UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN ii
NASKAH SOAL TUGAS AKHIR iii
HALAMAN PERNYATAAN iv
HALAMAN PERSEMBAHAN v
INTISARI vi
KATA PENGANTAR vii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR TABEL xv
DAFTAR LAMPIRAN xviii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xix

BAB I PENDAHULUAN
1.1. Latar Belakang Masalah 1
1.2. Rumusan Masalah 2
1.3. Batasan Perancangan 2
1.4. Tujuan Perancangan 3
1.5. Manfaat Perancangan 3
1.6. Sistematika Penulisan 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1. Jenis-Jenis Reservoir Panas Bumi 5
2.2. Model Sistem Panas Bumi 8
2.3. Jenis-Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi 13

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.3.1. Siklus Uap Kering (*Direct Dry Steam Cycle*) 14
2.3.2. Siklus Uap Hasil Pemisahan (*Separated Steam Cycle*) 16
2.3.3. Siklus Uap Hasil Penguapan (*Single Flash Steam*) 18
2.3.4. Siklus uap hasil pemisahan dan penguapan dengan dua turbin terpisah (*flashing multi flash steam*) 19
2.3.5. Siklus *binary* 20
2.3.6. Sistem *combined cycle* 21
2.4. Studi Kelayakan (*feasibility study*) 22
2.5. Analisa Aliran dalam Sumur Uap 24

BAB III LANDASAN TEORI

3.1. Aliran Radial dalam Reservoir 26
3.1.1. Model skematis reservoir dan sumur panas bumi 26
3.1.2. Persamaan Dasar 27
3.2. Aliran Fluida dalam Sumur Panas Bumi 34
3.2.1. Aliran Satu Fase 34
3.2.2. Aliran Dua Fase 35
3.2.2.1. Hubungan Dasar Parameter Aliran Dua Fase 35
3.2.2.2. Parameter Sistem Aliran Dua Fase 37
3.2.2.3. Penurunan Tekanan 39
3.3. Prinsip Termodinamika pada Pembangkit Listrik Panas Bumi 39
3.3.1. Siklus uap kering (d*irect dry steam cycle*) 39
3.3.2. Siklus uap hasil pemanasan (*separated steam cycle*) 41

BAB IV PROGRAM SIMULASI

4.1. Gambaran Umum Program 44
4.1.1. Penjelasan Masing-Masing *Procedure* 45
4.1.2. Parameter-Parameter yang Digunakan 46
4.2. Pengenalan Program 55
4.2.1. Mengenal *Borland Delphi* 55

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.2.2. Pengoperasian *Borland Delphi* 56
4.2.3. Tahapan Perancangan Aplikasi 59
4.2.4. Komponen dalam *Delphi* 60
4.3. Algoritma Program 62
4.4. Program Utama *welltrans* 66
4.4.1. Pemanfaatan *File Project* 66
4.4.2. Tampilan Aplikasi 76
4.4.2.1. Tampilan *frmParameter* 77
4.4.2.2. Tampilan *frmOutput* 78

BAB V VALIDASI PROGRAM
5.1. Metode Validasi Program 80
5.1.1. Validasi Data Keluaran 81
5.1.2. Validasi dengan Data Pengukuran 84

BAB VI HASIL DAN PEMBAHASAN
6.1. Pengaruh Kenaikan G = 0 – 72 ton/jam terhadap Karakteristik Sumur 100
6.2. Pengaruh Pengujian *drawdown* dan *buildup* terhadap Karakteristik Sumur 109
6.3. Pengaruh Pengujuan *Shut in* terhadap Karakteristik Sumur 125
6.4. Pengaruh Laju Aliran *Transient* terhadap Karakteristik Sumur 131

