



TESIS (TM 142501)

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS
FLUE GAS - PRIMARY AIR PADA *ROTARY REGENERATIVE
AIR PREHEATER***

DIAN MUSTIKANING KUSUMA

NRP. 2112 204 801

Pembimbing:

Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**



THESIS (TM 142501)

**THE NUMERICAL STUDY OF FLUE GAS - PRIMARY AIR FLOW AND HEAT
TRANSFER CHARACTERISTICS IN ROTARY REGENERATIVE
AIR PREHEATER**

DIAN MUSTIKANING KUSUMA

NRP. 2112 204 801

Advisor:

Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

**MASTER PROGRAM
ENERGY ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

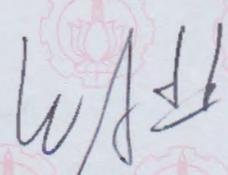
Oleh :

DIAN MUSTIKANING KUSUMA
NRP. 2112 204 801

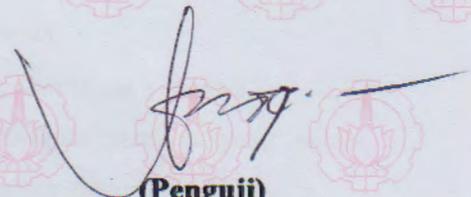
Tanggal Ujian : 29 Januari 2015
Periode Wisuda : Maret 2015

Disetujui oleh:

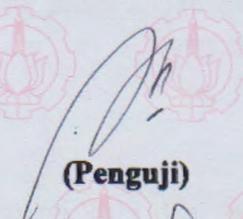
1. **Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**
NIP.197104051997021001


(Pembimbing)

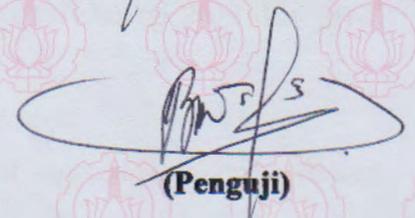
2. **Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME.**
NIP. 195312191981031001

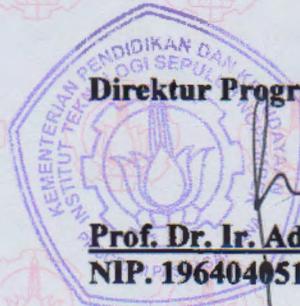

(Penguji)

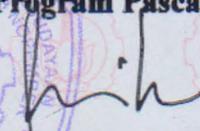
3. **Ary Bachtiar K.P., S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 197105241997021001


(Penguji)

4. **Dr. Bambang Arif D., S.T., M.Sc.Eng.**
NIP. 197804012002121001


(Penguji)


Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 196404051990021001

Studi Numerik Karakteristik Aliran Dan Perpindahan Panas *Flue Gas - Primary Air*

Pada *Rotary Regenerative Airpreheater*

Nama Mahasiswa : Dian Mustikaning Kusuma

NRP : 2112 204 801

Jurusan : Teknik Mesin, FTI-ITS

Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT

ABSTRAK

Penggunaan batubara campuran low rank yang nilai kalorinya lebih rendah dan kadar *moisture* lebih tinggi dari design awal boiler PLTU Paiton 1-2 menyebabkan meningkatkan kebutuhan temperatur *primary air* untuk proses *internal drying* pada *pulvurizer*. Salah satu cara meningkatkan temperatur *primary air* adalah menambah elemen *heater* pada *intermediate layer ljungstrom rotary regenerative air pre heater*. Penambahan elemen ini dapat meningkatkan perpindahan panas dan performa dari *air preheater*, namun juga berefek pada meningkatnya *pressure drop* pada *primary air outlet* dan meningkatnya resiko *sulfur dew point temperature corrosion* akibat menurunnya metal temperature pada *flue gas outlet*. Oleh karena itu studi numerik perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran dan perilaku perpindahan panas pada *air preheater*.

Penelitian ini merupakan simulasi numerik 3D dengan bantuan *software* Fluent 6.3.26. Pemodelan menggunakan *solver* k-epsilon standar dengan mengaplikasikan persamaan massa, energy dan momentum untuk mengetahui pengaruh modifikasi dengan variasi profil DU (*Double Undulated*) atau NF6 (*Notch Flat 6*), dengan pendekatan poros media. MRF (*Moving Reference Frame*) diaplikasikan untuk mengetahui efek variasi kecepatan rotasi.

Dari hasil pengolahan data *post processing* dan analisa secara kualitatif dan kuantitatif, didapatkan nilai dari masing masing konfigurasi DU-DU-NF6 dan DU-NF6-NF6 adalah 7533.37 pascal dan 7619.62 pascal untuk *primary air outlet pressure*, serta 296.02 C dan 296.10 C untuk temperatur *flue gas outlet*, sehingga kedua jenis konfigurasi ini dapat digunakan. Konfigurasi yang paling optimal adalah DU-DU-NF6 dengan kecepatan rotasi 3 rpm, yang memberikan nilai *effectiveness* sebesar 70%.

Kata kunci: *Ljungstrom rotary air preheater*, elemen *heater*, poros media, *moving reference frame*

The Numerical Study Of Flue Gas - Primary Air Flow And Heat Transfer

Characteristics In Rotary Regenerative Air Preheater

Student Name : Dian Mustikaning Kusuma
NRP : 2112 204 801
Departement : Teknik Mesin, FTI-ITS
Advisor : Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT

ABSTRACT

Low rank coal which had lower calories and higher moisture content than design requirement, had been used as mix coal feeding in Paiton 1-2 steam power plant's boiler. It increased primary air temperature demand for internal drying process in pulverizer. One of strategies to improve primary air temperature was by adding element heaters in intermediate layer of Ljungstrom rotary air preheater. This modification would enhance heat transfer and performance of airpreheater, meanwhile result to higher pressure drop at primary air outlet and risk of acid dew point temperature corrosion due to lower metal temperature at flue gas outlet. Therefore flow characteristic and heat transfer behavior in airpreheater were necessary to be investigated for modification feasibility.

This study was 3D numerical simulation using Fluent 6.3.26. The Modeling used k-epsilon turbulent viscous standard and applied mass, energy and momentum equation to investigate effect of modification using matrix profile variation DU (Double Undulated) and NF6 (Notch Flat 6), which were approached as porous media. Moving Reference Frame (MRF) was applied to incorporate the effect of rotational speed.

The post processing results had been analyzed qualitatively and quantitatively. The results for each DU-DU-NF6 and DU-NF6-NF6 configuration were 7533.37 pascal and 7619.62 pascal for primary air outlet pressure, also 296.02 C and 296.10 C for flue gas outlet temperature. Therefore both configurations could be applied. The optimum configuration was DU-DU-NF6 with 3 rpm speed, which resulted to 70% effectiveness

Key Words: Ljungstrom rotary air preheater, heating element, poros media, moving reference frame

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Studi Numerik Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas *Flue gas - Primary Air* pada *Rotary Regenerative Air preheater*”.

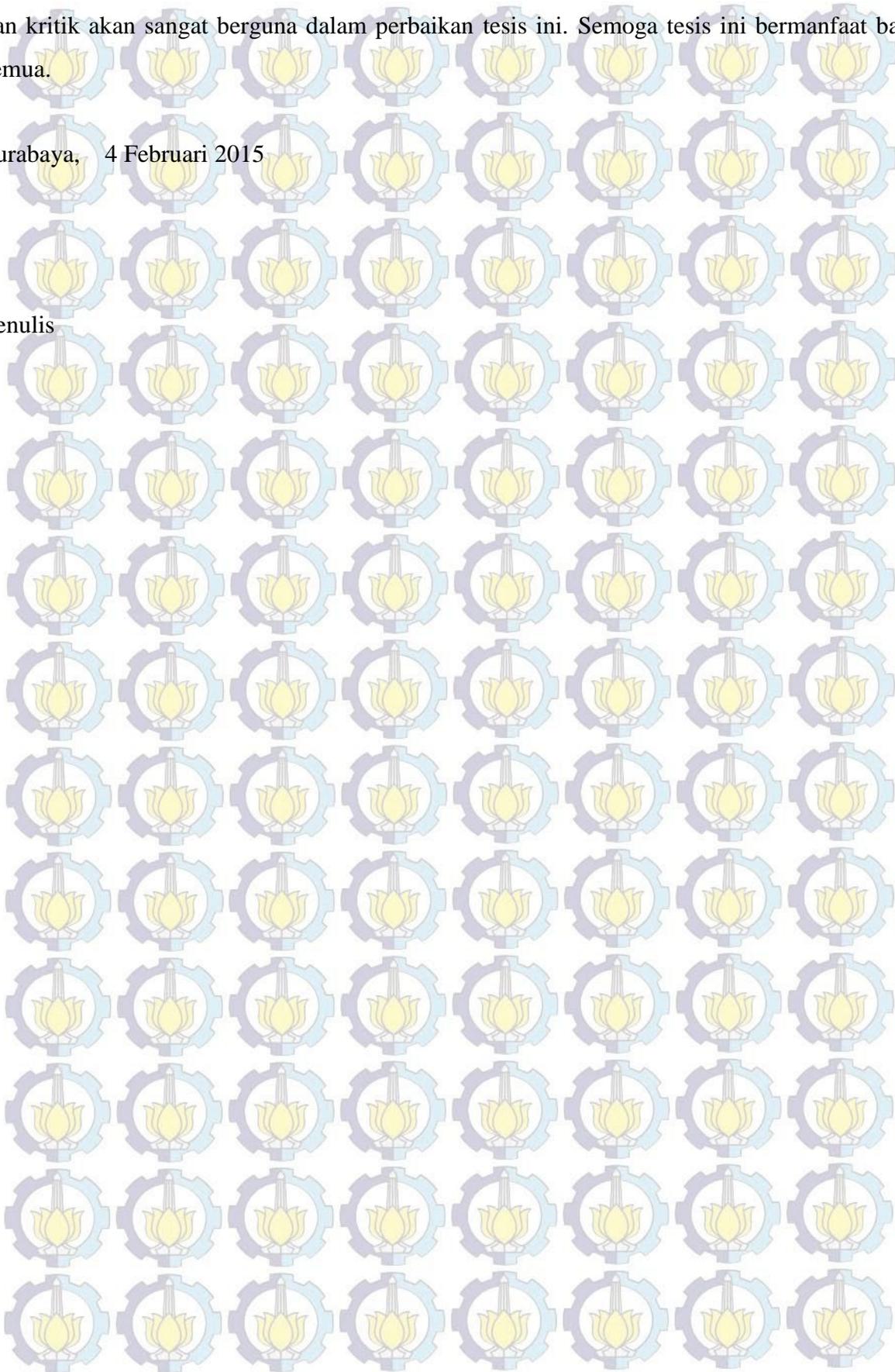
Penyusunan tesis ini merupakan persyaratan kelulusan Program Studi S-2 Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari keberhasilan penulisan tesis ini mendapat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu dalam penulisan tesis ini, antara lain kepada :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing tesis.
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Sc. PhD, selaku Koordinator S-2 Jurusan Teknik Mesin.
3. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME, Ary Bachtiar K. P., S.T, M.T, Ph.D. , Dr. Bambang Arif D., ST., M.Sc.Eng, selaku dosen penguji tesis.
4. PT PJB Services yang memberikan beasiswa dan kesempatan tugas belajar S2.
5. Rosihan Anwar dan Wardani Endang Herliastuti, orangtua tercinta yang selalu mendukung dan memanjatkan doa demi keberhasilan penulis dalam kehidupan.
6. Anugerah Budiman Akbar dan Muhamad Riadh Solikhin yang selalu memberikan bantuan dan semangat untuk segera lulus.
7. Segenap dosen dan Karyawan jurusan Teknik Mesin.
8. Rekan-rekan S-2 Jurusan Teknik Mesin Rekayasa Energi.
9. Rekan-rekan S-2 Jurusan Teknik Mesin Rekayasa Konversi Energi 2013 dan 2014, atas sharing dan bantuannya.
10. Rekan-rekan lab mekanika fluida atas bantuan dan diskusinya
11. Armin Heidari-Kaydan, *for reference, discussions and suggestions to solve Fluent problems*
12. Rekan-rekan PJB UP Paiton 1-2 yang telah banyak direpotkan oleh penulis dalam pengambilan data.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan tesis ini, segala saran dan kritik akan sangat berguna dalam perbaikan tesis ini. Semoga tesis ini bermanfaat bagi semua.

