

# RANCANGAN WATERWALL PADA ONCE THROUGH SUPERCRITICAL BOILER UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP KAPASITAS 1X660 MW

Jayu Suzia, Ika Yuliyani, Maridjo

Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

Jl. Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Bandung 40012

Telp. (022) 2013789, Fax (022) 2013889

E-mail : [jayusuzia@gmail.com](mailto:jayusuzia@gmail.com)

## Abstrak

*Waterwall merupakan tempat terjadinya proses perpindahan panas konveksi dan radiasi antara fluida kerja dengan gas hasil pembakaran pada furnace. Ada 3 jenis waterwall, yaitu multi-pass waterwall, spiral waterwall, dan Benson waterwall. Pada teknologi supercritical boiler, jenis waterwall yang paling banyak digunakan yaitu jenis spiral waterwall karena perpindahan panas yang terjadi lebih baik dari jenis yang lainnya dan juga mengurangi jumlah pipa yang digunakan pada boiler tersebut. Temperatur dan tekanan fluida kerja pada supercritical boiler beroperasi di atas titik kritis, titik kritis tekanan fluida air adalah sebesar 22,1 MPa dan titik kritis temperature 374,14°C. Hasil rancangan Waterwall adalah jenis spiral waterwall dengan volume furnace waterwall sebesar 29523,36 m<sup>3</sup>, tinggi furnace waterwall sebesar 65,66 m, lebar furnace waterwall sebesar 21,42m, kedalaman furnace waterwall sebesar 20,99 m dan diameter luar water tubes spiral waterwall sebesar 76,2 mm (3 in) serta ketebalan pipa tersebut sebesar 1,27 mm (0,05). Jumlah energi kalor yang diserap oleh waterwall adalah 689,33 MW.*

**Kata kunci :** *spiral waterwall, supercritical boiler, supercritical fluid, furnace waterwall, water tubes.*

## 1. PENDAHULUAN

Saat ini Pemerintah Indonesia sedang melaksanakan program 35.000 MW untuk memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat setiap tahunnya. Berdasarkan RUPTL 2015-2024, pertumbuhan ekonomi pada tahun 2015 di Indonesia mencapai 6,1% dan beban puncak mencapai 36,787 MW serta pertumbuhan kebutuhan listrik mencapai 8,7% per tahun. Program tersebut tertuang di dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia nomor 21 tahun 2013. Di dalam kebijakan tersebut disebutkan mengenai daftar proyek-proyek percepatan pembangunan pembangkit tenaga listrik yang menggunakan energi terbarukan, batubara dan gas serta transmisi terkait. Salah satu proyeknya adalah pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang menggunakan teknologi *Supercritical boiler*.

*Supercritical boiler* merupakan *once-through boiler* yang tidak memerlukan *drum* untuk memisahkan uap dan air [1]. *Supercritical boiler* beroperasi pada tekanan tinggi yaitu

sebesar 22,12 Mpa atau lebih. Fluida kerja berupa air hanya berubah dari fasa cair menjadi fluida yang disebut sebagai "*Supercritical Fluid*". Kelebihan dari penggunaan teknologi ini antara lain,

1. Meningkatkan efisiensi sistem PLTU menjadi 37 – 42 %, karena mampu beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi.
2. Mengurangi emisi gas buang.
3. Mengurangi biaya operasi pembangkit.

*Waterwall* merupakan komponen yang sangat penting dalam proses perubahan fluida kerja dari fasa cair menjadi uap kering. Pada *Supercritical boiler*, *waterwall* yang digunakan harus mampu beroperasi pada tekanan dan temperatur yang sangat tinggi serta mampu untuk mengoptimalkan proses perubahan fasa dari cair menjadi *supercritical fluid*. Saat ini perkembangan teknologi *supercritical boiler* sangatlah pesat dan banyak digunakan [2].

Rancangan *Waterwall* pada *Once Through Supercritical Boiler* untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 1x660 MW dapat

dilakukan dengan menentukan tekanan dan temperatur kerja pada *Supercritical boiler*, kemudian menentukan material yang digunakan untuk *waterwall*.

