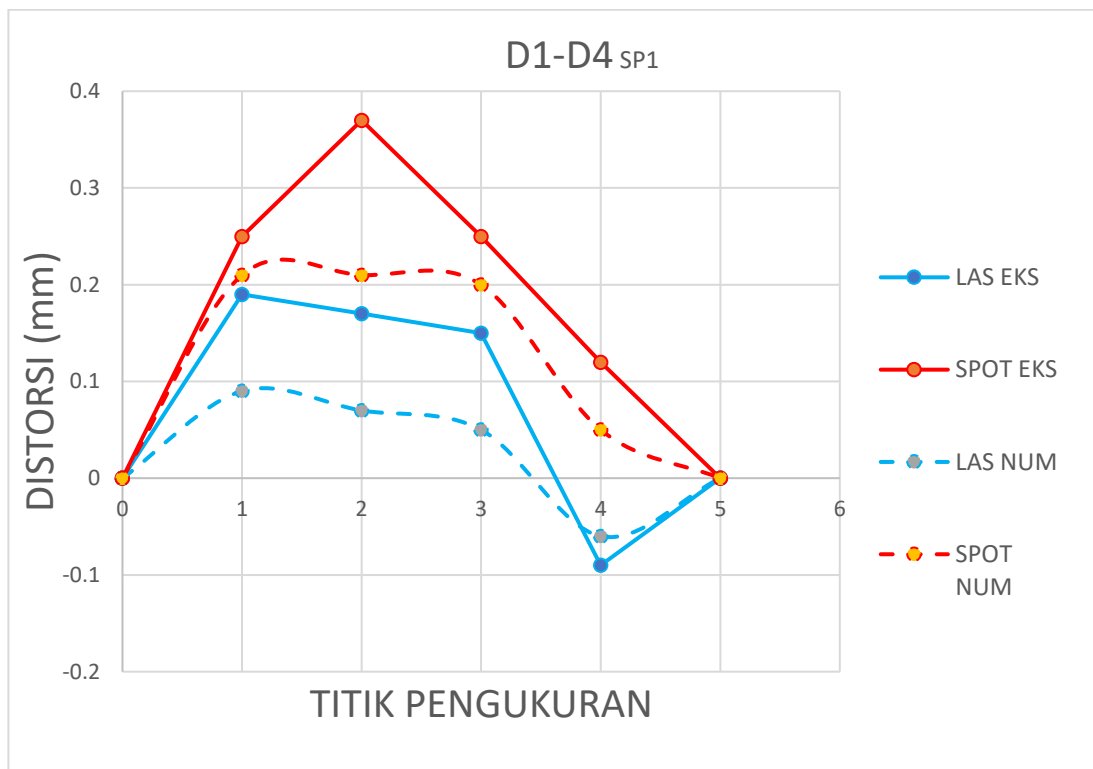
- TITIK B1-B4



- TITIK C1-C4

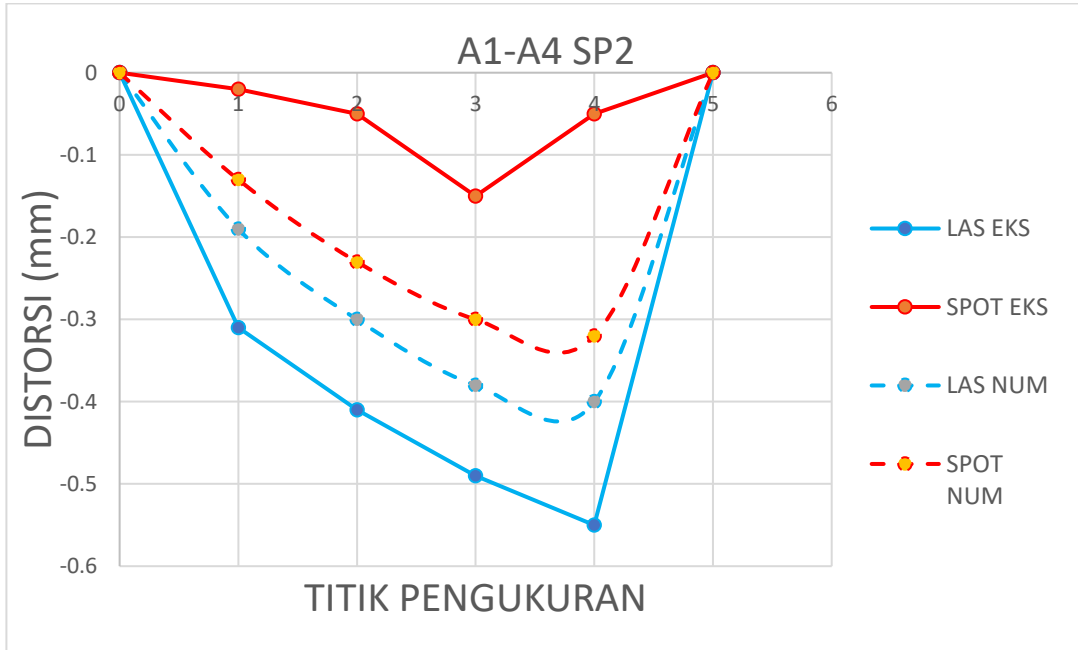


- TITIK D1-D4

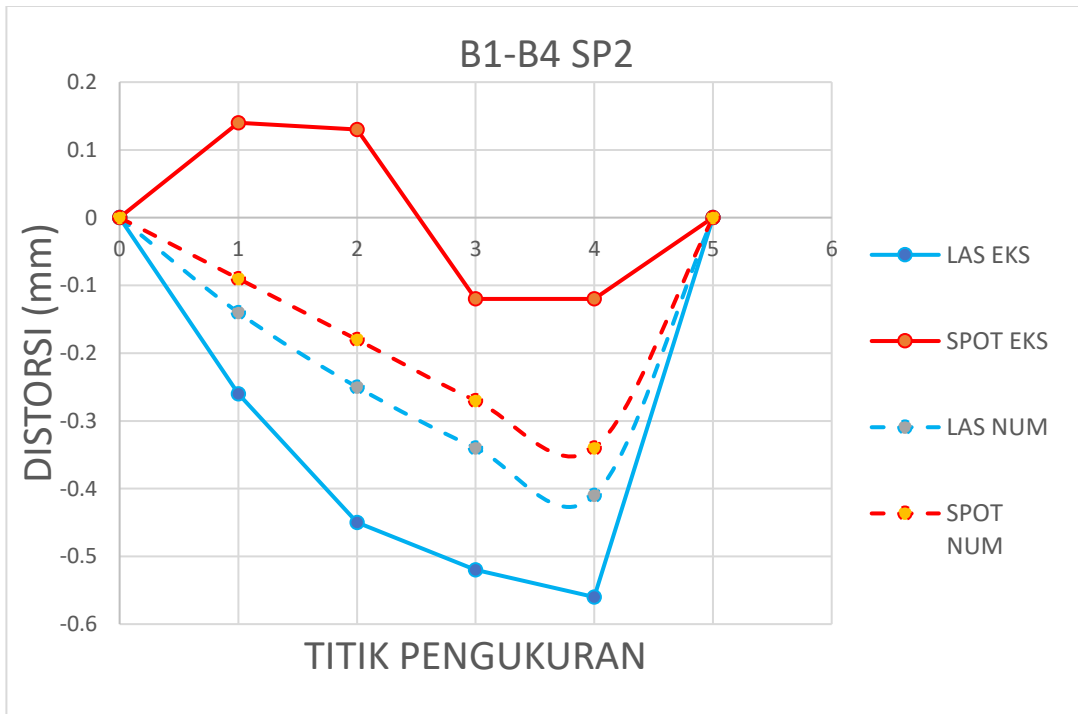


SPEKIMEN 2

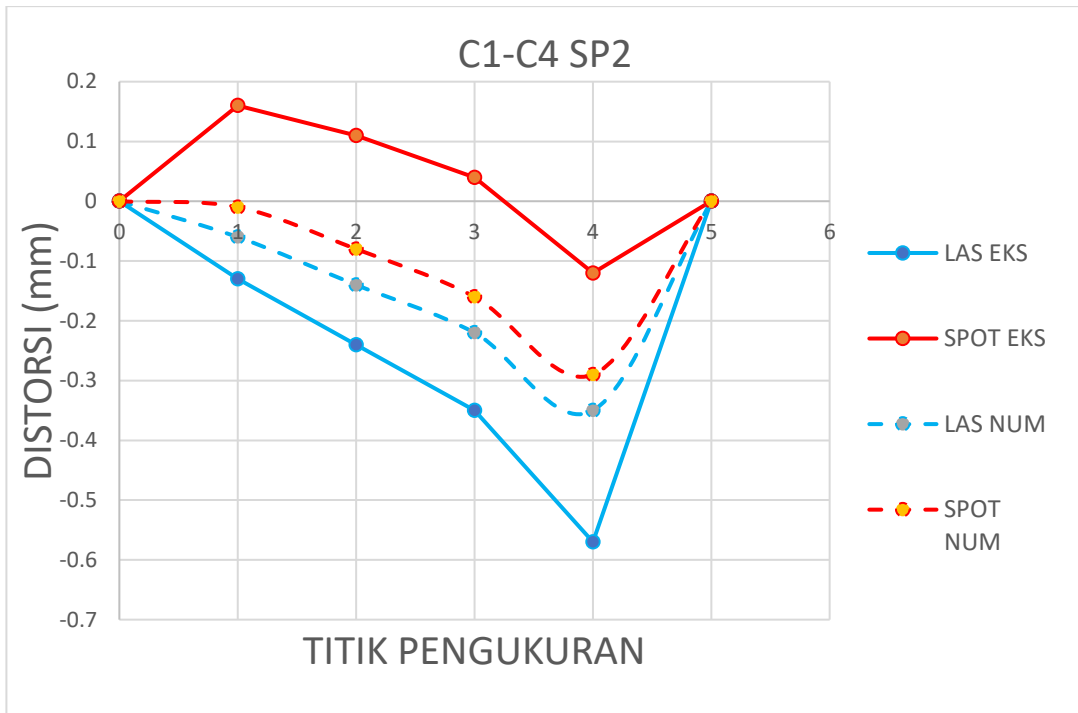
- TITIK A1-A4



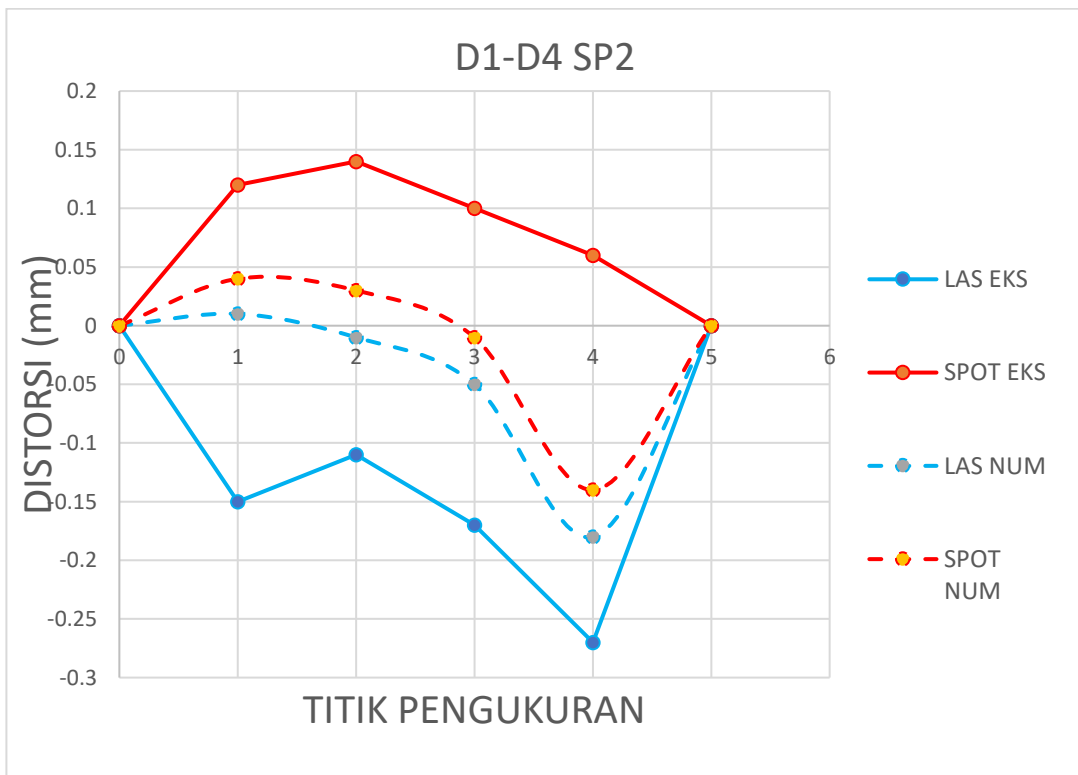
- TITIK B1-B4



- TITIK C1-C4

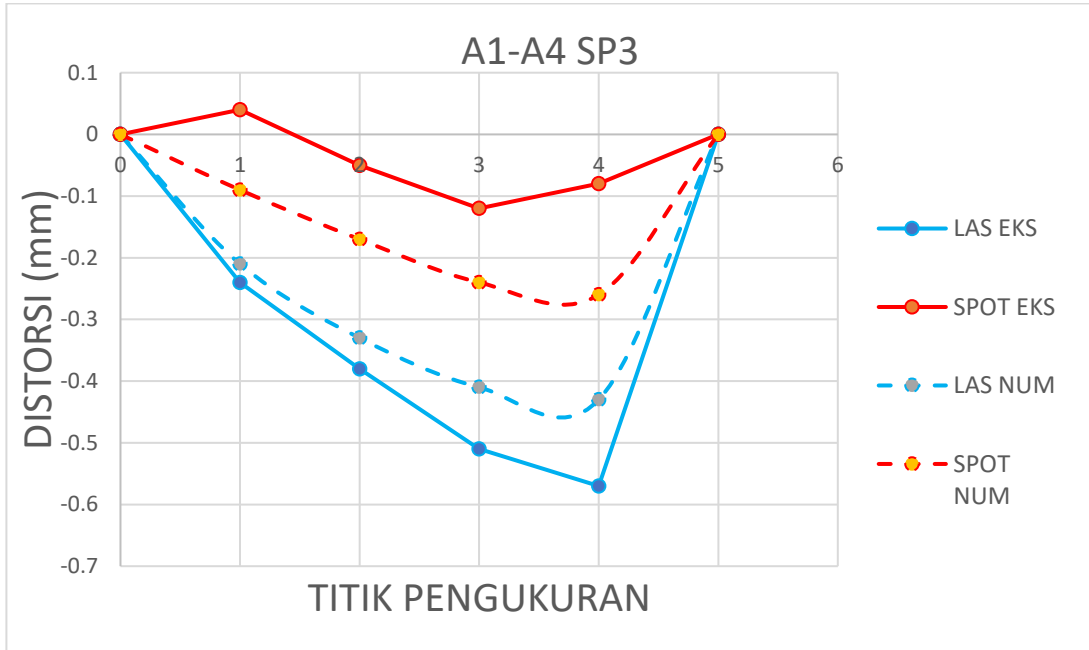


- TITIK D1-D4

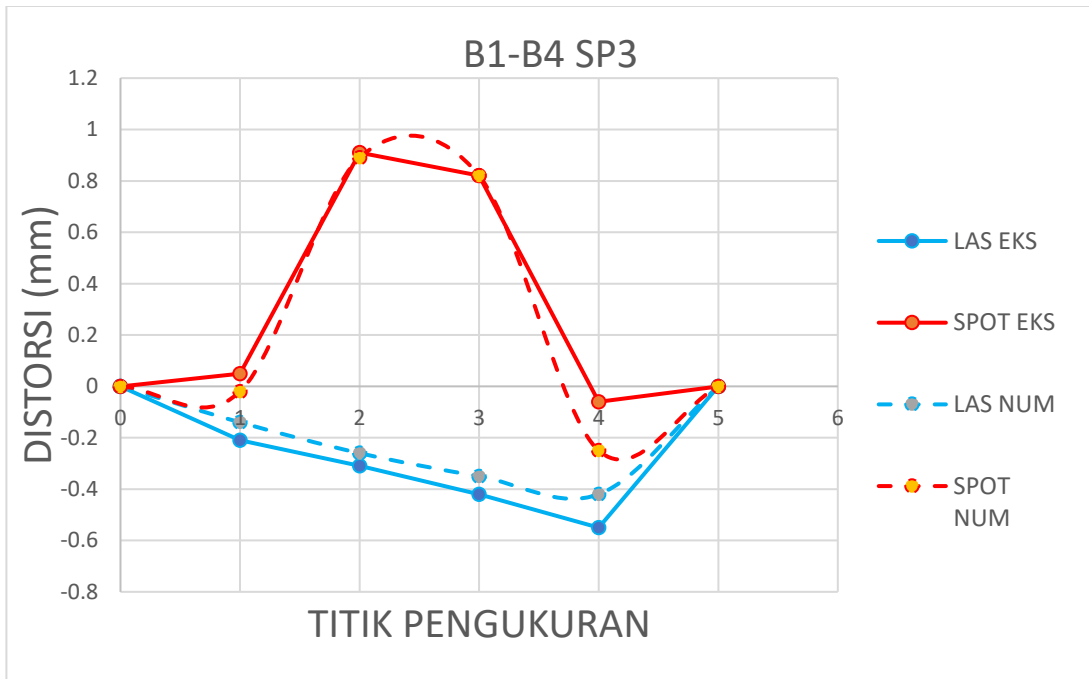


SPEKIMEN 3

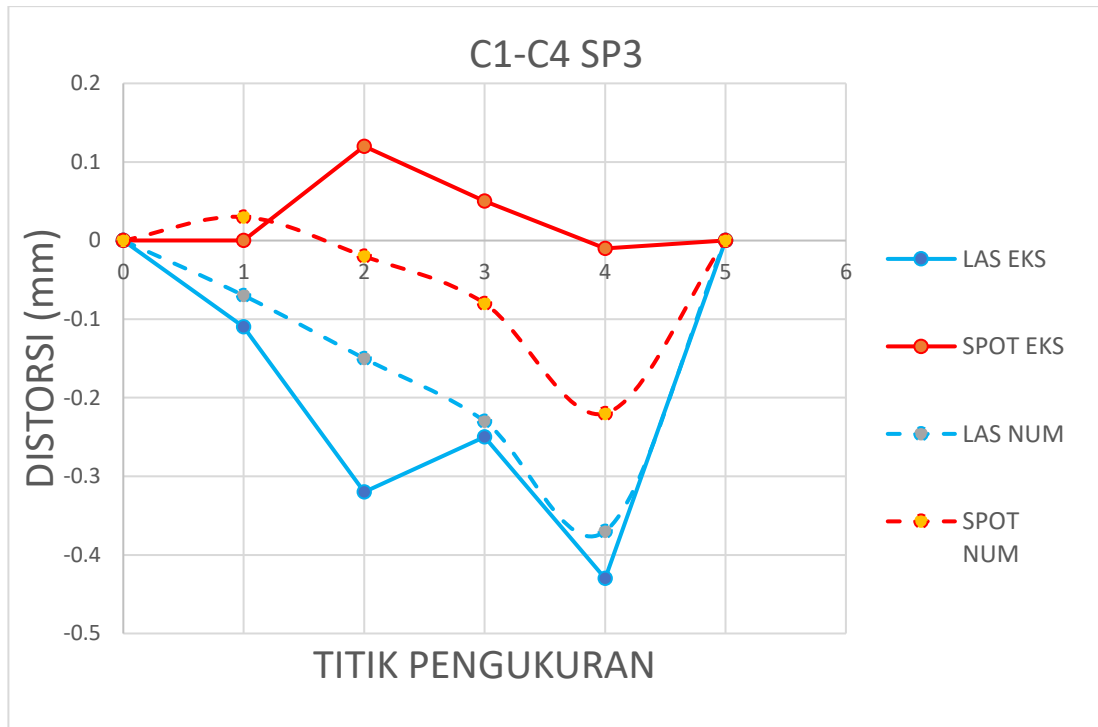
- TITIK A1-A4



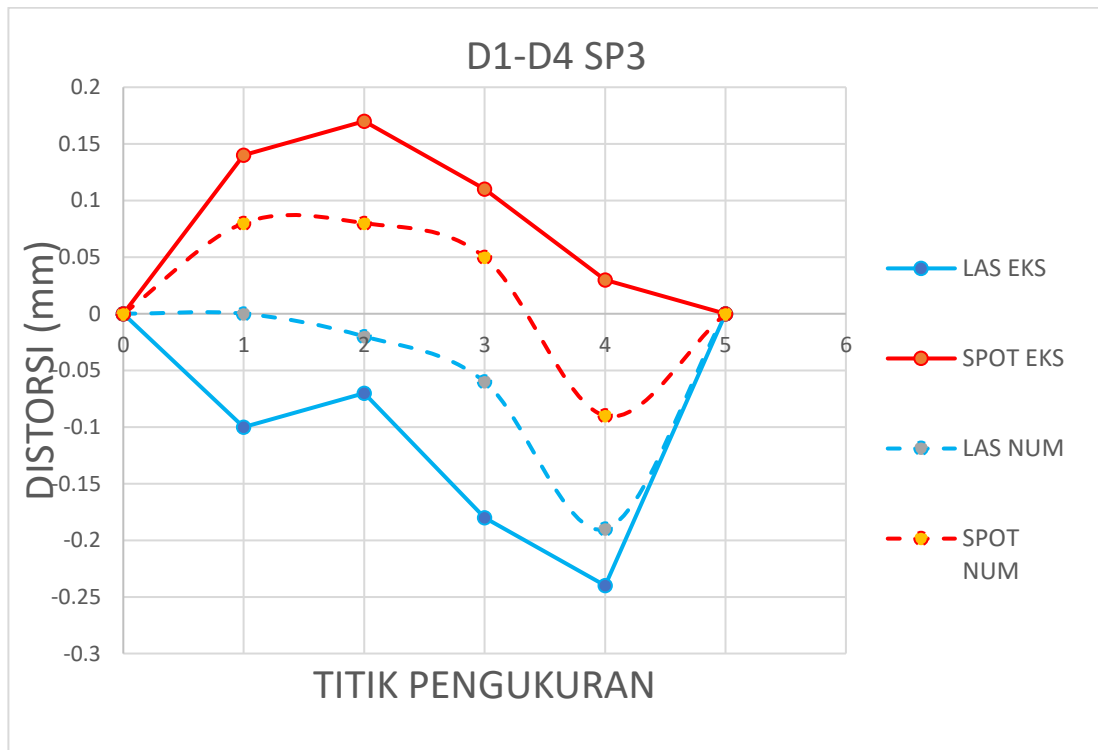
- TITIK B1-B4



- TITIK C1-C4



- TITIK D1-D4



LAMPIRAN III
LANGKAH ANALISA
TRANSIENT THERMAL

1. *Input Engineering Data*

Melakukan *input* pada *Engineering Data* menyesuaikan dengan jenis material yang digunakan. Pada tugas akhir ini, material yang digunakan adalah Baja A36 dengan spesifikasi sebagai berikut:

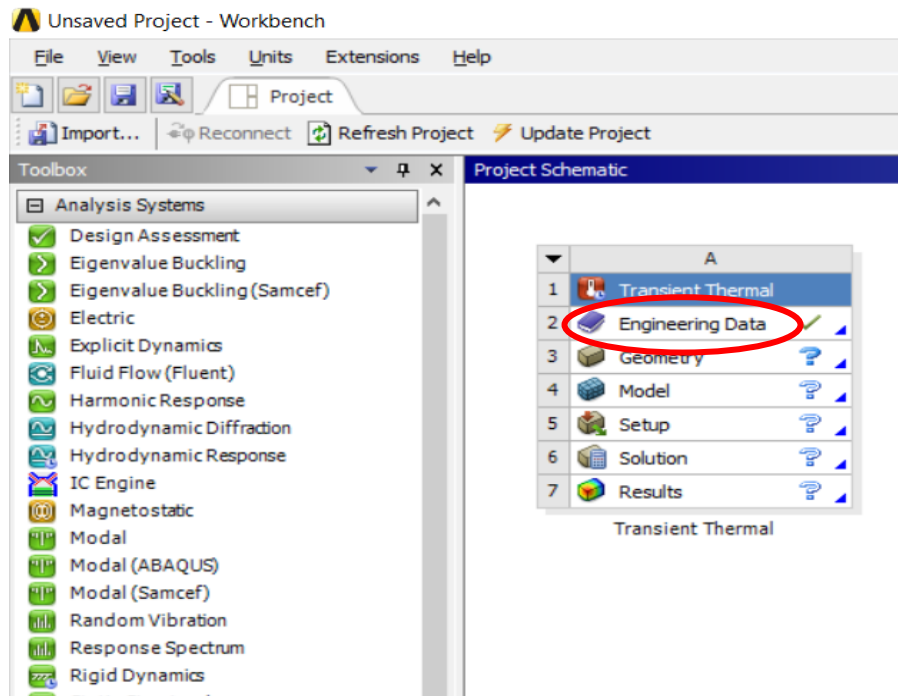
Density = 7860 kg m³

Spesific Heat = 43 W/m K

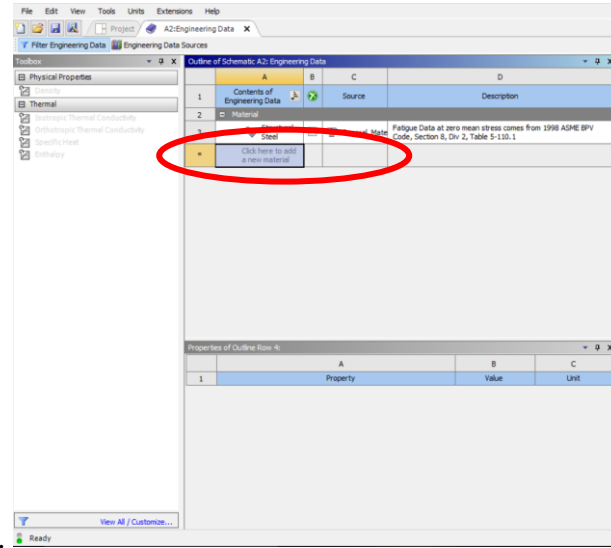
Isotropic Thermal Conductivity = 440 J/kg K

Lakukan *input* pada *software* ANSYS Workbench 16.0 dengan cara sebagai berikut:

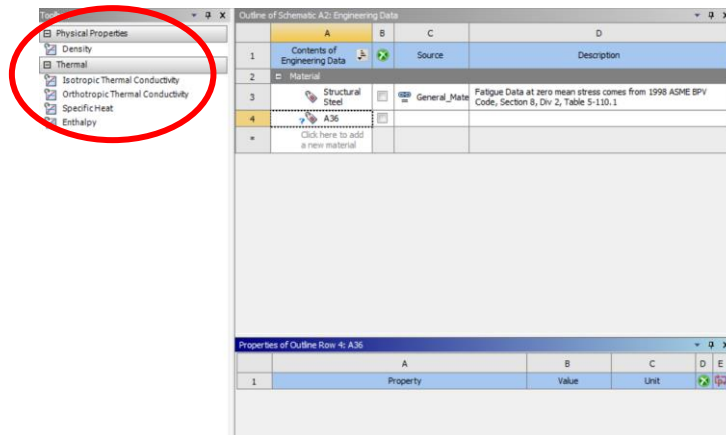
- Pilih bagian *Engineering Data* dengan cara *double click*.



