UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN ii
HALAMAN PERNYATAAN iii
HALAMAN SOAL TUGAS AKHIR iv
HALAMAN PERSEMBAHAN v
INTISARI vi
KATA PENGANTAR vii
UCAPAN TERIMAKASIH viii
DAFTAR ISI x
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xv
DAFTAR LAMPIRAN xviii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xix

BAB I : PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang Masalah 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA 4

BAB III : LANDASAN TEORI 6
3.1 Proses Produksi Gula Secara Singkat 6
3.2 Audit Energi 9
3.2.1 Pengertian Audit Energi 9
3.2.2 Tujuan Audit Energi 9
3.2.3 Tahapan Audit Energi 10
3.3 Ketel Uap 12
3.3.1 Klasifikasi Ketel Uap 13
3.3.2 Ketel Uap Pipa Air 13
3.3.3 Bagian-bagian Utama Ketel Pipa Air 13
3.3.4 Prinsip Kerja Ketel Uap Pipa Air 15
3.3.5 Proses Termodinamika dalam Ketel Uap 16
3.3.6 Perpindahan Kalor 17
3.3.7 Sirkulasi Alami Air Umpan 19
3.3.8 *Blowdown* 20
3.4 Udara 20
3.4.1 Rasio Kelembaban 21

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.5 Bahan Bakar dan Nilai Kalor Bahan Bakar 22
3.5.1 Komposisi Kimia Bahan Bakar
3.5.2 Analisis Mol Bahan Bakar 23
3.5.3 Nilai Kalor Bahan Bakar 26
3.6 Reaksi Pembakaran 26
3.6.1 Proses Pembakaran Ideal 29
3.6.2 Udara Pembakaran Berlebih 30
3.6.3 Proses Pembakaran Aktual Dalam Ruang Bakar 30
3.6.4 Temperatur Api Adiabatik 32
3.7 Analisis Massa Sistem Ketel Uap 33
3.7.1 Analisis Massa *Non Reacting System* 33
3.7.2 Analisis Massa *Reacting System* 34
3.7.3 Neraca Massa Ketel Uap 37
3.8 Analisis Energi Dalam Sebuah Sistem 37
3.8.1 Analisis Energi Pada *Non Reacting System* 37
3.8.2 Analisis Energi Pada *Reacting System* 38
3.9 Analisis Energi Sistem Ketel Uap Pabrik Gula 39
3.9.1 Analisis Energi Pada *Non Reacting System* 39
3.9.2 Analisis Energi Pada *Reacting System* 41
3.9.3 Neraca Energi Ketel Uap 48
3.9.4 Efisiensi Ketel Uap 48
3.10 Konsep Dasar Eksergi 49
3.10.1 Energi Potensial Kerja 49
3.10.2 Kerja Reversibel dan Irreversibilitas 51
3.10.3 Efisiensi Hukum II Thermodinamika 52
3.10.4 Perpindahan Eksergi oleh Panas, Kerja, dan Massa 53
3.10.5 Prinsip Peningkatan Entropi 55
3.10.6 Prinsip Penurunan Eksergi dan Penghancuran Eksergi 56
3.10.7 Keseimbangan Eksergi Pada *Non Reacting Open System* 58
3.10.8 Keseimbangan Eksergi *Reacting Open System* 58
3.11 Analisis Eksergi Pada Ketel Uap Pabrik Gula 59
3.11.1 Analisis Eksergi Pada *Non Reacting System* 59
3.11.2 Analisis Eksergi Pada *Reacting System* 61
3.11.3 Neraca Eksergi Ketel Uap 69
3.11.4 Efisiensi Eksergi Ketel Uap 69
3.12 Irreversibilitas Pada Sistem Ketel Uap Pabrik Gula 69
3.12.1 Eksergi yang Hancur Dalam Proses Pembakaran (X_{dest_comb}) 70
3.12.2 Eksergi yang hancur karena transfer panas $\left(X_{dest_heat.}\right)$ 74

BAB IV : METODOLOGI PENELITIAN 75
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian 75
4.2 Objek Penelitian 75
4.3 Peralatan dalam Melakukan Audit 75
4.4 Metode Pengambilan Data 77

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB V : ANALISIS DATA, PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN 81
5.1 Udara Pembakaran 81
5.1.1 Kelembaban Udara Pembakaran 81
5.1.2 Komposisi Kimia Udara Pembakaran 81
5.2 Analisis Data dan Perhitungan Ketel Uap 1 82
5.2.1 Analisis Mol pada Ketel Uap 1 82
5.2.2 Analisis Massa pada Ketel Uap 1 87
5.2.3 Analisis Energi pada Ketel Uap 1 89
5.2.4 Neraca Energi Ketel Uap 99
5.2.5 Analisis Eksergi pada Ketel Uap 1 101
5.2.6 Analisis Eksergi pada Ketel Uap 109
5.2.7 Temperatur Adiabatis Ketel Uap 1 112
5.2.8 Rugi-Rugi Eksergi pada Ketel Uap 1 114
5.3 Analisis Data dan Perhitungan Ketel Uap 2 121
5.3.1 Analisis Mol pada Ketel Uap 2 121
5.3.2 Analisis Massa pada Ketel Uap 2 122
5.3.3 Analisis Energi pada Ketel Uap 2 122
5.3.4 Analisis Eksergi pada Ketel Uap 2 126
5.3.5 Temperatur Adiabatis Ketel Uap 2 129
5.3.6 Rugi-Rugi Eksergi pada Ketel Uap 2 131
5.4 Analisis Data dan Perhitungan Ketel Uap 3 134
5.4.1 Analisis Mol pada Ketel Uap 3 134
5.4.2 Analisis Massa pada Ketel Uap 3 135
5.4.3 Analisis Energi pada Ketel Uap 3 135
5.4.4 Analisis Eksergi pada Ketel Uap 3 139
5.4.5 Temperatur Adiabatis Ketel Uap 3 142
5.4.6 Rugi-Rugi Eksergi pada Ketel Uap 3 144
5.5 Analisis Data dan Perhitungan Ketel Uap 4 147
5.5.1 Analisis Mol pada Ketel Uap 4 147
5.5.2 Analisis Massa pada Ketel Uap 4 148
5.5.3 Analisis Energi pada Ketel Uap 4 148
5.5.4 Analisis Eksergi pada Ketel Uap 4 152
5.5.5 Temperatur Adiabatis Ketel Uap 4 155
5.5.6 Rugi-Rugi Eksergi pada Ketel Uap 4 157
5.6 Konsumsi Energi Spesifik 159
5.7 Pembahasan 160
5.8 Rekomendasi untuk Ketel Uap 177

