



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - 141584

# STUDI OPTIMISASI DIAMETER SINAR LASER DAN DAYA LASER PADA PENGELASAN LASER TERHADAP LEBAR LASAN DAN KEDALAMAN PENETRASI SA-516 *GRADE 70* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

BRAHMANU WISNU SAPUTRO  
NRP 02511440000113

Dosen Pembimbing  
Mas Irfan P. H., ST., M.Sc, Ph.D  
Budi Agung Kurniawan, ST.,M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**TUGAS AKHIR - TL141584**

**STUDI OPTIMISASI DIAMETER SINAR LASER  
DAN DAYA LASER PADA PENGELASAN LASER  
TERHADAP LEBAR LASAN DAN KEDALAMAN  
PENETRASI SA-516 *GRADE* 70 DENGAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

**BRAHMANU WISNU SAPUTRO  
NRP. 02511440000113**

Dosen Pembimbing  
Mas Irfan P. H., ST., M.Sc, Ph.D  
Budi Agung Kurniawan, ST., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



FINAL PROJECT - TL141584

**OPTIMIZATION STUDY OF LASER BEAM  
DIAMETER AND LASER POWER ON LASER  
WELDING TO WELD WIDTH AND  
PENETRATION DEPTH OF SA-516 GRADE 70  
USING FINITE ELEMENT METHOD**

BRAHMANU WISNU SAPUTRO  
NRP. 02511440000113

Supervisor  
Mas Irfan Purbawanto. H., ST., M.Sc, Ph.D  
Budi Agung Kurniawan, ST., M.Sc

DEPARTMENT OF MATERIALS ENGINEERING  
Faculty of Industry Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDI OPTIMISASI DIAMETER SINAR LASER  
DAN DAYA LASER PADA PENGELASAN LASER  
TERHADAP LEBAR LASAN DAN KEDALAMAN  
PENETRASI SA-516 *GRADE* 70 DENGAN METODE  
ELEMEN HINGGA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**BRAHMANU WISNU SAPUTRO**  
NRP. 02511440000113

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. H., ST., M.Sc, Ph.D .....(Pembimbing I)
2. Budi Agung K., ST., M.Sc.....(Pembimbing II)



**SURABAYA**  
**JULI, 2018**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **STUDI OPTIMISASI DIAMETER SINAR LASER DAN DAYA LASER PADA PENGELASAN LASER TERHADAP LEBAR LASAN DAN KEDALAMAN PENETRASI SA-516 GRADE 70 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Nama** : Brahmanu Wisnu Saputro  
**NRP** : 02511440000113  
**Jurusan** : Departemen Teknik Material  
**Dosen Pembimbing** : Mas Irfan P. H., ST., M.Sc, Ph.D  
Budi Agung Kurniawan., ST., M.Sc

## **Abstrak**

Salah satu cara untuk menilai kualitas dari hasil sambungan pengelasan adalah dengan mengetahui dimensi dari *weld metal* terutama lebar lasan dan kedalaman penetrasi. Parameter pengelasan laser yang digunakan berpengaruh pada kualitas hasil pengelasan. Proses simulasi dan optimisasi dari pengelasan laser dilakukan untuk memprediksi hasil pengelasan laser dan memilih parameter untuk mendapatkan hasil yang optimal. Simulasi dan optimisasi masing – masing dilakukan dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dan *Response Surface Methodology* (RSM). Simulasi pada material baja SA-516 *grade* 70 dilakukan sebanyak sembilan kali dengan parameter pengelasan yang berbeda. Parameter masukan pertama adalah variasi diameter sinar laser 1 mm; 0,9 mm; dan 0,8 mm. Kemudian parameter masukan kedua adalah variasi daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W. Selain itu, perubahan fasa juga dipertimbangkan dengan menghitung nilai entalpi berdasarkan nilai *specific heat* dan *latent heat* peleburan material. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin kecil diameter sinar laser maka lebar lasan semakin menurun, laju solidifikasi semakin lambat, kedalaman penetrasi, dan lebar HAZ semakin meningkat. Hasil simulasi juga menggambarkan bahwa semakin tinggi daya laser maka lebar lasan semakin meningkat, laju solidifikasi



semakin lambat, kedalaman penetrasi, dan lebar HAZ semakin meningkat. Kemudian agar mendapatkan hasil pengelasan yang optimal maka direkomendasikan untuk menggunakan parameter diameter sinar laser 0,8 mm serta daya laser dengan rentang 2000 – 2250 W. Proses validasi dengan perhitungan matematis telah dilakukan dan didapatkan hasil simulasi yang valid.

***Kata kunci: Laser, Metode Elemen Hingga, Pengelasan, SA-516 Grade 70***

**OPTIMIZATION STUDY OF LASER BEAM  
DIAMETER AND LASER POWER ON LASER  
WELDING TO WELD WIDTH AND PENETRATION  
DEPTH OF SA-516 GRADE 70 USING FINITE  
ELEMENT METHOD**

**Name** : **Brahmanu Wisnu Saputro**  
**SRN** : **02511440000113**  
**Department** : **Material Engineering Department**  
**Supervisor** : **Mas Irfan P. H., ST., M.Sc, Ph.D**  
**Budi Agung Kurniawan., ST., M.Sc**

**Abstract**

One way to assess the quality of the welded joint results is to know the dimensions of the weld metal especially the weld width and the penetration depth. The laser welding parameters used affect the quality of the weld. Simulation and optimization process of laser welding is done to predict laser welding results and to select parameters to obtain the optimal results. Simulation and optimization are each performed using Finite Element Method (FEM) and Response Surface Methodology (RSM). Simulation of SA-516 grade 70 steel was done nine times with different welding parameters. The first input parameters are laser beam diameter with variations of 1 mm, 0.9 mm, and 0.8 mm. Then the second input parameter is a variation of laser power 1750 W, 2000 W, and 2250 W. In addition, phase change is also considered by calculating the value of enthalpy based on specific heat value and melting latent heat of material. The simulation results show that the smaller the laser beam diameter, the weld width decreases, the solidification rate becomes slower, the penetration depth, and HAZ Width increases. The simulation results also illustrate that the higher the laser power the weld width increases, the solidification rate is slower, the penetration depth, and HAZ Width increases. Then in order to obtain optimal welding results it is recommended to use the laser beam diameter parameter of 0.8 mm and laser power with

the range of 2000 – 2250 W. Validation process using mathematical calculations have been done and obtained simulation results are found to be valid.

**Keywords: Laser, Finite Element Method, Welding, SA-516  
Grade 70**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul **“Studi Optimisasi Diameter Sinar Laser dan Daya Laser pada Pengelasan Laser terhadap Lebar Lasan dan Kedalaman Penetrasi SA-516 Grade 70 dengan Metode Elemen Hingga”**.

Pada kesempatan kali ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penyusun Bapak Samargi dan Ibu Kusmedihati serta segenap keluarga besar Soepono dan Soebekti atas semua doa, dukungan moril dan materiil yang selalu dicurahkan.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI – ITS.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing pertama Tugas Akhir serta dosen wali yang telah memberikan bekal dan ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing kedua Tugas Akhir yang telah memberikan bekal dan ilmu yang sangat bermanfaat.

Penyusun menyadari adanya banyak kekurangan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini. Besar harapan penyusun akan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Aamiin.

Surabaya, Juli 2018  
Brahmanu Wisnu Saputro

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Permasalahan .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Lingkup Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	5
2.2 Laser.....	20
2.3 Metode Elemen Hingga .....	25
2.4 Distribusi Temperatur pada Permodelan Pengelasan... 27	
2.5 Pengukuran Lebar Lasan dari Lebar HAZ.....	30
2.6 Hubungan Parameter Pengelasan terhadap Kedalaman Penetrasi.....	31
2.7 Material SA-516 <i>Grade 70</i> .....	32
2.8 Perubahan Fasa (Peleburan dan Pembekuan) .....	32
2.9 <i>Response Surface Methodology</i> (RSM) .....	34
<b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Metode Penelitian .....	37
3.2 Spesifikasi Material dan Parameter <i>Laser Welding</i> .....	38
3.3 Peralatan Penelitian.....	45
3.4 Alur Permodelan dengan Perangkat Lunak .....	45

<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1 Hasil Penelitian (Permodelan).....	55
4.2 Optimisasi Hasil Simulasi.....	107
4.3 Validasi Hasil Simulasi.....	115
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan.....	119
5.2 Saran.....	119
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>xxi</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>xxv</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>liii</b>
<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>lvii</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Bentuk Distorsi dari Benda Kerja pada Empat Waktu yang Berbeda : (a) 5 s, (b) 20 s, (c) 30 s, (d) 1000 s (Tsirkas, 2003).....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Profil Kekerasan dari <i>Fusion Zone</i> Lasan Hasil Eksperimen (Esfahani, 2015).....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Pengaruh <i>Welding Speed</i> pada Geometri Lasan: (a) Lebar total, (b) Kedalaman fusi, (c) Lebar FZ; Pengaruh Temperatur pada Geometri Lasan (d) Lebar total, (e) Kedalaman fusi, (f) Lebar FZ. (Akbari, 2016) .....	11
<b>Gambar 2.4</b>	Elemen Dasar dari Laser (Dawes, 1992) .....	20
<b>Gambar 2.5</b>	Ilustrasi dari Fenomena <i>Spot</i> dan <i>Bead Welding</i> dengan Laser PW dan CW (Katayama, 2013)...	23
<b>Gambar 2.6</b>	Ilustrasi Mekanisme Pengelasan <i>Laser Keyhole</i> : (a) <i>Keyhole</i> dilihat dari depan, (b) <i>Keyhole</i> dilihat dari bagian samping (Sundqvist, 2015) .....	24
<b>Gambar 2.7</b>	Skema Model Termal pada Analisa Material Tiga Dimensi (Bhadra, 2014) .....	28
<b>Gambar 2.8</b>	Geometri Sumber Panas Volumetrik : (a) Bhadra (2014), (b) Goldak (2005).....	29
<b>Gambar 2.9</b>	Entalpi terhadap Fungsi Temperatur (ANSYS, 2010).....	33
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram Alir Penelitian.....	37
<b>Gambar 3.2</b>	Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 1 mm ( <i>Isometric</i> dan <i>Fit View</i> ).....	41
<b>Gambar 3.3</b>	Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 1 mm Dilihat Lebih Dekat ( <i>Isometric View</i> ).....	41
<b>Gambar 3.4</b>	Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm ( <i>Isometric</i> dan <i>Fit View</i> )....	42



<b>Gambar 3.5</b>	Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm Dilihat Lebih Dekat ( <i>Isometric View</i> ).....	42
<b>Gambar 3.6</b>	Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm ( <i>Isometric dan Fit View</i> )....	43
<b>Gambar 3.7</b>	Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm Dilihat Lebih Dekat ( <i>Isometric View</i> ).....	43
<b>Gambar 3.8</b>	Diagram Alir Permodelan <i>Laser Welding</i> .....	46
<b>Gambar 3.9</b>	Hasil <i>Meshing</i> pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 1 mm ( <i>Isometric dan Fit View</i> ).....	47
<b>Gambar 3.10</b>	Hasil <i>Meshing</i> pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 1 mm Dilihat Lebih Dekat ( <i>Isometric View</i> ).....	48
<b>Gambar 3.11</b>	Hasil <i>Meshing</i> pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm ( <i>Isometric dan Fit View</i> )....	48
<b>Gambar 3.12</b>	Hasil <i>Meshing</i> pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm Dilihat Lebih Dekat ( <i>Isometric View</i> ).....	49
<b>Gambar 3.13</b>	Hasil <i>Meshing</i> pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm ( <i>Isometric dan Fit View</i> )....	49
<b>Gambar 3.14</b>	Hasil <i>Meshing</i> pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm Dilihat Lebih Dekat ( <i>Isometric View</i> ).....	50
<b>Gambar 3.15</b>	Material dengan <i>Boundary Condition</i> yang Sudah Diatur .....	51
<b>Gambar 3.16</b>	Contoh Pengaturan Menu <i>Solution Controls</i> .....	54
<b>Gambar 4.1</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 1750 W ( <i>Top View</i> ).....	57
<b>Gambar 4.2</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2000 W ( <i>Top View</i> ).....	57
<b>Gambar 4.3</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2250 W ( <i>Top View</i> ).....	58

<b>Gambar 4.4</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 1750 W ( <i>Top View</i> ) ....	58
<b>Gambar 4.5</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2000 W ( <i>Top View</i> ) ....	59
<b>Gambar 4.6</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2250 W ( <i>Top View</i> ) ....	59
<b>Gambar 4.7</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 1750 W ( <i>Top View</i> ) ....	60
<b>Gambar 4.8</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2000 W ( <i>Top View</i> ) ....	60
<b>Gambar 4.9</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2250 W ( <i>Top View</i> ) ....	61
<b>Gambar 4.10</b>	Lebar Lasan dengan Diameter Laser 1 mm .....	62
<b>Gambar 4.11</b>	Lebar Lasan dengan Diameter Laser 0,9 mm ....	63
<b>Gambar 4.12</b>	Lebar Lasan dengan Diameter Laser 0,8 mm ....	63
<b>Gambar 4.13</b>	Lebar Lasan Pengelasan Laser Berdasarkan Diameter Sinar Laser .....	65
<b>Gambar 4.14</b>	Lebar Lasan dengan Daya Laser 1750 W .....	66
<b>Gambar 4.15</b>	Lebar Lasan dengan Daya Laser 2000 W .....	66
<b>Gambar 4.16</b>	Lebar Lasan dengan Daya Laser 2250 W .....	67
<b>Gambar 4.17</b>	Lebar Lasan Pengelasan Laser Berdasarkan Daya Laser .....	68
<b>Gambar 4.18</b>	Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Diameter Sinar Laser 1 mm.....	69
<b>Gambar 4.19</b>	Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm.....	70
<b>Gambar 4.20</b>	Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm.....	70
<b>Gambar 4.21</b>	Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Daya Laser 1750 W.....	73
<b>Gambar 4.22</b>	Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Daya Laser 2000 W.....	74
<b>Gambar 4.23</b>	Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Daya Laser 2250 W.....	74

<b>Gambar 4.24</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 1750 W ( <i>Right View</i> ) .....	79
<b>Gambar 4.25</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2000 W ( <i>Right View</i> ) .....	79
<b>Gambar 4.26</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2250 W ( <i>Right View</i> ) .....	80
<b>Gambar 4.27</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 1750 W ( <i>Right View</i> ) ..	80
<b>Gambar 4.28</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2000 W ( <i>Right View</i> ) ..	81
<b>Gambar 4.29</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2250 W ( <i>Right View</i> ) ..	81
<b>Gambar 4.30</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 1750 W ( <i>Right View</i> ) ..	82
<b>Gambar 4.31</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2000 W ( <i>Right View</i> ) ..	82
<b>Gambar 4.32</b>	Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2250 W ( <i>Right View</i> ) ..	83
<b>Gambar 4.33</b>	Kedalaman Penetrasi dengan Diameter Sinar Laser 1 mm .....	84
<b>Gambar 4.34</b>	Kedalaman Penetrasi dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm .....	84
<b>Gambar 4.35</b>	Kedalaman Penetrasi dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm .....	85
<b>Gambar 4.36</b>	Kedalaman Penetrasi Pengelasan Laser Berdasarkan Diameter Sinar Laser .....	86
<b>Gambar 4.37</b>	Kedalaman Penetrasi dengan Daya Laser 1750 W .....	87
<b>Gambar 4.38</b>	Kedalaman Penetrasi dengan Daya Laser 2000 W .....	88
<b>Gambar 4.39</b>	Kedalaman Penetrasi dengan Daya Laser 2250 W .....	88
<b>Gambar 4.40</b>	Kedalaman Penetrasi Berdasarkan Daya Laser ..	90

<b>Gambar 4.41</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 1 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	92
<b>Gambar 4.42</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 2 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	93
<b>Gambar 4.43</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 3 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	94
<b>Gambar 4.44</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 4 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	95
<b>Gambar 4.45</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 5 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	96
<b>Gambar 4.46</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 6 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	97
<b>Gambar 4.47</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 7 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	98
<b>Gambar 4.48</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 8 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	99
<b>Gambar 4.49</b>	Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 9 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K .....	100
<b>Gambar 4.50</b>	Lebar HAZ dengan Diameter Sinar Laser 1 mm ... ..	101
<b>Gambar 4.51</b>	Lebar HAZ dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm .....	102
<b>Gambar 4.52</b>	Lebar HAZ dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm .....	102

<b>Gambar 4.53</b>	Lebar HAZ Pengelasan Laser Berdasarkan Diameter Sinar Laser .....	104
<b>Gambar 4.54</b>	Lebar HAZ dengan Daya Laser 1750 W .....	105
<b>Gambar 4.55</b>	Lebar HAZ dengan Daya Laser 2000 W .....	105
<b>Gambar 4.56</b>	Lebar HAZ dengan Daya Laser 2250 W .....	106
<b>Gambar 4.57</b>	Lebar HAZ Pengelasan Laser Berdasarkan Daya Laser .....	106
<b>Gambar 4.58</b>	<i>Contour Plot</i> Lebar Lasan terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser .....	109
<b>Gambar 4.59</b>	<i>Surface Plot</i> Lebar Lasan terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser .....	110
<b>Gambar 4.60</b>	Analisa Lebar Lasan Minimum .....	110
<b>Gambar 4.61</b>	<i>Contour Plot</i> Kedalaman Penetrasi terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser .....	112
<b>Gambar 4.62</b>	<i>Surface Plot</i> Lebar Lasan terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser .....	112
<b>Gambar 4.63</b>	Analisa Kedalaman Penetrasi Maksimum .....	113
<b>Gambar 4.64</b>	Optimisasi Respon Pengelasan Laser Baja SA-516 Grade 70 .....	114

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Penelitian <i>Laser Welding</i> Sebelumnya .....	12
<b>Tabel 2.2</b>	Contoh Aplikasi Teknik dari MEH (Chen, 2015)...	25
<b>Tabel 3.1</b>	Standar Komposisi Kimia Material Baja SA-516 <i>Grade 70</i> untuk Plat Dibawah 12,5 mm (ASME SA- 516, 2003) .....	38
<b>Tabel 3.2</b>	Standar Uji Tarik Baja SA-516 <i>Grade 70</i> (ASME SA-516, 2003).....	39
<b>Tabel 3.3</b>	Komposisi Kimia Baja SA-516 <i>Grade 70</i> yang Digunakan dalam Simulasi (Oyyaravelu, 2017).....	39
<b>Tabel 3.4</b>	Sifat Mekanik <i>Base Metal</i> Baja SA-516 <i>Grade 70</i> (Oyyaravelu, 2017) .....	40
<b>Tabel 3.5</b>	Parameter <i>Laser Welding</i> pada Setiap Kasus.....	44
<b>Tabel 4.1</b>	Temperatur Minimum dan Maksimum Menurut Parameter Pengelasan .....	61
<b>Tabel 4.2</b>	Lebar Lasan Menurut Parameter Pengelasan.....	62
<b>Tabel 4.3</b>	<i>Solidification Time</i> Lasan Menurut Parameter Pengelasan .....	71
<b>Tabel 4.4</b>	Dimensi Kedalaman Penetrasi Menurut Parameter Pengelasan .....	83
<b>Tabel 4.5</b>	Dimensi Lebar HAZ Menurut Parameter Pengelasan .....	101

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pengelasan merupakan proses penyambungan material dimana dua bagian atau lebih disambungkan pada permukaan yang saling bersentuhan dengan diberikan energi panas dan atau tekanan yang sesuai, dengan atau tanpa menggunakan logam *filler*. Proses pengelasan umumnya dilakukan dengan memanfaatkan energi panas saja, tanpa diberikan tekanan. Tetapi dalam beberapa proses digunakan kombinasi dari energi panas dan tekanan, dan ada pula yang menggunakan tekanan saja tanpa diberikan energi panas eksternal (Groover, 2010). Menurut AWS (2001), las merupakan ikatan metalurgi antara sambungan logam dan logam paduan yang dilakukan ketika fasa cair. Sehingga dapat dikatakan bahwa las adalah sambungan lokal dari beberapa material logam dengan menggunakan energi panas. Secara sekilas konsep pengelasan terlihat sederhana, namun pengaruh yang dihasilkan oleh daya las tidaklah demikian. Proses pengelasan yang dilakukan akan mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik dari material yang mana akan mempengaruhi performa dari material secara keseluruhan. Karena itulah penting untuk menentukan parameter input yang dapat menghasilkan produk lasan yang baik.

Sejak ditemukan pada tahun 1960 oleh Maiman (Hecht, 1999), laser telah berevolusi dengan sangat cepat yang mana dapat dilihat dari perkembangan metode dan penerapannya, serta peralatan yang semakin efisien, kecil dan murah. Salah satu penerapan dari teknologi ini adalah untuk pengelasan logam menggunakan laser. Teknologi pengelasan laser beberapa tahun terakhir semakin diminati sehingga penerapan dari teknologi ini akan meningkat seiring dengan pengembangan peralatan laser dan proses penyambungan terbaru. Menurut Katayama (2013), kerapatan daya dari sinar laser pada pengelasan laser jauh lebih tinggi dari pengelasan menggunakan busur maupun plasma,





sehingga dapat menghasilkan penetrasi lasan yang dalam dan sempit, kualitas tinggi, performa tinggi, cepat, presisi, distorsi yang rendah, serta fleksibel. Dikarenakan konsentrasi energi yang tinggi pada daerah yang kecil pada sinar laser, proses ini umumnya hanya digunakan pada benda dengan ukuran kecil. Selain itu logam memiliki kemungkinan untuk menguap akibat temperatur yang sangat tinggi, sehingga harus berhati-hati dalam menentukan parameter pengelasan laser. Kemudian biaya proses ini juga relatif mahal dibandingkan dengan pengelasan konvensional.

Guna menghasilkan produk lasan yang terbaik, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengoptimasi parameter-parameter input dari proses pengelasan laser. Parameter yang dimaksud adalah *travel speed*, *laser focal position*, diameter sinar laser serta *laser power*. Respon pengelasan yang diperhatikan antara lain yaitu struktur mikro, daerah fusi, geometri *weld pool*, lebar HAZ, kedalaman penetrasi, lebar lasan, *repetition rate* sinar laser, kekuatan tarik, kekerasan, dan sebagainya. Optimisasi dari parameter lasan umumnya dilakukan dengan metode elemen hingga serta dibantu oleh berbagai perangkat lunak yang mumpuni di bidangnya.

Pada penelitian – penelitian yang telah ada umumnya membahas mengenai pengelasan laser untuk material *stainless steel* atau aluminium, tetapi masih jarang ada penelitian mengenai pengelasan laser untuk material baja karbon. Permodelan pengelasan laser dilakukan karena proses pengelasan laser di lapangan membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Adapun penelitian ini adalah melakukan optimisasi daya laser dan diameter sinar laser pada pengelasan laser material baja SA-516 *grade 70* dan membandingkan hasilnya terutama pada bagian lebar lasan, laju solidifikasi, kedalaman penetrasi dan lebar HAZ. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS 18.1 dengan metode elemen hingga serta aplikasi Minitab18 yang diterapkan untuk mendapatkan hasil yang optimal.

---

## BAB I PENDAHULUAN



---

## 1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan penjabaran latar belakang diatas dapat ditarik beberapa permasalahan dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana pengaruh diameter sinar laser terhadap lebar lasan, laju solidifikasi, kedalaman penetrasi, dan lebar HAZ material SA516 *grade 70* menggunakan metode pengelasan laser?
2. Bagaimana pengaruh daya laser terhadap lebar lasan, laju solidifikasi, kedalaman penetrasi, dan lebar HAZ material SA516 *grade 70* menggunakan metode pengelasan laser?
3. Bagaimana parameter daya laser dan diameter sinar laser agar pengelasan laser pada material SA516 *grade 70* mencapai kondisi yang optimal?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini berjalan dengan terarah serta memiliki kejelasan dalam analisa permasalahan, maka dilakukan beberapa batasan permasalahan, diantaranya yaitu :

1. Material yang disimulasikan adalah SA516 *grade 70* yang diasumsikan homogen.
2. Laju pendinginan setelah pengelasan pada satu bagian dari material diasumsikan selalu konstan.
3. Perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan diabaikan.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh daya laser terhadap lebar lasan, laju solidifikasi, kedalaman penetrasi, dan lebar HAZ SA516 *grade 70* menggunakan metode pengelasan laser.
2. Menganalisis pengaruh diameter sinar laser terhadap lebar lasan, laju solidifikasi, kedalaman penetrasi, dan



---

lebar HAZ SA516 *grade* 70 menggunakan metode pengelasan laser.

3. Memperoleh parameter daya laser dan diameter sinar laser agar pengelasan laser pada SA516 *grade* 70 mencapai kondisi yang optimal.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu sebagai referensi pengembangan dalam proses pengelasan lanjut dalam dunia industri dan sebagai referensi untuk peneliti-peneliti berikutnya dalam mengembangkan ilmu mengenai *laser welding*.

### 1.6 Lingkup Penelitian

Adapun lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh radiasi terhadap *heat loss* tidak diperhitungkan pada proses simulasi pengelasan laser.
2. Proses evaporasi dari material akibat pemanasan tidak diperhitungkan dalam simulasi.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Sebelumnya**

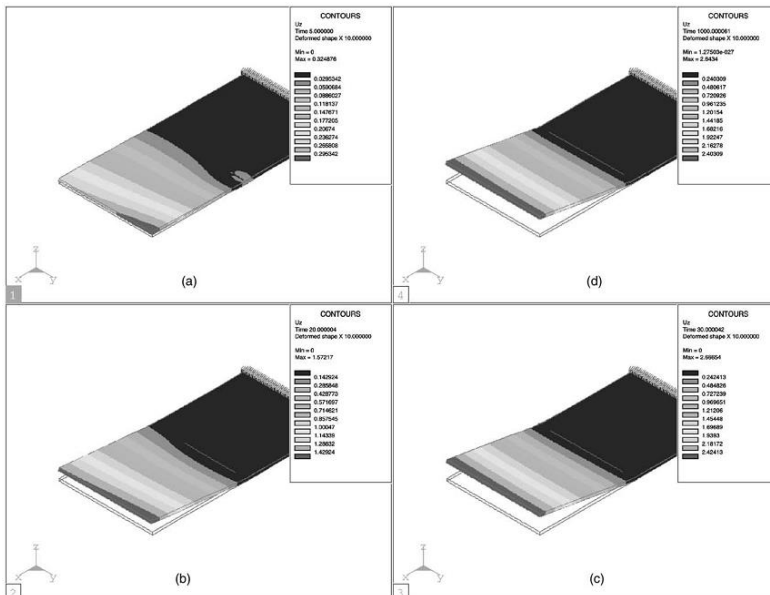
Model elemen hingga 3-D untuk mensimulasikan pengelasan laser diteliti oleh Tsirkas (2003) yang kemudian diverifikasi dengan melakukan eksperimen. Tsirkas (2003) melakukan simulasi dan eksperimen pengelasan laser menggunakan material baja AH36 dengan memvariasikan daya laser dan travel speed untuk mendapatkan distribusi temperatur dan nilai distorsi dari hasil lasan. Model elemen hingga 3-D yang digunakan mempertimbangkan analisis menggunakan sifat material yang temperature dependent serta transformasi metalurgi. Tsirkas (2003) mendapatkan hasil bahwa pada awal pengelasan distorsi tidak seragam dan distorsi cenderung lebih besar pada saat laser pertama kali menyentuh spesimen. Tetapi menjelang akhir pengelasan dan setelah pendinginan, distorsi menjadi lebih seragam.

Investigasi terhadap material Ti6Al4V yang dilas menggunakan pengelasan laser dilakukan oleh Casalino (2005) dengan memanfaatkan pendekatan Taguchi dan statistik. Investigasi dilakukan pada Ti6Al4V *grade 5* dengan pengelasan laser dioda. Variabel masukan yang digunakan yaitu variasi gas pelindung (helium atau argon), ketebalan spesimen, serta *welding speed* yang kemudian digunakan untuk mendapatkan variabel cacat (kelebihan logam lasan, kelebihan penetrasi, dan porositas). Hasil dari penelitian Casalino (2005) untuk pengelasan laser dioda ini adalah jumlah cacat akan semakin sedikit ketika spesimen semakin tipis, *welding speed* semakin cepat, dan ketika helium digunakan sebagai gas pelindung.

Optimasi dari parameter pengelasan laser CO<sub>2</sub> telah dilakukan oleh Olabi (2006) menggunakan algoritma Taguchi dan *Artificial Neural Network* (ANN). Dimana pada penelitiannya Olabi (2006) melakukan pengelasan laser pada material *medium carbon steel* dengan posisi *butt weld*. Parameter pengelasan yang



digunakan yaitu daya laser dengan kisaran 1,2 – 1,42 kW, *travel speed* dengan kisaran 5 – 11,66 mm/s, serta *focal position* dengan kisaran 0 – 2,5 mm digunakan untuk mendapatkan keluaran berupa rasio antara penetrasi dan lebar *fusion zone* ( $P/W$ ) serta rasio antara penetrasi dan lebar HAZ ( $P/W_{HAZ}$ ). Hasil penelitian Olabi (2006) menunjukkan bahwa semakin besar daya laser, *travel speed* dan focal position maka  $P/W$  dan  $P/W_{HAZ}$  akan semakin besar yang artinya penetrasi akan semakin dalam sedangkan lebar *fusion zone* dan lebar HAZ akan semakin sempit. Kemudian dari hasil analisa Taguchi dan model ANN didapatkan nilai parameter yang optimal, yaitu daya laser 1,42 kW, *travel speed* 11,66 mm/s dan *focal position* 2,5 mm dengan hasil  $P/W$  dan  $P/W_{HAZ}$  masing – masing 2,22 dan 9,70.



**Gambar 2.1** Bentuk Distorsi dari Benda Kerja pada Empat Waktu yang Berbeda : (a) 5 s, (b) 20 s, (c) 30 s, (d) 1000 s (Tsirkas, 2003)

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

Studi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik dari sambungan las material 304 stainless steel yang dilas menggunakan pengelasan TIG, *laser*, dan *laser-TIG hybrid welding* telah dilakukan oleh Yan (2010). Material yang telah dilas oleh Yan (2010) kemudian dikarakterisasi struktur makro, struktur mikro, dan komposisi fasanya. Kemudian sifat mekanik dan morfologi patahan permukaannya juga dianalisa. Hasil dari penelitian ini adalah sambungan dengan penetrasi penuh dan tanpa cacat berhasil didapatkan dari ketiga jenis pengelasan. Struktur mikro dari semua sambungan berupa fasa  $\delta$ -Fe dan  $\gamma$ -Fe. Zona transisi dan HAZ hanya terdapat pada sambungan hasil pengelasan TIG. Ukuran dendrit pada struktur mikro sambungan yang paling besar didapatkan pada sambungan hasil pengelasan TIG sedangkan ukuran dendrit paling kecil didapatkan pada sambungan hasil pengelasan laser. Kekuatan tarik paling besar didapatkan dari hasil pengelasan *hybrid*.

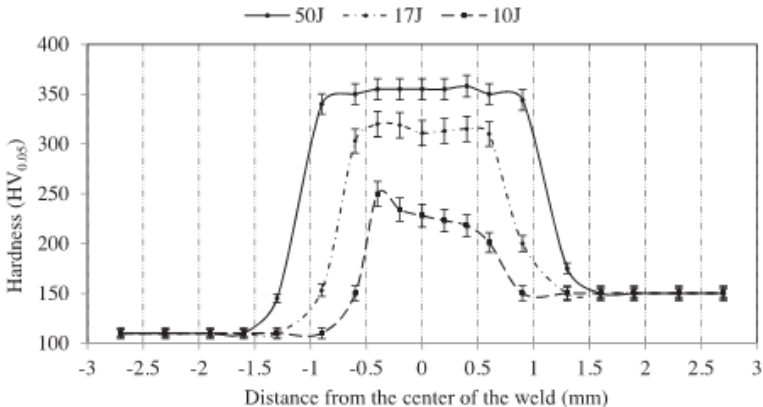
Torkamany (2012) melakukan penelitian akan pengaruh mode pengelasan laser terhadap struktur mikro dan performa mekanik dari pengelasan *laser spot welding* antara baja karbon rendah dan baja tahan karat austenitik. Pengelasan laser dilakukan dengan menggunakan *pulsed Nd:YAG laser model IQL-10* dengan daya laser maksimal 400 W, diameter sinar laser 0,3 mm, *travel speed* 3 mm/s, *pulse frequency* 14 Hz, dan *pulse duration* 8,5 ms. Daya laser divariasikan untuk mendapatkan struktur mikro, sifat mekanik dan evolusi bentuk serta dimensi dari *fusion zone* (FZ). Hasil dari penelitiannya yaitu bentuk dari FZ tidaklah simetris karena perbedaan sifat dari kedua material, transisi mode pengelasan laser dari mode konduksi ke mode *keyhole* akibat peningkatan daya laser akan meningkatkan luas daerah FZ serta dilusi dari kedua material. Dengan meningkatkan daya laser maka FZ akan semakin luas sehingga kekuatan dari sambungan akan meningkat.

Pengelasan laser juga dapat digunakan untuk menyambung *dissimilar metal*, seperti studi yang telah dilakukan oleh Esfahani (2015). Esfahani (2015) melakukan simulasi untuk mempelajari

---



proses *alloying* pada *fusion zone* dari pengelasan *dissimilar metal* antara baja karbon (CS) dan *austenitic stainless steel* (SS). Distribusi temperatur, *fluid velocity* pada permukaan *weld pool*, dan profil konsentrasi material dianalisa untuk berbagai parameter lasan. Parameter masukan yang digunakan yaitu variasi *specific point energies*. Hasil dari penelitian Esfahani (2015) yaitu dengan meningkatnya *specific point energy* maka luas daerah yang mengalami peleburan akan semakin luas, temperatur puncak dari lasan akan semakin tinggi, kecepatan logam cair akan semakin cepat, arah pergerakan logam cair akan semakin beraturan serta akan meningkatkan pencampuran paduan antara CS dan SS sehingga kekerasan pada *fusion zone* akan semakin meningkat.



**Gambar 2.2** Profil Kekerasan dari *Fusion Zone* Lasan Hasil Eksperimen (Esfahani, 2015)

Dalam penelitiannya, Wu (2015) meneliti struktur mikro, sifat mekanik, dan perilaku korosi dari sambungan *laser welding* antara *ferritic stainless steel* (FSS) dan *carbon steel* (CS). Pengelasan laser dilakukan menggunakan *continuous Nd:YAG laser model* dengan daya maksimal 2 kW, *shielding gas* berupa argon murni, diameter sinar laser 0,6 mm, dan daya laser yang digunakan sebesar 1,65 kW. Parameter yang divariasikan yakni

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

*travel speed* (12 – 24 mm/s). Penelitian ini memiliki hasil yaitu struktur mikro yang terbentuk pada HAZ dari baja karbon berupa *lath martensite*, *upper bainite*, dan ferrit widmanstatten. Kemudian lebar weld bead dan HAZ akan menurun dengan meningkatnya *travel speed*. Kekerasan weld metal lebih tinggi dari kedua base metal (akibat terbentuknya martensit). Elongasi akan meningkat seiring dengan meningkatnya *travel speed*. Sambungan lasan memiliki potensial korosi yang lebih tinggi dari CS dan lebih rendah FSS. Kerapatan arus sambungan lasan paling tinggi dibandingkan dengan CS dan FSS sehingga laju korosinya paling tinggi.

Akbari (2016) dalam percobaannya berhasil menciptakan metode untuk memprediksi geometri lasan serta distribusi temperatur dari pengelasan laser material Ti6Al4V menggunakan metode *Artificial Neural Network* (ANN). Akbari (2016) melakukan eksperimen pengelasan laser terlebih dahulu kemudian simulasi numerik dilakukan berdasarkan hasil dari eksperimen. Parameter yang digunakan pada eksperimen hanya variasi *welding speed* (V) yang kemudian dimasukkan ke dalam model ANN untuk mendapatkan parameter geometri dari lasan. Hasilnya dari percobaan Akbari (2016) yaitu semakin cepat *welding speed* dan semakin rendah *temperature center* (T.C.) *weld pool* maka lebar dan kedalaman *fusion zone* (FZ), serta lebar lasan total akan semakin rendah.

Model *thermal-metallurgical-mechanical* (TMM) yang diteliti oleh Mi (2016) dapat digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur dan tegangan saat pengelasan laser dilakukan maupun setelahnya pada material baja karbon Q235 yang dianil. Validasi dilakukan dengan melakukan eksperimen menggunakan mesin *continuous fiber laser* IPG YLS400 dengan daya maksimum 4 kW dan *travel speed* yang digunakan 0,8 m/min. Hasil penelitiannya yaitu model TMM ini dapat digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur, transformasi fasa, dan distribusi tegangan sisa dari pengelasan laser dengan cukup akurat. Transformasi fasa memiliki pengaruh yang cukup

---





signifikan terhadap distribusi tegangan terutama akibat dari sifat fisik, perubahan volume, dan transformasi regangan plastis.

Meco (2017) meneliti bagaimana pengaruh *intermetallic compound* (IMC) dan daerah sambungan terhadap kekuatan mekanik dari sambungan serta bagaimana pengaruh dari temperatur dan waktu pemaparan terhadap kedua parameter tersebut. Meco (2017) melakukan eksperimen dengan menyambungkan plat baja karbon rendah dengan plat paduan aluminium. Daya laser dan *travel speed* divariasikan untuk mendapatkan profil temperatur, temperatur puncak, waktu melebur, lebar lasan, ketebalan lapisan IMC, dan kekuatan tarik geser. Didapatkan hasil bahwa kepadatan daya pengaruhnya lebih besar terhadap temperatur puncak daripada lama interaksi. Dalam hal waktu melebur, kepadatan daya dan lama interaksi memiliki pengaruh yang hampir sama. Kekuatan dari sambungan akan semakin kuat seiring dengan meningkatnya daerah sambungan (direpresentasikan oleh lebar lasan), dan menurun ketika ketebalan lapisan IMC meningkat.

