

TESIS

**Optimasi Kekuatan Mekanik dan Biaya Produksi
pada Pemilihan Parameter Proses *Hardening*
Material ASSAB 705 dan ASSAB 709**




**KRISTIAN ISMARTAYA
21 56 11455**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
2023**

Pengesahan Dosen Pembimbing

Nama Mahasiswa : Kristian Ismartaya
Nomor Mahasiswa : 21 56 11455
Konsentrasi : Business Analytics
Judul Tesis : Optimasi Kekuatan Mekanik dan Biaya
Produksi pada Pemilihan Parameter Proses
Hardening Material ASSAB 705 dan ASSAB
709

Nama Pembimbing	Tanggal	Tanda Tangan
Dr. Ir. Baju Bawono, S.T., M.T., IPU	24/03/2023	
Dr. Ir. Paulus Wisnu Anggoro, S.T., M.T. IPU	29/03/2023	

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Berjudul

OPTIMASI KEKUATAN MEKANIK DAN BIAYA PRODUKSI PADA PEMILIHAN PARAMETER PROSES
HARDENING MATERIAL ASSAB 705 DAN ASSAB 709

yang disusun oleh

Kristian Ismartaya

215611455

dinyatakan telah memenuhi syarat pada tanggal 26 April 2023

		Keterangan
Dosen Pembimbing 1	: Dr. T. Baju Bawono, ST., MT.	Telah Menyetujui
Dosen Pembimbing 2	: Dr.T. Paulus Wisnu Anggoro, S.T., M.T.	Telah Menyetujui
Tim Penguji		
Penguji 1	: Dr. T. Baju Bawono, ST., MT.	Telah Menyetujui
Penguji 2	: Ir. B.Kristyanto, M.Eng., Ph.D.	Telah Menyetujui
Penguji 3	: Dr. A. Teguh Siswanto, M.Sc.	Telah Menyetujui

Yogyakarta, 26 April 2023

Universitas Atma Jaya Yogyakarta

Teknologi Industri

Dekan

ttd.

Dr. A. Teguh Siswanto, M.Sc.

Dokumen ini merupakan dokumen resmi UAJY yang tidak memerlukan tanda tangan karena dihasilkan secara elektronik oleh Sistem Bimbingan UAJY. UAJY bertanggung jawab penuh atas informasi yang tertera di dalam dokumen ini

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini dengan sesungguhnya menyatakan bahwa tesis dengan judul

Optimasi Kekuatan Mekanik dan Biaya Produksi pada Pemilihan Parameter Proses *Hardening* Material ASSAB 705 dan ASSAB 709

benar-benar karya saya sendiri. Pernyataan, gagasan, dan kutipan yang berasal langsung atau tidak langsung dari tulisan atau pemikiran orang lain disajikan secara tertulis dalam karya ini dalam bentuk catatan akhir dan daftar pustaka. Apabila di kemudian hari ternyata saya menjiplak sebagian atau seluruh tesis ini, maka gelar dan ijazah yang saya terima dinyatakan batal demi hukum dan saya akan mengembalikannya ke Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Surakarta, 26 April 2023

Yang menyatakan,



Kristian Ismartaya

KATA HANTAR

Puji syukur dan terima kasih kepada Allah Bapa yang Maha Rahim atas berkat dan rahmat yang diberikan sehingga tesis ini dapat selesai. Tesis berjudul "**Optimasi Kekuatan Mekanik dan Biaya Produksi pada Pemilihan Parameter Proses Hardening Material ASSAB 705 dan ASSAB 709**" disusun sebagai syarat mencapai derajat Magister Program Studi Magister Teknik Industri di Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Penyusunan tesis ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak, maka penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Baju Bawono, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Ir. Paulus Wisnu Anggoro, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar dan penuh dukungan senantiasa membantu penulis dalam aktivitas perkuliahan, penyusunan tesis, serta hal di luar akademik.
2. Bapak Dr. Ir. Parama Kartika Dewa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi serta Dr. Ir. A. Teguh Siswanto, M.Sc., Ir. Ririn Diar Astanti, S.T., M.MT., Dr.Eng., Dr. Ir. Yosephine Suharyanti, S.T., M.T., Ir. Yosef Daryanto, S.T. M.Sc. Ph.D., Ir. The Jin Ai, S.T., M.T., Dr.Eng., Ir. Adhi Anindyajati, S.T, M. Biotech, Ph.D., selaku dosen Program Studi Magister Teknik Industri yang memberikan ilmu pengetahuan dan kompetensi baru bagi penulis.
3. Era Satyarini, Anselmus Hans Kristian, Kresensia Yoseline Satyakristi, dan Faustine Diory Christy (yang hadir ditengah penyusunan tesis) atas dukungan, gangguan, dan tuntutan yang senantiasa diberikan kepada penulis sepanjang waktu.
4. Seluruh keluarga meliputi kedua orang tua, mertua, adik dan keponakan tersayang.

Serta seluruh pihak yang telah memberi bantuan dan dukungan kepada penulis. Penulisan tesis ini masih dapat disempurnakan kembali, dengan demikian penulis mengharapkan saran membangun dalam penulisan selanjutnya.