BAB VI : KESIMPULAN DAN SARAN 182
6.1 Kesimpulan 182
6.2 Saran 182

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Gambar Proses Pembuatan Gula 7
Gambar 3.2. Gambar Distribusi Uap Pabrik Gula 8
Gambar 3.3. Ketel Uap Pipa-pipa Air 13
Gambar 3.4. Prinsip Kerja Ketel Uap Pipa-pipa Air 16
Gambar 3.5. Grafik T-s Proses Pembentukan Uap 16
Gambar 3.6. Profil Temperatur Perpindahan Kalor di Dinding Ruang Bakar 18
Gambar 3.7. Sirkulasi Alami Air Umpan Ketel Uap 19
Gambar 4.1. Mobil Energi Indonesia 76
Gambar 4.2. Sket dari Ketel Uap Pabrik Gula 78
Gambar 4.3. Diagram Alur Penelitian 80
Gambar 5.1. Grafik Laju Alir Energi dan Eksergi yang Dihasilkan serta Eksergi yang Dihancurkan pada Reaksi Pembakaran Ketel Uap 1 167
Gambar 5.2. Grafik Temperatur Api Adiabatis Ketel Uap 1 pada beberapa Kondisi 168
Gambar 5.3. Diagram Sankey Distribusi Energi Ketel Uap 1 168
Gambar 5.4. Diagram Sankey Distribusi Eksergi Ketel Uap 1 169
Gambar 5.5. Grafik Laju Alir Energi dan Eksergi yang Dihasilkan serta Eksergi yang Dihancurkan pada Reaksi Pembakaran Ketel Uap 2 170
Gambar 5.6. Grafik Temperatur Api Adiabatis Ketel Uap 2 pada beberapa Kondisi 170
Gambar 5.7. Diagram Sankey Distribusi Energi Ketel Uap 2 171
Gambar 5.8. Diagram Sankey Distribusi Eksergi Ketel Uap 2 171
Gambar 5.9. Grafik Laju Alir Energi dan Eksergi yang Dihasilkan serta Eksergi yang Dihancurkan pada Reaksi Pembakaran Ketel Uap 3 172
Gambar 5.10. Grafik Temperatur Api Adiabatis Ketel Uap 3 pada Beberapa Kondisi 173

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.12. Diagram Sankey Distribusi Eksergi Ketel Uap 3 174
Gambar 5.13. Grafik Laju Alir Energi dan Eksergi yang Dihasilkan serta Eksergi yang Dihancurkan pada Reaksi Pembakaran Ketel Uap 4 174
Gambar 5.14. Grafik Temperatur Api Adiabatis Ketel Uap 4 pada beberapa Kondisi 175
Gambar 5.15. Diagram Sankey Distribusi Energi Ketel Uap 4 175
Gambar 5.16. Diagram Sankey Distribusi Eksergi Ketel Uap 4 176
Gambar 5.17. Grafik Hubungan Antara Prosentase Udara Berlebih dengan Prosentase Karbon Tak Terbakar 177
Gambar 5.18. Grafik Laju Alir Energi Termal Masing-masing Komponen Gas Buang Ketel Uap 1. 180
Gambar 5.19. Grafik Laju Alir Eksergi Masing-masing Komponen Gas Buang Ketel Uap 1. 180

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Komposisi Udara Atmosfer 21
Tabel 3.2. *Proximate Analisys* 23
Tabel 3.3. *Ultimate Analisys* 23
Tabel 3.4. Komposisi Kimia Residu & Kayu Kering 23
Tabel 3.5. Massa Molekular Unsur dan Senyawa 24
Tabel 3.6. Nilai Kalor Bahan Bakar Ketel uap Pabrik Gula 26
Tabel 5.1. Mol dan Fraksi Mol dari Komponen Penyusun Udara Pembakaran 82
Tabel 5.2. Jumlah Mol Bahan Bakar Ketel Uap 1 84
Tabel 5.3. Jumlah Mol Komponen Penyusun Bahan Bakar Campuran Ketel Uap 1 85
Tabel 5.4. Neraca Massa Ketel Uap 1 88
Tabel 5.5. Tekanan, Temperatur dan Entalpi Air Umpan dan Uap Ketel Uap 1 90
Tabel 5.6. Entalpi Pembentukan, Kalor Jenis Rata-rata, Entropi Bahan Bakar (dengan temperatur 33 °C) 90
Tabel 5.7. Entalpi Pembentukan, Entalpi, Entropi Udara Pembakaran (dengan temperatur 31 °C) 91
Tabel 5.8. Entalpi Pembentukan, Entalpi, Entropi Gas Buang Ketel Uap 1 (pada temperatur 315,56 °C) 91
Tabel 5.9. Entalpi Pembentukan, Kalor Jenis Rata-rata, dan Entropi Abu (pada temperatur 300 °C) 91
Tabel 5.10 Entalpi Pembentukan, Kalor Jenis Rata-rata, dan Entropi Karbon (pada temperatur 300 °C) 91
Tabel 5.11. Energi *Reacting System* Ketel Uap 1 98
Tabel 5.12. Neraca Energi Ketel Uap 1 100
Tabel 5.13. Eksergi *Reacting System* Ketel Uap 1 110