Surabaya, 4 Februari 2015

Penulis



DAFTAR ISI

COVER	
Lembar Pengesahan	
Kata Pengantar	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
NOMENCLATURE	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Perumusan masalah.....	6
1.3 Batasan masalah.....	6
1.4 Tujuan penelitian.....	7
1.5 Manfaat penelitian.....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Ljungstrom <i>air preheater</i>	9
2.2 Distribusi temperatur pada <i>air preheater</i>	10
2.3 Pengaruh kecepatan rotasi.....	11
2.4 Pengaruh bentuk <i>heating element</i>	14
2.5 Elemen <i>heater</i> temperatur dan pemilihan material.....	15
2.6 Permodelan numerik dengan Fluent 6.3.....	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Tahapan Penelitian.....	21
3.2 Data.....	22
3.3 Tahap <i>pre processing</i>	22
3.4 Tahap <i>processing</i>	24
3.5 Tahap <i>post processing</i>	29
3.6 Rancangan penelitian.....	29

3.7	<i>Diagram alir</i>	30
3.8	Jadwal kegiatan pelaksanaan tesis	31

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Perhitungan parameter <i>input</i> dalam simulasi	33
4.2	Validasi kondisi initial permodelan <i>airpreheater</i>	35
4.3	Analisa temperatur pada kondisi <i>initial airpreheater</i>	35
4.4	Analisa distribusi <i>pressure</i> pada kondisi <i>initial airpreheater</i>	38
4.5	Analisa pengaruh penambahan elemen heater pada <i>airpreheater</i>	39
4.6	Analisa pengaruh variasi putaran rotor terhadap <i>effectiveness air preheater</i>	43

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	45
5.2	Saran.....	45

DAFTAR PUSTAKA

vii

LAMPIRAN

BIOGRAFI PENULIS

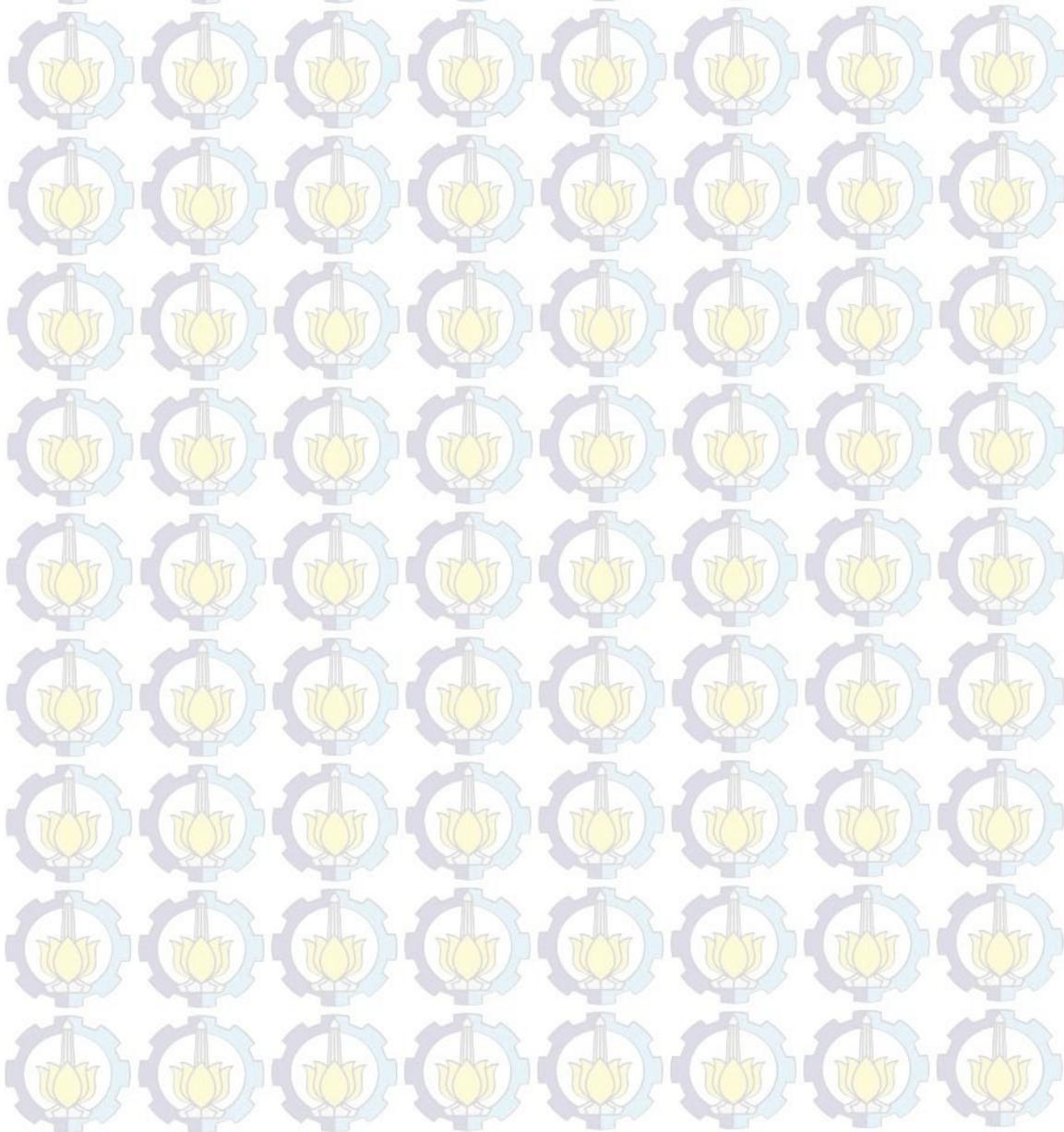
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Harga patokan dan kualitas beberapa merek dagang batubara Juli 2014, Kementrian ESDM.....	1
Tabel 2.1 Properti material <i>Cor-Ten Steel</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.....	17
Tabel 2.2 Komposisi kimia material <i>Cor-Ten steel grade A</i> , Wikipedia.....	17
Tabel 2.2 Komposisi kimia material <i>Cor-Ten steel grade A</i> , Wikipedia.....	17
Tabel 3.1 Kondisi batas dan momentum pada <i>baseline</i>	24
Tabel 3.2 Perhitungan mass flow rate flue gas dan primary air yang melalui PAH B	26
Tabel 3.3 Penentuan jenis aliran	26
Tabel 3.4 Properti <i>ambient air</i>	27
Tabel 3.5 Parameter inlet-outlet pada boundary condition.....	27
Tabel 3.6 Kondisi batas momentum	28
Tabel 3.7 Variasi input elemen dalam rancangan penelitian	29
Tabel 3.8. Variasi input kecepatan rotasi dalam rancangan penelitian.....	29
Tabel 3.9 Jadwal Kegiatan Pelaksanaan Tesis	31
Tabel 4.1 Perhitungan <i>inertia resistance coefficient</i>	33
Tabel 4.2 Validasi nilai <i>pressure drop</i> elemen DU dengan hasil eksperimen	34
Tabel 4.3 Validasi temperatur dan <i>pressure</i> hasil simulasi dengan kondisi aktual	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Bi-section air preheater</i>	4
Gambar 1.2 Ljungstrom <i>air preheater</i> PLTU Paiton 1-2, <i>Maintenace Manual vol 8 PLTU Paiton 1-2</i>	5
Gambar 2.1 <i>Rotary air preheater</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.	9
Gambar 2.2 Basic flow diagram regenerative air heater, Strom, 2011.	9
Gambar 2.3 Distribusi temperatur dilihat dari sisi <i>hot end layer</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.	10
Gambar 2.4 Distribusi temperatur dilihat dari sisi <i>cold end layer</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.	11
Gambar 2.5 Distribusi temperatur dilihat dari bagian tengah <i>matrix air preheater</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.	11
Gambar 2.6 Grafik <i>outlet flue gas</i> dan <i>primary air</i> temperature terhadap kecepatan putaran rotor, Alagic, 2005.	12
Gambar 2.7 Efek kecepatan rotasi rotor terhadap efisiensi <i>air preheater</i> dan temperatur dari <i>outlet primary air</i> dan <i>flue gas</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.	13
Gambar 2.8 Distribusi temperatur pada kondisi kecepatan putaran 2 rpm, Kaydan-Hajidavallo, 2014.	13
Gambar 2.9 Temperatur distribution pada kondisi temperatur 6 rpm, Kaydan-Hajidavallo, 2014.	13
Gambar 2.10 Profil elemen <i>heater</i> , chelli, 2008.	14
Gambar 2.11 <i>Friction factor</i> dari beberapa <i>heating element profile</i> , Zhang, 2012.	15
Gambar 2.12. Acid dew point temperature, Sarunac 2011.	16
Gambar 2.13 <i>Acid deposition zone</i> pada Ljungstrom <i>air preheater</i> , Sarunac 2011.	16
Gambar 2.14 Efek material plat terhadap efisiensi <i>airpreheater</i> , Kaydan-Hajidavallo, 2014.	17
Gambar 3.1 Pemodelan <i>air preheater</i> pada gambit	22
Gambar 3.2 Meshing pada base line.	23
Gambar 3.3 Kondisi batas dan kondisi momentum pada <i>Fluent</i>	24
Gambar 3.4 Diagram alir simulasi numerik <i>air preheater</i>	30
Gambar 4.1 Nilai Friction factor elemen DU berdasarkan hasil experimen Zhang, 2011 ..	34
Gambar 4.2 Distribusi temperatur matrix pada kondisi initial (2.2 rpm)	36

Gambar 4.3 Distribusi temperatur matrix untuk tiap facet pada kondisi initial (2.2 rpm) ..	36
Gambar 4.4 Grafik distribusi temperatur matrix pada kondisi initial (2.2 rpm).....	37
Gambar 4.5 Titik titik pengambilan data distribusi tekanan pada model <i>air preheater</i>	38
Gambar 4.6 Grafik distribusi tekanan pada model <i>initial airpreheater</i>	39
Gambar 4.7 <i>Grafik pressure drop</i> pada masing masing elemen.....	40
Gambar 4.8 Grafik perbandingan distribusi <i>pressure</i> pada masing masing modifikasi	40
Gambar 4.9 Perbandingan kualitatif air preheater initial dengan modifikasi	41
Gambar 4.10 Grafik perbandingan kuantitatif temperatur airpreheater dengan modifikasi	41
Gambar 4.11 Grafik pengaruh putaran rotor terhadap <i>effectiveness</i>	44
Gambar 4.12 Pengaruh Putaran rotor terhadap distribusi temperatur pada DU-DU-NF6...	44



NOMENCLATURE

Simbol	Keterangan	Unit
A_H	Hydraulic Area	mm ²
C_p	Constant Pressure	J/kg.K
D_H	Hydraulic diameter	mm
E	Relative internal energy	
F	External body forces	
h	Heat transfer coefficient	W/m ² .K
k	Thermal conductivity	W/m.K
K	Permeability	m ²
L	Porous layer thickness	m
	Mass flow rate	Kg/s
P	Pressure	pa
\dot{q}	Heat generation	W/m ³
Re	Reynolds number	
Sh	Heat sources	
Sp	Sparrow number	
t	Time	s
T	Temperature	K
\vec{v}	Velocity of the moving frame relative to the inertial reference frame	m/s
\vec{v}_p	Plane velocity (u,v,w)	m/s
\vec{v}_a	Absolute velocity	m/s
\vec{v}_r	Relative velocity	m/s
\vec{v}_t	Translational frame velocity	m/s
∇	Fluid velocity	m/s
	Greek letters	
ω	angular velocity	rpm
	Porosity	
	Efficiency	
μ	Dynamic viscosity	N s/m ²
	Density	Kg/m ²
σ	relative stress tensor	
	Subscript	
s	Solid	
f	Fluid	
m	Mixture	
out	outlet fluid	
in	Inlet fluid	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Unit Pembangkitan Paiton (UP Paiton) adalah salah satu unit bisnis milik PT. Pembangkitan Jawa Bali (PT. PJB), yang merupakan anak perusahaan dari PT. PLN (Persero). UP Paiton mengelola Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berlokasi di desa Binor, kecamatan Paiton, kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. PLTU Paiton yang mulai beroperasi sejak Oktober 1993, dengan kapasitas terpasang sebesar 2 x 400 MW (PLTU Paiton unit 1 dan 2) dan berbahan bakar batubara *bituminous* dengan nilai kalori diatas 5800 Kcal/kg dalam *ash dry basis*.

Ketersediaan batubara menjadi peranan penting terhadap kelangsungan operasi PLTU Paiton. Cadangan batubara nasional Indonesia dengan kalori tinggi (*high rank*, 6.100-7100 Kcal/kg) sebanyak 12%, batubara kalori menengah (*middle rank*, 5100-6100 Kcal/kg) sebanyak 66% dan kalori rendah (*low rank*, kurang dari 5100 Kcal/kg) sebanyak 22% (RUPTL 2013-2022). Seiring dengan semakin meningkatnya permintaan ekspor, harga batubara *high* dan *middle rank* semakin tinggi, sedangkan batubara berbahan bakar *low rank* kurang diminati sehingga harganya jauh lebih murah (Tabel 1). Peluang ini dimanfaatkan oleh UP Paiton untuk dapat tetap beroperasi dan bersaing. Sejak tahun 2003 UP Paiton mengambil kebijakan untuk menggunakan batubara campuran antara *middle rank* dan *low rank* dengan konfigurasi 60%-40% atau 75%-25%.

Tabel 1.1 Harga patokan dan kualitas beberapa merek dagang batubara Juli 2014, Kementerian ESDM

NO	MEREK DAGANG/ BRAND	KUALITAS TYPICAL				HPB MARKER (US\$/ton)
		CV (kcal/kg GAR)	TM (%)	TS (%, ar)	Ash (%,ar)	
1	Gunung Bayan I	7.000	10,00	1,00	15,00	77,68
2	Prima Coal	6.700	12,00	0,60	5,00	78,24
3	Pinang 6150	6.200	14,50	0,60	5,50	70,63
4	Indominco IM_East	5.700	17,50	1,63	4,80	59,34
5	Melawan Coal	5.400	22,50	0,40	5,00	57,73
6	Envirocoal	5.000	26,00	0,10	1,20	54,41
7	Jorong J-1	4.400	32,00	0,25	4,15	43,81
8	Ecocoal	4.200	35,00	0,18	3,90	40,08

Selain nilai kalori yang lebih rendah, batubara *low rank* memiliki *total moisture content* yang lebih tinggi, yaitu sekitar 25-30% dibandingkan dengan batubara *middle rank* yang *total moisture content*-nya masih dibawah 25%. Di dalam *mill*, jika batubara memiliki kadar *moisture* tinggi, berpotensi menyebabkan *clogging*. *Clogging* dapat dihindari dengan proses *grinding* dan *internal drying*. Target dari proses *grinding* adalah mengurangi *finnest* dari batubara (hingga 200 mesh) sehingga memperluas permukaan butiran batubara untuk mempermudah penguapan *moisture*, sedangkan proses *internal drying* bertujuan mengurangi kadar *moisture* dalam batubara hingga 1-2% sebelum menuju ke *burner*.