Dalam penelitiannya, Ragavedran (2017) melakukan optimisasi parameter *laser-TIG hybrid welding* material *stainless steel* 316LN untuk mendapatkan geometri lasan yang terbaik. Parameter *pulse peak power* antara 2 – 3,75 kW, *pulse frequency* 4 – 12 Hz, *pulse duration* 5 – 10 ms, dan arus TIG 100 – 120 A digunakan untuk mendapatkan penetrasi, lebar *weld bead*, dan luas daerah lasan yang optimal. Dapat disimpulkan dari penelitian Ragavedran (2017) ini bahwa daya laser lah yang paling berpengaruh dalam mengontrol kedalaman penetrasi tetapi tidak berpengaruh terhadap lebar *weld bead*. Lebar *weld bead* paling dipengaruhi oleh arus TIG dan durasi *pulse* karena kedua parameter inilah yang mengontrol *heat input* pada material. Untuk mendapatkan penetrasi maksimal didapatkan nilai optimal parameter yaitu daya laser 3,67 – 3,75 kW, arus TIG 110 – 120 A, frekuensi *pulse* 11 – 12 Hz, dan durasi *pulse* 9 – 10 ms.

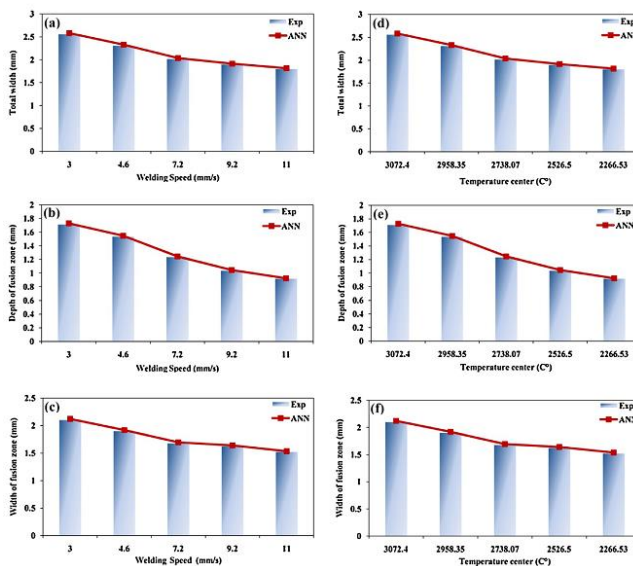
Yolanda (2018) dalam penelitiannya melakukan permodelan *Finite Element* 3-D untuk menganalisis pengelasan

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



*laser fiber* material esshete 1250 pada kondisi *transient thermal* kemudian mengoptimasi parameter-parameter masukan guna mendapatkan hasil lasan yang optimal. Parameter masukan yang digunakan Yolanda (2018) dalam penelitiannya yaitu *laser power* dengan kisaran 2 kW – 2,75 kW dan *travel speed* dengan kisaran 2,5 – 3,5 m/menit untuk mendapatkan hasil berupa kedalaman penetrasi, lebar lasan, dan tegangan sisa. Parameter-parameter tersebut kemudian dioptimisasi menggunakan perangkat lunak Minitab 17, sehingga didapatkan hasil parameter masukan yang optimal berupa *travel speed* 2,5 m/min dan *laser power* 2 kW yang menghasilkan *heat flux* sebesar 7077140835 W/m<sup>2</sup> sehingga menghasilkan lebar lasan dan tegangan sisa yang minimal serta kedalaman penetrasi yang maksimal.



**Gambar 2.3** Pengaruh *Welding Speed* pada Geometri Lasan: (a) Lebar total, (b) Kedalaman fusi, (c) Lebar FZ; Pengaruh Temperatur pada Geometri Lasan (d) Lebar total, (e) Kedalaman fusi, (f) Lebar FZ. (Akbari, 2016)

**Tabel 2.1** Penelitian *Laser Welding* Sebelumnya

No	Penelitian <i>Laser Welding</i> Sebelumnya	
1	Judul	<i>Numerical Simulation of the Laser Welding Process in Butt-Joint Specimens</i>
	Peneliti	S. A. Tsirkas, P. Papanikos, dan Th. Kermanidis
	Metode	Sebuah model <i>finite element</i> 3-D telah dikembangkan untuk mensimulasikan proses pengelasan laser dan memprediksi distorsi yang terjadi. Perhitungan <i>finite element</i> dilakukan menggunakan kode SYSWELD FE, yang memperhitungkan aspek termal, metalurgi, dan mekanik. Geometri yang digunakan berupa spesimen <i>butt-joint</i> dari material AH36 berbentuk plat. Verifikasi dilakukan dengan melakukan eksperimen.
	Hasil	Hasil dari pendekatan FE sesuai dengan hasil eksperimen. Pada awal pengelasan distorsi tidak seragam dan distorsi cenderung lebih besar pada saat laser pertama kali menyentuh spesimen. Tetapi menjelang akhir pengelasan dan setelah pendinginan, distorsi menjadi lebih seragam.
2	Judul	<i>Investigation on Ti6Al4V Laser Welding Using Statistical and Taguchi Approaches</i>
	Peneliti	G. Casalino, F. Curcio, dan F. Memola C. M.
	Metode	Eksperimen dilakukan pada lembaran material Ti6Al4V setebal 2,85 mm dan 2,5 mm. Sumber laser menggunakan CO <sub>2</sub> Rofin Sinar Mod. DC 025 (daya maksimal 2,5 kW). Kisaran daya yang digunakan yakni antara 1,8 – 2,4 kW. Sedangkan <i>welding speed</i> berkisar antara 60 – 120 mm/s. Variabel keluaran berupa morfologi sifat mekanik hasil lasan. Model ANN digunakan untuk menginterpolasi data hasil eksperimen yang tidak lengkap.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

Hasil	Jumlah cacat akan semakin sedikit ketika spesimen semakin tipis, <i>welding speed</i> semakin cepat, dan ketika helium digunakan sebagai gas pelindung.
<b>3</b>	<b>Judul</b> <i>An ANN and Taguchi Algorithms Integrated Approach to the Optimization of CO<sub>2</sub> Laser Welding</i>
Peneliti	A. G. Olabi, G. Casalino, K. Y. Benyounis, dan M. S. J. Hashmi
Metode	Eksperimen dilakukan untuk mengelas material baja karbon sedang berbentuk plat dengan dimensi tiap plat 180 x 80 x 5 mm. Daya laser (1,2 – 1,43 kW), <i>welding speed</i> (5 – 11,66 mm/s), dan <i>focal position</i> (-2,5 – 0 mm) digunakan untuk mendapatkan keluaran berupa rasio antara penetrasi dan lebar <i>fusion zone</i> ( $P/W$ ) serta rasio antara penetrasi dan lebar HAZ ( $P/W_{HAZ}$ ).
Hasil	Semakin besar daya laser, <i>travel speed</i> dan <i>focal position</i> maka $P/W$ dan $P/W_{HAZ}$ akan semakin besar yang artinya penetrasi akan semakin dalam sedangkan lebar <i>fusion zone</i> dan lebar HAZ akan semakin sempit. Kemudian dari hasil analisa Taguchi dan model ANN didapatkan nilai parameter yang optimal, yaitu daya laser 1,42 kW, <i>travel speed</i> 11,66 mm/s dan <i>focal position</i> 2,5 mm dengan hasil $P/W$ dan $P/W_{HAZ}$ masing – masing 2,22 dan 9,70.
<b>4</b>	<b>Judul</b> <i>Study on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Joints by TIG, Laser and Laser-TIG Hybrid Welding</i>
Peneliti	Jun Yan, Ming Gao, dan Xiaoyan Z.
Metode	Proses pengelasan dilakukan menggunakan Rofin TR050 CO <sub>2</sub> laser 5 kW dan Miller 300A conventional DCEN TIG welder untuk

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA




---

	menyambung plat <i>stainless steel</i> 304 setebal 3 mm. Parameter yang digunakan yaitu daya laser 4 kW, arus TIG 165 A, dan <i>welding speed</i> 400, 1000, dan 3000 mm/min masing – masing untuk TIG, laser, dan <i>hybrid welding</i> . Kemudian dilakukan uji metalografi untuk mendapatkan struktur mikro, uji tarik untuk mendapatkan sifat mekanik, uji SEM untuk menganalisa morfologi patahan, dan uji XRD untuk mendapatkan komposisi fasa.
Hasil	Sambungan dengan penetrasi penuh dan tanpa cacat berhasil didapatkan dari ketiga jenis pengelasan. Struktur mikro dari semua sambungan berupa fasa $\delta$ -Fe dan $\gamma$ -Fe. Zona transisi dan HAZ hanya terdapat pada sambungan hasil pengelasan TIG. Ukuran dendrit pada struktur mikro sambungan yang paling besar didapatkan pada sambungan hasil pengelasan TIG sedangkan ukuran dendrit paling kecil didapatkan pada sambungan hasil pengelasan laser. Kekuatan tarik paling besar didapatkan dari hasil pengelasan <i>hybrid</i> .
5	
Judul	<i>Effect of Laser Welding Mode on the Microstructure and Mechanical Performance of Dissimilar Laser Spot Welds between Low Carbon and Austenitic Stainless Steels</i>
Peneliti	M. J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh, M. J. Hamedi.
Metode	Pengelasan laser dilakukan dengan menggunakan <i>pulsed Nd:YAG laser model IQL-10</i> dengan daya laser maksimal 400 W, diameter sinar laser 0,3 mm, <i>travel speed</i> 3 mm/s, <i>pulse frequency</i> 14 Hz, dan <i>pulse duration</i> 8,5 ms. Daya laser divariasikan untuk mendapatkan struktur mikro, sifat mekanik dan

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

		evolusi bentuk serta dimensi dari <i>fusion zone</i> (FZ).
	Hasil	Hasil dari penelitiannya yaitu bentuk dari FZ tidaklah simetris karena perbedaan sifat dari kedua material, transisi mode pengelasan laser dari mode konduksi ke mode <i>keyhole</i> akibat peningkatan daya laser akan meningkatkan luas daerah FZ serta dilusi dari kedua material. Dengan meningkatkan daya laser maka FZ akan semakin luas sehingga kekuatan dari sambungan akan meningkat.
6	Judul	<i>Numerical Simulation of Alloy Composition in Dissimilar Laser Welding</i>
	Peneliti	M.R. Nekouie Esfahani, J. Coupland, dan S. Marimuthu
	Metode	Model <i>computational fluid dynamic</i> (CFD) 3-D dibuat untuk mempelajari <i>alloying</i> pada <i>fusion zone</i> dari pengelasan laser baja karbon rendah yang disambung dengan <i>stainless steel</i> . Distribusi temperatur, <i>fluid velocity</i> pada permukaan <i>weld pool</i> , dan profil konsentrasi material dianalisa untuk berbagai parameter <i>specific point energy</i> .
	Hasil	Semakin tinggi meningkatnya <i>specific point energy</i> maka luas daerah yang mengalami peleburan akan semakin luas, temperatur puncak dari lasan akan semakin tinggi, kecepatan logam cair akan semakin cepat, arah pergerakan logam cair akan semakin beraturan serta akan meningkatkan pencampuran paduan antara CS dan SS sehingga kekerasan pada <i>fusion zone</i> akan semakin meningkat.
7	Judul	<i>Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Laser Welded Dissimilar Joints between Ferritic Stainless Steel and</i>

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA




---

*Carbon Steel*

---

Peneliti	Wenyong Wu, Shengsun Hu, dan Junqi Shen
Metode	<p>Pengelasan laser dilakukan menggunakan <i>continuous Nd:YAG laser model</i> dengan daya maksimal 2 kW , <i>shielding gas</i> berupa argon murni, diameter sinar laser 0,6 mm, dan daya laser yang digunakan sebesar 1,65 kW. Parameter yang divariasikan yakni <i>travel speed</i> (12 – 24 mm/s). Struktur mikro investigasi menggunakan mikroskop optik, XRD, dan SEM. Uji tarik dan kekerasan dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanik. <i>Electrochemical corrosion test</i> dilakukan untuk mempelajari perilaku korosi dari sambungan lasan.</p>
Hasil	<p>Struktur mikro yang terbentuk pada HAZ dari baja karbon berupa <i>lath martensite</i>, <i>upper bainite</i>, dan ferrit widmanstatten. Kemudian lebar weld bead dan HAZ akan menurun dengan meningkatnya <i>travel speed</i>. Kekerasan weld metal lebih tinggi dari kedua base metal (akibat terbentuknya martensit). Elongasi akan meningkat seiring dengan meningkatnya <i>travel speed</i>. Sambungan lasan memiliki potensial korosi yang lebih tinggi dari CS dan lebih rendah FSS. Kerapatan arus sambungan lasan paling tinggi dibandingkan dengan CS dan FSS sehingga laju korosinya paling tinggi.</p>
8	<p>Judul <i>Numerical Simulation and Designing Artificial Neural Network for Estimating Melt Pool Geometry and Temperature Distribution in Laser Welding of Ti6Al4V Alloy</i></p>
Peneliti	M. Akbari, Seyfolah S., Afshin P., Mohsen H., Masoud A., dan Mohammad J. T.

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

Metode	Eksperimen dilakukan untuk mengkarakterisasi pengukuran temperatur dan dimensi HAZ pada pengelasan laser. Spesimen yang digunakan berupa plat Ti6Al4V (50 x 20 x 3 mm). <i>Pulsed Nd:YAG laser model IQL-20</i> digunakan sebagai sumber laser. Parameter masukan berupa <i>welding speed</i> (2 – 12 mm/s). Simulasi termal numerik dilakukan untuk memprediksi distribusi temperatur, geometri <i>fusion zone</i> (FZ), dan HAZ.
Hasil	Semakin cepat <i>welding speed</i> dan semakin rendah <i>temperature center</i> (T.C.) <i>weld pool</i> maka lebar dan kedalaman <i>fusion zone</i> (FZ), serta lebar lasan total akan semakin rendah.
9 Judul	<i>A Thermal-Metallurgical-Mechanical Model for Laser Welding Q235 Steel</i>
Peneliti	Gaoyang Mi, Lingda X., Chunming W., Xiyuan H., dan Yanhong W.
Metode	<i>Thermal-Metallurgical-Mechanical</i> (TMM) <i>model</i> dikembangkan untuk memprediksi distribusi temperatur dan tegangan pada saat pengelasan dan setelahnya. Validasi dilakukan dengan melakukan beberapa eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan menyambung plat baja karbon Q235 dengan menggunakan IPS YLS4000 sebagai sumber laser. Daya laser (4 kW), <i>welding speed</i> (0,8 m/min), <i>defocusing amount</i> (0) merupakan parameter yang digunakan.
Hasil	Model TMM ini dapat digunakan untuk memprediksi distribusi temperatur, transformasi fasa, dan distribusi tegangan sisa dari pengelasan laser dengan cukup akurat. Transformasi fasa memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap distribusi tegangan

---





	terutama akibat dari sifat fisik, perubahan volume, dan transformasi regangan plastis.
<b>10</b>	<p><b>Judul</b> <i>Laser Welding of Steel to Aluminium : Thermal Modelling and Joint Strength Analysis</i></p> <p><b>Peneliti</b> Sonia Meco, Luis C., Supriyo G., Stewart W., dan Norman M.</p> <p><b>Metode</b> Model termal finite element (FE) dikembangkan untuk memprediksi <i>transient thermal cycle</i> pada Fe-Al <i>interface</i> dengan berbagai kerapatan daya dan lama interaksi. Profil waktu-temperatur dihubungkan dengan geometri lasan, ketebalam lapisan IMC, dan kekuatan mekanik. Pengelasan dilakukan untuk memvalidasi hasil model FE dengan parameter lasan yang digunakan yaitu daya laser dan <i>travel speed</i>.</p> <p><b>Hasil</b> Kepadatan daya pengaruhnya lebih besar terhadap temperatur puncak daripada lama interaksi. Dalam hal waktu melebur, kepadatan daya dan lama interaksi memiliki pengaruh yang hampir sama. Kekuatan dari sambungan akan semakin kuat seiring dengan meningkatnya daerah sambungan (direpresentasikan oleh lebar lasan), dan menurun ketika ketebalan lapisan IMC meningkat.</p>
<b>11</b>	<p><b>Judul</b> <i>Optimization of Hybrid Laser – TIG Welding of 316LN Steel Using Response Surface Methodology (RSM)</i></p> <p><b>Peneliti</b> M. Ragavendran, N. Chandrasekhar, R. Ravikumar., Rajesh S. dan M. Vasudevan</p> <p><b>Metode</b> Optimisasi parameter <i>laser-TIG hybrid welding material stainless steel 316LN</i> dilakukan untuk mendapatkan geometri lasan yang terbaik. Parameter <i>pulse peak power</i> antara 2 – 3,75 kW, <i>pulse frequency</i> 4 – 12 Hz, <i>pulse duration</i></p>

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

		5 – 10 ms, dan arus TIG 100 – 120 A digunakan untuk mendapatkan penetrasi, lebar <i>weld bead</i> , dan luas daerah lasan yang optimal.
	Hasil	Daya laser paling berpengaruh dalam mengontrol kedalaman penetrasi tetapi tidak berpengaruh terhadap lebar <i>weld bead</i> . Lebar <i>weld bead</i> paling dipengaruhi oleh arus TIG dan durasi <i>pulse</i> karena kedua parameter inilah yang mengontrol <i>heat input</i> pada material. Untuk mendapatkan penetrasi maksimal didapatkan nilai optimal parameter yaitu daya laser 3,67 – 3,75 kW, arus TIG 110 – 120 A, frekuensi <i>pulse</i> 11 – 12 Hz, dan durasi <i>pulse</i> 9 – 10 ms.
12	Judul	Studi Optimisasi <i>Heat Flux</i> dan <i>Welding Speed</i> pada Pengelasan <i>Laser Fiber</i> Terhadap Lebar Lasan, Kedalaman Penetrasi dan Tegangan Sisa Esshete 1250 dengan Metode Elemen Hingga
	Peneliti	Tiara Anselly Resti Yolanda
	Metode	Permodelan <i>Finite Element</i> 3-D untuk menganalisis pengelasan <i>laser fiber</i> material esshete 1250 pada kondisi <i>transient thermal</i> kemudian mengoptimasi parameter-parameter masukan guna mendapatkan hasil lasan yang optimal. Parameter masukan yang digunakan yaitu <i>laser power</i> dengan kisaran 2 kW – 2,75 kW dan <i>travel speed</i> dengan kisaran 2,5 – 3,5 m/menit untuk mendapatkan hasil berupa kedalaman penetrasi, lebar lasan, dan tegangan sisa. Parameter-parameter tersebut kemudian dioptimisasi menggunakan perangkat lunak Minitab 17.
	Hasil	Hasil parameter masukan yang optimal berupa <i>travel speed</i> 2,5 m/min dan <i>laser power</i> 2 kW yang menghasilkan <i>heat flux</i> sebesar 7077140835 W/m <sup>2</sup> sehingga menghasilkan

---



---

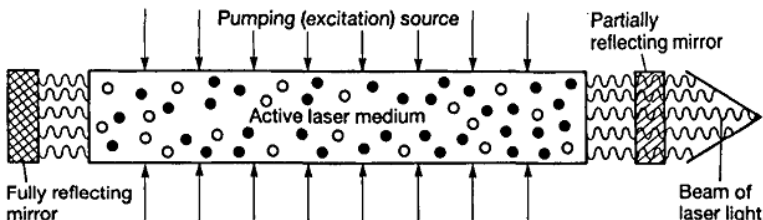
lebar lasan dan tegangan sisa yang minimal serta kedalaman penetrasi yang maksimal.

---

## 2.2 Laser

Laser (*Light Amplification Stimulated by the Emission of Radiation*) merujuk pada bagaimana cahaya tersebut dihasilkan. Laser berasal dari hasil eksitasi dari medium aktif yang diletakkan diantara dua buah cermin, yang mana salah satunya hanya mentransmisikan cahaya secara parsial, **Gambar 2.5**. Medium aktif terdiri dari kumpulan atom, molekul atau ion tertentu yang mana dapat berupa gas, cairan, ataupun padatan yang kemudian akan memancarkan radiasi sebagai gelombang cahaya (foton) ketika eksitasi terjadi. Eksitasi dari cairan dan padatan dapat dilakukan dengan membanjirinya dengan cahaya dari lampu *flash* dan gas dieksitasi dengan memberikan debit listrik.

Baik medium aktif dari atom, ion, maupun molekul, jumlahnya akan mencapai milyaran dan masing – masing akan menyerap energi ketika dieksitasi. Ketika umur mereka habis maka energi yang mereka serap akan dilepaskan dalam bentuk foton. Pelepasan ini disebut emisi spontan. Foton yang dilepaskan akan berjalan ke segala arah. Ketika foton bertumbukan dengan atom berenergi lainnya maka atom tersebut akan melepaskan foton sebelum waktunya dan dua foton akan berjalan pada fasa yang sama hingga tumbukan berikutnya, sehingga menghasilkan aliran foton yang densitasnya terus bertambah. (Dawes, 1992)



**Gambar 2.4** Elemen Dasar dari Laser (Dawes, 1992)

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

### 2.2.1 Jenis Laser untuk Pengelasan

Umumnya terdapat dua jenis laser menurut medium aktif yang digunakan yaitu *gas laser* dan *solid-state laser*. *Solid-state laser* terbagi menjadi beberapa jenis yaitu *ruby*, *neodymium glass*, dan *neodymium yttrium aluminium garnet (Nd:YAG)*. Sedangkan untuk laser gas umumnya menggunakan laser  $\text{CO}_2$ .

Laser Nd:YAG walaupun umumnya memiliki rata – rata daya yang lebih rendah dari laser  $\text{CO}_2$ , tetapi laser tersebut masih dapat mencapai daya puncak *pulse* hingga 10 kW. Fitur paling penting pada laser Nd:YAG adalah panjang gelombang keluarannya ( $1,06 \mu\text{m}$ ) yang dapat ditransmisikan melalui kabel serat optik. Sehingga laser Nd:YAG begitu menarik bagi pengelasan kecepatan tinggi dan otomatisasi. Kemampuan untuk mengontrol parameter *current pulse* memungkinkan untuk mengontrol interaksi antara sinar laser dan material sehingga menghasilkan kedalaman penetrasi lasan, profil dan tampilan yang diinginkan. Umumnya *pulse duration* untuk pengelasan laser Nd:YAG berkisar antara 0,5 – 20 ms dan *repetition rate* dari 5 – 500 Hz.

Laser  $\text{CO}_2$  dengan kisaran 2 – 5 kW saat ini berjumlah paling banyak untuk aplikasi pengelasan laser  $\text{CO}_2$ . Laser ini umumnya dapat mencapai daya yang lebih tinggi dibanding dengan laser Nd:YAG. Laser  $\text{CO}_2$  dapat digunakan dalam mode *continuous wave* ataupun *pulsed*. (Dawes, 1992)

### 2.2.2 Pengelasan Laser

Terdapat dua jenis mode pengelasan laser menurut perpindahan energi serta kedalaman penetrasinya. Mode pengelasan laser yang pertama adalah *conduction welding*. *Conduction welding* terjadi saat permukaan logam disinari oleh laser, logam akan terpanaskan hingga melebur sehingga penetrasi lasan akan ditentukan oleh laju penyerapan energi oleh logam dari laser dan pelepasan energi sepanjang ketebalan dari logam melalui konduksi. Mode pengelasan laser kedua yaitu *keyhole welding*. *Keyhole welding* akan terjadi pada saat kerapatan daya

---



permukaan (intensitas) dari sinar laser ditingkatkan hingga panas yang ditimbulkan cukup untuk menguapkan lapisan tipis dari logam sehingga dapat menimbulkan lubang yang dalam pada *weld pool*. Intensitas sendiri merupakan jumlah daya yang diaplikasikan pada daerah tertentu sesuai dengan diameter sinar laser yang digunakan. (Torkamany, 2012)

Pengelasan laser umumnya berupa metode *keyhole welding* yang mana dapat dicapai dengan intensitas yang sangat tinggi. Intensitas yang tinggi didapatkan dengan menerapkan daya laser yang tinggi serta memfokuskan sinar laser pada titik yang sangat kecil. Pada kerapatan daya permukaan (intensitas) dengan orde  $10^4 \text{ W/mm}^2$ , *rapid removal* dari logam karena penguapan akan menginisiasi *keyhole* kecil pada benda kerja. Jika laser dioperasikan pada mode *pulsed energy* atau *pulsed wave* (PW) maka logam cair akan merosot ke bagian tengah dari *keyhole* dan akan mengalami solidifikasi saat *pulse* selesai ditembakkan sehingga terkadang akan menghasilkan sedikit *undercut* pada *weld bead*. Ketika laser dioperasikan pada mode *continuous wave* (CW), sinar akan bergerak sepanjang garis sambungan, umumnya akan menghasilkan *weld bead* bagian atas yang lebih rapi dibandingkan dengan las busur pada umumnya.

*Laser keyholing* mula – mula akan terjadi pada baja ketika diberikan intensitas sekitar  $10^3 \text{ W/mm}^2$ . Pada tingkat ini lasan akan cenderung dangkal dan lebar sehingga dibutuhkan waktu pemaparan yang lebih lama. Pada intensitas  $10^4 - 10^5 \text{ W/mm}^2$  lasan akan menjadi dalam dan sempit sehingga membutuhkan waktu pemaparan yang sedikit, yang mana artinya *welding speed* yang tinggi dapat digunakan. (Katayama, 2013)

Pengelasan sinar laser dengan kualitas yang tinggi ditentukan oleh beberapa hal seperti berikut :

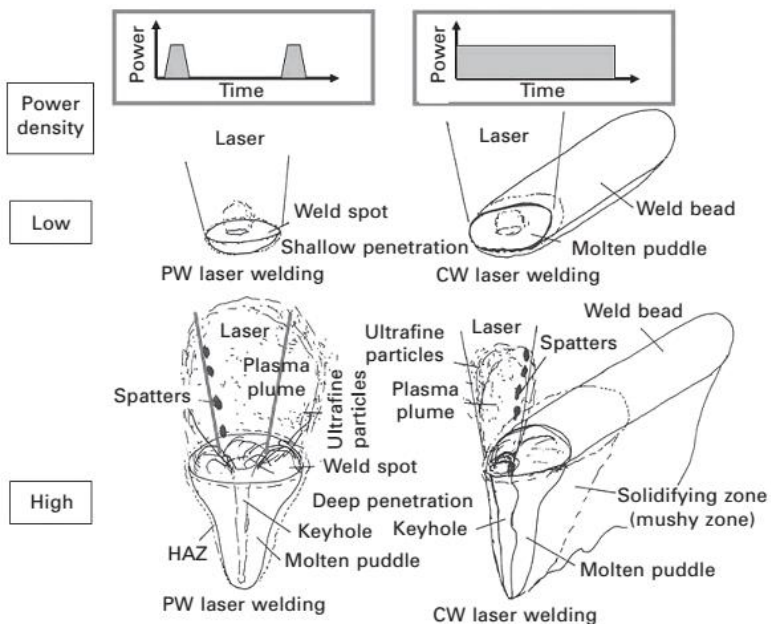
- Tidak ada kecacatan di dalam (pori, inklusi, fasa getas, retak, kekurangan fusi, dan sebagainya)
- Tidak ada kecacatan di permukaan (takik, dan sebagainya)

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Untuk mendapatkan kualitas yang baik dalam sebuah sambungan biasanya digunakan metode optimisasi. Beberapa parameter proses yang penting adalah (Sundqvist, 2015):

- Kecepatan pengelasan
- Daya masukan laser
- Mode pengelasan
- *Focussing, focal plane* dan parameter sinar laser
- Iradiasi laser
- Desain sambungan dan preparasi permukaan material
- Komposisi kimia material
- Gas pelindung
- Logam *filler* yang memungkinkan
- Dan sebagainya

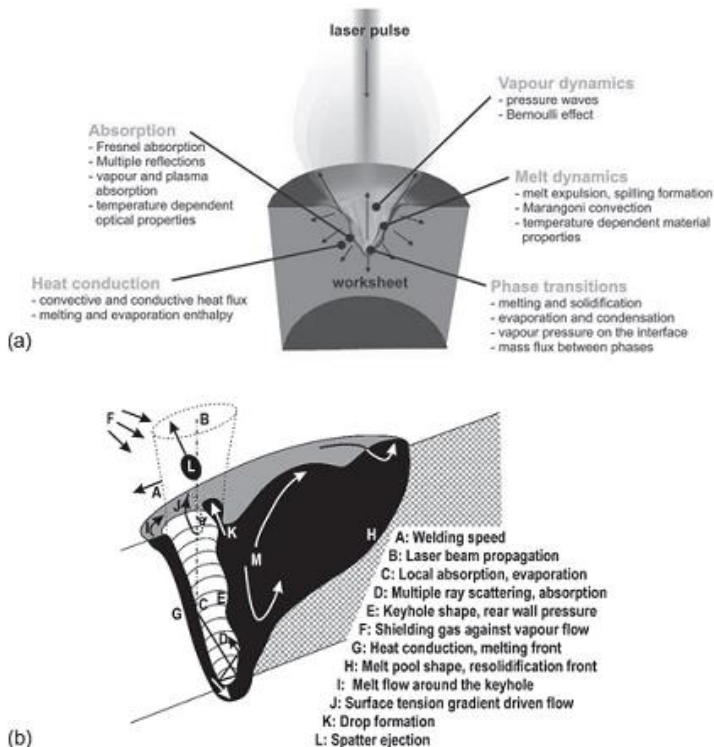


**Gambar 2.5** Ilustrasi dari Fenomena *Spot* dan *Bead Welding* dengan Laser PW dan CW (Katayama, 2013)



### 2.2.3 Permodelan Pengelasan Laser

Pada model pengelasan laser, mekanisme fisika diekspresikan melalui persamaan matematika. Model bisa saja sangat komprehensif dengan mempertimbangkan banyak bidang fisika (optik, termodinamika, dinamika fluida, dll) atau bisa saja fokus pada satu atau beberapa mekanisme tersebut. **Gambar 2.6** merupakan ilustrasi dari mekanisme – mekanisme penting pada proses mode *keyhole* pengelasan laser yang rumit.



**Gambar 2.6** Ilustrasi Mekanisme Pengelasan *Laser Keyhole*: (a) *Keyhole* dilihat dari depan, (b) *Keyhole* dilihat dari bagian samping (Sundqvist, 2015)



Model sederhana dari pengelasan laser biasanya hanya mempertimbangkan persamaan konduksi panas, yang dapat ditulis pada bentuk umum :

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T = 0 \quad (2.1)$$

dimana  $\alpha$  adalah difusifitas termal yang dapat dijabarkan dengan  $\alpha = \kappa / (\rho c_p)$ ,  $\kappa$  adalah konduktifitas termal,  $\rho$  adalah densitas masa dan  $c_p$  adalah kalor jenis.  $T(x,y,z;t)$  disini dijelaskan dengan daerah temperatur pada ruang dan waktu. (Sundqvist, 2015)

### 2.3 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (MEH) didasarkan pada gagasan akan membangun sebuah objek yang rumit dengan blok – blok sederhana atau membagi objek yang rumit menjadi bagian – bagian yang kecil. Dalam istilah matematika, MEH melakukan pendekatan sebuah objek dengan bagian kecil berjumlah tertentu yang sederhana dan dengan menambah jumlah bagian itu akan meningkatkan akurasi dari representasi.

MEH dapat diaplikasikan untuk menyelesaikan model matematika dari berbagai permasalahan teknik, dari analisis tegangan struktur atau mesin, hingga respon dinamis dari kendaraan dibawah pembebanan mekanik, termal, atau elektromagnetik.

**Tabel 2.2** Contoh Aplikasi Teknik dari MEH (Chen, 2015)

Bidang Studi	Contoh Aplikasi Teknik
<b>Mekanika struktural</b>	Analisis reliabilitas struktur
	simulasi <i>offshore</i> , kecelakaan,
	analisis integritas komponen reactor nuklir,
	optimisasi desain sudu turbin angin





<b>Perpindahan panas</b>	Permodelan pendinginan elektronik, permodelan pengecoran, analisis perpindahan panas motor bakar
<b>Aliran fluida</b>	Analisa aerodinamika dari desain mobil balap, permodelan pola aliran udara pada bangunan
<b>Elektrostatik/elektromagnetik</b>	Kalkulasi medan pada sensor dan aktuator, prediksi performa desain antena

Untuk melakukan permodelan MEH umumnya mengikuti prosedur sebagai berikut:

- Membagi model geometri menjadi bagian – bagian untuk membuat *mesh* (kumpulan elemen dengan *node*).
- Menjelaskan perilaku *physical quantities* pada setiap elemen.
- Merakit elemen pada *node* untuk membentuk persamaan sistem pendekatan dari keseluruhan model.
- Berikan pembebanan dan *boundary condition* (mis. Untuk mencegah agar model tidak bergerak).
- Selesaikan sistem persamaan yang melibatkan kuantitas yang tidak diketahui (mis. Perpindahan).
- Hitung kuantitas yang diinginkan (mis. Tegangan dan regangan) pada elemen atau *node*.

Dalam perangkat lunak MEH komersial, prosedur diatas biasanya diatur ulang menjadi:

- *Preprocessing* (membuat model MEH, menentukan sifat elemen, memberikan beban dan batasan).
- Pemecah MEH (merakit dan memecahkan sistem persamaan MEH, menghitung hasil elemen).

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



- 
- *Postprocessing* (menyortir dan menampilkan hasil).

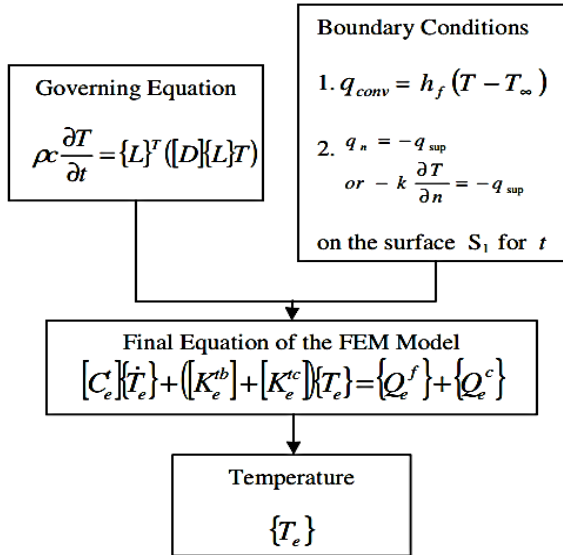
## **2.4 Distribusi Temperatur pada Permodelan Pengelasan**

Perpindahan panas dan distribusi temperatur dari pengelasan laser dianalisa menggunakan metode elemen hingga tiga dimensi. Hasil dari studi literatur menyimpulkan bahwa mekanisme perpindahan panas pada *weld pool* sangatlah rumit. Pengembangan terhadap berbagai macam sifat material logam pada fasa cair sedang dikembangkan. Oleh karena itu model konduksi tiga dimensi dikembangkan untuk menganalisa aliran panas dan distribusi temperatur pada seluruh bagian plat yang ingin disimulasikan.

### **2.4.1 Model Termal**

Diusahakan dalam membuat suatu model termal untuk mengakomodasi kondisi pengelasan yang sama seperti kondisi yang sebenarnya. Asumsi pada pengelasan telah dibuat dalam penelitian yang dilakukan oleh Shanmugam (2012):

- Temperatur awal dari benda kerja adalah 30°C. Koordinat sinar laser maupun *mesh* adalah tetap.
- Sifat termal dari material seperti densitas, panas spesifik, dan konduktivitas nilainya tergantung pada temperatur.
- Pembebanan radiasi dan konveksi diperhitungkan dengan mempertimbangkan koefisien transfer panas yang mengumpul.
- Energi laser yang diserap dianggap sebesar 69,3% dari daya laser.
- Fenomena fisika seperti efek Marangoni, *convective melt flow*, *bouyancy force*, dan *viscous force* diabaikan



**Gambar 2.7** Skema Model Termal pada Analisa Material Tiga Dimensi (Bhadra, 2014)

### 2.4.2 Model Sumber Panas

Interaksi antara sumber panas (dalam penelitian ini berupa laser) dengan weld pool merupakan fenomena fisika yang rumit sehingga sulit untuk dimodelkan. Model berbentuk piringan lebih realistis dibandingkan dengan sumber berupa titik, karena *heat input* disebarkan pada daerah sumber. Tetapi model berbentuk piringan tidak dapat memprediksi kedalaman penetrasi dari FZ akibat laser.

Guna memprediksi distribusi panas yang bersifat volumetrik, maka paling umum menggunakan model distribusi Gaussian *ellipsoid* atau *ellipsoid* ganda.

$$q = \frac{6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{\varphi P}{dr^2} e^{-3\left(\frac{x}{r}\right)^2 - 3\left(\frac{y}{d}\right)^2 - 3\left(\frac{z-v_i t}{r}\right)^2} \quad (2.2)$$

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dimana

$q$  = Kerapatan daya volumetrik ( $W/mm^3$ )

$\varphi$  = Koefisien absorpsi

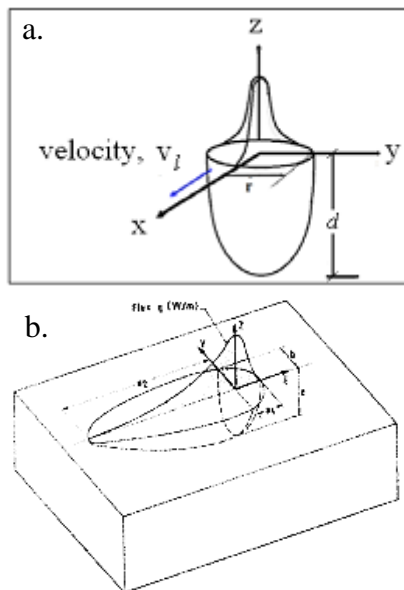
$p$  = Daya laser (W)

$r$  = Jari-jari sinar laser (mm)

$v_l$  = Kecepatan laser (mm/s)

$d$  = Parameter sumber panas yang bergantung pada dispersi titik *focal* (mm)

$t$  = Waktu proses pada saat perhitungan dilakukan (s)



**Gambar 2.8** Geometri Sumber Panas Volumetrik : (a) Bhadra (2014), (b) Goldak (2005)

Pengelasan laser menggunakan intensitas sebagai masukan yang diaplikasikan pada bagian *spot weld* untuk menganalisa geometri dari *fusion zone* apakah berbentuk *keyhole* atau tidak (Torkamany, 2012) :



$$I = \frac{4 \times P}{(\pi d^2)} \quad (2.3)$$

Dimana

$P$  = Daya puncak laser (W)

$I$  = Intensitas ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$d$  = Diameter sinar laser (m)

## 2.5 Pengukuran Lebar Lasan dari Lebar HAZ

Besar *heat input* akan mempengaruhi lebar HAZ yang dapat diketahui secara teoritis dengan menggunakan rumus berikut (Jenny, 2001) :

$$H_{net} = \frac{P}{v} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4.13 \rho C t Y}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o} \quad (2.5)$$

Dimana

$\rho C$  = 0,0044  $\text{J}/\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  (AWS, 2010)

$t$  = Ketebalan benda kerja (mm)

$T_o$  = Temperatur mula-mula dari benda kerja (K)

$T_m$  = Temperatur lebur (K) (khususnya temperatur *liquid* yang akan dilas)

$T_p$  = *Peak temperature* (K) pada jarak (mm) dari *weld centerline*

$Y$  = Jarak garis HAZ dari *weld centerline* (mm)

$H_{net}$  = *Net heat input* per satuan panjang ( $\text{J}/\text{mm}$ )

$P$  = Daya puncak laser (W)

$v$  = *Travel speed* (mm/s)

Dari persamaan tersebut dapat dicari lebar lasan yakni dengan mencari dua titik perbatasan antara HAZ dengan *base metal* (BM) pada dua sisi berseberangan yang tegak lurus dengan

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



*weld centerline*. Dengan begitu didapatkan lebar lasan sebagai jarak antara dua titik perbatasan HAZ-BM yang saling berseberangan.