Penulis berharap dengan adanya tesis ini dapat memberikan inspirasi dan wawasan bagi mahasiswa Universitas Atma Jaya Yogyakarta, khususnya bagi mahasiswa yang memiliki latar belakang teknik mesin.

23 Februari 2023

DAFTAR ISI

TESIS	i
Pengesahan Dosen Pembimbing.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN.....	iv
KATA HANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xviii
INTISARI	xix
ABSTRACT.....	xx
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	7
1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	8
1.4. Batasan dan Asumsi Penelitian.....	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1. Pencarian Tinjauan Pustaka	10
2.2. Ulasan Tinjauan Pustaka	13
2.2.1. Tinjauan Pustaka Topik Metode <i>Hardening</i>	13
2.2.2. Tinjauan Pustaka Topik Temperatur <i>Austenite</i>	14
2.2.3. Tinjauan Pustaka Topik Kecepatan Pendinginan (<i>Quench</i>).....	16
2.2.4. Tinjauan Pustaka Topik Temperatur Temper.....	18
2.2.5. Tinjauan Pustaka Topik Distorsi Material.....	19
2.2.6. Tinjauan Pustaka Topik Biaya Produksi	22
2.2.7. Evaluasi Tinjauan Pustaka	24
2.3. Metode dan Faktor dalam Penelitian.....	29
2.4. Kontribusi Penelitian	31
BAB 3 LANDASAN TEORI	33
3.1. Baja dan Diagram <i>Phase</i>	33
3.1.1. ASSAB 705	36
3.1.2. ASSAB 709	38
3.2. Pengerasan (<i>Hardening</i>).....	40
3.2.1. Pemanasan Mula (<i>Pre-heating</i>).....	41
3.2.2. Proses <i>Austenitizing</i> (Temperatur <i>austenite</i>).....	42

3.2.3. <i>Quench</i>	43
3.2.4. <i>Temper</i>	46
3.3. Kegagalan proses <i>Hardening</i>	47
3.3.1. Nilai Kekerasan Rendah.....	47
3.3.2. <i>Crack</i>	48
3.3.3. Distorsi Material	48
3.4. Pengujian Mekanik (<i>Mechanical Test</i>).....	50
3.4.1. Pengujian Kekerasan (<i>Hardness Test</i>).....	50
3.4.2. Pengujian Ketangguhan (<i>Toughness Test</i>)	52
3.5. Pengujian Distorsi	56
3.6. Metode <i>Taguchi</i> : Desain, Analisis, dan Optimasi	58
3.7. ANOVA (<i>Analysis of Variance</i>).....	61
3.8. <i>Grey Relational Analysis</i> (GRA)	61
3.9. <i>Response Surface Methodology</i>	64
3.10. <i>Activity-Based Costing</i>	67
3.11. Hipotesis Sementara.....	68
BAB 4 METODOLOGI PENELITIAN.....	70
4.1. Tahapan dalam Penelitian.....	70
4.1.1. Tahap Pendahuluan	70
4.1.2. Tahap Eksperimen	71
4.1.3. Tahap Analisis dan Optimasi.....	71
4.1.4. Tahap Penutup.....	72
4.2. Diagram Alir Penelitian.....	73
4.3. Faktor dan Level pada Penelitian	74
4.4. Persiapan Spesimen Penelitian	75
4.4.1. Mendesain Eksperimen Uji Kekerasan dan Ketangguhan	75
4.4.2. Mendesain Eksperimen Uji Distorsi	78
4.4.3. Proses Pembuatan Spesimen	80
4.5. Persiapan Format Tabel Hasil Eksperimen	81
4.5.1. Format Tabel Pengujian Ketangguhan	81
4.5.2. Format Tabel Pengujian Distorsi	82
4.6. Persiapan Eksperimen	83
4.7. Metode Perhitungan Biaya Produksi	85
4.8. Metode Analisis dengan <i>Taguchi</i>	87
4.9. Metode Analisis dengan <i>Response Surface Method</i>	88
BAB 5 PEMBAHASAN	89
5.1. Perhitungan Biaya Produksi	89
5.2. Hasil Eksperimen Pengujian Ketangguhan	94
5.3. Hasil Eksperimen Pengujian Distorsi.....	106
5.4. Analisis dan Optimasi Desain Eksperimen <i>Taguchi</i> dan <i>Grey Relational Analysis</i>	115