BAB VII PENUTUP
7.1. Kesimpulan 144
7.2. Saran 145

DAFTAR PUSTAKA 146
LAMPIRAN 147

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sistem dominasi uap 5
Gambar 2.2. Sistem dominasi air 6
Gambar 2.3. Model sistem panas bumi (White, 1967) 9
Gambar 2.4. Model sistem panas bumi di lapangan Wairakei (Hochstein, 1990) 10
Gambar 2.5. Model sistem panas bumi di lapangan Rotorua, Selandia Baru (Donaldson & Grant, 1981) 10
Gambar 2.6. Model sistem panas bumi di lapangan Kamojang (Hochstein, 1990) 11
Gambar 2.7. Skema instalasi pembangkit listrik uap kering 14
Gambar 2.8. Pola pengusahaan panas bumi Kamojang unit 1 sampai dengan 3 15
Gambar 2.9. Skema diagram pembangkit listrik untuk fluida dominasi air 16
Gambar 2.10. Pola pengusahaan panas bumi lapangan Awibengkok unit 1-3 17
Gambar 2.11. Pola pengusahaan panas bumi lapangan Awibengkok unit 4-6 17
Gambar 2.12. Skema diagram pembangkit listrik s*ingle flash steam* 18
Gambar 2.13. Skema diagram pembangkit listrik *double flash steam* 19
Gambar 2.14. Skema diagram pembangkit listrik sistem *multi flash steam* 20
Gambar 2.15. Skema diagram pembangkit listrik sistem *binary cycle* 21
Gambar 2.16. Skema diagram pembangkit listrik sistem siklus kombinasi 22
Gambar 2.17.Diagram alir pembangunan pembangkit listrik panas bumi bila potensi sumur tinggi 23
Gambar 2.18. Diagram alir pembangunan pembangkit listrik panas bumi bila terdapat kebutuhan listrik 24
Gambar 3.1. Model skematis reservoir dan sumur panas bumi (Khasani, 2002) 27

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 3.2. Ilustasi distribusi tekanan di reservoir (Khasani, 2002) 32
Gambar 4.1. Lembar kerja *Borland Delphi* 56
Gambar 4.2. Tab *properties* dan *events* 58
Gambar 4.3. Tampilan *form* 60
Gambar 4.4. Tampilan unit 61
Gambar 4.5. Diagram alir *welltrans* 66
Gambar 4.6. Halaman muka aplikasi 76
Gambar 4.7 Halaman *form frmParameter* untuk memasukkan *input* 77
Gambar 4.8. Keterangan yang muncul saat pengisian *input* tidak lengkap 78
Gambar 4.9. Halaman *form frmOutput* 79
Gambar 5.1. Data keluaran ke-10 dihitung dengan aplikasi *welltrans* 83
Gambar 5.2. Data keluaran ke-10 dihitung dengan aplikasi w*ellbore* 84
Gambar 5.3. Grafik profil tekanan sumur Svartsengi, *Well* 4 (pengukuran) (Bjornsson, 1987) 85
Gambar 5.4. Grafik profil tekanan sumur Krafla, *Well* 9 (pengukuran) (Bjornsson, 1987) 86
Gambar 5.5. Grafik profil tekanan sumur Krafla, *Well* 11 (pengukuran) (Bjornsson, 1987) 87

Gambar 5.6. Profil tekanan sumur Svartsengi, *Well* 4 hasil perhitungan aplikasi *welltrans* 89
Gambar 5.7. Grafik profil tekanan sumur Svartsengi, *Well* 4 91
Gambar 5.8. Profil tekanan sumur Krafla, *Well* 9 hasil perhitungan aplikasi *welltrans* 93
Gambar 5.9. Grafik profil tekanan sumur Krafla, *Well* 9 95
Gambar 5.10. Profil tekanan sumur Krafla, *Well* 11 hasil perhitungan aplikasi *welltrans* 97
Gambar 5.11. Grafik profil tekanan sumur Krafla, *Well* 11 99
Gambar 6.1. Grafik tekanan dasar sumur dengan G = 0 – 72 ton/jam 101
Gambar 6.2. Grafik tekanan kepala sumur dengan G = 0 – 72 ton/jam 102