Dalam proses *internal drying*, dibutuhkan kalori dari udara panas *primary air*. Semakin tinggi kadar *moisture* dalam batubara dibutuhkan semakin banyak kalori dari *primary air supply*. Namun karena volume *primary air* yang dapat dialirkan ke dalam *mill* cenderung konstan, dan jika kalori yang di berikan terlalu tinggi, maka berpotensi menyebabkan *coal ignition* atau *internal combustion* pada *mill*, sehingga *mill inlet temperature* harus dijaga tidak lebih dari 250 C dan *mill outlet temperature* sekitar 70-80 C. Selain itu penggunaan batubara yang nilai kalornya lebih rendah meningkatkan kecepatan *feeding* batubara ke dalam *boiler* akibat dibutuhkan lebih banyak batubara untuk mencapai beban yang sama. Dengan adanya keterbatasan kapasitas aktual *mill* yang rata rata hanya mencapai 50 ton/jam per *mill* sedangkan *demand boiler* rata-rata sekitar 208 ton/jam untuk mencapai *full load* dengan batubara *low rank*, sehingga dibutuhkan tambahan kapasitas *mill* yang beroperasi. Akibatnya pengoperasian *pulverizer/mill* yang menurut desain awal cukup menggunakan 4 unit *mill* untuk mendapatkan beban daya penuh (400 MW) menjadi 5 unit *mill* beroperasi untuk mencapai beban yang sama. Penggunaan keseluruhan *mill* yang ada dapat menurunkan *redundancy* dan *reliability* dari *pulverizing system* dan berpotensi besar terhadap terjadinya *derating* unit PLTU jika ada salah satu *pulverizing system* mengalami masalah. Adanya tambahan beban *mill* yang bekerja ini juga menyebabkan peningkatan *auxiliary power* yang berefek pada peningkatan biaya operasi secara keseluruhan.

Berbagai strategi dapat dilakukan untuk kembali meningkatkan *efficiency* dan *reliability* pembangkit setelah menggunakan batubara dengan yang lebih rendah dari desainnya, antara lain dengan memodifikasi *mill* sehingga didapatkan kapasitas masing-masing *mill* yang lebih besar atau penambahan *external coal drier* untuk mengurangi *moisture* batubara. Namun kedua modifikasi ini membutuhkan biaya investasi yang cukup besar. Alternatif lain yang dapat dilakukan adalah meningkatkan kapasitas panas

dari *primary air* dengan cara mengoptimalkan pemanfaatan panas sisa dari gas buang atau *flue gas* dengan meningkatkan efektivitas dari *regenerative air heater device* atau *air preheater*. Penggunaan *air preheater* dapat meningkatkan efisiensi unit lebih dari 10%. Selain itu setiap penurunan 5.5 C temperatur gas *outlet* dari *air preheater* dapat meningkatkan efisiensi boiler sebesar 0.25% (Strom, 2010).

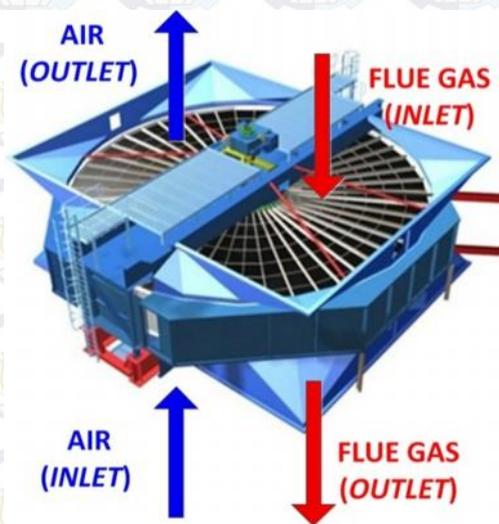
Pada prinsipnya penurunan temperatur *outlet* ini menunjukkan penyerapan energi yang lebih banyak pada susunan heater boiler sehingga efisiensi boiler pun meningkat. Peranan *air preheater* sendiri dalam meningkatkan efisiensi unit didapatkan dengan memanfaatkan panas sisa dari *flue gas* untuk memanaskan terlebih dahulu (*pre-ignition*) udara bakar primer (*primary air*) sebelum di-*supply* ke mill serta udara bakar sekunder (*secondary air*) sebelum di-*supply* menuju ruang bakar (*combustion chamber*) boiler. Jika *supply* udara bakar dan fuel ini tidak dipanaskan terlebih dahulu, maka energi yang dibutuhkan oleh boiler akan semakin meningkat akibat kalor yang terserap digunakan untuk memanaskan udara dan untuk menguapkan sisa *moisture* dalam batubara di dalam ruang bakar, akibatnya lebih banyak bahan bakar yang dikonsumsi sehingga mengurangi efisiensi unit pembangkit dan meningkatkan biaya operasional secara keseluruhan. Keuntungan lain dari *air preheater* adalah mengurangi temperatur *flue gas* yang keluar menuju *stack*, sehingga mengurangi pencemaran lingkungan akibat panas.

Air preheater yang digunakan di PLTU Paiton 1 adalah jenis *rotary air heater* yang diperkenalkan oleh Ljungstrom. Ljungstrom *air preheater* merupakan *regenerative heat exchanger* dimana didalamnya terdiri dari *matrix* plat heater yang disusun sedemikian rupa dalam bentuk *basket*. *Hot flue gas* dan *primary air* yang akan dipanaskan masuk dari *duct channel* yang berbeda dan arahnya berlawanan menuju ke *air preheater* yang diputar secara perlahan oleh sebuah rotor listrik. Ditengah tengahnya diberi *seal* pemisah berupa plat agar tidak bercampur. *Matrix* pada bagian rotor yang bergerak melewati aliran *hot flue gas* akan menyerap panas dari *flue gas* untuk kemudian ditransfer ke *primary air* pada saat bagian *matrix* tersebut berputar melewati *primary air channel*. Proses ini terjadi secara simultan. Tipe Ljungstrom *air preheater* pada PLTU Paiton 1-2 adalah *bi-section* (Gambar 1.2), artinya proses *preheating* dari *primary air* dan *secondary air* terpisah pada *duct channel* dan peralatan *air preheater* yang berbeda.

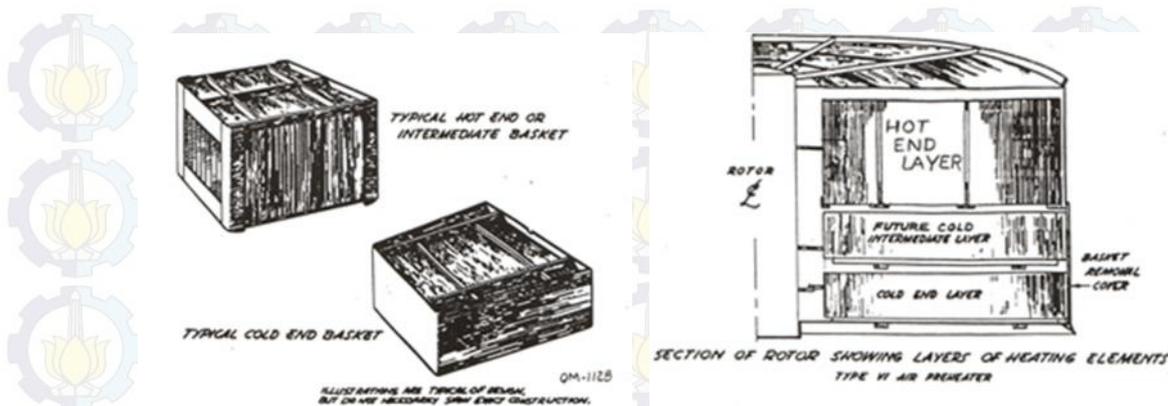
Menurut Arora, 2012, beberapa cara dapat dilakukan untuk meningkatkan performa dari *air preheater*, antara lain dengan mengganti *heating surface element*,

memodifikasi *duct inlet* dari *flue gas* sehingga distribusi aliran lebih *uniform*, menggunakan *double sealing* untuk mengurangi *flue gas leakage*, mengurangi *boiler air ingress* sehingga meningkatkan temperature pada *air preheater inlet* serta menambah *heating surface area*.

Penambahan *heating surface area* ini dapat dilakukan dengan menambahkan *heating element sheet* pada *air preheater matrix*. Kebanyakan *air preheater* Ljungstrom didesain dengan beberapa inci slot kosong sehingga memungkinkan ditambahkan *heat transfer element*. *air preheater* pada *primary air line* PLTU Paiton 1-2 juga di design dengan 2 *layer* elemen heater, yaitu *hot end layer* dan *cold end layer*, sedangkan untuk *intermediate layer* tidak diberi elemen *heater*, sehingga memungkinkan untuk pengembangan lebih lanjut dalam meningkatkan performa *air preheater* (gambar 1.3). Pada *hot end layer* digunakan elemen *heater* tipe DU (*double undulated*) sedangkan pada *cold end layer* digunakan elemen *heater* dengan tipe NF6 (*Notched Flat*). Dengan adanya penambahan elemen *heater* pada *intermediate layer* diharapkan akan terjadi penyerapan panas lebih banyak panas sisa yang terjadi di dalam *air preheater* dari *flue gas* untuk ditransfer ke *primary air*, sehingga efisiensi termal unit pun meningkat.



Gambar 1.1 Bi-section air preheater



Gambar 1.2 Ljungstrom *air preheater* PLTU Paiton 1-2,
Maintenace Manual Volume 8 PLTU Paiton 1-2

Penambahan elemen *heater* ini juga dapat menimbulkan beberapa efek negatif. Menurunnya temperatur *flue gas outlet* berpotensi meningkatkan laju korosi pada elemen *heater* akibat menurunnya metal temperatur mendekati *sulphur temperatur dew point*-nya, terutama disekitar *cold end layer*. Selain itu terjadinya peningkatnya *pressure drop* sehingga *pressure permissive mill* untuk *primary air* tidak tercapai . Peningkatan *pressure drop* dapat diantisipasi dengan menaikkan *pressure* pada *flue gas inlet* dengan meningkatkan kerja PA (*primary air*) *fan*. Namun peningkatan kerja ini dapat menaikkan daya yang dibutuhkan oleh *fan* sehingga meningkatkan daya pemakaian sendiri dari unit pembangkit.

Karena banyaknya faktor yang perlu dipertimbangkan dari modifikasi ini, studi kelayakan perlu dilakukan. Salah satunya adalah dengan pendekatan numerik dengan metode *Computational Fluid Dynamic (CFD)* untuk mengetahui pengaruh penambahan elemen *heater* pada *intermediate layer* terhadap karakter aliran fluida dan perpindahan panas pada *air preheater*.

Beberapa penelitian sebelumnya dapat digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini. Kaydan-Hajidavalloo, 2014, melakukan simulasi 3D-fluent pada *air preheater* untuk mengetahui efek dari *rotational speed*, *fluid flow rate* dan *separator plate* terhadap distribusi temperatur dan performa *air preheater*. Persamaan massa, momentum dan energi serta poros media dengan metode *Moving Reference Frame (MRF) solver* digunakan untuk memodelkan *matrix* ini, dimana dihasilkan eror yang masih dapat diterima, yaitu sekitar 7.5%. Alagic, 2005, melakukukan studi numerik untuk mengetahui distribusi temperatur pada *air preheater*. Zhan, 2012, dalam

investigasi eksperimen dan numerik-nya, membandingkan beberapa bentuk profil elemen terhadap *Reynold number* dan *friction factor* dan menyebutkan bahwa semakin tinggi *friction factor*, maka semakin tinggi pula interupsi pada *boundary layer*, sehingga *heating performace*-nya semakin baik, namun *pressure drop*-nya pun semakin tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Untuk meningkatkan performance unit pembangkit UP. Paiton, direncanakan penambahan elemen *heater* pada *intermediate layer air preheater*. Studi numerik dengan metode CFD 3-dimensi dengan menggunakan *software Fluent* dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan elemen *heater* terhadap karakter aliran fluida dan perpindahan panas pada *air preheater*. Poros media pada masing masing *layer* digunakan untuk mempermudah komputasi untuk mewakili variasi elemen *heater* profil DU dan NF6. Konfigurasi elemen heater yang paling optimal akan digunakan dalam menentukan parameter kecepatan rotasi yang paling optimal. Validasi dilakukan dengan metode *grid independence* dan membandingkan hasil *running* fluent dengan kondisi aktual unit.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberlakukan beberapa batasan masalah dan asumsi sehingga pembahasan yang dilakukan tidak melenceng dari tujuan yang telah ditentukan. Adapun batasan masalah dan asumsi tersebut adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian adalah Ljungstrom *air preheater* yang terpasang pada *primary air line* B PLTU Paiton unit 2
2. Data operasi yang digunakan merupakan data yang diambil dari *Central Control Room (CCR) display* PLTU Paiton 2 pada tanggal 20 November 2014 pukul 16.30 WIB dengan kondisi *full load*, sedangkan data batubara didapat dari hasil *performance test* bulan Agustus 2014
3. Analisa dilakukan berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* Fluent 6.3 secara 3D dengan *input* geometri *air preheater* dengan menggunakan *software* Gambit.
4. Permodelan hanya diwakili oleh area yang terisi basket sebagai poros medium. Pengaruh *seal leakage*, *pressure drop* dan *heat transfer* pada dinding *basket* dan rotor diabaikan.

5. Variasi jenis elemen *heater* hanya pada *intermediate layer* yaitu menggunakan tipe DU dan NF6, sedangkan untuk *hot end* dan *cold end layer* tetap menggunakan elemen *heater* sesuai kondisi *existing*.
6. Tidak membahas pengaruh penambahan element heater terhadap besarnya vibrasi dan gaya apapun yang terjadi pada rotor dan *support basket*.
7. Efek dari *ash scalling* terhadap heat transfer pada element heater diabaikan.
8. Kedua jenis aliran fluida adalah *incompressible*, kondisi operasi dianggap *steady state*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan umum simulasi numerik ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas dengan adanya penambahan elemen *heater* type DU atau NF6 pada *intermediate layer* dan mendapatkan parameter kecepatan rotor yang paling optimal untuk diaplikasikan pada *air preheater* .