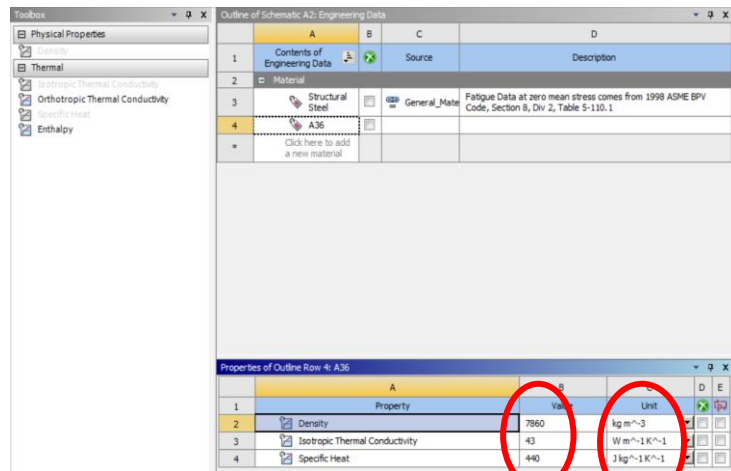
b. Setelah masuk pada *Engineering Data*, tambahkan material dengan nama



c. Lakukan penambahan *Property* untuk material A36 berupa *Density*, *Specific Heat*, dan *Isotropic Thermal Conductivity* yang tersedia pada kolom *Toolbox* dengan cara *double click* pada komponen yang ingin ditambahkan.



d. Lakukan *input* pada setiap *Property* yang sudah ditambahkan sesuai data spesifikasi Baja A36. Sesuaikan juga unit yang digunakan dengan data spesifikasi.

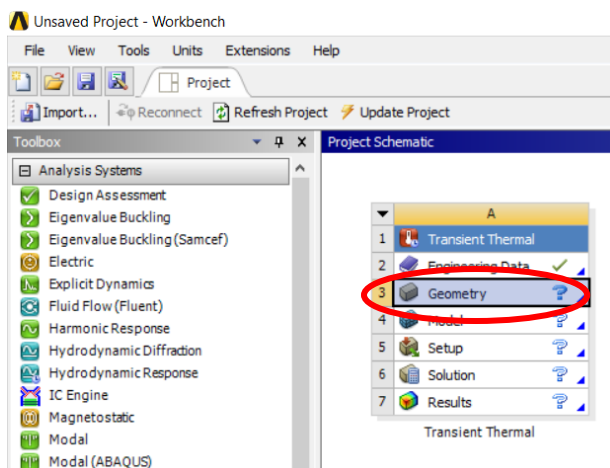


e. Tutup tab *Engineering Data* dan kembali ke tampilan awal.

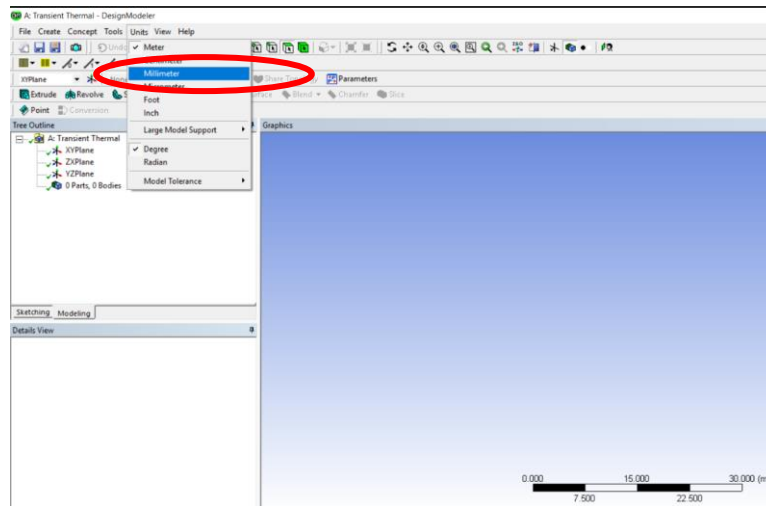
2. *Input Geometry*

Melakukan *Input Geometry* sesuai dengan hasil rancangan geometri pada *software* AutoCAD Inventor. Langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

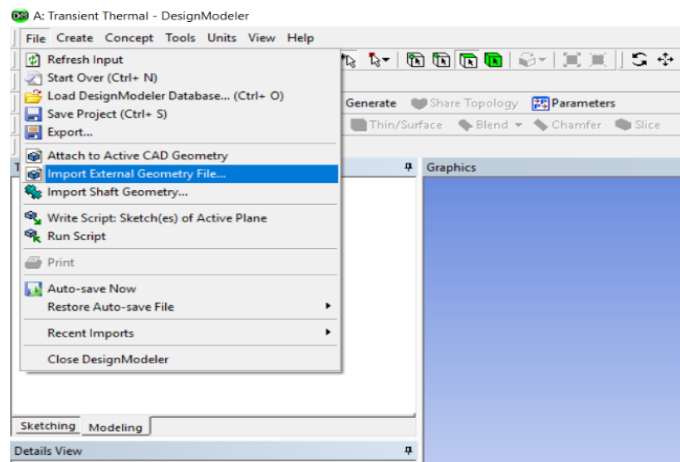
a. Pilih bagian *Geometry* dengan cara *double click*.

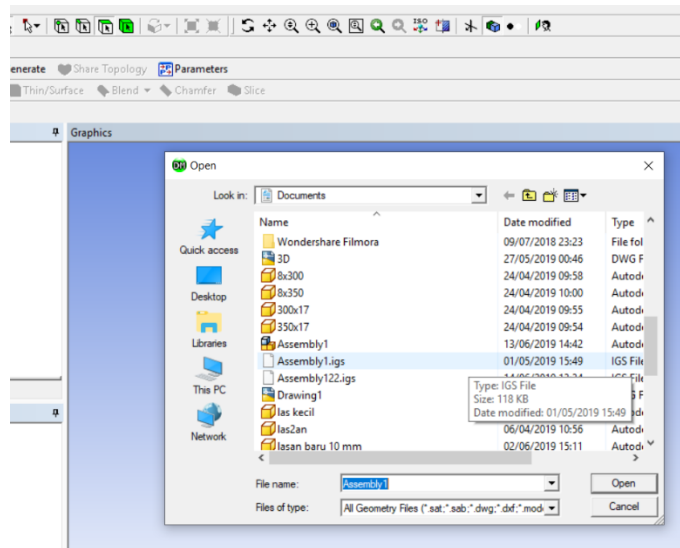


- b. Setelah masuk pada *Window Design Modeler*, lakukan perubahan unit yang digunakan (standar ANSYS adalah meter) menjadi milimeter (mm). Pilih menu *Units*, lalu pilih milimeter.

