



**OPTIMALISASI KINERJA *AIR PREHEATER* TERHADAP  
EFEKTIVITAS DENGAN VARIASI RPM PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**

**SKRIPSI**

Oleh:

**Adrian Ronatal Situmorang  
NIM 121910101021**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**



**OPTIMALISASI KINERJA *AIR PREHEATER* TERHADAP  
EFEKTIVITAS DENGAN VARIASI RPM PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1) dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh:

**Adrian Ronatal Situmorang  
NIM 121910101021**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2020**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Kedua orangtua saya, Victor T. Situmorang, S.Ak dan Ibu Halimah yang tercinta;
2. Kakakku Radhitya P. Situmorang, S.T. dan Enget Firman Situmorang;
3. Wanita yang selalu mensupport Vita Noor Sheila, S.Iikom.;
4. Dosen Pembimbing Utama Bapak Ir. Hary Sutjahjono, S.T., M.T. dan Dosen Pembimbing Anggota Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T. yang selalu sabar dan ikhlas membimbing;
5. Dosen Penguji Utama Bapak Ir. Digdo Lisyadi Setyawan, MSc. dan Dosen Penguji Anggota Bapak Ir. Dedi Dwilaksana, S.T, M.T. yang selalu memberikan masukan terbaiknya;
6. Saudaraku Teknik Mesin 2012 Solidarity Forever yang selalu menemani hari hariku di Jember, Khususnya Ir. Mohamad Tunggal Hanif, S.T., Rachell Nurman Zulkarnain, S.T., Hemas Hafid Bachtiar, S,T., M.T., Arief Efendi dan Radix Fachri;
7. Saudaraku mas Dani Hari Tunggal, S,T. dan Dr. dr. Raditya Bagus Evanda, M.M. yang selalu bersedia membantu penulisan ini dan memberikan ilmu tentang leadership dan karakter;
8. Saudaraku Teknik Mesin 2013 Solidarity Forever yang selalu menemani, membantuk dan memberi masukan untuk penulisan ini.
9. Keluarga seperantauan “IMADA JAYA”, yang selalu ada saat suka maupun duka;
10. Saudaraku pengurus Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Jember (KBMMJ) 2014-2015;
11. Guru-guruku sejak Sekolah Dasar sampai dengan perguruan tinggi;
12. Seluruh dosen, staff pengajar dan administrasi Teknik Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Jember yang membantu penulis dalam menyelesaikan studi S1;

13. Seluruh Keluarga besar Teknik Mesin Universitas Jember Khususnya adik-adik tingkat Iskandar Akbar, Caisar Ramadhan, Ilman Azmi, yang membantu penulis dalam menyelesaikan studi S1;
14. Almamater Teknik Mesin Universitas Jember Solidarity Forever Solidarity Forever Solidarity Forever.



## MOTO

“Sesungguhnya bersama kesukaran itu ada keringanan. Karena itu bila kau sudah selesai (mengerjakan yang lain). Dan berharaplah kepada Tuhanmu.”

(Q.S Al Insyirah : 6-8)

“Lebih baik terlambat daripada tidak wisuda sama sekali. Wisuda setelah 14 semester adalah kesuksesan yang tertunda”

(Anonim)

“Rahasia keberhasilan adalah kerja keras dan belajar dari kegagalan,  
Pantang pulang sebelum padam”

(Adrian Ronatal Situmorang )

## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Adrian Ronatal Situmorang

NIM : 121910101021

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Optimalisasi Kinerja *Air* Preheater Terhadap Efektivitas Dengan Variasi RPM Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada instansi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 24 Januari 2020

Yang menyatakan,

Adrian Ronatal Situmorang

NIM 121910101021

**SKRIPSI**

**OPTIMALISASI KINERJA *AIR PREHEATER* TERHADAP  
EFEKTIVITAS DENGAN VARIASI RPM PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**

Oleh

Adrian Ronatal Situmorang

NIM 121910101021

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Hary Sutjahjono, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “**OPTIMALISASI KINERJA AIR PREHEATER TERHADAP EFEKTIVITAS DENGAN VARIASI RPM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP**” telah diuji dan disahkan pada tanggal :

Tanggal : Kamis 24 Januari 2020

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Pembimbing,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

**Ir. Hary Sutjahjono, S.T., M.T.**

NIP 19681205 199702 1 002

**Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T.**

NIP 19751006 200212 1 002

Tim Penguji,

Penguji I,

Penguji II,

**Ir. Digdo Listyadi Setryawan, Msc.**

NIP 19680617 199501 1 001

**Ir. Dedi Dwilaksana S.T., M.T.**

NIP 19691201 199602 1 001

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik

**Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.**

NIP. 19700826 199702 1 001

## RINGKASAN

**Optimalisasi Kinerja Air Preheater Terhadap Efektivitas Dengan Variasi RPM Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap.** Adrian Ronatal Situmorang, 121910101021; 2020: 53 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

*Rotary Air Preheater* lazim digunakan untuk pemanasan awal (*preheater*) pada pembakaran untuk pembangkit-pembangkit listrik khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Banten, sebagai salah satu PLTU di Indonesia juga menggunakan alat ini untuk memanaskan udara primer maupun sekunder sebagai komponen utama yang menunjang proses pembakaran di boiler. Tipe *rotary air preheater* yang dibahas pada penelitian ini merupakan tipe *regenerative air heater*. Maka, tujuan dari penelitian ini adalah mencari nilai optimum pada kinerja *air preheater* di Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Banten dengan memvariasikan RPM rentang rendah terhadap peningkatan efektivitasnya.

Penelitian ini dilakukan dengan cara mencari nilai – nilai yang mempengaruhi efektivitas dari *rotary air preheater*. kemudian melakukan perhitungan yang setelahnya divariasikan dengan kecepatan putar rotor sebesar 2 RPM, 3,2 RPM, 5 RPM. Setelah itu, dari memvariasikan kecepatan putar rotor kemudian dianalisa untuk mencari nilai optimumnya.

Setelah dilakukan perhitungan pada penelitian ini, didapatkan data yang menunjukkan adanya pengaruh RPM (kecepatan rotasi rotor) terhadap nilai efektivitas *rotary air preheater*. Pada 3 variasi kecepatan rotasi rotor yang dilakukan dengan perbandingan antara kapasitas perpindahan panas minimal terhadap kapasitas perpindahan panas maksimal ( $C^*$ ) yang konstan, dapat diamati bahwa grafik cenderung naik seiring dengan meningkatnya kecepatan rotasi rotor. pengaruh kecepatan rotasi rotor terhadap peningkatan efektivitas tersebut dipengaruhi oleh setiap kenaikan pada kecepatan rotasi rotor yang akan

mempengaruhi nilai kapasitas kalor pada dinding matriks ( $Cr$ ) yang turut meningkat.

Kesimpulan dari hasil penelitian ini menunjukkan adanya pengaruh putaran rotor *air preheater* terhadap efektivitasnya. Dimana peningkatan kecepatan rotasi dapat mempengaruhi peningkatan pada efektivitas dikarenakan setiap peningkatan kecepatan rotasi juga mempengaruhi meningkatnya nilai kapasitas kalor pada dinding matriks ( $Cr$ ) sehingga perbandingan antara nilai kapasitas kalor pada dinding matriks terhadap kapasitas perpindahan panas minimal ( $Cr^*$ ) ikut meningkat juga.

Dari 3 variasi yang terdiri dari 2 RPM, 3,2 RPM dan 5 RPM menunjukkan semua variasi mencapai dan melebihi nilai efektivitasnya. Nilai tertinggi diperoleh oleh variasi 5 RPM dengan nilai  $Cr = 3,36$  W/K,  $Cr^* = 3,69$ , dan nilai efektivitasnya 1,102. Sedangkan nilai terendah yang diperoleh oleh variasi 2 RPM dengan nilai  $Cr = 1,34$  W/K,  $Cr^* = 1,47$ , dan nilai efektivitasnya 1,054. Hal tersebut dapat disebabkan oleh karena dimensi dan desain matriks yang terlalu berlebihan atau besar sehingga nilai perhitungan berdasarkan desain dan dimensinya menghasilkan nilai yang lebih tinggi dari hasil yang diharapkan dari desain tersebut.

## **SUMMARY**

***Optimization of Air Preheater Performance toward Effectiveness with RPM Variations on Steam Power Plants.*** Adrian Ronatal Situmorang, 121910101021; 2020: 53 page; Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty of Jember University.

*Rotary air preheater is commonly used for preheating in combustion for power plants, especially steam power plant. Steam power plant in Banten, as one of the Indonesian power plant and also uses this instrument to heat primary and secondary air as the main component that supports the combustion process in the boiler. The type of rotary air preheater discussed on this experiment is a type of regenerative air heater. Thus, the purpose of this experiment is to find the optimum value on the performance of the air preheater in steam power plant in Banten by varying the low range RPM to increase the effectiveness.*

*This experiment was conducted by looking for values that affect the effectiveness of the rotary air preheater. Then do the calculations after which varying with the rotational speed of 2 RPM, 3,2 RPM, 5 RPM. After that, from the varying the rotational speed of the rotor the analyzed to find the optimum value.*

*After calculations in this experiment, data were obtained that showed the influence of rotational speed of the air preheater rotor on the effectiveness value of the rotary air preheater. In 3 variation of the rotational speed of the rotor carried out by the ratio between the capacity of the minimum heat transfer to the capacity of maximum heat transfer ( $C^*$ ), it can be observed that the effectiveness tends to rise with increasing rotation speed rotor. The affect of the rotational speed of the rotor on the increase in effectiveness is influenced by each increase in the rotational speed of the rotor which will affect the value of the heat capacity in the matrix wall ( $C_r$ ) which also increases.*

*The conclusions from the result of this experiment indicate the influence of the rotation speed of air preheater on its effectiveness. Where an increase in rotational speed can affect the increase in effectiveness because each increase in*

*rotational speed also affect the increasing value of the heat capacity of the matrix wall ( $Cr$ ) so that the ratio between the value of the heat capacity in the matrix wall to the capacity of minimum heat transfer ( $Cr^*$ ) also increased.*

*From the 3 variations consisting of 2 RPM, 3,2 RPM and 5 RPM showed that all variation reached and exceeded the value of its effectiveness. The highest value is obtained by variation of 5 RPM with a value of  $Cr = 3,36$  W/K,  $Cr^* = 3,69$ , and the effectiveness value is 1,102. While the lowest value obtained by the variation of 2 RPM with the value of  $Cr = 1,34$  W/K,  $Cr^* = 1,47$ , and the effectiveness value is 1,054. This can be caused by the dimension and design of a matrix which excessive or large so that the value calculated based on the design and dimension result in a higher value of the expected result of such design.*

## PRAKATA

Puji syukur kepada Allah SWT, atas segala nikmat hidup dan kesempatan mengenggam ilmu, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Optimalisasi Kinerja *Air Preheater* Terhadap Efektivitas Dengan Variasi RPM Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai derajat Sarjana Teknik. Dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini, penulis banyak dibantu, dibimbing, dan didukung oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orangtua saya, Victor T. Situmorang, S.Ak. dan Ibu Halimah yang tercinta;
2. Kakakku Radhitya P. Situmorang, S.T. dan Enget Firman Situmorang;
3. Wanita yang selalu mensupport Vita Noor Sheila, S.Iikom.;
4. Dosen Pembimbing Utama Bapak Ir. Hary Sutjahjono, S.T., M.T. dan Dosen Pembimbing Anggota Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T. yang selalu sabar dan ikhlas membimbing;
5. Dosen Penguji Utama Bapak Ir. Digdo Lisyadi Setyawan, MSc. dan Dosen Penguji Anggota Bapak Ir. Dedi Dwilaksana, S.T, M.T. yang selalu memberikan masukan terbaiknya;
6. Saudaraku Teknik Mesin 2012 Solidarity Forever yang selalu menemani hari hariku di Jember, Khususnya Ir. Mohamad Tunggal Hanif, S.T., Rachell Nurman Zulkarnain, S.T., Hemas Hafid Bachtiar, S,T., M.T., Arief Efendi dan Radix Fachri;
7. Saudaraku mas Dani Hari Tunggal, S,T. dan Dr. dr. Raditya Bagus Evanda, M.M. yang selalu bersedia membantu penulisan ini dan memberikan ilmu tentang leadership dan karakter;
8. Saudaraku Teknik Mesin 2013 Solidarity Forever yang selalu menemani, membantuk dan memberi masukan untuk penulisan ini.