Tujuan khusus dari simulasi numerik ini adalah untuk mendapatkan data dan hasil analisa secara kualitatif dan kuantitatif. Kualitatif yaitu berupa kontur distribusi temperatur dan kontur tekanan pada setiap *air preheater* layer baik pada sisi *flue gas* maupun *primary air*. Sedangkan kuantitatif berupa grafik temperatur arah radial maupun vertikal

1.5 Manfaat penelitian

Penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi pada kajian kelayakan penambahan elemen *heater* pada *intermediate layer* pada Ljungstrom *air preheater* PLTU Paiton 1-2.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

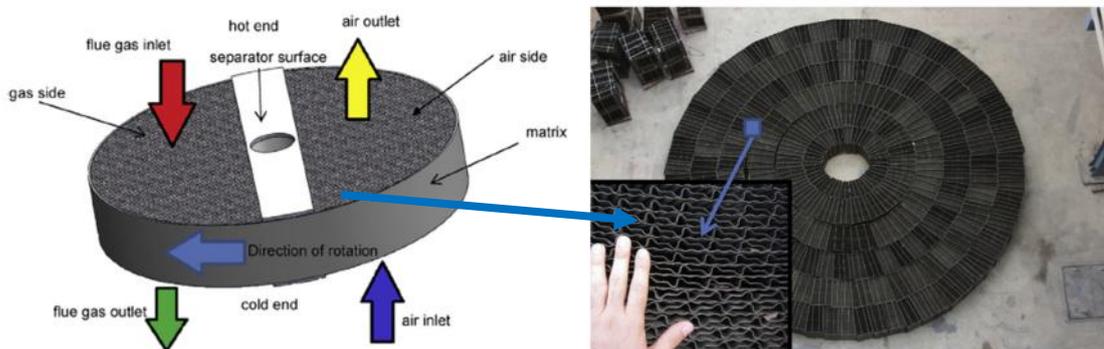
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

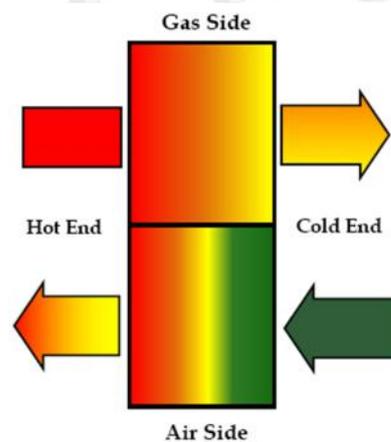
2.1 Ljungstrom air preheater

Ljungstrom rotary air preheater adalah jenis *heat exchanger* (HE) berupa silinder yang berputar dan dilengkapi dengan *matrix* yang disusun secara rapat, yang dapat mentransfer *heat* dari *flue gas* (gas buang panas) ke *cool air* (udara dingin) yang mengalir secara paralel dengan arah yang berlawanan (Gambar 2.1).

Prinsip kerja dari rotary air preheater adalah regeneratif. Regeneratif merupakan proses mengembalikan, memperbaiki energi yang tidak terpakai atau energi sisa sebagai sumber energi yang menciptakan ketersediaan system yang berkelanjutan. Berbeda dari *recuperative heat exchanger*, pada siklus regeneratif, *heat* tidak ditransfer dengan melalui *tube* atau *plate wall*, namun diserap dan dilepaskan dari permukaan yang sama seiring dengan perpindahan massa elemen secara rotasi dalam siklus yang berkelanjutan antara aliran *flue gas* dan *cool air* (Warren, 1982).



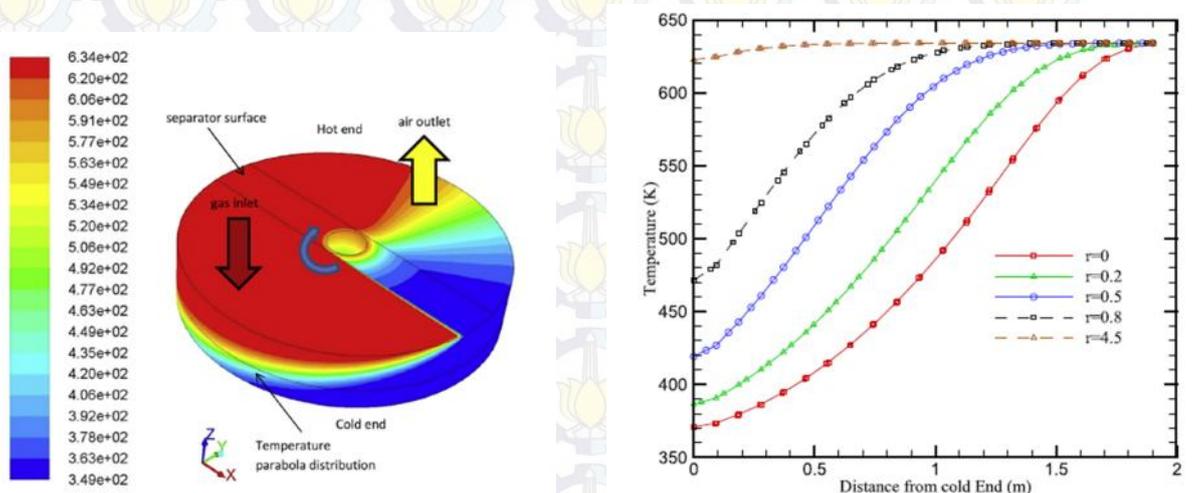
Gambar 2.1 Rotary air preheater, Kaydan-Hajidavallo, 2014



Gambar 2.2 Basic flow diagram regenerative air heater, Strom, 2011.

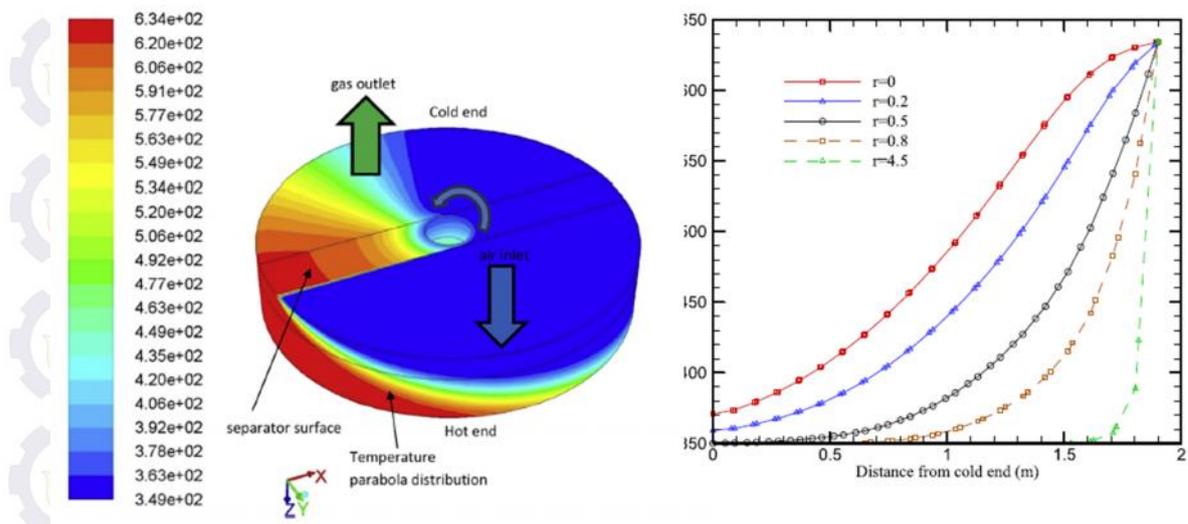
2.2 Distribusi temperatur pada *air preheater*

Kaydan-Hajidavalloo, 2014, melakukan studi numerik 3D untuk mendapatkan gambaran yang lebih mendetail mengenai profil temperatur yang terjadi pada daerah yang berbeda pada *air preheater*. Gambar 2.3 menunjukkan distribusi temperatur pada *matrix* dimana *hot end layer* berada pada posisi paling atas. Distribusi temperatur hampir merata pada permukaan *inlet* pada *flue gas channel*, namun semakin kebawah akan berubah secara gradual terhadap arah rotasi hingga menuju *outlet*. Hal ini menunjukkan bahwa bagian dari *outlet* air yang melalui *matrix* yang telah dipanaskan pada *flue gas channel* menjadi lebih hangat, namun sebagaimana *matrix* berotasi dan men-transfer energinya menuju ke *primary air*, temperaturnya pun menurun kembali. Akibatnya bagian lain dari *outlet primary air* yang melalui *matrix* menjadi lebih dingin. Sebagaimana juga terlihat bahwa pada akhir dari daerah rotasi, temperatur *matrix* hampir mendekati temperatur *inlet primary air*. Tren yang sama juga terlihat pada daerah *cold end layer* (Gambar 2.4). Sedangkan distribusi temperatur pada bagian dalam *matrix air preheater*, ditunjukkan oleh Gambar 2.5.

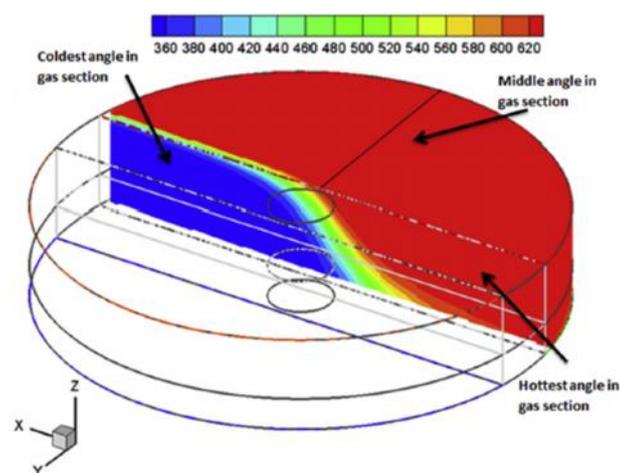


Gambar 2.3 Distribusi temperatur dilihat dari sisi hot end layer,

Kaydan-Hajidavalloo, 2014



Gambar 2.4 Distribusi temperatur dilihat dari sisi cold end layer, Kaydan-Hajidavalloo, 2014.



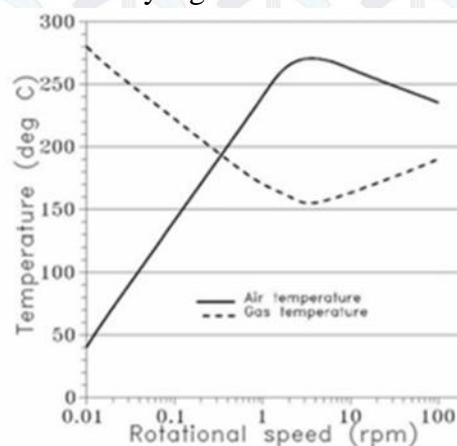
Gambar 2.5 Distribusi temperatur dilihat dari bagian tengah *matrix air preheater*, Kaydan-Hajidavalloo, 2014.

2.3 Pengaruh kecepatan rotasi

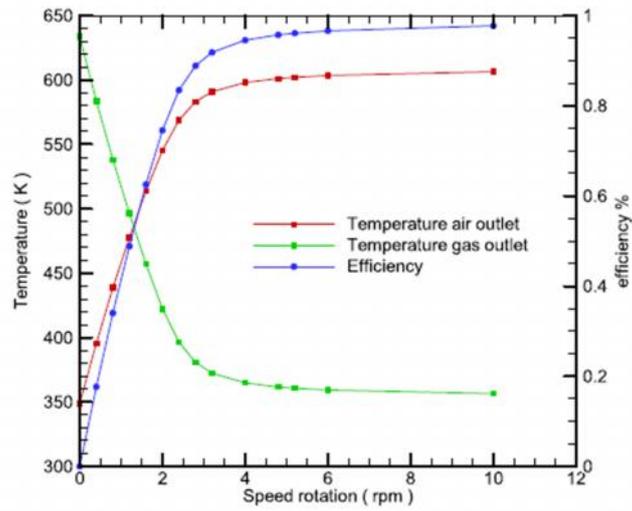
Menurut Alagic, 2005, Perpindahan panas pada *air preheater* tergantung pada kecepatan putaran rotor. Semakin rendah putaran rotor, temperatur *primary air* yang meninggalkan *air preheater* semakin rendah, sedangkan temperatur *flue gas outlet* lebih tinggi pada. Hal ini terjadi karena temperatur kedua fluida, baik *primary air* maupun *flue gas* memiliki periode kontak dengan dinding *matrix* yang sama lebih lama, sehingga perpindahan panas yang terjadi lebih sedikit. Pada kecepatan 0 sebagai contoh, secara visual tidak terjadi perpindahan *matrix* sehingga tidak terjadi perpindahan panas pada kedua sisi, akibatnya temperatur *outlet* akan sama dengan temperatur *inlet*. Pada kondisi kecepatan rotor yang lebih tinggi, temperatur udara dan

gas akan memiliki harga tertentu yang mana berimbang tergantung dari *heat capacity* dari kedua stream. Pada *infinite speed* atau kecepatan yang sangat tinggi, *heat transfer* akan sama dengan *infinite paralel heat exchanger*, karena *matrix elemen heater* tidak memiliki cukup waktu untuk menyimpan dan melepaskan panas secara maksimal pada periode kontak masing masing *stream*. Sebagaimana diharapkan bahwa ljunstrom *air preheater* memiliki performa yang lebih baik daripada paralel heat exchanger, terdapat nilai kecepatan rotor, dimana, pada kondisi tersebut *heat transfer* yang terjadi menjadi maksimum (Gambar 2.6). Pada kasus Tusla *power plant*, didapat bahwa pada 3 rpm, terjadi peningkatan 3.2% *heat transfer* dibandingkan dengan kondisi sebelumnya yaitu 1.76 rpm.