**2. METODOLOGI DAN TAHAPAN RANCANGAN**

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian adalah studi lapangan, dan pembuatan simulasi untuk rancangan PLTU dan *waterwall*.

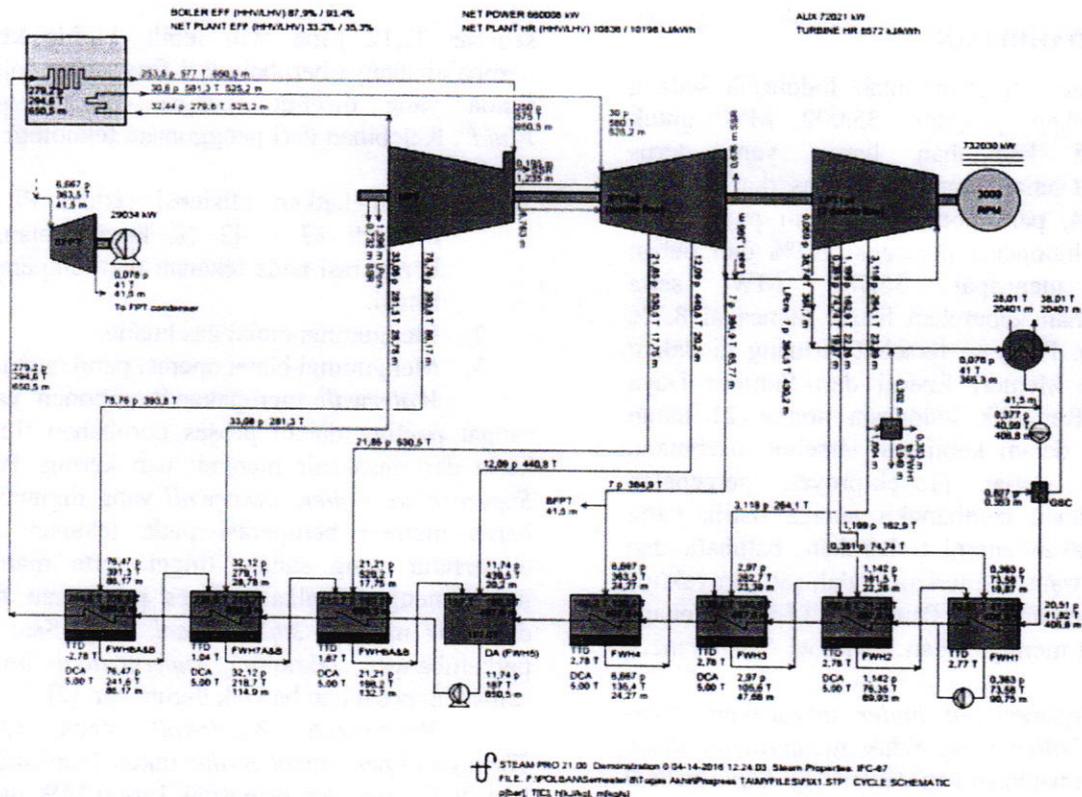
- Studi lapangan dilaksanakan untuk mendapatkan data dan informasi yang berkaitan dengan pembangkit yang menggunakan *supercritical* boiler.
- Pembuatan simulasi pembangkit dengan menggunakan software *Steampro*.
- Membuat rancangan *waterwall* (bhs asing) menggunakan data-data yang diperoleh dari studi lapangan dan software *steampro*.
- Analisa desain *waterwall*.

Rancangan *waterwall* ini menggunakan sistem pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas 1x660 MW dan disimulasikan

menggunakan perangkat lunak STEAMPRO dari ThermoFlow seperti Gambar 1 dan hasil simulasi tersebut terdapat pada Tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1 Hasil data *furnace boiler* pada perangkat lunak STEAMPRO

No	Data	Jumlah	Satuan
1	Mass flow air	650,5	kg/s
2	Temperatur inlet <i>waterwall</i>	343,5	°C
3	Temperatur outlet <i>waterwall</i>	410	°C
4	Tekanan inlet <i>waterwall</i>	27,74	MPa
5	Tekanan outlet <i>waterwall</i>	26,22	MPa
6	LHV bahan bakar	20517	kJ/kg
7	Mass flow bahan bakar	91,13	kg/s
8	Temperatur flue gas	1102,2	°C
9	Mass flow gas	860,9	kg/s
10	Gas mass flux	3.734	kg/s m <sup>2</sup>
11	Volumetric heat release	63,33	kW/m <sup>3</sup>