9. Keluarga seperantauan “IMADA JAYA”, yang selalu ada saat suka maupun duka;
10. Saudaraku pengurus Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Jember (KBMMJ) 2014-2015;
11. Guru-guruku sejak Sekolah Dasar sampai dengan perguruan tinggi;
12. Seluruh dosen, staff pengajar dan administrasi Teknik Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Jember yang membantu penulis dalam menyelesaikan studi S1;
13. Seluruh Keluarga besar Teknik Mesin Universitas Jember Khususnya adik-adik tingkat Iskandar Akbar, Caisar Ramadhan, Ilman Azmi, yang membantu penulis dalam menyelesaikan studi S1;
14. Almamater Teknik Mesin Universitas Jember Solidarity Forever Solidarity Forever Solidarity Forever.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, karena sempurna hanya milik Allah SWT. Harapan penulis adalah supaya informasi dari skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Jember, 24 Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>MOTO</b> .....	v
<b>PERNYATAAN</b> .....	vi
<b>PENGESAHAN</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>SUMMARY</b> .....	xi
<b>PRAKATA</b> .....	xiii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xviii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	2
<b>1.4 Tujuan dan Manfaat</b> .....	3
1.4.1 Tujuan.....	3
1.4.2 Manfaat.....	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
<b>2.1 Siklus Rankine</b> .....	4
<b>2.2 Teori Pembakaran</b> .....	6
2.2.1 Pembakaran Batubara .....	7
<b>2.3 Boiler</b> .....	8
2.3.1 Klasifikasi Boiler.....	8
2.3.2 Teori efisiensi boiler.....	10
<b>2.4 Air Preheater (APH)</b> .....	15
2.4.1 Kecepatan Rotasi Rotor APH.....	17

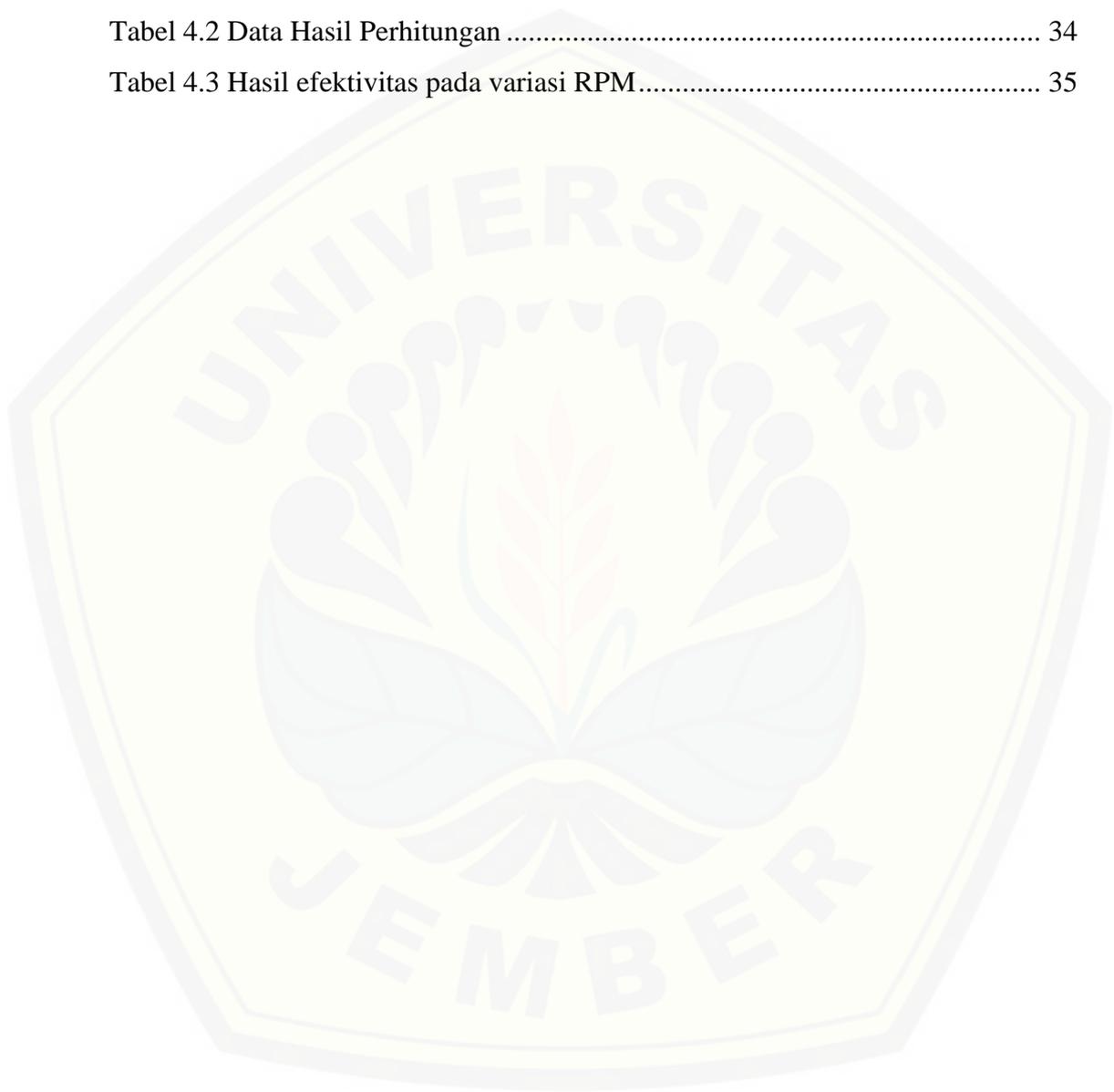
2.4.2 Keunggulan Air Preheater (APH) .....	17
<b>2.5 Hipotesa .....</b>	<b>18</b>
<b>BAB 3 METODOLOGI.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Sumber Data .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian.....</b>	<b>18</b>
3.2.1 Tempat Penelitian.....	18
3.2.2 Waktu Penelitian .....	18
<b>3.3 Visualisasi Data.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4 Variabel Penelitian .....</b>	<b>24</b>
3.4.1 Variabel Bebas.....	24
3.4.2 Variabel Terikat.....	24
<b>3.5 Prosedur Penelitian .....</b>	<b>25</b>
3.5.1 Pengambilan Data.....	25
3.5.2 Tahap Pengolahan Data.....	25
<b>3.6 Diagram Alir Penelitian .....</b>	<b>26</b>
<b>BAB 4 PEMBAHASAN .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Spesifikasi Alat dan Batas Kerja Sistem .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Hasil Perhitungan Data.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3 Pembahasan Hasil Penelitian .....</b>	<b>35</b>
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Kesimpulan .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2 Saran.....</b>	<b>38</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>40</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>42</b>
<b>A.1 SUMBER DATA.....</b>	<b>42</b>
<b>A.2 HASIL PERHITUNGAN.....</b>	<b>48</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem PLTU .....	4
Gambar 2.2 Siklus Rankine .....	5
Gambar 2.3 Siklus Dengan Superheat .....	5
Gambar 2.4 Siklus Dengan Superheat dan Re-Heat .....	6
Gambar 2.5 Boiler pipa api .....	9
Gambar 2.6 Boiler pipa air .....	10
Gambar 2.7 Grafik Efisiensi boiler .....	11
Gambar 2.8 Ilustrasi Input – output – Losses .....	15
Gambar 2.9 <i>Air Preheater</i> .....	16
Gambar 3.1 <i>Air &amp; Gas System</i> PLTU di Banten. ....	22
Gambar 3.2 <i>Air Preheater System</i> PLTU di Banten. ....	23
Gambar 3.3 Diagram Alir penelitian.....	26
Gambar 4.1 Skema Alat Uji .....	27
Gambar 4.2 Geometri Matriks .....	28
Gambar 4.3 Grafik RPM Terhadap Efektivitas .....	36

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi Rotasi Rotor <i>Air Preheater</i> (APH).....	24
Tabel 4.1 Spesifikasi Alat dan Batas Kerja Sistem.....	28
Tabel 4.2 Data Hasil Perhitungan .....	34
Tabel 4.3 Hasil efektivitas pada variasi RPM.....	35



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan vital yang menentukan majunya perekonomian dan teknologi di suatu negara. Hampir setiap aktifitas manusia membutuhkan listrik. Apalagi, dengan adanya revolusi industri dan modernisasi yang menjadikan kebutuhan manusia akan teknologi semakin tinggi. Tidak heran jika pada akhirnya industri listrik menjadi public utility yang cukup vital. Tidak seimbang pasokan energi listrik yang tersedia dengan listrik yang dibutuhkan masyarakat menjadi tantangan tersendiri bagi pemerintah untuk menjaga kestabilan energi listrik itu sendiri. Untuk menjaga kestabilan energi ke seluruh wilayah Nusantara, dibutuhkan peralatan pembangkitan yang tidak sekedar mumpuni namun juga handal sehingga dapat beroperasi secara terus menerus dan optimal (M.V. Nurhasan, 2015).

Pembangkit listrik tenaga batu bara membutuhkan pemanasan awal untuk udara pembakaran pada boiler sekarang ini menjadi suatu keharusan sebagai usaha untuk meningkatkan efisiensi boiler. *Rotary Air Preheater*, lazim digunakan untuk pemanasan awal (*preheater*) pada pembakaran untuk pembangkit-pembangkit listrik khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Banten sebagai salah satu PLTU di Indonesia juga menggunakan alat ini untuk memanaskan udara primer maupun sekunder sebagai komponen utama yang menunjang proses pembakaran di boiler. Karena digunakan untuk memanaskan udara primer dan sekunder maka alat ini sering disebut sebagai *Primary Air Heater* dan *Secondary Air Heater*, *Rotary Air Preheater* (A.M. Sasmita, 2015).

Pemanfaatan gas buang ini memiliki keuntungan memperkecil biaya pada proses pemanasan yang dipakai, sehingga memperkecil pencemaran thermal udara lingkungan (Ahmed S.D dan Kadarisman, 2012). Tipe *rotary air preheater* yang

dibahas pada penelitian ini merupakan tipe *regenerative air heater*. Sementara itu menurut Ramesh K. Shah dan Dusan P. Sekutic ialah salah satu parameter yang mempengaruhi besarnya efektivitas pada *rotary air preheater* adalah kecepatan rotasi rotor.

Pada penelitian sebelumnya yang berjudul *optimum operational conditions of rotary regenerator using genetic algorithm* membuktikan bahwa dengan memodelkan penukar dengan *rotary* matriks (*regenerator*), desain optimumnya dan parameter operasional untuk pengaplikasian pendingin, didapatkan bahwa dengan meningkatkan besaran dari kecepatan rotasi rotor pada *air preheater*, maka efektivitasnya akan turut meningkat juga (Sanaye S. dkk, 2008). Selanjutnya menurut Dewo S. dan Teguh H.A. juga membuktikan bahwa efektivitas akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan rotasi rotor yang juga dipengaruhi oleh perbandingan kapasitas perpindahan panasnya. Besar dari nilai NTU juga mempengaruhi peningkatan efektivitas.

Maka pada penelitian ini peneliti akan mencari nilai optimum pada kinerja *air preheater* di Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Banten dengan memvariasikan RPM rentang rendah terhadap peningkatan efektivitasnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam pembahasan ini sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh putaran rotor *air preheater* terhadap efektivitas ?

## 1.3 Batasan Masalah

Evaluasi kinerja *Air Preheater* tipe *Rotary Air Preheater* serta penyelesaian teoritisnya akan mempunyai cakupan yang sangat luas dan kompleks. Oleh karena itu dalam pembahasan kinerja dari *Air Heater* ini diberikan beberapa masalah sebagai berikut :

1. Perhitungan berdasarkan data operasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Banten.
2. Dimensi dan geometri *air heater* diambil dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap di Banten.

3. Dalam perhitungan, *air heater* dianggap terdiri dari *heat stored element* tanpa adanya perhitungan elemen basket, *seal*, modul dan komponen lain.

