

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iv
PRAKATA	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan.....	5
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Lokasi Penelitian.....	7
1.6. Luaran Penelitian.....	7
1.7. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	9
2.1. Tinjauan Pustaka	9
2.2. Landasan Teori.....	13
2.2.1 Besi Cor Kelabu.....	13
2.2.2 Transformasi Fasa Besi Cor Kelabu	18

2.2.3 Teori Solidifikasi Besi Cor Kelabu.....	23
2.2.4 Sensitivitas Ketebalan dan Gradien Penampang Besi Cor Kelabu 25	
2.2.5 Pengaruh Unsur Paduan Pada Besi Cor Kelabu	28
2.2.6 Komponen <i>Disc Brake</i>	41
2.2.7 Karakterisasi Material dan Metode Pengujian.....	43
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	50
3.1. Metode Penelitian.....	50
3.1.1 Alat	51
3.1.2 Bahan.....	54
3.2. Tahapan Penelitian.....	57
3.2.1 Studi Literatur.....	58
3.2.2 Pengumpulan Data	58
3.2.3 Pengolahan Data.....	58
3.2.4 Penyusunan Parameter Penelitian	62
3.2.5 Persiapan Bahan Baku dan Alat	64
3.2.6 Proses Pengecoran dan Perlakuan Metalurgi	65
3.2.7 <i>Material Checking</i>	66
3.2.8 Pengujian dan Karakterisasi Material.....	66
3.2.9 Analisis Hasil dan Pembahasan.....	71
3.2.10 Kesimpulan.....	71
3.3. Jadwal Penelitian.....	72
BAB IV PENGOLAHAN DAN PENYAJIAN DATA.....	73
4.1 Pengolahan Data.....	73
4.1.1 Data Komposisi <i>Base Metal Melting</i>	73
4.1.2 Data Hasil Uji Kekerasan	75
4.1.3 Data Distribusi Grafit Serpih.....	78
4.1.4 Data Karakteristik Matriks Sampel	79
4.1.5 Data Penambahan Unsur Paduan	80
4.2 Penyajian Data.....	81
4.2.1 Data Komposisi Akhir <i>Pouring</i>	81
4.2.2 Profil Distribusi Kekerasan Sampel	82
4.2.3 Karakterisasi Morfologi dan Distribusi Grafit Serpih.....	86

4.2.4	Karakterisasi Struktur Mikro Matriks	91
4.2.5	Kalkulasi Efisiensi Biaya Unsur Paduan	94
BAB V PEMBAHASAN.....		95
5.1	Pengaruh Eliminasi Antimon Pada Komponen <i>Disc Brake FC200</i> ...	95
5.1.1	Pembentukan dan Pertumbuhan Grafit Serpih Tanpa Kehadiran Sb	95
5.1.2	Transformasi Fasa pada Matriks Tanpa Kehadiran Sb	99
5.1.3	Perubahan Nilai Kekerasan <i>Disc Brake FC200</i> Tanpa Kehadiran Sb	102
5.2	Mekanisme Tembaga, Kromium, dan Timah Sebagai Substitusi Antimon pada <i>Disc Brake FC200</i>	105
5.2.1	Pengaruh Cu Terhadap Stabilisasi Perlit dan Penguatan Matriks	106
5.2.2	Pengaruh Cr Terhadap Pengendalian Karbon dan Kecenderungan Pembentukan Karbida	109
5.2.3	Pengaruh Sn Terhadap Homogenitas Transformasi Matriks	113
5.3	Analisis Pengaruh Substitusi Antimon Terhadap Efisiensi Biaya Unsur Paduan	116
5.3.1.	Evaluasi Beban Biaya Paduan Dengan Penggunaan Antimon	117
5.3.2.	Analisis Efisiensi Biaya pada Skenario Substitusi dengan Optimasi Unsur Tembaga, Kromium, dan Timah	118
5.3.3.	Penentuan Skenario Optimal Substitusi Antimon Terhadap Kelayakan Ekonomi dan Kualitas Sifat Mekanis	120
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		123
6.1	Kesimpulan	123
6.2	Saran	124
DAFTAR PUSTAKA		xvii
LAMPIRAN		xxi