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 6.3. Profil tekanan untuk G = 0 – 72 ton/jam pada variasi temperatur reservoir 105
Gambar 6.4. Profil temperatur untuk G = 0 – 72 ton/jam pada variasi temperatur reservoir 108
Gambar 6.5. Grafik tekanan kepala sumur selama pengujian *draw down* 110
Gambar 6.6. Grafik tekanan dasar sumur selama pengujian *draw down* 110
Gambar 6.7. Grafik tekanan kepala sumur selama pengujian *build up* 111
Gambar 6.8. Grafik tekanan kepala sumur selama pengujian *build up* 111
Gambar 6.9. Profil tekanan *draw down* pada temperatur reservoir tertentu 117
Gambar 6.10. Profil tekanan *build up* pada temperatur reservoir tertentu 117
Gambar 6.11. Profil temperatur *draw down* pada temperatur reservoir tertentu 122
Gambar 6.12. Profil temperatur *build up* pada temperatur reservoir tertentu 123
Gambar 6.13. Kondisi tekanan sumur selama *shut in* 125
Gambar 6.14. Profil tekanan *shut in* pada temperatur reservoir tertentu 127
Gambar 6.15. Profil temperatur *shut in* pada temperatur reservoir tertentu 129
Gambar 6.16. Grafik laju aliran total kasus keempat 131
Gambar 6.17. Grafik tekanan kepala sumur kasus keempat 131
Gambar 6.18. Grafik tekanan dasar sumur kasus keempat 132
Gambar 6.19. *Wellhead output curve* untuk harga kh bervariasi 132
Gambar 6.20. Grafik hubungan antara tekanan *feed zone* dengan laju aliran total 135
Gambar 6.21. Grafik hubungan antara tekanan kepala sumur dengan laju aliran total 138
Gambar 6.22. Profil tekanan kasus keempat dengan temperatur reservoir berlainan 140
Gambar 6.23. Profil temperatur kasus keempat dengan temperatur reservoir berlainan 142

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Klasifikasi reservoir panas bumi berdasarkan temperatur	8
Tabel 5.1.	Data masukan program aplikasi	81
Tabel 5.2.	Data pengukuran sumur Svartsengi, *Well* 4	85
Tabel 5.3.	Data pengukuran sumur Krafla, *Well* 9	86
Tabel 5.4.	Data pengukuran sumur Krafla, *Well* 11	87
Tabel 5.5.	Data sumur Svartsengi, *Well* 4	88
Tabel 5.6.	Data perhitungan sumur Svartsengi, *Well* 4 dengan aplikasi *welltrans* dan data pengukuran	90
Tabel 5.7.	Data sumur Krafla, *Well* 9	92
Tabel 5.8.	Data perhitungan sumur Krafla, *Well* 9 dengan aplikasi *welltrans* dan data pengukuran	94
Tabel 5.9.	Data sumur Krafla, *Well* 11	96
Tabel 5.10.	Data perhitungan sumur Krafla, *Well* 11 dengan aplikasi *welltrans* dan data pengukuran	98
Tabel 6.1.	Parameter-parameter kasus pertama di dalam sumur	100
Tabel 6.2.	Parameter-parameter kasus pertama di dalam reservoir	101
Tabel 6.3.	Kondisi batas kasus pertama	101
Tabel 6.4.	Harga energi per satuan massa untuk tiap temperatur reservoir	103
Tabel 6.5(a).	Profil tekanan *cold well* untuk laju aliran total 0 - 72 ton/jam	103
Tabel 6.5(b).	Profil tekanan *warm well* untuk laju aliran total 0 - 72 ton/jam	104
Tabel 6.6(a).	Profil temperatur *cold well* untuk laju aliran total 0 - 72 ton/jam	106
Tabel 6.6(b).	Profil temperatur *warm well* untuk laju aliran total 0 - 72 ton/jam	107
Tabel 6.7.	Parameter-parameter kasus kedua di dalam sumur	109
Tabel 6.8.	Parameter-parameter kasus pertama di dalam reservoir	109

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 6.9.	Kondisi batas kasus kedua	110
Tabel 6.10.	Harga energi per satuan massa kasus kedua untuk tiap temperatur reservoir	113
Tabel 6.11(a).	Profil tekanan *draw down* untuk laju aliran total 72 – 144 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	113
Tabel 6.11(b).	Profil tekanan *draw down* untuk laju aliran total 144 - 216 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	114
Tabel 6.11(c).	Profil tekanan *build up* untuk laju aliran total 216 - 144 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	115
Tabel 6.11(d).	Profil tekanan *build up* untuk laju aliran total 144 – 72 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	116
Tabel 6.12(a).	Profil temperatur *draw down* untuk laju aliran total 72 – 144 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	118
Tabel 6.12(b).	Profil temperatur *draw down* untuk laju aliran total 144 - 216 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	119
Tabel 6.12(c).	Profil temperatur *build up* untuk laju aliran total 216 - 144 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	120
Tabel 6.12(d).	Profil temperatur *build up* untuk laju aliran total 144 – 72 ton/jam pada temperatur reservoir tertentu	121
Tabel 6.13.	Parameter-parameter kasus ketiga di dalam sumur	124
Tabel 6.14.	Parameter-parameter kasus ketiga di dalam reservoir	124
Tabel 6.15.	Kondisi batas kasus ketiga	125
Tabel 6.16.	Profil tekanan *shut in* untuk laju aliran total 36 - 0 ton/jam	126
Tabel 6.17.	Profil temperatur *shut in* untuk laju aliran total 36 - 0 ton/jam	128
Tabel 6.18.	Parameter-parameter kasus keempat di dalam sumur	130
Tabel 6.19.	Parameter-parameter kasus keempat di dalam reservoir	130
Tabel 6.20.	Perbandingan antara komponen penurunan tekanan terhadap penurunan tekanan total	133