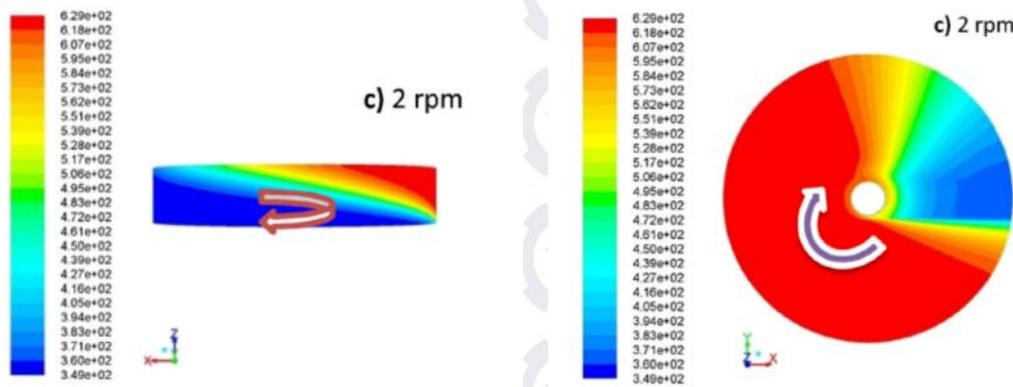
Penelitian yang sama juga dilakukan oleh Kaydan-hajidavallo, 2014 pada *air preheater Ramin power plant*. Gambar 2.7 menunjukkan efek kecepatan putaran rotor terhadap efisiensi atau *effectiveness* dan temperatur *outlet* dari fluida. Sedangkan Gambar 2.8 dan 2.9 merupakan perbandingan pengaruh kecepatan rotasi terhadap distribusi temperatur. Dengan menambah kecepatan rotasi, daerah panas pada *primary air outlet* bertambah. Hal ini menunjukkan interaksi perpindahan panas yang lebih baik. Demikian pula dengan daerah dingin pada *flue gas outlet*. *Effectiveness* bertambah secara signifikan hingga batas tertentu dan kemudian cenderung konstan. Selain itu, dengan bertambahnya kecepatan rotasi, rata rata temperatur *outlet air* bertambah namun temperatur *outlet gas* berkurang. Setelah 4 rpm perbedaan temperature rata rata cenderung konstan. sama halnya dengan kurva efisiensi. Menambah *rotasional speed* akan menambah area yang tersedia untuk *heat transfer* antara *hot* dan *cold fluid* pada interval waktu tertentu sehingga meningkatkan efisiensi preheater, dan sebaliknya. Keseimbangan antara kedua *section* yang berlawanan menentukan kurva *effectiveness*.



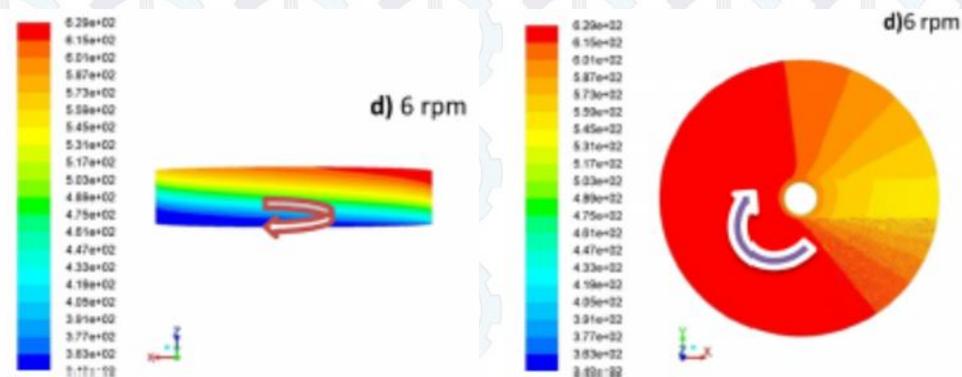
Gambar 2.6 Grafik *outlet flue gas* dan *primary air* temperature terhadap kecepatan putaran rotor, Alagic, 2005.



Gambar 2.7 Efek kecepatan rotasi rotor terhadap *effectiveness air preheater* dan temperatur dari *outlet primary air* dan *flue gas*, Kaydan-Hajidavallo, 2014.



Gambar 2.8 Distribusi temperatur pada kondisi kecepatan putaran 2 rpm, Kaydan-Hajidavallo, 2014.

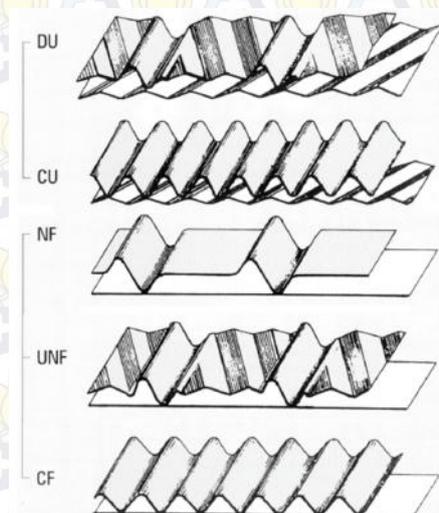


Gambar 2.9 Temperatur distribution pada kondisi temperatur 6 rpm, Kaydan-Hajidavallo, 2014.

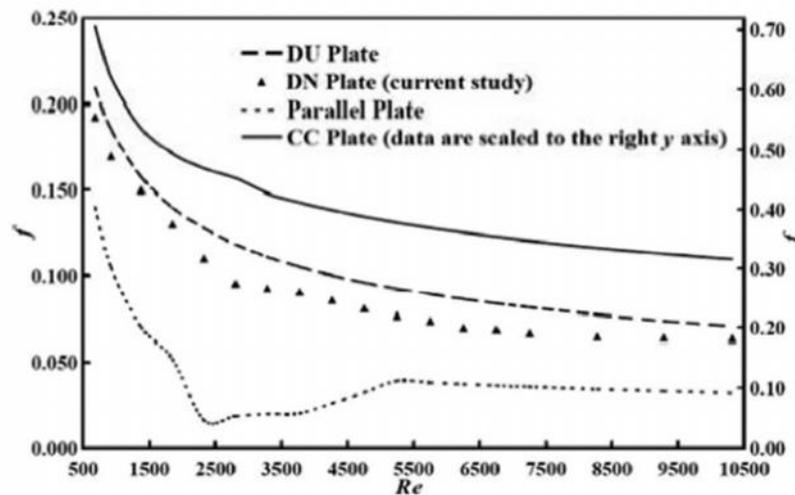
2.4 Pengaruh bentuk *heating element*

Ada banyak pilihan dalam menentukan design pada *air preheater*. Masing masing konfigurasi memiliki keunikan masing masing dalam hal *pressure drop* dan karakteristik *heat transfer*. Selain itu faktor adanya partikel ash dalam *flue gas* juga digunakan sebagai pertimbangan karena adanya partikel ini rentan menyebabkan terjadinya *fouling* atau penumpukan *fly ash* pada permukaan elemen *heater* yang dilewatinya, sehingga menyebabkan terhambatnya *heat transfer*. Sebagai contoh, bentuk elemen *heater corrugated undulated* (CU) baik digunakan untuk kondisi *fouling* yang banyak, *double undulated* (DU) digunakan untuk *fouling* tingkat menengah, sedangkan Undulated Notched Flat (UNF) dapat digunakan untuk kondisi *flue gas* tanpa *fouling* (gambar 2010)

Elemen yang didesign untuk menghasilkan maksimum *heat transfer* dalam dimensi kedalaman yang terbatas mungkin juga memiliki lebih tinggi *pressure drop* dibandingkan dengan element yang didesign lebih dalam untuk mencapai *heat transfer* yang sama. Secara umum, konfigurasi dengan *pressure drop* per inch yang paling rendah juga memiliki *heat transfer rate* per inch yang lebih rendah dan membutuhkan kedalaman element yang lebih tinggi untuk mendapatkan *thermal performance* yang sama, sehingga hasil akhir dari konfigurasi beberapa element merupakan hasil dari keseluruhan *pressure drop* untuk menghasilkan nilai *heat transfer* tertentu. Namun tidak semua *air preheater* dapat mengakomodir penambahan kedalaman elemen tanpa membutuhkan modifikasi dari rotornya (Strom, 2011).



Gambar 2.10 Profil elemen heater, chelli, 2008.



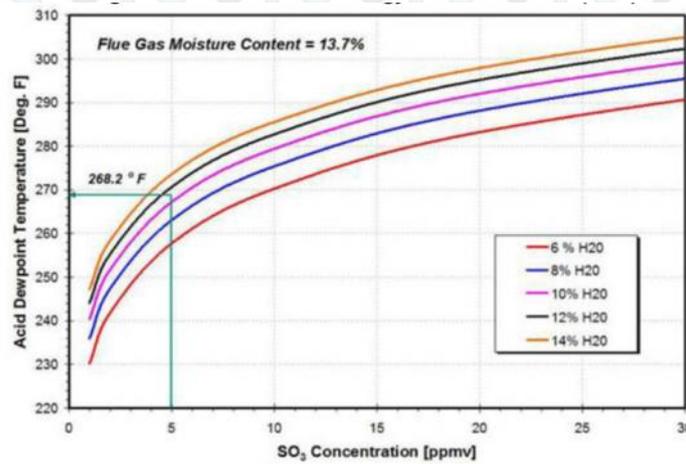
Gambar 2.11 *Friction factor* dari beberapa *heating element profile*, Zhang, 2012

Zhang, 2012, dalam studi eksperimen dan numeriknya menyebutkan bahwa salah satu yang mempengaruhi performa dari elemen heater adalah *friction factor*. Dalam penelitian tersebut, zhang memberikan perbandingan yang didapat dari beberapa literatur dan eksperimennya mengenai *friction factor* dari beberapa profile elemen, seperti pada gambar 2.11. *Friction factor* dari profile cross corrugated (CC) dapat dilihat pada y-axis sebelah kanan sedangkan elemen lain pada sisi kiri. Plat CC dengan pure scrow undulation menunjukkan interupsi yang efisien pada *boundary layer* sehingga memiliki *thermal performance* yang tinggi dengan *pressure drop* yang tinggi, namun untuk *parallel plate* menghasilkan performace yang kurang namun *pressure drop*-nya lebih rendah. Performa dari DN dan DU berada diantaranya.

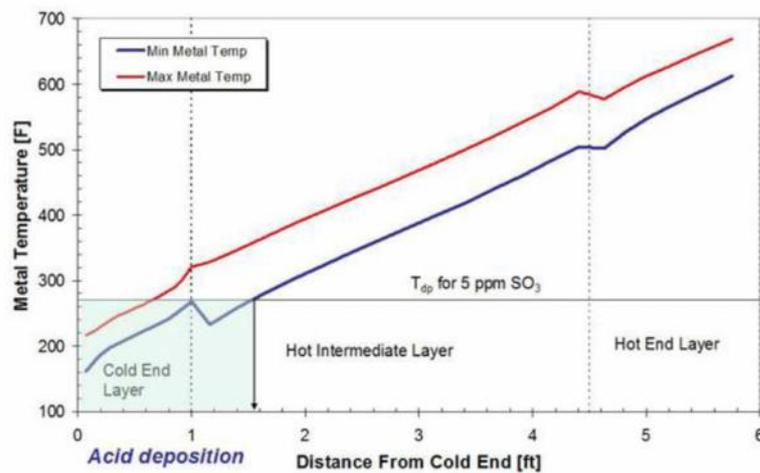
2.5 Element heater temperatur dan pemilihan material

Pada kebanyakan kasus, tingkat korosifitas dari *flue gas* juga dipertimbangkan. Penambahan elemen dapat menyebabkan menurunnya temperatur *flue gas outlet* dan metal temperatur. Menurut Sarunac, 2011, penurunan ini jika tidak dikontrol akan rawan menyebabkan *acid dew temperature* terutama pada daerah *cold end layer*. *Acid dew temperatur* merupakan temperatur dimana mulai terjadi kondensasi asam sulfat yang terdapat pada (Gamber 2.12). Gambar 2.13 merupakan *acid deposition zone* pada *air preheater*. Analisa ini digunakan selain untuk menentukan pola operasi juga untuk menentukan jenis material pada *matrix* karena material khusus yang tahan korosi sangat dibutuhkan pada *cold end layer*.

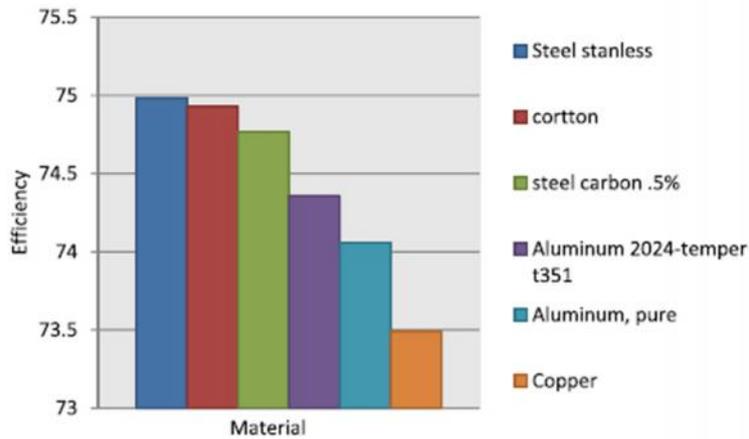
Menurut Kaydan-Hajidavallo,2014, dengan hasil simulasinya terhadap beberapa jenis material pada Gambar 2.14 menunjukkan bahwa meskipun pengaruh material pada efisiensi tidak terlalu signifikan, namun *stainless steel* memiliki efisiensi tertinggi jika digunakan pada *air preheater* karena memiliki *thermal diffusivity* yang paling rendah. Meskipun demikian, *stainless steel* tidak banyak digunakan sebagai elemen heater karena lebih rentan terhadap korosi *dew point*.



Gambar 2.12. Acid dew point temperature, Sarunac 2011.



Gambar 2.13 Acid deposition zone pada Ljungstrom air preheater, Sarunac 2011.



Gambar 2.14 Efek material plat terhadap efisiensi *airpreheater*, Kaydan-Hajidavallo, 2014

Tabel 2.1 Properti material *Cor-Ten Steel* , Kaydan-Hajidavallo, 2014

Jenis Material	Thermal Diffusivity, m^2/s	Thermal Conductivity, $W/m.K$	Heat Capacity, $J/kg.K$	Density, kg/m^3
Cor-Ten Steel	$10^{-6} \times 7.6$	25	460	7700

Tabel 2.2 Komposisi kimia material *Cor-Ten steel grade A* , Wikipedia

Grade	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	V	Ni
Cor-ten A	0.12	0.25-0.75	0.20-0.50	0.01-0.20	0.030	0.50-1.25	0.25-0.55		0.65

Penggunaan *Cor-Ten steel* merupakan jenis material yang paling umum digunakan dalam aplikasi ini, karena selain *thermal diffusivity*-nya tergolong rendah, *cor-ten steel* merupakan *weathering steel*, yaitu paduan steel yang dikembangkan sedemikian rupa untuk meningkatkan resistensi terhadap korosi atmosfer. Efek tahan korosi ini dihasilkan oleh distribusi dan konsentrasi paduan pada permukaannya yang dapat membentuk *protective layer* berbentuk seperti *rust* pada permukaannya bila ter-expose pada kondisi lingkungan atmosfer. *Layer* ini melindungi permukaan logam dan melakukan regenerasi secara terus menerus pada saat terkena perubahan kondisi cuaca/lingkungan. Jenis *cor-ten steel* ASTM grade A-606-04 – high strength low alloy (HSLA) steel dengan corrosion resistance improvement ASTM G101-04 merupakan

material yang paling standar digunakan pada *air preheater* (Strom, 2011). Adapun properti dan komposisi kimia dari *Cor-Ten steel* dapat dilihat pada tabel 2.1 dan 2.2

2.6 Permodelan numerik dengan fluent 6.3

Computational fluid dynamics (CFD) merupakan perangkat analisa sistem dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, momentum, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain didasarkan simulasi berbasis komputer. CFD hakekatnya adalah perangkat *software* menggunakan *finite volume method* dengan memperlakukan fluida menjadi volume kecil-kecil dan melalui algoritma tertentu untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju alir massa (*mass flow rate*). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida, perpindahan panas dan massa, dan lain-lain untuk dapat menginterpretasikan hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence* model, spesifikasi parameter dan *grid generation*) kemudian *processing*, dan *postprocessing* (*visualization* dan *data treatment*).