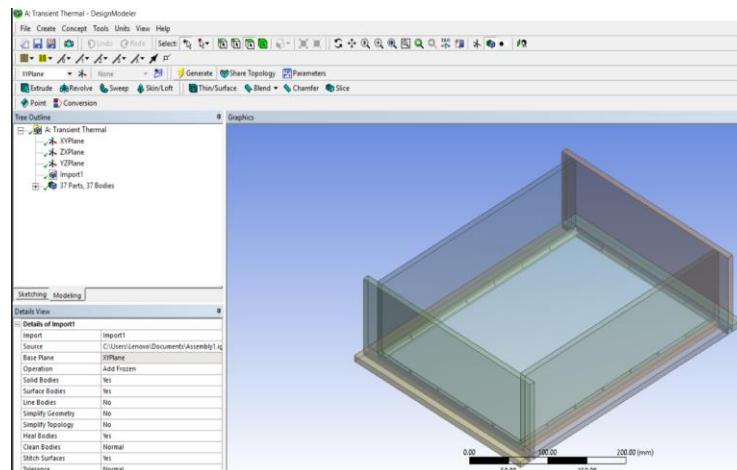
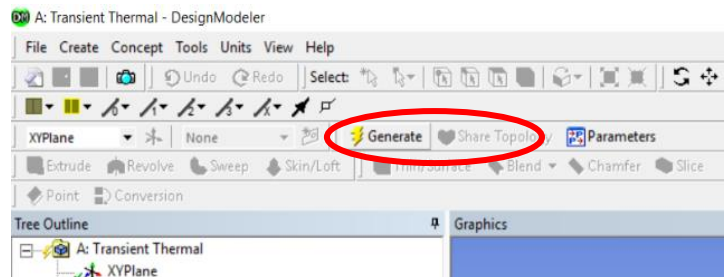


- c. Lakukan impor geometri dari hasil software AutoCAD Inventor yang sudah di simpan dalam format **Namafile.igs**. Untuk melakukan impor, pilih menu *File*, lalu klik *Import External Geometry File*, kemudian pilih file yang ingin diimpor.





- d. Lakukan *Generate* pada hasil geometri, dengan cara menekan *Generate* dengan lambang petir kuning.

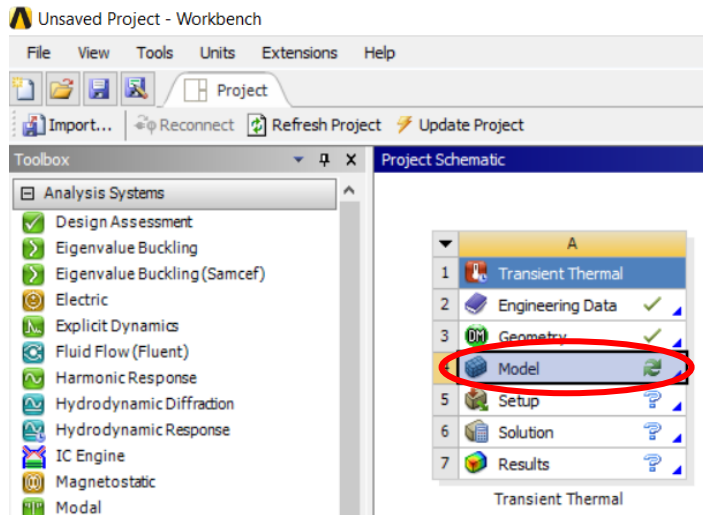


- e. *Minimize Window Design Modeler* dan kembali ke tampilan awal.

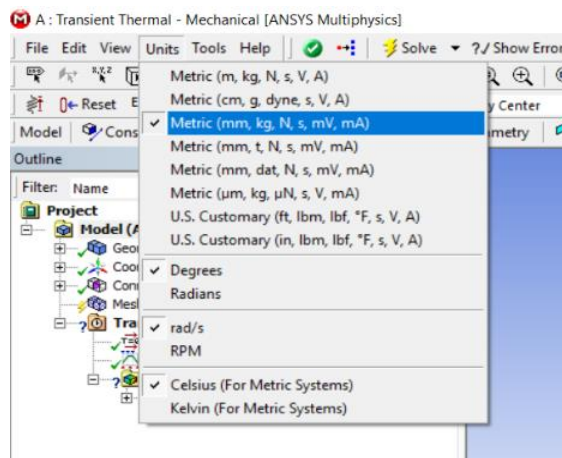
3. Analisa Model

Geometri yang sudah *diinput* akan dijadikan Model oleh ANSYS Workbench untuk dilakukan analisa *Transient Thermal*. Langkah-langkah untuk melakukan analisa model adalah sebagai berikut:

- a. Pilih bagian Model dengan cara *double click*.



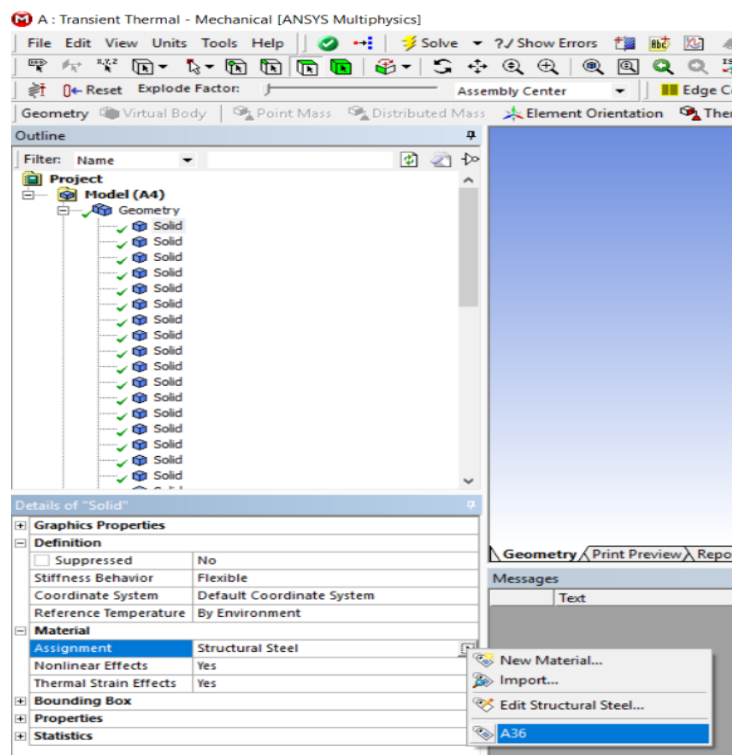
- b. Setelah masuk pada *Window ANSYS Mechanical*, cek unit yang digunakan. Unit yang harus digunakan adalah *Metric* (mm, kg, N, s, mV, mA). Untuk mengubah unit, pilih menu *Units* dan pilih *Metric* yang sesuai.



4. *Input Model Geometry*

Langkah ini bertujuan untuk memastikan model yang menggunakan geometri hasil input telah menerapkan *Engineering Data* yang tepat di setiap bagiannya. Langkah-langkah yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

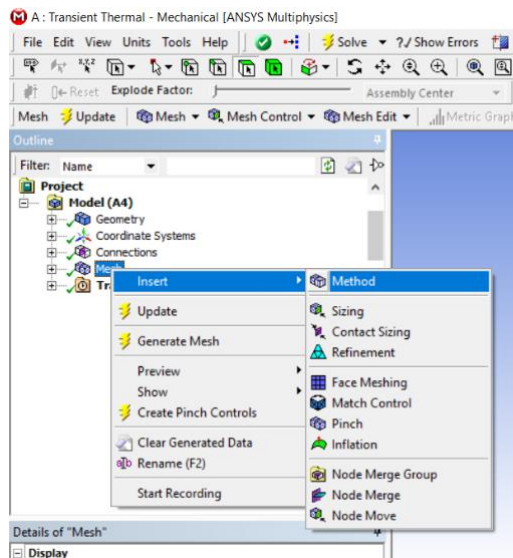
- a. Pada bagian *Project*, pilih Model (A4), lalu pilih *Geometry*, klik pada *Solid*. Setelah itu, pada bagian *Assignment*, pastikan sudah menggunakan A36. Lakukan ini pada seluruh *Solid* di bagian Model. Jika proses sudah berhasil, maka di sebelah kiri *Geometry* akan menunjukkan lambang centang hijau



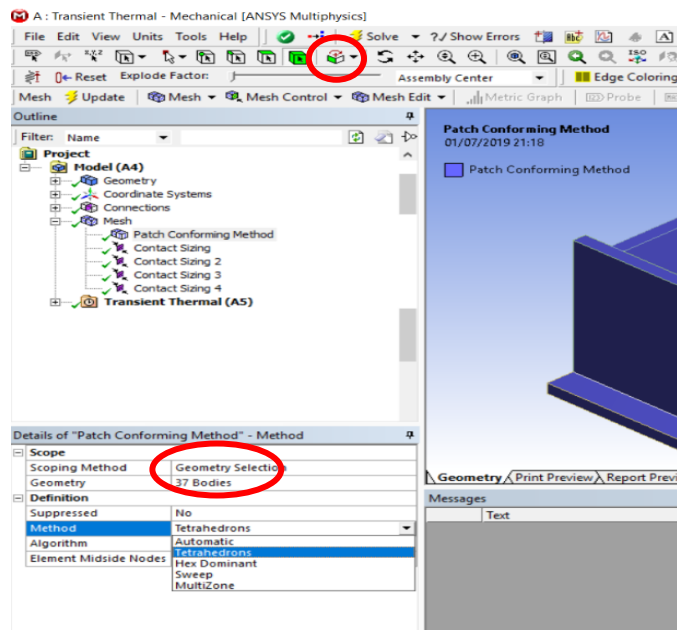
5. *Insert Mesh*

Meshing berguna untuk melakukan pendiskritan pada model agar mendekati keadaan yang sebenarnya. Berikut ini langkah-langkah dalam *meshing* yang digunakan:

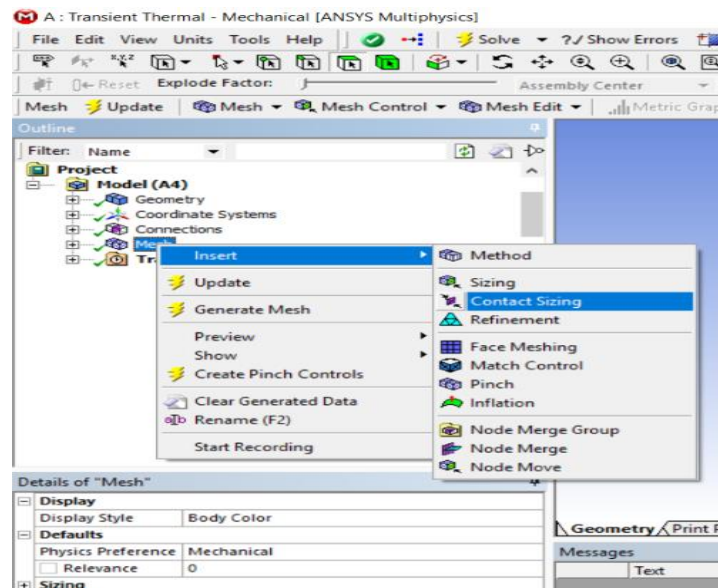
- a. Pilih *Mesh*, klik kanan, lalu pilih *Insert*, pilih *Method*.



- b. Pada bagian *Scope-Geometry*, pilih semua bagian pada model dengan seleksi Ctrl+A pada model. Pastikan model yang diseleksi adalah *Bodies*, bukan *Face*. Untuk memastikan, klik ikon *Bodies*.
- c. Pada bagian *Method*, pilih Tetrahedron. Jika *input* sudah benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.

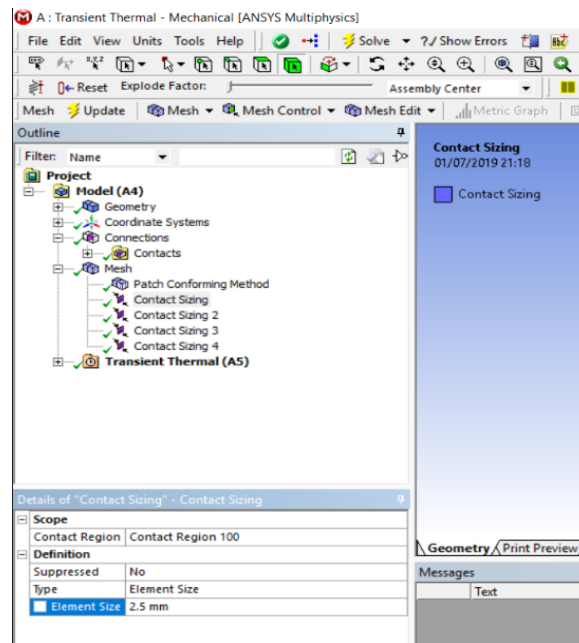


- d. Pilih *Mesh*, klik kanan, pilih *Insert*, pilih *Contact Sizing*.



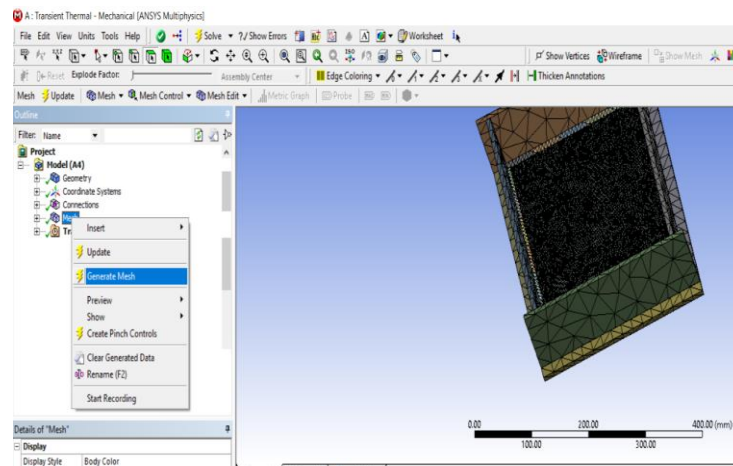
6. Insert Contact Sizing

Pada bagian *Details of Contact Sizing*, input *Contact Region* yang ingin digunakan. Setelah itu, input *Element Size* yang ingin digunakan. Untuk menentukan *Contact Region* yang ingin digunakan, klik pada *Connections* di Model (A4), lalu klik *Contacts*, lalu cek *Contact Region* yang sesuai.



7. *Generate Mesh*

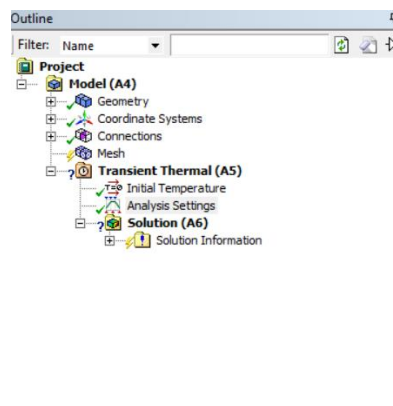
Jika semua parameter sudah selesai diinputkan, klik kanan pada *Mesh*, lalu pilih *Generate*. Tunggu beberapa saat, maka meshing akan selesai dibuat, ditandai dengan lambang centang hijau.