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Data Penjualan Mobil Total di Indonesia Tahun 2016 – 2025	1
Gambar 1.2. Perkembangan Harga Antimon Trioksida di China dan AS Periode 3	
Gambar 2.1. Diagram Fasa Sistem Biner Besi – Karbon	18
Gambar 2.2. Pembentukan Morfologi Tipe Grafit Berdasarkan Kurva Termal..	21
Gambar 2.3. Skematis Transformasi Matriks Besi Cor Selama Proses Solidifikasi	22
Gambar 2.4. Hubungan Diagram Fasa Fe -Fe ₃ C dengan Kurva Pendinginan	24
Gambar 2.5. Skematik Diagram Isopleth yang Menunjukkan Kesetimbangan Stabil dan Metastabil dalam Paduan Fe–C–Si dan Kurva Pendinginannya	25
Gambar 2.6. Variasi Ketebalan Penampang Terhadap Nilai Kekerasan Brinell.	27
Gambar 2.7. Rentang Kadar Karbon dan Silikon untuk Paduan Besi	30
Gambar 2.8. Diagram Fasa Biner Sistem Mn – S	32
Gambar 2.9. Ilustrasi Penguatan Larutan Padat oleh Cu pada Matriks Ferit	34
Gambar 2.10. Potongan Diagram Fasa Biner Sistem Fe – Cu	34
Gambar 2.11. Pengamatan SEM koloni Perlit.....	35
Gambar 2.12. Diagram CCT yang Menunjukkan Pergeseran Domain Perlit ke Waktu yang Lebih Singkat Akibat Penambahan Sn > 0,05%.....	37
Gambar 2.13. Morfologi Lamelar Perlit Pada Paduan Tanpa Sn dan Paduan Dengan 0,02 - 0,10 wt.% Sn	38
Gambar 2.14. Hasil Pengujian Kekerasan dan Kuat Tarik dengan Variasi Penambahan 1% Cr Material FC250.....	39
Gambar 2.15. Mekanisme Formasi Lapisan Sb pada Antarmuka Grafit.....	40
Gambar 2.16. Desain dan Bagian-bagian <i>Disc Brake</i> Mobil	42
Gambar 2.17. Mekanisme Kerja Pengujian OES	44
Gambar 2.18. Skematik Pengujian Kekerasan Metode Vickers.....	47
Gambar 2.19. Parameter Jarak Indentasi pada Pengujian Kekerasan Metode Vickers	48

Gambar 2.20. Skematik Pengujian Kekerasan Brinell	49
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	57
Gambar 3.2. Desain Komponen Disc Brake FC200.....	66
Gambar 3.3. Skematik Pengujian dan Karakterisasi Sampel Material.....	67
Gambar 4.1. Skematis area uji Brinell pada Sampel Uji	75
Gambar 4.2. Skematis Pembagian Area tepi & Tengah pada Sampel Uji	77
Gambar 4.3. Contoh Gambar Pengamatan dan Identifikasi Struktur Mikro Besi Cor Kelabu.....	80
Gambar 4.4. Perbandingan Nilai Rata-rata Kekerasan Brinell Setiap Percobaan	82
Gambar 4.5. Rata-rata Nilai Kekerasan Vickers Setiap Percobaan.....	83
Gambar 4.6. Perbandingan Homogenitas Nilai Kekerasan HV Seluruh Percobaan	83
Gambar 4.7. Grafik Hubungan Antara Kadar Cu terhadap Nilai Kekerasan Vickers Rata-rata Setiap Percobaan	84
Gambar 4.8. Grafik Hubungan Antara Kadar Cr terhadap Nilai Kekerasan Vickers Rata-rata Setiap Percobaan	85
Gambar 4.9. Grafik Hubungan Antara Kadar Sn dengan Nilai Kekerasan Rata- rata Vickers Setiap Percobaan	85
Gambar 4.10. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan I Area Tengah..	86
Gambar 4.11. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan I Area Tepi	86
Gambar 4.12. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan IIA Area Tengah	87
Gambar 4.13. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan IIA Area Tepi ..	87
Gambar 4.14. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan IIB Area Tengah	87
Gambar 4.15. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan IIB Area Tepi ..	88
Gambar 4.16. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan III Area Tengah	88
Gambar 4.17. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan III Area Tepi....	88
Gambar 4.18. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan IV Area Tengah	89
Gambar 4.19. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan IV Area Tepi ...	89
Gambar 4.20. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan V Area Tengah	89
Gambar 4.21. Pengamatan Morfologi Grafit Serpih Percobaan V Area Tepi.....	90