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 5.14. Neraca Eksergi Ketel Uap 1 111

Tabel 5.15. Nilai $\dot{N}_p\left(\bar{h}_f^0 - \bar{h}^0\right)$ Gas Buang Ketel Uap 1 113

Tabel 5.16. Nilai $\dot{N}_p\,\bar{h}$ Gas Buang Ketel Uap 1 pada Temperatur 1800 °C dan 500 °C 114

Tabel 5.17. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Masuk pada *Reacting System* Ketel Uap 1 118

Tabel 5.18. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi yang Keluar pada *Reacting System* Ketel Uap 1 119

Tabel 5.19. Jumlah Mol Bahan Bakar Ketel Uap 2 121

Tabel 5.20. Jumlah Mol dari Komponen Penyusun Bahan Bakar Campuran Ketel Uap 2 122

Tabel 5.21. Neraca Massa Ketel Uap 2 123

Tabel 5.22. Energi *Reacting System* Ketel Uap 2 124

Tabel 5.23. Neraca Energi Ketel Uap 2 125

Tabel 5.24. Eksergi *Reacting System* Ketel Uap 2 127

Tabel 5.25. Neraca Eksergi Ketel Uap 2 128

Tabel 5.26 Nilai $\dot{N}_p\left(\bar{h}_f^0 - \bar{h}^0\right)$ Gas Buang Ketel Uap 2 130

Tabel 5.27. Nilai $\dot{N}_p\,\bar{h}$ Gas Buang Ketel Uap 2 pada Temperatur 1800 °C dan 1500 °C 130

Tabel 5.28. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Masuk pada *Reacting System* Ketel Uap 2 131

Tabel 5.29. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Keluar pada *Reacting System* Ketel Uap 2 132

Tabel 5.30. Jumlah Mol Bahan Bakar Ketel Uap 3 134

Tabel 5.31. Jumlah Mol dari Komponen Penyusun Bahan Bakar Campuran Ketel Uap 3 135

Tabel 5.32. Neraca Massa Ketel Uap 3 136

Tabel 5.33. Energi *Reacting System* Ketel Uap 3 137

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 5.35. Eksergi *Reacting System* Ketel Uap 3 140

Tabel 5.36. Neraca Eksergi Ketel Uap 3 141

Tabel 5.37. Nilai $\dot{N}_p\left(\bar{h}_f^0 - \bar{h}^0\right)$ Gas Buang Ketel Uap 3 143

Tabel 5.38. Nilai $\dot{N}_p\,\bar{h}$ Gas Buang Ketel Uap 3 pada Temperatur 1800 °C dan 1500 °C 143

Tabel 5.39. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Masuk pada *Reacting System* Ketel Uap 3 144

Tabel 5.40. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Keluar pada *Reacting System* Ketel Uap 3 145

Tabel 5.41. Jumlah Mol Bahan Bakar Ketel Uap 4 147

Tabel 5.42. Jumlah Mol dari Komponen Penyusun Bahan Bakar Campuran Ketel Uap 4 148

Tabel 5.43. Neraca Massa Ketel Uap 4 149

Tabel 5.44. Energi *Reacting System* Ketel Uap 4 150

Tabel 5.45. Neraca Energi Ketel Uap 4 151

Tabel 5.46. Eksergi *Reacting System* Ketel Uap 4 153

Tabel 5.47. Neraca Eksergi Ketel Uap 4 154

Tabel 5.48. Nilai $\dot{N}_p\left(\bar{h}_f^0 - \bar{h}^0\right)$ Gas Buang Ketel Uap 4 156

Tabel 5.49. Nilai $\dot{N}_p\,\bar{h}$ Gas Buang Ketel Uap 4 pada Temperatur 1800 °C dan 1500 °C 156

Tabel 5.50. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Masuk pada *Reacting System* Ketel Uap 4 157

Tabel 5.51. Tabel Perhitungan Jumlah Entropi Keluar pada *Reacting System* Ketel Uap 4 158

Tabel 5.52. Keterangan Konsumsi Energi Spesifik Beberapa Pabrik Gula 162

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Data Pengukuran Laju Alir Bahan Bakar	185
Lampiran 2.	Data Pengukuran Laju Alir Udara Pembakaran	187
Lampiran 3.	Data Pengukuran Tekanan dan Temperatur pada Beberapa Titik Pengukuran Ketel Uap (*Boiler Control Room*)	189
Lampiran 4.	Data Pengukuran Komposisi Gas Buang	193
Lampiran 5.	Spesisikasi Ketel Uap	195
Lampiran 6.	Perhitungan Entalpi Pembentukan Bahan Bakar	196
Lampiran 7.	Entalpi dan Entropi Udara dan Gas Buang	198
Lampiran 8.	Tabel Perhitungan Pembangkitan Entropi pada Proses Pembakaran	200
Lampiran 9.	Hasil Perhitungan Reaksi Pembakaran pada Beberapa Kondisi	210
Lampiran 10.	Tabel $\bar{h}_f^0$, $\bar{g}_f^0$, dan $\bar{s}^0$ pada 25 ^{0}C, 1 atm	212
Lampiran 11.	Tabel Properti Karbon	213
Lampiran 12.	Perangkat Lunak yang Digunakan dalam Perhitungan	214
Lampiran 13.	*Psychrometric Chart*	217
Lampiran 14.	Foto Audit	218
Lampiran 15.	Gambar dan Dimensi Mobil Energi Indonesia	221