Kaydan-Hajidavalloo, 2014 melakukan simulasi numerik 3D menggunakan *software* CFD Fluent *three section rotary air preheater* dengan menggunakan *matrix* sebagai poros media untuk mengetahui pengaruh rotational speed pada *matrix*, laju alir masa fluida, *matrix* material dan temperatur *air inlet* pada performa *air preheater*. Dalam simulasinya tersebut, Kaydan-Hajidavallo menggunakan persamaan persamaan numerik sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad (2.1)$$

Reynold *number* digunakan untuk mengetahui menentukan jenis aliran, apakah *laminar* ataupun *turbulent*.

Untuk mensimulasikan aliran dan perpindahan panas pada *heat exchanger*, pemodelan numerik dapat dilakukan menggunakan persamaan Navier-Stokes pada poros medium untuk menghitung continuity dan momentum, sebagai berikut:

$$\gamma \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f v) = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho_f \left[\gamma^{-1} \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma^{-2} (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{k} v \quad (2.3)$$

Persamaan energi untuk fasa *solid* dan *liquid* yaitu :

$$(1 - \gamma)(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \gamma) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \gamma) q_s'' \quad (2.4)$$

$$\gamma(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C_p)_f v \cdot \nabla T_s = \gamma \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \gamma q_f'' \quad (2.5)$$

Secara umum, persamaan energi untuk fasa *solid* dan *liquid* harus diselesaikan secara terpisah (*local thermal non equilibrium condition*), namun jika Sparrow number pada media adalah diatas 100, *local thermal equilibrium* dapat diaplikasikan. Sparrow number didapat dengan persamaan dibawah ini:

$$Sp = \frac{2hL^2}{K_m D_h} \quad (2.7)$$

Dengan mengkombinasikan persamaan kedua fase, Persamaan energi untuk kondisi *thermal equilibrium* menjadi:

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f v \cdot \nabla T_s = \nabla \cdot (k_m \nabla T_m) + \gamma q_m'' \quad (2.7)$$

Effectiveness air preheater didapat dengan menghitung rasio dari perpindahan energi terhadap energi maksimum yang dapat ditransfer:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\text{heat transfered}}{\text{Maximum possible heat transfered}} \\ &= \frac{m_{air,in} \times C_{p,air} \times (T_{air,out} - T_{air,in})}{m_{flue,in} \times C_{p,flue} \times (T_{flue,in} - T_{air,in})} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Solver *Moving Reference Frame* digunakan untuk menggabungkan efek rotasi pada *matrix*. Persamaan persamaan algoritma sederhana yang terdapat pada fluent digunakan untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes sebagai berikut:

- Persamaan *continuity*

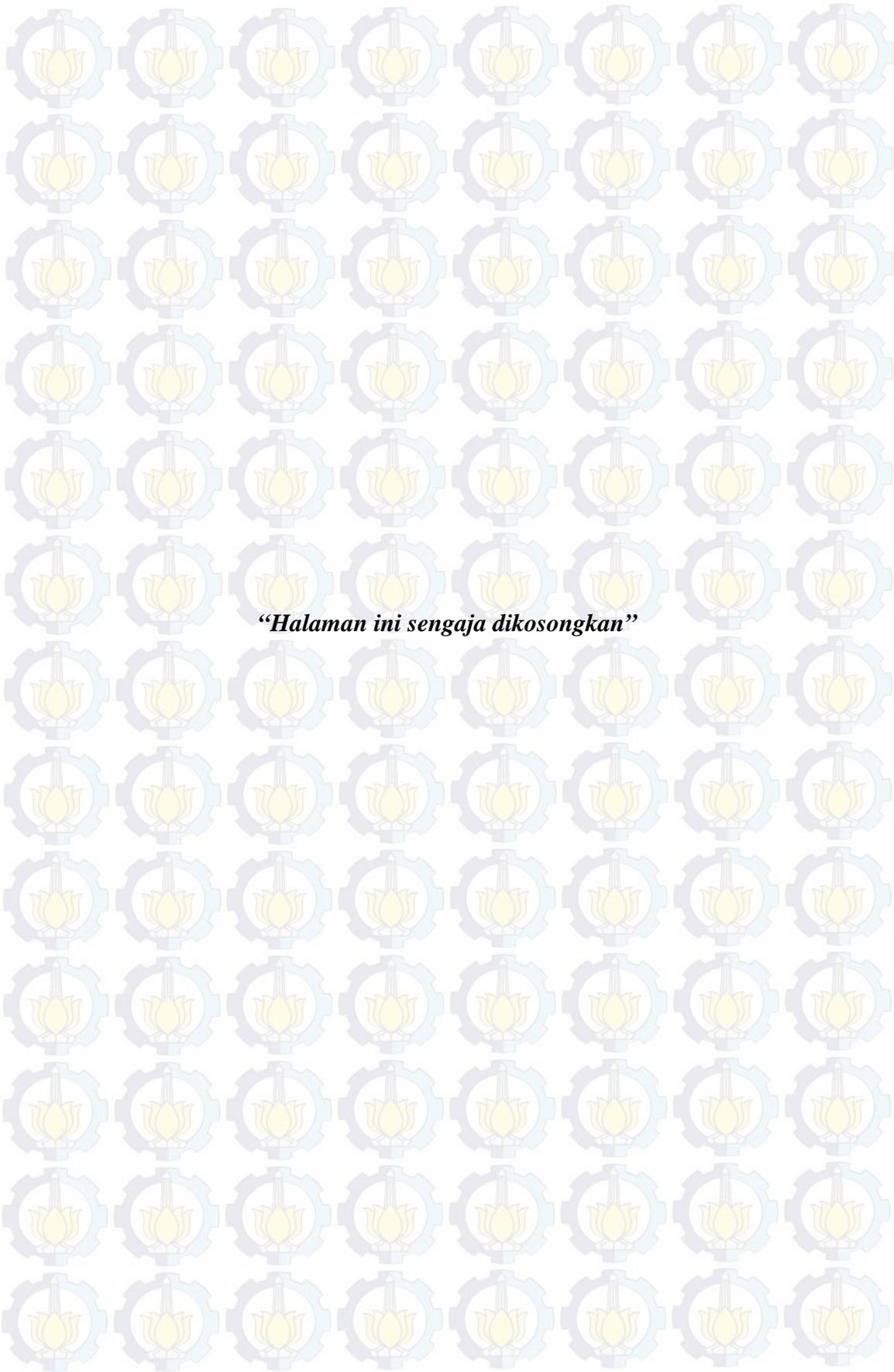
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{v}_r = 0 \quad (2.9)$$

- Persamaan Momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r \bar{v}) + \rho (\bar{\omega} \times (\bar{v} - \bar{v}_t)) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_r + F \quad (2.10)$$

- Persamaan Energi

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r H + p \bar{\tau}_r) = \nabla \cdot (k \nabla T + \nabla \cdot \bar{\tau} \cdot \bar{v}) + S_h \quad (2.11)$$



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3

METODOLOGI

3.1 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan analisa dan simulasi CFD mengenai karakteristik aliran dan *heat transfer* pada *rotary regenerative heater*, terdapat beberapa tahap yang dilakukan:

1. Studi kasus

Studi kasus diambil dari peralatan air preheater yang terpasang pada primary air line B PLTU Paiton unit 2, dimana direncanakan modifikasi peralatan *air preheater* untuk meningkatkan performa unit pembangkit. Terdapat beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan pada modifikasi tersebut sehingga dibutuhkan penelitian ini.

2. Studi pustaka

Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas dan metodologi yang digunakan, maka dilakukan studi pustaka yang berkaitan dengan cara kerja, karakteristik, persamaan persamaan numerik dalam analisa serta permodelan *air preheater*. Studi literatur diperoleh dari *e-book* dan jurnal yang berkaitan dengan topik permasalahan.

3. Pengumpulan dan pengolahan data aktual

Data aktual didapat dari *database* aktual PLTU Paiton 1-2 berupa dimensi geometri dan data operasi dari sistem yang akan ditinjau. Data ini diperlukan sebagai data primer dan *input* untuk permodelan, simulasi dan proses analisa.

4. Pemodelan dan simulasi

Tahapan ini diawali dengan *pre-processing* dengan bantuan *software* gambit. Setelah domain dibuat, selanjutnya di-*export* dan dilakukan *processing* berupa proses simulasi dari *domain* sistem yang telah dibuat dengan fluent. Simulasi dilakukan dengan memodelkan secara 3 dimensi kondisi aktual sebagai validasi dan kondisi modifikasi dengan variasi elemen profil pada *intermediate* layer *air preheater* dan variasi kecepatan rotasi rotor. Pada akhir simulasi, dilakukan *post-processing* dengan menampilkan hasil simulasi berupa kontur distribusi temperatur dan kontur tekanan, kecepatan dan vektor aliran yang terjadi.

5. Pengolahan dan analisa data hasil simulasi

Setelah proses simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk data visual untuk dianalisa secara kualitatif, dan

juga diolah dalam bentuk tabel dan grafik sehingga dapat dianalisa secara kuantitatif. Dari kedua parameter tersebut, dapat dibahas fenomena dan karakteristik perpindahan panas aliran dan distribusi temperatur pada *air preheater* terhadap masing masing variasi yang disimulasikan

6. Penyusunan Laporan

Keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dan hasil dari penelitian yang telah dibahas, kemudian disusun dalam bentuk laporan tesis yang sistematis.

3.2 Data

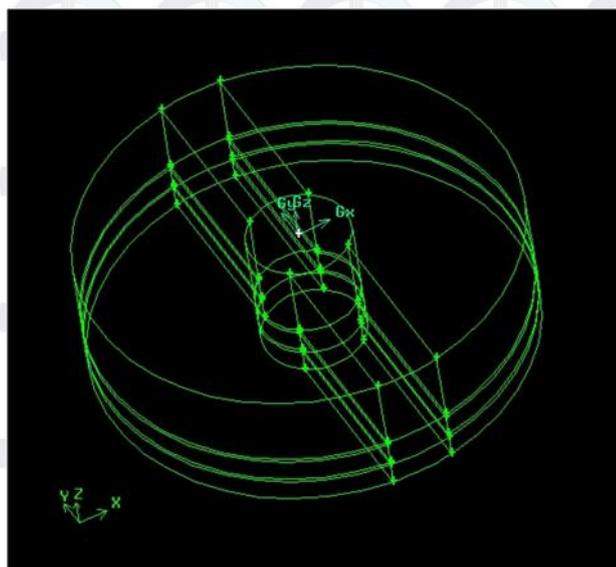
Sebelum melakukan simulasi *air preheater*, diperlukan data yang digunakan sebagai acuan dalam pembuatan domain dan pengaturan nilai kondisi batas. Geometri silinder *air preheater* pada Lampiran I

3.3 Tahap *pre-processing*

Tahap *pre processing* merupakan tahap awal untuk menganalisa pemodelan CFD. Tahap ini terdiri dari pembuatan geometri, *meshing*, dan penentuan kondisi batas menggunakan *software* Gambit 2.4.6. Tahapan dalam *pre-processing* antara lain sebagai berikut:

3.3.1 Domain pemodelan *air preheter*

Dalam proses *pre-processing* dilakukan pemodelan *air preheater* pada Gambit. Gambar 3.1 menunjukkan domain yang akan disimulasikan.

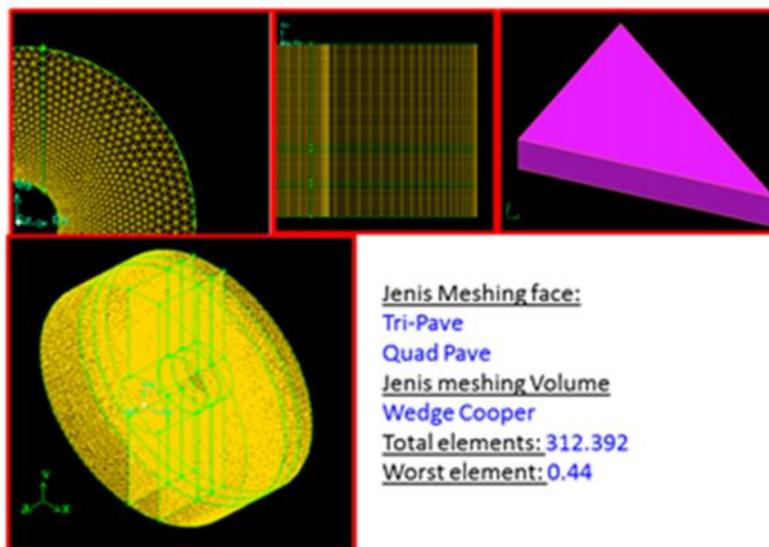


Gambar 3.1 Pemodelan *air preheater* pada gambit

3.3.2 Meshing dan Kondisi Batas

Pembuatan *mesh* elemen hingga (*meshing*) adalah pembagian model solid menjadi elemen-elemen kecil sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Pembuatan *mesh* dilakukan dengan metode *bottom-up*, yaitu *mesh* dibuat dari *entity* geometri yang paling rendah, yaitu garis, kemudian bidang dan yang terakhir adalah volume. Gambar 3.2 merupakan domain yang telah di *mesh* pada *base line inlet header* disusun dengan menggunakan *mesh* face jenis *tri-pave* dan *quad-map* serta *mesh* volume *wedge-cooper*.