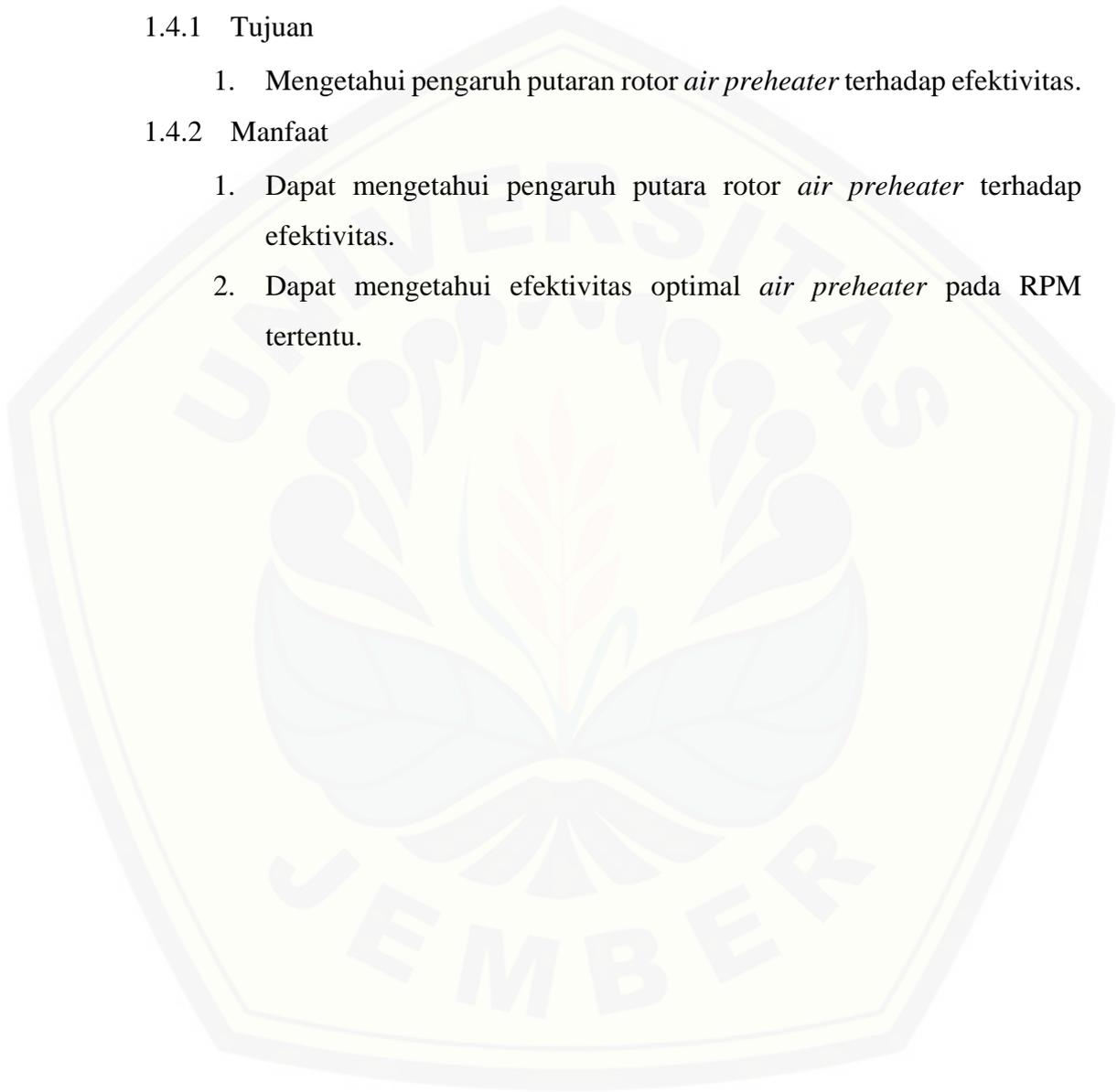
#### 1.4 Tujuan dan Manfaat

##### 1.4.1 Tujuan

1. Mengetahui pengaruh putaran rotor *air preheater* terhadap efektivitas.

##### 1.4.2 Manfaat

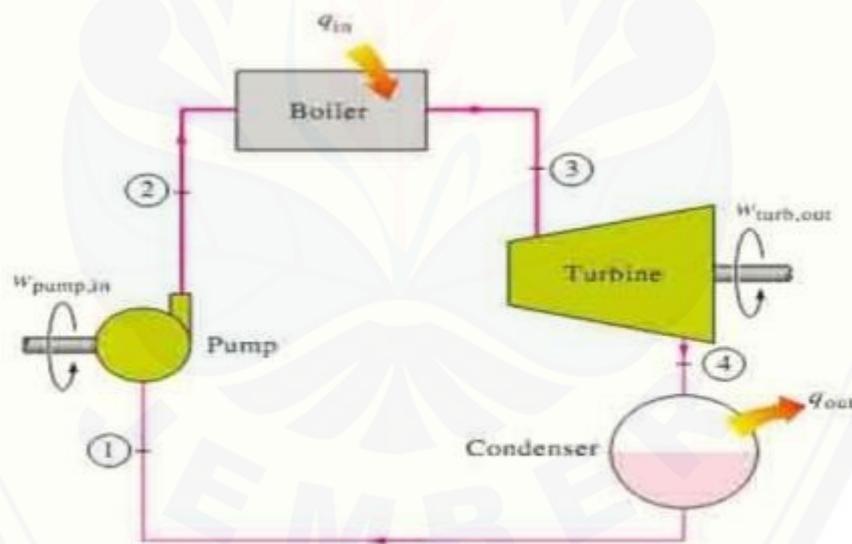
1. Dapat mengetahui pengaruh putara rotor *air preheater* terhadap efektivitas.
2. Dapat mengetahui efektivitas optimal *air preheater* pada RPM tertentu.



## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Siklus Rankine

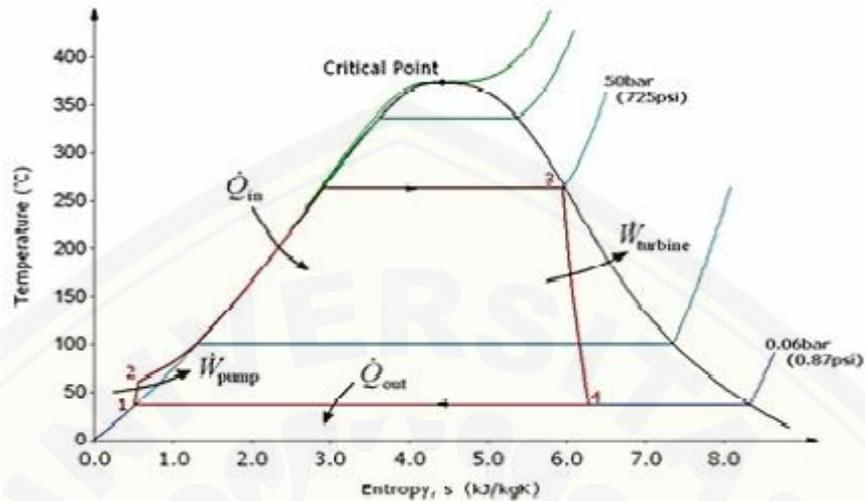
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah suatu jenis pembangkit listrik termal yang memanfaatkan uap sebagai penggerak turbin. Siklus pembangkit listrik tenaga uap ini memanfaatkan siklus Rankine atau siklus tenaga uap yang merupakan siklus sederhana yang memanfaatkan air-uap sebagai medium kerja. Hilangnya panas dari uap ke lingkungan juga merupakan sumber utama terjadinya penurunan efisiensi, untuk mengatasi hal ini perlu diberikan panas yang lebih pada steam dalam boiler namun akan berakibat juga dapat menurunkan efisiensi siklus (Cengel & Boles, 2002).



Gambar 2.1 Sistem PLTU (Cengel & Boles, 2002)

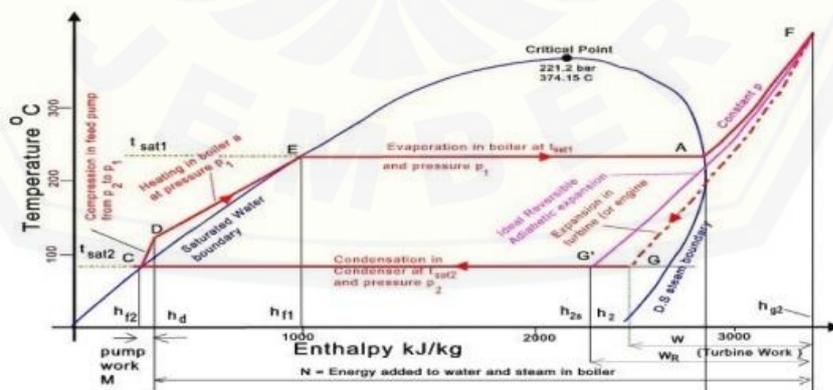
Secara Sederhana PLTU terdiri dari boiler (*Steam Generator*), turbin, condenser, pompa dan generator listrik (Gambar 2.1). Sehingga secara sederhana juga siklus rankin (Gambar 2.2) untuk PLTU terdiri dari proses 1-2 adalah penambahan tekanan oleh pompa, kemudian proses 2-3 merupakan penambahan panas terhadap air didalam boiler, proses 3-4 adalah proses ekspansi pada turbin

sehingga uap menurun tekanan dan suhunya, proses terakhir yaitu kondensasi oleh kondensor (4-1) (El-Walkiel,1992).



Gambar 2.2 Siklus Rankine (Cengel & Boles, 2002)

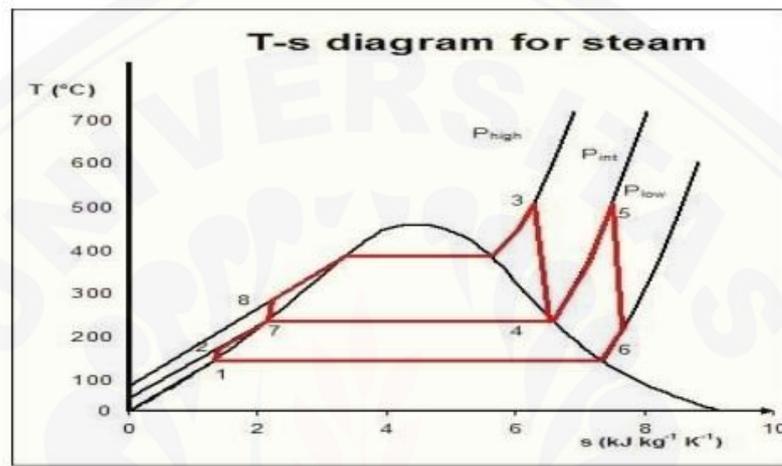
Untuk meningkatkan efisiensi plan PLTU secara umum maka dalam siklus ditambahkan superheat dan reheat (Gambar 2.3) dengan memanfaatkan panas hasil pembakaran boiler yang masih memiliki energi panas yang cukup besar agar tidak terbuang begitu saja. Dengan superheat dan re-heat ini maka siklus rankine sederhana mengalami perubahan yaitu uap mengalami tambahan panas sehingga titik 3 berubah menjadi titik 3', dan titik 4 menjadi titik 4' juga karena mengalami penambahan panas (UNEP, 2008).



Gambar 2.3 Siklus Dengan Superheat (Cengel & Boles, 2002)

Reheat merupakan modifikasi sistem superheat dimana uap tidak langsung berekspansi pada turbin ke tekanan kondensor melainkan uap akan berekspansi

pada turbin . Uap akan menuju turbin pertama ke tekanan antara steam generator dan tekanan kondensor untuk di panaskan kembali kemudian uap berekspansi pada turbin tingkat kedua sampai tekanan kondensor seperti pada Gambar 2.4. Sebuah *Feedwater Heater* pada dasarnya adalah sebuah ruang pencampuran uap ekstraksi dari turbin bercampur dengan air yang keluar dari pompa. Idealnya campuran pemanas sebagai cairan jenuh pada tekanan pemanas (Cengel & Boles , 2002).



Gambar 2.4 Siklus Dengan Superheat dan Re-Heat (Cengel & Boles, 2002)

## 2.2 Teori Pembakaran

Secara teoritis, pembakaran dapat diartikan sebagai reaksi kimia berantai antara oksigen dengan elemen yang mudah terbakar (*combustible element*). Untuk mendapatkan manfaat yang maksimal dari proses pembakaran, dibutuhkan proses pembakaran yang sempurna.

Pada Proses Pembakaran, diperlukan bahan bakar udara (sebagai sumber oksigen). Pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara oksigen dan bahan yang dapat terbakar, disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Dalam suatu pembakaran bahan bakar akan menjadi reaksi kimia antara komponen bahan bakar dengan oksigen, dimana hasil reaksi ini akan membentuk gas CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan gas – gas lain (Meylisa Eka, 2015). Syarat-syarat agar dapat terjadi pembakaran sempurna yaitu:

1. Kuantitas udara (oksigen) yang disupply ke bahan bakar cukup.
2. Oksigen dan bahan bakar benar-benar tercampur.

3. Campuran bahan bakar-udara terjaga diatas temperatur pengapiannya.
4. Volume *furnace* cukup luas sehingga memberikan waktu yang cukup bagi campuran bahan bakar-udara untuk terbakar sempurna

Bahan bakar yang bermacam-macam, memiliki spesifikasi campuran udara yang berbeda pula. Pada kondisi ideal, proses pembakaran dapat terjadi apabila jumlah bahan bakar dan udara pada proporsi tertentu, yang berdasarkan prinsip kimia (stoikiometrik). Namun kenyataan yang terjadi adalah, campuran bahan bakar dengan udara di dalam *furnace* (ruang bakar) sangat mustahil untuk mencapai kondisi sempurna. Untuk itulah dibutuhkan adanya *excess air* yang disuplai ke dalam proses pembakaran untuk memastikan terjadinya pembakaran yang sempurna. Jumlah dari *excess air* tergantung dari bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran.

#### 2.2.1 Pembakaran Batubara

Batubara merupakan bahan baku utama pembangkit listrik tenaga uap. Batubara menyimpan energi di dalamnya secara kimia melalui ikatan-ikatan kimia antara karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur. Batubara tidak memiliki struktur kimia yang baku, karena ia merupakan campuran dari beberapa ikatan hidrokarbon yang kompleks. Ikatan-ikatan hidrokarbon inilah yang menyimpan energi, yang apabila terputus melalui proses pembakaran, akan menghasilkan energi panas yang untuk selanjutnya dipergunakan panasnya di boiler untuk memanaskan air.

Kandungan kimia yang terjadi saat batubara dibakar ialah  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ .

##### 1. Sulfur Dioksida ( $\text{SO}_2$ )

Gas dari pembakaran batu bara terutama Sulfur Oksida ( $\text{SO}_2$ ), Dengan kuantitas sulfur trioksida ( $\text{SO}_3$ ) dan sulfat gas yang jauh lebih rendah. Senyawa ini terbentuk sebagai belerang organik dan piritik dalam batubara yang teroksidasi selama proses pembakaran. Rata-rata, sekitar 95 persen belerang terdapat dalam batubara bituminous akan menghasilkan gas  $\text{SO}_x$ . Sifat alkalin yang lebih alkali pada beberapa batubara subbituminous menyebabkan beberapa belerang bereaksi

di tungku untuk membentuk berbagai garam sulfat yang disimpan di dalam boiler atau di flyash (*U. S. Environmental Protection Agency, 1993*).

## 2. Nitrogen Dioksida (NO<sub>2</sub>)

Emisi NO<sub>x</sub> dari pembakaran batu bara terutama adalah nitrat oksida (NO), hanya beberapa persen dari volume nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>). Pembentukan NO<sub>x</sub> dihasilkan dari fiksasi termal nitrogen atmosfer pada pembakaran dan dari oksidasi nitrogen yang terikat pada batubara. Pengukuran eksperimental pembentukan termal NO<sub>x</sub> telah menunjukkan bahwa konsentrasi NO<sub>x</sub> secara eksponensial bergantung pada suhu dan sebanding dengan konsentrasi nitrogen pada nyala api, konsentrasi oksigen pada nyala api, dan waktu tinggal gas. Nitrogen ke NO<sub>x</sub> Biasanya, hanya 20 sampai 60 persen nitrogen bahan bakar yang diubah menjadi NO<sub>x</sub>. Batubara bituminous dan subbituminous biasanya mengandung 0,5 sampai 2 persen berat nitrogen. Nitrogen bahan bakar dapat mencapai 80 persen total NO<sub>x</sub> dari pembakaran batu bara.