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

$\dot{\alpha}$ = laju alir mol unsur C bahan bakar gabungan [kmol/jam]

$\alpha_{_bgs}$ = fraksi mol unsur C bahan bakar *bagasse* tanpa abu

$\alpha_{_f.o.}$ = fraksi mol unsur C bahan bakar *fuel oil* tanpa abu

$\alpha_{_ky}$ = fraksi mol unsur C bahan bakar kayu tanpa abu

A = luas penampang tegak lurus pada aliran panas [m^2]

A.R. = massa molar bahan bakar

$\dot{a}_{th}$ = laju alir mol udara pembakaran teoritis [kmol/jam]

$\dot{\beta}$ = laju alir mol unsur H_2 bahan bakar gabungan [kmol/jam]

$\beta_{_bgs}$ = fraksi mol unsur H_2 bahan bakar *bagasse* tanpa abu

$\beta_{_f.o.}$ = fraksi mol unsur H_2 bahan bakar *fuel oil* tanpa abu

$\beta_{_ky}$ = fraksi mol unsur H_2 bahan bakar kayu tanpa abu

Cp = kalor jenis pada tekanan konstan [kJ/kg.K]

$\overline{Cp}_{ash}$ = panas jenis rata-rata abu pada kondisi tertentu [kJ/kg.K]

$\overline{Cp}_{_f.o.}$ = kalor jenis rata-rata dari *fuel oil* pada delta suhu tertentu [kJ/kmol]

$\overline{Cp}_{_ky}$ = kalor jenis rata-rata dari kayu pada delta suhu tertentu [kJ/kmol]

$\overline{Cp}_{u.c.}$ = panas jenis rata-rata karbon tak terbakar pada kondisi tertentu

$\dot{\gamma}$ = laju alir mol unsur O_2 bahan bakar gabungan [kmol/jam]

$\gamma_{_bgs}$ = fraksi mol unsur O_2 bahan bakar *bagasse* tanpa abu

$\gamma_{_f.o.}$ = fraksi mol unsur O_2 bahan bakar *fuel oil* tanpa

$\gamma_{_ky}$ = fraksi mol unsur O_2 bahan bakar kayu tanpa abu

$\dot{\delta}$ = laju alir mol gas CO [kmol/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ΔT_{ash} = selisih temperatur abu dengan temperatur referensi [°C]

$\Delta T_{_bgs}$ = selisih suhu bahan bakar *bagasse* dengan suhu referensi [°C]

$\Delta T_{_f.o.}$ = selisih suhu bahan bakar *fuel oil* dengan suhu referensi [°C]

$\Delta T_{_ky}$ = selisih suhu bahan bakar kayu dengan suhu referensi [°C]

$\Delta T_{u.c.}$ = selisih temperatur karbon tak terbakar dengan temperatur referensi [°C]

ε = perbandingan volume udara aktual dengan udara teoritis

h_c = koefisien konveksi [kW/m^2.K]

η_{ex} = efisiensi eksergi

η_{th} = efisiensi termal

η_{th_rev} = efisiensi termal reversible

η_{II} = efisiensi hukum kedua

$\bar{h}$ = entalpi pada kondisi tertentu [kJ/kmol]

$\bar{h}_{Ar.u.b.}$ = entalpi Ar udara pembakaran pada suhu tertentu [kJ/kmol]

$\bar{h}_{a.u}$ = entalpi air umpan [kJ/kg]

$\bar{h}_{H2O.u.b.}$ = entalpi H_2O udara pembakaran pada suhu tertentu [kJ/kmol]

$\bar{h}_{N2.u.b.}$ = entalpi N_2 udara pembakaran pada suhu tertentu [kJ/kmol]

$\bar{h}_{O2.u.b.}$ = entalpi O_2 udara pembakaran pada suhu tertentu [kJ/kmol]

$\bar{h}_{s.K_out}$ = entalpi uap keluar dari ketel uap [kJ/kg]

$\bar{h}^0$ = entalpi sensibel pada kondisi referensi (25 °C; 1 atm) [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{a.u.}$ = entalpi air umpan pada kondisi referensi (1 atm; 25 °C) [kJ/kg]

$\bar{h}^0_{Ar}$ = entalpi argon pada suhu referensi [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_f$ = entalpi pembentukan (pada keadaan standard) [kJ/kmol]

$\bar{h}^{\,0}_{f.\,Ar}$ = entalpi pembentukan argon [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{f_bgs}$ = entalpi pembentukan bahan bakar *bagasse* [kJ/kmol]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\bar{h}^0_{f_f.o.}$ = entalpi pembentukan bahan bakar *fuel oil* [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{f.H2O}$ = entalpi pembentukan uap air [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{f_ky}$ = entalpi pembentukan bahan bakar kayu [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{f.N2}$ = entalpi pembentukan nitrogen [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{f.O2}$ = entalpi pembentukan oksigen [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{f.u.c.}$ = entalpi pembentukan karbon [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{H2O}$ = entalpi uap air pada suhu referensi [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{N2}$ = entalpi nitrogen pada suhu referensi [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{O2}$ = entalpi oksigen pada suhu referensi [kJ/kmol]