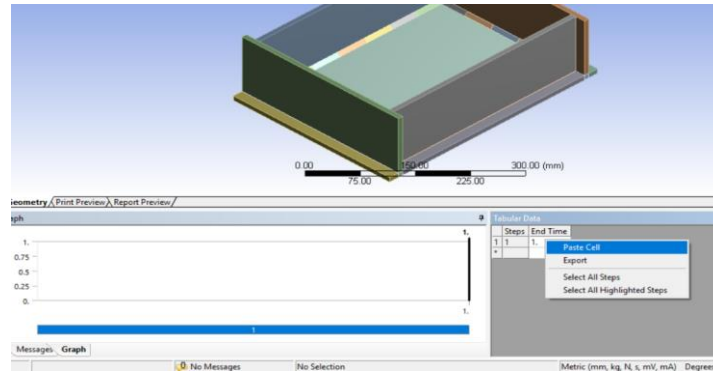
8. *Insert Analysis Settings*

Pada *Analysis Settings*, data yang diperlukan adalah waktu yang digunakan selama proses pemanasan/pengelasan. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

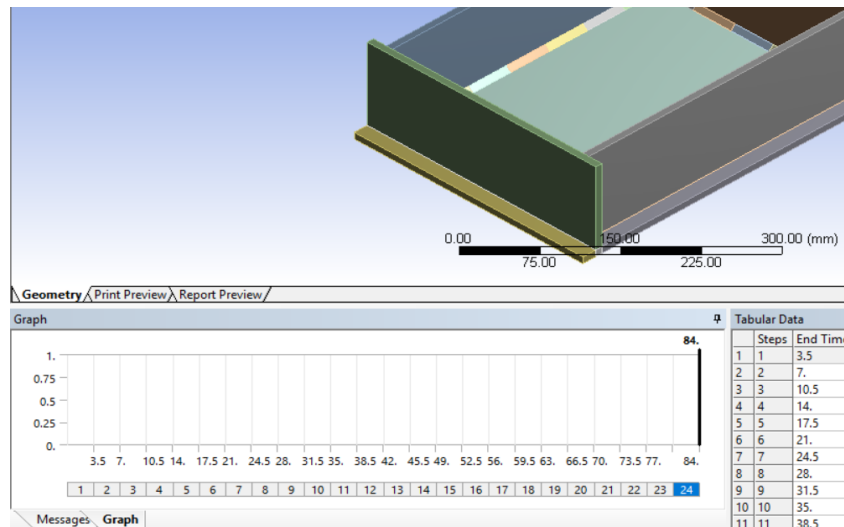
- a. Klik pada *Transient Thermal* di kolom *Outline*, lalu pilih *Analysis Setting*.



- b. Masukkan data waktu (*Time-Step*). *Time-step* ini dibuat dengan bantuan Microsoft Excel, kemudian di *copy-paste* pada ANSYS Workbench di bagian *Tabular Data*, klik kanan pada kolom *End Time*, lalu pilih *Paste Cell* hasil dari Microsoft Excel..



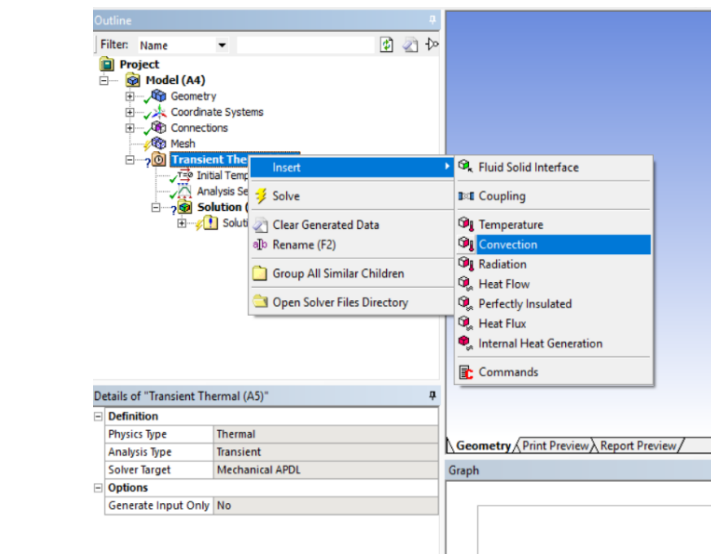
- c. Jika input sudah berhasil, maka akan ditandai dengan centang hijau di sebelah kiri *Analysis Setting*..



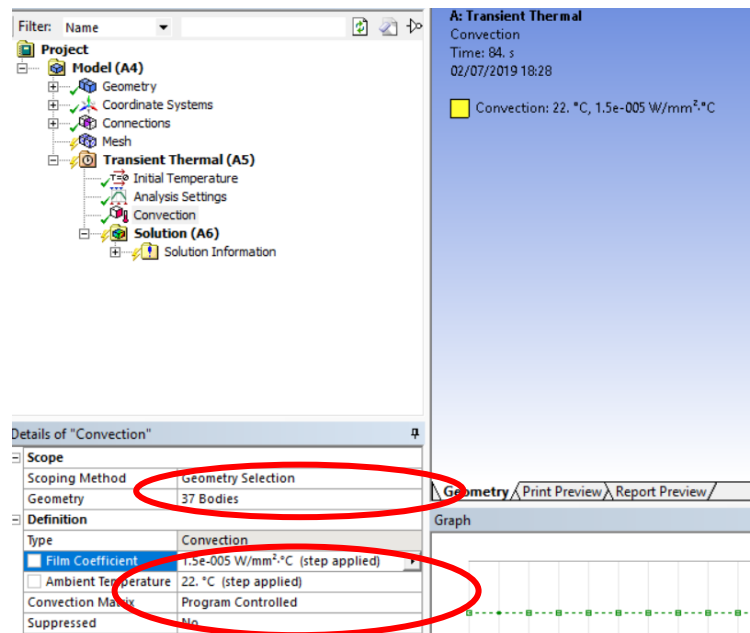
9. *Insert Convection*

Convection adalah beban yang harus diinputkan untuk analisa *Transient Thermal*. Nilai *Film Coefficient* yang digunakan adalah $1,5e-005 \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dengan *Ambient Temperature* 22°C . Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Klik kanan pada *Transient Thermal*, pilih *Insert*, lalu pilih *Convection*.



- b. Seleksi semua *Bodies* yang ada pada model di bagian *Scope-Geometry*. Kemudian, masukkan nilai *Film Coefficient* dan *Ambient Temperature* sesuai data yang akan digunakan. Jika penginputan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.

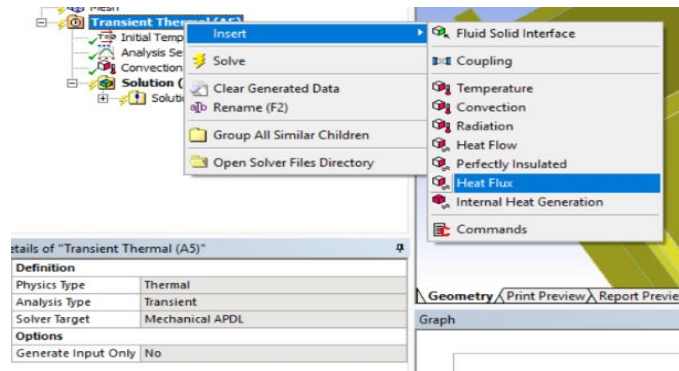


10. Insert Heat Flux

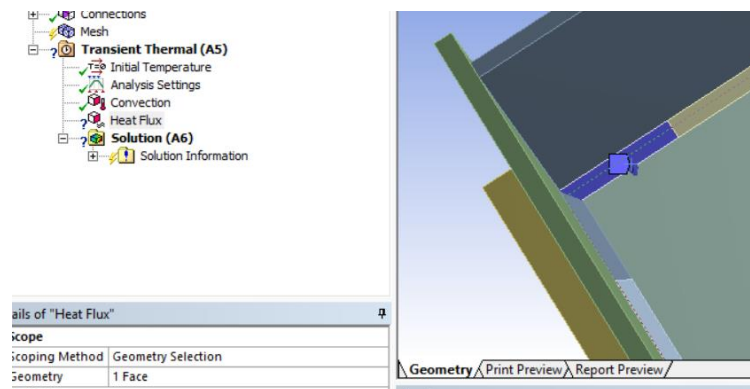
Jumlah *heat flux* yang ditambahkan pada model ini adalah 24 *heat flux*.

Langkah-langkah penambahan *heat flux* adalah sebagai berikut:

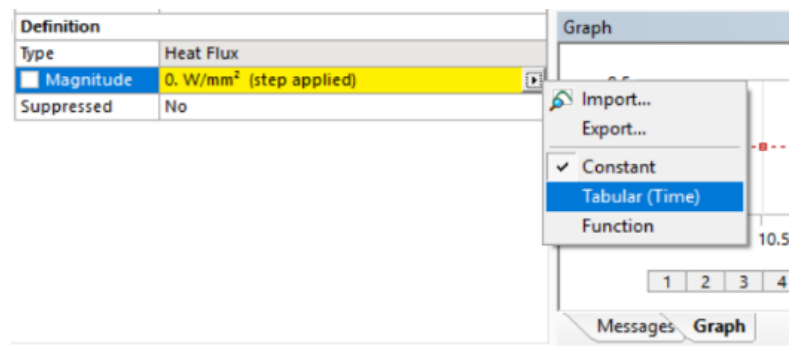
- Klik kanan pada *Transient Thermal*, pilih *Insert*, lalu pilih *Heat Flux*.

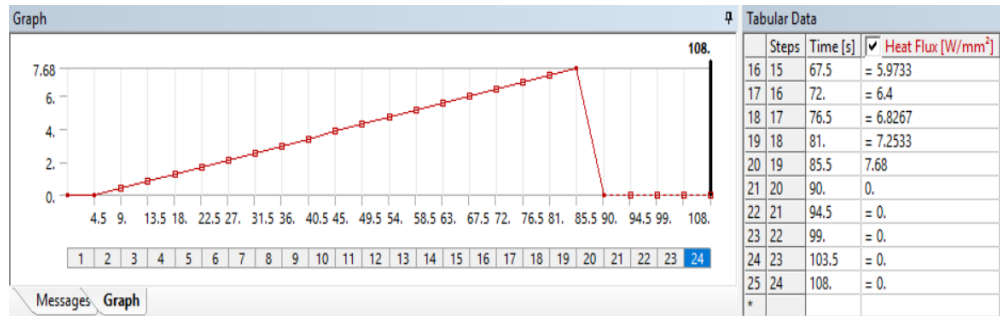


- Lakukan pemilihan lokasi *heat flux* akan diterapkan pada model. Penerapan *heat flux* harus dilakukan di *Face* model.

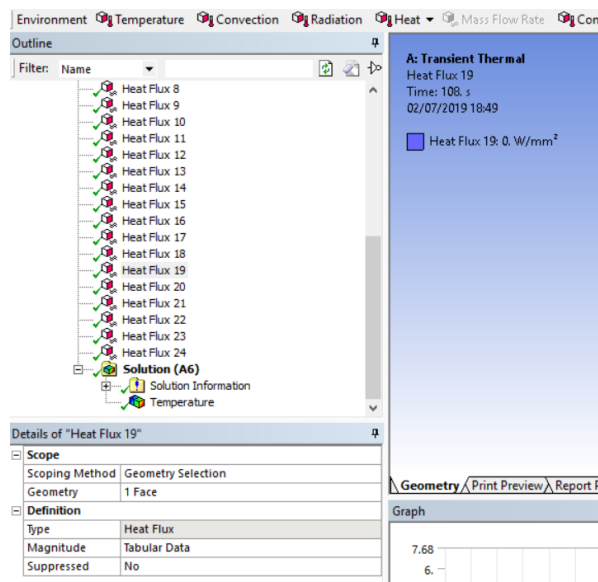


- Masukkan nilai *Heat Flux* yang digunakan. Pada *Definition-Magnitude*, pilih *Tabular*, lalu masukkan nilai *Heat Flux* sesuai pada step yang diterapkan.





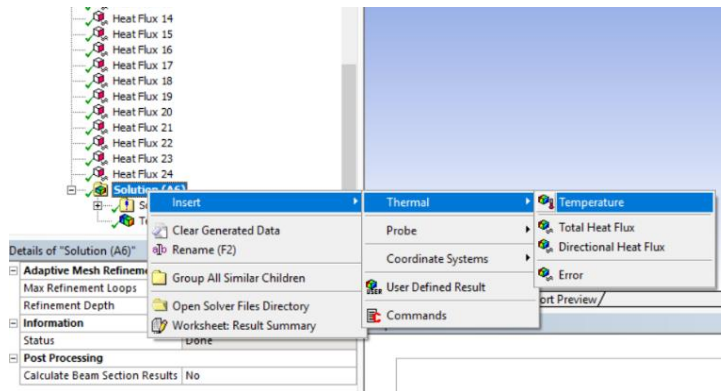
- d. Lakukan langkah yang sama untuk setiap *heat flux* yang ingin ditambahkan. Jika *heat flux* berhasil ditambahkan, maka akan ditandai dengan centang hijau.



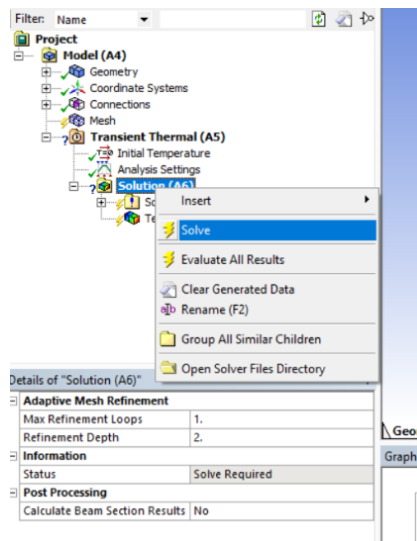
11. Insert Solution

Solusi yang ingin diketahui dari analisa *Transient Thermal* adalah temperatur pada model yang terjadi selama proses pengelasan. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

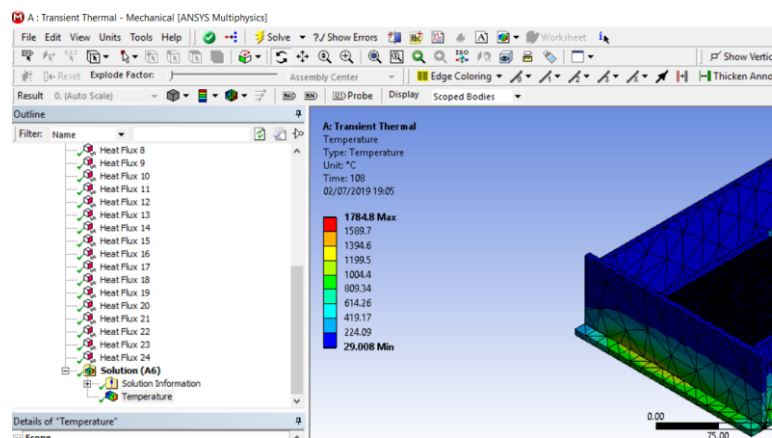
- a. Klik kanan pada *Solution (A6)*, pilih *Insert*, pilih *Thermal*, lalu pilih *Temperature*.



b. Klik kanan pada *Solution (A6)*, lalu pilih *Solve* untuk memulai analisa.



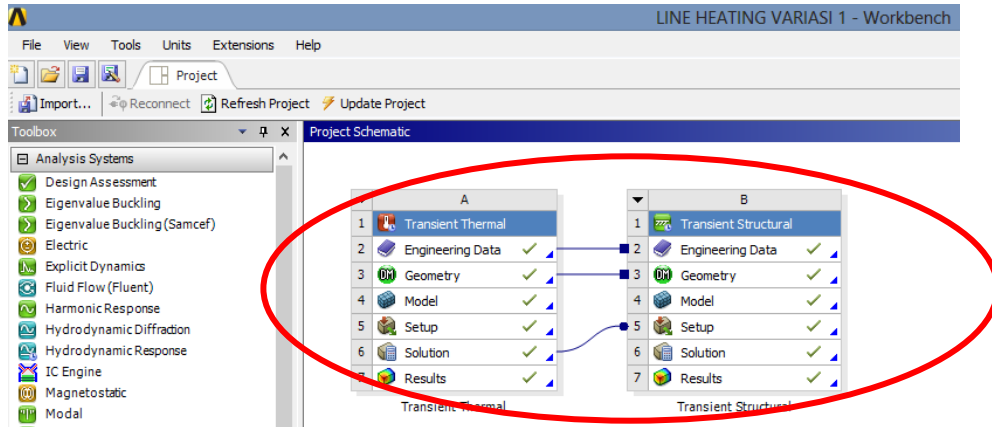
c. Jika hasil analisa sudah selesai, maka akan ditandai dengan centang hijau.