5.4.1. Analisis dan Optimasi Biaya - <i>Taguchi</i>	115
5.4.2. Analisis dan Optimasi Nilai Kekerasan - <i>Taguchi</i>	117
5.4.3. Analisis dan Optimasi Nilai Ketangguhan - <i>Taguchi</i>	122
5.4.4. Optimasi Parameter <i>Hardening</i> untuk Respon Biaya, Kekerasan, dan Ketangguhan - <i>Grey Relational Analysis</i>	127
5.4.5. Analisis dan Optimasi Distorsi Material - <i>Taguchi</i>	136
5.5. Analisis dan Optimasi <i>Response Surface Method</i>	165
5.5.1. Analisis Biaya.....	165
5.5.2. Analisis Nilai Kekerasan	167
5.5.3. Analisis Nilai Ketangguhan.....	174
5.5.4. Optimasi Parameter <i>Hardening</i> untuk Biaya, Kekerasan, dan Ketangguhan.....	182
5.5.5. Analisis Distorsi Material	193
5.6. Hasil dan Pembahasan	235
5.6.1. Komparasi Hasil Analisis <i>Taguchi</i> - <i>Response Surface Method</i> dan Pembahasan	235
5.6.2. Komparasi Hasil Optimasi dengan Kondisi Aktual	240
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	246
Daftar Pustaka	248
LAMPIRAN	252

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram fase baja karbon dan perubahan struktur mikro	3
Gambar 2. Roda gigi patah akibat getas (kekerasan terlalu tinggi)	5
Gambar 3. <i>Crack</i> pada komponen akibat nilai ketangguhan rendah	5
Gambar 4. Komponen mengalami distorsi	6
Gambar 5. <i>Literature tree</i> penelitian.....	12
Gambar 6. Jangkauan temperatur <i>hardening</i> baja karbon	16
Gambar 7. Spesimen <i>Navy C-ring</i> dan distorsinya menurut Silva dkk (2012)	20
Gambar 8. Faktor tebal pada penelitian Nan dkk (2009)	21
Gambar 9. Klasifikasi teknik estimasi biaya produksi Niazi dkk (2006).....	23
Gambar 10. Kontribusi faktor perlakuan dalam tinjauan pustaka	28
Gambar 11. Proporsi jumlah dan jenis pengujian kualitas.....	29
Gambar 12. Diagram phase kesetimbangan besi-karbon	33
Gambar 13. Diagram phase kesetimbangan besi-karbon pada baja	34
Gambar 14. Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur <i>austenite</i>	35
Gambar 15. Pergeseran garis ubah Ac1 dan Ac3 akibat unsur paduan	36
Gambar 16. <i>Tempering diagram</i> ASSAB 705	37
Gambar 17. Grafik proses <i>hardening</i> ASSAB 709 menurut Bryson (2009)	39
Gambar 18. Pembacaan temperatur pada bagian luar dan inti material.....	41
Gambar 19. Skema proses <i>pre-heating</i> menurut Bryson (2009)	42
Gambar 20. Temperatur <i>austenite</i> dan perubahan struktur.....	42
Gambar 21. Grafik kecepatan pendinginan menurut Ray dkk (2020)	44
Gambar 22. Tahap pendinginan media <i>water</i>	45
Gambar 23. Pengujian kekerasan Rockwell dengan indenter kerucut.....	51
Gambar 24. Mesin uji ketangguhan atau <i>impact test</i> (Rajan dkk, 2011).....	53
Gambar 25. a) Charpy <i>impact test</i> ; b) Izod <i>impact test</i>	53
Gambar 26. Charpy <i>impact specimen</i> : a) <i>V-notch</i> , b) <i>keyhole</i> , c) <i>U-notch</i>	54
Gambar 27. Visualisasi posisi pengujian Charpy <i>V-notch impact test</i>	55
Gambar 28. Visualisasi pengujian Charpy <i>impact test</i>	55
Gambar 29. Spesimen <i>Navy C-ring</i> penelitian Northwood dkk (2007).....	57
Gambar 30. Tahapan kombinasi <i>Taguchi</i> - GRA (Qazi dkk, 2020).....	62
Gambar 31. a) RSM grafis dan b) contour plot (Myers dkk, 2016)	65
Gambar 32. Konsep desain BBD pada k=3	66
Gambar 33. Logika perhitungan biaya pada <i>Activity-Based Costing</i>	67
Gambar 34. Langkah implementasi <i>Activity-Based Costing</i>	68

