

## DAFTAR ISI

BAB I : PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.1.1 Operasi Lapangan Minyak Bumi .....	1
1.1.2 Kendala Penggunaan Gas Produksi Sendiri.....	2
1.1.3 Optimisasi Tenaga Listrik, Uap dan Jaringan Distribusi Gas.....	5
1.1.4 Optimisasi dengan Mempertimbangkan Penggunaan Gas Produksi Sendiri.....	6
1.1.5 Pengembangan Algoritme <i>Chemical Reaction Optimization</i> .....	8
1.2 Rumusan dan Batasan Masalah .....	9
1.3 Keaslian Penelitian.....	10
1.4 Tujuan Penelitian .....	11
1.5 Manfaat Penelitian .....	12
BAB II: TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1 Tinjauan Pustaka.....	13
2.1.1 Optimisasi aliran daya / <i>optimal power flow</i> (OPF).....	13
2.1.2 Pemodelan siklus kogenerasi tenaga listrik dan uap / panas .....	17
2.1.3 <i>Chemical Reaction Optimization</i> .....	29
2.1.4 Optimisasi multi tujuan dengan <i>Chemical Reaction Optimization</i> ..	34
2.1.5 Algoritme pengambilan keputusan / penentuan solusi terbaik .....	38
2.2 Landasan Teori.....	39
2.2.1 Optimisasi aliran daya dengan metode deterministik.....	39
2.2.2 Optimisasi aliran daya multi tujuan – metode deterministik .....	44
2.2.3 Optimisasi aliran daya dengan metode heuristik.....	45
2.2.4 Optimisasi aliran daya multi tujuan - heuristik .....	50
2.2.5 Siklus termodinamika pembangkit listrik tenaga gas.....	54
2.2.6 Analisis bahan bakar gas .....	58
2.2.7 Analisis aliran daya .....	61
2.2.8 Analisis aliran saluran gas .....	63

2.3	Pertanyaan Penelitian .....	65
2.4	Hipotesis .....	66
BAB III: METODE PENELITIAN .....		68
3.1	Sistem Kombinasi Tenaga Listrik, Uap dan Bahan Bakar .....	68
3.2	Variabel Penelitian .....	69
3.3	Instrumen Pengumpulan Data.....	74
3.4	Prosedur Pengambilan Data.....	75
3.5	Cara Analisis Data.....	75
3.5.1	Pemodelan termodinamika pembangkit .....	75
3.5.2	Analisis bahan bakar.....	75
3.5.3	Pemodelan sistem <i>combined heat &amp; power</i> .....	76
3.5.4	<i>Unit commitment</i> & optimisasi aliran daya – fungsi tujuan tunggal	79
3.5.5	Optimisasi aliran daya – fungsi multi tujuan .....	82
3.5.6	Integrasi optimisasi saluran gas, sistem tenaga listrik, kombinasi uap dan panas .....	85
3.5.7	Pengembangan algoritme CRO untuk optimisasi CHP multi tujuan	92
BAB IV: HASIL PENELITIAN.....		99
4.1	Persamaan Termodinamika dan Perbandingan dengan Aktual .....	99
4.2	Optimisasi Aliran Daya Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas dengan Bahan Bakar Gas Asosiasi dan Basah.....	103
4.3	Optimisasi Multi Tujuan Aliran Daya Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas dengan Bahan Bakar Gas Asosiasi dan Basah.....	112
4.4	Optimisasi Terintegrasi Saluran Gas, Sistem Tenaga Listrik serta Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas dengan Fungsi Batasan Penggunaan Gas Basah dan Asosiasi.....	124
4.5	Optimisasi Aliran Daya Multi Tujuan Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas berbasis Indicator Based Multi Objective Chemical Reaction Optimization .....	138
4.6	Optimisasi Aliran Daya Multi Tujuan Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas berbasis Hypervolume Based Multi Objective Chemical Reaction Optimization .....	145
BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN .....		153
5.1	Kesimpulan.....	153

5.2	Saran.....	154
BAB VI: RINGKASAN.....		156
6.1	Optimisasi Aliran Daya Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas dengan Bahan Bakar Gas Asosiasi dan Basah.....	156
6.2	Optimisasi Multi Tujuan Aliran Daya Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas dengan Bahan Bakar Gas Asosiasi dan Basah.....	157
6.3	Optimisasi Terintegrasi Saluran Gas, Sistem Tenaga Listrik serta Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas dengan Fungsi Batasan Penggunaan Gas Basah dan Asosiasi.....	159
6.4	Optimisasi Aliran Daya Multi Tujuan Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas berbasis Indicator Based Multi Objective Chemical Reaction Optimization .....	160
6.5	Optimisasi Aliran Daya Multi Tujuan Kombinasi Tenaga Listrik dan Panas berbasis Hypervolume Based Multi Objective Chemical Reaction Optimization .....	161
Lampiran 1: Parameter Turbin Gas .....		175
Lampiran 2: Data Sistem Tenaga Listrik .....		179
Lampiran 3: Data Saluran Pipa Gas.....		182
Lampiran 4: Pengaruh Kualitas Bahan Bakar terhadap Kurva <i>Input Output</i> .....		183
Lampiran 5: Perbandingan Perhitungan Model Termodinamika dengan Perangkat Lunak Hysys.....		185