LAMPIRAN IV
LANGKAH ANALISIS
TRANSIENT STRUCTURAL

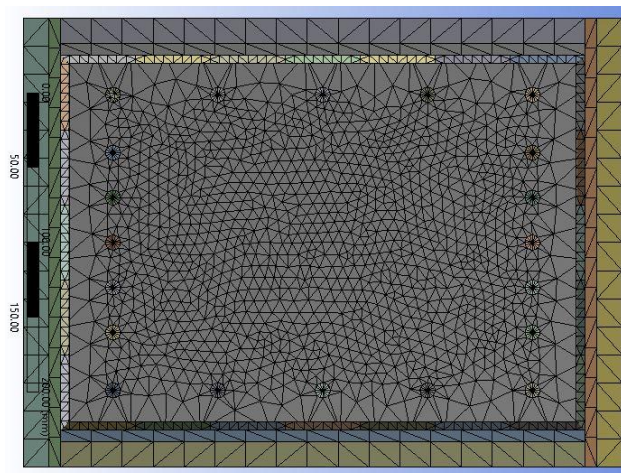
1. Mulai Workbench 16.0

Setelah analisis *transient thermal* selesai, kembali ke layar workbench 16.0 lagi dan *double-click* pilihan *transient structural*. Kemudian *drag* hasil dan data *transient thermal* ke kolom *transient structural* seperti gambar dibawah:



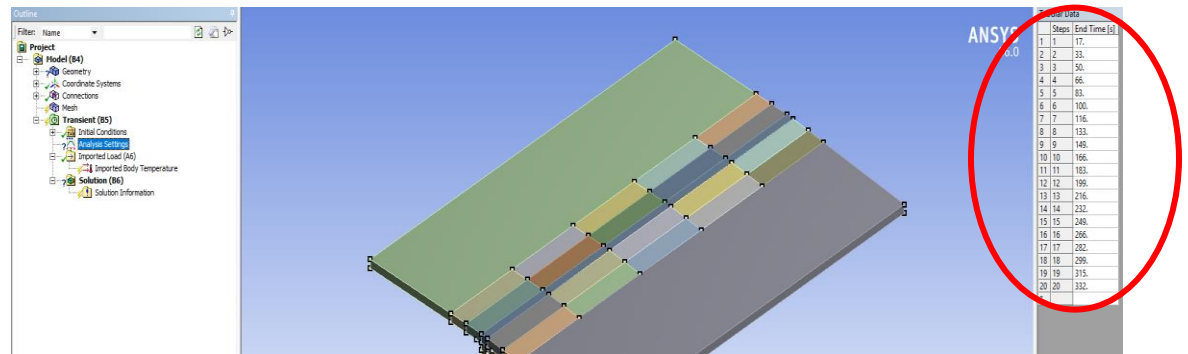
2. Insert Mesh

Meshing yang dilakukan untuk analisis *transient structural* sama dengan meshing pada *transient thermal*. Pada analisis *transient structural* metode *meshing* dan *sizing* yang digunakan juga sama dengan *transient thermal* yaitu *Tetrahedrons* dan *Body Sizing*. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



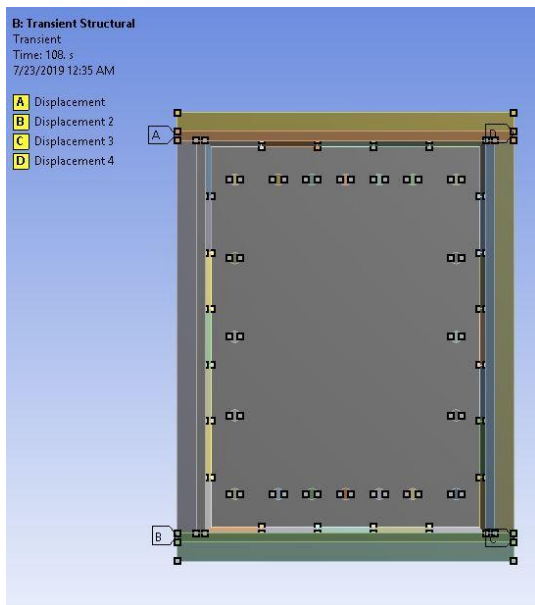
3. *Insert Analysis Settings*

Pada *Analysis Settings*, data *Time-Step* yang dimasukkan merupakan waktu yang sama dengan *Time-Step* yang dimasukkan pada *Transient Thermal*. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



4. Menentukan *Boundary Condition*

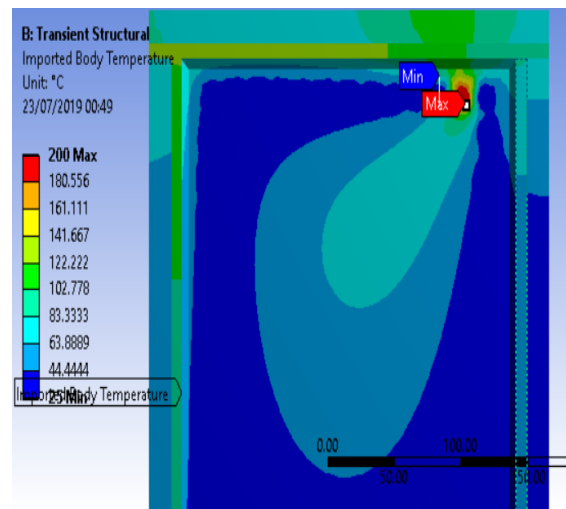
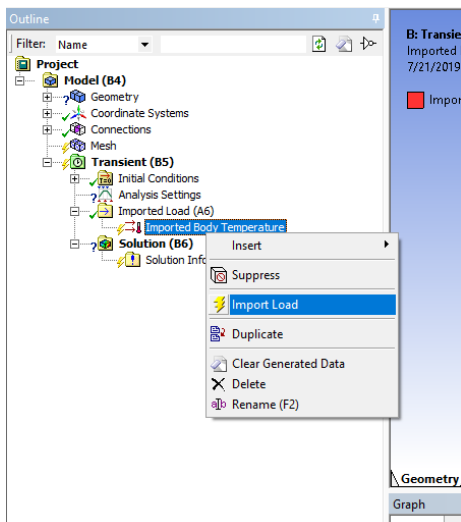
Boundary Condition yang digunakan adalah *Displacement*. *Displacement* ditentukan dengan mengunci daerah atau bagian yang tidak terpengaruh oleh perubahan bentuk yang disebabkan oleh beban termal. Daerah yang dikunci dengan *displacement* ini harus sesuai dengan kondisi nyata spesimen pada saat eksperimen, daerah mana yang tidak mengalami perubahan bentuk merupakan daerah yang harus dikunci. Penguncian dilakukan dengan memasukkan nilai 0 pada *coordinate system* pada sumbu x, y dan z agar tidak terjadi perpindahan pada titik atau daerah tersebut. Langkah-langkah yang dilakukan adalah klik kanan pada *Transient(B5)*, pilih *Insert*, lalu pilih *Displacement*. Pilih daerah yang dianggap sebagai *boundary condition* kemudian input nilai 0 pada sumbu x, y, dan z. Jika input yang digunakan benar, maka akan ditandai dengan centang hijau.



| Scope | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 4 Faces |
| Definition | |
| Type | Displacement |
| Define By | Components |
| Coordinate System | Global Coordinate System |
| <input type="checkbox"/> X Component | 0. mm (step applied) |
| <input type="checkbox"/> Y Component | 0. mm (step applied) |
| <input type="checkbox"/> Z Component | 0. mm (step applied) |
| Suppressed | No |

5. Import Load

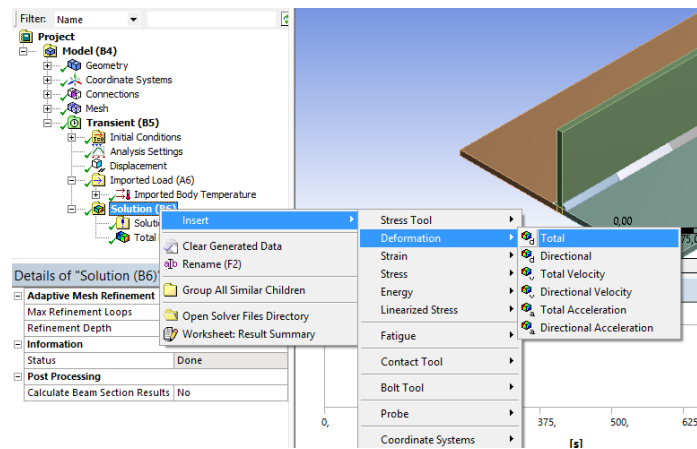
Tahap berikutnya merupakan *Import Load*, tahap ini merupakan transfer hasil pembebanan termal yang telah diselesaikan pada analisis *transient thermal*. Langkah-langkah *import load* beban termal yaitu *expand* pilihan *Imported Load* kemudian klik *Imported Body Temperature*. Jika *heat flux* atau *temperature* berhasil ditambahkan, maka akan ditandai dengan centang hijau.



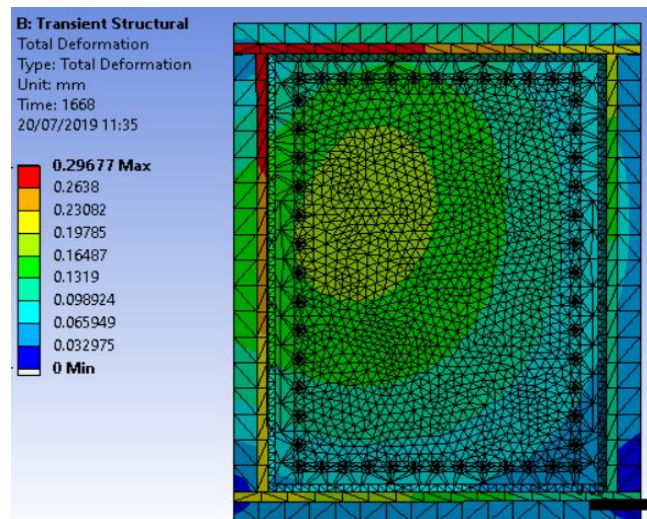
6. Insert Solution

Solusi yang ingin diketahui dari analisis *Transient Structural* merupakan perubahan bentuk atau deformasi yang terjadi pada model selama proses pengelasan maupun pemanasan. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Klik kanan pada *Solution (B6)*, pilih *Insert*, pilih *Deformation*, lalu pilih *Total*.

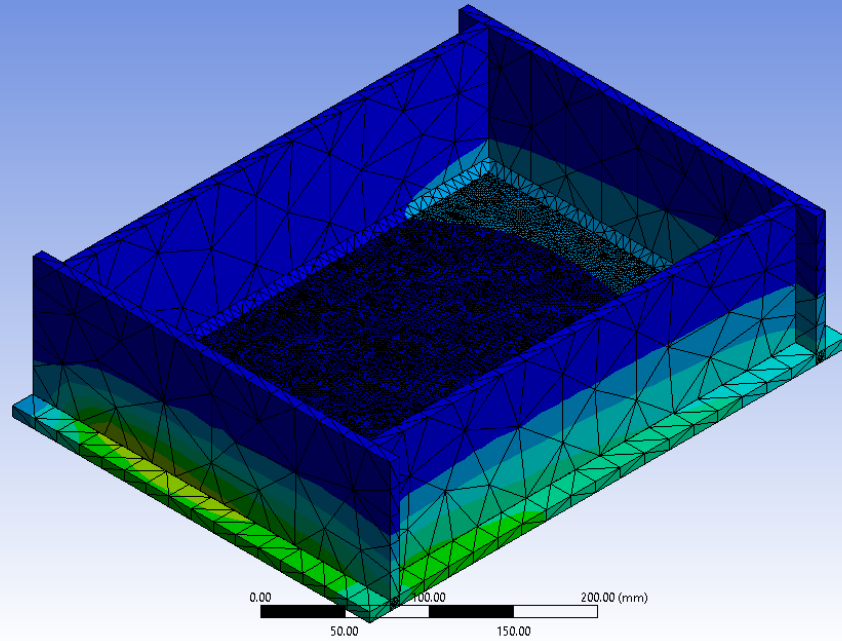
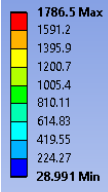


- Klik kanan pada *Solution (B6)*, lalu pilih *Solve* untuk memulai analisa. Jika hasil analisa sudah selesai, maka akan ditandai dengan centang hijau.

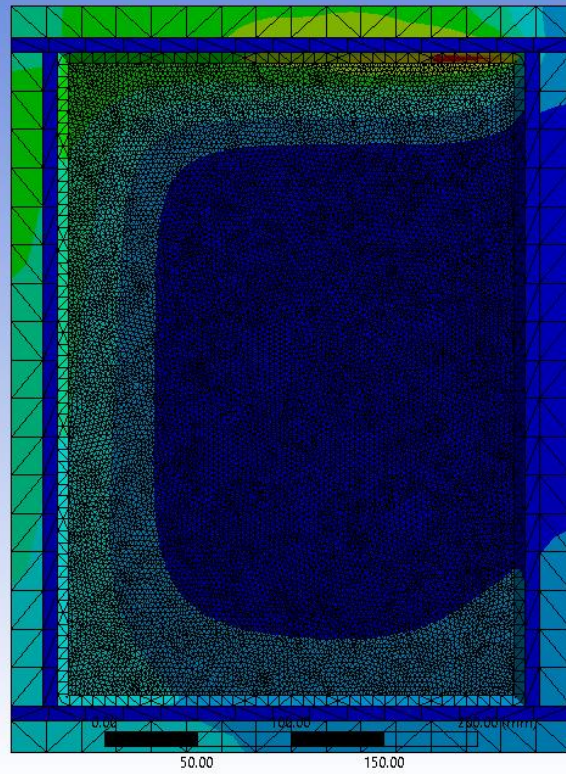
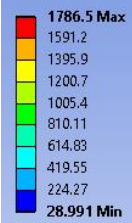


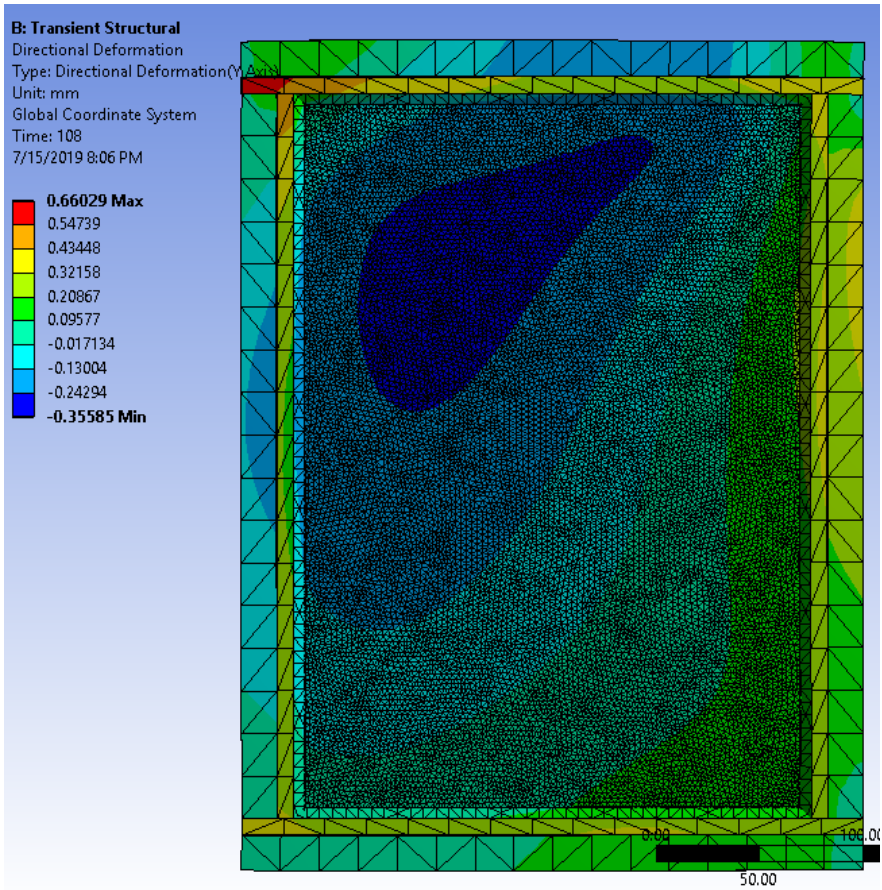
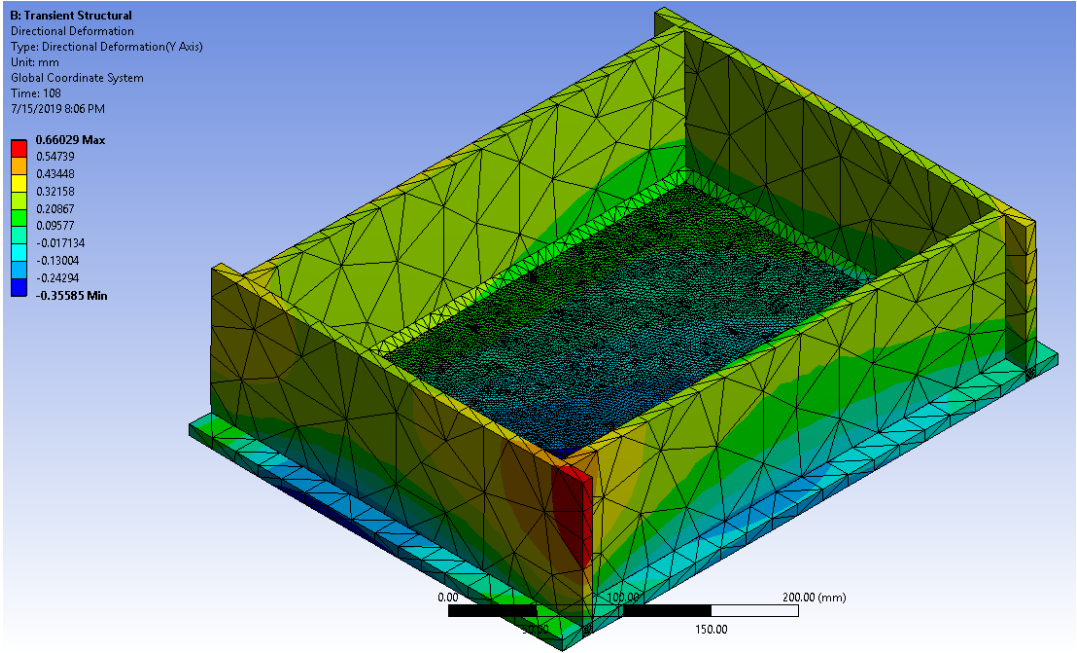
LAMPIRAN V
HASIL *TRANSIENT THERMAL*
DAN *TRANSIENT*
***STRUCTURAL* PENGELASAN**
SPEKIMEN 1