## 2.3 Boiler

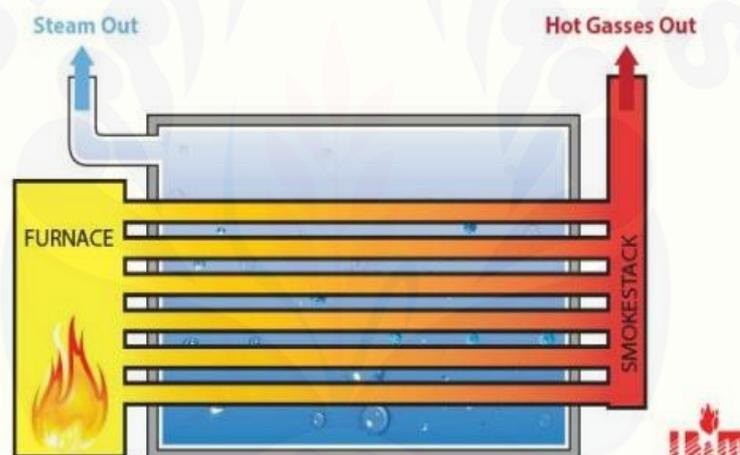
*Boiler* (Ketel Uap ) adalah suatu bejana yang di dalam nya berisi air atau fluida lain untuk di panaskan. Energi panas dari fluida tersebut selanjutnya di gunakan untuk berbagai macam keperluan, seperti untuk turbin ua, pemanas ruangan, mesin uap dan lain sebagainya. Uap pada tekanan tertentu digunakan untuk mengalirkan panas ke suatu proses. Jika air dididihkan sampai menjadi uap, volumenya meningkat menjadi 1.600 kali, dan menghasilkan tenaga yang menyerupai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga boiler merupakan peralatan yang harus dikelola dengan sangat baik. Boiler memiliki fungsi untuk mengkonversi energi kimia yang tersimpan di dalam bahan bakar menjadi energi panas yang terhantar ke fluida kerja (ASME PTC 4.1).

### 2.3.1 Klasifikasi Boiler

Boiler/ ketel uap pada dasarnya terdiri dari drum yang tertutup pada ujung pangkalnya dan dalam perkembangannya dilengkapi dengan pipa api maupun pipa air. Menurut bentuk, konstruksi dan kegunaannya ketel uap mempunyai bermacam jenis dan dapat digolongkan sebagai berikut:

a. Boiler pipa api (*fire tube boiler*)

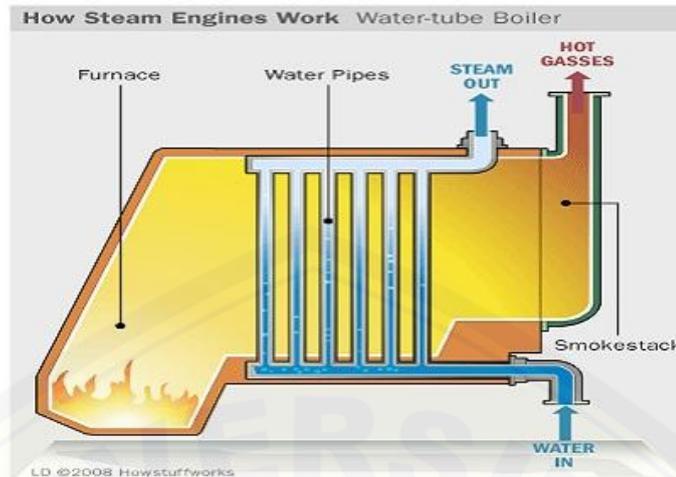
Boiler pipa api merupakan pengembangan dari ketel lorong api dengan menambah pemasangan pipa – pipa api, dimana gas panas hasil pembakaran dari ruang bakar mengalir didalamnya, sehingga akan memanasi dan menguapkan air yang berada di sekeliling pipa – pipa api tersebut. Pipa - pipa api berada atau terendam didalam air yang akan diuapkan. Volume air kira – kira  $\frac{3}{4}$  dari tangki ketel. Jumlah pass dari boiler tergantung dari jumlah laluan vertikal dari pembakaran diantara furnace dan pipa – pipa api. Laluan gas pembakaran pada furnace dihitung sebagai pass pertama boiler jenis ini banyak dipakai untuk industri pengolahan mulai skala kecil sampai skala menengah (Imam M & Aqli M, 2019) seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Boiler pipa api

b. Boiler pipa air (*water tube boiler*)

Pada water tube boiler, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Memiliki kontruksi yang hampir sama dengan jenis pipa api, jenis ini juga terdiri dari pipa dan barel, yang membedakan hanya sisi pipa yang diisi oleh air sedangkan sisi barrel merupakan tempat terjadinya pembakaran. Karakteristik pada jenis ini ialah menghasilkan jumlah steam yang relatif banyak seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Boiler pipa air

### 2.3.2 Teori efisiensi boiler

Efisiensi *boiler* adalah sebuah besaran yang menunjukkan hubungan antara *supply* energi masuk kedalam *boiler* dengan energi keluaran yang di hasilkan oleh *boiler* (ASME PTC 4.1). Namun demikian , efisiensi boiler dapat di definsikan ke dalam tiga cara yaitu :

#### 2.3.2.1 Efisiensi Pembakaran Boiler

Efisiensi Pembakaran Boiler secara umum menjelaskan kemampuan sebuah *burner* untuk membakar keseluruhan bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar (*furnace*) boiler. Efisiensi tipe ini dihitung dari jumlah bahan bakar yang tidak terbakar bersamaan dengan jumlah udara sisa pembakaran (*excess air*). Pembakaran boiler dapat dikatakan efisien apabila tidak ada bahan bakar yang tersisa di ujung keluaran ruang bakar boiler, begitu pula dengan jumlah udara sisa.

Untuk mendapatkan efisiensi pembakaran yang tinggi, *burner* dan ruang bakar boiler harus didesain seoptimum mungkin. Di sisi lain perbedaan penggunaan jenis bahan bakar juga mempengaruhi efisiensi pembakaran. Diketahui bahwa bahan bakar cair dan gas (seperti LNG dan HSD) menghasilkan efisiensi pembakaran yang lebih tinggi jika dibandingkan bahan bakar padat seperti batubara.

Menghitung efisiensi pembakaran *boiler* mengurangi jumlah total energi panas yang dilepas oleh pembakaran dengan energi panas yang lolos melewati *stack* (cerobong asap), dibagi dengan total energi panas.

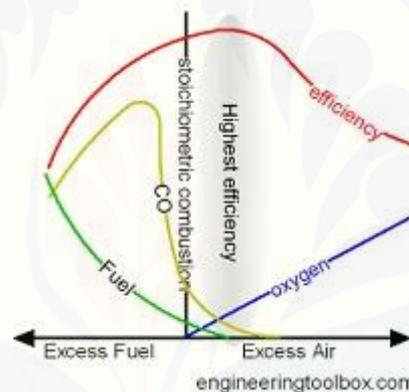
$$\eta_{combustion} = \frac{Q_{in} - Q_{losses}}{Q_{in}} \times 100\%$$

Dimana :

$\eta_{combustion}$  : Efisiensi pembakaran boiler (%)

$Q_{in}$  : Energi panas total hasil pembakaran (kalori; Joule)

$Q_{losses}$  : Energi panas lolos melewati cerobong asap (kalori; Joule)



Gambar 2.7 Grafik Efisiensi boiler (ASME.2008)

Pada ilustrasi grafik Gambar 2.7 bahwa semakin tinggi jumlah udara (oksigen) yang lolos melewati *stack*, maka akan semakin kecil jumlah bahan bakar termasuk karbon monoksida yang belum terbakar sempurna. Namun juga seperti yang telah kita bahas di atas, semakin tinggi jumlah *excess air* maka grafik efisiensi pembakaran kembali turun, tidak lain hal ini dikarenakan energi panas yang ikut lolos dengan udara sisa tersebut. Maka dapat dipastikan ada nilai paling optimum dari *excess air* sehingga didapatkan efisiensi pembakaran paling baik. Sebagai gambaran saja, nilai *excess air* optimum untuk pembakaran gas alam adalah 5 hingga 10%, bahan bakar cair di angka 5 hingga 20%, dan 15 hingga 60% untuk pembakaran batubara.

### 2.3.2.2 Efisiensi Termal Boiler

Efisiensi Termal Boiler menunjukkan fungsinya sebagai *heat exchanger*. Perhitungan efisiensi ini akan menunjukkan seefektif apa perpindahan energi panas dari proses pembakaran bahan bakar ke air. Namun perhitungan efisiensi ini tidak terlalu akurat, karena ia tidak memperhitungkan kerugian panas radiasi maupun konveksi yang tidak terserap oleh air. Selain itu, perhitungan efisiensi termal boiler tidak bisa digunakan untuk analisa ekonomis, sebab perhitungan ini tidak memperhatikan secara teliti jumlah bahan bakar yang dikonsumsi. Atas dasar inilah kita tidak akan membahas lebih dalam mengenai perhitungan efisiensi termal boiler.

### 2.3.2.3 Efisiensi Bahan Bakar-Uap Air (Fuel-to-Steam)

Efisiensi Bahan Bakar-Uap Air (*Fuel-to-Steam*) Selain memperhatikan efektivitas boiler sebagai *heat exchanger* (efisiensi termal), perhitungan efisiensi bahan bakar boiler juga memperhatikan adanya *losses* (kerugian) akibat adanya perpindahan panas radiasi dan konveksi. Efisiensi bahan bakar boiler memperhatikan sangat teliti jumlah konsumsi bahan bakar yang digunakan, sehingga sangat tepat digunakan sebagai bahan analisa ekonomis boiler. Pada perhitungan ini ada dua macam metode sebagai berikut:

#### a. Metode Langsung

Dikenal ada dua metode untuk menghitung efisiensi bahan bakar pada boiler, yaitu metode langsung dan metode tak langsung. Metode langsung, atau dikenal juga sebagai metode input-output, dilakukan dengan jalan membandingkan secara langsung energi panas yang diserap oleh air sehingga berubah fase menjadi uap air (energi output), dengan energi panas yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di dalam ruang bakar boiler (energi input). Rumusan sederhana dari perhitungan metode langsung adalah sebagai berikut:

$$\eta_{fuel} = \frac{Q_{steam}}{Q_{fuel}} \times 100\%$$

$$= \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times GCH} \times 100\%$$

Dimana :

$\eta_{fuel}$  : Efisiensi bahan bakar %

$Q_{steam}$  : Energi panas total yang diserap uap air (kalori; Joule)

$Q$  : Debit uap air keluar boiler (kg/jam)

$h_g$  : Entalpi uap keluar boiler (kcal/kg)

$h_f$  : Entalpi air keluar boiler (kcal/kg)

$q$  : Debit kebutuhan bahan bakar (kg/jam)

$Q_{fuel}$  : Energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar (kalori; Joule)

$GCV$  : *Gross Calorific Value* atau nilai kalor spesifik bahan bakar (kcal/kg)

Pada metode langsung, ada beberapa parameter yang harus diukur secara presisi agar didapatkan hasil perhitungan yang akurat. Parameter-parameter tersebut antara lain adalah:

1. Debit air (*feedwater*) masuk ke boiler
2. Debit air *desuperheater*
3. Keseluruhan debit aliran sekunder seperti *boiler blowdown*, *auxiliary steam*, dan lain sebagainya.
4. Tekanan dan temperatur keseluruhan aliran fluida kerja seperti air masuk, uap superheater keluar, uap reheater masuk dan keluar, *auxiliary steam*, dan lain-lain.
5. Debit kebutuhan bahan bakar
6. Nilai kalor (*heating value*) bahan bakar
7. Energi masuk lainnya

b. Metode Tidak Langsung

Perhitungan efisiensi boiler tak-langsung adalah perhitungan yang tidak langsung melibatkan komponen utama rumusan efisiensi boiler yakni energi output dan input, melainkan dengan jalan menghitung kerugian-kerugian (*losses*) yang ada. Untuk menghitung efisiensi ketel dengan metode ini, terlebih dahulu harus dicari unsur input yang masuk keketel serta kerugian (*Losses*) yang terjadi didalam ketel.

Seperti diketahui bahwa nilai kalor bahan bakar ada 2 macam yaitu nilai kalor atas (HHV) dan nilai kalor bawah (LHV). Unsur input ke ketel masih tetap berupa energi panas yang diperoleh dari Transformasi energi kimia yang dikandung didalam bahan bakar. Jadi input ke ketel adalah Nilai kalor bahan bakar.

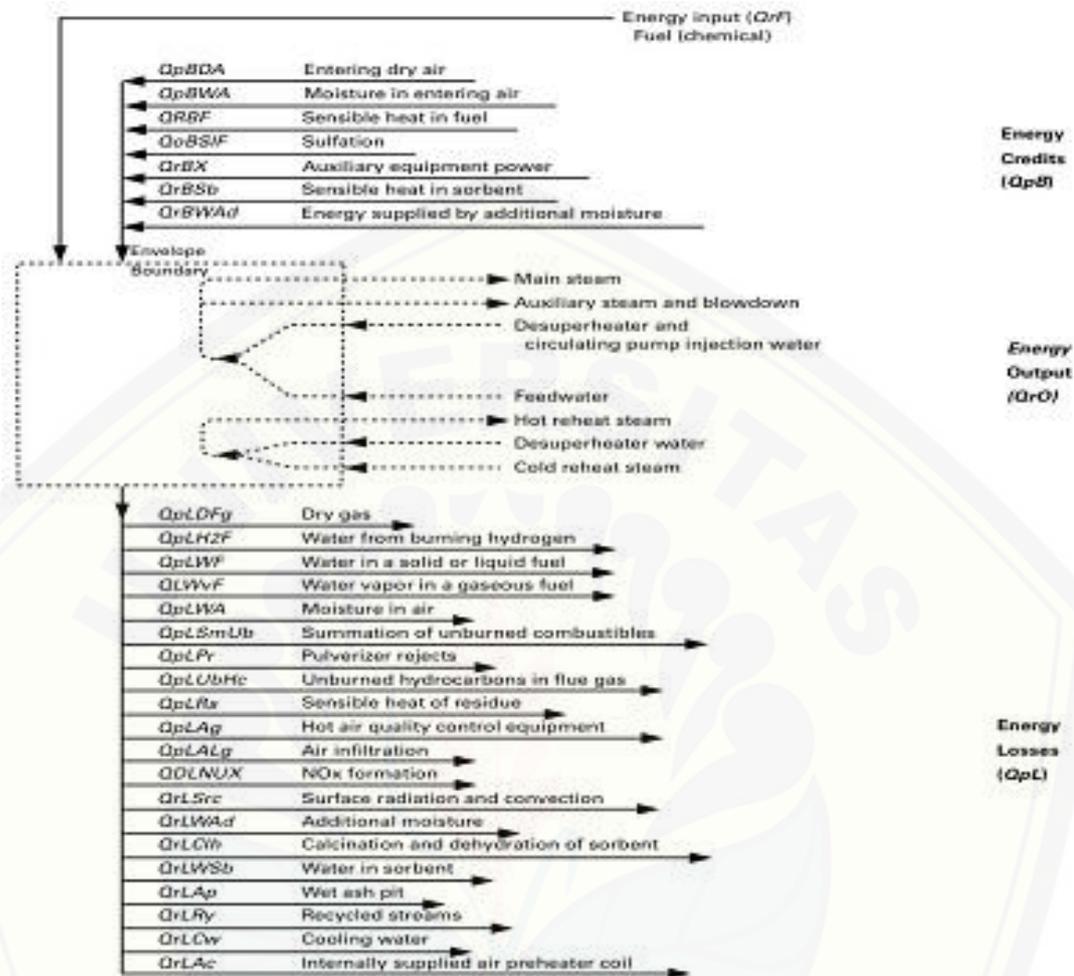
$$\eta_{fuel} = \frac{output}{input} \times 100\%$$