Gambar 1. Simulasi sistem *supercritical power plant* 1x660 MW

Setelah simulasi selesai dan didapatkan data-data yang dibutuhkan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan parameter rancangan *waterwall*. Berikut adalah perhitungan parameter rancangan *waterwall* :

• Laju Kalor pada *Furnace Waterwall*

Perpindahan panas yang terjadi pada ruang bakar terjadi diantara partikel-partikel gas asap yang memancarkan kalor secara radiasi ke pipa-pipa evaporator yang menempel pada dinding ruang bakar. Perpindahan panas yang terjadi secara konveksi dapat diabaikan karena memiliki nilai yang kecil. Saat proses perpindahan panas terjadi terdapat kerugian kalor yang diakibatkan dari pembakaran yang tidak sempurna. Kalor yang terbawa oleh abu, dan kalor yang hilang didistribusikan kelingkungan. Kalor yang dapat diserap oleh evaporator dapat dihitung dengan persamaan berikut [3] :

$$\dot{Q}_{ww} = \dot{m}_{water} (h_e - h_i) \tag{1}$$

Dimana:

- $\dot{Q}_{ww}$  : kalor yang diserap *waterwall* (kW)
- $h_e$  : entalpi uap keluar *waterwall* (kJ/kg)
- $h_i$  : entalpi uap masuk *waterwall* (kJ/kg)
- $\dot{m}_{water}$  : laju alir massa air (kg/s)

Kalor yang dihasilkan oleh bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{bb} = \dot{m}_{bb} \cdot LHV \tag{2}$$

Dimana:

- $\dot{Q}_{bb}$  : kalor yang dihasilkan bahan bakar (kW)
- LHV : nilai kalor bahan bakar (kJ/kg)
- $\dot{m}_{bb}$  : laju alir massa bahan bakar (kg/s)

• Derajat Kemiringan *Spiral Waterwall*

Derajat kemiringan spiral *waterwall* yang akan dirancangan dapat diketui dengan persamaan berikut :

$$\sin \alpha_h = \frac{k_p d_1 W_{mm}}{4l \frac{d_1^2 \pi}{4} W''} = \frac{W k_p}{W'' \pi l d_1} \tag{3}$$

Dimana,

- $\sin \alpha_h$  : derajat kemiringan *spiral waterwall*
- $k_p$  : konstanta berdasarkan diameter *water tube*
- $W''$  : *minimum mass flux*, (kg/s.m<sup>2</sup>)
- $W$  : *feed water flow*, (kg/s)
- $d_1$  : diameter dalam *water tube*, (m)
- $l$  : lebar *waterwall*, (m)

Dimensi *waterwall* dapat ditentukan dengan mengetahui *volume heat release rate* dan melakukan asumsi untuk lebar *waterwall* yang dirancang. Berikut adalah persamaannya :

a. Volume *spiralwaterwall*

$$V_{ww} = \frac{\dot{Q}_{bb}}{V_f} \tag{4}$$

b. Kedalaman *waterwall*

$$\frac{D}{w} = 0.98 \tag{5}$$

c. Ketinggian *spiral waterwall*

$$h = \frac{V_{ww}}{w \cdot D} \tag{6}$$

Dimana,

- $V_{ww}$  : volume *spiral waterwall* (m<sup>3</sup>)
- $V_f$  : *volume heat release rate*(kW/m<sup>3</sup>)
- $w$  : *width* (lebar yang diasumsikan) (m)
- $D$  : *depth* (kedalaman *waterwall*) (m)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

