UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

Halaman

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

BAB I PENDAHULUAN
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 3
1.3. Batasan Masalah 3
1.4. Tujuan Penelitian 4
1.5. Manfaat Penelitian 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI
2.1. Tinjauan Pustaka 6
2.2. *Boiler* 20
2.3. Metode Pembakaran Pada *Boiler* Berbahan Bakar Batubara 24
2.4. Batubara 27

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.4.1. Metode Analisis Batubara 29
2.5. Pembakaran Batubara 33
2.5.1. Teori Pembakaran 33
2.5.2. Pembakaran Batubara 35
2.5.3. Kandungan Material Volatil 37
2.5.4. Partikel Arang (*Char*) 38
2.6. Dampak *Ash* Batubara Pada *Boiler* 39
2.6.1. Endapan *Ash* 40
2.6.2. Kemampuan Leleh Abu (*Ash Fusibility*) 43
2.6.3. Rasio Asam-Basa 45
2.6.4. Hubungan Viskositas-Temperatur dari Abu Batubara 46
2.7. Komputasi Numerik 48
2.7.1. Persamaan Kontinuitas (Persamaan Kekekalan Massa) 48
2.7.2. Persamaan Kekekalan Momentum 48
2.7.3. Persamaan Model Fraksi Campuran 49
2.7.4. Persamaan Transport Model Standard $k-\varepsilon$ 52
2.7.5. Persamaan Model Fase Diskrit 54
2.7.6. Model Radiasi P-1 54
2.7.7. NOx 57
2.7.8. Formulasi Solver 59
2.7.9. Kontrol Solusi 59
2.7.10. Kriteria Konvergensi 62

BAB III METODOLOGI PENELITIAN
3.1. Analisis Secara Empiris 63
3.2. Analisis Secara Komputasi Numerik 68
3.2.1. Alat-Alat yang Digunakan 68
3.2.2. Objek Penelitian 68
3.3. Alur Penelitian Permodelan *Boiler* 330 MW 69
3.3.1. Permodelan Geometri Ruang Bakar 71

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.3.2. Pembuatan File PDF 79
3.3.3. Penentuan Model pada Perangkat Lunak *Ansys Fluent* 12.1 85

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Empiris 103
4.2. Analisis Komputasi Numerik 104
4.2.1. Penentuan Konvergensi 106
4.2.2. Kontur *Boiler* PA=21,8 m/s dan SA=26,23 m/s 111
4.2.3. Kontur *Boiler* PA=21,8 m/s dan SA=32,5 m/s 112
4.2.4. Kontur *Boiler* PA=21,8 m/s dan SA=39,14 m/s 114
4.2.5. Kontur *Boiler* PA=21,8 m/s dan SA=45,75 m/s 115
4.2.6. Kontur *Boiler* PA=21,8 m/s dan SA=52,4 m/s 117
4.2.7. Kontur *Boiler* PA=23,02 m/s dan SA=51,72 m/s 119
4.2.8. Kontur *Boiler* PA=24,07 m/s dan SA=51,08 m/s 120
4.2.9. Kontur *Boiler* PA=25,09 m/s dan SA=50,43 m/s 122
4.2.10. Kontur *Boiler* PA=26,16 m/s dan SA=49,75 m/s 124
4.2.11. Kontur Prediksi *Slagging* Pada *Platen Superheater* 127