$\bar{h}^0_{s.K_out}$ = entalpi uap pada kondisi referensi [kJ/kg]

HHV = *Higer Heating Value* [kJ/kg]

H_{Produk} = entalpi produk [kJ/kmol]

H_{Reaktan} = entalpi reaktan [kJ/kmol]

k = konduktifitas termal [Kw/m.K]

LHV = *Lower Heating Value* [kJ/kg]

m_a = massa udara kering [kg udara kering]

$\dot{m}_{a.u.}$ = laju alir massa air umpan masuk ketel uap [kg/jam]

$\dot{m}_{Ar.g.b.}$ = laju alir massa Ar gas buang [kg/jam]

$\dot{m}_{Ar.u.b}$ = laju alir massa Ar udara pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{ash}$ = laju alir massa abu produk hasil pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{ash_bgs}$ = massa abu *bagasse* [kg/jam]

$\dot{m}_{ash_f.o.}$ = massa abu *fuel oil* [kg/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{m}_{b.b.}$ = laju alir massa bahan bakar [kg/jam]

$\dot{m}_{bgs}$ = laju alir massa bahan bakar *bagasse* [kg/jam]

$\dot{m}_{C_bgs}$ = laju alir massa unsur C dalam *bagasse* [kg/jam]

$\dot{m}_{C_f.o.}$ = laju alir massa unsur C dalam *fuel oil* [kg/jam]

$\dot{m}_{C_ky}$ = laju alir massa unsur C dalam kayu [kg/jam]

$\dot{m}_{CO.g.b.}$ = laju alir massa CO gas buang [kg/jam]

$\dot{m}_{CO2.g.b.}$ = laju alir massa CO_2 gas buang [kg/jam]

$\dot{m}_{f.o.}$ = laju alir massa bahan bakar *fuel oil* [kg/jam]

$\dot{m}_{g.b.}$ = laju massa gas buang hasil dari reaksi pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{H2_bgs}$ = laju alir massa senyawa H_2 dalam *bagasse* [kg/jam]

$\dot{m}_{H2_f.o.}$ = laju alir massa senyawa H_2 dalam *fuel oil* [kg/jam]

$\dot{m}_{H2_ky}$ = laju alir massa senyawa H_2 dalam kayu [kg/jam]

$\dot{m}_{H2O_bgs}$ = laju alir massa senyawa H_2O dalam *bagasse* [kg/jam]

$\dot{m}_{H2O_f.o.}$ = laju alir massa senyawa H_2O dalam *fuel oil* [kg/jam]

$\dot{m}_{H2O_ky}$ = laju alir massa senyawa H_2O dalam kayu[kg/jam]

$\dot{m}_{H2O.g.b.}$ = laju alir massa H_2O gas buang [kg/jam]

$\dot{m}_{H2O.u.b}$ = laju alir massa H_2O udara pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{in_react_sys}$ = laju alir massa masuk *reacting system* [kg/jam]

$\dot{m}_{ky}$ = laju alir massa bahan bakar kayu [kg/jam]

$\dot{m}_{loss_K}$ = laju alir rugi-rugi massa pada ketel uap [kg/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{m}_{N2.u.b}$ = laju alir massa N_2 udara pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{out_react_sys}$ = laju alir massa keluar *reacting system* [kg/jam]

$\dot{m}_{O2_bgs}$ = laju alir massa senyawa O_2 dalam *bagasse* [kg/jam]

$\dot{m}_{O2_f.o}$ = laju alir massa senyawa O_2 dalam *fuel oil* [kg/jam]

$\dot{m}_{O2.g.b.}$ = laju alir massa O_2 gas buang [kg/jam]

$\dot{m}_{O2_ky}$ = laju alir massa senyawa O_2 dalam kayu [kg/jam]

$\dot{m}_{O2.u.b}$ = laju alir massa O_2 udara pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{s.K_out}$ = laju alir massa uap keluar ketel uap[kg.jam]

$\dot{m}_{solid}$ = laju alir massa produk padat hasil pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{u.b.}$ = laju alir massa udara pembakaran [kg/jam]

$\dot{m}_{u.c.}$ = laju alir massa karbon tak terbakar [kg/jam]

m_v = massa air dalam udara [kg uap air]

N = jumlah mol [kmol]

$\dot{N}_{air_bgs}$ = laju alir mol senyawa H_2O dalam *bagasse* [kmol/jam]

$\dot{N}_{air_f.o.}$ = laju alir mol senyawa H_2O dalam *fuel oil* [kmol/jam]

$\dot{N}_{air_ky}$ = laju alir mol senyawa H_2O dalam kayu [kmol/jam]

$\dot{N}_{Ar.g.b.}$ = laju alir mol Ar gas buang [kmol/jam]

$\dot{N}_{Ar.u.b.}$ = laju alir mol Ar udara pembakaran [kmol/jam]

$\dot{N}_{bgs}$ = laju alir mol bahan bakar *bagasse* [kmol/jam]

$\dot{N}_{C_bgs}$ = laju alir mol unsur C dalam *bagasse* [kmol/jam]