Gambar 35. Diagram alir penelitian	73
Gambar 36. Design <i>Taguchi</i> terpilih.....	76
Gambar 37. Penyusunan desain RSM pada <i>software Minitab</i>	77
Gambar 38. Penyusunan desain RSM pada <i>software DX13</i>	77
Gambar 39. Spesimen uji Charpy V-notch.....	80
Gambar 40. Spesimen <i>Navy C-ring</i> sebelum proses pemotongan.....	81
Gambar 41. Tungku SMIT, ILF153, Borel, Tehag (kiri-kanan).....	83
Gambar 42. Media pendingin <i>oil</i> (kiri) dan <i>chemical aqua quench</i> (kanan)	84
Gambar 43. Alat uji kekerasan Albert Gnehm-Horgenn, skala Rockwell-C	84
Gambar 44. <i>Profile projector</i> (kiri) dan <i>dial indicator</i> (kanan)	85
Gambar 45. Alat uji impak Charpy merk Gotech	85
Gambar 46. Tangkapan layar tarif dasar listrik golongan I-4/TT.....	86
Gambar 47. Mode <i>Analyze Taguchi Design</i> pada <i>Minitab</i>	87
Gambar 48. Mode <i>Analyze Response Surface Design</i> pada <i>Minitab</i>	88
Gambar 49. Mode <i>Analyze dan Optimization</i> pada <i>software DX13</i>	88
Gambar 50. Grafik <i>S/N Ratio</i> respon biaya desain <i>Taguchi</i>	116
Gambar 51. Grafik <i>S/N Ratio</i> untuk respon nilai kekerasan ASSAB 705.....	119
Gambar 52. Grafik <i>S/N Ratio</i> untuk respon nilai kekerasan ASSAB 709.....	121
Gambar 53. Grafik <i>S/N Ratio</i> untuk respon nilai ketangguhan ASSAB 705	124
Gambar 54. Grafik <i>S/N Ratio</i> respon nilai ketangguhan ASSAB 709	126
Gambar 55. Identifikasi posisi pengukuran distorsi	136
Gambar 56. Grafik <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705	138
Gambar 57. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 705.....	140
Gambar 58. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>gap width</i> ASSAB 705.....	143
Gambar 59. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>flatness</i> ASSAB 705.....	145
Gambar 60. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 709.....	151
Gambar 61. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 709.....	153
Gambar 62. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>gap width</i> ASSAB 709.....	156
Gambar 63. <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>flatness</i> ASSAB 709.....	158
Gambar 64. Grafik parameter A1B3C1 untuk biaya	166
Gambar 65. <i>Respons surface</i> biaya pada temper C1	166
Gambar 66. Grafik parameter <i>hardening</i> A2,548-B3-C1,071	170
Gambar 67. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A2,548-B3-C1,071	170
Gambar 68. Grafik parameter <i>hardening</i> A2,999-B3-C1,003	173
Gambar 69. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A2,999-B3-C1,003	174

Gambar 70. Grafik parameter <i>hardening</i> A1,886-B3-C3	177
Gambar 71. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A1,886-B3-C3	178
Gambar 72. Grafik parameter <i>hardening</i> A1,137-B1-C2,861	181
Gambar 73. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A1,137-B1-C2,861	181
Gambar 74. <i>Response surface desirability</i> 0,775 <i>hardening</i> A2,050-B3-C1	184
Gambar 75. <i>Response surface biaya</i> <i>hardening</i> A2,050-B3-C1	184
Gambar 76. <i>Response surface kekerasan</i> <i>hardening</i> A2,050-B3-C1	185
Gambar 77. <i>Response surface</i> <i>hardening</i> A2,050-B3-C1	185
Gambar 78. Kombinasi keseluruhan respon pada parameter A2,050-B3-C1	186
Gambar 79. <i>Response surface desirability</i> 0,941 <i>hardening</i> A2,956-B3-C1	189
Gambar 80. <i>Response surface biaya</i> <i>hardening</i> A2,956-B3-C1	189
Gambar 81. <i>Response surface kekerasan</i> <i>hardening</i> A2,956-B3-C1	190
Gambar 82. <i>Response surface ketangguhan</i> <i>hardening</i> A2,956-B3-C1	190
Gambar 83. Kombinasi keseluruhan respon pada parameter A2,956-B3-C1	191
Gambar 84. Grafik parameter <i>hardening</i> A1-B3-C1,926	196
Gambar 85. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A1-B3-C1,926	196
Gambar 86. Grafik parameter <i>hardening</i> A2,825-B3-C2,778	199
Gambar 87. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A2,825-B3-C2,778	200
Gambar 88. Grafik parameter <i>hardening</i> A1-B2-C2,240	203
Gambar 89. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A1-B2-C2,240	204
Gambar 90. Grafik parameter <i>hardening</i> A2-B3-C3	207
Gambar 91. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A2-B3-C3	207
Gambar 92. <i>Response surface desirability</i> 0,911 <i>hardening</i> A2,972-B3-C2,796...210	210
Gambar 93. <i>Response surface distorsi OD</i> <i>hardening</i> A2,972-B3-C2,796	210
Gambar 94. <i>Response surface distorsi ID</i> <i>hardening</i> A2,972-B3-C2,796	211
Gambar 95. <i>Response surface distorsi GD</i> <i>hardening</i> A2,972-B3-C2,796	211
Gambar 96. <i>Response surface distorsi FL</i> <i>hardening</i> A2,972-B3-C2,796	212
Gambar 97. Kombinasi respon pada parameter A2,972-B3-C2,796	213
Gambar 98. Grafik parameter <i>hardening</i> A1,004-B3-C2,347	216
Gambar 99. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A1,004-B3-C2,347	217
Gambar 100. Grafik parameter <i>hardening</i> A2,762-B3-C2,958	220
Gambar 101. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A2,762-B3-C2,958	220
Gambar 102. Grafik parameter <i>hardening</i> A2,838-B3-C2,962	223
Gambar 103. <i>Respons surface</i> parameter <i>hardening</i> A2,838-B3-C2,962	224
Gambar 104. Grafik parameter <i>hardening</i> A3-B3-C2,360	227