## 2.6 Hubungan Parameter Pengelasan terhadap Kedalaman Penetrasi

Umumnya dalam pengelasan laser terdapat tiga kelompok parameter, yaitu : parameter sinar laser (diameter, panjang gelombang, dan daya), kapabilitas material (densitas, konduktivitas termal, *specific heat* dan ketebalan), serta parameter dari pengelasan itu sendiri (*travel speed*, arah *shielding gas*, dan absorpsivitas permukaan). Hubungan antara panas dan massa, kemudian hubungan keduanya dengan pengelasan laser, serta kedalaman penetrasi secara umum dirumuskan sebagai (Xin Xue, 2017) :

$$Q = m[c(T_m - T_0) + L_m] \quad (2.6)$$

$$P = \frac{Q}{t} = \rho D h v [c(T_m - T_0) + L_m] \quad (2.7)$$

$$h = \frac{P}{\rho D v [c(T_m - T_0) + L_m]} \quad (2.8)$$

Dimana,

$Q$  = Energi panas (J)

$m$  = Massa (kg)

$c$  = (J/kg.K)

$T_m$  = Temperatur lebur material (K)

$T_0$  = Temperatur awal material (K)

$L_m$  = *Latent heat* peleburan baja ( $2,7 \times 10^5$  J/kg)

$P$  = Daya (W)

$t$  = Waktu (s)

$\rho$  = Densitas material (kg/m<sup>3</sup>)

$D$  = Diameter sinar laser (m)



---

$h$  = Kedalaman penetrasi (m)  
 $v$  = *Travel speed* (m/s)

## 2.7 Material SA-516 Grade 70

SA-516 *grade 70* adalah material baja karbon rendah yang memiliki kekuatan yang baik dan cocok untuk aplikasi temperatur rendah hingga menengah. Material SA-516 *grade 70* juga memiliki *notch toughness* dan *weldability* yang baik. Umumnya material ini digunakan untuk *boiler* dan bejana tekan untuk berbagai jenis industri minyak, gas dan petrokimia yang dalam pembuatannya butuh untuk dilakukan pengelasan. Metode pengelasan yang paling sering digunakan untuk fabrikasi material ini terutama pada fabrikasi bejana tekan yaitu metode *Submerged Arc Welding* (SAW). Tegangan sisa seringkali ditemukan dalam pengelasan material ini terutama ketika menggunakan parameter heat input yang tinggi dan *travel speed* yang rendah sehingga mengurangi sifat mekanik dari SA-516 *grade 70* secara keseluruhan. Maka dari itu sebaiknya pengelasan material SA-516 *grade 70* dilakukan dengan parameter *heat input* cukup rendah dan *travel speed* yang cukup tinggi agar hasil sambungan lasan bisa optimal.

## 2.8 Perubahan Fasa (Peleburan dan Pembekuan)

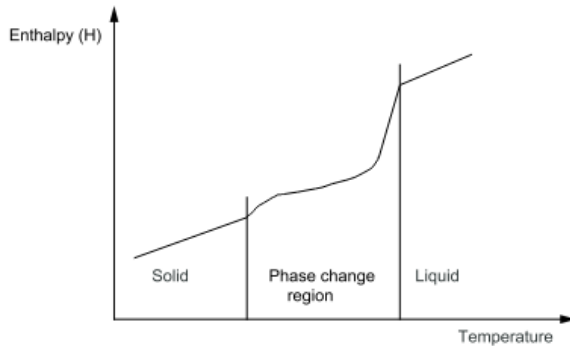
Pada analisis termal menggunakan ANSYS, perubahan fasa juga dapat dianalisis seperti pada proses peleburan dan pembekuan. Beberapa aplikasi untuk analisis perubahan fasa antara lain (ANSYS, 2010) :

- Proses pengecoran logam
- Pembuatan logam paduan
- Perlakuan panas

Untuk dapat menganalisis perubahan fasa, analisis *transient thermal* nonlinier harus dilakukan. Pada analisis nonlinier pengaruh *latent heat* dapat diperhitungkan. Untuk memperhitungkan *latent heat*, entalpi material berdasarkan fungsi temperatur harus didefinisikan seperti pada **Gambar 2.9**.

---

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



**Gambar 2.9** Entalpi terhadap Fungsi Temperatur (ANSYS, 2010)

Entalpi berhubungan erat dengan densitas, specific heat, dan temperatur menurut rumusan berikut (ANSYS, 2010) :

$$H = \int \rho c dT \quad (2.9)$$

Kemudian untuk menghitung nilai entalpi untuk dimasukan sebagai sifat material digunakan rumus – rumus berikut (ANSYS, 2010) :

$$C_{avg} = (C_S + C_L) / 2 \quad (2.10)$$

$$C^* = C_{avg} + \left( L / (T_L - T_S) \right) \quad (2.11)$$

$$H_- = \rho C (T - T_0) \quad (2.12)$$

$$H_S = \rho C_S (T_S - T_0) \quad (2.13)$$

$$H_{TR} = H_S + \rho C_{avg} (T_L - T_S) \quad (2.14)$$

$$H_L = H_S + \rho C^* (T_L - T_S) \quad (2.15)$$





$$H_+ = H_L + \rho C_L (T - T_L) \quad (2.16)$$

Dimana,

$C_{avg}$  = *Specific heat* rata – rata (J/kg.K)

$C_S$  = *Specific heat* untuk keadaan padat (J/kg.K)

$C_L$  = *Specific heat* untuk keadaan cair (J/kg.K)

$C^*$  = *Specific heat* pada temperatur transisi padat/cair (J/kg.K)

$L$  = *Latent heat* peleburan baja ( $2,7 \times 10^5$  J/kg)

$T_L$  = Temperatur *liquidus* (K)

$T_S$  = Temperatur *solidus* (K)

$H$  = Entalpi pada dibawah temperatur *solidus* (J/m<sup>3</sup>)

$\rho$  = Densitas (kg/m<sup>3</sup>)

$T$  = Temperatur acuan (K)

$T_0$  = Temperatur beku air (273 K)

$H_S$  = Entalpi pada temperatur *solidus* (J/m<sup>3</sup>)

$H_{TR}$  = Entalpi pada temperatur transisi padat/cair (J/m<sup>3</sup>)

$H_L$  = Entalpi pada temperatur *liquidus* (J/m<sup>3</sup>)

$H_+$  = Entalpi pada temperatur diatas temperatur *liquidus* (J/m<sup>3</sup>)

## 2.9 Response Surface Methodology (RSM)

*Response Surface Methodology* (RSM) merupakan kumpulan dari teknik statistika dan matematis yang berguna untuk mengembangkan dan mengoptimisasi berbagai proses. RSM paling banyak diaplikasikan pada dunia industri, terutama pada keadaan dimana beberapa variabel masukan berpotensi mempengaruhi kinerja atau kualitas dari produk atau proses. Pengukuran kinerja atau kualitas ini disebut sebagai respon. Umumnya aplikasi RSM melibatkan lebih dari satu respon. (Myers, 2016)

Salah satu contoh perangkat lunak untuk melakukan optimisasi dengan metode RSM adalah perangkat lunak Minitab18. Dengan perangkat lunak tersebut hubungan antara respon dengan variabel masukan dapat dilihat dengan membuat grafik *contour plot* dan atau *surface plot*. Selain itu terdapat juga

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA



---

fitur *response optimizer* untuk melakukan optimisasi guna mendapatkan variabel masukan dengan nilai yang tepat agar mendapatkan hasil yang sesuai dengan keinginan (maksimum atau minimum).



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

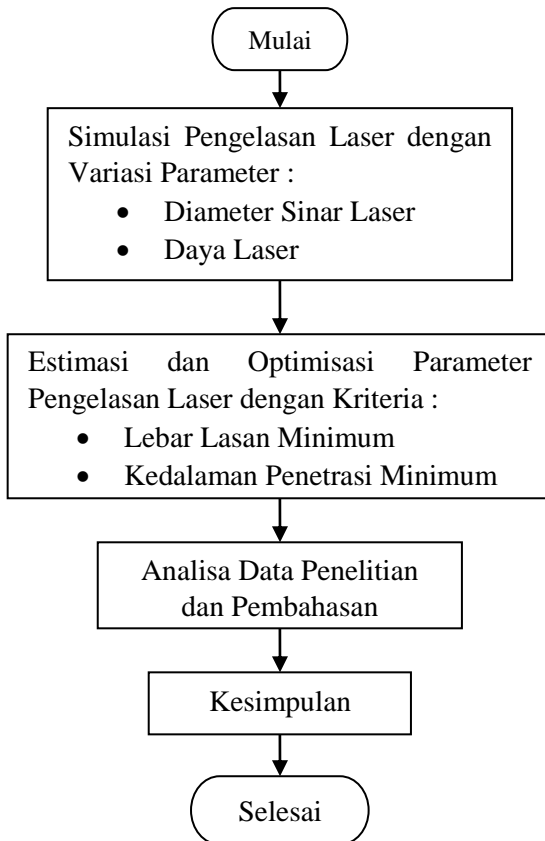
---

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Metode Penelitian**

Dalam penelitian terdapat beberapa langkah kegiatan yang dilakukan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Di bawah ini adalah diagram alir penelitian yang akan dilakukan:



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian



### 3.2 Spesifikasi Material dan Parameter *Laser Welding*

Dalam penelitian material yang diteliti adalah baja SA-516 *grade* 70. Material memiliki komposisi dan sifat yang dijadikan acuan dalam membuat geometri percobaan. Parameter yang digunakan dalam percobaan adalah diameter sinar laser dan daya laser. Kemudian yang dilihat hasilnya adalah lebar lasan, laju solidifikasi, dan kedalaman penetrasi dari baja SA-516 *grade* 70.

#### 3.2.1 Material Pengelasan

Pada penelitian ini, material yang digunakan dalam proses pengelasan adalah baja SA-516 *grade* 70. Standar spesifikasi komposisi kimia pada dan sifat mekanik baja SA-516 *grade* 70 didapatkan dari ASME SA-516 (2003). Kemudian untuk data komposisi kimia dan sifat mekanik yang digunakan dalam simulasi didapatkan dari Oyyaravelu (2016). Sedangkan data sifat termofisik didapatkan dari perangkat lunak JMAAtPro (2014).

**Tabel 3.1** Standar Komposisi Kimia Material Baja SA-516 *Grade* 70 untuk Plat Dibawah 12,5 mm (ASME SA-516, 2003)

Unsur	Komposisi (%)
C	$\leq 0,27$
Mn	0,79 – 1,30
P	$\leq 0,035$
S	$\leq 0,035$
Si	0,13 – 0,45



**Tabel 3.2** Standar Uji Tarik Baja SA-516 *Grade 70* (ASME SA-516, 2003)

<b>Sifat Mekanik</b>	<b>Nominal</b>
Kekuatan tarik, ksi (MPa)	70 – 90 (485 – 620)
Kekuatan luluh, min, ksi (MPa)	38 (260)
Elongasi pada 8 in. (200 mm), min, %	17
Elongasi pada 2 in. (50 mm), min, %	21

**Tabel 3.3** Komposisi Kimia Baja SA-516 *Grade 70* yang Digunakan dalam Simulasi (Oyyaravelu, 2017)

<b>Unsur</b>	<b>Komposisi (%)</b>
C	0.222
Si	0.32
Mn	1.12
P	0.013
S	0.007
Mo	0.006
Cr	0.048
V	0.005
Ni	0.012
Cu	0.018
Nb	0.014
Ti	0.002
B	0.001
N	0.006

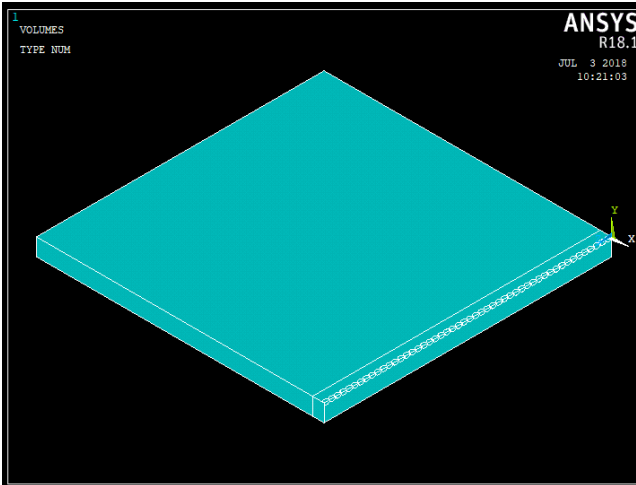


**Tabel 3.4** Sifat Mekanik *Base Metal* Baja SA-516 Grade 70  
(Oyyaravelu, 2017)

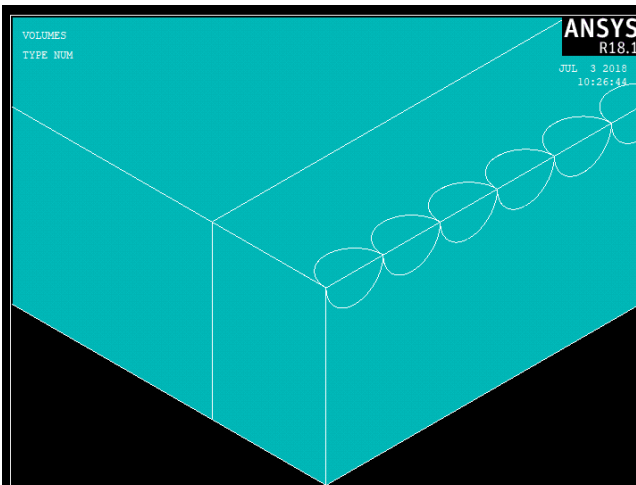
Sifat Mekanik	Nominal
Kekuatan Luluh, MPa	341
UTS, Mpa	563
% Elongasi	30
Energi impak, J	5,5
Kekerasan, HV	200

### 3.2.3 Geometri Spesimen

Geometri yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah plat baja SA-516 *grade* 70 dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 3 mm. Plat ini terbagi menjadi dua buah masing – masing dengan dimensi 50 mm x 45 mm x 3 mm dan 50 mm x 5 mm x 3 mm yang ditempelkan dengan fitur *glue*. Plat yang lebih kecil berfungsi mengakomodasi *meshing* yang lebih halus pada daerah yang dekat dengan titik – titik las (yang akan mengalami pemanasan) sehingga plat yang lebih besar bisa di-*meshing* dengan lebih kasar yang mengakibatkan jumlah *element* bisa dibatasi tanpa terlalu banyak mengorbankan akurasi dari hasil simulasi. Geometri yang dibuat sebanyak tiga jenis dengan bentuk input las berupa setengah bola (sebagai representasi sinar laser yang dipaparkan ke permukaan material) sebanyak 50 buah dengan variasi diameter sebesar 1; 0,9; 0,8 mm masing – masing sepanjang *weld centerline*. Kemudian dilakukan *overlap* pada seluruh volume yang telah dibuat.

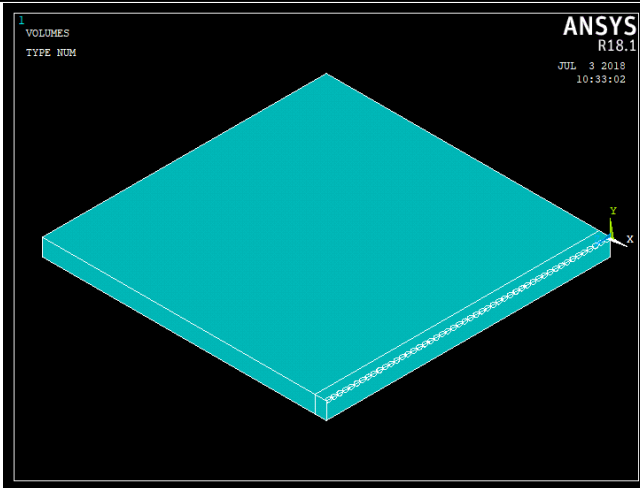


**Gambar 3.2** Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 1 mm (*Isometric dan Fit View*)

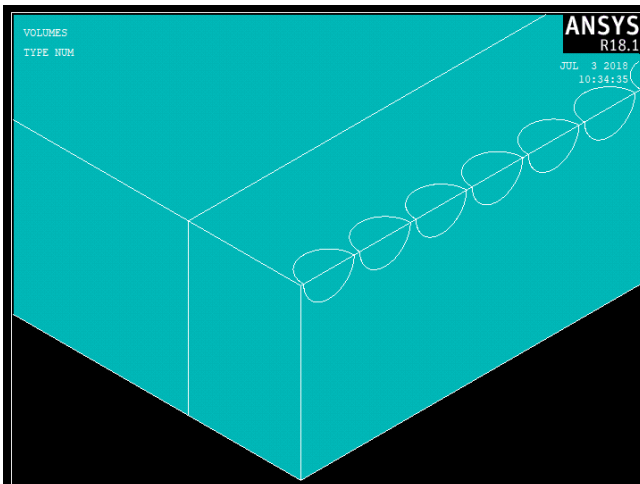


**Gambar 3.3** Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 1 mm Dilihat Lebih Dekat (*Isometric View*)

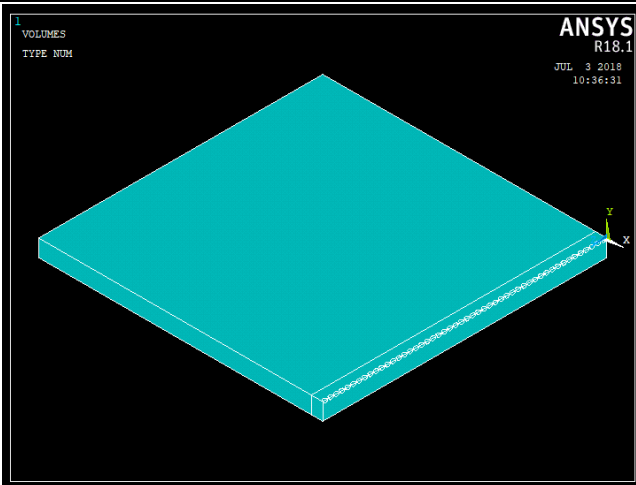




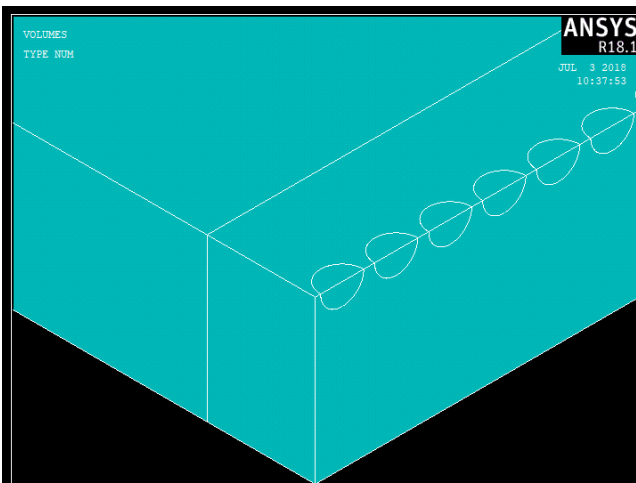
**Gambar 3.4** Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm (*Isometric dan Fit View*)



**Gambar 3.5** Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm Dilihat Lebih Dekat (*Isometric View*)



**Gambar 3.6** Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm (*Isometric dan Fit View*)



**Gambar 3.7** Geometri Material Permodelan dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm Dilihat Lebih Dekat (*Isometric View*)



### 3.2.3 Parameter *Laser Welding*

Adapun parameter yang dipakai dalam penelitian kali ini dibagi menjadi dua parameter yaitu daya laser dan diameter sinar laser disajikan pada **Tabel 3.5**.

**Tabel 3.5** Parameter *Laser Welding* pada Setiap Kasus

Kasus	Diameter Sinar Laser ( $\times 10^{-3}$ m)	Daya Laser (W)	Heat Flux ( $\times 10^9$ W/m <sup>2</sup> )
1	1	1750	2,229
2	1	2000	2,547
3	1	2250	2,866
4	0,9	1750	2,752
5	0,9	2000	3,145
6	0,9	2250	3,538
7	0,8	1750	3,483
8	0,8	2000	3,981
9	0,8	2250	4,478

Catatan :

- Mode laser yang digunakan diasumsikan berupa *pulse wave* (PW)
- Proses pengelasan dilakukan pada temperatur lingkungan 300 K dan tekanan 1 atm.
- Parameter pengelasan yang diasumsikan konstan yaitu :
  - *Welding Speed* = 50 mm/s
  - Waktu proses pengelasan = 1 s
  - *Laser pulse duration* = 10 ms
  - *Laser repetition rate* = 50 Hz

### 3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa:

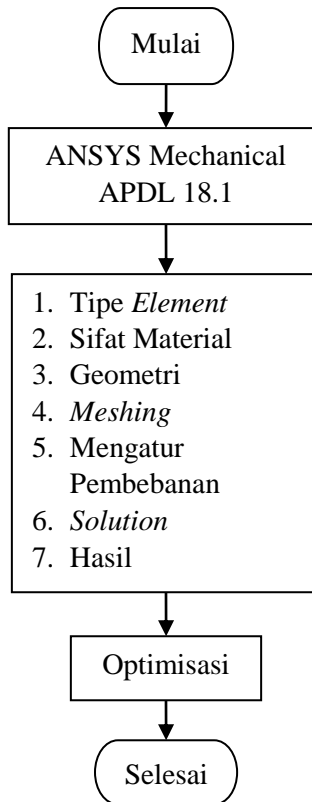
## BAB III METODOLOGI



1. ANSYS Mechanical APDL 18.1 merupakan salah satu perangkat lunak yang mampu menyelesaikan persoalan elemen hingga dari permodelan dengan keakuratan yang cukup tinggi. Dalam penelitian ini, ANSYS digunakan untuk membuat permodelan spesimen dan memodelkan simulasi *laser welding*. ANSYS digunakan untuk mengetahui lebar lasan, kekerasan daerah HAZ, dan tegangan sisa.
2. JMatPro v7 merupakan perangkat lunak yang dikembangkan untuk menghitung sifat dari logam paduan. JMatPro sendiri bukan merupakan basis data dari sifat material yang telah dihitung sebelumnya tetapi memperhitungkan model material secara fisika yang telah tervalidasi hasilnya.
3. Minitab18 adalah program komputer yang dirancang untuk melakukan pengolahan statistik. Minitab mengkombinasikan kemudahan penggunaan layaknya Microsoft Excel dengan kemampuannya melakukan analisa statistik yang kompleks. Minitab melakukan analisa terhadap hasil simulasi ANSYS untuk mendapatkan nilai optimal sesuai parameter yang telah ditentukan.

### **3.4 Alur Permodelan dengan Perangkat Lunak**

Adapun diagram alir permodelan *laser welding* SA-516 *grade 70* dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL 18.1 dapat dilihat pada **Gambar 3.5**.



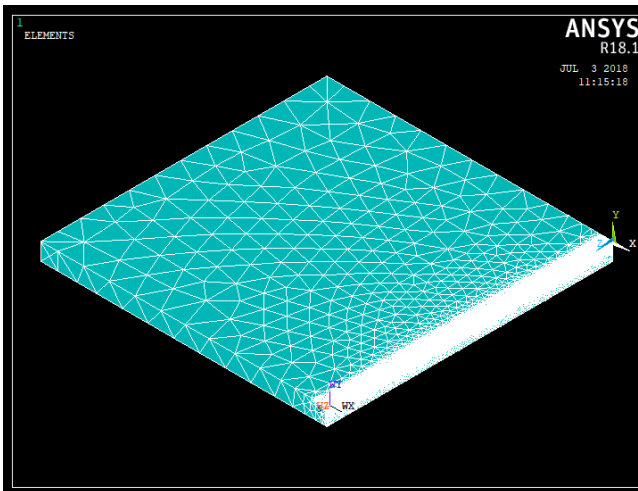
**Gambar 3.8** Diagram Alir Permodelan *Laser Welding*

### 3.4.1 *Meshing*

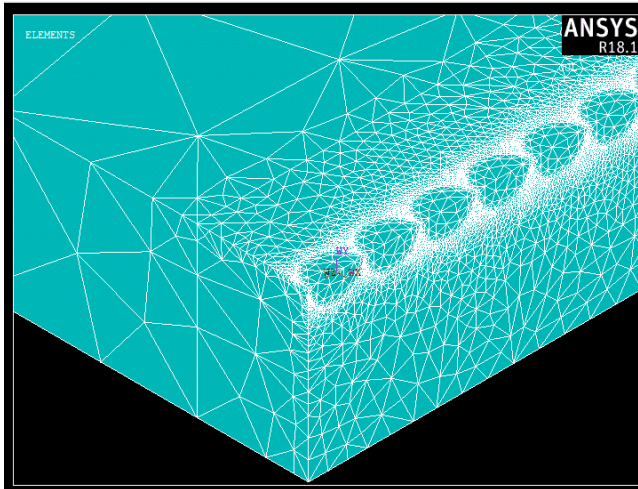
*Element* pada proses *meshing* yang digunakan adalah *element* SOLID70. *Meshing* dilakukan menggunakan fitur *smart size* pada menu *mesh tool* perangkat lunak ANSYS Mechanical APDL 18.1. Ketiga geometri spesimen dengan diameter laser 1 mm, 0,9 mm, dan 0,8 mm keseluruhan dari geometrinya dibuatkan *meshing* dengan *smart size* ukuran 4 (*medium-fine*), dengan menonaktifkan fitur *small angle coarsening*. Kemudian



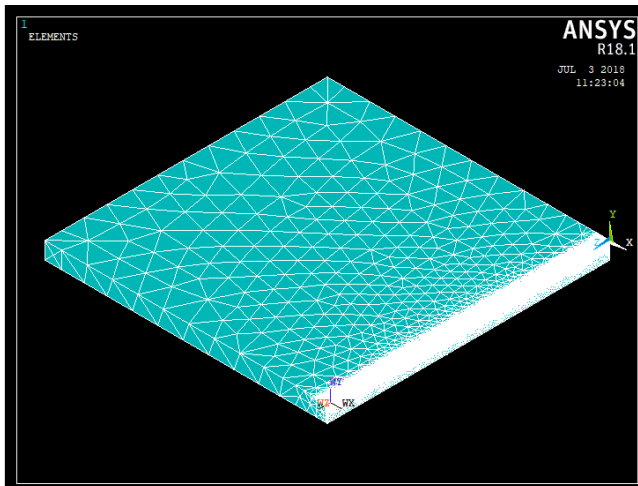
dilakukan *refine at elements* pada area A310 dan A311 untuk geometri dengan diameter sinar laser 1 mm; kemudian pada area A162 dan A163 untuk geometri dengan diameter sinar laser 0,9 dan 0,8 mm. *Refine at elements* digunakan untuk menghaluskan *element* pada daerah disekitar titik – titik las sehingga masing – masing menghasilkan elemen berjumlah 181008, 162612, dan 180104.



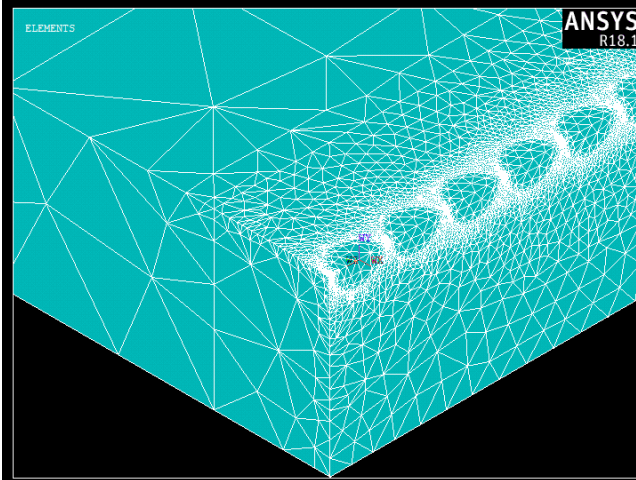
**Gambar 3.9** Hasil *Meshing* pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 1 mm (*Isometric dan Fit View*)



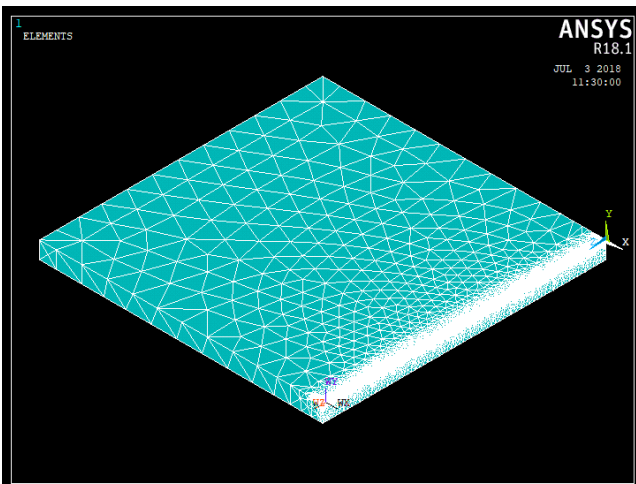
**Gambar 3.10** Hasil *Meshing* pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 1 mm Dilihat Lebih Dekat (*Isometric View*)



**Gambar 3.11** Hasil *Meshing* pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm (*Isometric dan Fit View*)

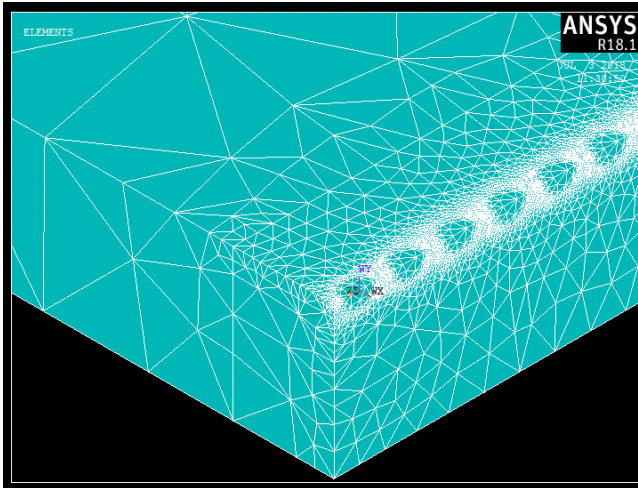


**Gambar 3.12** Hasil *Meshing* pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm Dilihat Lebih Dekat (*Isometric View*)



**Gambar 3.13** Hasil *Meshing* pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm (*Isometric dan Fit View*)

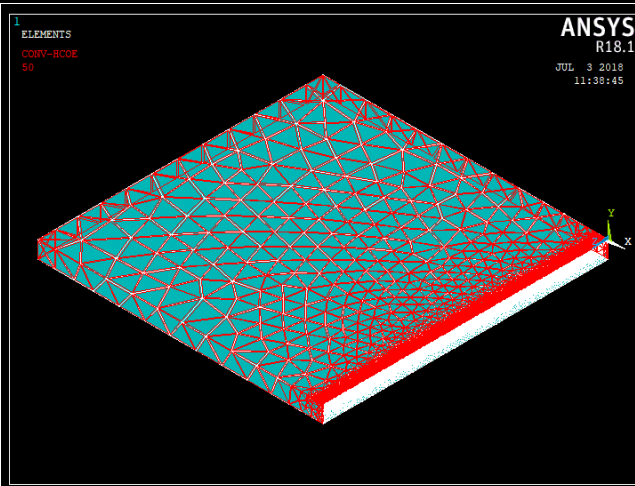




**Gambar 3.14** Hasil *Meshing* pada Spesimen dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm Dilihat Lebih Dekat (*Isometric View*)

### 3.4.2 Pengaturan *Boundary Condition*

Pada simulasi termal, masukan yang digunakan adalah *heat flux* yang dihitung dari daya laser yang diaplikasikan pada setiap titik las serta *travel speed* yang konstan. Sebagai *boundary condition*, awal analisa material diberikan temperatur *uniform* sebesar 300 K pada seluruh bagian material dan perambatan konveksi sebesar  $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pada seluruh luasan kecuali daerah *cross section weld metal*. Selanjutnya, pada bagian bawah material diberikan *heat flow* senilai 0 W karena pada bagian bawah tidak terkena hembusan udara bebas. **Gambar 3.15** menunjukkan material yang sudah diberikan *boundary condition*.



**Gambar 3.15** Material dengan *Boundary Condition* yang Sudah Diatur

### 3.4.3 Perhitungan Pembebanan Termal

Pembebanan termal pada ANSYS Mechanical APDL diaplikasikan pada setiap titik las pada dimensi pengelasan (sebanyak 50 titik yang berada pada koordinat yang berbeda). Titik-titik ini berbentuk setengah bola sebagai pengganti titik laser yang memiliki diameter 0,8 mm; 0,9 mm; dan 1 mm. Diameter ini sesuai dengan kemampuan fokus dari beberapa alat pengelasan laser di lapangan. Masing – masing titik las memiliki luas permukaan sebesar  $5,024 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ;  $6,3585 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ; dan  $7,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ .

*Heat flux* pengelasan dihitung menggunakan persamaan (2.3) dimana P adalah daya laser (W) dan d adalah diameter dari sinar laser (m) sehingga didapatkan heat flux sesuai dengan **Tabel 3.5**. Nilai *heat flux* pada tabel tersebut dianggap memiliki efisiensi 100 %. Pada keadaan yang sebenarnya, *heat flux* dipengaruhi oleh efisiensi absorpsi yang bergantung pada reflektivitas dari permukaan material yang dilas. Pada alat pengelasan sinar laser, daya yang dikeluarkan oleh sinar laser



besarnya tidak sama dengan daya yang digunakan untuk membangkitkan laser. Hal ini dikarenakan pembangkitan sinar laser merupakan proses yang tidak efisien sehingga dibutuhkan daya 10 kali lipat lebih besar untuk menghasilkan sinar laser dengan daya keluaran tertentu.

Pembebanan analisa termal dilakukan secara *transient* yaitu dengan mempertimbangkan variabel waktu pada 50 titik berbeda sepanjang material simulasi sehingga akan dihasilkan keluaran distribusi temperatur yang berbeda pada waktu yang berbeda untuk setiap titik yang ada. Waktu dari setiap titik pengelasan akan berbeda sesuai dengan koordinatnya terhadap sumbu geometri pengelasan. Titik pada koordinat nol permukaan geometri las memiliki waktu pembebanan *heat flux* sebesar  $t_1 = t_L$  dimana  $t_L$  merupakan lama waktu penembakan dari laser (dalam satuan s). Titik pengelasan kedua yang berada pada koordinat yang berbeda dapat dihitung dengan rumus  $t_2 = \frac{d_1}{v} + t_1 + t_L$  dimana  $d_1$  merupakan jarak antara titik kedua dengan titik pertama (dalam satuan m) dan  $v$  adalah *travel speed* pengelasan (dalam satuan m/s). Titik pengelasan ketiga yang berada pada koordinat yang berbeda dapat dihitung dengan rumus  $t_3 = \frac{d_2}{v} + t_2 + t_L$  dimana  $d_2$  merupakan jarak titik ketiga dengan titik kedua (dalam satuan m). Waktu pembebanan termal pada titik keempat dan seterusnya akan memiliki cara perhitungan yang sama dengan perhitungan titik ketiga terhadap titik kedua. Sehingga akan didapatkan waktu pembebanan termal total sesuai dengan *travel speed* yang ditetapkan. Waktu pembebanan termal sangatlah penting karena akan mempengaruhi hasil distribusi temperatur dari simulasi.

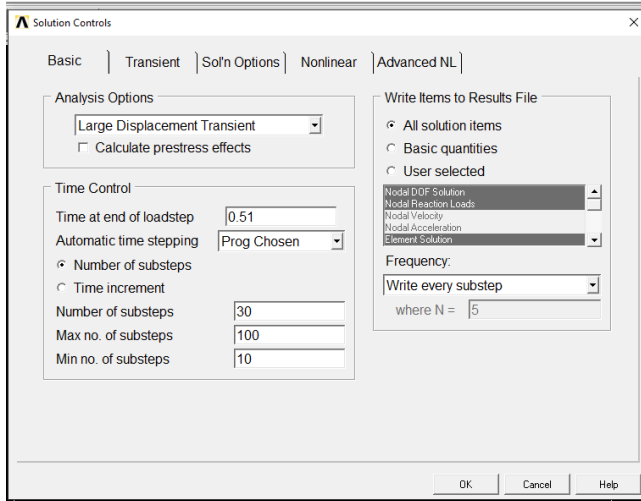
Pada setiap titik pengelasan diberikan pembebanan dengan dua waktu yang berbeda. Waktu yang pertama adalah waktu pemanasan logam dimana terdapat pembebanan *heat flux* yang sesuai dengan **Tabel 3.5**, dan waktu kedua adalah waktu pada *load step* selanjutnya yang mana hanya terdapat konveksi saja



tanpa adanya pembebanan *heat flux*. Hal ini bertujuan untuk mensimulasikan perpindahan dari sinar laser serta pendinginan dari logam agar didapatkan daerah peleburan logam yang sesuai dengan keadaan pengelasan sebenarnya. Pembebanan dengan dua waktu yang berbeda ini dilakukan pada semua titik las. Titik las pertama akan mendapatkan pembebanan *heat flux* pada *load step* pertama selain *load step* pertama maka hanya pembebanan konveksi yang diberikan. Titik las kedua akan mendapatkan pembebanan *heat flux* hanya pada *load step* ketiga, selain pada *load step* ketiga maka hanya pembebanan konveksi yang diberikan, dan seperti itu seterusnya hingga *load step* terakhir.