Kondisi batas atau *boundary condition* dan *momentum condition* yang digunakan dirangkum pada Tabel 3.1 didefinisikan pada Gambit. Kondisi batas ini juga digunakan sebagai pembatas antara daerah yang dilalui *flue gas* dan *primary air*. Selanjutnya geometri di *export* dalam format *.msh* dan selanjutnya di lakukan *processing* pada *software* Fluent 6.3.26.



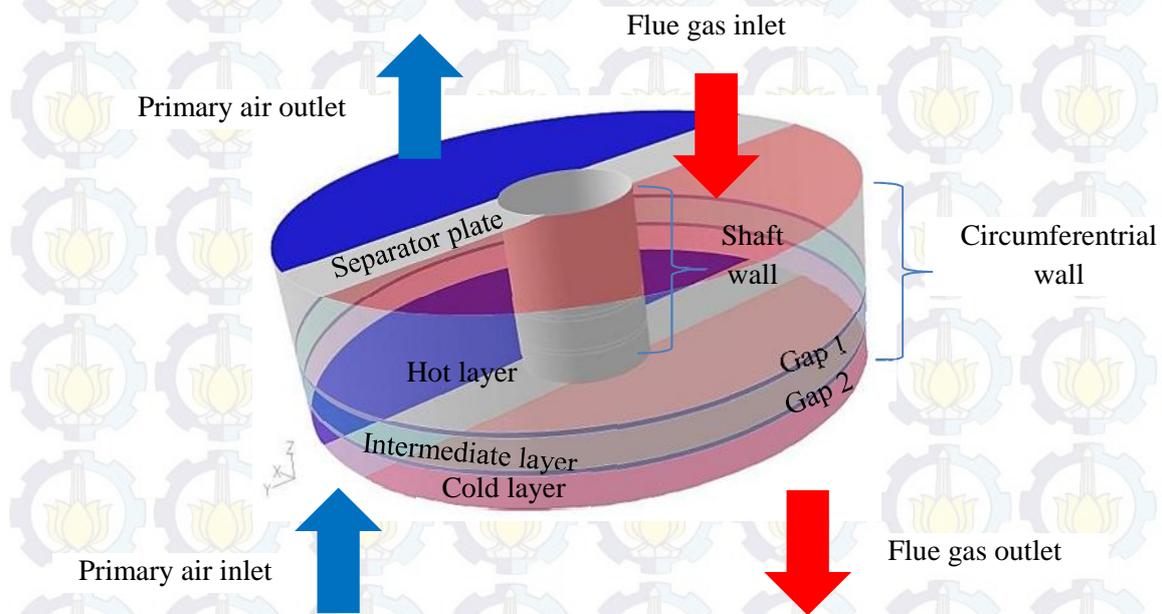
Gambar 3.2. Meshing pada base line.

Boundary Condition			Momentum		
No	Name	Type	No	Name	Type
1	Separator plate top	Wall	A	Hot Layer	Porous
2	Separator Plate bottom	Wall	B	Gap 1	Fluid
3	Cirwall hot	Wall	C	Intermediate layer	Fluid/Porous
4	Cirwall gap 1	Wall	D	Gap 2	Fluid
5	Cirwall intermediate	Wall	E	Cold layer	Porous
6	Cirwall gap 2	Wall			
7	Cirwall cold	Wall			
8	Shaft wall hot	Wall			
9	Shaft wall gap 1	Wall			
10	Shaft wall intermediate	Wall			
11	Shaft wall gap 2	Wall			
12	Shaft wall cold	Wall			
13	Flue gas inlet	Pressure Inlet			
14	Flue gas outlet	Pressure Outlet			
15	Primary air inlet	Pressure Inlet			
16	Primary air outlet	Pressure Outlet			

Tabel 3.1 Kondisi batas dan momentum pada *base line*

3.4 Tahap Processing

Processing merupakan langkah kedua dalam melakukan simulasi numerik dengan CFD. Dalam proses ini pemodelan dilakukan dengan menggunakan software *Fluent* 6.3.26. Tahap ini terdiri dari beberapa langkah yaitu sebagai berikut:



Gambar 3.3. Kondisi batas dan kondisi momentum pada *Fluent*

3.4.1 Mengimpor dan Memeriksa Mesh

Mesh model yang telah dibuat di Gambit harus dibuka dahulu di Fluent agar dapat melakukan analisis sesuai yang diinginkan. Untuk membuka *mesh* model dilakukan melalui File => Read => Case. *File* yang dibuka adalah *file* dengan ekstensi *.msh. *mesh* model yang telah dibuka harus dicek terlebih dahulu. Pengecekan *mesh* dilakukan supaya ketika terjadi kesalahan tidak melanjutkan ke langkah selanjutnya. Proses pengecekan ini dilakukan dengan Grid => Check.

3.4.2 Konversi Satuan

Pada fluent, semua dimensi geometri dianggap dalam satuan meter. Satuan geometri pada Gambit dibuat dalam milimeter sehingga satuan harus diubah menjadi meter melalui Grid => Scale.

3.4.3 Mendefinisikan Model

- *Solver*

Solver yang digunakan adalah *Pressure Based* dengan kondisi waktu *Steady*. *Porous Formulation* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *physical velocity formulation*. *Physical velocity formulation* dianggap lebih valid karena dalam formulasi ini perbedaan kecepatan fluida ketika memasuki porous media diperhitungkan dalam proses kalkulasi Fluent.

- *Energy*

Model akan dianalisa temperatur dan perpindahan panas, sehingga persamaan energy harus diaktifkan.

- *Viscous*

Sebelum menentukan model *viscous*, perlu dihitung nilai *Reynolds Number* untuk mengetahui jenis aliran yang terjadi laminar atau turbulen pada *air preheater*.

Perhitungan *Reynolds Number* menggunakan persamaan 2.1 berikut:

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu}$$

Jika data yang diketahui adalah *bulk inlet mass flow rate* atau \dot{m} , dimana

$$\dot{m} = \rho v n. A_H \quad (3.1)$$

$$D_H = \frac{n \cdot A_H}{P} \quad (3.2)$$

Maka *Reynold number* dapat dihitung :

$$Re = \frac{\rho \frac{\dot{m}}{\rho \cdot n \cdot A_H} \frac{4 \cdot n \cdot A_H}{n \cdot P}}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\mu \cdot n \cdot P} \quad (3.3)$$

D_H adalah diameter *hydraulic*, A_H merupakan luas *hydraulic close channel single cell* profil DU atau NF6. n merupakan jumlah *cell matrix* dalam 1 luasan *inlet air preheater*, ρ adalah massa jenis fluida, μ adalah *viscosity*

Properti *flue gas* dan *primary air* dianggap sama dengan *ambient air*. Nilai *mass flow rate combustion air* pada yang melalui *primary air* dapat dilihat dari *display Central Control Board (CCB)* bersama *total air flow*, sedangkan *mass flow rate primary air* dihitung proporsional sesuai dengan *ratio* antara *primary air flow* dan *total air flow* (nilai *ratio* didapat berdasarkan data aktual yang ada di CCB) yang dirangkum pada Tabel 3.2 Sehingga jenis aliran dari masing masing stream dapat diketahui sebagaimana pada Tabel 3.3. Nilai pada masing masing *stream* lebih dari 2300, maka jenis aliran merupakan *turbulent*, sehingga model *solver viscous* yang digunakan adalah *k-epsilon*.

Tabel 3.2 Perhitungan *mass flue rate flue gas* dan *primary air* yang melalui PAH B

<i>Mass Flow Rate Calculation</i>		
Data	Value	Unit
Primary Air (PA)	414459.77	kg/hr
Secondary air	1238546.78	kg/hr
Total Air flow	1653006.55	kg/hr
Ratio (PA/total)	0.25	
Mass flow batubara	196690.00	kg/hr
Ash content in fuel	5.49	%
Ash mass flow	10798.28	kg/hr
asumsi bottom ash	2.00	%
Fly ash on bottom ash	3933.80	kg/hr
Flue gas pass PAH B	1845762.75	kg/hr
((Total air+batubara)-bottom ash) x ratio)/2	256.36	kg/s
Primary air pass PAH B	414459.77	kg/hr
	57.56	kg/s

Tabel 3.3 Penentuan jenis aliran.

Stream	Profile	Mass flow rate channel, kg/s	Area channel mm ²	Area cell mm ²	cell number	Mass Flow rate profile, kg/s	viscosity kg/m-s	Wetted perimeter, mm	Reynold Number	flow type
Primary Air	DU	57.56	9172217.8	264.33	29148.41	0.001658878	1.79E-05	2820619.766	4562.03	Turbulent
	NF6	57.56	9172217.8	333.63	21444.10	0.002093807	1.79E-05	2233377.418	5761.56	Turbulent
Flue gas	DU	256.36	9172217.8	264.33	29148.41	0.007387676	1.79E-05	2820619.766	20316.62	Turbulent
	NF6	256.36	9172217.8	333.63	21444.10	0.0093246	1.79E-05	2233377.418	25658.65	Turbulent

3.4.4 Mendefinisikan Material

Properti *flue gas* dan *primary air* dianggap sama sebagai *ambient air* dan didefinisikan sebagai *fluid* sedangkan *Cor-Ten steel* merupakan *Solid*. Property *fluid* didefinisikan pada Tabel 3.4 sedangkan *Cor-Ten Steel* pada Tabel 2.1

3.4.5 Operating Conditions

Operating conditions menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar domain analisa. Sebagai acuan, kondisi operasi menggunakan *default fluent* sebesar 101325 pascal pada koordinat (0,0,0)

3.4.6 Boundary Conditions

Boundary conditions digunakan untuk menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran. Untuk semua wall, dianggap *stationary* dan *insulated* atau tidak terjadi perpindahan panas. Kondisi batas untuk *flue gas inlet-outlet* dan *primary air inlet-outlet* dapat dilihat pada Tabel 3.5. Sedangkan kondisi batas untuk momentum dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.4 Properti *ambient air*

Property	Unit	Ambient Air
Density	kg/m ³	1.225
Heat Capacity, Cp	J/kg-k	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	0.0242
Viscosity	kg/m-s	1.7894x10 ⁻⁵

Tabel 3.5 Parameter inlet-outlet pada boundary condition

	Boundary Condition			
	Flue gas inlet		Primary air Inlet	
Target mass flow rate	57.56	kg/s	255.54	kg/s
Pressure inlet	-1137.61	Pascal	8120.2	Pascal
Pressure Outlet	-2540.01	Pascal	7659.27	Pascal
Temperature inlet	332	C	31	C

Tabel 3.6 Kondisi batas momentum

Boundary Condition of Momentum					
Momentum	Hot layer	Gap 1	Intermediate	gap 2	Cold layer
Material Name	Air	Air	Air	Air	Air
Poros zone	ON	OFF	OFF/ON	OFF	√
Motion					
Rotation direction	Z				Z
Motion type	MRF	MRF	MRF	MRF	MRF
Speed (rpm)	2.2		0/2.2		2.2
Poros Zone					
Direction 1	X		X		X
Direction 2	Y		Y		Y
Viscous resistance	Dihitung pada Bab 4				
Inertial Resistance					
Fluid porosity (kaydan,2014)	0.84		0.84/0.78		0.78
Solid Material	Corten	Corten	Corten	Corten	Corten

3.4.7 Parameter Kontrol Solusi

Dalam kontrol solusi terdapat beberapa parameter yaitu:

- Faktor *Under-Relaxation*

Faktor *Under-Relaxation* merupakan faktor untuk menstabilkan proses iterasi pada *solver segregated*. Semua parameter diatur pada kondisi *default*. Menurunkan faktor *under-relaxation* dapat meningkatkan konvergensi, tetapi tidak boleh lebih kecil dari 0.2.

- Diskritisasi (Metode Interpolasi)

Metode diskritisasi yang dipilih adalah *First-Order Upwind*. Untuk tekanan dipilih *Standard*.

- *Pressure Velocity Coupling*

Untuk *pressure velocity coupling* dipilih SIMPLE sesuai skema *default*.

3.4.8 Inisialisasi Medan Aliran

Proses iterasi memerlukan inisialisasi (tebakan awal) sebelum memulai perhitungan. Untuk simulasi ini inisialisasi dihitung dari kondisi batas *pressure inlet primary air*.

3.4.9 Melakukan Perhitungan/ Iterasi

Sebelum melakukan perhitungan, harus ditentukan terlebih dahulu kriteria konvergensi. Kriteria konvergensi adalah kesalahan / perbedaan antara tebakan awal dan hasil akhir dari iterasi yang dilakukan Fluent pada masing-masing persamaan yang digunakan pada kasus tersebut. Semua kriteria diatur 10^{-5} kecuali persamaan energi sebesar 10^{-6} .

Ditentukan jumlah iterasi yang akan dilakukan. fluent akan berhenti melakukan iterasi jika telah konvergen. Apabila pada jumlah iterasi yang telah ditentukan belum konvergen, maka ditambah lagi jumlah iterasi sampai mencapai konvergen.

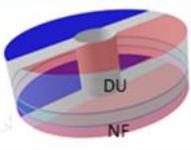
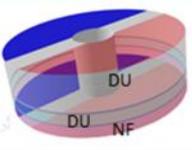
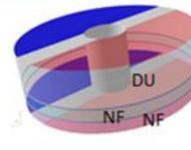
3.5 Post Processing

Proses ini merupakan proses akhir dari simulasi. Dimana hasil simulasi berupa data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif berupa visualisasi aliran, kontur temperatur dan kontur tekanan. Data kuantitatif berupa grafik yang diolah dengan *software* Microsoft Excel 2010 berupa temperatur dan *pressure*.