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Fungsi tujuan, variabel kontrol dan variabel keadaan .....	13
Tabel 2.2 Studi literatur CHPED tujuan tunggal .....	18
Tabel 2.3 Studi literatur CHPED multi tujuan .....	26
Tabel 2.4 Implementasi CRO .....	34
Tabel 2.5 Implementasi PSO .....	46
Tabel 2.6 Genetic algorithm .....	48
Tabel 2.7 Evolutionary programming .....	48
Tabel 2.8 Differential evolution .....	49
Tabel 2.9 Pseudocode <i>non-dominated sorting algorithm</i> .....	53
Tabel 2.10 Sifat intrinsik komponen penyusun bahan bakar gas .....	59
Tabel 3.1 Kapasitas pembangkit .....	68
Tabel 3.2 Variabel penelitian .....	70
Tabel 3.3 Data bahan bakar gas .....	78
Tabel 3.4 Komposisi gas menuju turbin gas AG, DG dan <i>Gas Boiler</i> .....	89
Tabel 3.5 Komposisi gas menuju turbin gas MGA, MGB .....	90
Tabel 3.6 Pseudocode IBCRO .....	94
Tabel 4.1 Hasil perhitungan <i>non linear least square</i> .....	99
Tabel 4.2 Hasil <i>unit commitment</i> .....	104
Tabel 4.3 Rugi-rugi sistem tenaga listrik (MW) .....	106
Tabel 4.4 Komposisi bahan bakar optimal (volume – std m <sup>3</sup> /jam) .....	106
Tabel 4.5 Komposisi bahan bakar optimal (%) .....	107
Tabel 4.6 Persentase penggunaan gas produksi sendiri (%) .....	108
Tabel 4.7 Pengaturan uap (m <sup>3</sup> /jam) .....	109
Tabel 4.8 Biaya optimal (\$/jam) .....	110
Tabel 4.9 Solusi minimum masing-masing fungsi tujuan skenario 1 .....	114
Tabel 4.10 Perbandingan solusi daya dan uap untuk skenario 1: biaya vs. MWI .....	114
Tabel 4.11 Komposisi bahan bakar (mmbtu/jam) skenario 1: MWI vs. biaya .....	115

Tabel 4.12 Solusi terbaik dan ASD Skenario 1: MWI vs. biaya .....	116
Tabel 4.13 Solusi minimum fungsi tujuan skenario 2: biaya vs. H <sub>2</sub> S .....	117
Tabel 4.14 Konsumsi bahan bakar (mmbtu/jam) skenario 2: biaya vs. H <sub>2</sub> S.....	118
Tabel 4.15 Solusi terbaik dan ASD skenario 2: biaya vs. H <sub>2</sub> S.....	119
Tabel 4.16 Solusi minimum masing-masing fungsi tujuan untuk kasus <i>triojective</i> .....	120
Tabel 4.17 Konsumsi bahan bakar (mmbtu/jam) skenario 3: biaya vs. MWI vs. H <sub>2</sub> S .....	121
Tabel 4.18 Solusi terbaik dan ASD skenario 2: biaya vs. H <sub>2</sub> S.....	121
Tabel 4.19 Perbandingan hasil optimisasi.....	136
Tabel 4.20 Solusi optimal untuk kasus <i>biobjective</i> .....	139
Tabel 4.21 Perbandingan solusi terbaik .....	140
Tabel 4.22 Perbandingan <i>side coverage</i> .....	141
Tabel 4.23 Perbandingan <i>spacing</i> .....	142
Tabel 4.24 Solusi optimal untuk kasus <i>triojective</i> .....	143
Tabel 4.25 Pengujian konsistensi IBCRO.....	144
Tabel 4.26 Perbandingan solusi ekstrem dan kompromi untuk skenario 1.....	146
Tabel 4.27 Perbandingan <i>coverage</i> dan <i>spacing</i> untuk skenario 1.....	146
Tabel 4.28 Perbandingan solusi ekstrem dan kompromi untuk skenario 2.....	148
Tabel 4.29 Perbandingan <i>coverage</i> dan <i>spacing</i> untuk skenario 2.....	148
Tabel 4.30 Perbandingan solusi ekstrem dan kompromi untuk skenario 3.....	150
Tabel 4.31 Perbandingan <i>coverage</i> dan <i>spacing</i> untuk skenario 3.....	151
Tabel 4.32 Pengujian konsistensi HVCRO .....	151
Tabel L 1.1 Parameter turbin gas & HRSG-DB DG 1 - 3 .....	175
Tabel L 1.2 Parameter turbin gas & HRSG AG 1 - 5 .....	176
Tabel L 1.3 Parameter turbin gas MG 1 - 5 .....	177
Tabel L 1.4 Parameter turbin gas MG 6 - 8 .....	177
Tabel L 1.5 Parameter turbin gas MG 9 - 11.....	178
Tabel L 1.6 Parameter <i>gas boiler</i> .....	178
Tabel L 2.1 Data saluran transmisi .....	179
Tabel L 2.2 Data beban .....	180