Setiap *load step* akan dibuatkan *load step file* yang mana berisi pembebanan yang telah diberikan pada setiap titik pengelasan pada ANSYS Mechanical APDL *Transient Thermal*. ANSYS kemudian akan menghitung semua *step* yang telah dibuatkan *load step file* ketika perintah *solve* diberikan. Karena tidak semua *load step file* berisi pembebanan *heat flux*, maka pembebanan *heat flux* tidak akan dihitung selain pada titik las dan waktu yang telah ditentukan.

Kemudian pengaturan menu *solution control* yang digunakan antara lain menggunakan opsi *large displacement transient*, mengatur *time at end of load step* sesuai dengan koordinat titik las yang diberikan beban, kemudian mengatur *number of substeps* menjadi 30 dengan *max no. of substeps* 100 dan *min no. of substeps* 10, serta frekuensi penulisan item ke *results file* diatur menjadi *write every substep*. Selain itu pembebanan berupa *stepped loading* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.16**.



**Gambar 3.16** Contoh Pengaturan Menu *Solution Controls*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian (Permodelan)

#### 4.1.1 Lebar Lasan

Hasil analisa simulasi *transient thermal* dari pengelasan laser ini berupa persebaran temperatur yang menggambarkan daerah pada material mengalami pemanasan. Persebaran temperatur pada hasil pengelasan berupa rentang temperatur maksimum dan minimum yang dicapai dari simulasi yang telah dilakukan. Temperatur maksimum dan minimum ini merupakan hasil dari pembebanan *heat flux* dari proses pengelasan pada setiap titik las yang ditentukan. Persebaran temperatur maksimum dan minimum pada saat pembebanan *heat flux* yang diberikan pada setiap titik las ditunjukkan pada **Gambar 4.1 – 4.9**. Temperatur tertinggi dari simulasi pengelasan didapatkan pada *weld pool* kemudian semakin jauh dari *weld pool* maka temperatur semakin turun seperti yang didapatkan pada daerah HAZ dan temperatur yang paling rendah didapatkan pada logam induk.

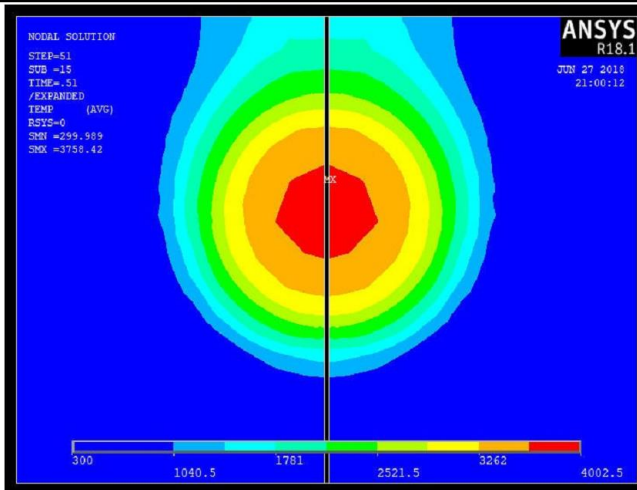
**Gambar 4.1 – 4.9** didapatkan dengan cara membaca hasil pada *load step 51, substep last* pada setiap kasus pengelasan (ketika *heat flux* diberikan pada titik las yang berada ditengah – tengah plat yang dilihat dari atas (*top view*), kemudian menekan tombol fitur *zoom in* sebanyak 12 kali dan tombol fitur *pan model up* sebanyak dua kali. Pada **Gambar 4.2 – 4.9** terdapat daerah yang berwarna abu – abu yang menandakan temperatur yang lebih tinggi dari 4002,5 K, dikarenakan skala maksimum yang digunakan adalah temperatur tersebut agar didapatkan kontur yang salah satu perbatasan warnanya memiliki temperatur tepat 1781 K (temperatur lebur dari material SA-516 *Grade 70*) untuk pengukuran lebar lasan.

Kontur temperatur pada **Gambar 4.1 – 4.9** hanya menyatakan daerah dengan rentang temperatur seperti pada legenda yang tertera pada gambar, tetapi tidak menunjukkan lebar lasan secara langsung. Kemudian, gambar yang berbeda walaupun

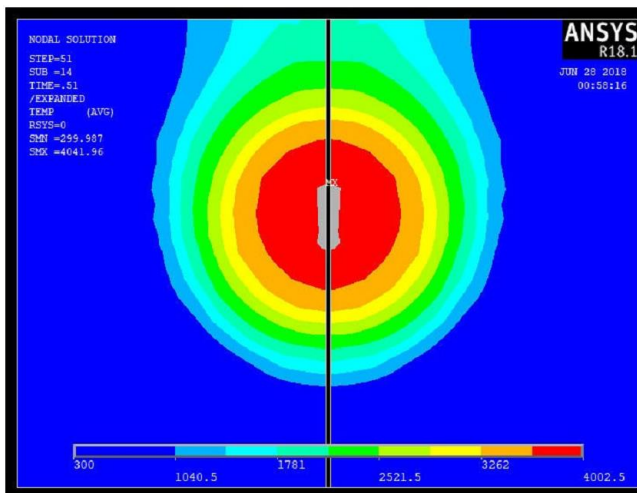


menunjukkan rentang temperatur yang sama tetapi gambar – gambar tersebut memiliki luasan daerah yang berbeda – beda. Sehingga lebar lasannya pun berbeda – beda. Pengukuran lebar lasan dilakukan dengan cara mencetak **Gambar 4.1 – 4.9** dengan perbesaran yang sama kemudian mengukur lebar lasan secara manual dengan mistar. Lebar lasan diukur dari kontur daerah yang menunjukkan temperatur 1781 K (temperatur lebur dari material SA-516 *Grade 70*) mulai dari plat sebelah kiri hingga *weld centerline*, kemudian dikalikan dua agar mendapatkan lebar lasan seperti dua plat yang disambung menjadi satu. Kemudian membandingkannya dengan lebar diameter sinar laser pada geometri benda kerja (sebagai acuan skala perbesaran) yang juga dicetak dengan perbesaran yang sama.

Hasil dari simulasi pengelasan laser dituliskan pada **Tabel 4.1** dan **4.2** yang dilakukan sebanyak sembilan kali simulasi. Simulasi dilakukan dengan tiga diameter laser berbeda yang masing – masing divariasikan dengan tiga daya laser yang berbeda. Simulasi dengan diameter laser dan daya laser yang berbeda menghasilkan dimensi lebar lasan yang berbeda – beda. Semakin kecil diameter sinar laser dan semakin besar daya laser maka kerapatan daya semakin besar sehingga temperatur maksimum dari benda kerja yang dipanaskan semakin tinggi. Dari sembilan simulasi yang dilakukan dihasilkan rata – rata lebar lasan senilai 1,3507 mm, rata – rata temperatur minimum senilai 300 K, dan rata – rata temperatur maksimum senilai 4409,051 K. Masing – masing temperatur didapatkan dari hasil pada *load step 51, substep last* pada setiap kasus pengelasan.

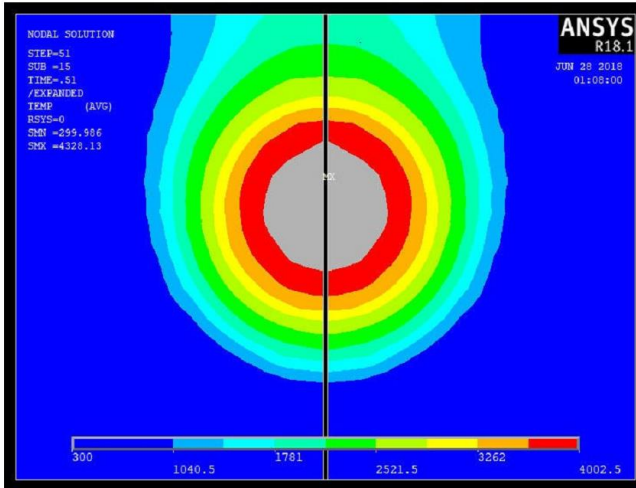


**Gambar 4.1** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 1750 W (*Top View*)

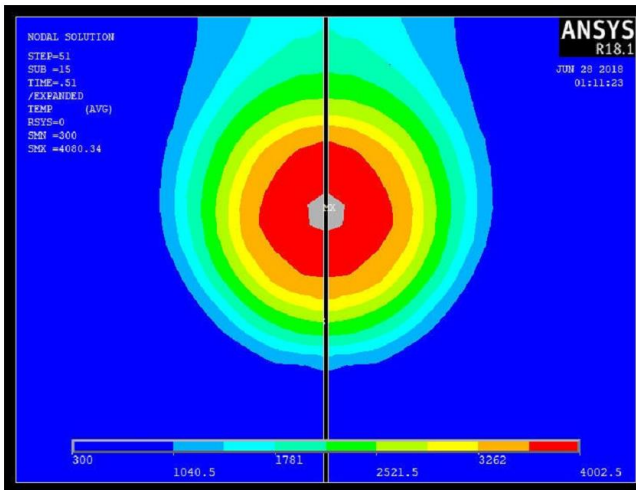


**Gambar 4.2** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2000 W (*Top View*)

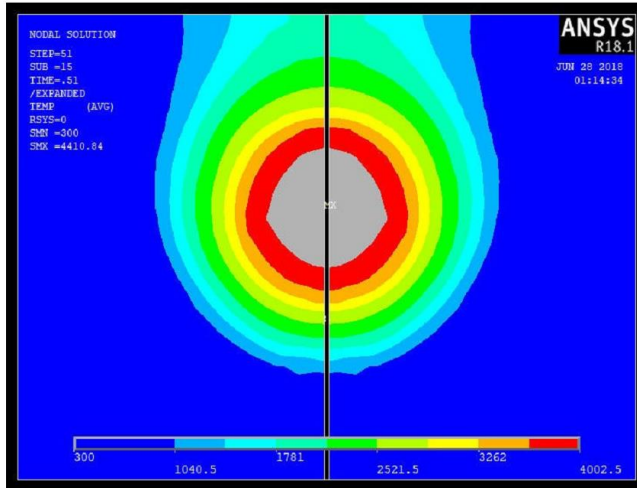




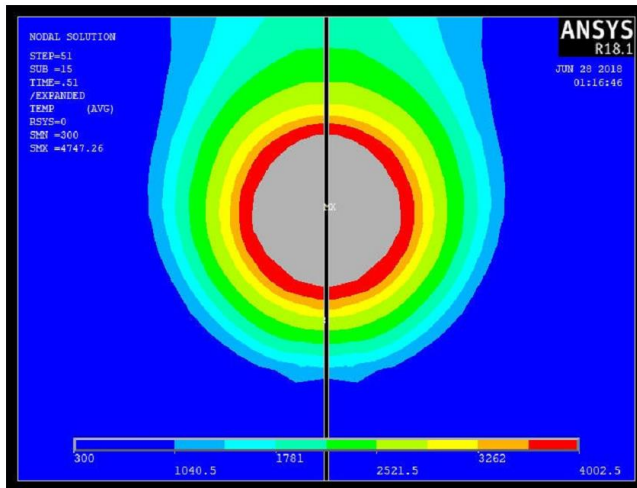
**Gambar 4.3** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2250 W (*Top View*)



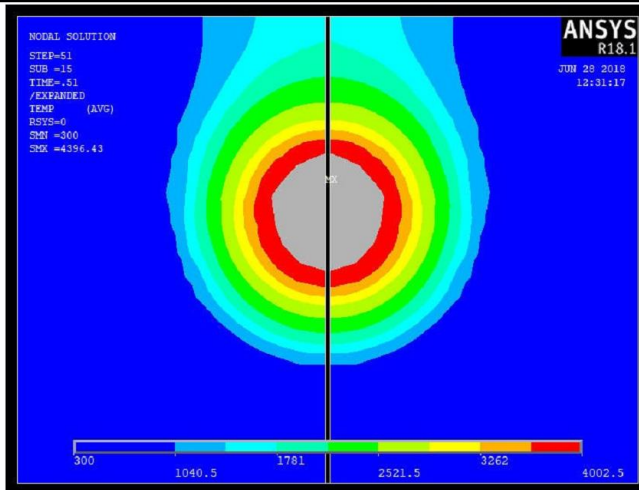
**Gambar 4.4** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 1750 W (*Top View*)



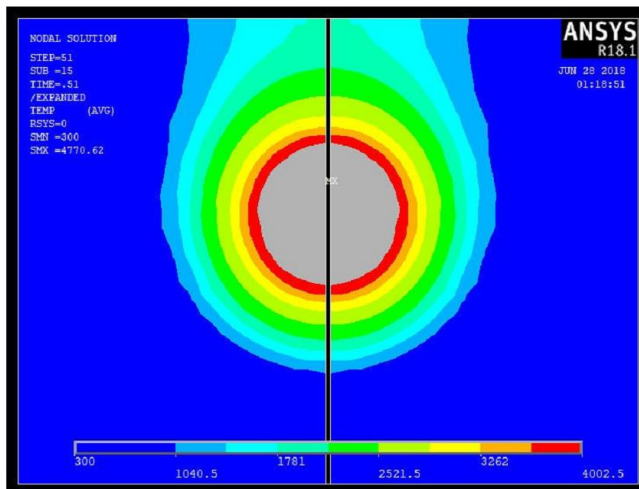
**Gambar 4.5** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2000 W (*Top View*)



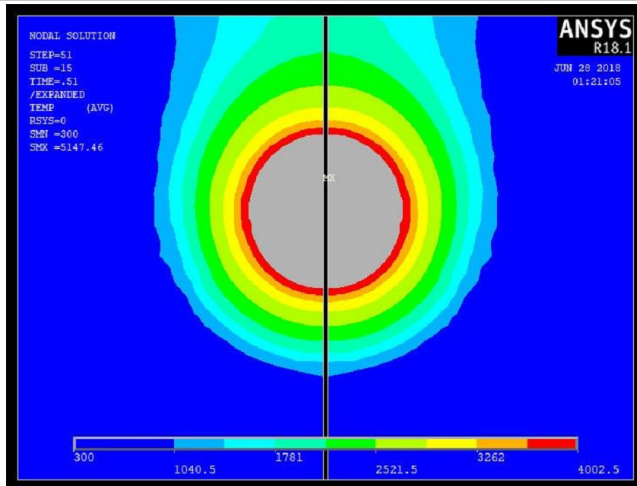
**Gambar 4.6** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2250 W (*Top View*)



**Gambar 4.7** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 1750 W (*Top View*)



**Gambar 4.8** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2000 W (*Top View*)



**Gambar 4.9** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2250 W (*Top View*)

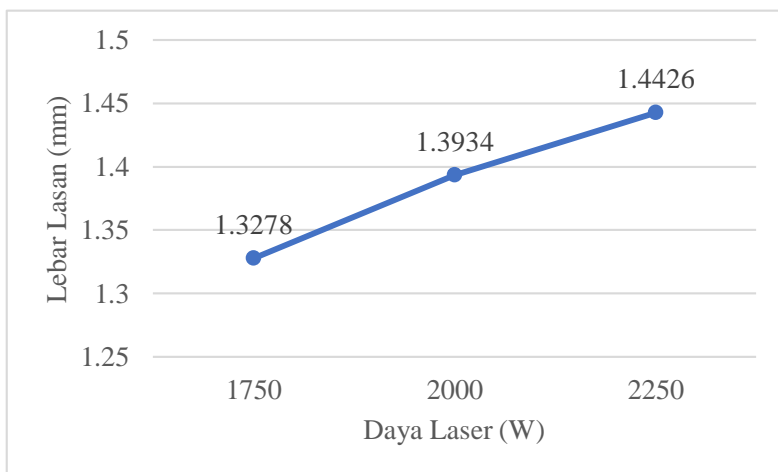
**Tabel 4.1** Temperatur Minimum dan Maksimum Menurut Parameter Pengelasan

No. Kasus	Diameter Sinar Laser (mm)	Daya Laser (W)	T <sub>Min</sub> (K)	T <sub>Max</sub> (K)
1		1750	300	3758,42
2	1	2000	300	4041,96
3		2250	300	4328,13
4		1750	300	4080,34
5	0,9	2000	300	4410,84
6		2250	300	4747,26
7		1750	300	4396,43
8	0,8	2000	300	4770,62
9		2250	300	5147,46

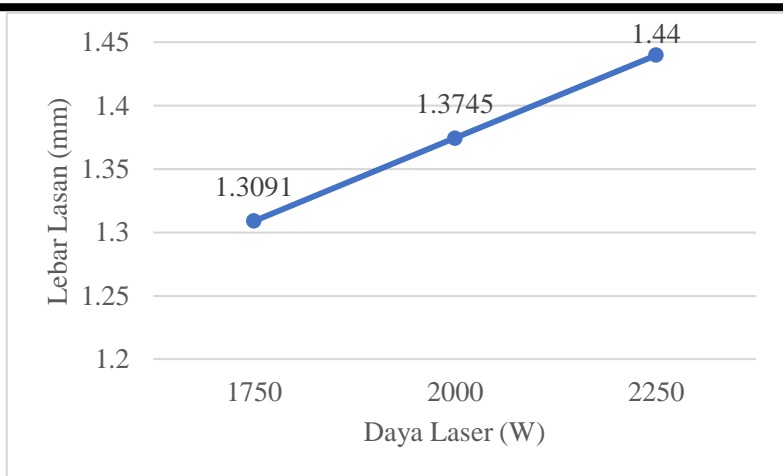


**Tabel 4.2** Lebar Lasan Menurut Parameter Pengelasan

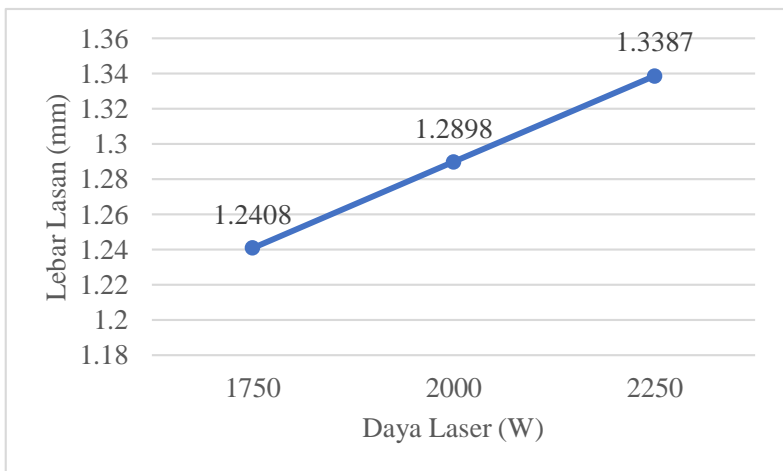
No. Kasus	Diameter Sinar Laser (mm)	Daya Laser (W)	Lebar Lasan (mm)
1		1750	1,3278
2	1	2000	1,3934
3		2250	1,4426
4		1750	1,3091
5	0,9	2000	1,3745
6		2250	1,44
7		1750	1,2408
8	0,8	2000	1,2898
9		2250	1,3387



**Gambar 4.10** Lebar Lasan dengan Diameter Laser 1 mm



**Gambar 4.11** Lebar Lasan dengan Diameter Laser 0,9 mm



**Gambar 4.12** Lebar Lasan dengan Diameter Laser 0,8 mm

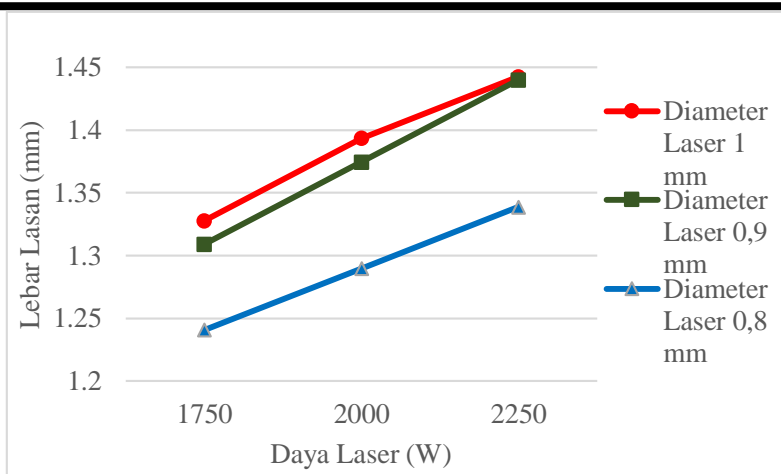
Hasil lebar lasan pada diameter laser 1 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.10**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan lebar lasan senilai 1,3278 mm, kemudian pada variasi daya laser 2000 W didapatkan



lebar lasan senilai 1,3934 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2250 W didapatkan lebar lasan senilai 1,4426 mm. Lebar lasan dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 1 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 1 mm dimensi lebar lasan berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

Hasil lebar lasan pada diameter laser 0,9 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.11**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan lebar lasan senilai 1,3091 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2000 W didapatkan lebar lasan senilai 1,3745 mm, kemudian pada variasi daya laser 2250 W didapatkan lebar lasan senilai 1,44 mm. Lebar lasan dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 0,9 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.4, 4.5, dan 4.6**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 0,9 mm dimensi lebar lasan berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

Hasil lebar lasan pada diameter laser 0,8 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.12**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan lebar lasan senilai 1,2408 mm, kemudian pada variasi daya laser 2000 W didapatkan lebar lasan senilai 1,2898 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2250 W didapatkan lebar lasan senilai 1,3387 mm. Lebar lasan dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 0,8 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.7, 4.8, dan 4.9**. Dari hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 0,8 mm dimensi lebar lasan berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.



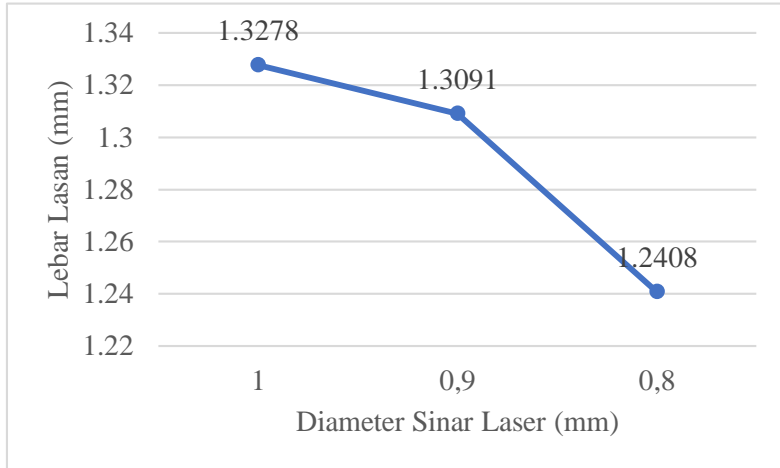
**Gambar 4.13** Lebar Lasan Pengelasan Laser Berdasarkan Diameter Sinar Laser

Pada **Gambar 4.13** dapat dilihat bahwa pengelasan laser dengan diameter sinar laser 1; 0,9; dan 0,8 mm menunjukkan kalau lebar lasan naik seiring dengan kenaikan daya laser yang digunakan. Semakin besar daya laser maka semakin besar *heat flux* yang diterima oleh titik – titik las laser, sehingga semakin lebar pula persebaran temperatur yang diterima oleh logam induk. Hasil penelitian ini sesuai dengan apa yang Ahn (2018) lakukan dalam penelitiannya, bahwa semakin besar kerapatan daya yang digunakan dalam pengelasan maka lebar lasan semakin lebar. Daya laser yang semakin besar menghasilkan energi yang juga semakin besar sehingga semakin banyak material yang terpanaskan yang selanjutnya memperbesar lebar lasan. Dikarenakan kerapatan daya yang berbanding lurus dengan daya laser dan berbanding terbalik dengan diameter maka semakin kecil diameter dari sinar laser maka kerapatan daya semakin besar tetapi daerah yang terpapar oleh laser kan semakin sempit, sehingga daerah yang terpanaskan sejak awal semakin kecil hal ini yang membuat *weld pool* semakin

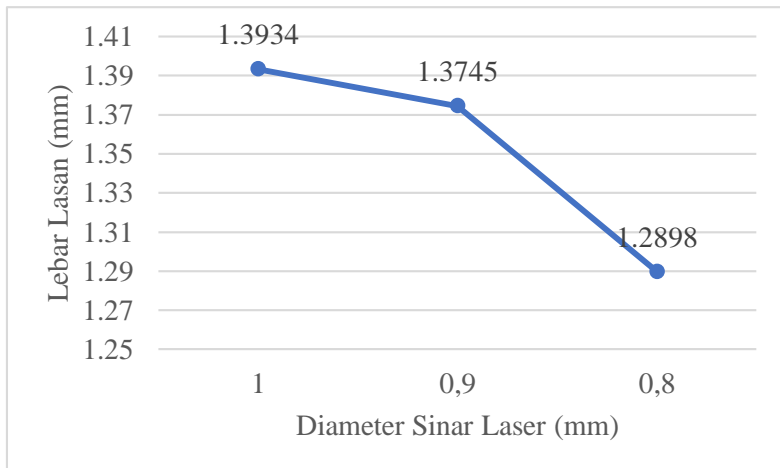




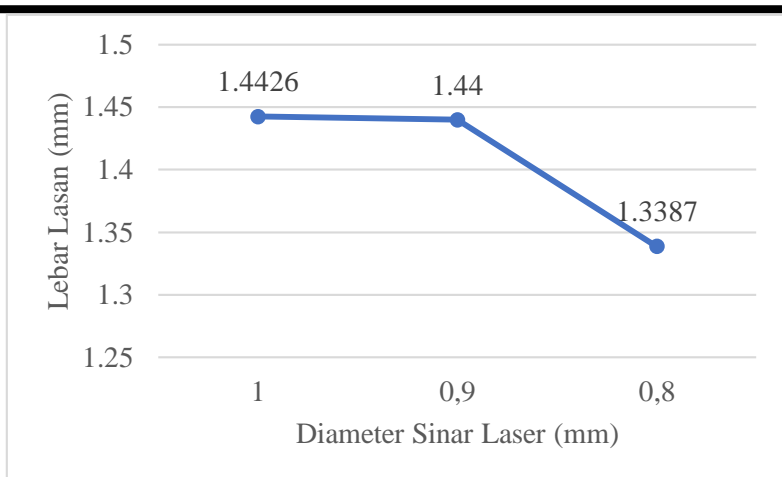
kecil sehingga lebar lasan menyempit seiring dengan penurunan diameter sinar laser.



**Gambar 4.14** Lebar Lasan dengan Daya Laser 1750 W



**Gambar 4.15** Lebar Lasan dengan Daya Laser 2000 W



**Gambar 4.16** Lebar Lasan dengan Daya Laser 2250 W

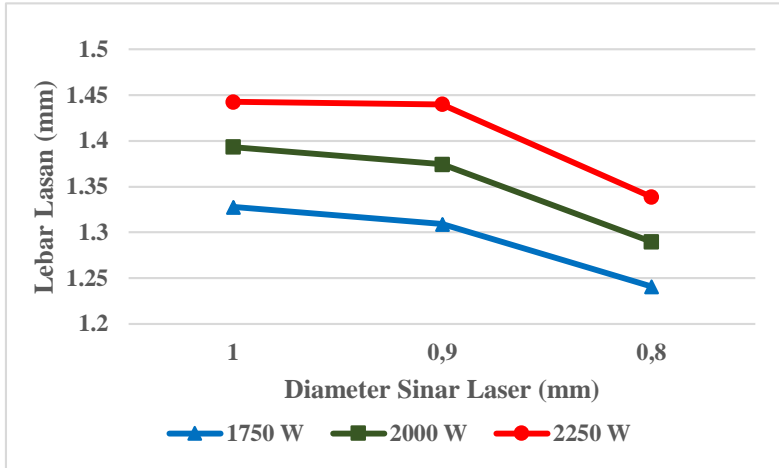
Pada **Gambar 4.14** didapatkan bahwa dengan daya laser 1750 W menghasilkan lebar lasan selebar 1,3278 mm untuk diameter sinar laser 1 mm, kemudian 1,3091 mm untuk diameter sinar laser 0,9 mm, dan 1,2408 mm untuk diameter sinar laser 0,8 mm. Dari gambar dapat dilihat bahwa lebar lasan dengan daya laser pengelasan 1750 W mengalami penurunan dimensi ketika diameter sinar laser yang digunakan semakin kecil.

Pada **Gambar 4.15** dapat dilihat bahwa dengan daya laser 2000 W menghasilkan lebar lasan selebar 1,3934 mm untuk diameter sinar laser 1 mm, kemudian 1,3745 mm untuk diameter sinar laser 0,9 mm, dan 1,2898 mm untuk diameter sinar laser 0,8 mm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa ketika daya laser sebesar 2000 W digunakan maka lebar lasan berbanding lurus dengan diameter sinar laser.

Dapat dilihat pada **Gambar 4.16** bahwa dengan daya laser 2250 W menghasilkan lebar lasan selebar 1,4426 mm untuk diameter sinar laser 1 mm, kemudian 1,44 mm untuk diameter sinar laser 0,9 mm, dan 1,3387 mm untuk diameter sinar laser 0,8 mm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa ketika daya laser sebesar 2250



W digunakan maka lebar lasan berbanding lurus dengan diameter sinar laser.



**Gambar 4.17** Lebar Lasan Pengelasan Laser Berdasarkan Daya Laser

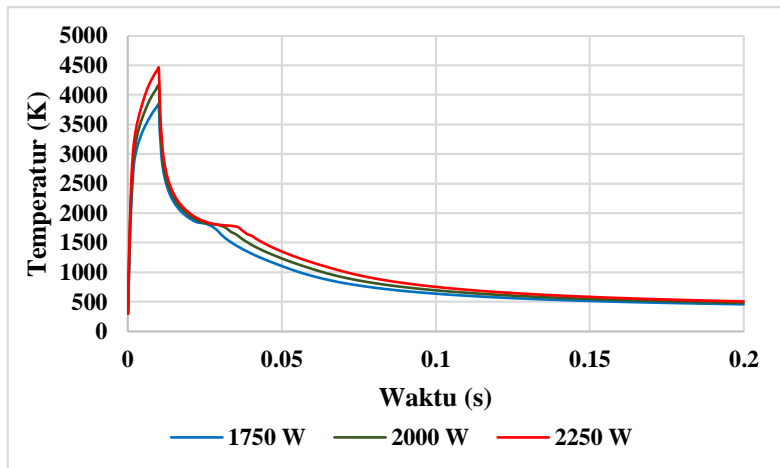
Berdasarkan **Gambar 4.17** dapat dilihat adanya perbedaan dimensi lebar lasan pada daya laser yang sama tetapi dengan diameter sinar laser yang berbeda. Pada setiap daya laser yang digunakan didapatkan lebar lasan yang semakin kecil pada diameter sinar laser yang semakin kecil. Menurut Ahn (2018) dalam penelitiannya bahwa semakin besar kerapatan daya yang digunakan dalam pengelasan maka lebar lasan semakin lebar. Daya laser yang semakin besar menghasilkan energi yang juga semakin besar sehingga semakin banyak material yang terpanaskan yang selanjutnya memperbesar lebar lasan. Akan tetapi diameter sinar laser yang semakin kecil memperkecil luas daerah yang terpapar oleh laser pada saat laser ditembakkan sehingga daerah yang mengalami pemanasan sejak awal juga mengecil hal ini yang membuat lebar lasan menjadi semakin kecil ketika diameter sinar laser yang digunakan semakin kecil.



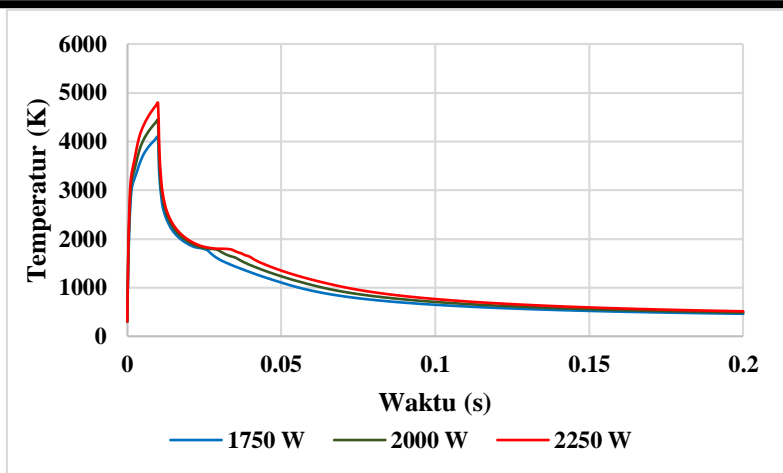
#### 4.1.2 Siklus Termal Pengelasan

Siklus termal pengelasan menunjukkan bagaimana panas mempengaruhi perubahan temperatur pada titik tertentu sebagai fungsi waktu. Perubahan temperatur sebagai fungsi waktu pada titik tertentu ini memberikan informasi – informasi seperti laju pemanasan, lama pemanasan, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur tertentu serta laju pendinginan. Laju pendinginan sendiri merupakan salah satu informasi terpenting dalam proses pengelasan karena laju pendinginan menentukan struktur mikro dari material yang dilas. Kemudian struktur mikro menentukan sifat mekanik dari material.

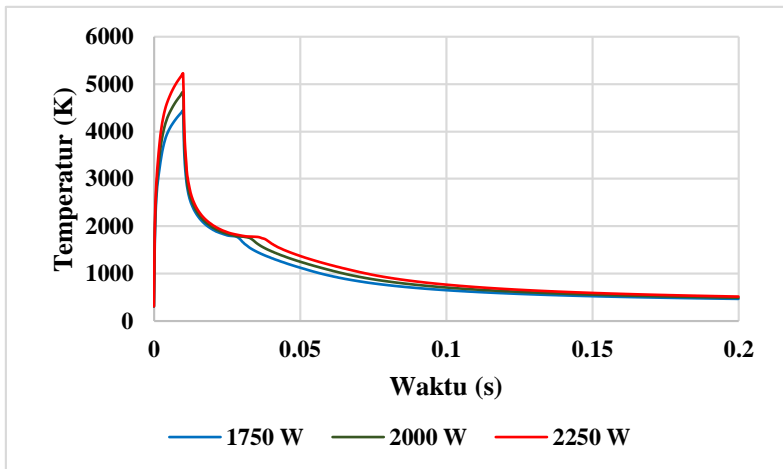
Perubahan fasa (peleburan dan pembekuan) telah berhasil dilakukan pada penelitian ini. Peleburan dan pembekuan disimulasikan dengan memperhitungkan *latent heat* pada simulasi. *Latent heat* diperhitungkan dengan mendefinisikan entalpi dari material sebagai fungsi temperatur untuk kemudian dimasukkan ke dalam sifat termofisika dari material dalam ANSYS.



**Gambar 4.18** Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Diameter Sinar Laser 1 mm



**Gambar 4.19** Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm



**Gambar 4.20** Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm



**Tabel 4.3** *Solidification Time* Lasan Menurut Parameter Pengelasan

Kasus	Diameter Sinar Laser (mm)	Daya Laser (W)	<i>Solidification Time</i> (s)
1	1	1750	0,01865
2		2000	0,02251
3		2250	0,0268
4	0.9	1750	0,01675
5		2000	0,02068
6		2250	0,02595
7	0.8	1750	0,0194
8		2000	0,02341
9		2250	0,028

**Gambar 4.18 – 4.20** menunjukkan bahwa pada setiap kasus pengelasan saat  $t = 0$  s hingga  $t = 0,01$  s (*load step 1, substep last*), *node* yang menjadi acuan mengalami kenaikan temperatur akibat pembebanan *heat flux* pada titik las tersebut. *Node* mengalami temperatur puncaknya pada  $t = 0,01$  s. Kemudian setelah  $t = 0,01$  s *node* mengalami pendinginan akibat konveksi yang diberikan pada permukaan benda kerja serta konduksi antara logam yang mengalami pemanasan dengan logam yang dingin disekitarnya. Proses solidifikasi berlangsung dari temperatur puncak dari masing – masing kasus hingga temperatur turun menjadi 1723 K atau temperatur *solidus* dari baja SA-516 *grade 70*. **Tabel 4.3** menunjukkan waktu yang dibutuhkan oleh *molten metal* lasan untuk membeku sepenuhnya terhitung dari temperatur puncak dari masing – masing parameter las yang digunakan.

Pada **Gambar 4.18** dengan diameter sinar laser sebesar 1 mm, dengan pembebanan *heat flux* selama 0,01 s untuk setiap



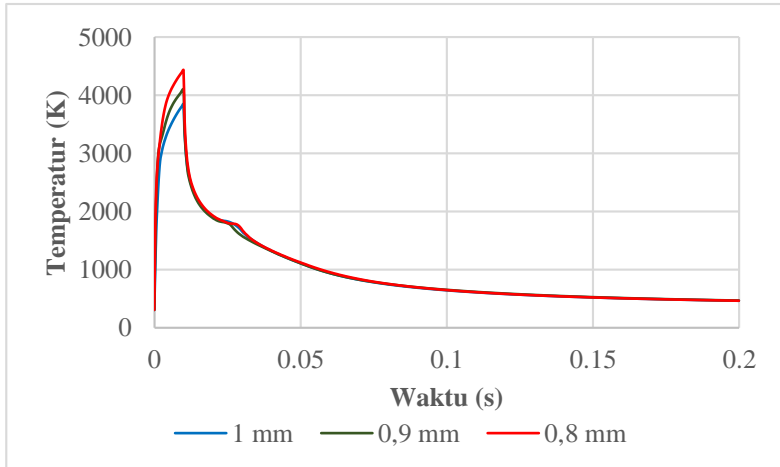
kasus pada penggunaan daya laser 1750 W didapatkan temperatur puncak senilai 3758,42 K. Kemudian pada daya laser 2000 W didapatkan temperatur puncak senilai 4041,96 K. Dan untuk daya laser 2250 W didapatkan temperatur puncak senilai 4328,13 K. Pada penggunaan daya laser 1750 W, proses solidifikasi berlangsung selama 0,01865 s dan berakhir saat  $t = 0,02865$  s. Untuk daya laser 2000 W proses solidifikasi berlangsung selama 0,02251 s dan berakhir saat  $t = 0,03251$  s. Sedangkan pada daya laser 2250 W proses solidifikasi berlangsung selama 0,0268 s dan berakhir saat  $t = 0,0368$  s. Dapat dilihat bahwa semakin besar daya laser yang digunakan maka semakin lama proses solidifikasi berlangsung.