Gambar 4.22. Perbandingan Jumlah Grafit Area Tepi dan Tengah Seluruh Percobaan	90
Gambar 4.23. Perbandingan Rata-rata Panjang Grafit Area Tepi dan Tengah Seluruh Percobaan.....	91
Gambar 4.24. Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan I.....	91
Gambar 4.25. Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan IIA	92
Gambar 4.26. Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan IIB.....	92
Gambar 4.27. Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan III	92
Gambar 4.28. Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan IV	93
Gambar 4.29. Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan V	93
Gambar 4.30. Perbandingan Biaya Paduan Seluruh Percobaan	94
Gambar 5.1. Perbandingan Morfologi dan Distribusi Ukuran Grafit Serpih	97
Gambar 5.2. Observasi Struktur Mikro Matriks Sampel Percobaan IIB.....	100
Gambar 5.3. Diagram <i>Continous Cooling Transformation</i> Besi Cor Kelabu ...	101
Gambar 5.4. Potongan Diagram Fasa Biner Sistem Fe – Cu dengan Kadar Cu pada skenario percobaan)	108
Gambar 5.5. Diagram Fasa Terner Sistem Fe-Cr-C pada Temperatur 1273 K.	111
Gambar 5.7. Skematis Interaksi antara Atom Karbon dan Kromium pada Pembentukan Kromium Karbida.....	112
Gambar 5.6. Identifikasi Fasa Karbida pada Observasi Struktur Matriks Sampel Percobaan V.....	112
Gambar 5.8. Pengaruh 0,05 wt.% Sn Terhadap Kebutuhan Undercooling untuk Transformasi Matriks di Temperatur Eutektoid).....	115
Gambar 5.9. Kontribusi Penambahan dan Biaya Unsur Paduan Per <i>Ladle</i> Pada Percobaan I	117
Gambar 5.10. Perbandingan Total Biaya Unsur Paduan Percobaan I dengan Skenario Substitusi di Percobaan III, IV, dan V	119
Gambar 5.11. Hubungan Antara Total Biaya Unsur Paduan Terhadap Nilai Kekerasan Rata-rata (HV) Yang Dihasilkan Tiap Percobaan	121

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Penelitian – penelitian Terdahulu.....	9
Tabel 2.2. Hubungan Penelitian dengan Penelitian Terdahulu	12
Tabel 2.3. Klasifikasi Bentuk Grafit pada Besi Cor Kelabu	14
Tabel 2.4. Standar Sifat Mekanis FC200	16
Tabel 2.5. Komposisi Standar FC200.....	16
Tabel 2.6. Standar Sifat Mekanis FC250	17
Tabel 2.7. Komposisi Kimia Standar FC250	18
Tabel 3.1. Rentang Komposisi <i>Base Metal Melting</i> Dalam Penelitian	63
Tabel 3.2. Estimasi Penambahan Paduan (Kg) Setiap Percobaan Dalam Penelitian	64
Tabel 3.3. Komposisi Target Unsur Paduan Setiap Percobaan Dalam Penelitian	64
Tabel 3.4. Rangkaian Tahap Penelitian.....	72
Tabel 4.1. Data Komposisi <i>Melting</i> Hasil OES.....	74
Tabel 4.2. Data <i>Carbon Equivalent</i> Setiap Percobaan	74
Tabel 4.3. Pengolahan Data Hasil Uji Kekerasan Brinell	76
Tabel 4.4. Pengolahan Data Hasil Uji Kekerasan Vickers.....	77
Tabel 4.5. Kategori Ukuran Grafit Serpih.....	78
Tabel 4.6. Pengolahan Data Kuantifikasi Morfologi dan Distribusi Grafit Serpih Setiap Percobaan	79
Tabel 4.7. Data Penambahan Unsur Paduan (kg) Setiap Percobaan	80
Tabel 4.8. Data Kalkulasi Biaya Unsur Paduan Setiap Percobaan.....	81
Tabel 4.9. Data Komposisi <i>Pouring</i> Hasil OES	81