A: Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 108
7/15/2019 7:44 PM

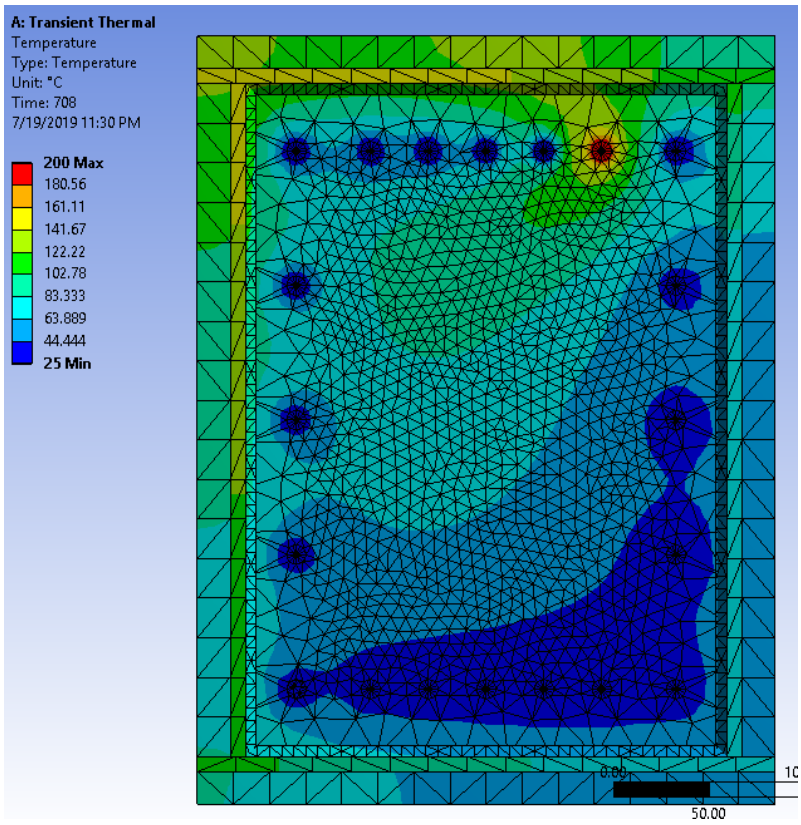
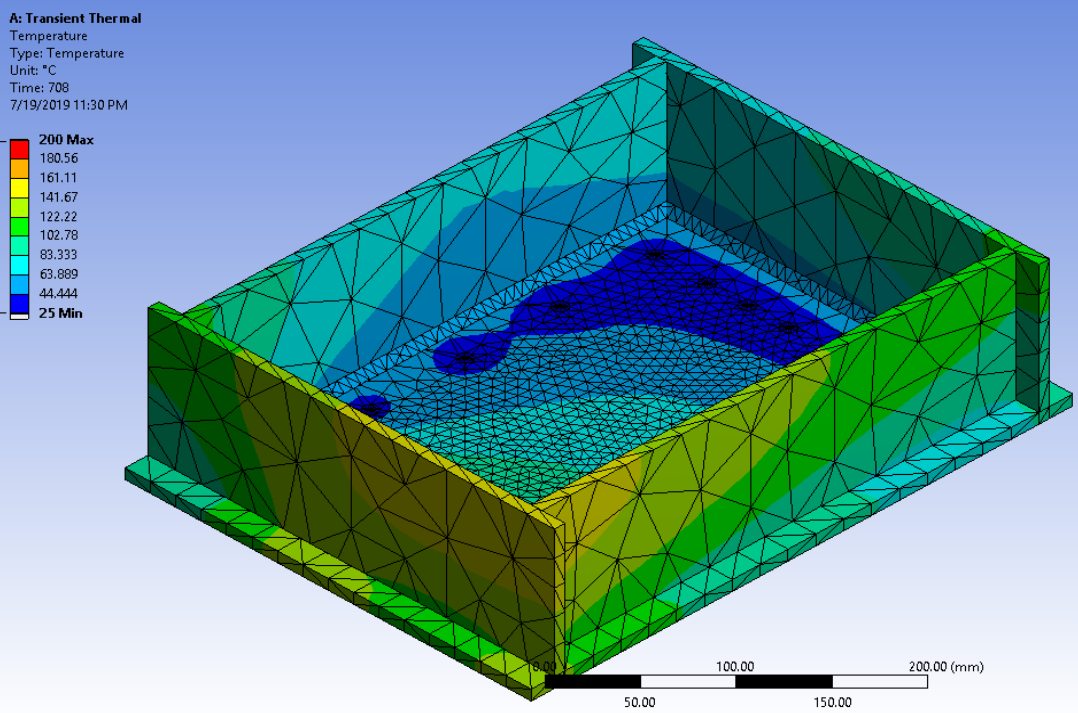


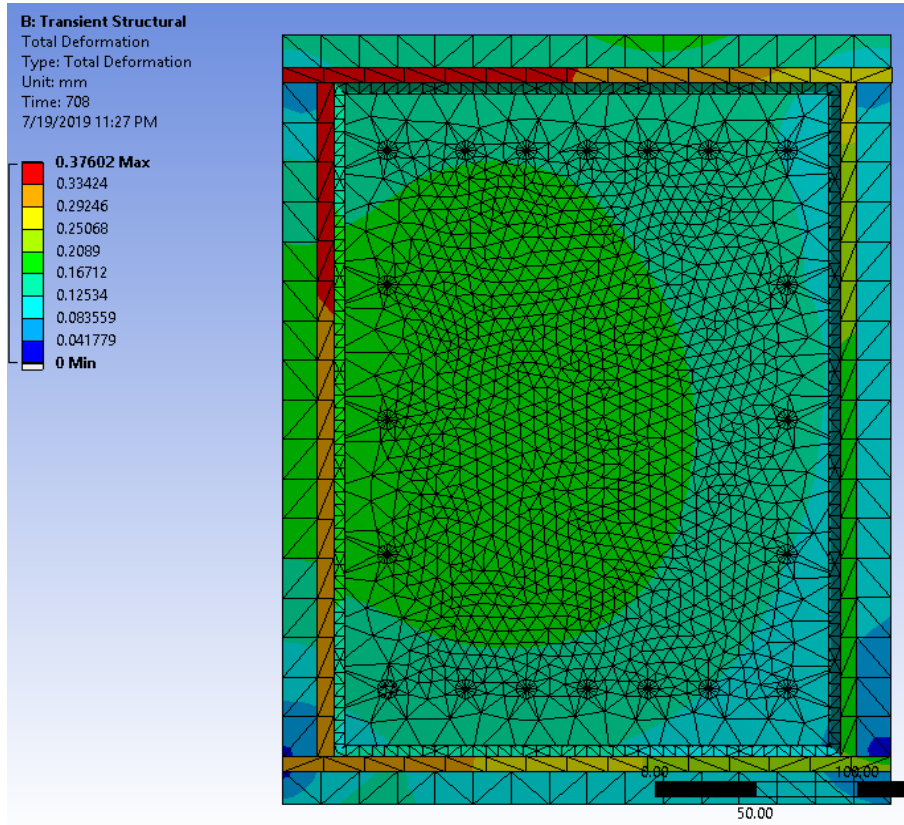
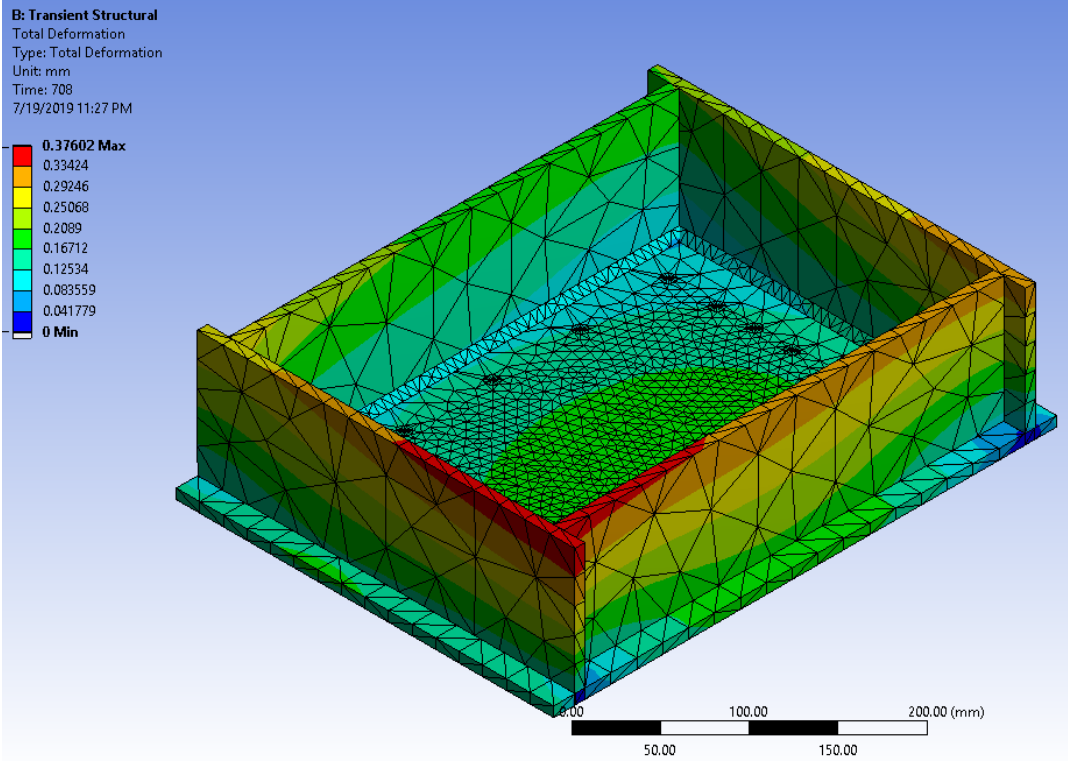
A: Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 108
7/15/2019 7:44 PM



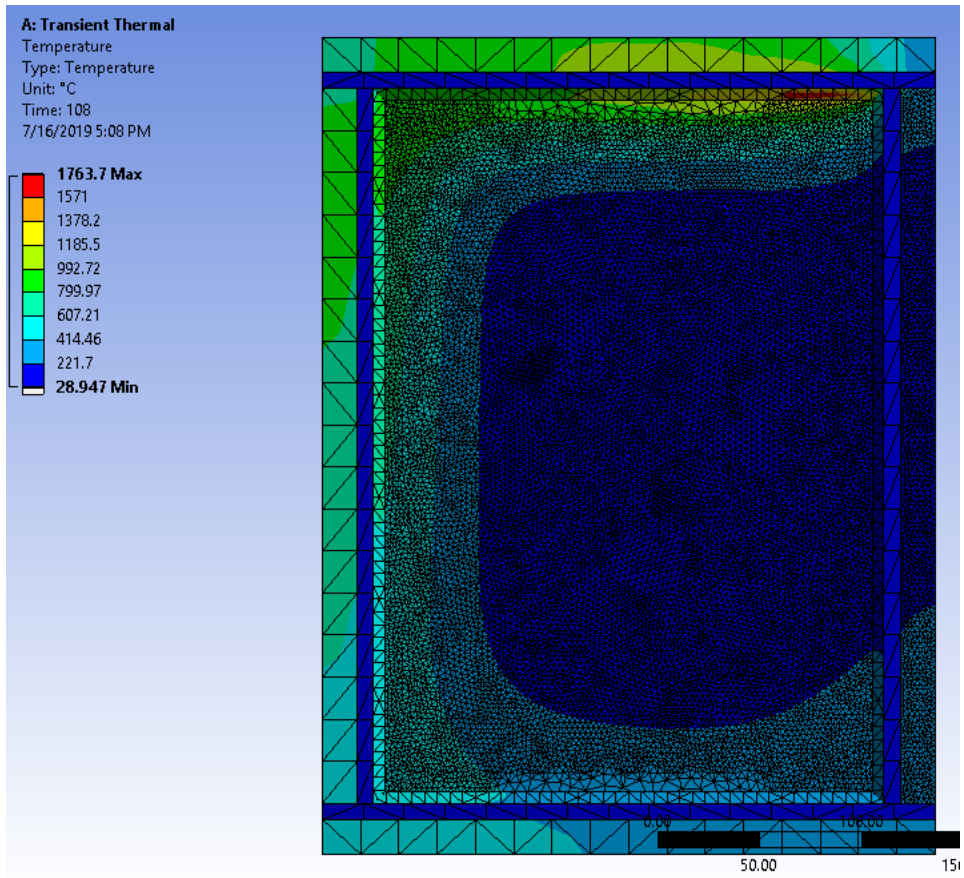
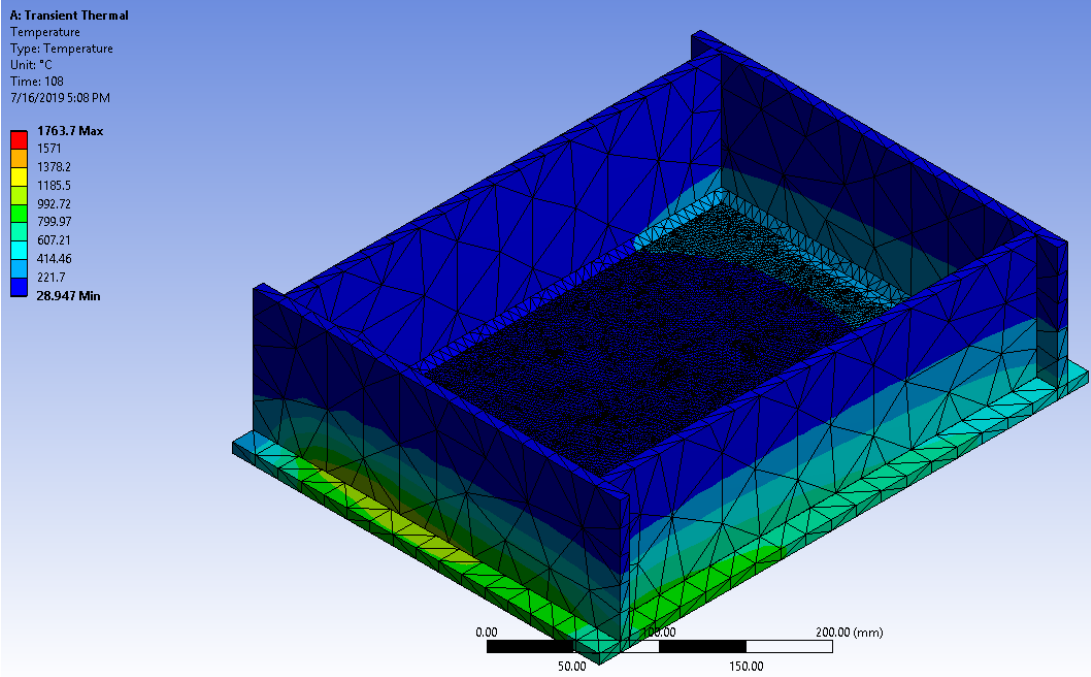