Pada **Gambar 4.19** dengan diameter sinar laser sebesar 0,9 mm, dengan pembebanan *heat flux* selama 0,01 s untuk setiap kasus pada penggunaan daya laser 1750 W didapatkan temperatur puncak senilai 4080,34 K. Kemudian pada daya laser 2000 W didapatkan temperatur puncak senilai 4410,84 K. Dan untuk daya laser 2250 W didapatkan temperatur puncak senilai 4747,26 K. Pada penggunaan daya laser 1750 W, proses solidifikasi berlangsung selama 0,01675 s dan berakhir saat  $t = 0,02675$  s. Untuk daya laser 2000 W proses solidifikasi berlangsung selama 0,02068 s dan berakhir saat  $t = 0,03068$  s. Sedangkan pada daya laser 2250 W proses solidifikasi berlangsung selama 0,02595 s dan berakhir saat  $t = 0,03595$  s. Dapat dilihat bahwa semakin besar daya laser yang digunakan maka semakin lama proses solidifikasi berlangsung.

Pada **Gambar 4.20** dengan diameter sinar laser sebesar 0,8 mm, dengan pembebanan *heat flux* selama 0,01 s untuk setiap kasus pada penggunaan daya laser 1750 W didapatkan temperatur puncak senilai 4396,43 K. Kemudian pada daya laser 2000 W didapatkan temperatur puncak senilai 4770,62 K. Dan untuk daya laser 2250 W didapatkan temperatur puncak senilai 5147,46 K. Pada penggunaan daya laser 1750 W, proses solidifikasi berlangsung selama 0,0194 s dan berakhir saat  $t = 0,0294$  s. Untuk daya laser 2000 W proses solidifikasi berlangsung selama 0,02341

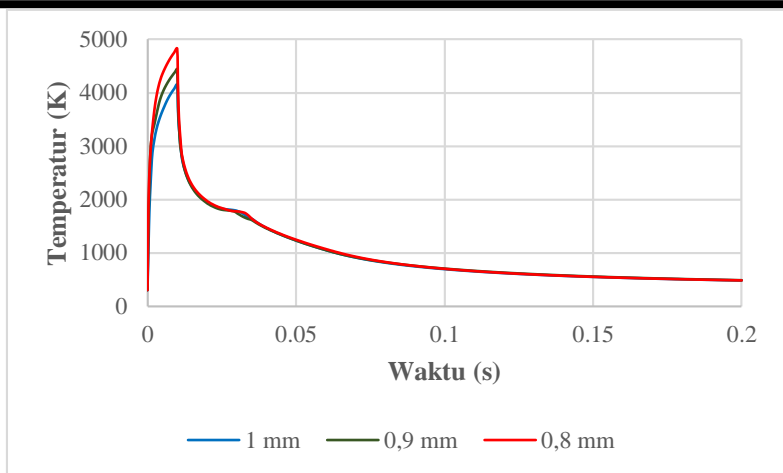


s dan berakhir saat  $t = 0,03341$  s. Sedangkan pada daya laser 2250 W proses solidifikasi berlangsung selama 0,028 s dan berakhir saat  $t = 0,038$  s. Dapat dilihat bahwa semakin besar daya laser yang digunakan maka semakin lama proses solidifikasi berlangsung.

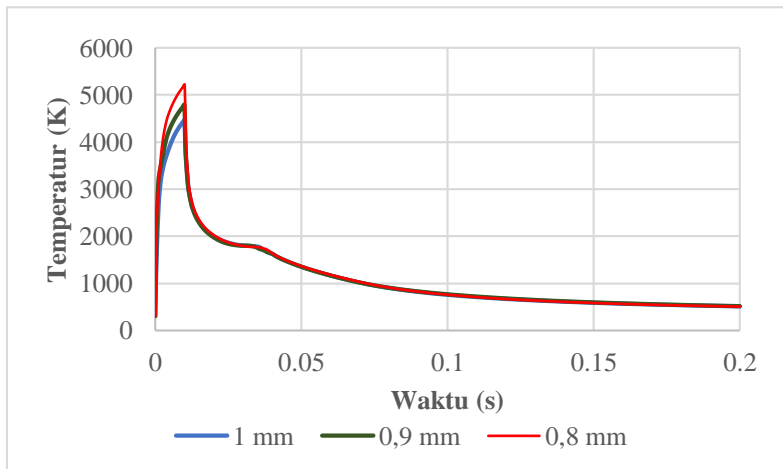


**Gambar 4.21** Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Daya Laser 1750 W





**Gambar 4.22** Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Daya Laser 2000 W



**Gambar 4.23** Siklus Termal Pengelasan Laser dengan Daya Laser 2250 W

Pada **Gambar 4.21** dengan daya laser sebesar 1750 W, dengan pembebanan *heat flux* selama 0,01 s untuk setiap kasus



pada penggunaan diameter sinar laser 1 mm didapatkan temperatur puncak senilai 3758,42 K. Kemudian pada diameter sinar laser 0,9 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4080,34 K. Dan untuk diameter sinar laser 0,8 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4396,43 K. Pada penggunaan diameter sinar laser 1 mm, proses solidifikasi berlangsung selama 0,01865 s dan berakhir saat  $t = 0,02865$  s. Untuk diameter sinar laser 0,9 mm proses solidifikasi berlangsung selama 0,01675 s dan berakhir saat  $t = 0,02675$  s. Sedangkan pada diameter sinar laser 0,8 mm proses solidifikasi berlangsung selama 0,0194 s dan berakhir saat  $t = 0,0294$  s. Walaupun pengaruhnya kecil, dapat dilihat bahwa secara garis besar semakin kecil diameter sinar laser yang digunakan maka semakin lama proses solidifikasi berlangsung.

Pada **Gambar 4.22** dengan daya laser sebesar 2000 W, dengan pembebanan *heat flux* selama 0,01 s untuk setiap kasus pada penggunaan diameter sinar laser 1 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4041,96 K. Kemudian pada diameter sinar laser 0,9 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4410,84 K. Dan untuk diameter sinar laser 0,8 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4770,62 K. Pada penggunaan diameter sinar laser 1 mm, proses solidifikasi berlangsung selama 0,02251 s dan berakhir saat  $t = 0,03251$  s. Untuk diameter sinar laser 0,9 mm proses solidifikasi berlangsung selama 0,02068 s dan berakhir saat  $t = 0,03068$  s. Sedangkan pada diameter sinar laser 0,8 mm proses solidifikasi berlangsung selama 0,02341 s dan berakhir saat  $t = 0,03341$  s. Walaupun pengaruhnya kecil, dapat dilihat bahwa secara garis besar semakin kecil diameter sinar laser yang digunakan maka semakin lama proses solidifikasi berlangsung.

Pada **Gambar 4.23** dengan daya laser sebesar 2250 W, dengan pembebanan *heat flux* selama 0,01 s untuk setiap kasus pada penggunaan diameter sinar laser 1 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4328,13 K. Kemudian pada diameter sinar laser 0,9 mm didapatkan temperatur puncak senilai 4747,26 K. Dan untuk diameter sinar laser 0,8 mm didapatkan temperatur puncak senilai 5147,46 K. Pada penggunaan diameter sinar laser 1 mm, proses



solidifikasi berlangsung selama 0,0268 s dan berakhir saat  $t = 0,0368$  s. Untuk diameter sinar laser 0,9 mm proses solidifikasi berlangsung selama 0,02595 s dan berakhir saat  $t = 0,03595$  s. Sedangkan pada diameter sinar laser 0,8 mm solidifikasi berlangsung selama 0,028 s dan berakhir saat  $t = 0,038$  s. Walaupun pengaruhnya kecil, dapat dilihat bahwa secara garis besar semakin kecil diameter sinar laser yang digunakan maka semakin lama proses solidifikasi berlangsung.

Inisiasi perubahan fasa terjadi pada 1781 K, yang ditunjukkan oleh perubahan kemiringan kurva yang tajam. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dari Haque (2014) yaitu perubahan kurva yang tajam pada grafik siklus termal terjadi karena adanya perubahan laju pendinginan secara tiba – tiba yang diakibatkan oleh energi panas yang digunakan untuk merubah fasa logam cair menjadi fasa logam padat. Energi panas ini digunakan oleh atom – atom logam untuk membentuk ikatan logam.

Perubahan fasa dari logam cair menjadi logam padat pada penelitian ini tidak terjadi pada keadaan isothermal melainkan pada keadaan temperatur yang berubah. Hal ini terjadi karena baja SA-516 *grade 70* merupakan logam paduan bukan logam murni sehingga terdapat garis *solidus* dan *liquidus* yang memungkinkan adanya campuran logam cair dan logam padat diantara kedua garis tersebut. Pada temperatur diatas 1781 K, baja SA-516 *grade 70* memiliki fasa logam cair. Kemudian setelah temperatur turun dibawah 1781 K logam mulai membeku dan membentuk fasa  $\delta$  (ferrit delta) + *liquid*, semakin turun temperatur maka fasa  $\delta$  semakin banyak. Pada temperatur 1773 K baja mengalami reaksi isothermal peritektik sehingga fasa  $\delta$  bertransformasi menjadi fasa  $\gamma$  (austenit) sedangkan *liquid* tidak mengalami perubahan. Semakin turun temperatur maka fasa  $\gamma$  semakin banyak terbentuk. Kemudian pada temperatur sedikit dibawah 1723 K baja membentuk fasa  $\gamma$  sepenuhnya. Setelah itu, ketika temperatur semakin turun terjadi pertumbuhan butir  $\gamma$  tetapi karena laju pendinginan yang relatif cepat maka pertumbuhan butir menjadi terhambat seperti yang dijelaskan oleh Callister (2014). Apabila



pendinginan berlangsung secara ekuilibrium, maka pada temperatur sedikit dibawah temperatur 1147 K (temperatur  $A_3$ ) terjadi pengintian butir – butir  $\alpha$  (ferrit) yang kemudian tumbuh seiring dengan penurunan temperatur hingga temperatur 1003 K. Pada temperatur 1003 K, terjadi reaksi isothermal eutektoid dimana  $\gamma$  bertransformasi menjadi perlit (ferrit + sementit) *lamellar*, sedangkan  $\alpha$  yang sudah terbentuk sebelumnya tidak mengalami perubahan. Pada pendinginan selanjutnya tidak terjadi perubahan struktur mikro.

Tetapi karena pendinginan dalam simulasi pengelasan laser yang dilakukan tidak ekuilibrium maka perubahan fasa untuk pendinginan dibawah temperatur 1147 K (temperatur  $A_3$ ) diabaikan karena untuk memprediksinya maka simulasi termal harus di-*coupling* dengan permodelan struktur mikro pada temperatur kamar dengan memanfaatkan *subroutine* serta *function editor* pada ANSYS untuk memodelkan struktur mikro tersebut yang mana hal tersebut tidak dilakukan karena sumber daya untuk melakukan komputasi melebihi sumber daya yang ada.

**Gambar 4.18 – 4.23** juga menunjukkan bahwa semakin besar daya laser dan semakin kecil diameter yang digunakan maka temperatur puncak semakin tinggi. Semakin tinggi temperatur puncak maka semakin lambat laju pendinginan yang dialami, ditandai dengan kurva pendinginan pada siklus termal yang semakin bergeser ke kanan. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian dari De (2003), bahwa semakin besar daya laser serta semakin lama pemanasan yang dilakukan maka laju pendinginan semakin lambat. Hal ini disebabkan oleh semakin banyak panas yang diberikan kepada benda kerja maka semakin banyak pula panas yang harus berpindah dari material yang mengalami pemanasan ke material yang tidak mengalami pemanasan serta ke lingkungan sekitar.

#### 4.1.3 Kedalaman Penetrasi

**Gambar 4.24 – 4.32** (gambar *cross section* dari plat yang dilas yang dilihat menurut ketebalannya) didapatkan dengan cara



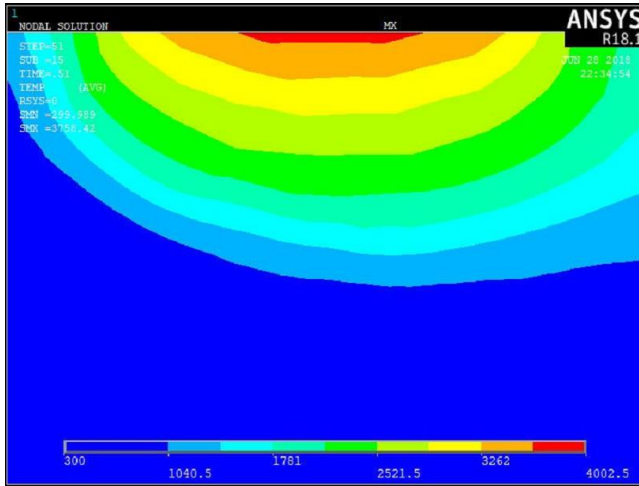
membaca hasil pada *load step 51, substep last* pada setiap kasus pengelasan (ketika *heat flux* diberikan pada titik las yang berada ditengah – tengah plat, kemudian menekan tombol fitur *zoom in* sebanyak 12 kali, tombol fitur *pan model down* sebanyak enam kali dan tombol fitur *pan model right* sebanyak tiga kali. Pada **Gambar 4.24 – 4.32** terdapat daerah yang berwarna abu – abu yang menandakan temperatur yang lebih tinggi dari 4002,5 K, dikarenakan skala maksimum yang digunakan adalah temperatur tersebut agar didapatkan kontur yang salah satu perbatasan warnanya memiliki temperatur tepat 1781 K (temperatur lebur dari material SA-516 *Grade 70*) untuk pengukuran kedalaman penetrasi.

Kontur temperatur pada **Gambar 4.24 – 4.32** hanya menyatakan daerah dengan rentang temperatur seperti pada legenda yang tertera pada gambar, tetapi tidak menunjukkan kedalaman penetrasi secara langsung. Kemudian, gambar yang berbeda walaupun menunjukkan rentang temperatur yang sama tetapi gambar – gambar tersebut memiliki luasan daerah yang berbeda – beda. Sehingga kedalaman penetrasinya pun berbeda – beda. Pengukuran kedalaman penetrasi dilakukan dengan cara mencetak **Gambar 4.24 – 4.32** dengan perbesaran yang sama kemudian mengukur kedalaman penetrasi secara manual dengan mistar. Kedalaman penetrasi diukur mulai dari kontur daerah yang menunjukkan temperatur 1781 K (temperatur lebur dari material SA-516 *Grade 70*) hingga sumbu x pada geometri plat. Kemudian membandingkannya dengan lebar diameter sinar laser pada geometri benda kerja (sebagai acuan skala perbesaran) yang juga dicetak dengan perbesaran yang sama.

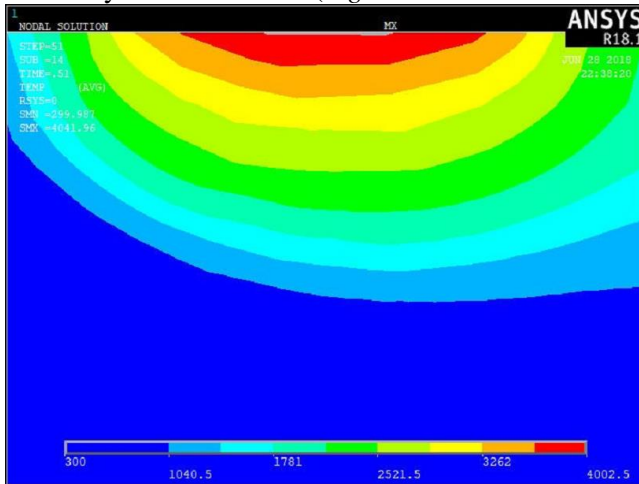
Hasil dari simulasi pengelasan laser dituliskan pada **Tabel 4.3** yang dilakukan sebanyak sembilan kali simulasi. Simulasi dilakukan dengan tiga diameter laser berbeda yang masing – masing divariasikan dengan tiga daya laser yang berbeda. Simulasi dengan diameter laser dan daya laser yang berbeda menghasilkan dimensi kedalaman penetrasi yang berbeda – beda. Dari sembilan



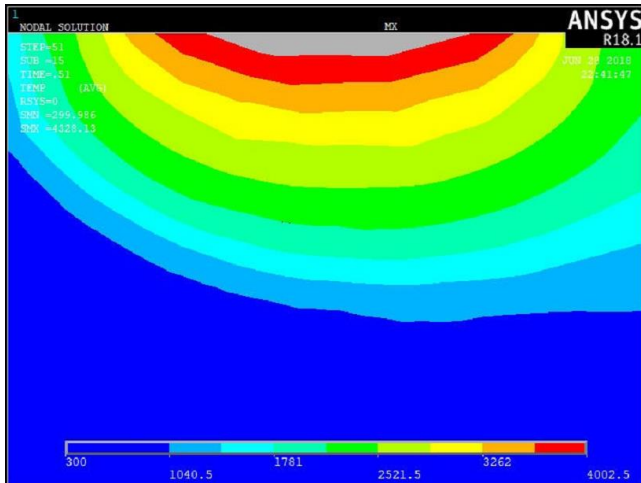
simulasi yang dilakukan dihasilkan rata – rata kedalaman penetrasi senilai 0,5033 mm.



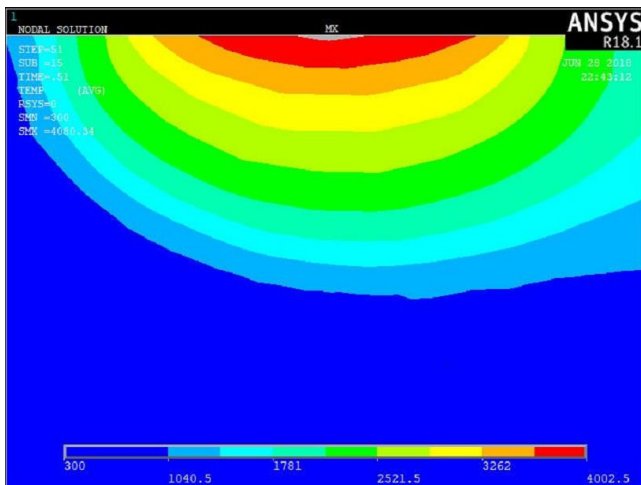
**Gambar 4.24** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 1750 W (*Right atau Cross Section View*)



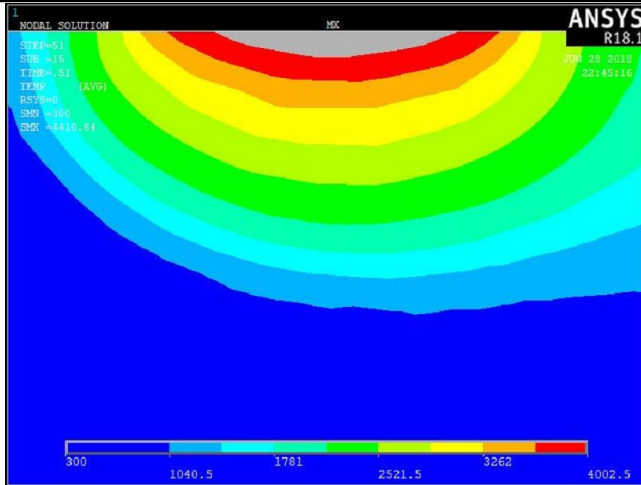
**Gambar 4.25** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2000 W (*Right atau Cross Section View*)



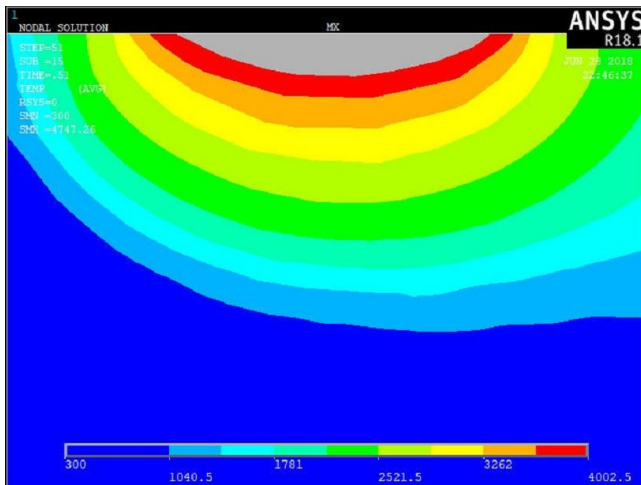
**Gambar 4.26** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 1 mm dan Daya Laser 2250 W (*Right* atau *Cross Section View*)



**Gambar 4.27** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 1750 W (*Right* atau *Cross Section View*)

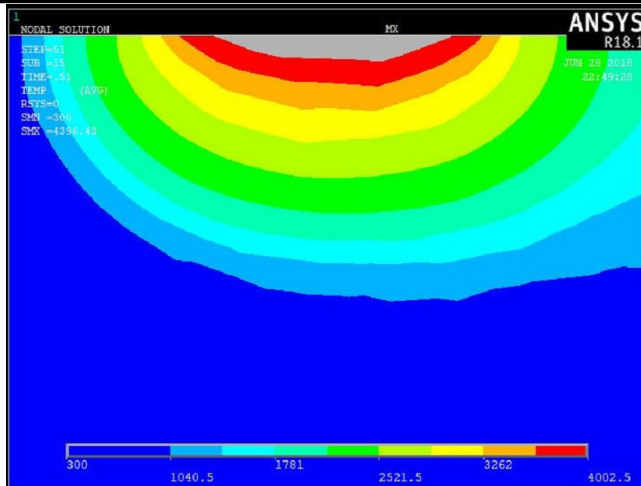


**Gambar 4.28** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2000 W (*Right* atau *Cross Section View*)

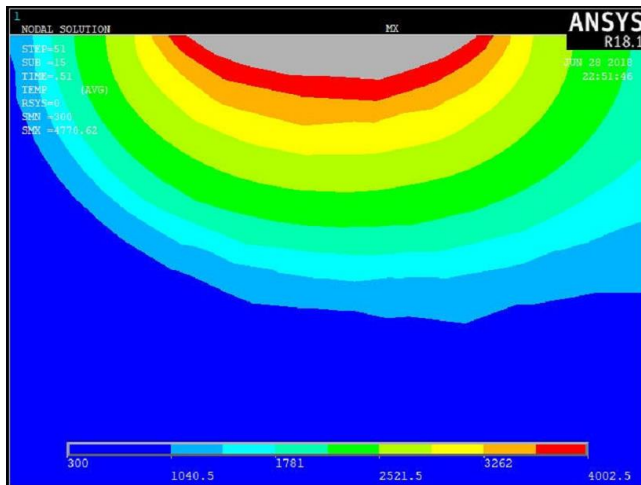


**Gambar 4.29** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,9 mm dan Daya Laser 2250 W (*Right* atau *Cross Section View*)

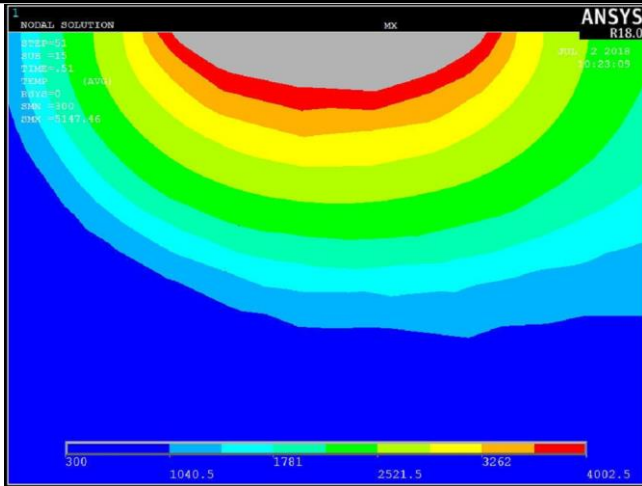




**Gambar 4.30** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 1750 W (*Right* atau *Cross Section View*)



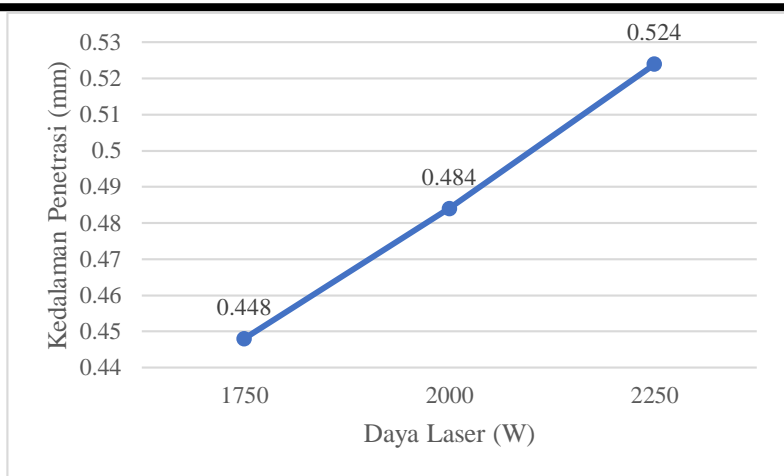
**Gambar 4.31** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2000 W (*Right* atau *Cross Section View*)



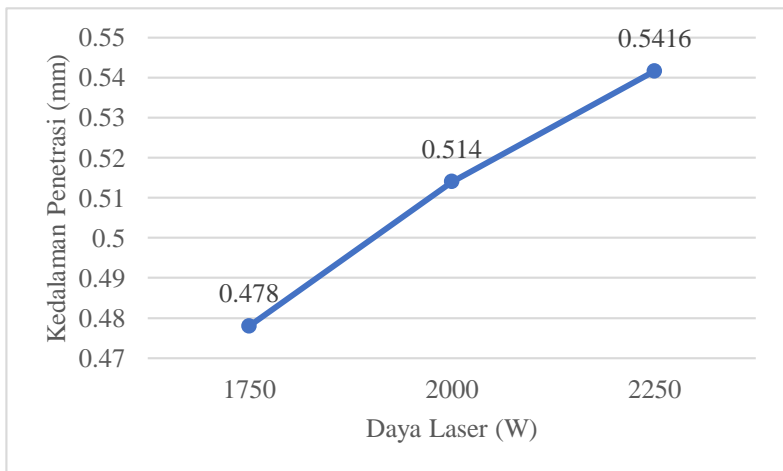
**Gambar 4.32** Persebaran Temperatur untuk Diameter Titik Las 0,8 mm dan Daya Laser 2250 W (*Right* atau *Cross Section View*)

**Tabel 4.4** Dimensi Kedalaman Penetrasi Menurut Parameter Pengelasan

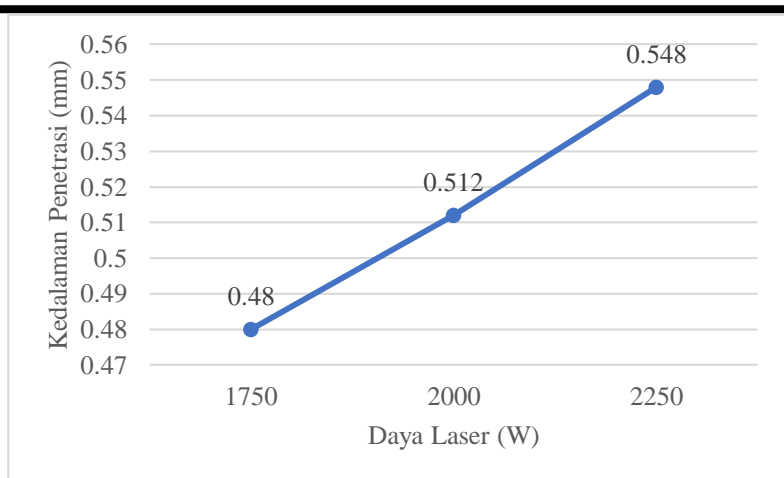
No. Kasus	Diameter Sinar Laser (mm)	Daya Laser (W)	Kedalaman Penetrasi (mm)
1		1750	0,448
2	1	2000	0,484
3		2250	0,524
4		1750	0,478
5	0,9	2000	0,514
6		2250	0,5416
7		1750	0,48
8	0,8	2000	0,512
9		2250	0,548



**Gambar 4.33** Kedalaman Penetrasi dengan Diameter Sinar Laser 1 mm



**Gambar 4.34** Kedalaman Penetrasi dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm



**Gambar 4.35** Kedalaman Penetrasi dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm

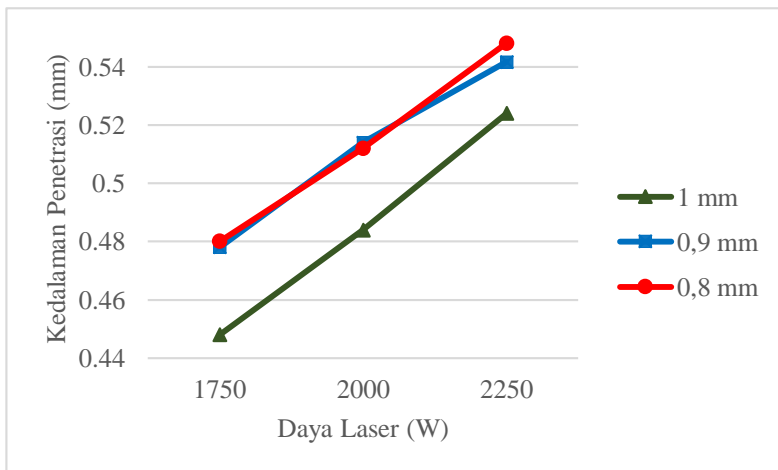
Hasil kedalaman penetrasi pada diameter laser 1 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.35**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,448 mm, kemudian pada variasi daya laser 2000 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,484 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2250 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,524 mm. Kedalaman penetrasi dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 1 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.26**, **4.27**, dan **4.28**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 1 mm dimensi kedalaman penetrasi berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

Hasil kedalaman penetrasi pada diameter laser 0,9 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.36**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,478 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2000 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,514 mm, kemudian pada variasi daya laser 2250 W didapatkan



kedalaman penetrasi senilai 0,5416 mm. Kedalaman penetrasi dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 0,9 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.29, 4.30, dan 4.31**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 0,9 mm dimensi kedalaman penetrasi berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

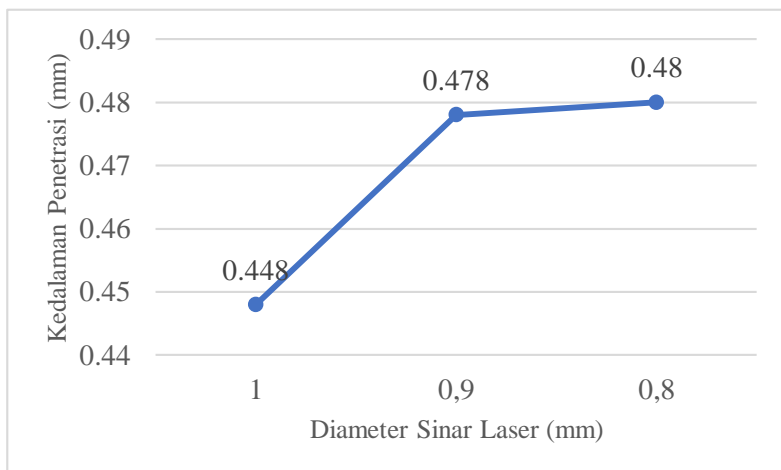
Hasil kedalaman penetrasi pada diameter laser 0,8 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.37**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,48 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2000 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,512 mm, kemudian pada variasi daya laser 2250 W didapatkan kedalaman penetrasi senilai 0,548 mm. Kedalaman penetrasi dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 0,8 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.32, 4.33, dan 4.34**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 0,8 mm dimensi kedalaman penetrasi berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.



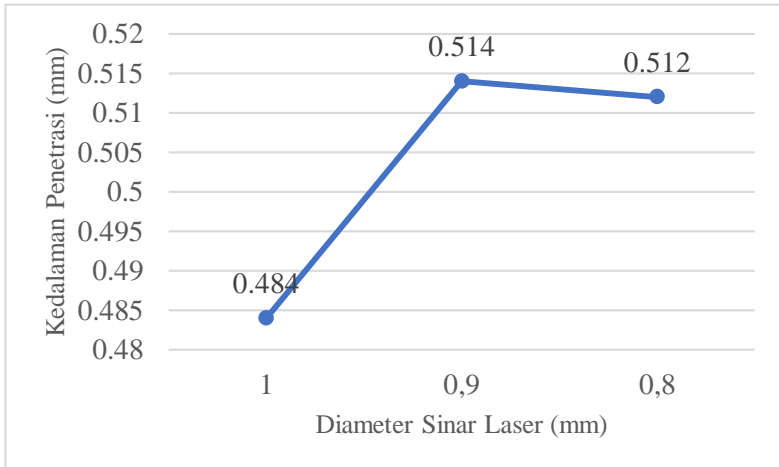
**Gambar 4.36** Kedalaman Penetrasi Pengelasan Laser Berdasarkan Diameter Sinar Laser



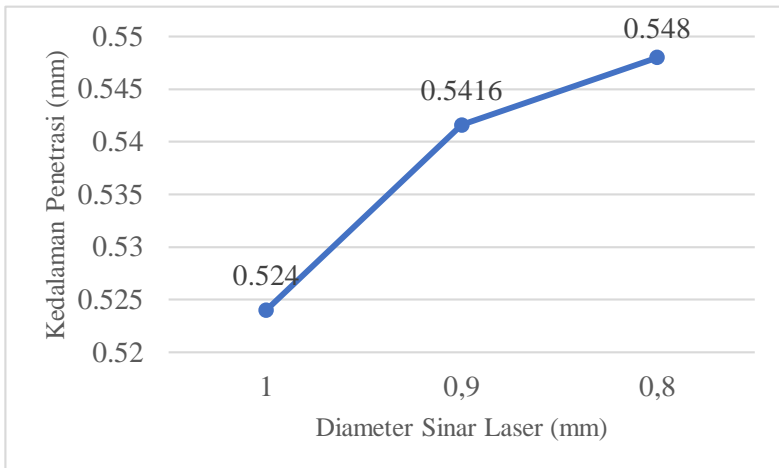
Pada **Gambar 4.36** dapat dilihat bahwa pengelasan laser dengan diameter sinar laser 1; 0,9; dan 0,8 mm menunjukkan kalau kedalaman penetrasi naik seiring dengan kenaikan daya laser yang digunakan. Semakin besar daya laser maka semakin besar *heat flux* yang diterima oleh titik – titik las laser, sehingga semakin dalam pula persebaran temperatur yang diterima oleh logam induk. Hasil penelitian ini sesuai dengan apa yang Xin Xue (2016) lakukan dalam penelitiannya, bahwa semakin besar kerapatan daya yang digunakan dalam pengelasan maka kedalaman penetrasi semakin dalam. Dikarenakan kerapatan daya yang berbanding lurus dengan daya laser dan berbanding terbalik dengan diameter. Semakin besar kerapatan daya maka semakin banyak energi yang digunakan untuk memanaskan material sehingga material yang terpanaskan semakin banyak yang selanjutnya menghasilkan penetrasi yang semakin dalam. Selain itu, semakin kecil diameter dari sinar laser maka pemanasan semakin fokus sehingga semakin banyak panas yang berkonduksi ke arah bawah benda kerja yang mengakibatkan penetrasi semakin dalam.



**Gambar 4.37** Kedalaman Penetrasi dengan Daya Laser 1750 W



**Gambar 4.38** Kedalaman Penetrasi dengan Daya Laser 2000 W



**Gambar 4.39** Kedalaman Penetrasi dengan Daya Laser 2250 W

Pada **Gambar 4.37** didapatkan bahwa dengan daya laser 1750 W menghasilkan kedalaman penetrasi sedalam 0,448 mm untuk diameter sinar laser 1 mm, kemudian 0,478 mm untuk

#### **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**



diameter sinar laser 0,9 mm, dan 0,48 mm untuk diameter sinar laser 0,8 mm. Dari gambar dapat dilihat bahwa kedalaman penetrasi dengan daya laser pengelasan 1750 W mengalami kenaikan dimensi ketika diameter sinar laser yang digunakan semakin kecil.

Pada **Gambar 4.38** dapat dilihat bahwa dengan daya laser 2000 W menghasilkan kedalaman penetrasi sedalam 0,484 mm untuk diameter sinar laser 1 mm, kemudian 0,514 mm untuk diameter sinar laser 0,9 mm, dan 0,512 mm untuk diameter sinar laser 0,8 mm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa secara garis besar ketika daya laser sebesar 2000 W digunakan maka kedalaman penetrasi berbanding terbalik dengan diameter sinar laser.

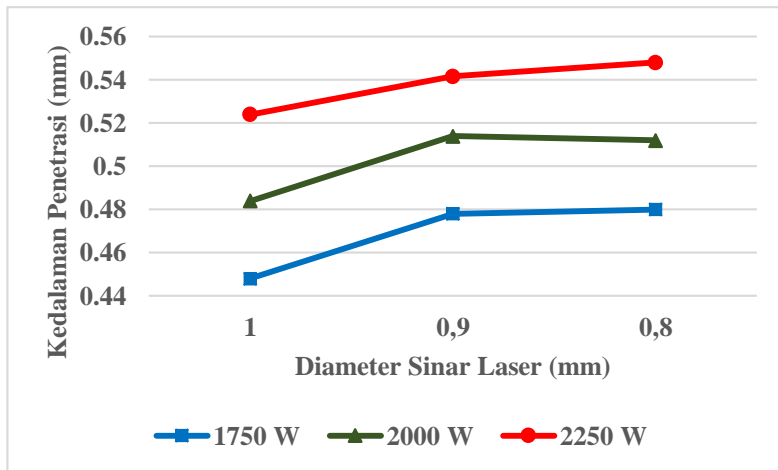
Dapat dilihat pada **Gambar 4.39** bahwa dengan daya laser 2250 W menghasilkan kedalaman penetrasi sedalam 0,524 mm untuk diameter sinar laser 1 mm, kemudian 0,5416 mm untuk diameter sinar laser 0,9 mm, dan 0,548 mm untuk diameter sinar laser 0,8 mm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa ketika daya laser sebesar 2250 W digunakan maka kedalaman penetrasi berbanding terbalik dengan diameter sinar laser.