Gambar 105. <i>Respons surface parameter hardening A3-B3-C2,360</i>	227
Gambar 106. <i>Response surface desirability 0,918 hardening A3-B3-C2,319</i>	230
Gambar 107. <i>Response surface distorsi OD hardening ASSAB 709</i>	230
Gambar 108. <i>Response surface distorsi ID hardening ASSAB 709</i>	231
Gambar 109. <i>Response surface distorsi GD hardening ASSAB 709</i>	231
Gambar 110. <i>Response surface distorsi FL hardening ASSAB 709</i>	232
Gambar 111. <i>Kombinasi respon pada parameter A3-B3-C2,319</i>	233



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Padanan material ASSAB 705 dan ASSAB 709.....	13
Tabel 2. Pengelompokan berdasarkan faktor perlakuan dan pengujian	25
Tabel 3. Kontribusi unsur paduan pada baja (Bryson, 2009).....	35
Tabel 4. Komposisi kimia penyusun baja ASSAB 705	36
Tabel 5. Kekuatan mekanik baja ASSAB 705	36
Tabel 6. Data rekomendasi perlakuan panas ASSAB 705	37
Tabel 7. Komposisi kimia penyusun baja ASSAB 709	38
Tabel 8. Kekuatan mekanik baja ASSAB 709	38
Tabel 9. Parameter <i>hardening</i> untuk baja karbon sedang.....	40
Tabel 10. Kecepatan pendinginan dalam <i>H-value</i> (Canale dkk, 2008)	45
Tabel 11. Temperatur <i>austenite</i> baja karbon (Canale dkk, 2008).....	46
Tabel 12. Pengaruh temperatur temper terhadap material.....	47
Tabel 13. Resiko distorsi ukuran dan bentuk akibat <i>heat treatment</i>	49
Tabel 14. Spesifikasi uji kekerasan Rockwell (Kuhn, 2000)	52
Tabel 15. Standar uji ketangguhan dan aplikasinya (Kuhn, 2000).....	54
Tabel 16. Pengaruh media <i>quench</i> terhadap distorsi (Totten dkk, 2000)	58
Tabel 17. Pengaruh jenis baja terhadap arah distorsi	58
Tabel 18. Desain faktorial <i>Box-Behnken</i> $k=3$ (Myers dkk, 2016)	65
Tabel 19. <i>Box-Behnken Design</i> 13 runs (Myers dkk, 2016)	66
Tabel 20. Faktor perlakuan dalam penelitian	74
Tabel 21. Pengujian kualitas dalam penelitian	75
Tabel 22. Desain <i>Taguchi</i> untuk uji ketangguhan dan kekerasan	76
Tabel 23. Desain RSM uji ketangguhan dan kekerasan.....	78
Tabel 24. Desain eksperimen <i>Taguchi</i> untuk pengujian distorsi.....	79
Tabel 25. Desain eksperimen RSM untuk pengujian distorsi	79
Tabel 26. Format pencatatan data uji ketangguhan	82
Tabel 27. Format pencatatan data uji ketangguhan	82
Tabel 28. Spesifikasi tungku pemanas.....	83
Tabel 29. Data <i>lead time process hardening</i> dan mesin	87
Tabel 30. Biaya listrik tungku pemanas per satuan waktu.....	90
Tabel 31. <i>Unit-level activity hardening process and cost</i>	92
Tabel 32. Data spesimen uji impak ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	95
Tabel 33. Data spesimen uji impak ASSAB 705 desain RSM	96
Tabel 34. Hasil uji impak ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	97

Tabel 35. Hasil uji dampak ASSAB 705 desain RSM.....	98
Tabel 36. Data spesimen uji dampak ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	101
Tabel 37. Data spesimen uji dampak ASSAB 709 desain RSM	102
Tabel 38. Hasil uji dampak ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	103
Tabel 39. Hasil uji dampak ASSAB 709 desain RSM	104
Tabel 40. Hasil pengukuran <i>Navy C-ring</i> ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	106
Tabel 41. Distorsi <i>Navy C-ring</i> ASSAB 705 design <i>Taguchi</i>	107
Tabel 42. Hasil pengukuran <i>Navy C-ring</i> ASSAB 705 desain RSM.....	108
Tabel 43. Distorsi <i>Navy C-ring</i> ASSAB 705 desain RSM	109
Tabel 44. Hasil pengukuran <i>Navy C-ring</i> ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	110
Tabel 45. Distorsi <i>Navy C-ring</i> ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	111
Tabel 46. Hasil pengukuran <i>Navy C-ring</i> ASSAB 709 desain RSM.....	112
Tabel 47. Distorsi <i>Navy C-ring</i> ASSAB 709 desain RSM	113
Tabel 48. Hasil perhitungan biaya dengan desain <i>Taguchi</i>	115
Tabel 49. ANOVA untuk <i>S/N Ratio</i> - respon total biaya.....	116
Tabel 50. Respon <i>S/N Ratio</i> setiap level-faktor untuk respon biaya.....	117
Tabel 51. Hasil uji kekerasan ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	118
Tabel 52. ANOVA untuk <i>S/N Ratio</i> - respon nilai kekerasan ASSAB 705	118
Tabel 53. Respon <i>S/N Ratio</i> level-faktor nilai kekerasan ASSAB 705.....	119
Tabel 54. Hasil uji kekerasan ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	120
Tabel 55. ANOVA untuk <i>S/N Ratio</i> - respon nilai kekerasan ASSAB 709	121
Tabel 56. Respon <i>S/N Ratio</i> level-faktor nilai kekerasan ASSAB 709.....	122
Tabel 57. Hasil uji ketangguhan ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	123
Tabel 58. ANOVA untuk <i>S/N Ratio</i> - respon nilai ketangguhan ASSAB 705	123
Tabel 59. Respon <i>S/N Ratio</i> level-faktor nilai ketangguhan ASSAB 705.....	124
Tabel 60. Hasil uji ketangguhan ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	125
Tabel 61. ANOVA untuk <i>S/N Ratio</i> - respon nilai ketangguhan ASSAB 709	126
Tabel 62. Respon <i>S/N Ratio</i> level-faktor nilai ketangguhan ASSAB 709.....	127
Tabel 63. <i>S/N Ratio</i> respon biaya, kekerasan, ketangguhan ASSAB 705	128
Tabel 64. Nilai <i>Reference</i> dan <i>Deviation Sequence</i> respon ASSAB 705.....	129
Tabel 65. Nilai GRC dan GRG respon ASSAB 705.....	129
Tabel 66. Nilai GRG level-faktor untuk respon ASSAB 705	130
Tabel 67. Nilai <i>S/N Ratio</i> untuk respon ASSAB 709.....	130
Tabel 68. <i>Reference</i> dan <i>Deviation Sequence</i> respon kekuatan ASSAB 709 ..	131
Tabel 69. Nilai GRC dan GRG untuk respon ASSAB 709	132