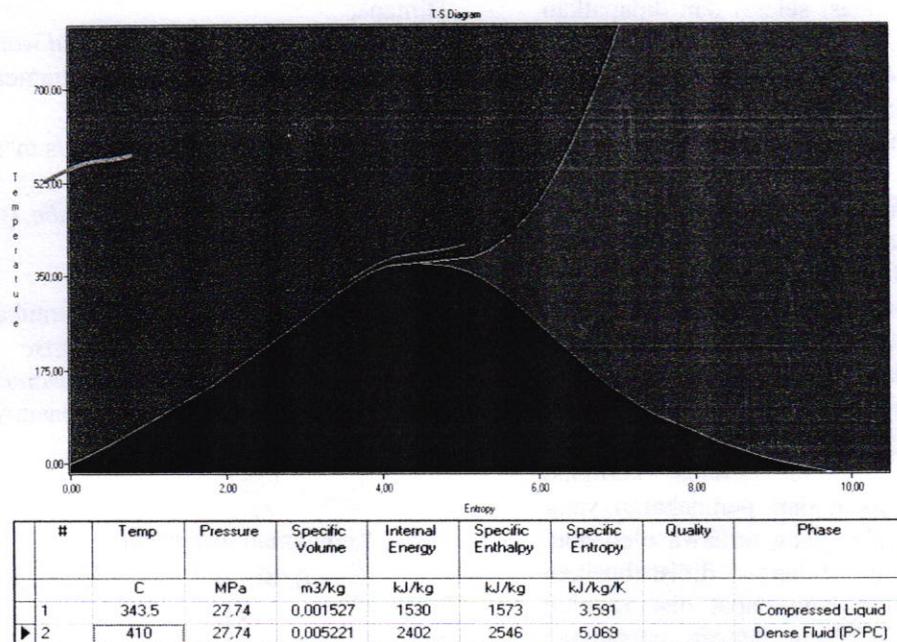
Berdasarkan dari parameter yang telah disimulasi sebelumnya, maka dipilihlah pipa *waterwall* yang digunakan untuk rancangan ini, yaitu ASME SA213 T12 dengan diameter luar sebesar 76,2 mm (3 in) dan tebal pipa tersebut sebesar 1,27 mm (0,05 in), dan jenis *water tubes* yang dipilih adalah *smooth tubes*. Berikut adalah spesifikasi pipa tersebut :

Tabel 2 Komposisi kimia pipa ASME SA213 T12

C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %	Cr, %	Mo, %
0,05-0,15	0,30-0,61	0,025 max	0,025 max	0,50 max	0,80-1,25	0,44-0,65

Tabel 3 Spesifikasi mekanik pipa ASME SA213 T12

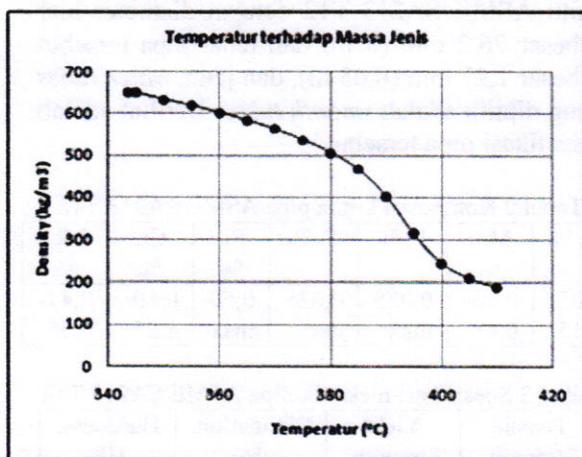
Tensile Strength, MPa	Yield Strength, MPa	Elongation, %	Hardness, HB
415 min	220 min	30 min	163 max



Gambar 3 Diagram T-s untuk fluida kerja pada *waterwall*

**1. Termodinamika fluida kerja pada *waterwall***

Dari data simulasi diketahui bahwa temperatur inlet *waterwall* sebesar 343,5°C dan temperatur outlet *waterwall* sebesar 410 °C pada tekanan konstan (kondisi ideal), yaitu sebesar 27,74 MPa. Dengan menggunakan perangkat lunak *computer-aided thermodynamic table 3*, maka didapatkan hasil seperti Gambar 3.