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan 139
5.2. Saran 140

DAFTAR PUSTAKA 141

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Endapan yang terbentuk pada *superheater* selama pembakaran jerami di Masnedo CHP plant, Denmark 5
Gambar 2.2 Model konfigurasi endapan pada *Fluent* 6
Gambar 2.3 Pemodelan bentuk 3 dimensi 7
Gambar 2.4.Prediksi endapan flux massa dalam $gm^{-2}h^{-1}$ 7
Gambar 2.5 Flux *inertial impaction* dalam $gm^{-2}h^{-1}$ 8
Gambar 2.6. Endapan dari *boundary layer* dalam $gm^{-2}h^{-1}$ 8
Gambar 2.7. Flux endapan uap (*vapour*) dalam $gm^{-2}h^{-1}$ 9
Gambar 2.8. Grafik peningkatan massa endapan sebagai fungsi waktu 9
Gambar 2.9. Temperatur lebur *ash* sebagai fungsi dari angka basa 12
Gambar 2.10. Indeks *fusibility* sebagai fungsi angka basa 12
Gambar 2.11. Rasio asam-basa terhadap angka basa 14
Gambar 2.12. Rasio asam-basa terhadap indeks *fusibility* 15
Gambar 2.13. Rasio silika terhadap angka basa 15
Gambar 2.14. Rasio silika terhadap indeks *fusibility* 16
Gambar 2.15. Besi oksida (Fe_2O_3) dari *ash* terhadap angka basa 17
Gambar 2.16. Besi oksida (Fe_2O_3) dari *ash* terhadap indeks *fusibility* 17
Gambar 2.17. Persentase kandungan Dolomite (DP) terhadap angka basa 18
Gambar 2.18. Persentase kandungan Dolomite (DP) terhadap indeks *fusibility* 18
Gambar 2.19. Faktor *slagging* terhadap angka basa 19
Gambar 2.20. Faktor *slagging* terhadap indeks *fusibility* 19
Gambar 2.21. *Boiler* bertipe *pulverized coal* (PC) 21
Gambar 2.22. Penampang dari *wall tube* 21
Gambar 2.23. *Steam drum* untuk bahan bakar fosil 22
Gambar 2.24. Tipe *boiler* berdasarkan metode pembakaran 24

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 2.25. Tipe *boiler fluidized bed combustion* 25
Gambar 2.26. Tipe boiler *pulverized coal combustion* 26
Gambar 2.27. Batubara *bituminous* 28
Gambar 2.28. Batubara *lignite* 28
Gambar 2.29. Basis analisis batubara 29
Gambar 2.30. Proses pembakaran batubara 36
Gambar 2.31. Proses pengapian batubara yang mengenai permukaan batubara 37
Gambar 2.32. Lokasi terjadinya endapan *slagging* dan *fouling* 41
Gambar 2.33. *Slagging* pada permukaan dinding *boiler* 42
Gambar 2.34. *Fouling* pada permukaan dinding *boiler* 43
Gambar 2.35. Tahapan bentuk-bentuk deformasi dari *ash* 44
Gambar 2.36. Grafik hubungan antara temperatur-viskositas 47
Gambar 2.37. Perpindahan panas secara radiasi 55
Gambar 3.1. Flowchart penelitian yang dilakukan 69
Gambar 3.2. Diagram alir prosedur simulasi numerik pembakaran 71
Gambar 3.3. Ukuran dan letak *burner* yang telah di-*meshing* 71
Gambar 3.4. Ukuran *boiler* yang telah di-*meshing* dari samping 72
Gambar 3.5. *Burner* model DRB-XCL 73
Gambar 3.6. *Meshing* dari plat-plat pada *platen superheater* 74
Gambar 3.7. Elemen-elemen *superheater* 75
Gambar 3.8. Jarak antar permukaan pipa dan penurunan temperatur gas 75
Gambar 3.9. Macam-macam bentuk *mesh* 76
Gambar 3.10. *Mesh* pada *burner* 77
Gambar 3.11. *Mesh* pada area konveksi (*platen superheater*) 78
Gambar 3.12. Hasil *meshing* geometri volume atur *boiler* 79
Gambar 3.13. Diagram alir pembuatan file PDF 81
Gambar 3.14. Menu *define species* 82
Gambar 3.15. Menu komposisi batubara 82
Gambar 3.16. Menu parameter penyelesaian 84
Gambar 3.17. Menu *define case* 84