Tabel 70. Nilai GRG level-faktor untuk respon ASSAB 705	133
Tabel 71. Komparasi parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 - ASSAB 709.....	134
Tabel 72. Distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	137
Tabel 73. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705	137
Tabel 74. <i>S/N Ratio</i> level - faktor distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705	139
Tabel 75. Distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	139
Tabel 76. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705	140
Tabel 77. <i>S/N Ratio</i> level - faktor distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 705.....	141
Tabel 78. Distorsi <i>gap width</i> ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	142
Tabel 79. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>gap width</i> ASSAB 705	142
Tabel 80. <i>S/N Ratio</i> level - faktor distorsi <i>gap width</i> ASSAB 705	143
Tabel 81. Distorsi <i>flatness</i> ASSAB 705 desain <i>Taguchi</i>	144
Tabel 82. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>flatness</i> ASSAB 705	145
Tabel 83. <i>S/N Ratio</i> level - faktor distorsi <i>flatness</i> ASSAB 705	146
Tabel 84. <i>S/N Ratio</i> respon keseluruhan distorsi ASSAB 705.....	147
Tabel 85. <i>Reference</i> dan <i>Deviation Sequence</i> respon distorsi ASSAB 705	147
Tabel 86. Nilai GRC dan GRG untuk respon distorsi ASSAB 705.....	148
Tabel 87. Nilai GRG level faktor respon distorsi ASSAB 705	148
Tabel 88. Distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	149
Tabel 89. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 709	150
Tabel 90. <i>S/N Ratio</i> level faktor distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 709.....	151
Tabel 91. Distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	152
Tabel 92. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 709	153
Tabel 93. <i>S/N Ratio</i> level faktor distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 709.....	154
Tabel 94. Distorsi <i>gap width</i> ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	155
Tabel 95. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>gap width</i> ASSAB 709	155
Tabel 96. <i>S/N Ratio</i> level faktor distorsi <i>gap width</i> ASSAB 709.....	156
Tabel 97. Distorsi <i>flatness</i> ASSAB 709 desain <i>Taguchi</i>	157
Tabel 98. ANOVA <i>S/N Ratio</i> distorsi <i>flatness</i> ASSAB 709	158
Tabel 99. <i>S/N Ratio</i> level faktor distorsi <i>flatness</i> ASSAB 709	159
Tabel 100. <i>S/N Ratio</i> untuk respon keseluruhan distorsi ASSAB 709	159
Tabel 101. <i>Reference</i> dan <i>Deviation Sequence</i> respon distorsi ASSAB 709 ...	160
Tabel 102. Nilai GRC dan GRG respon distorsi ASSAB 709	161
Tabel 103. Nilai GRG level faktor respon distorsi ASSAB 709	161
Tabel 104. Komparasi parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 - ASSAB 709.....	163