Gambar 3 Grafik temperatur terhadap massa jenis fluida kerja

Dari hasil perangkat lunak tersebut didapatkan bahwa *spiral waterwall* yang dirancang bekerja

pada daerah di atas titik kritis dari fluida air sehingga cocok untuk teknologi *supercritical boiler* pada PLTU dengan kapasitas 1x660 MW.

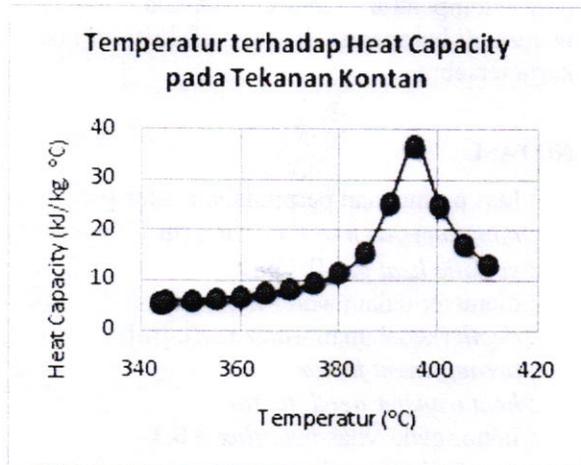
**2. Temperatur terhadap Massa Jenis Fluida Kerja**

Massa jenis fluida kerja didapatkan dari perangkat lunak *Chemicalogic SteamTab Companion* dengan memasukkan data input berupa temperatur dan tekanan kerja fluida air pada *spiral waterwall* yang dirancang. Dari grafik tersebut terlihat bahwa semakin besar temperatur maka semakin kecil densitas fluida air tersebut. Terjadi penurunan densitas yang cukup signifikan pada temperatur 385°C karena fluida tersebut berada di atas titik kritis dari fluida air. Penurunan densitas fluida air tersebut mempengaruhi kondisi fluida tersebut sehingga menjadi *supercritical fluid* di dalam *spiral waterwall* yang dirancang.

**3. Temperatur terhadap Heat Capacity pada Tekanan Konstan**

Heat capacity pada tekanan konstan didapatkan dari perangkat lunak *Chemicalogic SteamTab Companion* dengan memasukkan data input berupa temperatur dan tekanan kerja fluida air pada *spiral waterwall* yang dirancang. Dari grafik tersebut

terlihat bahwa semakin besar temperatur maka semakin besar pula *heat capacity* fluida air tersebut.



Gambar 4. Grafik temperatur terhadap *heat capacity* pada tekanan konstan

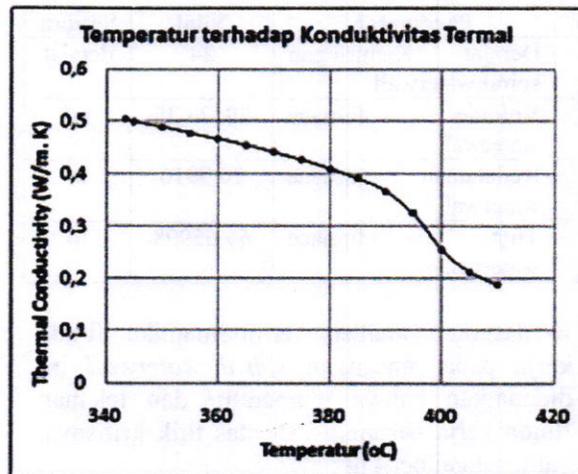
Terjadi kenaikan *heat capacity* yang signifikan pada temperatur 385°C hingga mencapai puncaknya pada temperatur 395°C. Hal tersebut terjadi karena fluida tersebut berada di atas titik kritis dari fluida air sehingga air tersebut berubah menjadi *supercritical fluid*. Perubahan *heat capacity* tersebut akan mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi pada *spiral waterwall* yang dirancang sehingga perlu material dan ketebalan pipa yang tepat agar perpindahan panas yang terjadi lebih maksimal.

#### 4. Temperatur terhadap Thermal Conductivity

Konduktivitas termal fluida kerja didapatkan dari perangkat lunak *Chemicalogic SteamTab Companion* dengan memasukan data input berupa temperatur dan tekanan kerja fluida air pada *spiral waterwall* yang dirancang. Dari grafik tersebut terlihat bahwa semakin besar temperatur maka semakin kecil konduktivitas termal fluida air tersebut.