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 6.21. Komponen penurunan tekanan untuk kh = 2,5 Darcy-meter 134
Tabel 6.22. Pengaruh variasi permeabilitas (kh) terhadap hubungan antara laju aliran total dengan tekanan *feed zone* 135
Tabel 6.23. Harga energi/massa untuk tiap temperatur reservoir 136
Tabel 6.24. Harga tekanan kepala sumur dengan variasi temperatur 137
Tabel 6.25. Profil tekanan kasus keempat pada variasi temperatur reservoir 139
Tabel 6.26. Profil temperatur kasus keempat dengan variasi temperatur reservoir 141

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data masukan *welbore* untuk kasus pertama 146

Lampiran 2. Data masukan *welbore* untuk kasus kedua 147

Lampiran 3. Data masukan *welbore* untuk kasus ketiga 148

Lampiran 4. Data pengukuran lapangan dan validasi *welbore* untuk Sumur Svartsengi, *Well* 4 (Bjornsson, 1987) 149

Lampiran 5. Data pengukuran lapangan dan validasi *welbore* untuk Sumur Krafla, *Well* 9 (Bjornsson, 1987) 150

Lampiran 6. Data pengukuran lapangan dan validasi *welbore* untuk Sumur Krafla, *Well* 11 (Bjornsson, 1987) 151

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	: luas penampang sumur
A_g	: luas penampang sumur untuk uap
A_l	: luas penampang sumur untuk cairan
c	: kompresibilitas dari reservoir
D	: diameter sumur
e	: energi spesifik rata-rata massa
e_g	: energi spesifik dari uap jenuh
e_f	: energi spesifik dari cairan jenuh
f	: faktor gesekan
g	: percepatan gravitasi
G	: kecepatan massa
h_g	: entalpi spesifik dari uap jenuh
h_f	: entalpi spesifik dari cairan jenuh
h	: kedalaman
H	: koefisien perpindahan panas
K	: rasio kecepatan
k	: permeabilitas
k_t	: konduktivitas termal
ΔL	: selisih panjang
$\dot{m}$	: laju aliran massa total
Q_g	: kecepatan volumetrik uap
Q_l	: kecepatan volumetrik cairan
P	: tekanan
ΔP_t	: penurunan tekanan total
ΔP_f	: penurunan tekanan karena gesekan
ΔP_h	: penurunan tekanan karena potensial
ΔP_a	: penurunan tekanan karena percepatan
Pi	: tekanan awal pada reservoir
q	: *volume flow rate*

UNIVERSITAS GADJAH MADA
PENGEMBANGAN PERANGKAT LUNAK UNTUK KAJIAN NUMERIK TRANSIENT ALIRAN DUA FASE DALAM SUMUR DAN RESERVOIR PANAS BUMI
Dedy Sagita Putra, Dr. Ir. Khasani, S.T., M.Eng, IPM. ASEAN Eng
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

r_w	: jari-jari sumur
t	: waktu
u_g	: kecepatan rata-rata uap
u_l	: kecepatan rata-rata cairan
T	: temperatur fluida di dalam sumur
Tr	: temperatur reservoir
v	: kecepatan rata-rata massa fluida
v_g	: kecepatan uap
v_f	: kecepatan air
x	: fraksi uap
Φ	: porositas
ρ	: massa jenis
ρ_g	: massa jenis uap jenuh
ρ_f	: massa jenis air jenuh
ρ_H	: massa jenis homogen
α	: fraksi hampa
σ	: tegangan permukaan cairan