$\dot{N}_{C_f.o.}$ = laju alir mol unsur C dalam *fuel oil* [kmol/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{Q}_{K_H2O.g.b.}$ = laju alir energi kimia H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_ky}$ = laju alir energi kimia kayu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_N2.g.b.}$ = laju alir energi N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_N2.u.b.}$ = laju alir energi kimia N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_O2.u.b.}$ = laju alir energi kimia O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_u.b.}$ = laju alir energi kimia udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{ky}$ = laju alir energi kayu tanpa abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{N2.g.b.}$ = laju alir energi N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{N2.u.b.}$ = laju alir energi N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{O2.u.b.}$ = laju alir energi O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{product}$ = laju alir energi yang dikandung oleh produk [kJ/jam]

q_{rad} = perpindahan kalor secara radiasi [kJ]

$\dot{Q}_{reactan}$ = laju alir energi yang dikandung oleh reaktan [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi}$ = $\dot{Q}_{rev}$ = laju alir energi maksimum yang dihasilkan dari reaksi kimia (reaksi kimia pembakaran) [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_in}$ = $\dot{Q}_{reactan}$ = laju alir energi yang dikandung oleh reaktan [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_K}$ = laju alir energi kimia reaksi [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_Ar.u.b.}$ = laju alir energi kimia Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_H2O.u.b.}$ = laju alir energi kimia H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}$ = laju alir energi kimia reaktan [kJ/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{N}_{u.b.}$ = laju alir mol udara pembakaran [kmol/jam]

P = jumlah tekanan parsial udara kering [kPa]

P_a = tekanan parsial uap air [kPa]

P_g = tekanan jenuh air murni pada temperatur yang sama [kPa]

P_v = tekanan parsial uap air dalam keadaan saturasi [kPa]

$\dot{Q}_{a.u.}$ = laju alir energi air umpan [kJ/jam]

$\dot{Q}_{Ar.u.b.}$ = laju alir energi Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{b.b.}$ = laju alir energi bahan bakar tanpa abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{bgs}$ = laju alir energi *bagasse* tanpa abu [kJ/jam]

q_c = perpindahan kalor dengan cara konveksi [kJ]

q_{cond} = perpindahan energi secara konduksi [kJ]

$\dot{Q}_{CO2.g.b.}$ = laju alir energi CO_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{f.o.}$ = laju alir energi *fuel oil* tanpa abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{g.b.}$ = laju alir energi gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{H2O.u.b.}$ = laju alir energi H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{H2O.g.b.}$ = laju alir energi H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_b.b.}$ = laju alir energi kimia bahan bakar tanpa abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_bgs}$ = laju alir energi kimia *bagasse* [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_CO2.g.b.}$ = laju alir energi kimia CO_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_f.o.}$ = laju alir energi kimia *fuel oil* [kJ/jam]

$\dot{Q}$ = laju alir energi kimia gas buang [kJ/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{Q}_{K_H2O.g.b.}$ = laju alir energi kimia H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_ky}$ = laju alir energi kimia kayu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_N2.g.b.}$ = laju alir energi N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_N2.u.b.}$ = laju alir energi kimia N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_O2.u.b.}$ = laju alir energi kimia O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_u.b.}$ = laju alir energi kimia udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{ky}$ = laju alir energi kayu tanpa abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{N2.g.b.}$ = laju alir energi N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{N2.u.b.}$ = laju alir energi N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{O2.u.b.}$ = laju alir energi O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{product}$ = laju alir energi yang dikandung oleh produk [kJ/jam]

q_{rad} = perpindahan kalor secara radiasi [kJ]

$\dot{Q}_{reactan}$ = laju alir energi yang dikandung oleh reaktan [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi}$ = $\dot{Q}_{rev}$ = laju alir energi maksimum yang dihasilkan dari reaksi kimia (reaksi kimia pembakaran) [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_in}$ = $\dot{Q}_{reactan}$ = laju alir energi produk pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_K}$ = laju alir energi kimia reaksi [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_Ar.u.b.}$ = laju alir energi kimia Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{K_H2O.u.b.}$ = laju alir energi kimia H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}$ = laju alir energi kimia reaktan [kJ/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{Q}_{reaksi_K_out}$ = laju alir energi kimia produk [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_out}$ = $\dot{Q}_{product}$ = laju alir energi produk pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_T}$ = laju alir energi termal reaksi [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_T_in}$ = laju alir energi termal reaktan [kJ/jam]

$\dot{Q}_{reaksi_T_out}$ = laju alir energi termal produk [kJ/jam]

$\dot{Q}_{rec}$ = energi hasil dari pembakaran bahan bakar yang dapat dimanfaatkan [kJ/jam]

$\dot{Q}_{rev}$ = energi yang dihasilkan dari reaksi pembakaran pada ruang bakar [kJ/jam]

$\dot{Q}_{s.K_out}$ = laju alir energi termal uap [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_Ar.u.b.}$ = laju alir energi termal Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_ash}$ = laju alir energi termal abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_ash_in}$ = laju alir energi abu bahan bakar [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_ash_bgs_in}$ = laju alir energi termal abu *bagasse* masuk [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_ash_f.o._in}$ = laju alir energi termal abu *fuel oil* masuk [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_ash_ky_in}$ = Laju alir energi termal abu kayu masuk [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_b.b.}$ = laju alir energi termal bahan bakar tanpa abu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_bgs}$ = laju alir energi termal *bagasse* [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_f.o.}$ = laju alir energi termal *fuel oil* [kJ/jam]

$\dot{Q}$ = laju alir energi termal CO_2 gas buang [kJ/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{Q}_{T_g.b.}$ = laju alir energi termal gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_H2O.g.b.}$ = laju alir energi termal H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_H2O.u.b.}$ = laju alir energi termal H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_N2.g.b.}$ = laju alir energi N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_ky}$ = laju alir energi termal kayu [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_N2.u.b.}$ = laju alir energi termal N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_O2.u.b.}$ = laju alir energi termal O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{T_u.b.}$ = laju alir energi termal udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{u.b.}$ = laju alir energi udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{Q}_{u.c.}$ = laju alir energi karbon tak terbakar [kJ/jam]