Tabel 105. ANOVA <i>linear model</i> respon biaya - RSM.....	165
Tabel 106. Parameter <i>hardening</i> respon biaya	166
Tabel 107. ANOVA Rumus 5.2 respon nilai kekerasan.....	168
Tabel 108. ANOVA Rumus 5.3 respon nilai kekerasan.....	168
Tabel 109. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 respon kekerasan.....	169
Tabel 110. ANOVA Rumus 5.4 respon nilai kekerasan.....	171
Tabel 111. ANOVA Rumus 5.5 respon nilai kekerasan.....	172
Tabel 112. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 respon kekerasan.....	173
Tabel 113. ANOVA Rumus 5.6 respon nilai ketangguhan.....	175
Tabel 114. ANOVA Rumus 5.7 respon nilai ketangguhan.....	176
Tabel 115. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 respon ketangguhan.....	177
Tabel 116. ANOVA Rumus 5.8 respon nilai ketangguhan.....	179
Tabel 117. ANOVA Rumus 5.9 respon nilai ketangguhan.....	179
Tabel 118. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 nilai ketangguhan	180
Tabel 119. Parameter <i>hardening</i> respon biaya, kekerasan, ketangguhan ASSAB 705	183
Tabel 120. Parameter <i>hardening</i> respon biaya, kekerasan, ketangguhan ASSAB 709	188
Tabel 121. Komparasi parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 dan ASSAB 709.....	192
Tabel 122. ANOVA Rumus 5.10 distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705	194
Tabel 123. ANOVA Rumus 5.11 distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 705	194
Tabel 124. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 distorsi <i>outside diameter</i>	195
Tabel 125. ANOVA Rumus 5.12 distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 705.....	197
Tabel 126. ANOVA Rumus 5.13 distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 705.....	198
Tabel 127. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 distorsi <i>inside diameter</i>	199
Tabel 128. ANOVA Rumus 5.14 distorsi <i>gap width</i> ASSAB 705	201
Tabel 129. ANOVA Rumus 5.15 distorsi <i>gap width</i> ASSAB 705	201
Tabel 130. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 distorsi <i>gap width</i>	203
Tabel 131. ANOVA Rumus 5.16 distorsi <i>flatness</i> ASSAB 705	205
Tabel 132. ANOVA Rumus 5.17 distorsi <i>flatness</i> ASSAB 705	205
Tabel 133. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 distorsi <i>flatness</i>	206
Tabel 134. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 respon distorsi.....	209
Tabel 135. ANOVA Rumus 5.18 distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 709	214
Tabel 136. ANOVA Rumus 5.19 distorsi <i>outside diameter</i> ASSAB 709	215
Tabel 137. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 distorsi <i>outside diameter</i>	216

Tabel 138. ANOVA Rumus 5.20 distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 709.....	218
Tabel 139. ANOVA Rumus 5.21 distorsi <i>inside diameter</i> ASSAB 709.....	218
Tabel 140. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 distorsi <i>inside diameter</i>	219
Tabel 141. ANOVA Rumus 5.22 distorsi <i>gap width</i> ASSAB 709	221
Tabel 142. ANOVA Rumus 5.23 distorsi <i>gap width</i> ASSAB 709	222
Tabel 143. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 distorsi <i>gap width</i>	223
Tabel 144. ANOVA Rumus 5.24 distorsi <i>flatness</i> ASSAB 709	225
Tabel 145. ANOVA Rumus 5.25 distorsi <i>flatness</i> ASSAB 709	225
Tabel 146. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 distorsi <i>flatness</i>	226
Tabel 147. Parameter <i>hardening</i> ASSAB 709 respon distorsi.....	229
Tabel 148. Komparasi parameter <i>hardening</i> ASSAB 705 dan ASSAB 709.....	234
Tabel 149. Komparasi Hasil Analisis <i>Taguchi</i> dan RSM untuk proses <i>hardening</i>	235
Tabel 150. Komparasi hasil penelitian vs aktual, <i>hardening</i> ASSAB 705	240
Tabel 151. Konfirmasi hasil <i>Design Expert 13</i> vs aktual ASSAB 705	241
Tabel 152. Komparasi hasil penelitian vs aktual, <i>hardening</i> ASSAB 705	242
Tabel 153. Konfirmasi hasil <i>Design Expert 13</i> vs aktual ASSAB 705	242
Tabel 154. Komparasi hasil penelitian vs aktual, <i>hardening</i> ASSAB 709	243
Tabel 155. Konfirmasi hasil <i>Design Expert 13</i> vs aktual ASSAB 709	243
Tabel 156. Komparasi hasil penelitian vs aktual, <i>hardening</i> ASSAB 709	244
Tabel 157. Konfirmasi hasil <i>Design Expert 13</i> vs aktual ASSAB 709.....	244

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

ABC	: <i>Activity-Based Costing</i>
ANOVA	: <i>Analysis of Variance</i>
GRA	: <i>Grey Relational Analysis</i>
HRC	: <i>Hardness Rockwell-C</i>
RSM	: <i>Response Surface Method</i>
S/N Ratio	: <i>Signal to Noise Ratio</i>



INTISARI

Beberapa permasalahan dalam penelitian ini antara lain: 1) belum diketahui apakah biaya proses *hardening* saat ini merupakan biaya paling minimal, 2) belum diketahui apakah nilai kekerasan dan ketangguhan yang dicapai saat ini merupakan nilai paling maksimal, 3) belum diketahui apakah resiko distorsi yang terjadi saat ini merupakan nilai distorsi paling minimal, 4) belum diketahui parameter proses *hardening* yang dapat mengoptimalkan respon biaya, kekerasan, dan ketangguhan secara bersamaan, 5) belum diketahui komparasi kekuatan mekanik ASSAB 705 dan ASSAB 709 sebagai referensi untuk memilih material dan mensubstitusi material. Dengan demikian perlu dilakukan penelitian untuk mengevaluasi parameter proses *hardening* baja ASSAB 705 dan ASSAB 709 terhadap dampak biaya, nilai kekerasan dan nilai ketangguhan, serta resiko distorsi yang terjadi pasca proses *hardening*. Tujuannya ialah memperoleh parameter proses *hardening* yang menghasilkan biaya, nilai kekerasan, nilai ketangguhan, dan distorsi yang paling optimal.