Berdasarkan **Gambar 4.40** dapat dilihat adanya perbedaan dimensi kedalaman penetrasi pada daya laser yang sama tetapi dengan diameter sinar laser yang berbeda. Pada setiap daya laser yang digunakan didapatkan kedalaman penetrasi yang semakin besar pada diameter sinar laser yang semakin kecil. Menurut Xin Xue (2017) dalam penelitiannya bahwa semakin kecil diameter sinar laser yang digunakan dalam pengelasan maka kedalaman penetrasi semakin dalam. Hal ini dikarenakan oleh kerapatan daya yang berbanding terbalik dengan diameter sinar laser. Semakin besar kerapatan daya maka semakin banyak energi yang digunakan untuk memanaskan material sehingga material yang terpanaskan semakin banyak yang selanjutnya menghasilkan penetrasi yang semakin dalam. Selain itu, semakin kecil diameter dari sinar laser maka pemanasan semakin fokus sehingga semakin banyak panas





yang berkonduksi ke arah bawah benda kerja yang mengakibatkan penetrasi semakin dalam.



**Gambar 4.40** Kedalaman Penetrasi Berdasarkan Daya Laser

#### 4.1.4 Lebar HAZ

*Heat Affected Zone* (HAZ) merupakan daerah pada benda kerja yang mengalami perubahan struktur mikro maupun sifat akibat pengelasan. *Heat input* pada proses pengelasan serta proses pendinginan kembali menyebabkan perubahan tersebut pada daerah sekitar *weld metal*. Pada baja SA-516 grade 70, lebar HAZ merupakan daerah yang mengalami temperatur puncak antara 1003 K (temperatur isothermal eutektoid) hingga 1723 K (temperatur *solidus*).

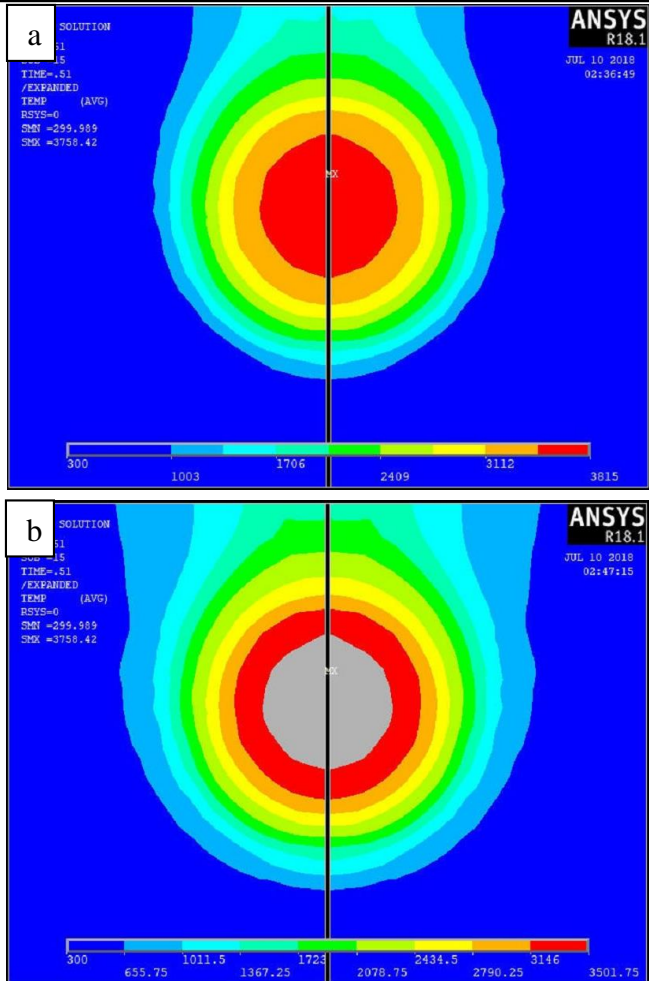
Pengukuran lebar HAZ dilakukan dengan cara yang hampir mirip dengan pengukuran lebar HAZ yaitu membaca hasil pada *load step 51, substep last* pada setiap kasus pengelasan (ketika *heat flux* diberikan pada titik las yang berada ditengah – tengah plat yang dilihat dari atas (*top view*), kemudian menekan tombol fitur *zoom in* sebanyak 12 kali dan tombol fitur *pan model up* sebanyak dua kali. Setelah itu mengatur kontur dari tampilan persebaran



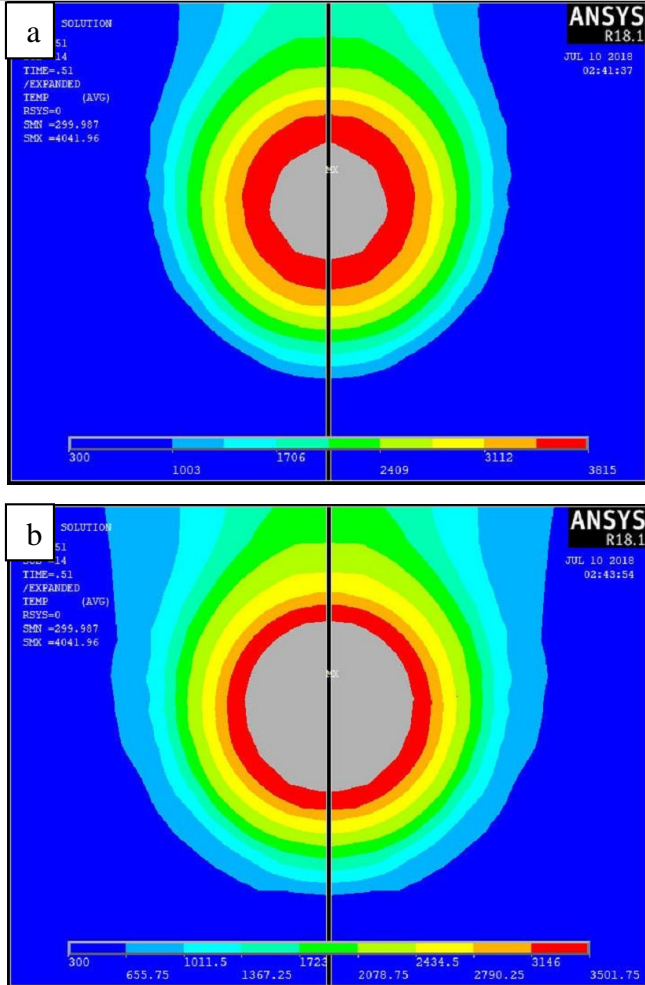
temperatur agar mendapatkan temperatur tepat pada 1003 K dan 1723 K pada salah satu perbatasan warnanya sebagai titik pengukuran lebar HAZ.

Kontur temperatur yang didapatkan hanya menyatakan daerah dengan rentang temperatur seperti pada legenda yang tertera pada gambar, tetapi tidak menunjukkan lebar HAZ secara langsung. Kemudian, gambar yang berbeda walaupun menunjukkan rentang temperatur yang sama tetapi gambar – gambar tersebut memiliki luasan daerah yang berbeda – beda. Sehingga lebar HAZ pun berbeda – beda. Pengukuran lebar HAZ dilakukan dengan cara mencetak **Gambar 4.41 – 4.49** dengan perbesaran yang sama kemudian mengukur lebar HAZ secara manual dengan mistar. Lebar HAZ didapatkan dengan mengukur selisih dimensi dari kontur daerah yang menunjukkan temperatur 1003 K dan 1723 K pada dua gambar yang berbeda hingga *weld centerline*. Kemudian membandingkannya dengan lebar diameter sinar laser pada geometri benda kerja (sebagai acuan skala perbesaran) yang juga dicetak dengan perbesaran yang sama.

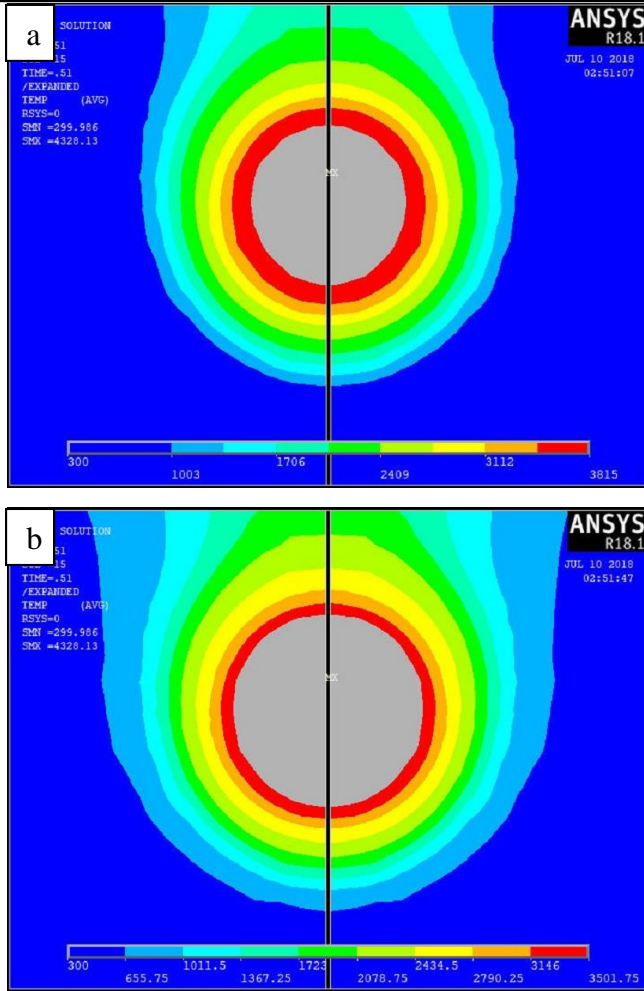
Hasil dari simulasi pengelasan laser dituliskan pada **Tabel 4.4** yang dilakukan sebanyak sembilan kali simulasi. Simulasi dilakukan dengan tiga diameter laser berbeda yang masing – masing divariasikan dengan tiga daya laser yang berbeda. Simulasi dengan diameter laser dan daya laser yang berbeda menghasilkan dimensi lebar HAZ yang berbeda – beda. Semakin kecil diameter sinar laser dan semakin besar daya laser maka kerapatan daya semakin besar sehingga temperatur maksimum dari benda kerja yang dipanaskan semakin tinggi. Dari sembilan simulasi yang dilakukan dihasilkan rata – rata lebar HAZ senilai 0,1363 mm.



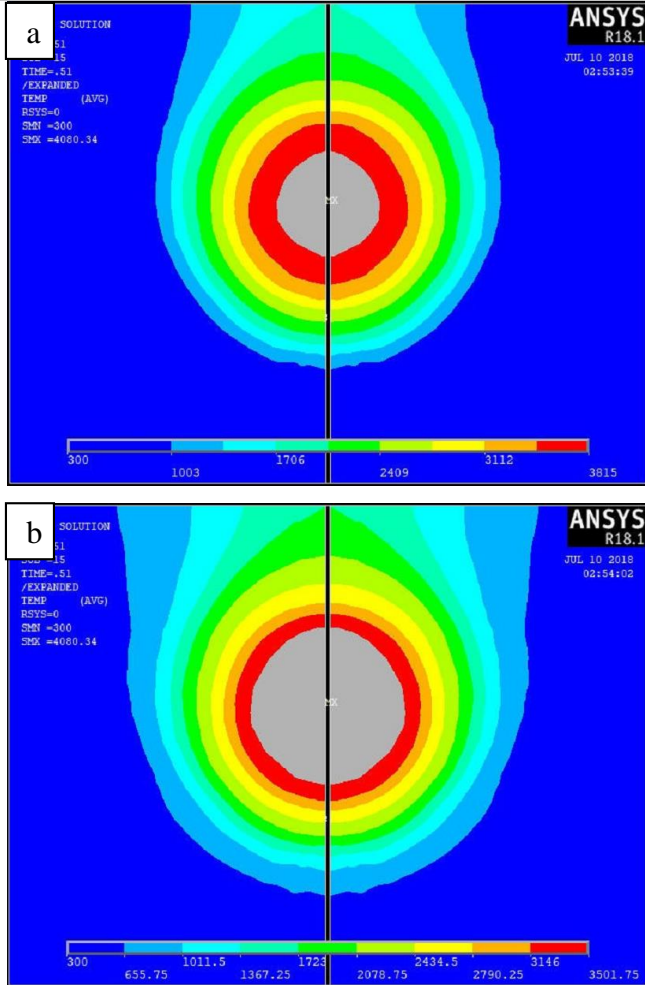
**Gambar 4.41** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 1 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K



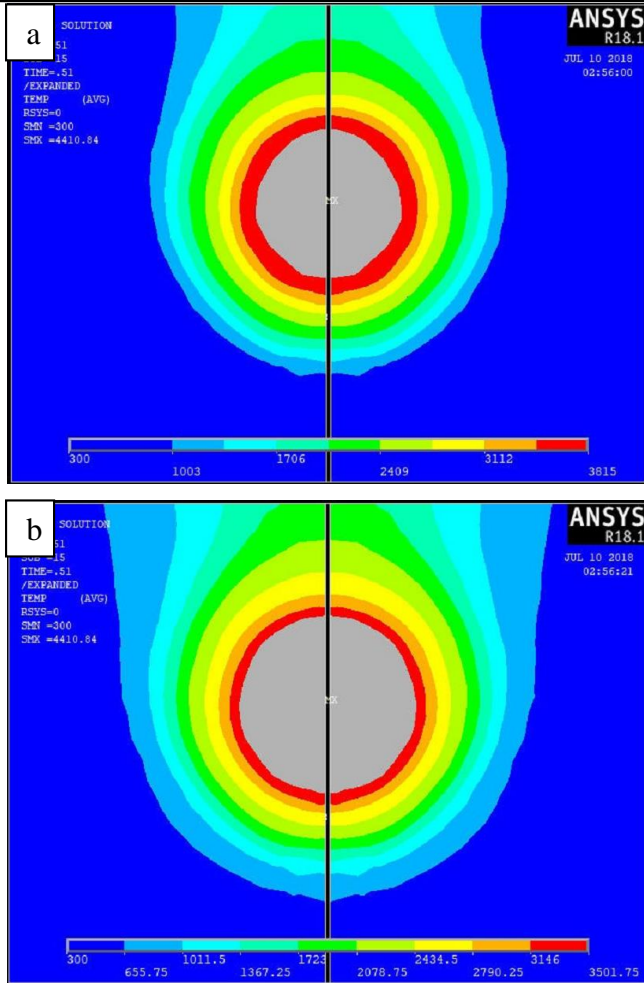
**Gambar 4.42** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 2 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K



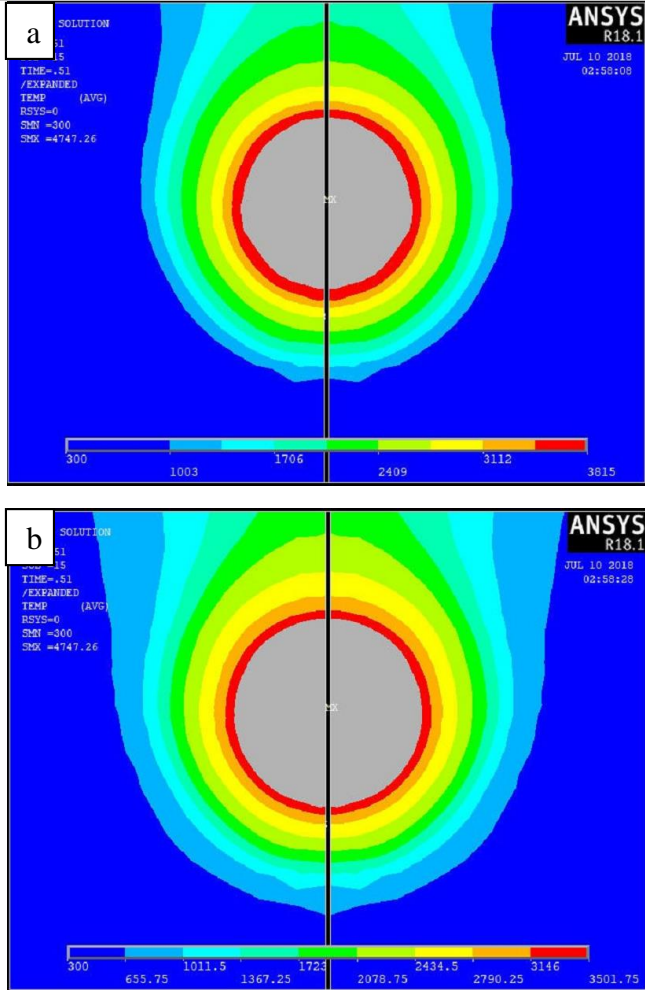
**Gambar 4.43** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 3 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K



**Gambar 4.44** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 4 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K

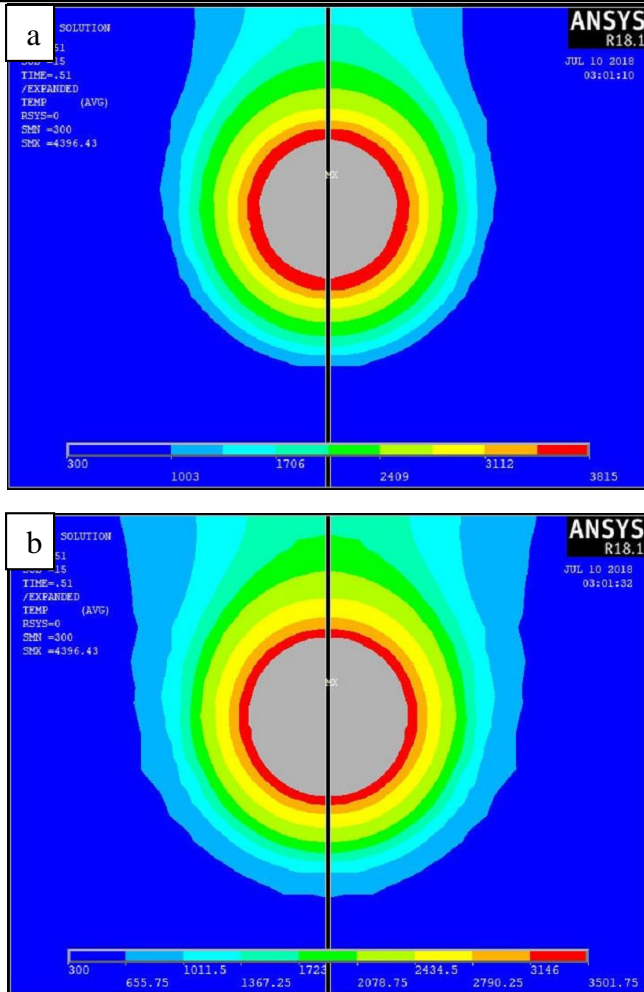


**Gambar 4.45** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 5 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K

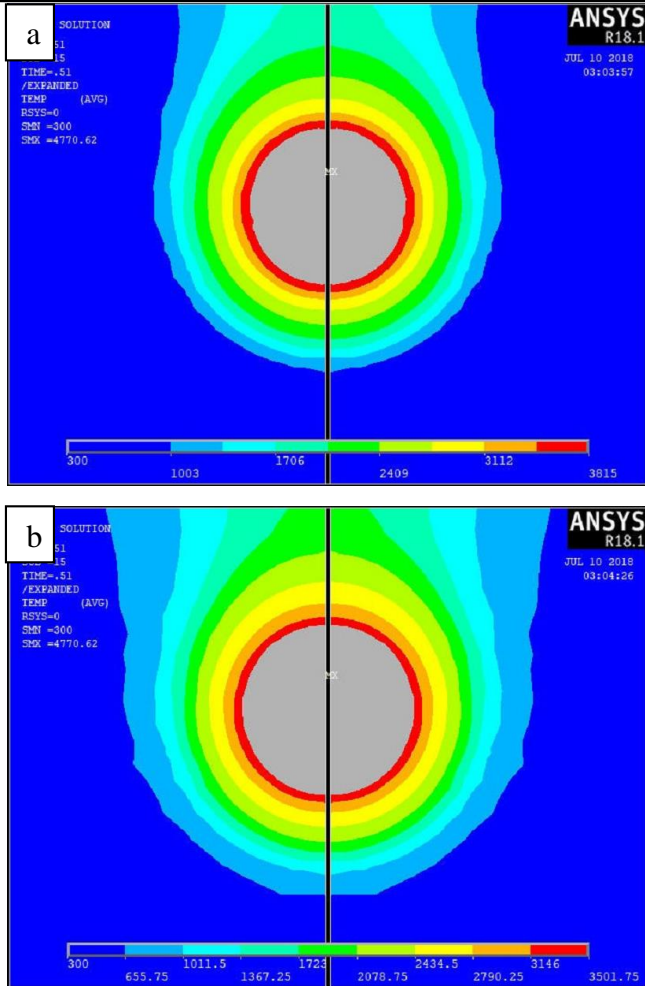


**Gambar 4.46** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 6 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K

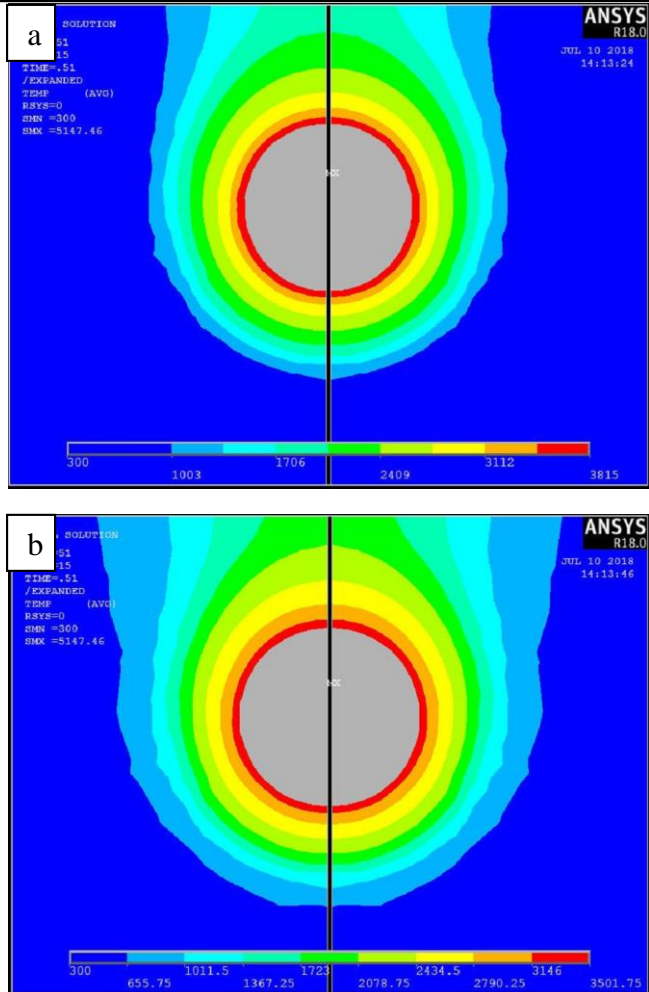




**Gambar 4.47** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 7 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K



**Gambar 4.48** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 8 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K

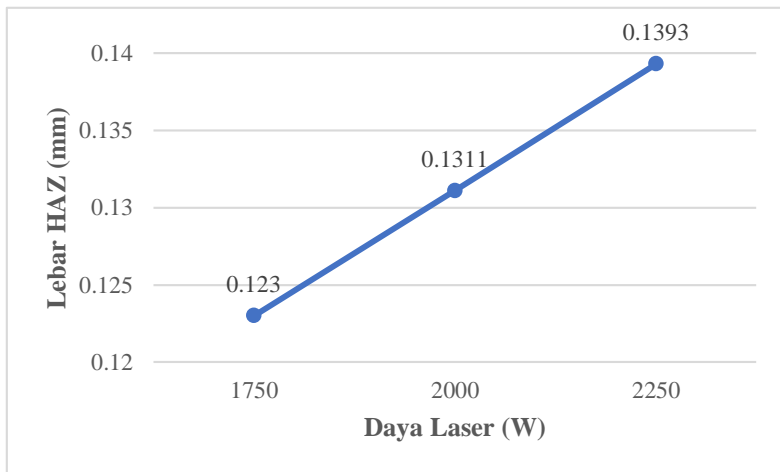


**Gambar 4.49** Persebaran Temperatur untuk Mengukur Dimensi HAZ Kasus 9 pada Temperatur : (a) 1003 K, (b) 1723 K

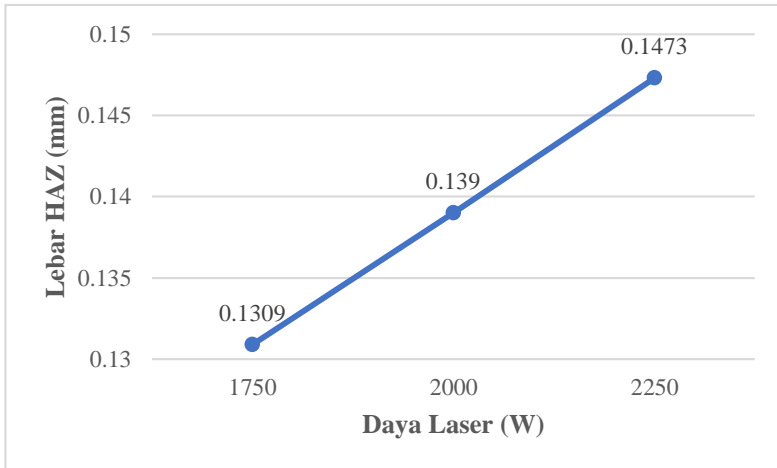


**Tabel 4.5** Dimensi Lebar HAZ Menurut Parameter Pengelasan

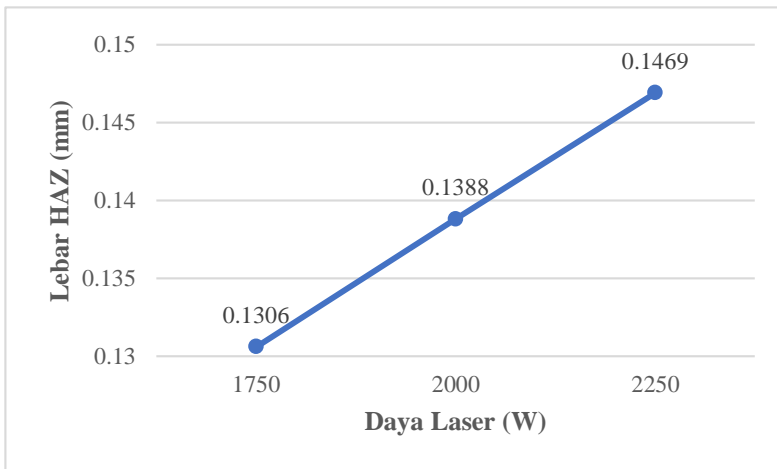
Kasus	Diameter Sinar Laser (mm)	Daya Laser (W)	Lebar HAZ (mm)
1		1750	0,123
2	1	2000	0,1311
3		2250	0,1393
4		1750	0,1309
5	0,9	2000	0,139
6		2250	0,1473
7		1750	0,1306
8	0,8	2000	0,1388
9		2250	0,1469



**Gambar 4.50** Lebar HAZ dengan Diameter Sinar Laser 1 mm



**Gambar 4.51** Lebar HAZ dengan Diameter Sinar Laser 0,9 mm



**Gambar 4.52** Lebar HAZ dengan Diameter Sinar Laser 0,8 mm

Hasil lebar HAZ pada diameter laser 1 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.50**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,123

## **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**



mm, kemudian pada variasi daya laser 2000 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1311 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2250 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1393 mm. Lebar HAZ dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 1 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.41**, **4.42**, dan **4.43**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 1 mm dimensi lebar HAZ berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

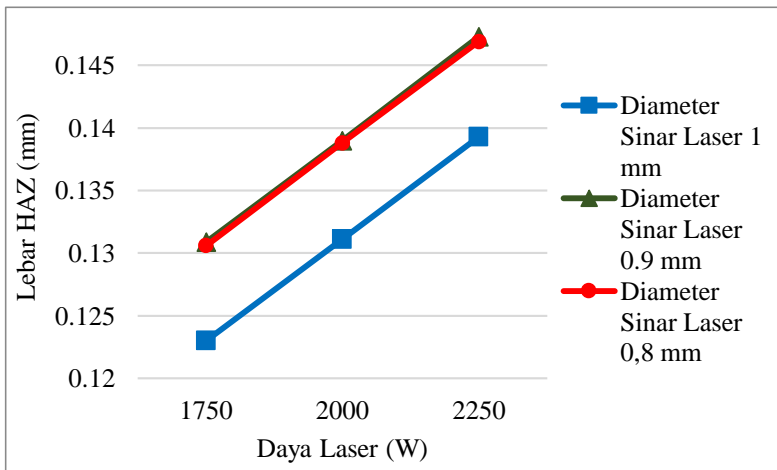
Hasil lebar HAZ pada diameter laser 0,9 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.51**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1309 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2000 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,139 mm, kemudian pada variasi daya laser 2250 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1473 mm. Lebar HAZ dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 0,9 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.44**, **4.45**, dan **4.46**. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 0,9 mm dimensi lebar HAZ berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

Hasil lebar HAZ pada diameter laser 0,8 mm dengan beberapa variasi daya laser yang berbeda dapat dilihat pada **Gambar 4.52**. Pada variasi daya laser 1750 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1306 mm, kemudian pada variasi daya laser 2000 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1388 mm, selanjutnya pada variasi daya laser 2250 W didapatkan lebar HAZ senilai 0,1469 mm. Lebar HAZ dengan daya laser 1750 W, 2000 W, dan 2250 W dan diameter sinar laser yang konstan 0,8 mm diukur masing – masing pada **Gambar 4.47**, **4.48**, dan **4.49**. Dari hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada diameter laser 0,8 mm dimensi lebar HAZ berbanding lurus dengan daya laser yang digunakan.

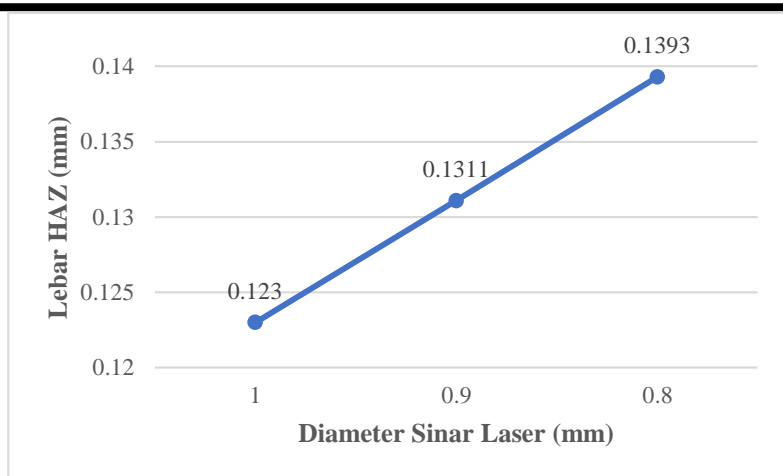
Pada **Gambar 4.53** dapat dilihat bahwa pengelasan laser dengan diameter sinar laser 1; 0,9; dan 0,8 mm menunjukkan kalau lebar HAZ naik seiring dengan kenaikan daya laser yang digunakan. Semakin besar daya laser dan semakin kecil diameter sinar laser maka semakin besar *heat flux* yang diterima oleh titik –



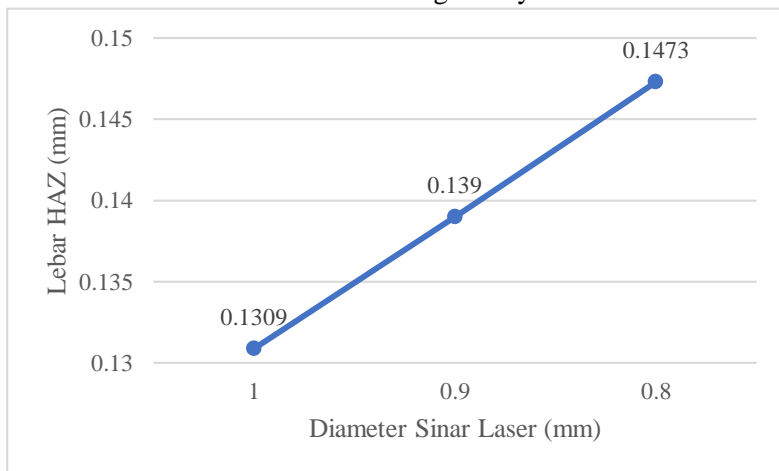
titik las laser, sehingga *weld pool* akan semakin panas dan temperturnya semakin tinggi. Semakin tinggi temperatur dari *weld pool* maka laju pendinginannya akan semakin lambat. Menurut Ghosh (2011), semakin lambat laju pendinginan maka HAZ akan semakin lebar. Hal ini disebabkan oleh temperatur *weld pool* yang semakin tinggi menyebabkan semakin banyaknya panas yang harus berpindah dari *weld pool* sehingga semakin banyak material yang terimbas panas *weld pool* (semakin jauh panas yang merambat). Di sisi lain, pengelasan laser sendiri akan menghasilkan panas dengan jumlah yang terbatas tetapi sangat terkonsentrasi sehingga lebar HAZ menjadi sempit jika dibandingkan dengan proses pengelasan lain seperti *oxyfuel welding* dan *arc welding*.



**Gambar 4.53** Lebar HAZ Pengelasan Laser Berdasarkan Diameter Sinar Laser

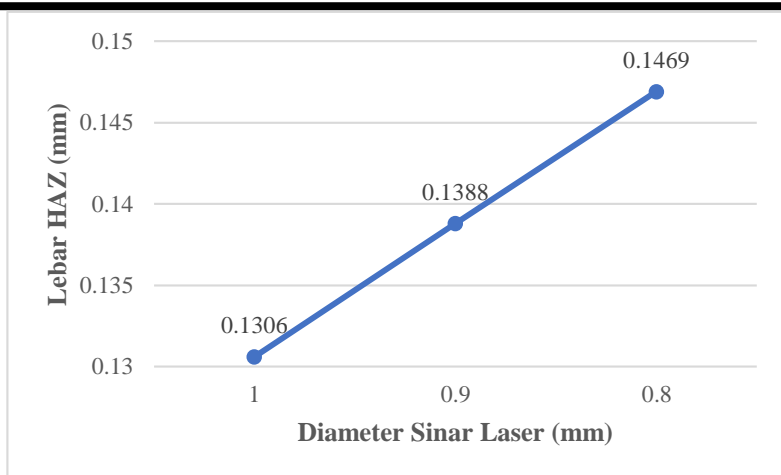


**Gambar 4.54** Lebar HAZ dengan Daya Laser 1750 W

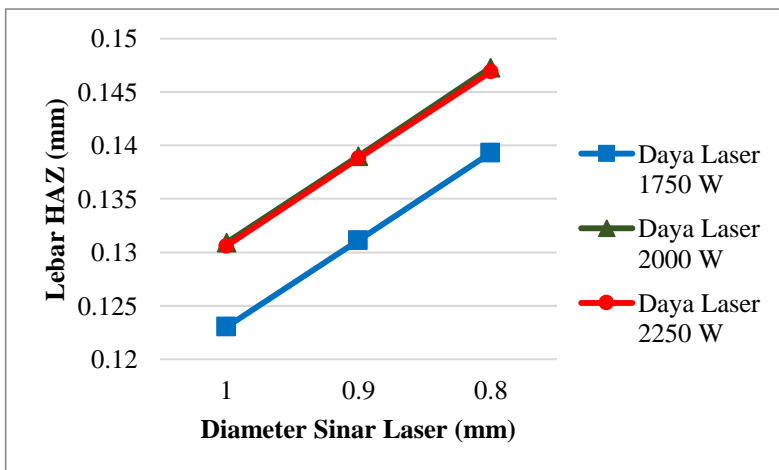


**Gambar 4.55** Lebar HAZ dengan Daya Laser 2000 W





**Gambar 4.56** Lebar HAZ dengan Daya Laser 2250 W



**Gambar 4.57** Lebar HAZ Pengelasan Laser Berdasarkan Daya Laser

Berdasarkan **Gambar 4.57** dapat dilihat adanya perbedaan dimensi lebar HAZ pada daya laser yang sama tetapi dengan diameter sinar laser yang berbeda. Semakin besar daya laser dan



semakin kecil diameter sinar laser maka semakin besar *heat flux* yang diterima oleh titik – titik las laser, sehingga *weld pool* akan semakin panas dan temperaturnya semakin tinggi. Semakin tinggi temperatur dari *weld pool* maka laju pendinginannya akan semakin lambat. Menurut Ghosh (2011), semakin lambat laju pendinginan maka HAZ akan semakin lebar. Hal ini disebabkan oleh temperatur *weld pool* yang semakin tinggi menyebabkan semakin banyaknya panas yang harus berpindah dari *weld pool* sehingga semakin banyak material yang terimbas panas *weld pool* (semakin jauh panas yang merambat). Di sisi lain, pengelasan laser sendiri akan menghasilkan panas dengan jumlah yang terbatas tetapi sangat terkonsentrasi sehingga lebar HAZ menjadi sempit jika dibandingkan dengan proses pengelasan lain seperti *oxyfuel welding* dan *arc welding*.

#### 4.2 Optimisasi Hasil Simulasi

Simulasi pengelasan laser yang telah dilakukan menghasilkan lebar lasan dan kedalaman penetrasi yang berbeda – beda seperti yang diuraikan pada **Tabel 4.2** dan **Tabel 4.3**. Perbedaan hasil simulasi ini menggambarkan bagaimana pengaruh daya laser dan diameter sinar laser yang digunakan dalam pengelasan terhadap lebar lasan dan kedalaman penetrasi baja SA-516 grade 70 yang dilas menggunakan pengelasan laser.

Pengaruh daya laser dan diameter sinar laser terhadap lebar lasan seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 4.1.1 yaitu untuk mendapatkan lebar lasan yang minimum maka daya laser dan diameter sinar laser yang digunakan juga harus minimum. Lebar lasan yang minimum mengurangi daerah HAZ dimana daerah tersebut memiliki struktur mikro dan sifat mekanik yang sulit dikontrol.

Sedangkan untuk mendapatkan kedalaman penetrasi yang maksimum seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 4.1.3 maka daya laser yang maksimum dan diameter sinar laser yang minimum harus digunakan. Kedalaman penetrasi menunjukkan seberapa tersambung material menurut ketebalannya akibat proses



pengelasan. Semakin dalam penetrasi maka semakin luas penampang yang menahan beban ketika material diberikan pembebanan sehingga beban yang diterima oleh material tanpa terjadi kegagalan menjadi lebih besar.