Terjadi penurunan konduktivitas termal yang signifikan di mulai dari temperatur 395°C. Hal tersebut dikarenakan kondisi fluida air berada di atas titik kritisnya sehingga air tersebut berubah menjadi *supercritical fluid*. Perubahan viskositas tersebut akan mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi pada *spiral waterwall* yang dirancang

sehingga perlu material dan ketebalan pipa yang tepat agar perpindahan panas yang terjadi lebih maksimal.



Gambar 5. Grafik temperatur terhadap konduktivitas termal fluida kerja

#### 4. SIMPULAN

1. Parameter hasil rancangan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Energi Kalor Waterwall	689,33	MW
2	Energi Kalor Bahan bakar	1869,71	MW
3	Persentase penyerapan kalor oleh waterwall	36,87	%
4	Kalor Radiasi	801,52	kW
5	Temperatur fluegas meninggalkan	1078,303	°C
6	Heat Flux	24868,67	W/m <sup>2</sup>
7	Minimum gas free flow area	230,557	m <sup>2</sup>
8	Gas film temperatur	716,8439	°C
9	Bilangan Reynolds	6883,2	
10	Koefisien perpindahan panas konveksi	35,87527	W/m <sup>2</sup> C
11	Koefisien perpindahan panas radiasi	12,99278	W/m <sup>2</sup> C
12	Gabungan koefisien perpindahan panas	48,86804	W/m <sup>2</sup> C
13	Waterwall surface	51240,25	m <sup>2</sup>

2. Dimensi *spiral waterwall* menggunakan pipa ASME SA213 T12 dengan diameter luar pipa *spiral waterwall* tersebut adalah 76,2 mm (3

in) dan ketebalannya sebesar 1,27 mm (0,05 in), berikut dimensi rancangan *spiral waterwall* :

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Derajat Kemiringan spiral waterwall	24	derajat
2	Volume furnace waterwall	29523,36	m <sup>3</sup>
3	Kedalaman furnace waterwall	20,9916	m
4	Tinggi furnace waterwall	65,65998	m

3. Berdasarkan analisis termodinamika fluida kerja pada rancangan *spiral waterwall* ini didapatkan bahwa temperatur dan tekanan fluida kerja beroperasi di atas titik kritisnya, yaitu sebagai berikut :

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Temperatur inlet water wall	343,5	°C
2	Temperatur outlet water wall	410	°C
3	Tekanan inlet water wall	27,74	MPa
4	Tekanan outlet water wall	26,22	MPa

4. Dari grafik temperatur terhadap massa jenis fluida kerja pada *spiral waterwall* terlihat bahwa semakin besar temperatur maka semakin kecil densitas fluida air tersebut. Terjadi penurunan densitas yang cukup signifikan pada temperatur 385°C karena fluida tersebut berada di atas titik kritis dari fluida air.
5. Dari grafik temperatur terhadap *heat capacity* fluida kerja pada tekanan konstan terlihat bahwa semakin besar temperatur maka semakin besar pula *heat capacity* fluida air tersebut. Terjadi kenaikan *heat capacity* yang signifikan pada temperatur 385°C hingga mencapai puncaknya pada temperatur 395°C. Hal tersebut terjadi karena fluida tersebut berada di atas titik kritis dari fluida air sehingga air tersebut berubah menjadi *supercritical fluid*.
6. Dari grafik temperatur terhadap konduktivitas termal terlihat bahwa semakin besar

temperatur maka semakin kecil konduktivitas termal fluida air tersebut. Terjadi penurunan konduktivitas termal yang signifikan di mulai dari temperatur 395°C karena *spiral waterwall* beroperasi di atas titik kritis fluida kerja tersebut.