Tabel L 2.3 Data transformator .....	181
Tabel L 3.1 Data saluran pipa gas .....	182
Tabel L 3.2 Batasan tekanan pipa gas.....	182
Tabel L.5.1 Perbandingan keluaran turbin gas - uap rendah beban tinggi.....	186
Tabel L.5.2 Perbandingan keluaran turbin gas - uap tinggi beban tinggi .....	186
Tabel L.5.3 Perbandingan perhitungan tekanan pipa skenario uap rendah dengan batasan kualitas gas.....	188
Tabel L.5.4 Perbandingan perhitungan tekanan pipa skenario uap tinggi dengan batasan kualitas gas.....	189

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1: Siklus kogenerasi dalam lapangan minyak dengan metode produksi <i>steam flood</i> .....	1
Gambar 2.1: Kumpulan solusi optimal <i>pareto front</i> .....	17
Gambar 2.2: Efek pembebanan katup saat katup A, B, C, D membuka.....	20
Gambar 2.3: <i>Feasible operating region combined heat and power</i> . .....	21
Gambar 2.4: <i>Prohibited operating zone</i> .....	23
Gambar 2.5: Proses turbin gas.....	24
Gambar 2.6: Algoritme CRO .....	33
Gambar 2.7: Pareto front – CRO dengan metode dekomposisi .....	35
Gambar 2.8: Indikator <i>hypervolume</i> .....	37
Gambar 2.9: Indikator epsilon.....	37
Gambar 2.10: Linearisasi persamaan kubik .....	39
Gambar 2.11: Konsep perubahan posisi pada PSO. ....	45
Gambar 2.12: <i>Hyperbox</i> pada bidang fungsi tujuan .....	50
Gambar 2.13: Seleksi dalam NSGAI.....	52
Gambar 2.14: Proses termodinamika turbin gas.....	56
Gambar 2.15: Siklus Brayton non-ideal.....	57
Gambar 3.1: <i>Mindmap</i> penelitian .....	70
Gambar 3.2: Langkah penelitian .....	72
Gambar 3.3: Sistem produksi uap.....	76
Gambar 3.4: Sistem tenaga listrik.....	77
Gambar 3.5: Sistem distribusi gas alam dan gas produksi sendiri .....	77
Gambar 3.6 : Diagram masukan – proses – keluaran <i>unit commitment &amp; optimisasi aliran daya – fungsi tujuan tunggal</i> .....	79
Gambar 3.7 : Diagram alir <i>unit commitment &amp; optimisasi aliran daya – fungsi tujuan tunggal</i> .....	80
Gambar 3.8 : Diagram masukan – proses – keluaran optimisasi aliran daya – fungsi multi tujuan .....	83
Gambar 3.9 : Diagram alir optimisasi aliran daya – fungsi multi tujuan.....	84