R_a = tetapan gas untuk udara kering yaitu 287 J/kg.K [J/kg.K]

R_u = konstanta gas universal [J/kg.K]

R_v = tetapan gas untuk uap air yaitu 461,5 J/kg.K [J/kg.K]

$\bar{s}$ = entropi absolut [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{a.u.}$ = entropi air umpan masuk ketel uap

$\bar{s}_{Ar.g.b.}$ = entropi argon gas buang [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{Ar.u.b.}$ = entropi argon udara pembakaran [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{Ar.u.b.}$ = laju alir entropi Ar udara pembakaran [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{ash_bgs}$ = entropi abu *bagasse* masuk sistem [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{ash_bgs}$ = laju alir entropi abu *bagasse* [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{ash_f.o}$ = entropi abu *fuel oil* masuk system [kJ/kmol.K]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\bar{s}_{ash_ky}$ = entropi abu kayu masuk system [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{ash_ky}$ = lalju alir entropi abu kayu [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{ash_out}$ = laju alir entropi abu hasil pembakaran [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{b.b.}$ = laju alir entropi bahan bakar [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{bgs}$ = entropi bahan bakar *bagasse* [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{bgs}$ = laju alir entropi *bagasse* [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{CO.g.b.}$ = entropi karbonmonoksida gas buang [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{CO2.g.b.}$ = entropi karbondioksida gas buang [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{f.o.}$ = entropi bahan bakar *fuel oil* [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{f.o}$ = laju alir entropi *fuel oil* [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{g.b.}$ = laju alir entropi gas buang [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{gen}$ = laju alir entropi yang dibangkitkan [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{gen_comb}$ = laju peningkatan entropi [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{gen_heat_trans}$ = laju peningkatan entropi [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{H2O.g.b.}$ = entropi uap air gas buang [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{ky}$ = entropi bahan bakar kayu [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{ky}$ = laju alir entropi kayu [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{N2.u.b.}$ = entropi nitrogen udara pembakaran [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{N2.u.b.}$ = laju alir entropi N_2 udara pembakaran [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{O2.u.b.}$ = entropi oksigen udara pembakaran [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{O2.u.b.}$ = laju alir entropi O_2 udara pembakaran [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{O2.g.b.}$ = entropi oksigen gas buang [kJ/kmol.K]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{S}_{H2O.u.b.}$ = laju alir entropi H_2O udara pembakaran [kJ/jam.K]

$\bar{s}_{N2.g.b.}$ = entropi nitrogen gas buang [kJ/kmol.K]

$\bar{s}_{s.K_out}$ = entropi uap keluar ketel uap [kJ/kmol.K]

$\dot{S}_{u.b.}$ = laju alir entropi udara pembakaran [kJ/jam.K]

$\dot{S}_{u.c.}$ = laju alir entropi karbon tak terbakar [kJ/jam.K]

$\bar{s}^{0}_{a.u.}$ = entropi air umpan masuk ketel uap pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{Ar}$ = entropi argon pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{ash_bgs}$ = entropi abu *bagasse* kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{ash_f.o.}$ = entropi abu *fuel oil* kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{ash_ky}$ = entropi abu kayu kondisi referensi[kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{bgs}$ = entropi bahan bakar *bagasse* pada suhu 25 °C dan tekanan 1 atm (kondisi referensi), [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{CO}$ = entropi karbonmonooksida kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{CO2}$ = entropi karbondioksida pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{f.o.}$ = entropi bahan bakar *fuel oil* pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{H2O}$ = entropi uap air pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{ky}$ = entropi bahan bakar kayu pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{N2}$ = entropi nitrogen pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{O2}$ = entropi oksigen pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

$\bar{s}^{0}_{s.K_out}$ = entropi uap keluar ketel uap pada kondisi referensi [kJ/kmol.K]

T = temperatur [°C]

T_a = temperatur fluida [K]

T_o = temperatur referensi yaitu 25 °C atau 298 K [K]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dT/dx = gradien temperatur dalam arah perpindahan panas [-K/m]

T_1 = temperatur benda 1 [K]

T_2 = temperatur benda 2 [K]

Φ = kelembaban relatif

$\dot{\phi}$ = laju alir mol C (karbon tak terbakar) [kmol/jam]

V = volume [m^3]

W = kerja (bentuk lain dari kerja) [kJ]

$\dot{W}_{K_rev}$ = laju alir eksergi kimia reaksi reversible [kJ/jam]

W_{rev_out} = kerja reversible [kJ]

$\dot{W}_{rev}$ = kerja reversible setiap jam[kJ/jam]

W_{surr} = kerja yang dimiliki oleh lingkungan [kJ]

$\dot{W}_{T_rev}$ = laju alir eksergi termal reaksi reversible [kJ/jam]

W_u = kerja yang dapat dimanfaatkan [kJ/jam]

$\dot{X}_{a.u.}$ = laju alir energi air umpan [kJ/jam]

$\dot{X}_{Ar.g.b.}$ = laju alir eksergi Ar gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{Ar.u.b.}$ = laju alir eksergi Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{b.b.}$ = laju alir eksergi bahan bakar [kJ/jam]

$\dot{X}_{bgs}$ = eksergi bahan bakar *bagasse* [kJ/jam]