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. Data Hasil Pengujian Kekerasan Brinell	130
Lampiran B. Data Hasil Pengujian Kekerasan Vickers	131
Lampiran C. Data Hasil Karakterisasi Morfologi dan Distribusi Grafit	134
Lampiran D. Data Harga Unsur Paduan	139
Lampiran E. Data Perhitungan Kebutuhan Unsur Paduan Setiap Percobaan ..	139



DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN		Halaman
GAIKINDO	Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia	1
TKDN	Tingkat Komponen Dalam Negeri	1
GCI	<i>Grey Cast Iron</i>	2
FC	<i>Ferro Cast</i>	2
PET	<i>Polietilen Tereftalat</i>	3
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>	6
SOP	<i>Standar Operasional Prosedur</i>	6
OES	<i>Optical Emission Spectrometer</i>	7
ASTM	<i>American Standard Testing and Material</i>	16
EN-GJL	<i>European Norm Gießereiwesen – Gußeisen mit Lamellengraphit</i>	16
CE	<i>Carbon Equivalent</i>	17
FCC	<i>Face Centered Cubic</i>	23
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>	39
AES	<i>Auger Electron Spectroscopy</i>	42
LAMBANG		
$\alpha\text{-Fe}$	Ferit Besi	16
ρ	Densitas	17
σ	Kekuatan Tarik	17
E	Modulus Elastis	17
HB	Nilai kekerasan Brinell	17
C_p	Kapasitas panas	17
Λ	Konduktivitas termal	17
γ	Austenit	20
L	Likuid	20
TE_{low}	Temperatur eutektik bawah	22
TE_{gray}	Temperatur eutektik stabil	22
TE_{white}	Temperatur eutektik metastabil	22
D	Konstanta laju difusi	23

D_0	Konstanta pra-eksponensial	23
Q	Energi aktivasi difusi	23
R	Konstanta gas universal	23
T	Temperatur	23
T_{UC}	Temperatur kritis atas	23
T_{LC}	Temperatur kritis bawah	23
ΔT	<i>Undercooling</i>	25
T_m	Temperatur keseimbangan eutektik teoretis	25
t_s	Waktu pembekuan	25
B	Konstanta cetakan	25
V	Volume	25
A	Luas Area	26
n	Jumlah data/konstanta	26
T_L	Temperatur likuidus	27
T_G	Temperatur eutektik stabil	27
D_E	Diameter ekivalen	28
t	Ketebalan	28
T_e	Temperatur eutektoid	34
ΔG_v	Perubahan energi bebas Gibbs Volumetrik	34
ΔH_v	Perubahan entalpi transformasi fasa	34
λ	Jarak antar lamelar perlit	36
Sn_{Eq}	Timah ekivalen	36
T_α	Temperatur eutektoid stabil	37
T_p	Temperatur eutektoid metastabil	37
HV	Nilai kekerasan Vickers	47
F	Gaya	47
kgf	Kilogram Force	47
P	Beban	48
D	Diameter bola indentor	48
d	Diameter indentasi	48
ΔHB	Selisih Nilai Kekerasan Brinell	75
ΔHV	Selisih Nilai Kekerasan Vickers	77