Dan jika :

$$Input + Credit = losses + output$$

Maka :

$$\begin{aligned}\eta_{fuel} &= \left[ \frac{input - losses + credit}{input} \right] \times 100\% \\ &= \left[ 1 - \frac{(losses - credit)}{input} \right] \times 100\%\end{aligned}$$



Gambar 2.8 Ilustrasi Input – output – Losses (ASME 4.1 2008)

#### 2.4 Air Preheater (APH)

Sepanjang sejarah boiler telah ada banyak kemajuan dalam rangka untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik dan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah. Namun, beberapa penemuan telah sukses dalam menghemat bahan bakar Instalasi pertama dalam boiler komersial disimpan sebanyak 25% dari konsumsi bahan bakar. Dalam boiler utilitas modern Ljungstrom Air Preheater menyediakan sampai 20% dari perpindahan panas total dalam proses boiler, tetapi Ljungstrom Air Preheater hanya mewakili 2% dari investasi.

The Ljungstrom Air Preheater adalah *regenerative Heat Exchanger*, dan terdiri dari rotor yang perlahan berputar diisi dengan piring perpindahan panas.

Saluran gas panas dan dingin diatur sedemikian rupa sehingga setengah dari rotor adalah saluran gas buang dan setengah lainnya adalah saluran udara utama yang berfungsi memasok udara pembakaran ke tungku pembakaran (boiler). Panas gas buang memanaskan bagian dari rotor di salurannya, dan sebagai rotor berputar, bagian panas bergerak ke jalur udara pembakaran dan pemanasan awal itu. Rotor dibagi menjadi beberapa bagian yang melewati *seals* untuk mencegah pencampuran antara gas buang dan udara pembakaran. Ljungstrom Air Preheater digunakan terutama di boiler untuk pemanasan awal udara pembakaran. Beberapa tahun terakhir, penggunaannya telah diperluas untuk pemulihan energi dalam penghapusan oksida belerang dan nitrogen dari gas buang yang terkadang menggunakan katalis dilapisi pelat elemen pemanas. (SMR, 1995).

Pada intinya, *Air Preheater* adalah sebuah alat penukar panas yang didesain untuk memanaskan udara sebelum udara tersebut digunakan untuk berbagai proses, untuk pembahasan kali ini udara tersebut digunakan guna membantu pembakaran pada boiler. *Air Preheater* juga dapat digunakan untuk penukar panas gas, dimana gas hasil dari pembakaran tersebut digunakan untuk memanaskan fluida lainnya (Kuppan, 2013).



Gambar 2.9 *Air Preheater* (Kuppan, 2013)

*Air Preheater* (Gambar 2.9) merupakan komponen pendukung dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memiliki fungsi untuk pemanasan awal

udara untuk membantu memaksimalkan pembakaran dalam boiler. Pemanasan ini dilakukan sampai ketinggian temperatur tertentu sehingga dapat menghasilkan pembakaran yang maksimal dalam boiler. Fluida panas yang digunakan untuk menjadi media pemanas dari udara *primary air fan* dan *secondary air fan* adalah gas buang (*flue gas*) hasil pembakaran pada boiler. Menurut Ahmed S.D dan Ir Kadarisman (2012) pemanfaatan gas buang ini memiliki keuntungan memperkecil biaya pada proses pemanasan yang dipakai juga dapat menurunkan temperatur gas buang sehingga memperkecil pencemaran thermal udara lingkungan.

#### 2.4.1 Kecepatan Rotasi Rotor APH

Rotary air preheater pada pembangkit listrik mempunyai sebuah rotor berdiameter 10 meter dan kecepatan rotasi rotor berkisar pada range 0,5 sampai 3 rpm. Sementara untuk rotary air preheater dengan diameter 0,25 sampai 3 meter kecepatan rotasi rotornya dapat mencapai hingga 10 rpm. Sedangkan rotary air preheater dengan diameter 0,6 meter, kecepatan rotasi rotor maksimal dapat mencapai 18 rpm (Ramesh & Dusan, 2003).

Untuk mengetahui pengaruh besarnya kecepatan rotasi rotor terhadap performansi rotary air preheater digunakan metode e-NTU. Variasi dilakukan pada kecepatan rotasi 6 RPM, 9 RPM, 12 RPM, 15 RPM, 18 RPM. Dari lima variasi yang dilakukan menunjukkan bahwa kecepatan rotasi rotor mempengaruhi besarnya efektivitas. Kecepatan tersebut juga mempengaruhi besarnya NTU sehingga efektivitasnya ikut berubah. (Dewo S & Teguh H. A., 2015)

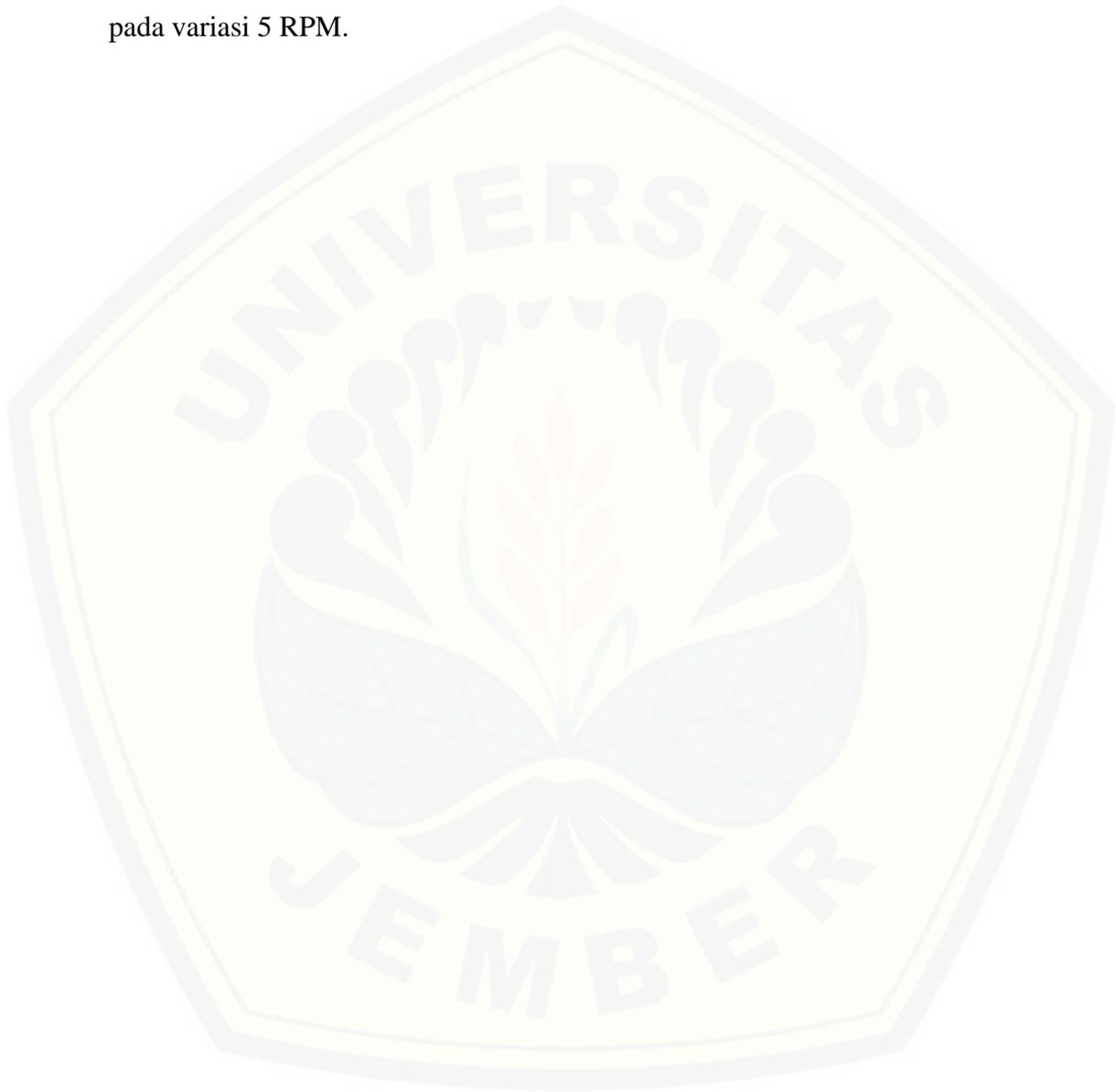
#### 2.4.2 Keunggulan Air Preheater (APH)

Beberapa keunggulan dari Air Preheater (APH) ialah sebagai berikut :

1. Memiliki biaya instalasi minimal,
2. Mampu beroperasi dalam waktu lama,
3. Memiliki efektivitas panas yang tinggi,
4. Memiliki 3 hingga 4 saluran fluida.

## 2.5 Hipotesa

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian dapat dikemukakan hipotesis penelitian efektivitas akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan putar rotor pada *rotary air preheater* dengan efektivitas optimumnya pada variasi 5 RPM.



## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1 Sumber Data

Sumber data diambil di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Banten.

### 3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian

#### 3.2.1 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Banten.

#### 3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama kurang lebih 15 hari yaitu pada tanggal 25 April – 10 Mei 2016

### 3.3 Visualisasi Data

Pada tahap pertama pada penelitian ini untuk mencari kerja optimal dari *Air Preheater* dengan memvariasikan putaran rotornya. Sumber data teknis pembangkit listrik tenaga uap diambil di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Banten.

Pada tahap kedua dilakukan perhitungan manual untuk mencari nilai kapasitas kalor matriks ( $C_r$ ), untuk mencari nilai kapasitas kalor matrik digunakan persamaan sebagai berikut :

$$C_r = M_w C_w \frac{N}{60} \quad (1)$$

$$M_w = A_r L \rho_r \quad (2)$$

$$\beta = \frac{A_r}{V_m} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{d_h \beta}{4} \quad (4)$$

Dimana :  $A_r$  : luas area rotor ( $m^2$ )

$C_r$  : kapasitas kalor matriks (W/K)

$c_w$  : kalor spesifik matriks (J/kg.K)

$d_h$  : diameter hidrolis (m)

$L$  : kedalaman matriks (m)

$M_w$  : massa matriks (kg)

$N$  : kecepatan putar rotor (m/s)

$V_m$  : volume matriks ( $m^3$ )

$\beta$  : kerapatan matriks ( $m^3$ )

$\sigma$  : rasio *free frontal area* terhadap *frontal area*

Langkah berikutnya adalah mencari perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ ) dari aliran fluida.

$$d_h = \frac{4 \cdot ab}{a + \sqrt{a^2 + 4b^2}} \quad (5)$$

Maka,

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d_h} \quad (6)$$

Dimana :  $h$  : koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2.K$ )

$Nu$  : bilangan Nusselt

$k$  : konduktivitas termal (W/m.K)

Langkah berikutnya adalah mencari perhitungan *Number of Transfer Unit* (NTU), efektivitas *crossflow* dan efektivitas *rotary air preheater*.

$$C = \dot{m} \cdot c_p \quad (7)$$

$$Cr^* = \frac{C_r}{C_{min}} \quad (8)$$

$$NTU = \frac{1}{C_{min}} \left[ \frac{1}{\frac{1}{(hA)_h} + \frac{1}{(hA)_c}} \right] \quad (9)$$

Maka,

$$\varepsilon_0 = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU(1 - C^*)]} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{cf} \left[ 1 - \frac{1}{9(Cr^*)^{1,93}} \right] \quad (11)$$

Dimana :  $C$  : kapasitas perpindahan panas (W/K)