### 5. NOTASI

- A : luas permukaan perpindahan kalor [m<sup>2</sup>]
- A<sub>g</sub> : *minimum gas free flow rate*, [m<sup>2</sup>]
- c<sub>p</sub> : *specific heat gas* [kJ/kg°C]
- d<sub>i</sub> : diameter dalam *water tube*, [m]
- D : *depth* (kedalaman *waterwall*), [m]
- F<sub>a</sub> : *arrangement factor*
- F<sub>d</sub> : *heat transfer depth factor*
- F<sub>e</sub> : faktor efektivitas *heat flux* = 0,3
- F<sub>pp</sub> : *physical properties factor*
- F<sub>s</sub> : faktor efektivitas perpindahan panas radiasi
- G<sub>e</sub> : *gas mass flux*, [kg/s.m<sup>2</sup>]
- h<sub>e</sub> : entalpi uap keluar *waterwall*, [kJ/kg]
- h<sub>i</sub> : entalpi uap masuk *waterwall*, [kJ/kg]
- h'<sub>c</sub> : *basic convection crossflow geometry and velocity factor*, [W/m<sup>2</sup>°C]
- h'<sub>r</sub> : *basic radiation heat transfer coefficient*, [W/m<sup>2</sup>°C]
- h<sub>rg</sub> : koefisien perpindahan kalor secara radiasi pada sisi gas [kJ/s m<sup>2</sup>°C]
- h<sub>cg</sub> : koefisien perpindahan kalor secara konveksi pada sisi gas [kJ/s m<sup>2</sup>°C]
- k<sub>p</sub> : konstanta berdasarkan diameter *water tube*
- K : faktor bahan bakar
- K<sub>Re</sub> : *gas properties factor*, [s.m<sup>2</sup>/kg]
- l : lebar *waterwall*, [m]
- L : panjang radiasi rata-rata, [m]
- LHV : nilai kalor bahan bakar [kJ/kg]
- LMTD : *log mean temperatur different*, [°C]
- m<sub>bb</sub> : laju alir massa bahan bakar [kg/s]
- m<sub>g</sub> : laju alir gas, [kg/s]
- m<sub>water</sub> : laju alir massa air, [kg/s]
- η<sub>th</sub> : efisiensi thermal, [%]
- p<sub>r</sub> : *partial pressure*
- sin α<sub>h</sub> : derajat kemiringan *spiral waterwall*
- T<sub>1</sub> : temperatur gas masuk *waterwall*, [°C]
- T<sub>2</sub> : temperatur gas keluar *waterwall*, [°C]
- T<sub>s</sub>' : temperatur saturasi air boiler, [°C]
- ΔT<sub>g</sub> : selisih temperatur gas masuk dan keluar, [°C]

- $q''$  : heat flux, [W/m<sup>2</sup>]
- $\dot{Q}$  : energi kalor, [kJ/s]
- $\dot{Q}_{bb}$  : kalor yang dihasilkan bahan bakar, [kW]
- $\dot{Q}_{rb}$  : energi kalor radiasi, [kW]
- $\dot{Q}_{ww}$  : kalor yang diserap *waterwall*, [kW]
- $\sigma_a$  : faktor kerugian akibat kalor yang terbawa abu
- $\sigma_c$  : faktor kerugian akibat pembakaran tidak sempurna
- $\sigma_d$  : faktor kerugian akibat kalor yang keluar dari dinding ruang bakar
- $\sigma$  : konstanta Stefan-Boltzmann =  $5,6703 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]
- $U = h_g$  : gabungan koefisien perpindahan kalor, [kJ/s m<sup>2</sup>°C]
- $V_{ww}$  : volume *spiral waterwall*, [m<sup>3</sup>]
- $V_f$  : volume heat release rate, (kW/m<sup>3</sup>)
- $w$  : width (lebar yang diasumsikan), [m]
- $W$  : feed water flow, [kg/s]
- $W''$  : minimum mass flux, [kg/s.m<sup>2</sup>]

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] S.K. Patel, dan A.C. Tiwari "Performance analysis of super critical boiler", International Journal Of Mechanical Engineering Andtechnology (IJMET) Volume 3, Issue 2, May-August (2012), pp. 422-430
- [2] Joachim Franke dan Rudolf Kral, "Supercritical boiler technology for future market conditions", Siemens Power Generation, Presented at Parsons Conference 2003
- [3] Moran, Shapiro, Boettner, Bailey: "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", 7th Edition, Dec 2010, © 2011, Wiley.