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 3.18. Menu kondisi operasi 85
Gambar 3.19. Menu aktivasi energy 86
Gambar 3.20. Menu model viskositas aliran 87
Gambar 3.21. Menu model spesies 87
Gambar 3.22. Menu model radiasi 88
Gambar 3.23. Menu *discrete phase model* 89
Gambar 3.24. Menu *setting injector* 89
Gambar 3.25. Menu nilai properti batubara 90
Gambar 3.26. Menu pada *velociy inlet* 97
Gambar 3.27. Menu pada *pressure outlet* 101
Gambar 4.1. Sistem koordinat model *boiler* 106
Gambar 4.2. Grafik residual simulasi *boiler* 108
Gambar 4.3. Kontur temperatur *boiler* 21-26 111
Gambar 4.4. Kontur viskositas *boiler* 21-26 112
Gambar 4.5. Kontur temperatur *boiler* 21-32 113
Gambar 4.6. Kontur viskositas *boiler* 21-32 113
Gambar 4.7. Kontur temperatur *boiler* 21-39 114
Gambar 4.8. Kontur viskositas *boiler* 21-39 115
Gambar 4.9. Kontur temperatur *boiler* 21-45 116
Gambar 4.10. Kontur viskositas *boiler* 21-45 117
Gambar 4.11. Kontur temperatur *boiler* 21-52 118
Gambar 4.12. Kontur viskositas *boiler* 21-52 118
Gambar 4.13. Kontur temperatur *boiler* 23-51 119
Gambar 4.14. Kontur viskositas *boiler* 23-51 120
Gambar 4.15. Kontur temperatur *boiler* 24-51 121
Gambar 4.16. Kontur viskositas *boiler* 24-51 122
Gambar 4.17. Kontur temperatur *boiler* 25-50 123
Gambar 4.18. Kontur viskositas *boiler* 25-50 123
Gambar 4.19. Kontur temperatur *boiler* 26-49 124
Gambar 4.20. Kontur viskositas *boiler* 26-49 125
Gambar 4.21. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 21-26 128

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 4.22. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 21-32 128
Gambar 4.23. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 21-39 129
Gambar 4.24. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 21-45 129
Gambar 4.25. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 21-52 130
Gambar 4.26. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 23-51 130
Gambar 4.27. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 24-51 131
Gambar 4.28. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 25-50 131
Gambar 4.29. Kontur prediksi *slag* pada *boiler* 26-49 132

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1. Batasan yang dianjurkan dari angka basa sebagai fungsi dari temperature lebur *ash* 13
Tabel 2.2. Batasan yang dianjurkan dari angka basa sebagai fungsi indeks *fusibility* 13
Tabel 2.3. Batasan yang dianjurkan dari angka basa 14
Tabel 2.4. Batasan yang dianjurkan dari indeks *fusibility*, rasio basa-asam, dan rasio silica 16
Tabel 2.5. Formula konversi analisis batubara 30
Tabel 2.6. Contoh hasil konversi analisis batubara 31
Tabel 2.7. Contoh hasil analisis proksimat dan ultimat 32
Tabel 2.8. Temperatur penyalaan berbagai bahan bakar padat 33
Tabel 2.9. Perbandingan model radiasi yang tersedia dalam *software fluent* 56
Tabel 3.1. Spesifikasi batubara (Sumber : PLTU 1 Indramayu, 2010) 63
Tabel 3.2. Batasan nilai temperatur lebur *ash* 64
Tabel 3.3. Spesifikasi *ash* batubara 64
Tabel 3.4. Batasan nilai indeks *slagging* 66
Tabel 3.5. Batasan nilai rasio basa-asam 66
Tabel 3.6. Batasan nilai rasio silika-almunium 67
Tabel 3.7. Batasan nilai indeks fusibilitas 68
Tabel 3.8. Tipe kondisi batas pada simulasi *boiler* 78
Tabel 3.9. Analisis proksimat sampel batubara 82
Tabel 3.10. Analisis ultimat sampel batubara 83
Tabel 3.11. Komposisi elemen batubara 83
Tabel 3.12. Kondisi operasi file PDF pada simulasi *boiler* 83
Tabel 3.13. Nilai properti konstan batubara 91
Tabel 3.14. Variasi parameter kebutuhan udara 96

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 4.1. Rangkuman hasil analisis empiris 103