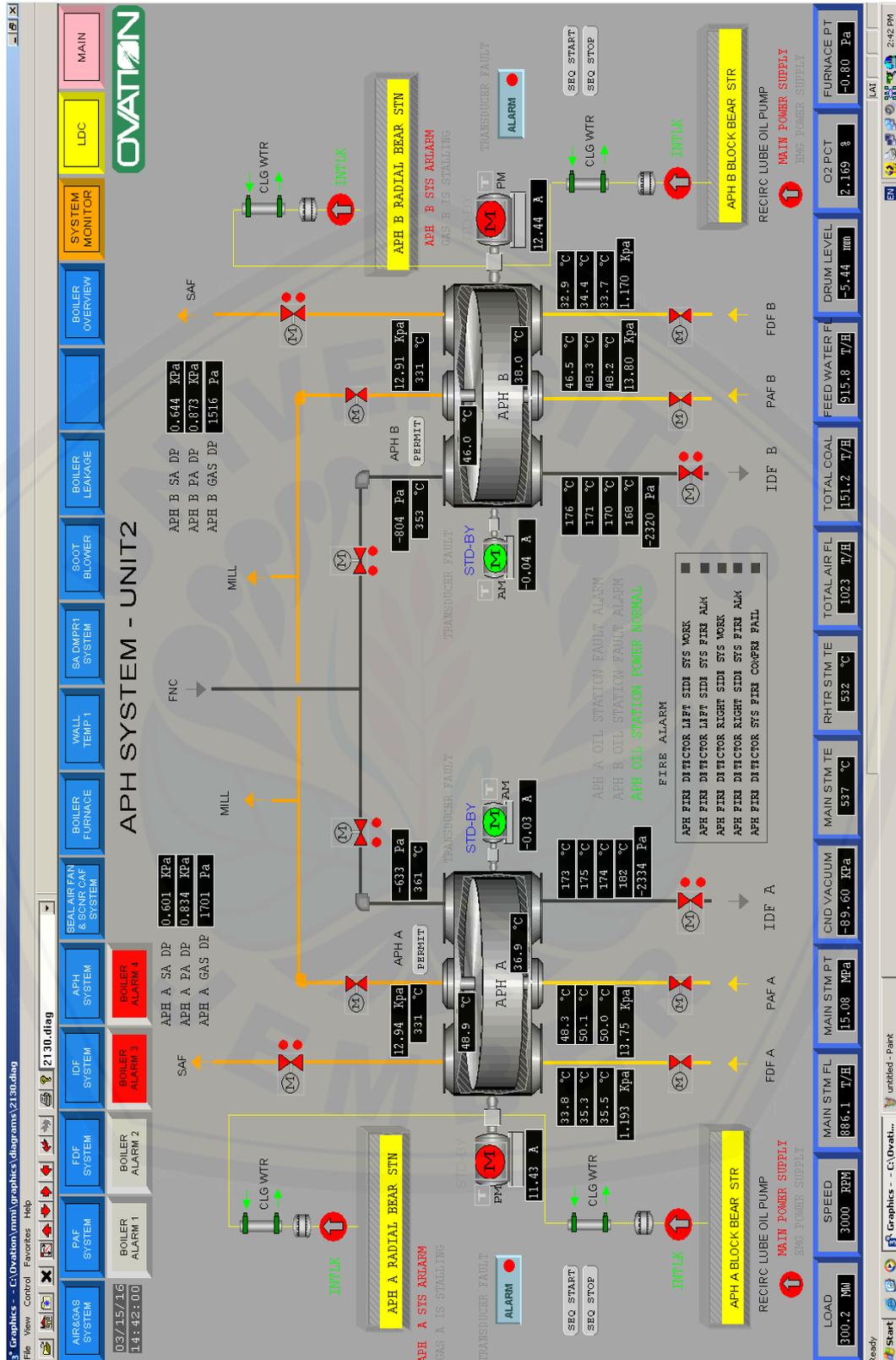
$C_{min}$  : kapasitas perpindahan panas minimal (W/K)

$c_p$  : kalor spesifik (W/K)

$\varepsilon_0$  : efektivitas *crossflow*

$\varepsilon$  : efektivitas *rotary air preheater*





Gambar 3.2 Air Preheater System Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Banten.

Pada tahap yang ketiga yaitu setelah dilakukan perhitungan secara manual, kemudian memvariasikan dengan 3 variasi. Pada *air preheater* (APH) yang digunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Banten digunakan variasi sebagai berikut :

Tabel 3.1 Variasi Rotasi Rotor *Air Preheater* (APH)

Variasi	Kondisi
Variasi 1	<i>Air preheater</i> (APH) dengan putaran rotor 2 RPM
Variasi 2	<i>Air preheater</i> (APH) dengan putaran rotor 3,2 RPM
Variasi 3	<i>Air preheater</i> (APH) dengan putaran rotor 5 RPM

Dari variasi ini diharapkan diketahui putaran rotor *air preheater* yang optimal.

### 3.4 Variabel Penelitian

Dalam Penelitian ini pertama-tama ditetapkan dua jenis variabel. Hal ini dilakukan untuk memperoleh informasi atau data-data dalam proses penelitian. Variabel dalam penelitian ini yaitu :

#### 3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian. Variabel bebas dalam penelitian ini yaitu putaran rotor *Air preheater* (APH) 2 RPM, 3.2 RPM, dan 5 RPM.

#### 3.4.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan sepenuhnya oleh peneliti, tetapi nilai dari variabel terikat dipengaruhi oleh variabel bebas. Penelitian ini mempunyai variabel terikat berupa temperatur gas buang *Air Preheater* tipe *Rotary Air Preheater*, kandungan emisi pada gas buang *Air Preheater* tipe *Rotary Air Preheater* berdasarkan data yang di peroleh dari memvariasikan RPM pada *Air Preheater* tipe *Rotary Air Preheater*.

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Pengambilan Data

- 1) Persiapan pengambilan data adalah mempersiapkan tabel-tabel untuk mencatat data-data yang diperoleh dari *Rotary Air Preheater*.
- 2) Mengambil data *flowsheet* dari sistem *air preheater* (APH) dari *Screenshot software ovation* Indonesia Power.
- 3) Mencatat Temperatur masuk *flue gas*, *Primary Air* dan *Secondary Air* beserta temperatur keluar pada sistem *Air Preheater* (APH)
- 4) Mencatat Laju alir dari *flue gas* dan juga laju alir dari *primary air* dan *secondary air* pada sistem *air preheater* (APH).
- 5) Setelah pengambilan data selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah mengevaluasi data yang telah didapatkan. Evaluasi pada tahap ini dilakukan bertujuan untuk memeriksa kelengkapan data yang didapatkan.

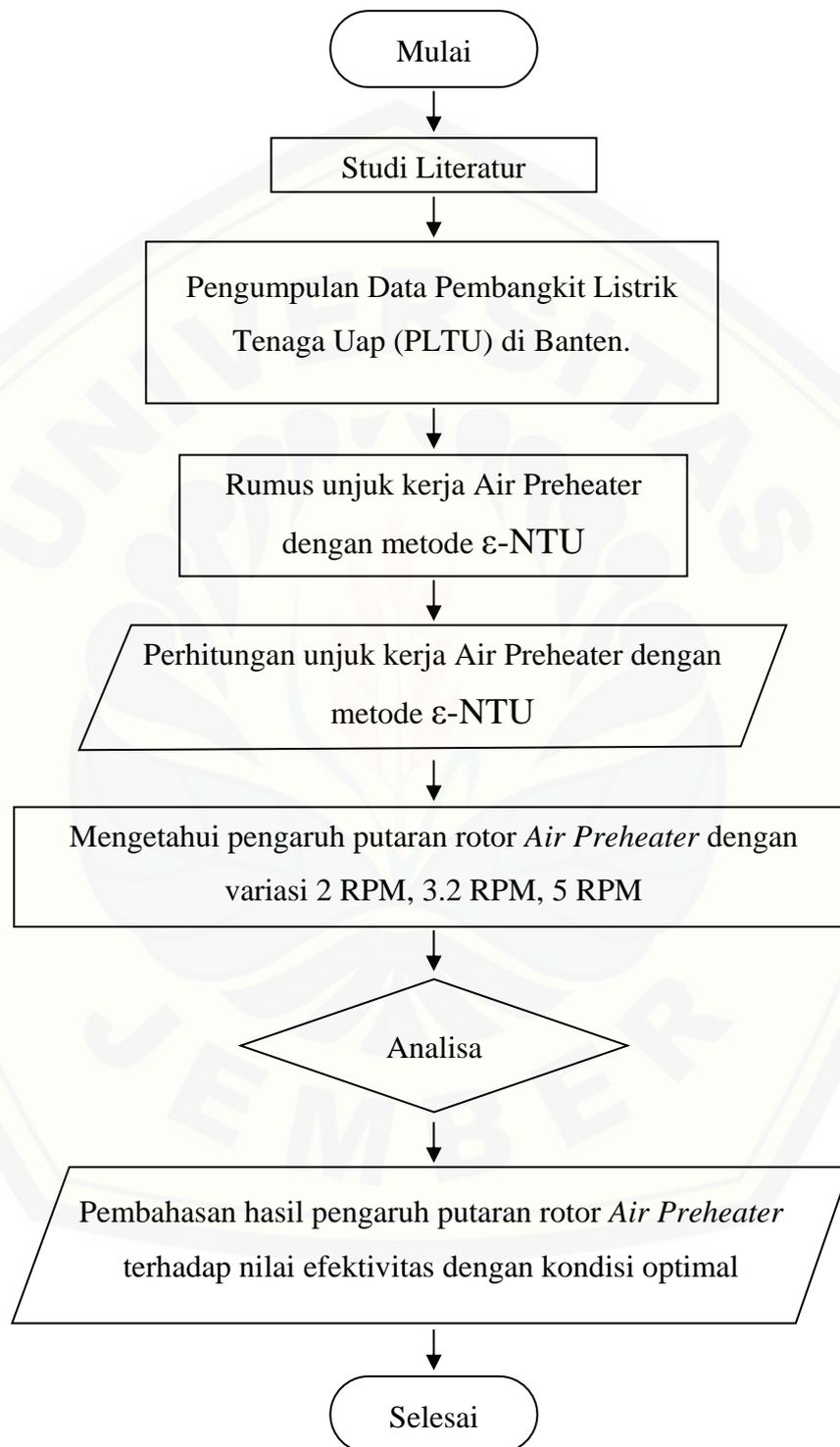
#### 3.5.2 Tahap Pengolahan Data

Penelitian ini dilakukan selama kurang lebih 15 hari yaitu pada tanggal 25 April – 10 Mei 2016. Namun yang diambil terpilih yaitu :

- 16 September 2015
- 21 Oktober 2015
- 16 November 2015
- 15 Maret 2016
- 23 Mei 2016

Selanjutnya data yang telah diperoleh akan dirata-rata dan data yang berupa temperatur baik itu temperatur masuk ( $T_{in}$ ) maupun temperatur keluar ( $T_{out}$ ) dan laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) dimasukkan kedalam problem tabel sehingga akan diperoleh kapasitas perpindahan panas. Untuk mempermudah dalam melakukan analisa, maka pada penelitian ini berlaku hukum kontinuitas dan untuk melengkapi data temperatur maka digunakan rata-rata aritmatiknya.

### 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram Alir penelitian

## BAB 5 PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil penelitian ini menunjukkan adanya pengaruh putaran rotor *air preheater* terhadap efektivitasnya. Peningkatan kecepatan rotasi mempengaruhi peningkatan pada efektivitas. Dimana peningkatan kecepatan rotasi dapat mempengaruhi peningkatan pada efektivitas dikarenakan setiap peningkatan kecepatan rotasi juga mempengaruhi meningkatnya nilai kapasitas kalor pada dinding matriks ( $Cr$ ) sehingga perbandingan antara nilai kapasitas kalor pada dinding matriks terhadap kapasitas perpindahan panas minimal ( $Cr^*$ ) ikut meningkat juga akibat peningkatan kecepatan rotasi rotor.

Dari 3 variasi yang terdiri dari 2 RPM, 3,2 RPM dan 5 RPM menunjukkan semua variasi mencapai dan melibahi nilai efektivitasnya. Sehingga dari ketiga variasi tersebut efektivitasnya mencapai optimal. Nilai tertinggi diperoleh oleh variasi 5 RPM dengan nilai  $Cr = 3,36$  W/K,  $Cr^* = 3,69$ , dan nilai efektivitasnya 1,193. Sedangkan nilai terendah yang diperoleh oleh variasi 2 RPM dengan nilai  $Cr = 1,34$  W/K,  $Cr^* = 1,47$ , dan nilai efektivitasnya 1,140.

Hal tersebut dapat disebabkan oleh karena dimensi dan desain matriks yang terlalu berlebihan atau besar sehingga nilai perhitungan berdasarkan desain dan dimensinya menghasilkan nilai yang lebih tinggi dari hasil yang diharapkan dari desain tersebut. Atau hal tersebut juga bisa dikarenakan kecepatan rotasi rotor dari *air preheater* terlalu besar dari konsumsi seharusnya dari yang dibutuhkan.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan oleh penulis pada penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan analisa dimensi dan desain dari *air preheater* untuk mendapatkan nilai efektivitas yang cukup
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menganalisa variasi dari perbandingan nilai kapasitas perpindahan panas minimal terhadap kapasitas perpindahan panas maksimal ( $C^*$ ) terhadap efektivitasnya.

3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan memvariasikan nilai NTU.
4. Perlu adanya penelitian nilai kecepatan rotasi rotor (RPM) dari rentang terendah sampai tertinggi
5. Perlu dilakuakn penelitian lebih lanjut dengan pengambilan pada pembangkit di tempat lain.



## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed S.D dan Ir Kadarisman. 2012. *Pengaruh Penambahan Regenerator Pada Sistem Turbin Gas Siklus Terbuka Sederhana (Studi Kasus PT. Indonesia Power UBP Pamaran Singaraja Bali)*. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- ASME, 1999. *Steam Generating Unit*. American Society of Mechanical Engineers (ASME), ASME PTC 4.1-1964. New York: ASME.
- ASME, 2008. *Fired Steam Generators*. American Society of Mechanical Engineers (ASME), ASME PTC 4-2008. New York: ASME.
- Cengel, Yunus, A., & Boles, Michael A. 2002. *Thermodynamics an Engineering Approach*. 2nd Edition. United States of America: McGraw-Hill, Inc.
- El-Wakil, M. M. 1992. *Instalasi Pembangkit Daya*. Cetakan Pertama. Jakarta: Erlangga.
- Environmental Protection Agency (EPA), 1993. *Guidance Specifying management measure for souces of nonpoint source in coastal waters*. Washington D.C : Environmental Protection Agency.
- Incropera F.P., dan D.P. Dewitt. 1996. *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. 4<sup>th</sup> edition: John Willey & Sons.
- Kuppan, T. 2013. *Heat exchanger Design Handbook, Second edition*. New York : CRC Press.
- Muzaki, I., dan A. Mursadin. 2019. Analisis Efisiensi Boiler Dengan Metode Input – Output di PT. JAPFA COMFEED INDONESIA Tbk. Unit Banjarmasin. *SJME Kinematika*. 4(1): 37-46.
- Nurhasan, M.V. 2015. Analisis Unjuk Kerja Regenerative Air Heater Sisi A PLTU Unit 3 PT. PJB UP Gresik Menggunakan Standard American Society of

- Mechanical Engineers (ASME) PTC 4.3. *Skripsi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.
- Sakarum, D., dan T. H. Ariwibowo. 2015. Evaluasi Pengaruh Kecepatan Rotasi Rotor Terhadap Efektivitas Rotary Air Preheater Menggunakan Metode e-NTU. *Jurnal Fisika Indonesia*. 19(55): 5-8.
- Sanaye, S., S. Jafari, dan H. Ghaebi. 2008. Optimum Operational Conditions of a Rotary Regenerator Using Genetic Algoritm. *Energy and Building*. (40): 1637-1642.
- Sangputri, M.E. 2015. Perhitungan Efisiensi Boiler PLTU Unit 20 PT. PJB UBJOM Rembang Pada Beban 315 MW Dengan Menggunakan Metode Langsung (Direct Method). *Jurnal Kerja Praktek*. 1(1): 1-6.
- Sasmita, A.M. 2015. Perhitungan Performa Alat Penukar Kalor Air Preheater A dan B tipe Rotary Lap Unit 1 PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar – Awar Tuban. *Skripsi*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Schmidt, F.W., dan M.E. Newell. 1967. Heat Transfer In Fully Developed Laminar Flow Through Rectangular and Isosceles Triangular Ducts. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 10:1121-1123.
- Shah, Ramesh K. dan Dusan P. Sekulic. 2003. *Fundamentals of Heat Exchanger*. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Svenka Mekanisters Riksförening (SMR), 1995. *The Ljungström Air Preheater 1920*. Swedia: American Society of Mechanical Engineers.
- United Nation Environment Programme (UNEP), 2008. *Annual Report*. Kenya: UNEP Division of Communications and Public Information.

## LAMPIRAN

### A.1 SUMBER DATA

#### Data A.1 Data APH

<b>Link Area ID:</b> Link.Area9			GC Version:	5.61.0.0
<b>Model ID:</b> HB			Date:	3/20/16
<b>Case ID:</b> REALD			Starting Time:	2:52:16 PM
<b>Location of Data Files:</b> C:\Documents and Settings\XP\Desktop\Dat.			Ending Time:	2:52:19 PM
			Status:	Converged
Location			Variables	
SAH[AIRHTR]	Method[0]		SAH Design Method	5
			<b>APHI</b>	
		C	GAH A inlet SAir Temp	361.2
		C	GAH A outlet SAir Temp	174
APHI[HEATX]	edColdSideOutletTemperat	C	GAHB inlet SAir Temp	314.785
		C	GAHB outlet SAir Press	132
		kPa	GAH A inlet SAir Press	101.945
		kPa	GAH A outlet SAir Press	102.105
		kPa	GAHB inlet SAir Press	102.025
		kPa	GAHB outlet SAir Press	102.147
APHI[HEATX]	ColdSidePLoss[0]		GAH SAir side pressure loss	0.007104277
		kg/hr	GAH A inlet SAir Flow	119160
		kg/hr	GAHB inlet SAir Flow	128160
SPLK1[SPLITR]	PrimaryPortDesiredFlow[0]		SA flow to boiler	637970
SPLK1[SPLITR]	TertiaryPortDesFrac[0]		SA leakage to Flue gas stream	0
			GAH A Material	AI
			GAHB Material	AI
APHI[HEATX]	MotorSideGAH[0]	v	GAH A Motor	380
		v	GAHB Motor	380

#### Data A.2 Data PAF

<b>Link Area ID:</b> Link.Area9			GC Version:	5.61.0.0
<b>Model ID:</b> HB			Date:	3/20/16
<b>Case ID:</b> REALD			Starting Time:	2:52:16 PM
<b>Location of Data Files:</b> C:\Documents and Settings\XP\Desktop\Dat.			Ending Time:	2:52:19 PM
			Status:	Converged
Location			Variables	
SPLK1[SPLITR]	TertiaryPortDesFrac[0]		SA leakage to Flue gas stream	0
			GAH A Material	AI
			GAHB Material	AI
APHI[HEATX]	MotorSideGAH[0]	v	GAH A Motor	380
		v	GAHB Motor	380
			<b>PAF outlet</b>	
		C	PAF A outlet Temp	331.214
		C	PAF B outlet Temp	341.495
PAFOUT[GAS]	Pres[1]	kPa	PAF Outlet Pressure	114.565
		C	PAF A inlet Temp	46.8
		C	PAF B inlet Temp	30.84
PAFOUT[GAS]	Temp[1]	kPa	PAF inlet Pressure	114.782
COLDPA[GAS]	Flow[1]	kg/hr	Cold PA flow	266040

Data A.3 Data Dimensi Air Preheater Ljungstorm

**Typical Data for today's sizes of Ljungström Air Preheater**

The sizes of boilers have since then increased and below typical data for a modern installation is:

Boiler Size (electrical output)	300 MW	500 MW
Fuel	Coal	Oil
Ljungström Air Preheater Size	2 x 28.5	2 x 30
Diameter (m)	9.9	11.4
Area (m <sup>2</sup> )	73	97
Height(m)	2.0	1.8
Rotation speed (rpm)	2	2
Gas flow (Nm <sup>3</sup> /h)	450 000	610 000
Air flow (Nm <sup>3</sup> /h)	430 000	575 000
Gas temperature in (C°)	375	375
Gas temperature out (C°)	120	140
Air temperature in (C°)	35	50
Air temperature out (C°)	325	324
Effectiveness, air side (%)	85.4	84.2
Effectiveness, gas side (%)	74.9	72.5

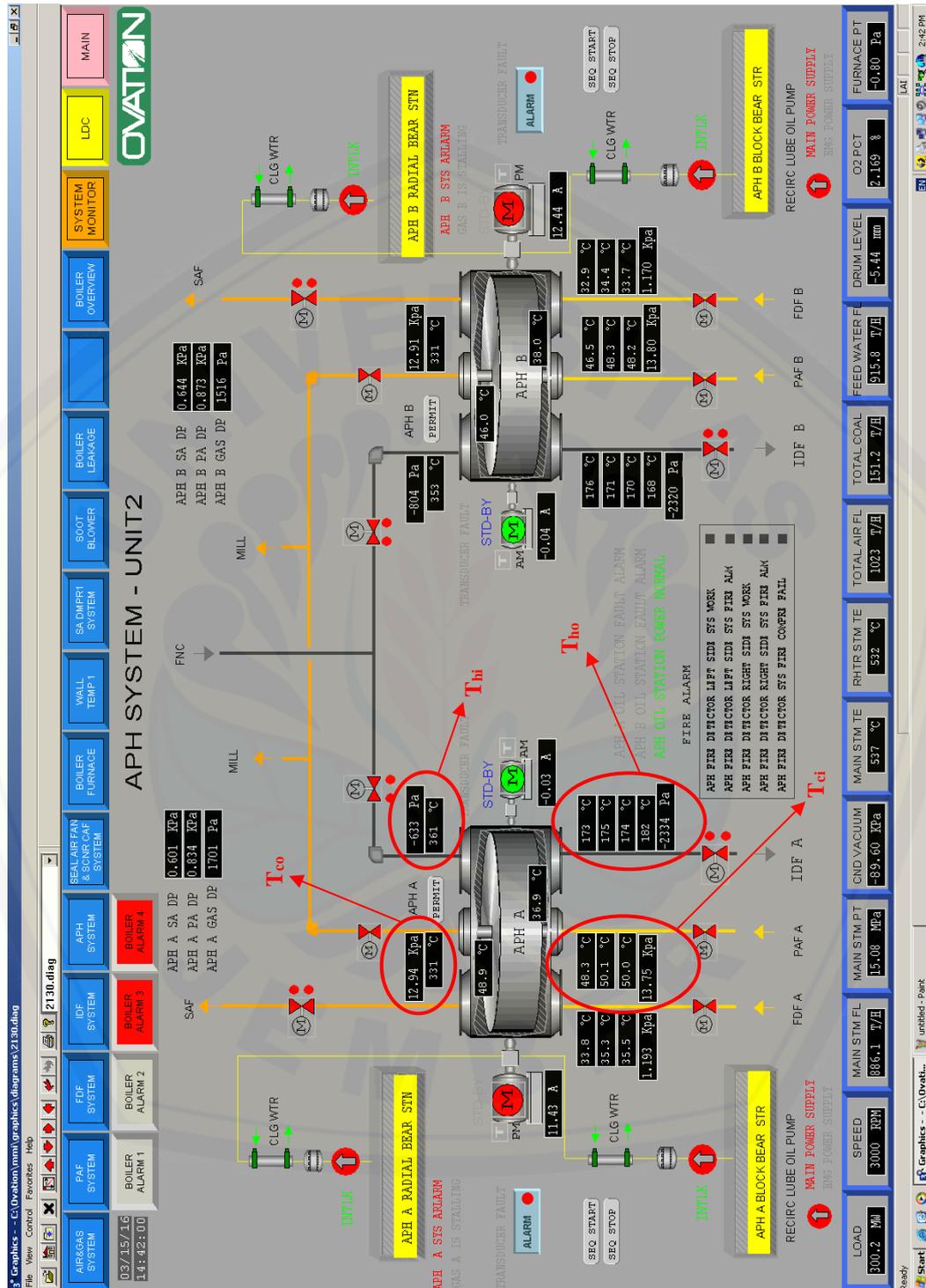
Data A.4 Data Nilai Kalor Spesifik dan koefisien perpindahan panas Alumunium

Metal	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat $c$ (J/kg · K)	Thermal Conductivity $k$ (W/m · K)	Metal	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat $c$ (J/kg · K)	Thermal Conductivity $k$ (W/m · K)
Aluminum				Steel			
Pure	2702	903	237	AISI 1010	7832	434	63.9
Duralumin <sup>a</sup>	2770	875	174	AISI 1042 (annealed)	7840	460	50
Coper				AISI 4130 (hardened)	7840	460	43
Pure	8933	385	401	AISI 302	8055	480	15.1
Bronze (90% Cu, 10% Al)	8800	420	52	AISI 304	7900	477	14.9
Brass (70% Cu, 30% Zn)	8530	380	111	AISI 316	8238	468	13.4
Iron				AISI 347	7978	480	14.2
Pure	7870	447	80.2	AISI 410	7770	460	25
4 C cast	7272	420	51	Titanium			
Inconel X-750	8510	439	11.7	Pure	4500	522	21.9
Nickel, pure	8900	444	91	Ti-6Al-4V	4420	610	5.8
Nichrome (80% Ni, 20% Cr)	8314	460	13	Ti-21Al-2Mn	4510	466	8.4
Hasteloy B	9240	381	12.2				

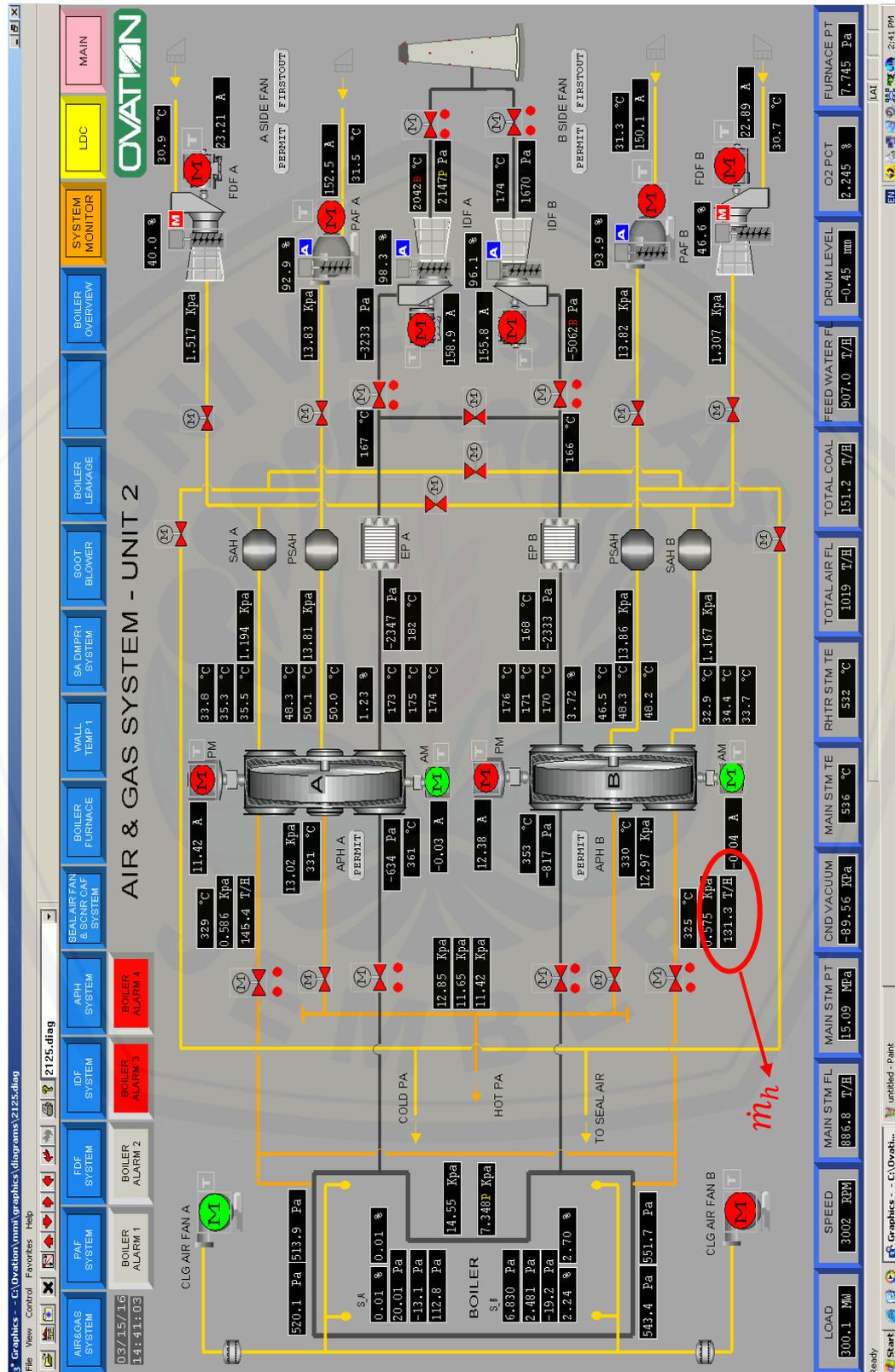
Data A.5 Data Koefisien Thermal dan Kalor Spesifik Air dan Steam