Gambar 3.10 : Diagram masukan, proses, keluaran optimisasi terpadu saluran gas, sistem tenaga listrik kombinasi uap dan panas .....	86
Gambar 3.11 : Diagram alir optimisasi terpadu saluran gas, sistem tenaga listrik kombinasi uap dan panas .....	87
Gambar 3.12: Saluran pipa gas alam dan gas produksi sendiri .....	88
Gambar 3.13: Interkoneksi saluran pipa gas dengan sistem tenaga listrik .....	90
Gambar 3.14: Interkoneksi saluran pipa gas dengan saluran produksi uap .....	91
Gambar 3.15 : Diagram alir R2-IBCRO .....	93
Gambar 3.16 : Konsep <i>hypervolume</i> .....	95
Gambar 3.17: Algoritme HVCRO .....	97
Gambar 4.1 : Perbandingan simulasi vs. aktual unit DG 1-3 (tipe 1) .....	100
Gambar 4.2: Perbandingan simulasi vs. aktual unit MG 1-5 (tipe 3) .....	100
Gambar 4.3: Perbandingan simulasi vs. aktual unit AG 1-5, MG 6-8 (tipe 2)....	101
Gambar 4.4: Perbandingan simulasi vs. aktual unit MG 9-11 (tipe 4) .....	101
Gambar 4.5: Perbandingan simulasi vs. aktual HRSG – AG 1-5 (tipe 2) .....	102
Gambar 4.6 : Perbandingan simulasi vs. aktual HRSG DG 1-3 (tipe1) .....	102
Gambar 4.7: Pengaturan beban aktif (MW) .....	105
Gambar 4.8: Profil tegangan (per unit) .....	109
Gambar 4.9: <i>Pareto front</i> biaya vs. MWI .....	113
Gambar 4.10: MWI bahan bakar gas AG1-5, MG1, MG9-11 .....	116
Gambar 4.11: <i>Pareto front</i> biaya minimum vs. kandungan H <sub>2</sub> S .....	117
Gambar 4.12: Kandungan H <sub>2</sub> S bahan bakar gas AG1-5, MG1, MG9-11 .....	119
Gambar 4.13: <i>Pareto front</i> biaya vs. MWI vs. H <sub>2</sub> S .....	120
Gambar 4.14: MWI campuran bahan bakar AG1-5, MG1, MG9-11 – biaya vs. MWI vs. H <sub>2</sub> S .....	122
Gambar 4.15: Kandungan H <sub>2</sub> S campuran bahan bakar AG1-5, MG1, MG9-11 – biaya vs. MWI vs. H <sub>2</sub> S .....	122
Gambar 4.16: Pengaturan daya nyata (MW) .....	125
Gambar 4.17: Pengaturan produksi uap (barrel per jam) .....	126
Gambar 4.18: Konsumsi bahan bakar gas alam pada DG1-3 dan <i>gas boiler</i> (mscf/jam) .....	127
Gambar 4.19: Rugi-rugi sistem tenaga listrik (MW) .....	128

Gambar 4.20: Profil tegangan sistem tenaga listrik (pu) .....	128
Gambar 4.21: Pengaturan daya reaktif (MVAR).....	129
Gambar 4.22: Campuran bahan bakar untuk terminal AG .....	130
Gambar 4.23: Campuran bahan bakar untuk terminal MGA .....	131
Gambar 4.24 : Campuran bahan bakar untuk terminal MGB .....	131
Gambar 4.25 : Perbandingan konsumsi dengan ketersediaan gas produksi sendiri untuk terminal MGA dan MGB.....	133
Gambar 4.26 : <i>Modified Wobbe Index</i> untuk terminal AG, MGA dan MGB .....	134
Gambar 4.27 : Kandungan H <sub>2</sub> S untuk terminal AG, MGA dan MGB (ppmv) ...	134
Gambar 4.28 : Profil tekanan pipa (psia) .....	135
Gambar 4.29: Perbandingan <i>pareto front</i> skenario biaya vs. rugi-rugi .....	139
Gambar 4.30: Perbandingan <i>pareto front</i> rugi-rugi vs. produksi uap.....	141
Gambar 4.31: Perbandingan <i>pareto front</i> biaya vs. rugi-rugi vs. produksi uap ..	143
Gambar 4.32: Perbandingan <i>pareto front</i> skenario biaya vs. rugi-rugi .....	146
Gambar 4.33: Perbandingan <i>pareto front</i> rugi-rugi vs. produksi uap.....	147
Gambar 4.34: Perbandingan <i>pareto front</i> biaya vs. rugi-rugi vs. produksi uap ..	149
Gambar L.4.1 : Pengaruh kandungan panas bahan bakar terhadap kurva <i>input</i> <i>output</i> .....	135
Gambar L.5.1 : Simulasi Hysys untuk menghitung keluaran turbin gas .....	135
Gambar L.5.2 : Simulasi Hysys untuk menghitung profil tekanan pipa.....	187

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Parameter Turbin Gas .....	175
Lampiran 2: Data Sistem Tenaga Listrik .....	179
Lampiran 3: Data Saluran Pipa Gas .....	182
Lampiran 4: Pengaruh Kualitas Bahan Bakar terhadap Kurva <i>Input Output</i> .....	183
Lampiran 5: Perbandingan Perhitungan Model Termodinamika dengan Perangkat Lunak Hysys .....	185