LAMPIRAN VI
HASIL *TRANSIENT THERMAL*
DAN *TRANSIENT*
STRUCTURAL SPOT HEATING
SPESIMEN 1

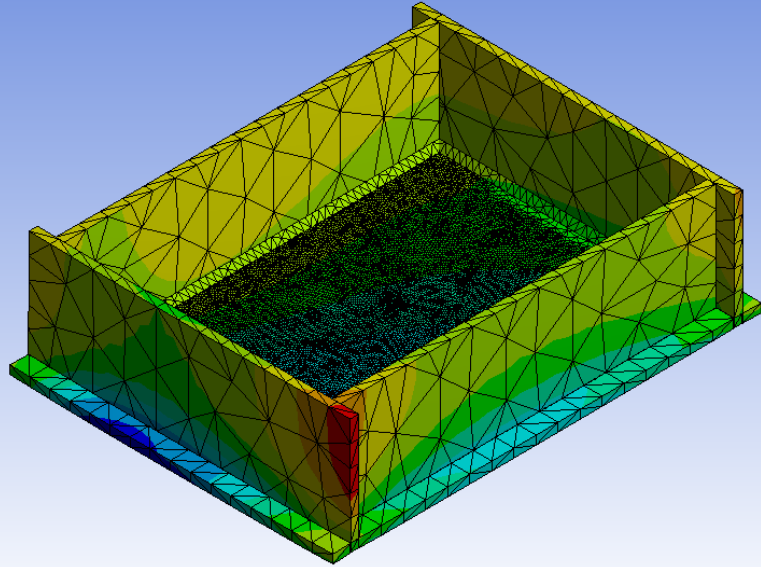
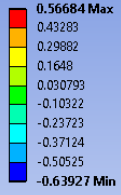




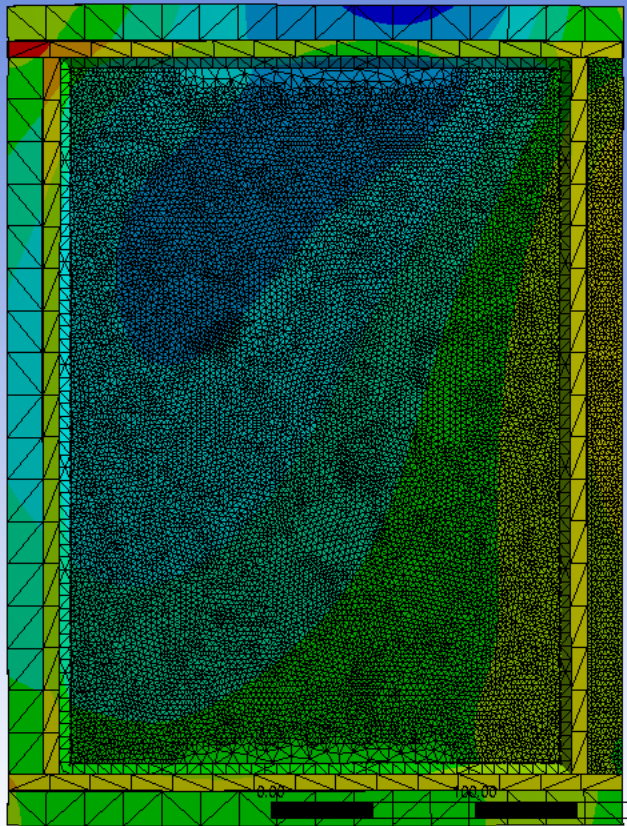
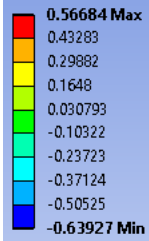
LAMPIRAN VII
HASIL *TRANSIENT THERMAL*
DAN *TRANSIENT*
***STRUCTURAL* PENGELASAN**
SPEKIMEN 2



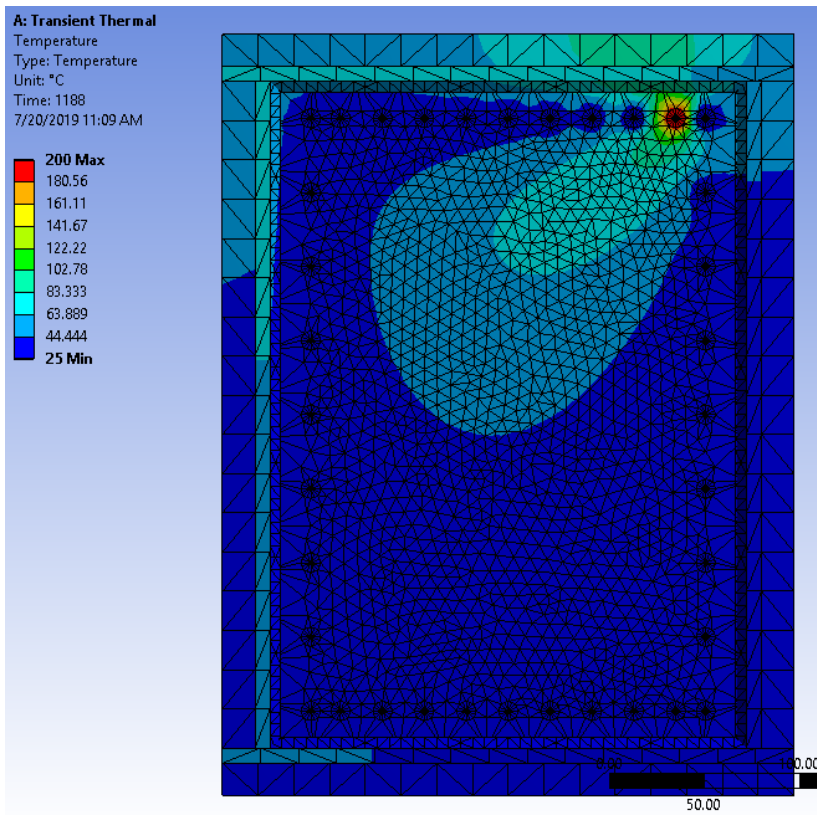
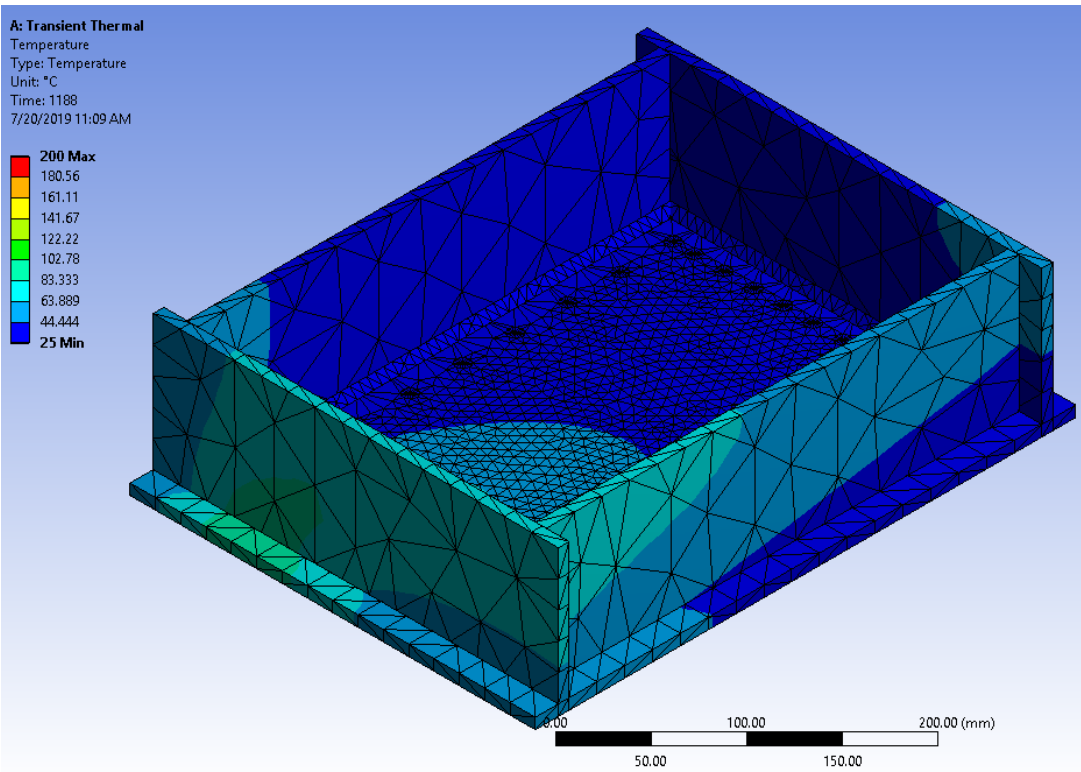
B: Transient Structural
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 108
7/16/2019 5:04 PM

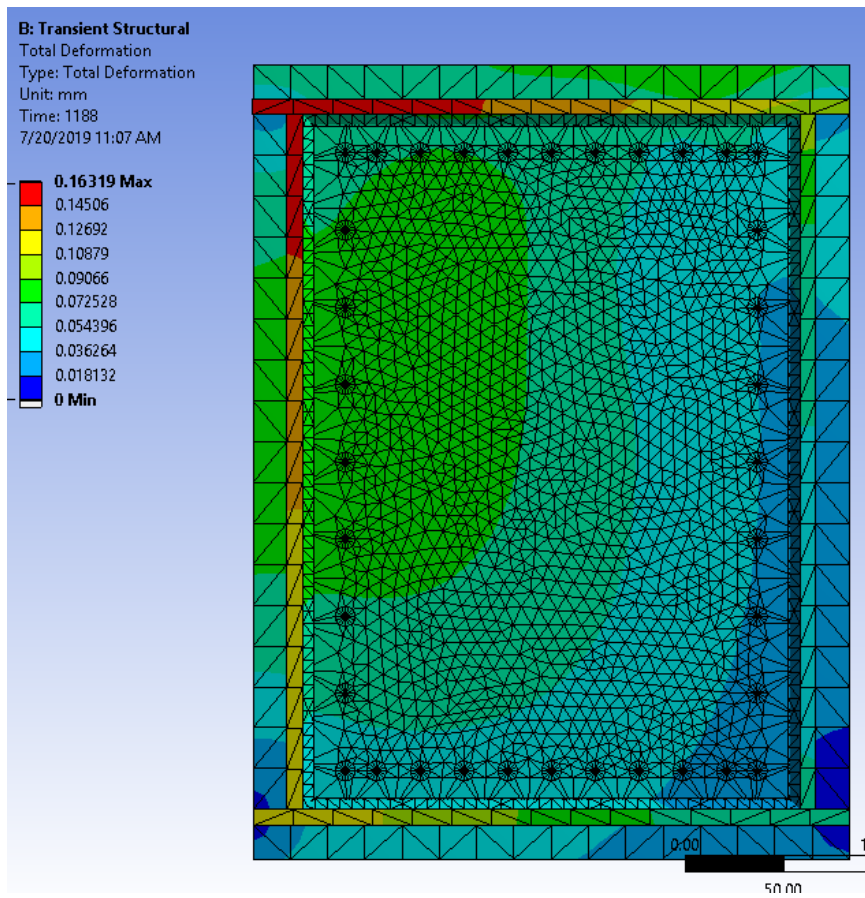
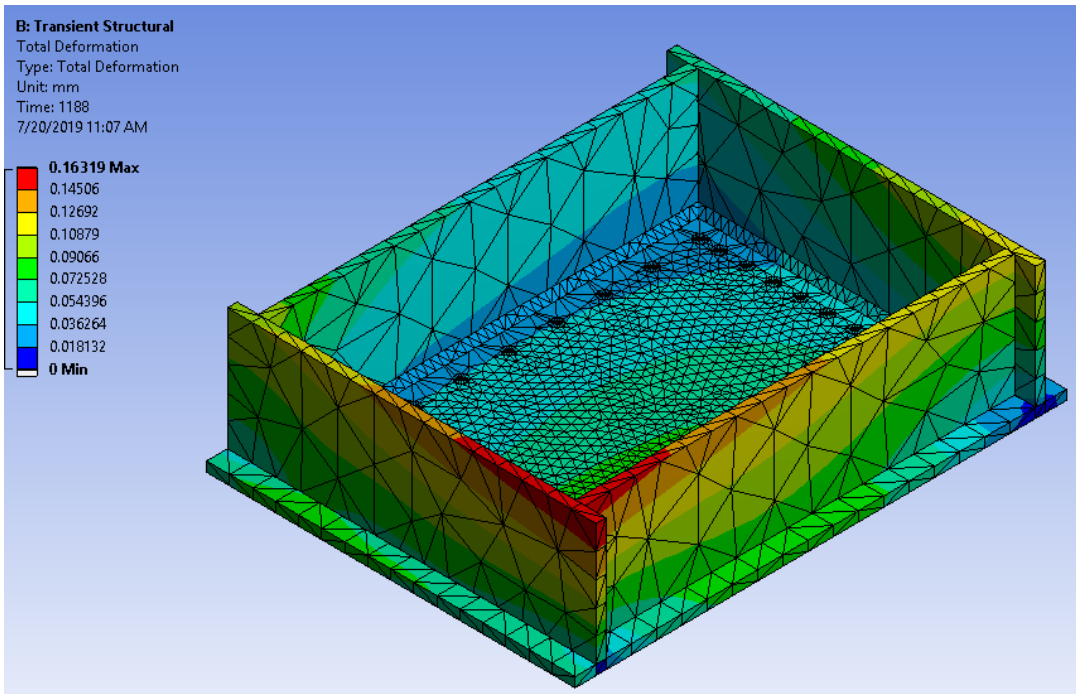


B: Transient Structural
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 108
7/16/2019 5:04 PM

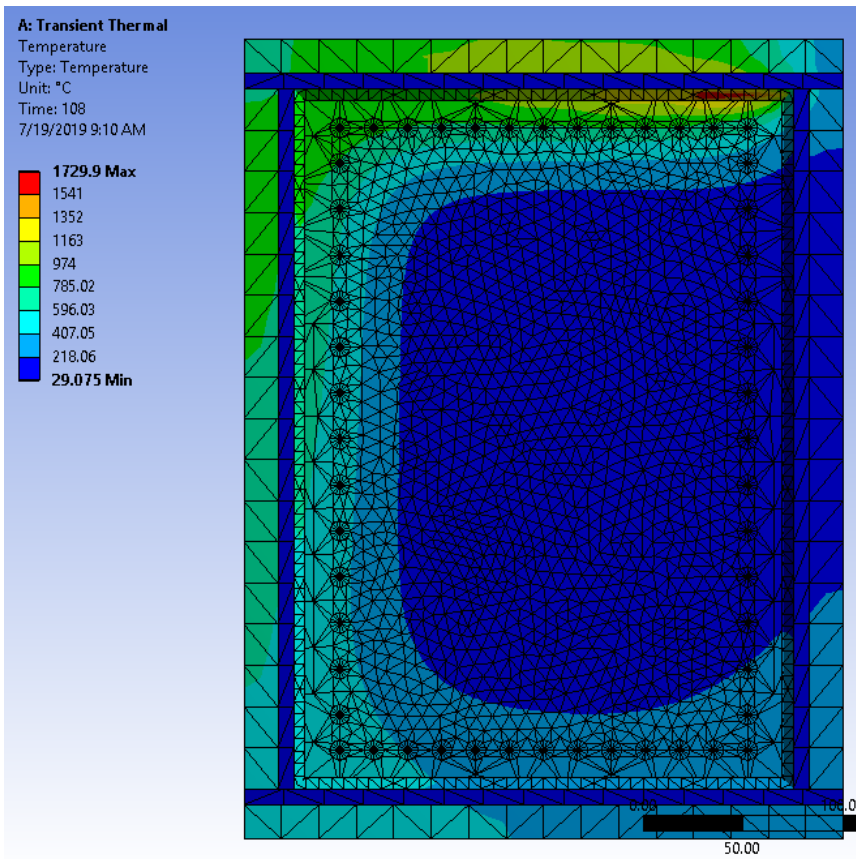
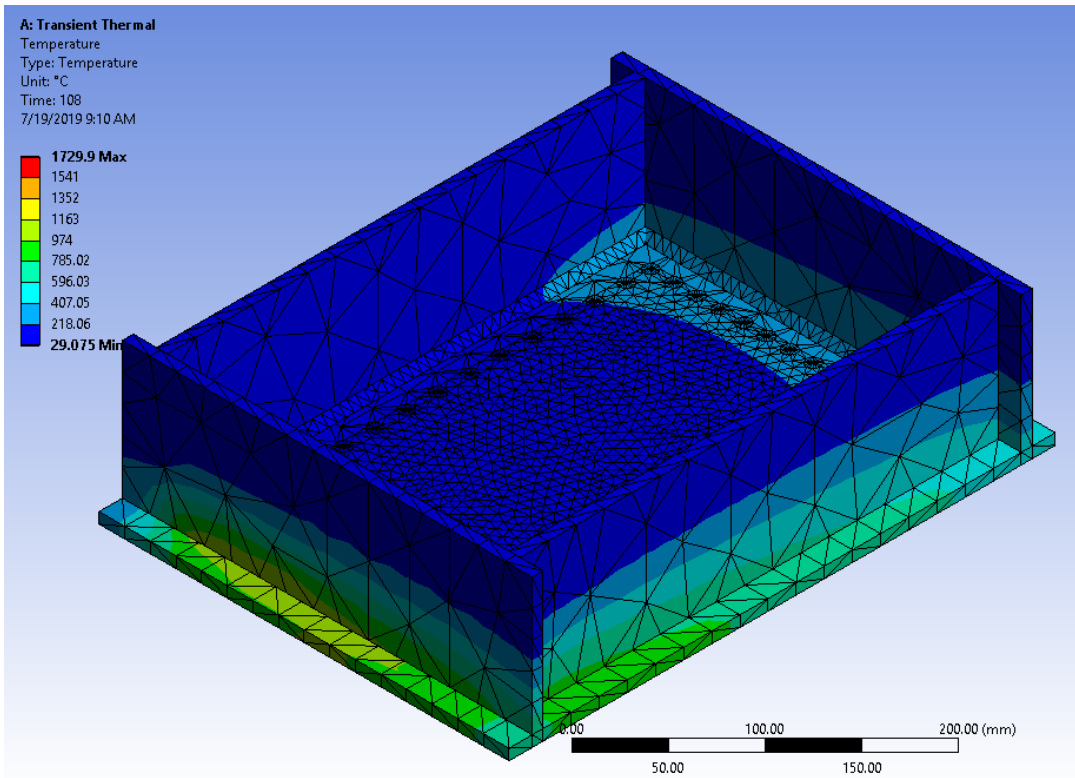