Gas	$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (W/m · K)	$c_p$ (J/kg · K)	$\mu \times 10^5$ (Pa · s)
Air	100	3.5562	0.00934	1032	71.1
	150	2.3364	0.0138	1012	103.4
	200	1.7458	0.0181	1007	132.5
	250	1.3947	0.0223	1006	159.6
	300	1.1614	0.0263	1007	184.6
	350	0.9950	0.0300	1009	208.2
	400	0.8711	0.0338	1014	230.1
	450	0.7740	0.0373	1021	250.7
	500	0.6964	0.0407	1030	270.1
	600	0.5804	0.0469	1051	305.8
	700	0.4975	0.0524	1075	338.8
	800	0.4354	0.0573	1099	369.8
	900	0.3868	0.0620	1121	398.1
1000	0.3482	0.0667	1141	424.2	
Ammonia	300	0.6894	0.0247	2158	101.5
	320	0.6448	0.0272	2170	109
	340	0.6059	0.0293	2192	116.5
	360	0.5716	0.0316	2221	124
	380	0.5410	0.0340	2254	131
	400	0.5136	0.0370	2287	138
	420	0.4888	0.0404	2322	145
	440	0.4664	0.0435	2357	152.5
	460	0.4460	0.0463	2393	159
	480	0.4273	0.0492	2430	166.5
	500	0.4101	0.0525	2467	173
Steam	380	0.5863	0.0246	2060	127.1
	400	0.5542	0.0261	2014	134.4
	450	0.4902	0.0299	1980	152.5
	500	0.4405	0.0339	1985	170.4
	550	0.4005	0.0379	1997	188.4
	600	0.3652	0.0422	2026	206.7
	650	0.3380	0.0464	2056	224.7
	700	0.3140	0.0505	2085	242.6
	750	0.2931	0.0549	2119	260.4
	800	0.2739	0.0592	2152	278.6
850	0.2579	0.0637	2186	296.9	

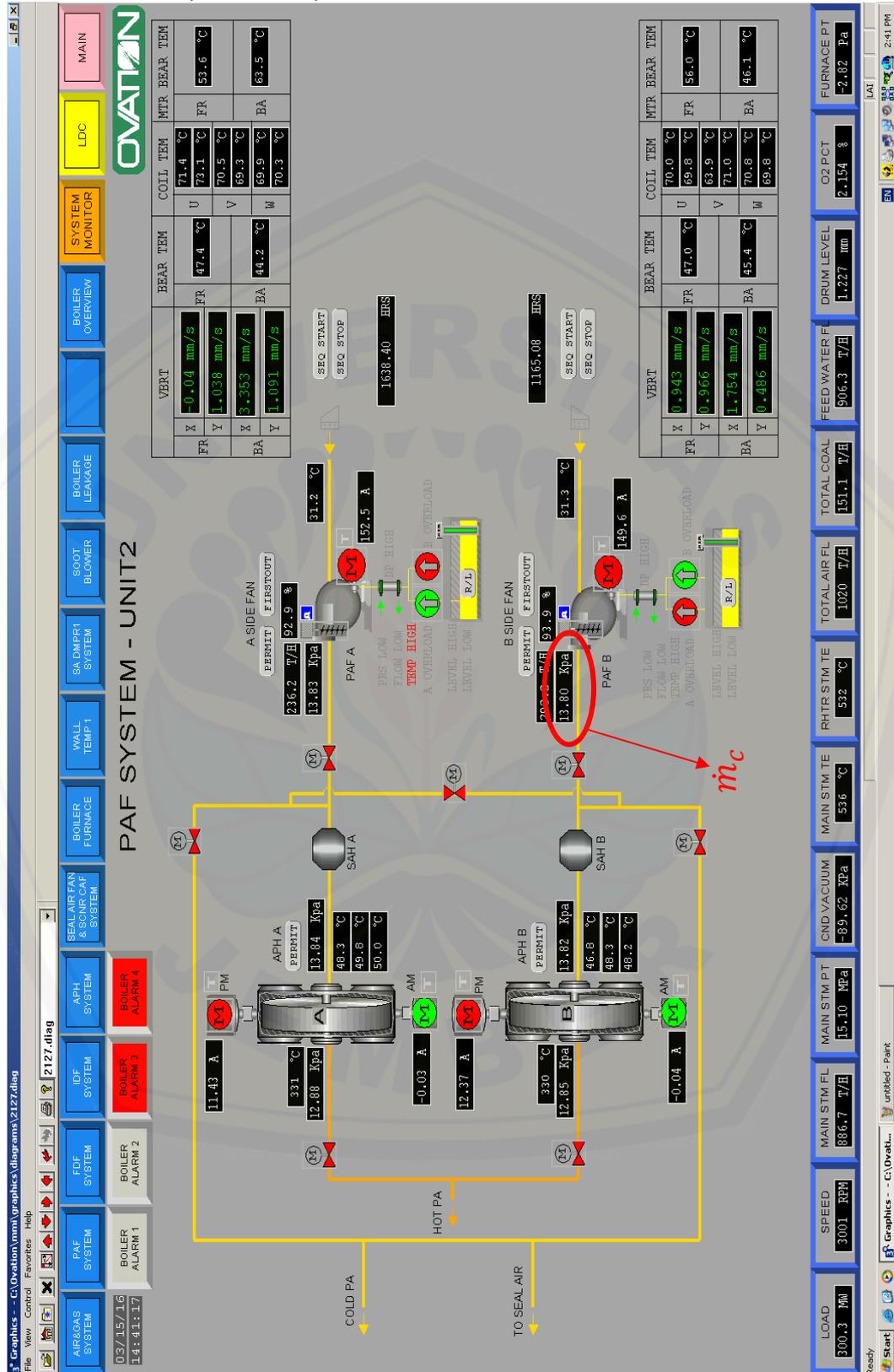
Data A.6 APH System



Data A.7 Data Air dan Gas System



Data A.8 Primary Air Fan System



**A.2 HASIL PERHITUNGAN**Data A.2.1 Perhitungan  $d_{hydrolic}$ 

$$\begin{aligned}
 d_{hydrolic} &= \frac{4 \cdot ab}{a + \sqrt{a^2 + 4b^2}} \\
 &= \frac{4 \cdot (14,78)(9,21)}{14,78 + \sqrt{(14,78)^2 + 4(9,21)^2}} \\
 &= \frac{544,49}{14,78 + 23,62} \\
 &= \frac{544,49}{38,4} \\
 &= 14,18 \text{ mm} = 0,01418 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Data A.2.2 Perhitungan Bilangan Prandtl

$$\begin{aligned}
 Pr &= \frac{\mu \cdot c_p}{k} \\
 Pr_h &= \frac{\mu \cdot c_p}{k} \\
 &= \frac{188,4 \cdot 10^{-6} \times 1997}{0,0379} \\
 &= 9,927 \\
 Pr_c &= \frac{\mu \cdot c_p}{k} \\
 &= \frac{250,7 \cdot 10^{-6} \times 1021}{0,0373} \\
 &= 6,862
 \end{aligned}$$

Data A.2.3 Perhitungan Kecepatan Fluida dan Bilangan Reynolds

$$\begin{aligned}
 v_h &= \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} \\
 &= \frac{33,1}{0,4005 \cdot 0,79} \\
 &= 104,75 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$v_c = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A}$$

$$= \frac{73,9}{1,2 \cdot 0,79}$$

$$= 77,95 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{G \cdot d_h}{\mu} = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\mu}$$

$$Re_h = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\mu}$$

$$= \frac{0,4005 \cdot 104,75 \cdot 0,01418}{0,0001884}$$

$$= 3157,56$$

$$Re_c = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\mu}$$

$$= \frac{0,7740 \cdot 77,95 \cdot 0,01418}{0,0002507}$$

$$= 3412,55$$

Data A.2.4 Perhitungan Bilangan Nusselt

$$Nu_h = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,33}$$

$$= 0,023 \times 3157,56^{0,8} \times 9,927^{0,33}$$

$$= 302,11$$

$$Nu_c = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,33}$$

$$= 0,023 \times 3412,55^{0,8} \times 6,862^{0,33}$$

$$= 284,59$$

Data A.2.5 Perhitungan h Aliran Panas dan h Aliran Dingin

$$h_h = \frac{Nu \cdot k}{d_{hydraulic}} = \frac{0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,33} \times k}{d_{hydraulic}}$$

$$= \frac{302,11 \cdot 0,0379}{0,01418}$$

$$= 807,46 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{d_{hydrolic}} = \frac{0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,33} \times k}{d_{hydrolic}}$$

$$= \frac{284,59 \cdot 0,0373}{0,01418}$$

$$= 748,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Data A.2.6 Perhitungan Kapasitas Perpindahan Panas Aliran Dingin dan Panas

$$C_h = \dot{m} \cdot C_{ph}$$

$$= 33,1 \cdot 2056$$

$$= 68053,6 \text{ J/s.K}$$

$$C_c = \dot{m} \cdot C_{pc}$$

$$= 73,9 \cdot 1007$$

$$= 74417,3 \text{ J/s.K}$$

Data A.2.7 Perhitungan Kapasitas Perpindahan Panas Minimal dan Maksimal

$$C_{min} = \frac{C_h}{C_c}$$

$$= \frac{68053,6}{74417,3}$$

$$= 0,91$$

$$C_{max} = \frac{C_c}{C_h}$$

$$= \frac{74417,3}{68053,6}$$

$$= 1,09$$

$$\begin{aligned}C^* &= \frac{C_{min}}{C_{max}} \\ &= \frac{0,91}{1,09} \\ &= 0,83\end{aligned}$$

Data A.2.8 Perhitungan NTU<sub>o</sub>

$$\frac{1}{U_o A} = \frac{1}{(hA)_h} + \frac{1}{(hA)_c}$$

$$\frac{1}{U_o A} = \frac{1}{807,46} + \frac{1}{748,6}$$

$$\frac{1}{U_o A} = 0,0025$$

$$U_o A = 400 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$NTU_o = \frac{U_o A}{C_{min}} = \frac{400}{0,91} = 439,56 \text{ W}^2/\text{m}^2$$

Data A.2.9 Perhitungan Cr dan Cr\* untuk Variasi 2 RPM

$$Cr = M_w c_w \frac{N}{60}$$

$$= (39,64)(1,017) \frac{2}{60}$$

$$= 1,34 \text{ W/K}$$

$$Cr^* = \frac{Cr}{C_{min}}$$

$$= \frac{1,34}{0,91}$$

$$= 1,47$$

Data A.2.10 Perhitungan Cr dan Cr\* untuk Variasi 3,2 RPM

$$\begin{aligned} Cr &= M_w c_w \frac{N}{60} \\ &= (39,64)(1,017) \frac{3,2}{60} \\ &= 2,15 \text{ W/K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cr^* &= \frac{Cr}{C_{min}} \\ &= \frac{2,15}{0,91} \\ &= 2,36 \end{aligned}$$

Data A.2.11 Perhitungan Cr dan Cr\* untuk Variasi 5 RPM

$$\begin{aligned} Cr &= M_w c_w \frac{N}{60} \\ &= (39,64)(1,017) \frac{5}{60} \\ &= 3,36 \text{ W/K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Cr^* &= \frac{Cr}{C_{min}} \\ &= \frac{3,36}{0,91} \\ &= 3,69 \end{aligned}$$

Data A.2.12 Perhitungan Efektivitas Crossflow

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{1 - \exp[-NTU_o (1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU_o (1 - C^*)]} \\ &= \frac{1 - \exp[-439,56 (1 - 0,83)]}{1 - 0,83 \exp[-439,56 (1 - 0,83)]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1 - \exp[-74,725]}{1 - 0,83 \exp[-74,725]} \\ &= \frac{204,12}{169,59} \\ &= 1,204 \end{aligned}$$

Data A.2.13 Perhitungan Efektivitas Variasi 2 RPM

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 \left[ 1 - \frac{1}{9(Cr^*)^{1,93}} \right] \\ &= 1,204 \left[ 1 - \frac{1}{9(1,47)^{1,93}} \right] \\ &= 1,204 [0,947] \\ &= 1,140 \end{aligned}$$

Data A.2.14 Perhitungan Efektivitas Variasi 3,2 RPM

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 \left[ 1 - \frac{1}{9(Cr^*)^{1,93}} \right] \\ &= 1,204 \left[ 1 - \frac{1}{9(2,36)^{1,93}} \right] \\ &= 1,204 [0,979] \\ &= 1,178 \end{aligned}$$

Data A.2.15 Perhitungan Efektivitas Variasi 5 RPM

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 \left[ 1 - \frac{1}{9(Cr^*)^{1,93}} \right] \\ &= 1,204 \left[ 1 - \frac{1}{9(3,69)^{1,93}} \right] \\ &= 1,204 [0,991] \\ &= 1,193 \end{aligned}$$