$\dot{X}_{CO.g.b.}$ = laju alir eksergi CO gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{CO2.g.b.}$ = laju alir eksergi CO_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{dest}$ = laju alir eksergi yang dihancurkan dalam sebuah proses [kJ/jam]

$\dot{X}_{dest_comb}$ = eksergi yang hancur karena proses pembakaran [kJ/jam.K]

$\dot{X}_{dest_heat_trans}$ = eksergi yang hancur karena proses perpindahan kalor [kJ/jam.K]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{X}_{g.b.}$ = laju alir eksergi gas buang [kJ/jam]

X_{heat} = perpindahan eksergi oleh kalor [kJ]

$\dot{X}_{H2O.g.b.}$ = laju alir eksergi H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{H2O.u.b.}$ = laju alir eksergi H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_Ar.g.b.}$ = laju alir eksergi kimia Ar gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_Ar.u.b.}$ = laju alir eksergi kimia Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_bgs}$ = eksergi kimia bahan bakar *bagasse* [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_CO.g.b.}$ = laju alir eksergi kimia CO gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_CO2.g.b.}$ = laju alir eksergi kimia CO_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_f.o.}$ = eksergi kimia bahan bakar *fuel oil* [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_g.b.}$ = laju alir eksergi kimia gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_H2O.g.b.}$ = laju alir eksergi kimia H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_H2O.u.b.}$ = laju alir eksergi kimia H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_ky}$ = eksergi kimia bahan bakar kayu [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_N2.g.b.}$ = laju alir eksergi kimia N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_N2.u.b.}$ = laju alir eksergi kimia N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_O2.g.b.}$ = laju alir eksergi kimia O_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{K_O2.u.b.}$ = laju alir eksergi kimia O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{ky}$ = eksergi bahan bakar kayu [kJ/jam]

$\dot{X}_{loss}$ = laju alir eksergi yang terbuang ke lingkungan [kJ/jam]

X_{mass} = perpindahan eksergi oleh massa [kJ]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{X}_{N2.u.b.}$ = laju alir eksergi N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{N2.g.b.}$ = laju alir eksergi N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{O2.u.b.}$ = laju alir eksergi O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi}$ = $\dot{W}_{rev}$ = Eksergi maksimum yang dihasilkan dari reaksi pembakaran aktual (pada kondisi tertentu) [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi_in}$ = eksergi masuk *reacting system* [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi_K_in}$ = eksergi kimia masuk *reacting system* [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi_K_out}$ = eksergi kimia keluar *reacting system* [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi_out}$ = eksegi keluar *reacting system* [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi_T_in}$ = eksergi termal masuk *reacting system* [kJ/jam]

$\dot{X}_{reaksi_T_out}$ = eksergi termal keluar *reacting system* [kJ/jam]

$\dot{X}_{rec}$ = laju alir eksergi yang dapat dimanfaatkan [kJ/jam]

$\dot{X}_{s.K_out}$ = laju alir eksergi termal yang dikandung air umpan [kJ/jam]

$\dot{X}_{s.K_out}$ = laju alir eksergi termal yang dikandung uap [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_Ar.g.b.}$ = laju alir eksergi termal Ar gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_Ar.u.b.}$ = laju alir eksergi termal Ar udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_ash_bgs_in}$ = laju alir eksergi termal abu *bagasse* masuk [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_ash_f.o._in}$ = laju alir eksergi termal abu *fuel oil* masuk [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_ash_in}$ = laju alir eksergi abu bahan bakar [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_ash_ky_in}$ = laju alir eksergi termal abu kayu masuk [kJ/jam]

$\dot{X}$ = laju alir eksergi termal abu keluar system [kJ/jam]

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Audit Energi Pada Ketel Uap Pabrik Gula Di Jawa timur Menggunakan Analisis Energi Dan Analisis Eksergi
Angger Cahyo Indarto , Prof. Dr. Ing. Ir. Harwin Saptoadi, MSE.
Universitas Gadjah Mada, 2005 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$\dot{X}_{T_CO2.g.b.}$ = laju alir eksergi termal CO_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_CO.g.b.}$ = laju alir eksergi termal CO gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_f.o.}$ = eksergi termal bahan bakar *fuel oil* [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_g.b.}$ = laju alir eksergi gas termal buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_H2O.g.b.}$ = laju alir eksergi termal H_2O gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_H2O.u.b.}$ = laju alir eksergi termal H_2O udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_ky}$ = eksergi termal bahan bakar kayu [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_N2.g.b.}$ = laju alir eksergi termal N_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_N2.u.b.}$ = laju alir eksergi termal N_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_O2.g.b.}$ = laju alir eksergi termal O_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{O2.g.b.}$ = laju alir eksergi O_2 gas buang [kJ/jam]

$\dot{X}_{T_O2.u.b.}$ = laju alir eksergi termal O_2 udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{u.b.}$ = laju alir eksergi udara pembakaran [kJ/jam]

$\dot{X}_{u.c.}$ = laju alir eksergi karbon tak terbakar [kJ/jam]

X_{work} = perpindahan eksergi oleh kerja [kJ]

σ = konstanta Stefan-Boltzman [5,669 x 10^{-8} kW/m^2.K]

ω = rasio kelembaban atau kelembaban mutlak
[kg uap air/kg udara kering]

ϖ = jumlah mol uap air dalam udara pembakaran [kmol/jam]

Ω_{bgs} = fraksi mol senyawa H_2O bahan bakar *bagasse*

$\Omega_{f.o.}$ = fraksi mol senyawa H_2O bahan bakar *fuel oil*

Ω_{ky} = fraksi mol senyawa H_2O bahan bakar kayu