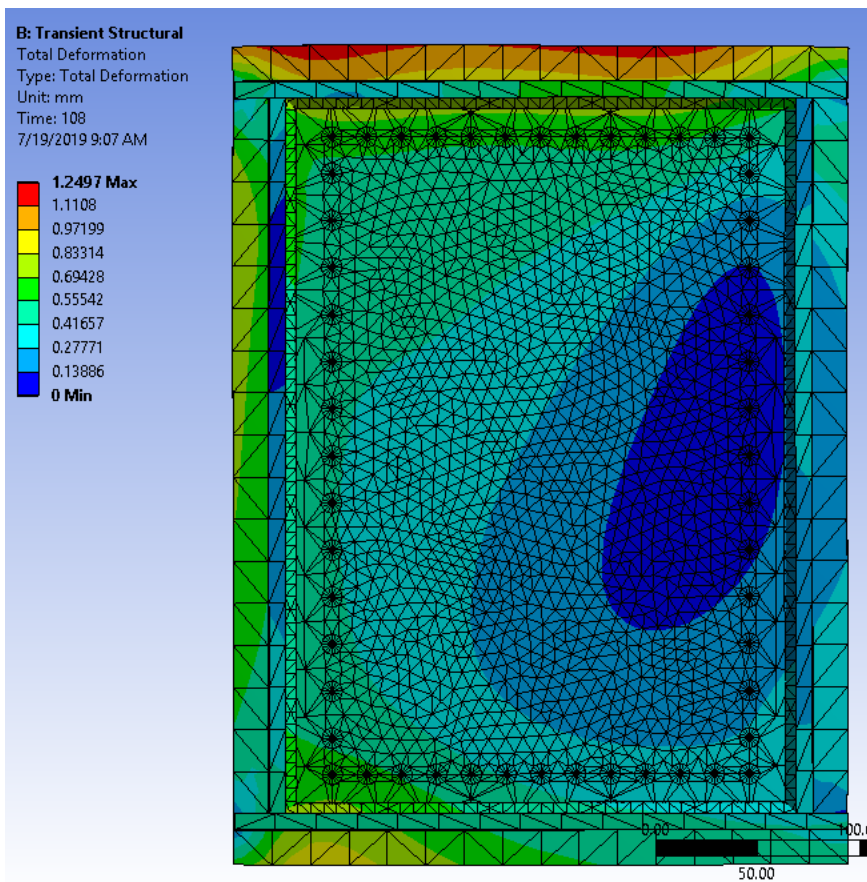
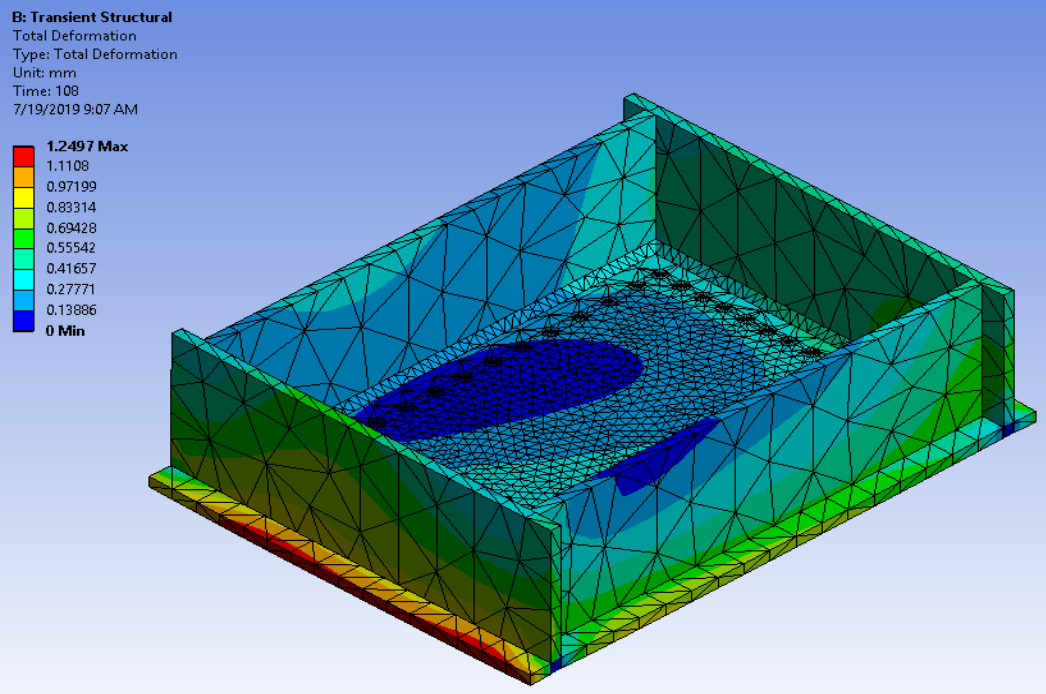
LAMPIRAN VIII
HASIL *TRANSIENT THERMAL*
DAN *TRANSIENT*
STRUCTURAL SPOT HEATING
SPESIMEN 2





LAMPIRAN IX
HASIL *TRANSIENT THERMAL*
DAN *TRANSIENT*
***STRUCTURAL* PENGELASAN**
SPEKIMEN 3

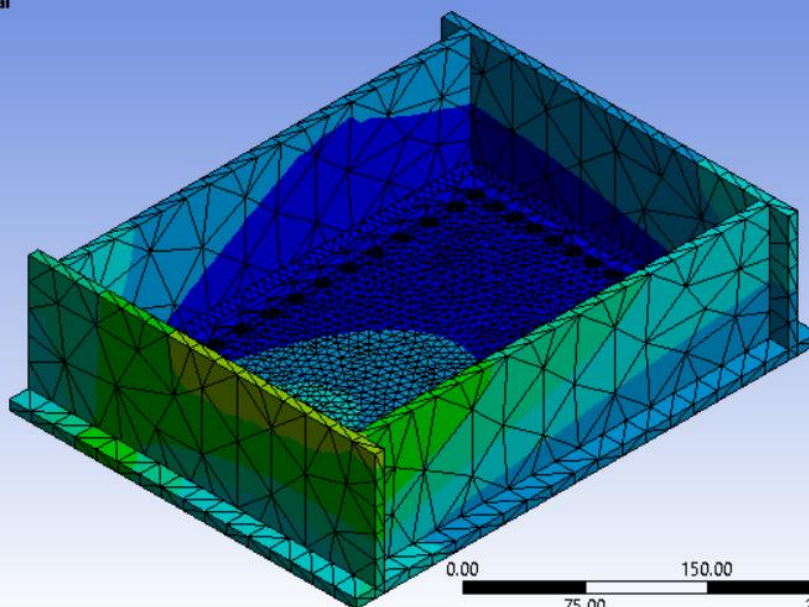
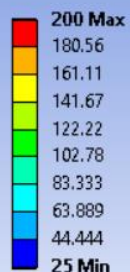




LAMPIRAN X
HASIL *TRANSIENT THERMAL*
DAN *TRANSIENT*
STRUCTURAL SPOT HEATING
SPESIMEN 3

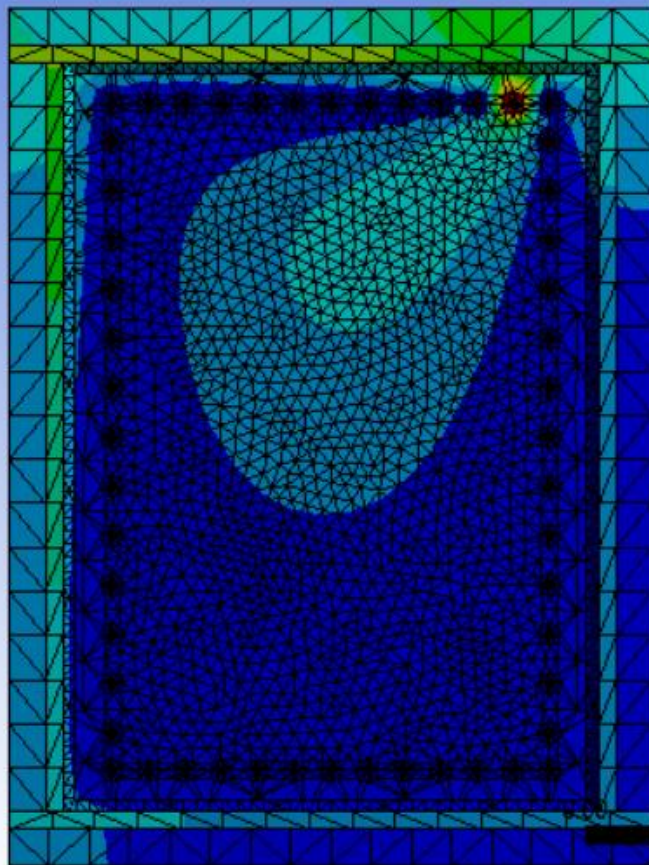
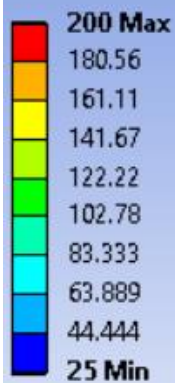
A: Transient Thermal

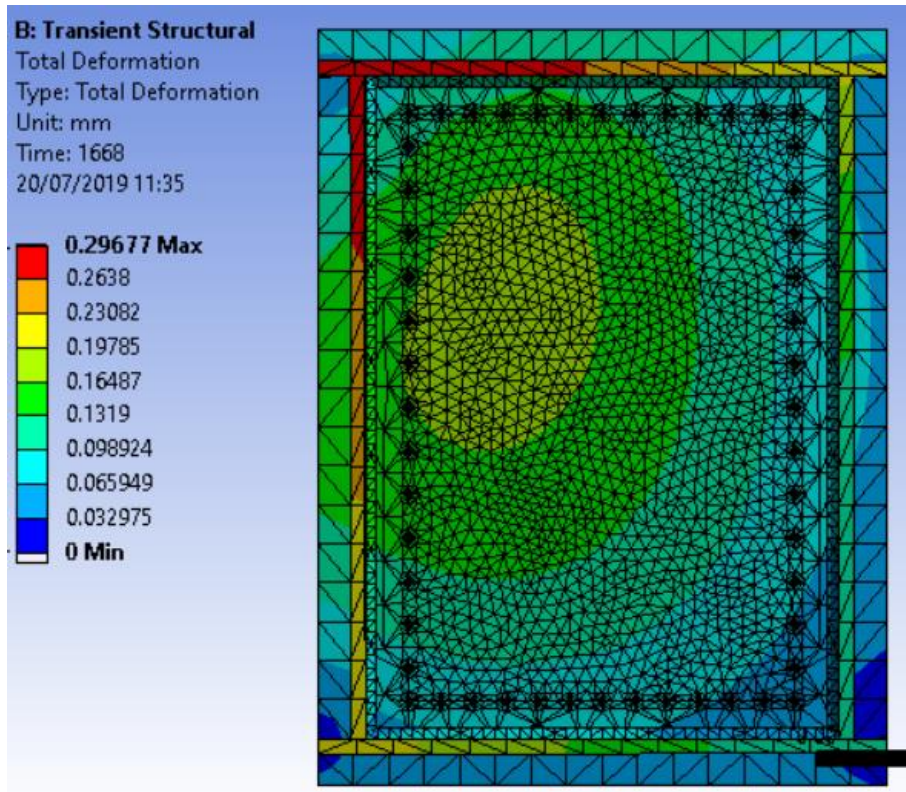
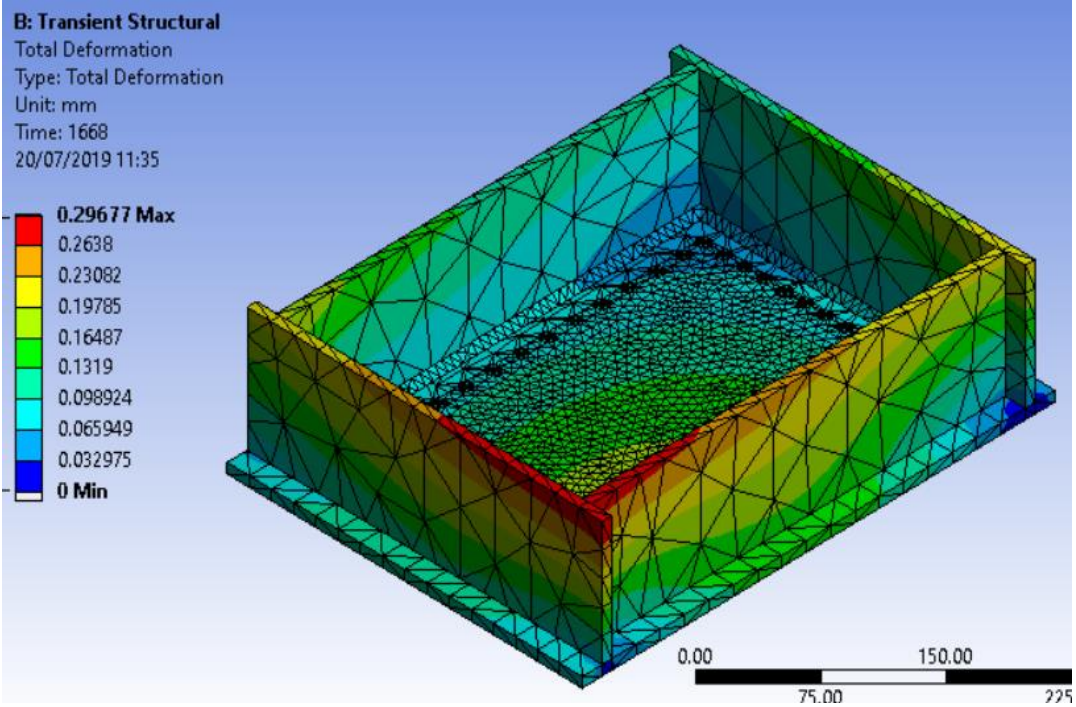
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1668
20/07/2019 11:27



A: Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1668
20/07/2019 11:27





BIODATA PENULIS

BIODATA PENULIS



Ida Bagus Tedja Prana Sukma, yang merupakan anak tunggal ini lahir di Singaraja, 21 Juni 1997. Penulis berhasil menyelesaikan pendidikan formal di SD Budi Luhur pada tahun 2009. Berikutnya penulis melanjutkan jenjang pendidikan di SMPN 111 Jakarta dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2012. Kemudian penulis mampu menyelesaikan pendidikan di SMAN 78 Jakarta pada tahun 2015. Selepas SMA, penulis melanjutkan ke jenjang Pendidikan Tinggi Strata 1 di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Insititut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN, kemudian terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 04311540000062. Selama menjalani masa perkuliahan, penulis aktif dalam mengikuti organisasi Tim Pembina Kerohanian Hindu (TPKH-ITS) dan menjabat sebagai Ketua Harian TPKH-ITS pada periode 2017/2018. Selama masa perkuliahan pula penulis menjalani beberapa kegiatan seperti bulutangkis, *travelling*, dan kegiatan sosial masyarakat seperti bakti sosial dan Kelautan Mengajar. Penulis pernah berkesempatan melaksanakan kerja praktek selama 2 bulan di PT. Dharma Kreasi Nusantara yang sedang melaksanakan proyek pembangunan kapal baru di galangan PT. Dumas Shipyard Surabaya. Selama masa studi, penulis sangat tertarik dengan bidang pengelasan, sehingga dalam penyusunan tugas akhir ini penulis mengusung judul yang berkaitan dengan bidang pengelasan dengan fokus pada perbaikan distorsi yang dialami akibat pengelasan.

Kontak Penulis

e-mail : tedja7815@gmail.com

mobile phone : 081297255809