Dari data – data pengaruh diameter sinar laser dan daya laser yang digunakan terhadap lebar lasan dan kedalaman penetrasi dirumuskan nilai optimisasi diameter sinar laser dan daya laser untuk mendapatkan lebar lasan yang minimum dan kedalaman penetrasi yang maksimum.

Kondisi optimal untuk mendapatkan lebar lasan yang minimum serta kedalaman penetrasi yang maksimum diperoleh dengan melakukan analisis terhadap masing – masing parameter. Analisis dilakukan menggunakan Minitab18 dengan tipe analisis data *Design of Experiment (DOE) Respon Surface Methodology (RSM) Design Analysis*. Analisis data ini dilakukan dengan menganalisis setiap respon (lebar lasan dan kedalaman penetrasi) yang dipengaruhi oleh faktor – faktor masukannya (diameter sinar laser dan daya laser). Sehingga diperoleh rentang nilai diameter sinar laser dan daya laser yang optimal sesuai dengan respon keluaran yang diinginkan yaitu lebar lasan minimum dan kedalaman penetrasi maksimum.

#### 4.2.1 Analisis RSM Lebar Lasan

Pada analisis RSM lebar lasan terdapat dua faktor yang digunakan sebagai masukan yaitu diameter sinar laser dan daya laser. Kemudian untuk respon keluaran yang digunakan dalam analisis RSM yaitu lebar lasan.

Analisis RSM lebar lasan menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Lebar Lasan (mm)} &= -2,285 + 6,58X_1 + 0,000252X_2 \\ &\quad - 3,568X_1^2 + 0,000169X_1X_2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

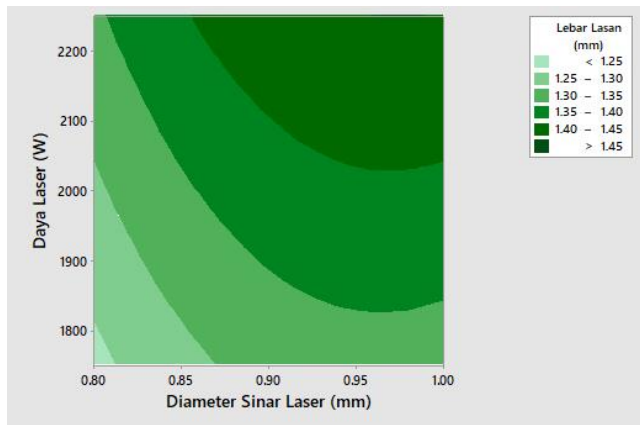


Dimana,

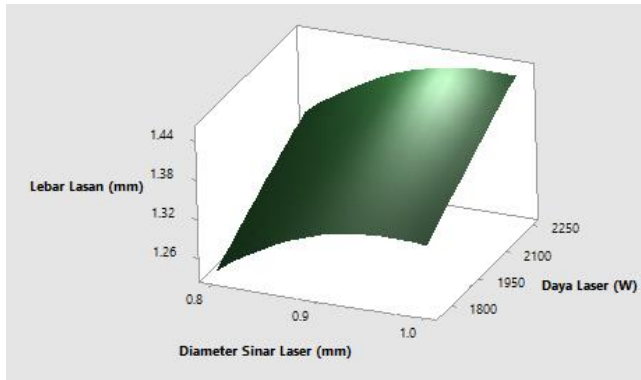
$X_1$  = Diameter sinar laser (mm)

$X_2$  = Daya laser (W)

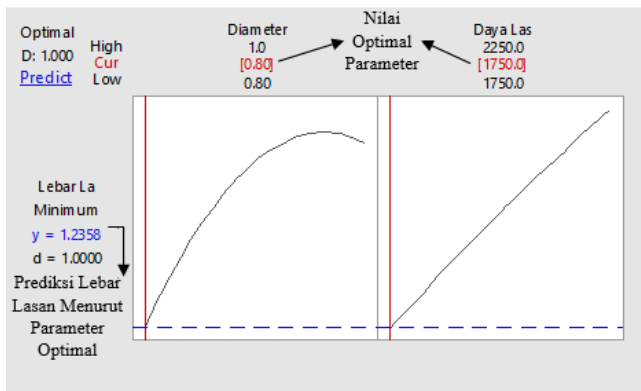
**Persamaan 4.1** merumuskan seberapa besar pengaruh dari diameter sinar laser dan daya laser terhadap lebar lasan serta bagaimana diameter sinar laser dan daya laser yang sesuai dengan kondisi optimal yaitu lebar lasan minimum. Untuk lebih jelasnya analisis RSM pada lebar lasan diplot menggunakan fitur *contour plot* seperti pada **Gambar 4.58**.



**Gambar 4.58** *Contour Plot* Lebar Lasan terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser



**Gambar 4.59** *Surface Plot* Lebar Lasan terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser



**Gambar 4.60** Analisis Lebar Lasan Minimum

**Gambar 4.58** menunjukkan *contour plot* berdasarkan warna yang berbeda – beda. Warna putih kehijauan menggambarkan lebar lasan kurang dari 1,25 mm dan warna hijau tua menggambarkan lebar lasan lebih dari 1,45 mm. Masing – masing warna dipengaruhi oleh dua faktor masukan yaitu diameter sinar laser pada sumbu x dan daya laser pada sumbu y.

**Gambar 4.59** merupakan *surface plot* hasil lebar lasan (mm) pada sumbu y menurut diameter sinar laser (mm) pada sumbu x



dan daya laser (W) pada sumbu z. Lebar lasan yang minimum digambarkan oleh permukaan yang semakin rendah yang dihasilkan oleh diameter sinar laser dan daya laser yang juga rendah.

**Gambar 4.60** merupakan hasil optimisasi untuk mendapatkan nilai lebar lasan yang minimum dengan menggunakan fitur *respons optimizer* pada perangkat lunak Minitab18. Dari hasil optimisasi tersebut didapatkan lebar lasan yang minimum yaitu 1,2358 mm dengan menggunakan parameter diameter sinar laser senilai 0,8 mm dan daya laser senilai 1750 W.

#### 4.2.2 Analisis RSM Kedalaman Penetrasi

Pada analisis RSM kedalaman penetrasi terdapat dua faktor yang digunakan sebagai masukan yaitu diameter sinar laser dan daya laser. Kemudian untuk respon keluaran yang digunakan dalam analisis RSM yaitu lebar lasan.

Analisis RSM kedalaman menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut :

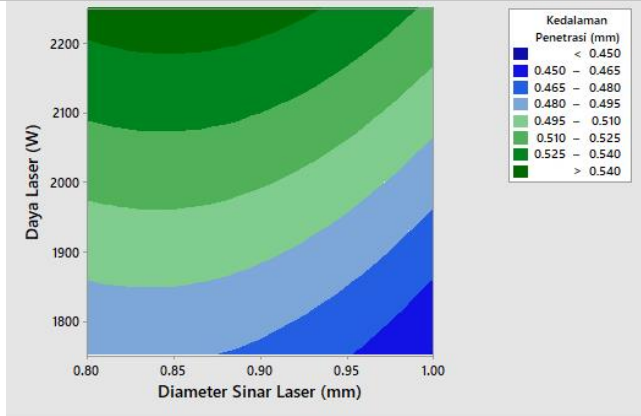
$$\begin{aligned} \text{Kedalaman Penetrasi (mm)} \\ &= -0,461 + 1,836X_1 + 0,000071X_2 \\ &\quad - 1,187X_1^2 + 0,00008X_1X_2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dimana,

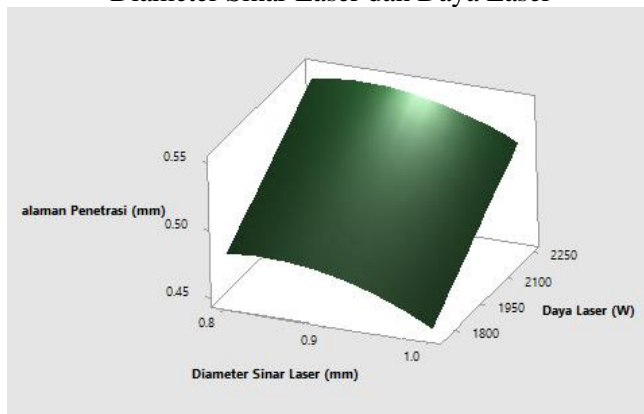
$X_1$  = Diameter sinar laser (mm)

$X_2$  = Daya laser (W)

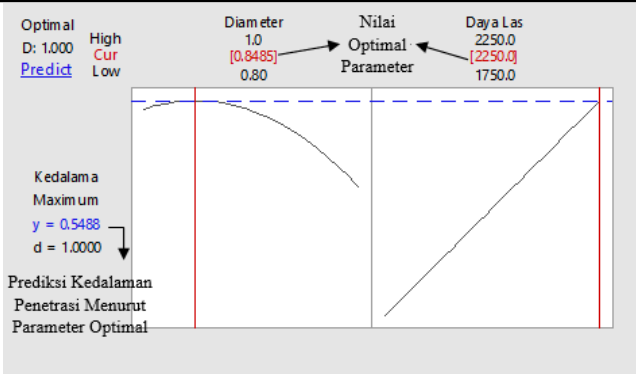
**Persamaan 4.2** merumuskan seberapa besar pengaruh dari diameter sinar laser dan daya laser terhadap kedalaman penetrasi serta bagaimana diameter sinar laser dan daya laser yang sesuai dengan kondisi optimal yaitu kedalaman penetrasi maksimum. Untuk lebih jelasnya analisis RSM pada lebar lasan diplot menggunakan fitur *contour plot* seperti pada **Gambar 4.61**.



**Gambar 4.61** *Contour Plot* Kedalaman Penetrasi terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser



**Gambar 4.62** *Surface Plot* Lebar Lasan terhadap Diameter Sinar Laser dan Daya Laser



**Gambar 4.63** Analisis Kedalaman Penetrasi Maksimum

**Gambar 4.61** menunjukkan *contour plot* berdasarkan warna yang berbeda – beda. Warna biru tua menggambarkan kedalaman penetrasi kurang dari 0,45 mm dan warna hijau tua menggambarkan kedalaman penetrasi lebih dari 0,54 mm. Masing – masing warna dipengaruhi oleh dua faktor masukan yaitu diameter sinar laser pada sumbu x dan daya laser pada sumbu y.

**Gambar 4.62** merupakan *surface plot* hasil kedalaman penetrasi (mm) pada sumbu y menurut diameter sinar laser (mm) pada sumbu x dan daya laser (W) pada sumbu z. Kedalaman penetrasi yang maksimum digambarkan oleh permukaan yang semakin tinggi yang dihasilkan oleh diameter sinar laser yang kecil dan daya laser yang tinggi.

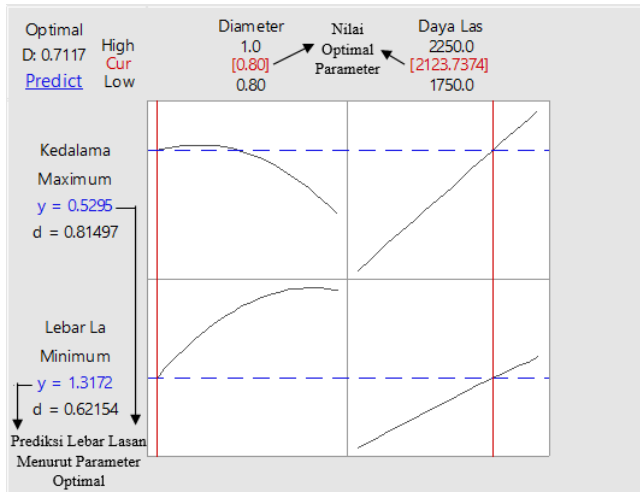
**Gambar 4.63** merupakan hasil optimisasi untuk mendapatkan nilai kedalaman penetrasi yang minimum dengan menggunakan fitur *response optimizer* pada perangkat lunak Minitab18. Dari hasil optimisasi tersebut didapatkan kedalaman penetrasi yang maksimum yaitu 0,5488 mm dengan menggunakan parameter diameter sinar laser senilai 0,8485 mm dan daya laser senilai 2250 W.





### 4.2.3 Hasil Analisis RSM dengan *Multiple Respon*

**Gambar 4.60** dan **4.63** menunjukkan grafik optimisasi yang berbeda karena grafik – grafik tersebut dibuat tanpa mengindahkan pengaruh faktor masukan terhadap respon yang lain. Pengaruh yang dimaksud yaitu pengaruh diameter sinar laser dan daya terhadap respon lebar lasan saja atau kedalaman penetrasi saja tanpa memperhatikan pengaruh faktor masukan terhadap respon satu dengan yang lain. Untuk mendapatkan hasil optimisasi pada dua respon yang berbeda maka optimisasi harus dilakukan secara bersamaan untuk kedua respon tersebut. Pengaturan optimisasi yang harus dilakukan yakni mengatur optimisasi lebar lasan menjadi *minimize* dan kedalaman penetrasi menjadi *maximize*.



**Gambar 4.64**

Hasil optimisasi yang memperhitungkan pengaruh parameter las dengan semua respon (lebar lasan dan kedalaman penetrasi) ditunjukkan oleh **Gambar 4.64**. Untuk mendapatkan lebar lasan dan kedalaman penetrasi yang betul – betul optimal maka parameter yang digunakan yaitu diameter sinar laser senilai 0,8 mm dan daya laser senilai 2123,7374 W. Akan tetapi, pada



peralatan pengelasan laser yang sebenarnya sulit untuk mengatur daya laser menjadi 2123,7374 W sehingga alangkah lebih baik apabila parameter daya laser yang direkomendasikan berupa rentang yaitu 2000 – 2250 W sehingga dihasilkan rentang lebar laser senilai 1,2916 – 1,3419 mm dan rentang kedalaman penetrasi senilai 0,5134 – 0,5459 mm.

### 4.3 Validasi Hasil Simulasi

Untuk membenarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan perangkat lunak seperti ANSYS Mechanical APDL *Transient Thermal* sehingga didapatkan dimensi lebar lasan dan kedalaman penetrasi lasan baja SA-516 *grade 70*. Perhitungan matematis dilakukan untuk melakukan validasi hasil lebar lasan dan kedalaman penetrasi akibat dari penggunaan daya laser dan diameter sinar laser yang digunakan dalam pengelasan. Validasi dilakukan dengan menghitung temperatur puncak matematis menggunakan **Persamaan 2.5** dan **2.8** dari diameter sinar laser dan daya laser 0,8 mm dan 2000 W.

Dari **Persamaan 2.5** menurut Jennney (2001) diketahui temperatur puncak yang sebenarnya dari suatu titik acuan apa bila telah diketahui jarak titik acuan tersebut dari *weld centerline*. Dari hasil simulasi dengan diameter sinar laser 0,8 mm dan daya laser 2000 W, diketahui dari **Gambar 4.1** bahwa titik dengan temperatur puncak 1040,5 K berjarak 0,792 mm dari *weld centerline*. Dengan temperatur awal 300 K, ketebalan plat 3 mm, *specific heat* volumetrik ( $\rho C$ ) 0,0044 J/mm<sup>3</sup>.°C (AWS,2001), temperatur lebur 1781 K, dan  $H_{net}$  35 J/mm (**Persamaan 2.4**). Maka didapatkan temperatur puncak logam pada titik acuan sebesar :

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e\rho ChY}}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$
$$\frac{1}{T_p - 300 K} = \frac{4,13 \cdot 0,0044 \frac{J}{mm^3 \cdot ^\circ C} \cdot 3 mm \cdot 0,792 mm}{35 \frac{J}{mm}} + \frac{1}{1781 K - 300 K}$$



$$\frac{1}{T_p - 300 K} = 0,00123362 K^{-1} + 0,00000187 K^{-1}$$

$$\frac{1}{T_p - 300 K} = 0,0012355 K^{-1}$$

$$T_p - 300 K = 809,389 K$$

$$T_p = 1109,389 K$$

Temperatur puncak pada titik acuan dengan jarak 0,792 mm dari *weld centerline* menurut **Gambar 4.1** adalah 1040,5 K. Hasil perhitungan matematis hanya memiliki selisih sebesar 68,889 K (6,62% eror) sehingga menggambarkan bahwa hasil simulasi sesuai dengan hasil secara matematisnya. Keakuratan perhitungan ini dipengaruhi oleh kehalusan *mesh* yang dihasilkan pada proses *meshing* geometri pengelasan. Semakin halus *mesh* yang dihasilkan maka semakin kecil ukuran dari *element* yang dihasilkan. Akibatnya proses interpolasi hasil temperatur di dalam *mesh* menjadi lebih akurat.

Validasi juga dihitung dengan **Persamaan 2.8** oleh Xin Xue (2017). Persamaan tersebut menggambarkan hubungan antara penetrasi, konduktivitas termal, daya laser, diameter sinar laser dan *travel speed* hasil proses pengelasan.

$$h = \frac{P}{\rho D v [C(T_m - T_0) + L_m]}$$

$$h = \frac{2000 W}{7827,52 \frac{kg}{m^3} \times 8 \times 10^{-4} m \times 0,05 \frac{m}{s} \times \left[ 452,92 \frac{J}{Kg \cdot K} (1781 K - 300K) + 270000 \frac{J}{Kg} \right]}$$

$$h = \frac{2000 W}{0,3131 \frac{kg}{ms} \times 940774,52 \frac{J}{Kg}}$$

$$h = \frac{2000 W}{294556,5022 \frac{J}{ms}}$$



$$h = 0,00679 \text{ m}$$

$$h = 0,679 \text{ mm}$$

Kedalaman penetrasi hasil simulasi adalah 0,652 mm sedangkan kedalaman penetrasi hasil perhitungan matematis adalah 0,679 mm. Kedua hasil ini menghasilkan selisih sebesar 0,027 mm (4,141 % error). Karena eror yang didapatkan relatif kecil maka kedalaman penetrasi hasil simulasi nilainya akurat dan mendekati hasil kedalaman penetrasi secara matematis.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

1. Diameter sinar laser yang semakin kecil menurunkan lebar lasan, memperlambat laju solidifikasi, serta meningkatkan kedalaman penetrasi dan lebar HAZ.
2. Daya laser yang semakin tinggi meningkatkan lebar lasan, memperlambat laju solidifikasi, serta meningkatkan kedalaman penetrasi dan lebar HAZ.
3. Agar hasil pengelasan menjadi optimal maka direkomendasikan untuk menggunakan parameter diameter sinar laser 0,8 mm serta daya laser dengan rentang 2000 – 2250 W.

#### **5.2 Saran**

1. Hasil persebaran temperatur semakin akurat jika *meshing* semakin halus.
2. Memperhitungkan pengaruh dari radiasi terhadap *heat loss* proses pengelasan laser.
3. Memperhitungkan pengaruh evaporasi terhadap persebaran temperatur pengelasan laser.
4. Melakukan permodelan terhadap perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan laser.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahn J., L. Chen, E. He, J. P. Dear, C. M. Davies. 2018. **Optimisation of Process Parameters and Weld Shape of High Power Yb-fibre Laser Welded 2024-T3 Aluminium Alloy**. UK : Imperial College London.
- Akbari M., Seyfolah S., Afshin P., Mohsen H., Masoud A., dan Mohammad J. T. 2016. **Numerical Simulation and Designing Artificial Neural Network for Estimating Melt Pool Geometry and Temperature Distribution in Laser Welding of Ti6Al4V Alloy**. Iran : Islamic Azad University.
- ANSYS, Inc. 2010. **ANSYS Mechanical Heat Transfer**. USA : United States Government.
- ASME SA-516/SA-516M. 2003. **Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower Temperature Service**. ASME BPVC.
- Bhadra Rakesh, Pankaj B., dan M. Ravi S. 2014. **Effect of Process Parameters on Thermal History of Laser Welding of AISI-304 Stainless Steel**. India : IIT Guwahati.
- Callister William D., dan David G. R. 2014. **Materials Science and Engineering : An Introduction**. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Casalino G., F. Curcio, dan F. Memola C. M. 2005. **Investigation on Ti6Al4V Laser Welding Using Statistical and Taguchi Approaches**. Italy : Politechnique of Bari.
- Chen Xiaolin, Yijun L. 2015. **Finite Element Modelling and Simulation with Ansys Workbench**. USA : CRC Press.
- Dawes Christopher. 1992. **Laser Welding : A Practical Guide**. UK : Abington Publishing.
- De A., C. A. Walsh, S. K. Maiti dan H. K. D. H. Bhadesia. 2003. **Prediction of Cooling Rate and Microstructure in Laser Spot Welds**. India : Indian Institute of Technology.



- Esfahani M.R. Nekouie, J. Coupland, dan S. Marimuthu. 2015. **Numerical Simulation of Alloy Composition in Dissimilar Laser Welding**. UK : Loughborough University.
- Ghosh Aniruddha, dan Somnath Chattopadhyaya. 2011. **Prediction of HAZ Width of Submerged Arc Welded Plates**. India : ISM.
- Goldak John A., dan Mehdi Akhlaghi. 2005. **Computational Welding Mechanics**. USA : Springer.
- Groover Mikell P. 2010. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. USA : John Wiley & Sons, Inc.
- Hecht, Jeff. 1999. **The Laser Guidebook**. USA : Mcgraw-Hill.
- Jennney, A.O. 2001. **Welding Handbook**. Edisi 9 Volume 1. USA : American Welding Society.
- Jiang, P., Chaochao W., Qi Z., Xinyu S., Leshi S. dan Xiongbin L. 2016. **Optimization of Laser Welding Process Parameters of Stainless Steel 316L Using FEM, Kriging and NSGA-II**. China : University of Science and Technology.
- Katayama Seiji. 2013. **Handbook of Laser Welding Technologies**. Japan : Osaka University.
- Oyyaravelu R., Palaniyandi K., dan Natarajan A. 2016. **Metallurgical and Mechanical Properties of Laser Welded High Strength Low Alloy Steel**. India : VIT University.
- Meco Sonia, Luis C., Supriyo G., Stewart W., dan Norman M. 2017. **Laser Welding of Steel to Aluminium : Thermal Modelling and Joint Strength Analysis**. UK : University Way.
- Mi Gaoyang, Lingda X., Chunming W., Xiyuan H., dan Yanhong W. 2016. **A Thermal-Metallurgical-Mechanical Model for Laser Welding Q235 Steel**. China : Huazhong University of Science and Technology.

- Olabi A. G., G. Casalino, K. Y. Benyounis, dan M. S. J. Hashmi. 2006. **An ANN and Taguchi Algorithms Integrated Approach to the Optimization of CO<sub>2</sub> Laser Welding**. Ireland : Dublin City University.
- Piekarsa Wiesława, dan Dorota Goszczyńska-Króliszewska. 2013. **Numerical Simulation of Deformations in T-Joint Welded by The Laser Beam**. Poland : Częstochowa University of Technology.
- Ragavendran M., N. Chandrasekhar, R. Ravikumar., Rajesh S. dan M. Vasudevan. 2017. **Optimization of Hybrid Laser – TIG Welding of 316LN Steel Using Response Surface Methodology (RSM)**. India : Bhabha National Institute.
- Shanmugam N. Siva, G. Buvanashakaran, dan K. Sankaranarayananasamy. 2012. **Some Studies on Weld Bead Geometries for Laser Spot Welding Process Using Finite Element Analysis**. India : National Institute of Technology.
- Sundqvist Jesper. 2015. **Heat Conduction Effects During Laser Welding**. Sweden : Luleå University of Technology.
- Thermo-Physical Properties Extended General*. Perangkat Lunak JMatPro 7.0.0. Guildford, UK.
- Torkamany M. J., J. Sabbaghzadeh, M. J. Hamedi. 2012. **Effect of Laser Welding Mode on the Microstructure and Mechanical Performance of Dissimilar Laser Spot Welds between Low Carbon and Austenitic Stainless Steels**. Iran : Iranian National Centre for Laser Science and Technology (INLC).
- Totten G., M. Howes, dan T. Inoue. 2002. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. USA : ASM International.
- Tsirkas S. A., P. Papanikos, dan Th. Kermanidis. 2003. **Numerical Simulation of the Laser Welding Process in Butt-Joint Specimens**. Greece : University of Patras.

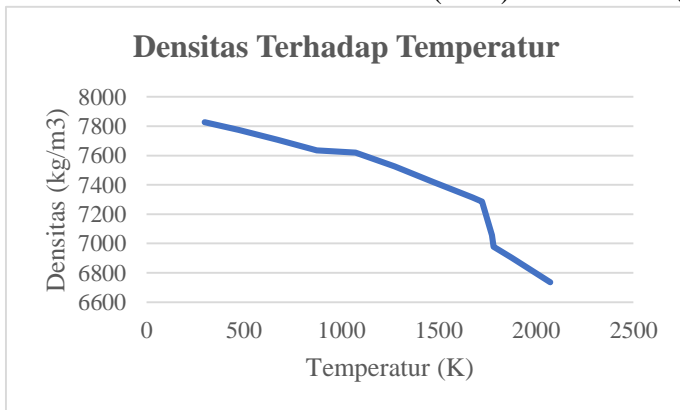
- Wiryosumarti, Okumura, dan Harsono Prof. 1998. **Teknologi Pengelasan Logam**. Jakarta : PT. Pradnya Paramitha.
- Wu Wenyong, Shengsun Hu, dan Junqi Shen. 2015. **Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Laser Welded Dissimilar Joints between Ferritic Stainless Steel and Carbon Steel**. China : Tianjin University.
- Xin Xue. 2017. **Effect of Pulsed Nd:YAG Laser Welding Parameters on Penetration and Microstructure Characterization of a DP1000 Steel Butt Joint**. China : School of Mechanical Engineering and Automation.
- Yolanda Tiara Ansellya R. 2018. **Studi Optimisasi Heat Flux dan Welding Speed pada Pengelasan Laser Fiber Terhadap Lebar Lasan, Kedalaman Penetrasi dan Tegangan Sisa Esshete 1250 dengan Metode Elemen Hingga**. Surabaya : ITS.
- Yan Jun, Ming Gao, dan Xiaoyan Z. 2010. **Study on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Joints by TIG, Laser and Laser-TIG Hybrid Welding**. China : Huazhong University of Science and Technology.

## LAMPIRAN

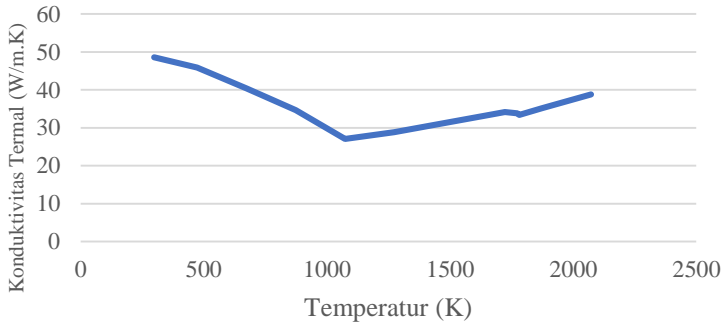
### I. Sifat Thermo-Fisika Baja SA-516 Grade 70

Temp. (K)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Konduktivitas Termal (W/m.K)	Specific Heat (J/kg.K)	Entalpi (x10 <sup>9</sup> J/m <sup>3</sup> )
298	7827	49	453	0,1247
473	7774	46	522	0,9975
673	7708	40	619	1,9950
873	7636	35	801	2,9926
1073	7620	27	995	3,9901
1273	7526	29	628	4,9876
1473	7419	31	662	5,9851
1673	7314	34	694	6,9827
1723	7287	34	1039	7,2321
1773	7056	34	7650	9,1102
1781	6979	33	-	9,4107
1873	6904	35	827	9,6870
2073	6735	39	828	10,840
2773	-	194	-	-

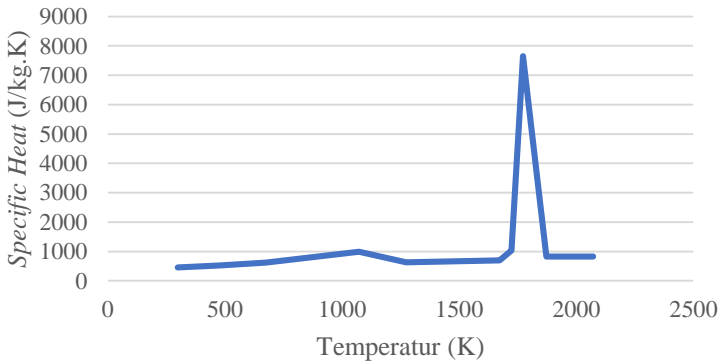
JMatPro (2010) dan Piekarsa (2013)

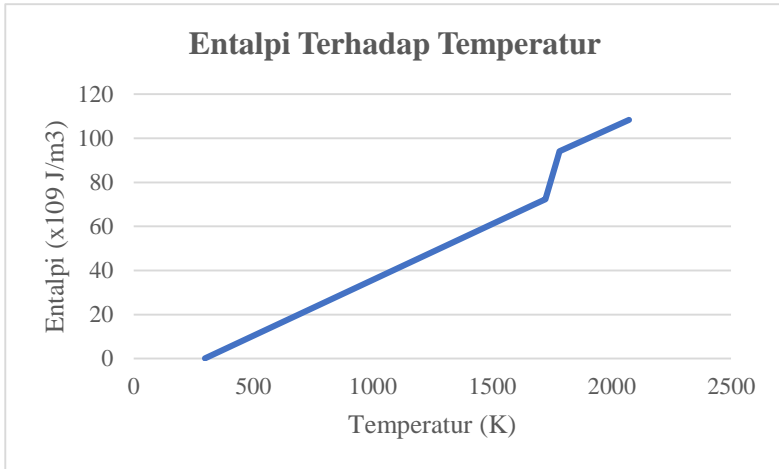


### Konduktivitas Termal Terhadap Temperatur



### *Specific Heat* Terhadap Temperatur



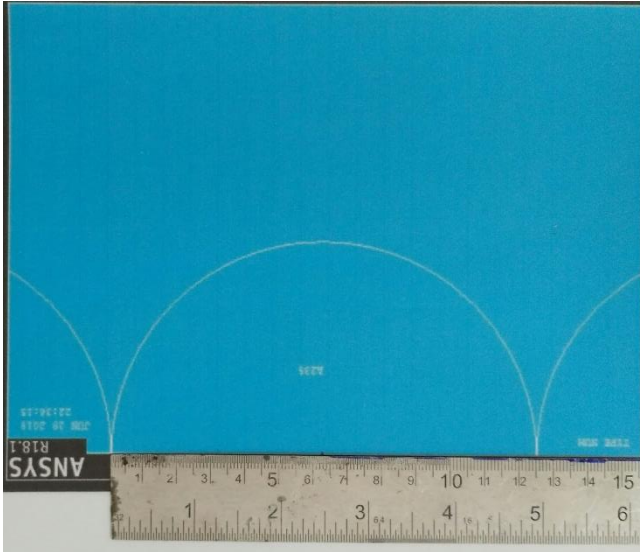


## II. Pengukuran Lebar Lasan dan Kedalaman Penetrasi

- A. Pengukuran Dimensi Geometri Sinar Laser 1 mm pada Gambar yang Dicitak Sebagai Acuan Skala Pengukuran Lebar Lasan dan Lebar HAZ (*Top View*)



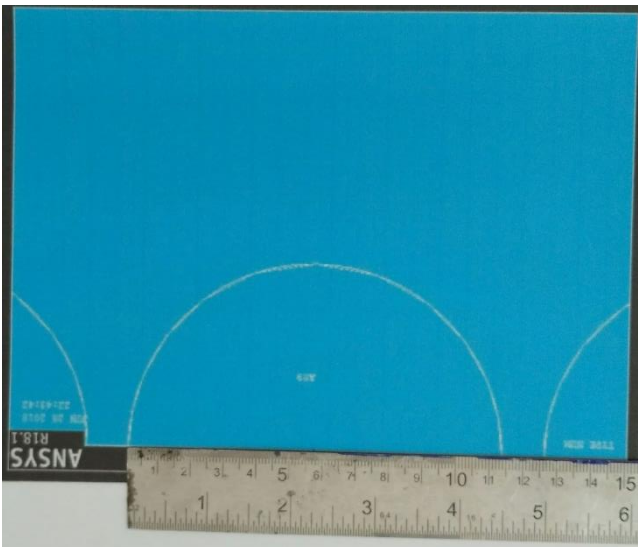
- B. Pengukuran Dimensi Geometri Sinar Laser 1 mm pada Gambar yang Dicitak Sebagai Acuan Skala Pengukuran Kedalaman Penetrasi (*Right View* atau *Cross Section View*)



- C. Pengukuran Dimensi Geometri Sinar Laser 0,9 mm pada Gambar yang Dicitak Sebagai Acuan Skala Pengukuran Lebar Lasan dan Lebar HAZ (*Top View*)

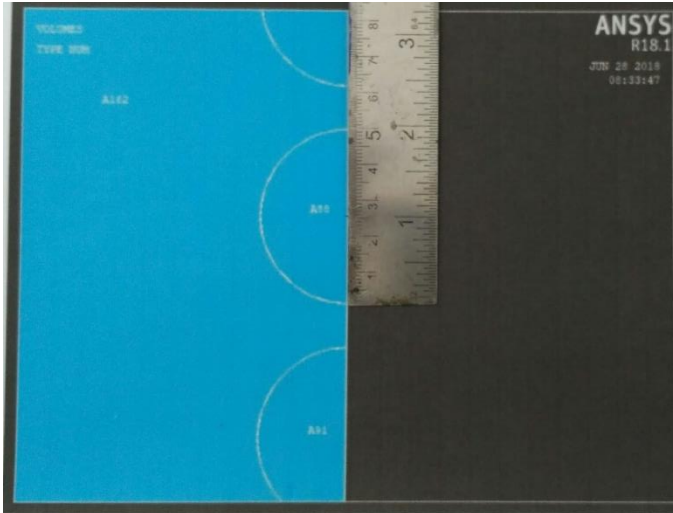


D. Pengukuran Dimensi Geometri Sinar Laser 0,9 mm pada Gambar yang Dicitak Sebagai Acuan Skala Pengukuran Kedalaman Penetrasi (*Right View* atau *Cross Section View*)

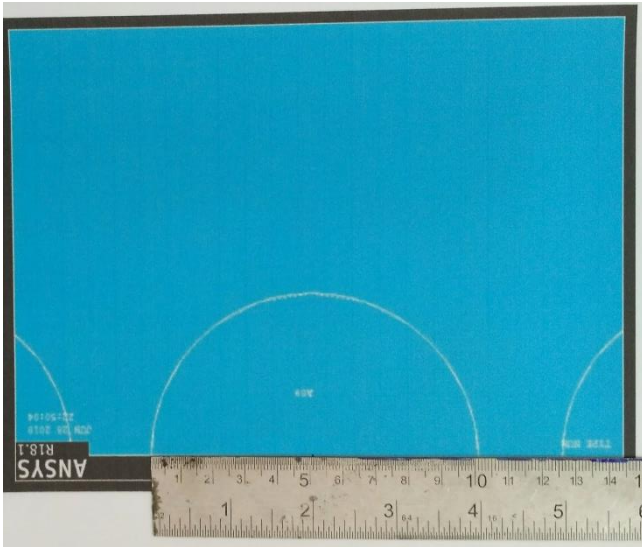




- E. Pengukuran Dimensi Geometri Sinar Laser 0,8 mm pada Gambar yang Dicitak Sebagai Acuan Skala Pengukuran Lebar Lasan dan Lebar HAZ (*Top View*)

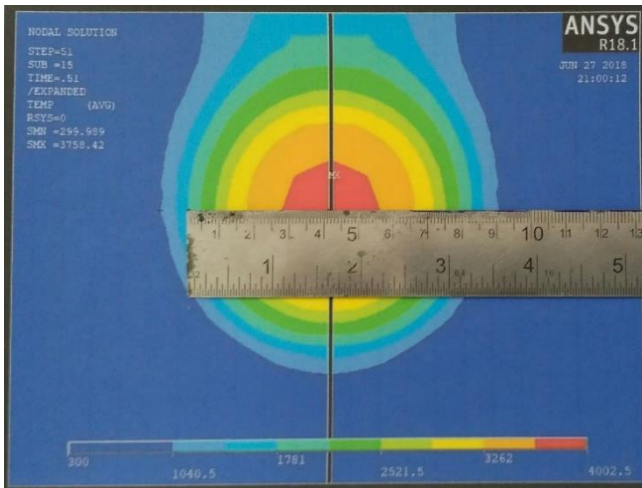


- F. Pengukuran Dimensi Geometri Sinar Laser 0,8 mm pada Gambar yang Dicitak Sebagai Acuan Skala Pengukuran Kedalaman Penetrasi (*Right View* atau *Cross Section View*)

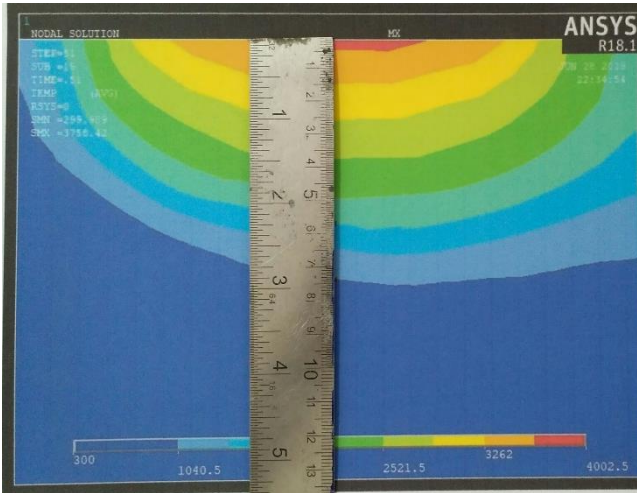


**Simulasi Kasus 1 (1 mm; 1750 W)**

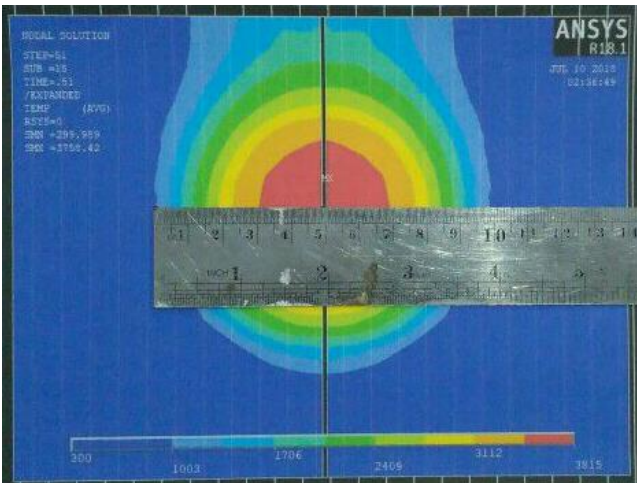
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