Tabel 4.2. Hasil kriteria kesetimbangan massa 109

Tabel 4.3. Hasil kriteria kesetimbangan kalor 110

Tabel 4.4. Temperatur tertinggi pembakaran 126

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

a	= kecepatan suara
$\vec{A}$	= vektor permukaan
AFR_s	= *Air Fuel Ratio* stoikoimetris (%)
AFR_a	= *Air Fuel Ratio* aktual (%)
ε	= energi disipasi
FC	= *Fixed Carbon*
F_x	= penambahan percepatan (gaya/massa partikel)
$F_D(\mu\text{-}\mu_p)$	= gaya drag/massa partikel
$\vec{F}$	= gaya eksternal
f	= persamaan fraksi campuran
fuel	= nilai pada *stream inlet* bahan bakar
GCV	= *Gross Calorific Value*
G_b	= pembangkitan energi kinetik turbulensi karena pengaruh gaya apung
G_k	= pembangkitan energi kinetik turbulensi karena gradien kecepatan
g_i	= komponen vektor gravitasi pada arah i
HHV	= *Higher Heating Value* (Btu / lb)
h_{fg}	= entalpi penguapan air pada temperatur tertentu (kJ/kmol)
H	= enthalpy total
$h_j^0\left(T_{ref,j}\right)$	= enthalpy pembentukan spesies j pada temperatur $T_{ref,j}$
I	= tensor satuan
I	= intensitas radiasi
IM	= *Inherent Moisture*
k	= thermal conductivity (Btu / ft^2 hr ° F / in)
l	= ketebalan benda (in)
K	= faktor bahan bakar
k	= energi kinetik turbulensi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

K_{Re} = Faktor properti gas asap,

N = jumlah baris pipa

LHV = *Lower Heating Value* (Btu / lb)

$m_{udara, a}$ = massa udara aktual tiap 100 lb bahan bakar (lb/100 lb bb)

$m_{udara, s}$ = massa udara stoikoimetris tiap 100 lb bahan bakar (lb/100 lb bb)

m_u = massa udara pembakaran (lb/hr)

$m_{u, s}$ = massa udara pembakaran stoikoimetris (lb/hr)

m_{bb} = massa bahan bakar (lb/hr)

m_s = laju aliran massa uap (lb/hr)

M_t = *turbulent mach number*

N = jumlah mol air

n = indeks bias

Ω' = sudut kontak

ox = nilai pada *stream inlet* udara

ϕ = *equivalence ratio*

ρ = massa jenis (kg/m^3)

$\rho\vec{g}$ = gaya berat gravitasi

p = tekanan statis (pa)

Pr_t = angka Prandlt untuk energi (*default* 0,85)

R_i = laju produksi dari spesies i dalam reaksi kimia

$\vec{r}$ = vektor posisi

r = *air fuel ratio*

Γ_ϕ = koefisien untuk difusi Φ

$\vec{s}$ = vektor arah

$\vec{s}'$ = vektor arah penyebaran

S_ϕ = besarnya Φ tiap unit volume

s = panjang lintasan

σ = konstanta Stefan-Boltzman

σ_s = koefisien penyebaran

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\bar{\tau}$ = tensor tegangan

T = temperatur

TM = *Total Moisture*

TS = *Total Sulfur*

T_{250} = temperatur pada 250 poise (^oC)

T_{cv} = temperatur viskositas kritis (^oC)

μ = *molecular viscosity*

μ = komponen kecepatan aliran tegak lurus dengan vektor gravitasi

υ = kecepatan (m/s)

∇_{ϕ} = gradien dari $\Phi = (\delta\Phi/\delta x)i + (\delta\Phi/\delta y)j$ dalam 2D

v = komponen kecepatan aliran yang sejajar dengan vektor gravitasi

VM = *Volatile Matter*

Y_j = fraksi massa dari spesies j

Y_M = pengaruh kompresibilitas turbulen

Z_i = fraksi massa untuk element i

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
PEMODELAN PREDIKSI SLAGGING PADA PLATEN SUPERHEATER DARI BOILER BERKAPASITAS 330 MW DENGAN CFD
Benedictus Bima Seno Saputro, Ir. Prajitno. MT
Universitas Gadjah Mada, 2010 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil kontur temperatur pada *boiler* dari perbandingan persentase kebutuhan udara 142
Lampiran 2. Hasil kontur prediksi *slag* pada *boiler* dari perbandingan persentase kebutuhan udara 143
Lampiran 3. Hasil kontur temperatur pada *boiler* dari perbandingan rasio *primary & secondary air* 144
Lampiran 4. Hasil kontur prediksi *slag* pada *boiler* dari perbandingan rasio *primary & secondary air* 145