Penelitian dilakukan dengan *Design of Experiment*, metode yang digunakan ialah *Taguchi - Grey Relational Analysis* dan *Response Surface Method*. Metode *Taguchi* digunakan untuk membentuk model dan mengoptimalkan respon tunggal. Hasil analisis *Taguchi* selanjutnya diolah dengan metode *Grey Relational Analysis* untuk mengoptimalkan multirespon, sehingga diperoleh parameter proses *hardening* yang optimal. Metode *Response Surface Method* digunakan untuk membentuk model, mengoptimalkan respon tunggal dan multirespon secara bersamaan, serta memperoleh parameter proses *hardening* yang optimal. Parameter proses *hardening* kedua metode dikomparasikan sehingga diperoleh parameter yang memberikan respon optimal secara keseluruhan dan nilai respon yang mendekati hasil percobaan aktual. ANOVA diterapkan pada metode *Taguchi* dan *Response Surface Method* untuk mengidentifikasi faktor yang berkontribusi signifikan terhadap respon.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter *hardening* ASSAB 705 yang optimal ialah temperatur austenite 862°C; *quench oil*; temperatur temper 200°C; untuk respon biaya Rp.65.035,92; kekerasan 51 HRC; dan ketangguhan 0,9815 J/mm². Parameter *hardening* ASSAB 709 yang optimal ialah temperatur austenite 898,24°C; *quench oil*; temperatur temper 200°C; untuk respon biaya Rp. Rp.69.299,00; kekerasan 56 HRC; dan ketangguhan 1,0892 J/mm². ANOVA menunjukkan bahwa temperatur *austenite* tidak berkontribusi signifikan terhadap respon biaya, nilai kekerasan, dan nilai ketangguhan. Baja ASSAB 705 unggul pada sifat tangguh (maksimum hingga 1,4429 J/mm²), sedangkan ASSAB 709 unggul pada sifat keras (maksimum hingga 56 HRC). Media *quench oil* dan *material thickness* yang lebih tebal memberikan resiko distorsi yang lebih minimal.

Kata kunci: *Baja pemesian, Pengerasan, Taguchi, Grey Relational Analysis, Response Surface Method.*

ABSTRACT

Some of problems in this study include: 1) it is not yet known whether the current hardening process cost is the minimum cost, 2) it is not yet known whether the hardness and toughness values achieved at this time are the maximum value, 3) it is not known whether the risk of distortion that occurs currently is the minimum distortion value, 4) it is not yet known which hardening process parameters can optimize cost, hardness, and toughness simultaneously, 5) it is not yet known the comparative mechanical strength of ASSAB 705 and ASSAB 709 as a reference for selecting materials and substituting materials. Thus it is necessary to evaluate the hardening process parameters for ASSAB 705 and ASSAB 709 steel on cost impact, hardness and toughness value, as well as the risk of distortion. The goal is to obtain the hardening process parameters that produce the most optimal costs, hardness, toughness, and distortions.

Design of Experiment was used for this research. The used methods are Taguchi - Gray Relational Analysis and Response Surface Method. The Taguchi method is used to build a model and optimize a single response. Next, the results of Taguchi analysis are processed using Gray Relational Analysis method to optimize multiresponse, so that the optimal parameter of hardening process are obtained. The Response Surface Method is used to form models, optimize single and multiresponse responses simultaneously, and obtain optimal parameter of hardening process. The hardening process parameters of the methods are compared in order to obtain parameter that give the overall optimal response and response values that are close to actual experimental results. ANOVA was applied to Taguchi and Response Surface Method to identify factors that contribute significantly to all response.

The results showed that the optimal hardening parameter for ASSAB 705 was 862°C of austenite temperature; oil quench; 200°C of tempering temperature; for Rp. 65,035.92 response costs; 51 HRC hardness; and 0.9815 J/mm² toughness. The optimal hardening parameter for ASSAB 709 is 898.24°C of austenite temperature; oil quench; 200°C of tempering temperature; for Rp. 69,299.00 response costs; 56 HRC hardness; and 1.0892 J/mm² toughness. ANOVA shows that the austenite temperature does not contribute significantly to cost, hardness and toughness value responses. ASSAB 705 steel excels in toughness (maximum up to 1.4429 J/mm²), while ASSAB 709 excels in hardness (maximum up to 56 HRC). Oil quench medium and thicker material provide a minimum risk of distortion.

Keyword: Machinery Steel, Hardening, Taguchi, Grey Relational Analysis, Response Surface Method.