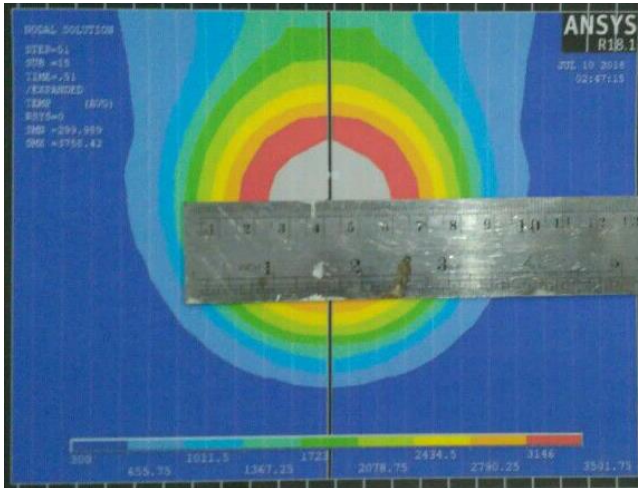
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

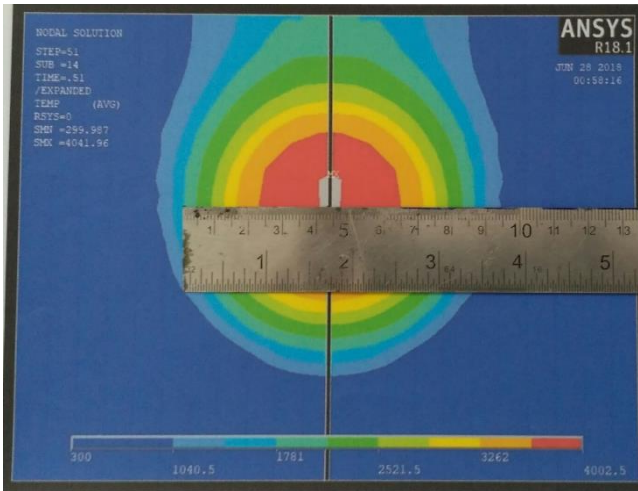


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

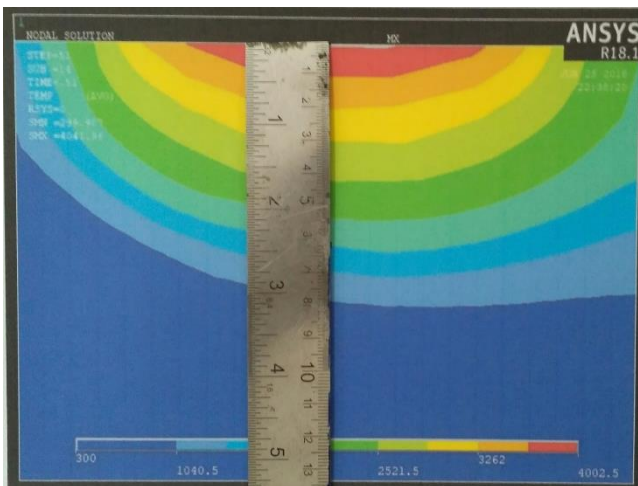


**Simulasi Kasus 2 (1 mm; 2000 W)**

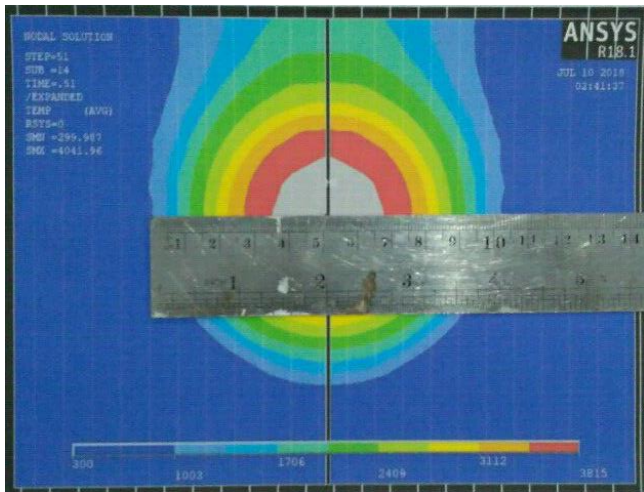
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



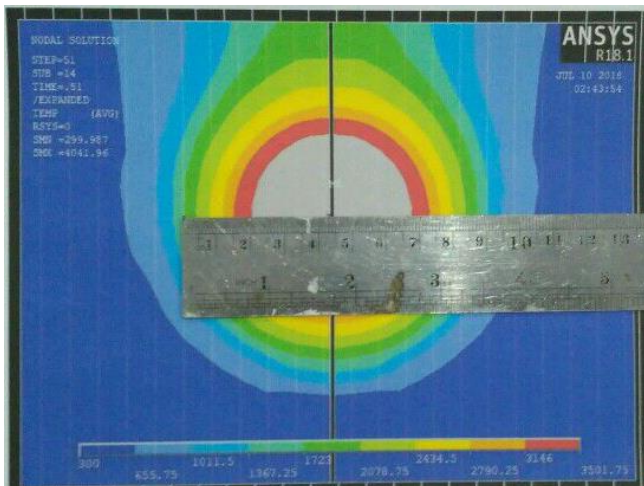
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

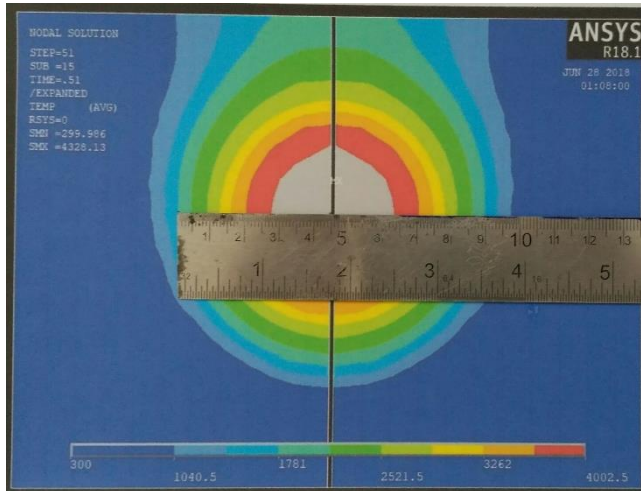


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

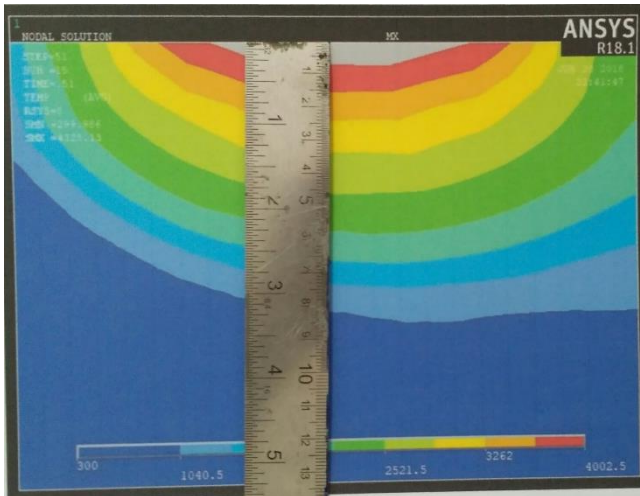


### Simulasi Kasus 3 (1 mm; 2250 W)

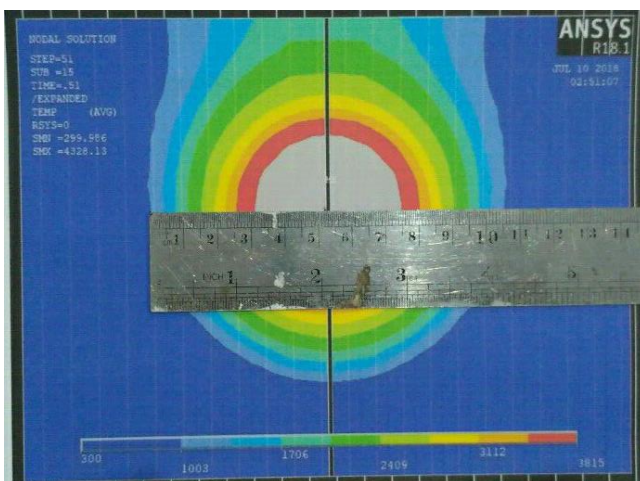
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)

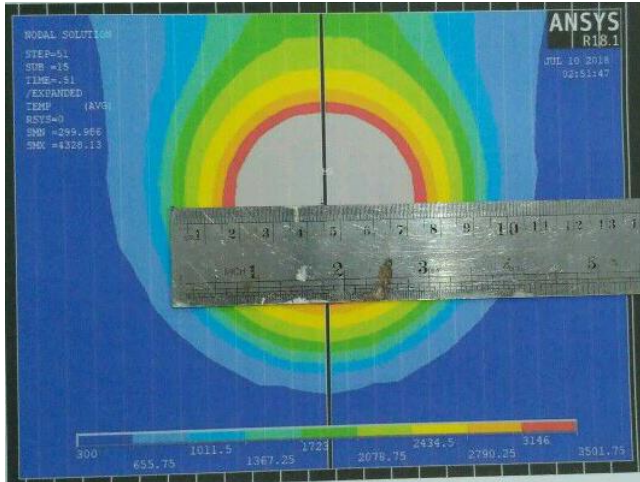


c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



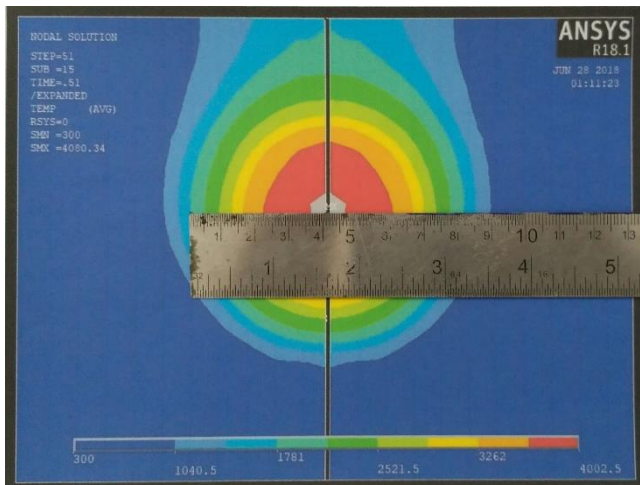


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

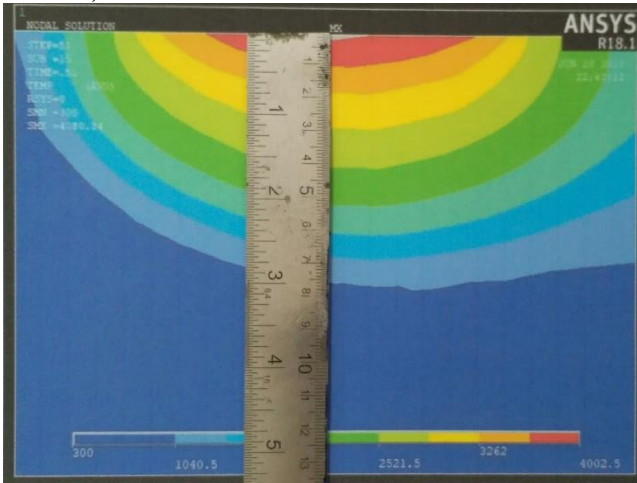


#### Simulasi Kasus 4 (0,9 mm; 1750 W)

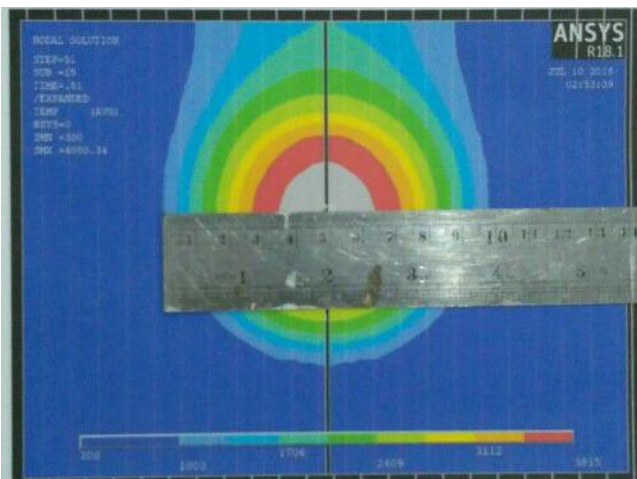
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



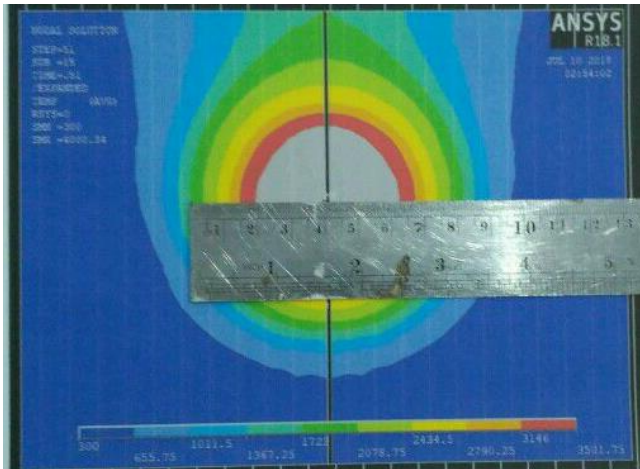
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

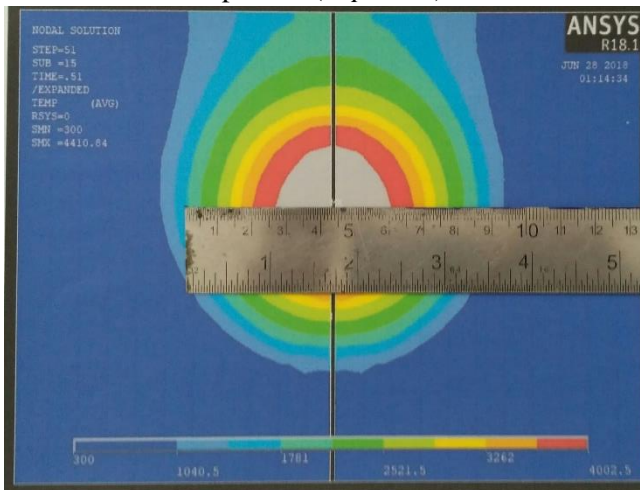


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

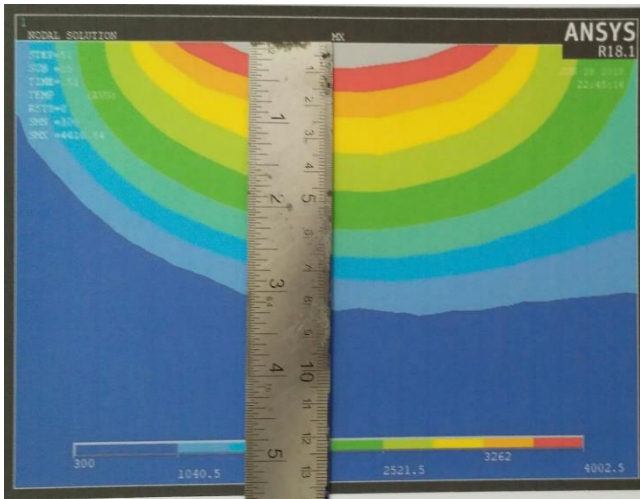


### Simulasi Kasus 5 (0,9 mm; 2000 W)

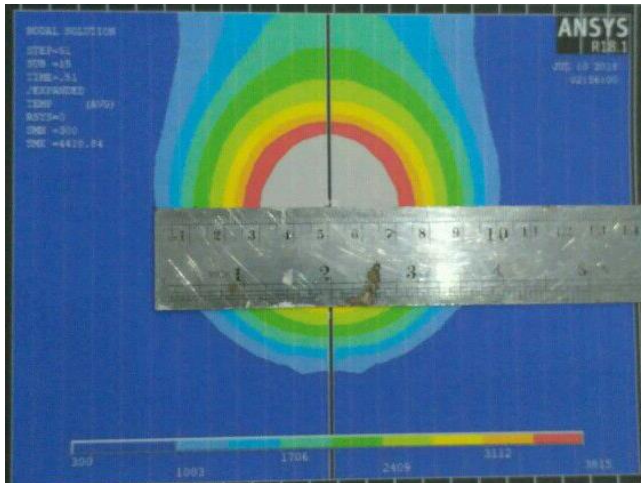
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



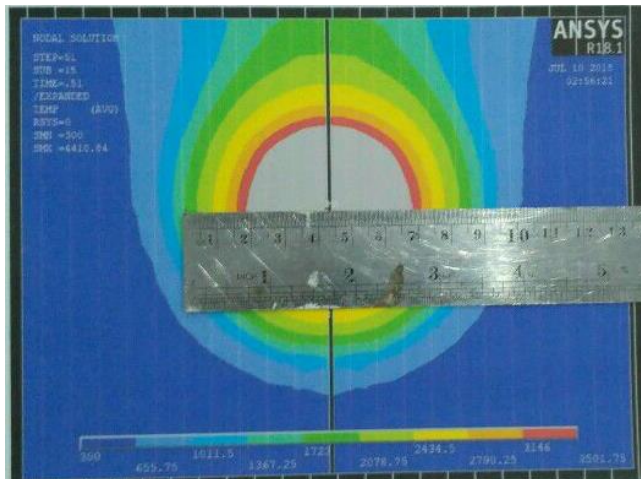
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

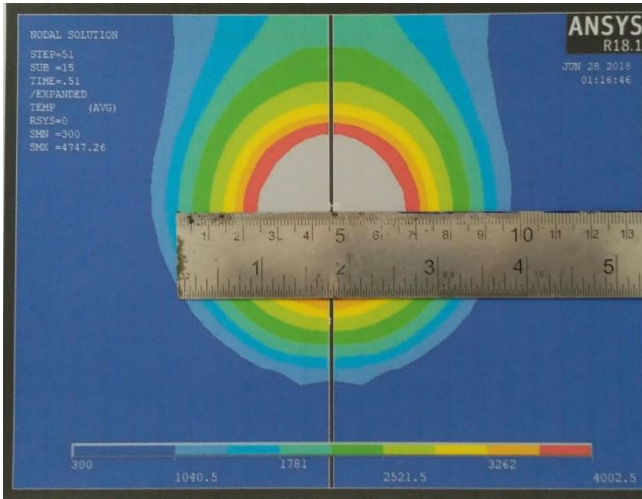


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

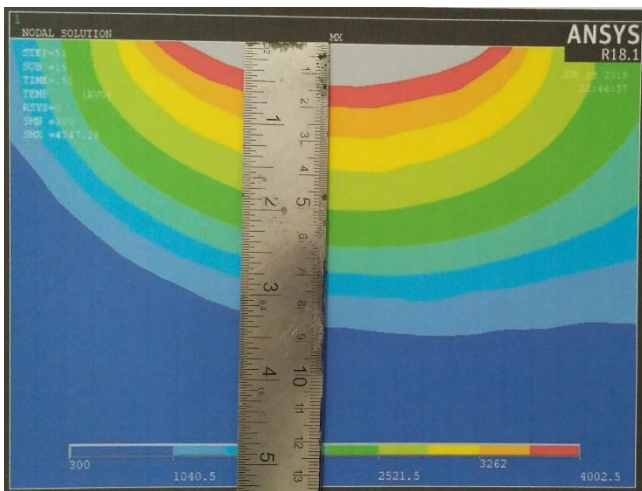


**Simulasi Kasus 6 (0,9 mm; 2250 W)**

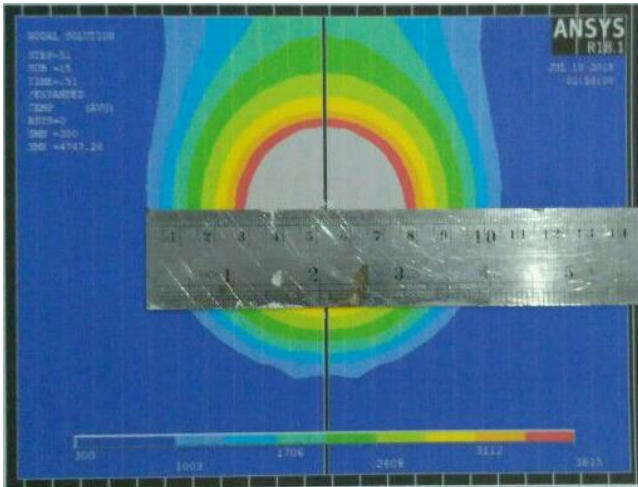
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



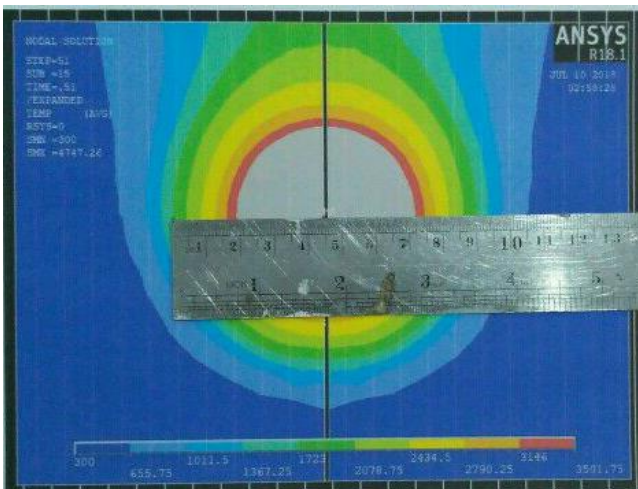
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

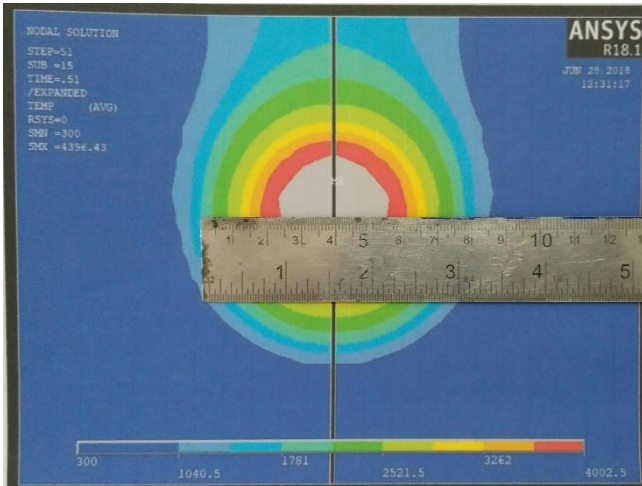


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

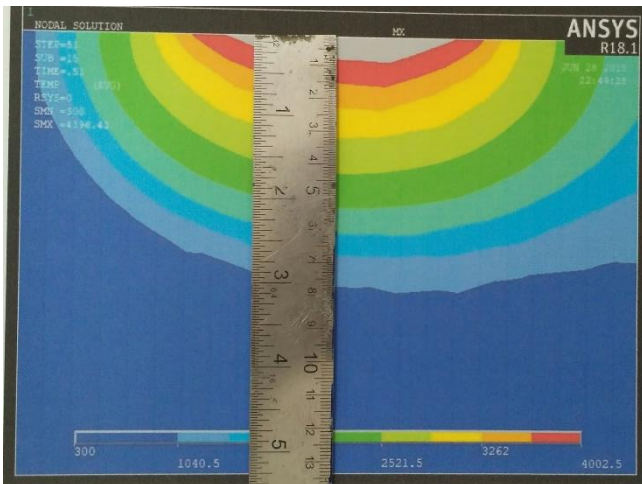


### Simulasi Kasus 7 (0,8 mm; 1750 W)

- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

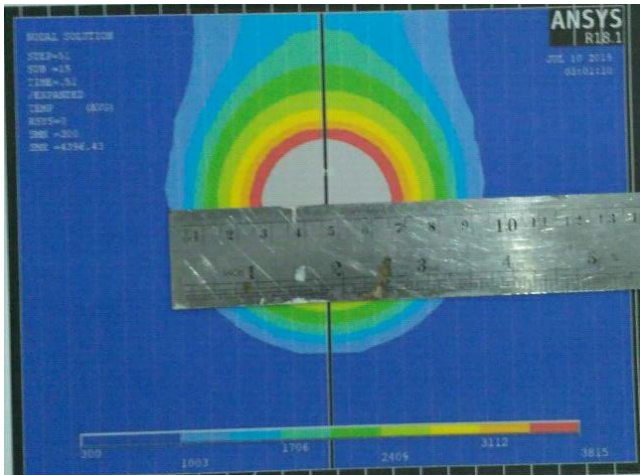


- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)

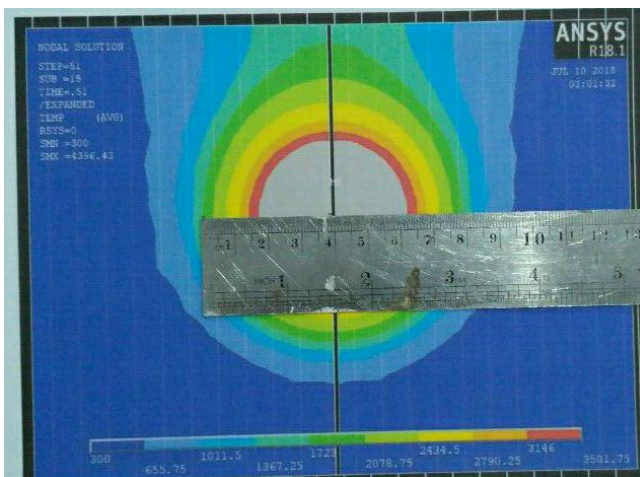




- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

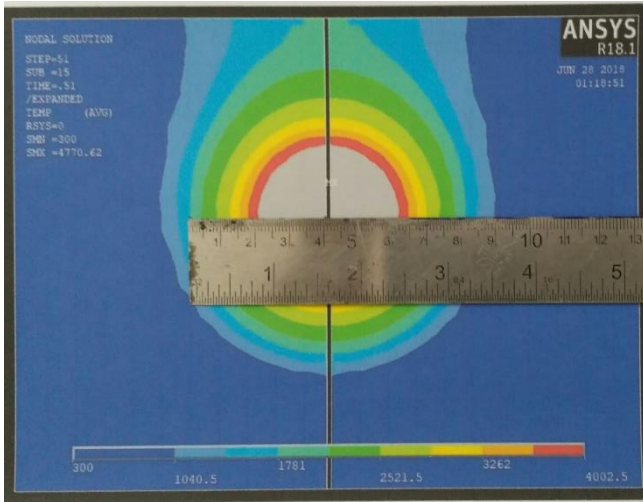


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

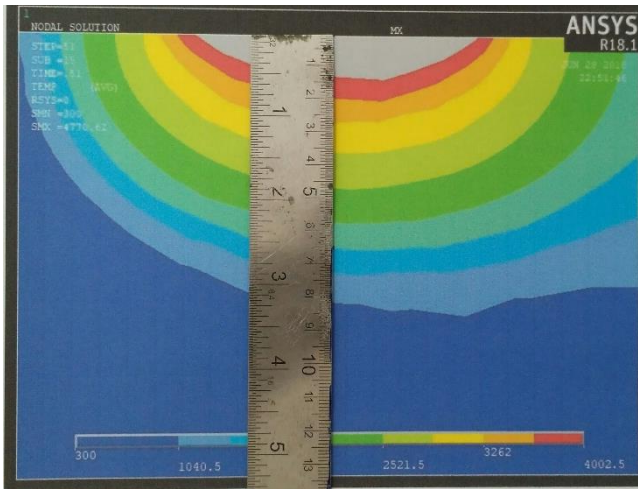


### Simulasi Kasus 8 (0,8 mm; 2000 W)

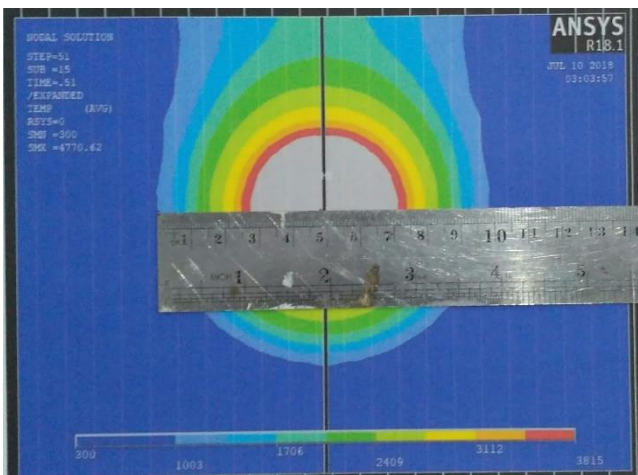
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



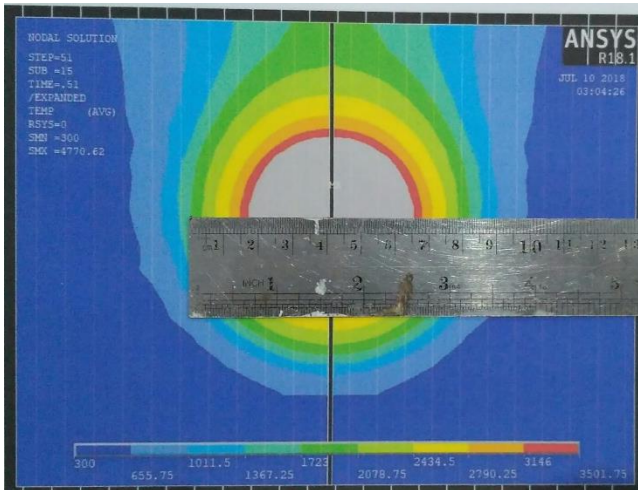
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

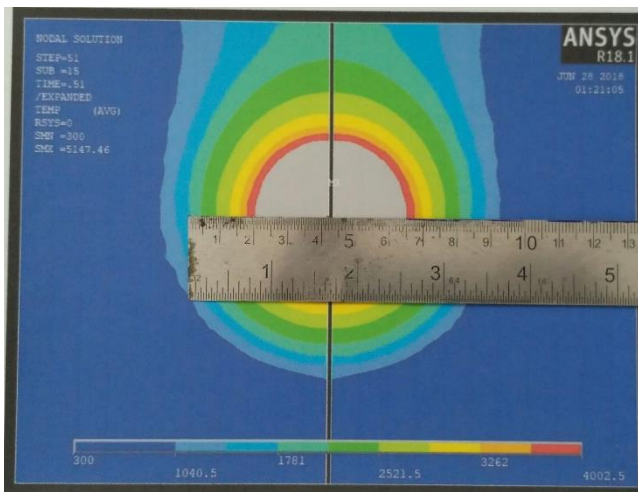


- d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)

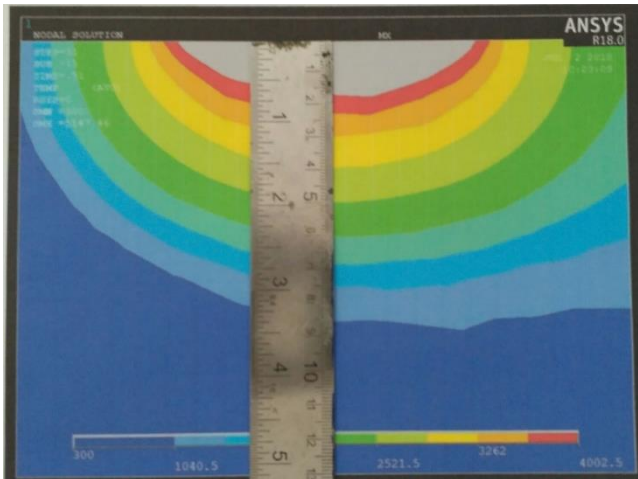


### Simulasi Kasus 9 (0,8 mm; 2250 W)

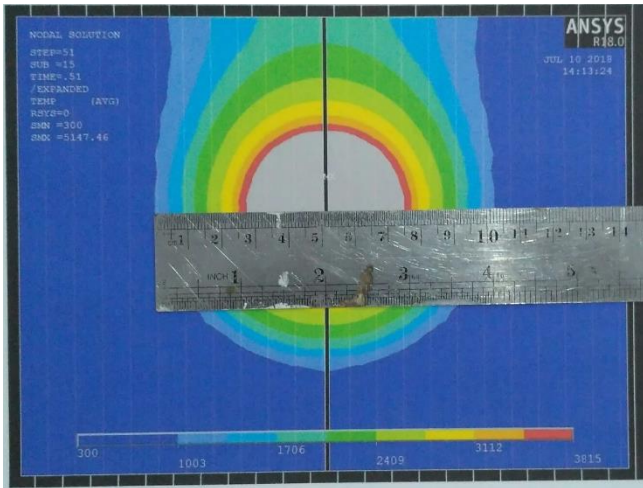
- a. Pengukuran Dimensi Lebar Lasan pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



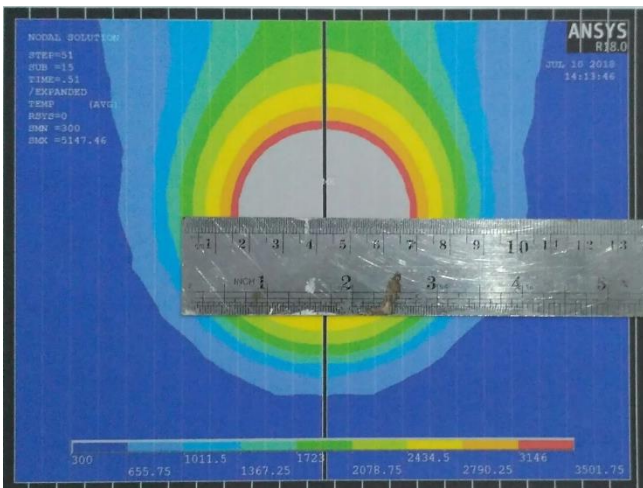
- b. Pengukuran Dimensi Kedalaman Penetrasi pada Gambar Persebaran Temperatur (*Right View* atau *Cross Section View*)



- c. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1003 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



d. Pengukuran Dimensi Lebar HAZ untuk Temperatur 1723 K pada Gambar Persebaran Temperatur (*Top View*)



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya, tidak lupa shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir. Tugas Akhir ini diselesaikan untuk berkontribusi terhadap bangsa serta memenuhi mata kuliah wajib yang harus diambil oleh mahasiswa Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), penulis telah menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “*Studi Optimisasi Diameter Sinar Laser dan Daya Laser pada Pengelasan Laser terhadap Lebar Lasan dan Kedalaman Penetrasi SA-516 Grade 70 dengan Metode Elemen Hingga*”

Penulis ingin berterima kasih juga kepada :

1. Allah SWT atas karunia, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Kedua orang tua penyusun Bapak Samargi dan Ibu Kusmedihati serta segenap keluarga besar Soepono dan Soebekti atas semua doa, dukungan moril dan materiil yang selalu dicurahkan.
3. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing pertama Tugas Akhir serta dosen wali yang telah memberikan bekal dan ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing kedua Tugas Akhir yang telah memberikan bekal dan ilmu yang sangat bermanfaat.
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng., selaku Ketua Departemen Teknik Material FTI-ITS.



6. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material FTI-ITS, yang turut serta membantu secara administratif pendaftaran sidang tugas akhir.
7. Saudari penulis Angesti Drea Habsari sebagai sumber motivasi dalam menuntut ilmu sampai jauh.
8. Teman partner TA permodelan seperjuangan Fajar Aditya B.P., Hendy Roesma Wardhana dan Rachmad A. Ghofeer.
9. Teman-teman Lab. Metalurgi yang telah membantu tugas akhir saya selama 1 semester yang sudah banyak memberi saran serta ilmu yang bermanfaat.
10. Sahabat-sahabat sesama Grader Lab. Metalurgi 2016/2017 dan 2017/2018 yang sering travelling dan menghabiskan waktu bersama serta saling bertukar ilmu.
11. Tiara Ansellya Resty Yolanda selaku alumni tugas akhir semester 7 dan partner non formal penulis, yang masih menyempatkan waktunya untuk *sharing* pengalaman serta menyemangati penulis dalam pengerjaan TA.
12. Sahabat-sahabat penulis yang sering bercanda dan bertukar pikiran di warkop. Leo, Azmi, HN, Imam, Slamet, Megah, Surya, Luki, Zulfikar, Sinung dan teman-teman lain yang tergabung pada Tiliskitip Group.
13. Teman-teman yang telah membuat saya nyaman di Surabaya. Bobby, Odi, Ferdi, Reza, Chang, Vigita, Zahra, Thalyta, Aninur, Adnan, Wiwin, Alvan, dan Teman-teman MT-16 lainnya.
14. Dan seluruh pihak yang tak bisa di sebutkan satu persatu yang telah memberikan partisipasi dalam tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan laporan ini masih membutuhkan banyak masukan. Oleh karena itu, penulis

mengharapkan kritik yang membangun dari pembaca demi perbaikan dan kemajuan bersama.

Surabaya, Juli 2018

Penulis,  
Brahmanu Wisnu Saputro

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 5 Desember 1996. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Samargi dan Kusmedihati. Riwayat pendidikan penulis adalah TK 17 Agustus, SMP Negeri 13 Jakarta, SMA Negeri 6 Jakarta, dan S1 Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember sampai sekarang.

Selama berkuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember penulis mengikuti kegiatan seminar, pelatihan, dan organisasi. Penulis pernah mengikuti pelatihan LKMM Pra Tingkat Dasar dan LKMM Tingkat Dasar. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Divisi Aplikatif Badan Semi Otonom Material Techno Club Himpunan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS 2015/2016 dan Bendahara Umum Badan Semi Otonom Material Techno Club Himpunan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS 2016/2017. Selain itu, penulis pernah menjadi Grader Laboratorium Metalurgi Periode 2016/2017 dan 2017/2018.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*