3.6 Rancangan penelitian

Dalam rencana penelitian ditentukan variasi apa saja yang akan diambil sebagai input penelitian. Kondisi aktual digunakan sebagai validasi awal dan membandingkan temperatur hasil simulasi dengan temperatur aktual operasi. Sedangkan variasi digunakan untuk mendapatkan respon yang paling optimal secara kualitatif maupun kuantitatif. Adapun rancangan penelitian ini di rangkum dalam Tabel 3.7 dan 3.8

Tabel 3.7. Variasi input dalam rancangan penelitian

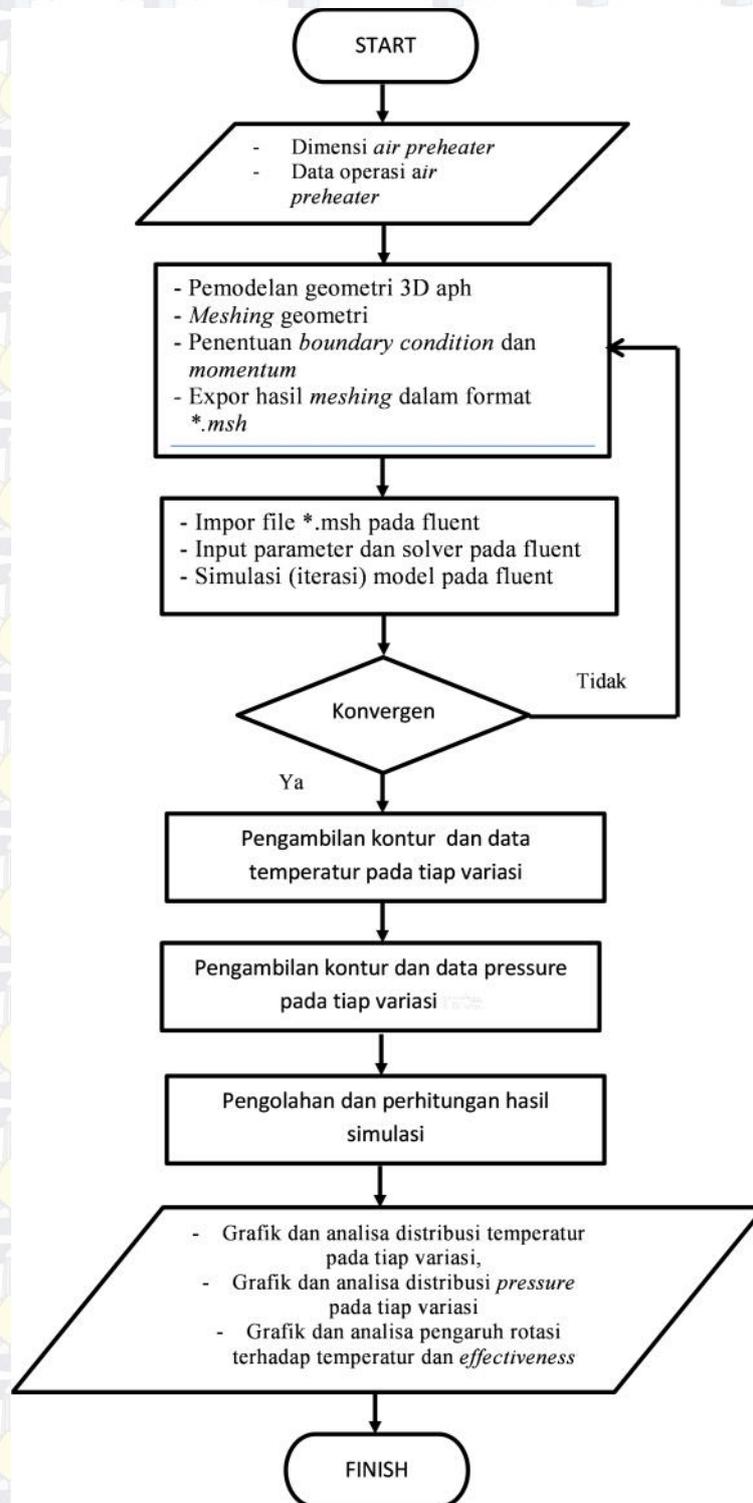
Respon (kontur dan grafik)	Variasi konfigurasi Elemen Heater (2.2 rpm)		
	Initial	Variasi 1	Variasi 2
			
Temperatur			
Pressure			

Tabel 3.8. Variasi input dalam rancangan penelitian

Respon	Variasi Rotational Speed (rpm)						
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Temperatur Flue gas outlet							
Temperatur Primary air outlet							
Effectiveness							

3.7 Diagram Alir

Secara singkat, berbagai tahapan simulasi numerik *air preheater* dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Diagram alir simulasi numerik *air preheater*

3.8 Jadwal kegiatan pelaksanaan penelitian

Penelitian simulasi ini akan dilaksanakan dalam waktu 5 bulan bertempat di jurusan Teknik Mesin FTI-ITS. Jadwal kegiatan pelaksanaan tesis ditunjukkan pada Tabel 3.9 dibawah ini.

Tabel 3.9 Jadwal Kegiatan Pelaksanaan Tesis

No	Kegiatan	Bulan I				Bulan II				Bulan III				Bulan IV				Bulan V			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	<u>Studi pustaka</u>																				
2	Analisa permasalahan																				
3	<u>Membuat ringkasan (road map)</u>																				
4	Penentuan topik																				
5	Studi jurnal dan buku terkait topik																				
6	Penentuan variabel <u>penelitian</u>																				
7	Pembuatan proposal <u>tesis</u>																				
8	<u>Pembuatan domain simulasi</u>																				
9	Seminar proposal <u>tesis</u>																				
10	<u>Simulasi dengan FLUENT</u>																				
11	Analisa hasil <u>simulasi</u>																				
12	Penyimpulan hasil <u>simulasi</u>																				
13	Pembuatan <u>tesis</u>																				
14	Sidang tesis																				



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan hasil simulasi (*post processing*) yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengukuran kontur temperatur dan *pressure* pada *flue gas-primary air* baik pada kondisi *initial* maupu pada kondisi modifikasi setelah ditambahkan elemen heater DU maupun NF6 pada *intermediate layer*, serta pengaruh variasi kecepatan rotor. Data yang dianalisa merupakan hasil dari pemodelan numerik menggunakan *software* FLUENT 6.3.26.

4.1 Perhitungan parameter input dalam simulasi

Source term dari *homogenous porous media* terdiri dari 2 komponen yaitu *viscous resistance*, yang merupakan *invers* atau kebalikan dari *permeability*, yaitu kemampuan fluida dalam menembus suatu *porous media* (), serta *inertia resistance* (C_2), yang merupakan resistansi dari adanya aliran suatu fluida. Nilai C_2 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Van Winkle, dimana untuk (*thickness / diameter*) > 1.6 , dan Reynold number > 4000 , koefisien C rata rata adalah 0.98, , sehingga nilai C_2 dapat dihitung sebagai:

$$C_2 = \frac{1}{C^2} \frac{(A_p/A_f)^2 - 1}{t} \quad (4.1)$$

Adapun hasil perhitungan C_2 dapat ditabulasikan pada Tabel 4.1

Viscous resistance merupakan nilai empiris yang didapat dari hasil eksperimen. Namun jika tidak terdapat hasil eksperimen, maka nilai *viscous resistance* didapat dengan melakukan *trial and error* pada Fluent dan membandingkan target *pressure drop* elemen DU dan *pressure drop* total yang melewati *primary air channel*. Nilai *viscous resistance* yang direkomendasikan oleh Kaydan-Hajidavallo adalah $6 \times 10^6 / \text{m}^2$ untuk elemen NF6 dan $2 \times 10^7 / \text{m}^2$ untuk elemen DU, keduanya merupakan *viscous resistance* searah aliran (z), sedangkan untuk nilai x dan y , sebesar $9 \times 10^{10} / \text{m}^2$.

Tabel 4.1 Perhitungan *inertia resistance Coefficient*

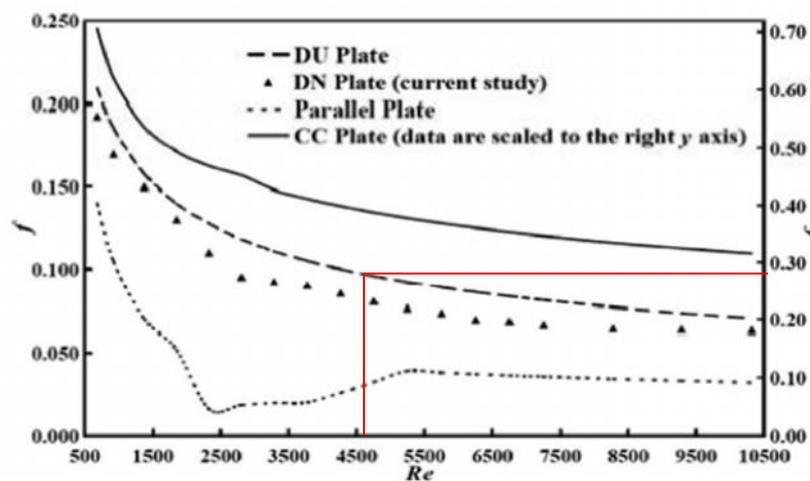
Jenis Elemen	A_p/A_f	C	thickness	C_2
DU	1.19	0.98	1.00	0.43
NF6	1.35	0.98	0.30	2.87

Nilai tersebut dapat divalidasi dengan menghitung nilai *friction factor* pada elemen DU dengan menggunakan persamaan Darcy's *friction factor* sebagai berikut :

$$f = \frac{D_h}{L} \left[\frac{2\Delta P}{\rho v^2} - (k_c + k_e) \right] \quad (4.2)$$

Dimana, K_c dan K_e merupakan *pressure loss inlet-outlet* pada *test core* yang nilainya dapat diabaikan. Nilai f didapat dari grafik eksperimen yang dilakukan Zhang, 2012 seperti pada Gambar 2.11. Untuk *Reynold number* aliran yang melalui elemen DU pada *primary air channel* sebesar 4562.03, sehingga dengan menarik garis menuju sumbu ordinat sebelah kanan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1, didapat *friction factor* sebesar 0.28

Adapun perbandingan antara perhitungan *friction factor* diatas dan simulasi numerik dapat dilihat pada Tabel 4.2. Pada tabel tersebut menunjukkan bahwa besar *pressure drop* pada elemen DU dengan metode simulasi numerik adalah sebesar 418.83 pascal dan didapat nilai error sebesar 1.64% , sehingga nilai *viscous resistance* dari masing masing elemen dapat diterima.



Gambar 4.1. Nilai *friction factor* elemen DU berdasarkan hasil eksperimen

Tabel 4.2 Validasi nilai *pressure drop* elemen DU dengan hasil eksperimen

Zhang,2012 Method					
f	ρ air (Kg/m ³)	L (m)	D_h , DU element (m)	v (m/s)	pressure drop (Pascal)
0.28	1.23	1.00	0.01	5.12	411.98
Simulation Fluent					
Pressure inlet DU (Pascal)		Pressure outlet DU (Pascal)		Pressure Drop (Pascal)	Error %
7659		8077.83		418.83	1.64

4.2 Validasi kondisi *initial* permodelan *airpreheater*

Sebelum melakukan simulasi numerik dengan variasi, terlebih dahulu dilakukan validasi dengan membandingkan properti hasil simulasi kondisi *inisial* dengan kondisi aktual operasional *air preheater*. Properti yang dibandingkan dapat berupa temperatur dan *pressure* yang dapat dilihat pada Tabel 4.2. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa secara umum nilai eror masih dapat diterima yaitu dibawah 5%, sedangkan eror yang paling besar yaitu 10.32% pada *flue gas outlet* terjadi karena properti *flue gas* dianggap sama dengan *ambient air* dan faktor penghambat *heat transfer* seperti *ash fouling* tidak diperhitungkan.

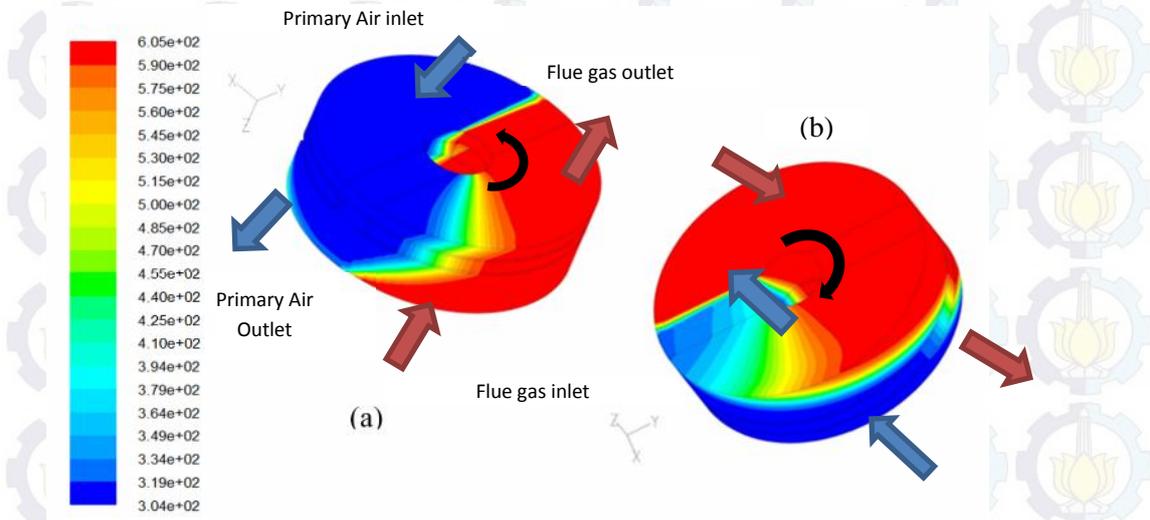
Tabel 4.3 Validasi temperatur dan *pressure* hasil simulasi *initial* dengan kondisi aktual

Boundary Condition	Temperature Validation (centigrade)			Pressure Validation (Pascal)		
	Simulation	Actual	Error	Simulation	Actual	Error
Primary air inlet	31.00	31.35	1.12%	8117.12	8120.20	0.04%
Primary air outlet	257.76	270.35	4.66%	7664.24	7435.81	3.07%
Flue gas inlet	332.00	332.35	0.11%	-1163.11	-1137.61	2.24%
Flue gas outlet	181.31	164.35	10.32%	-2534.96	-2540.01	0.20%

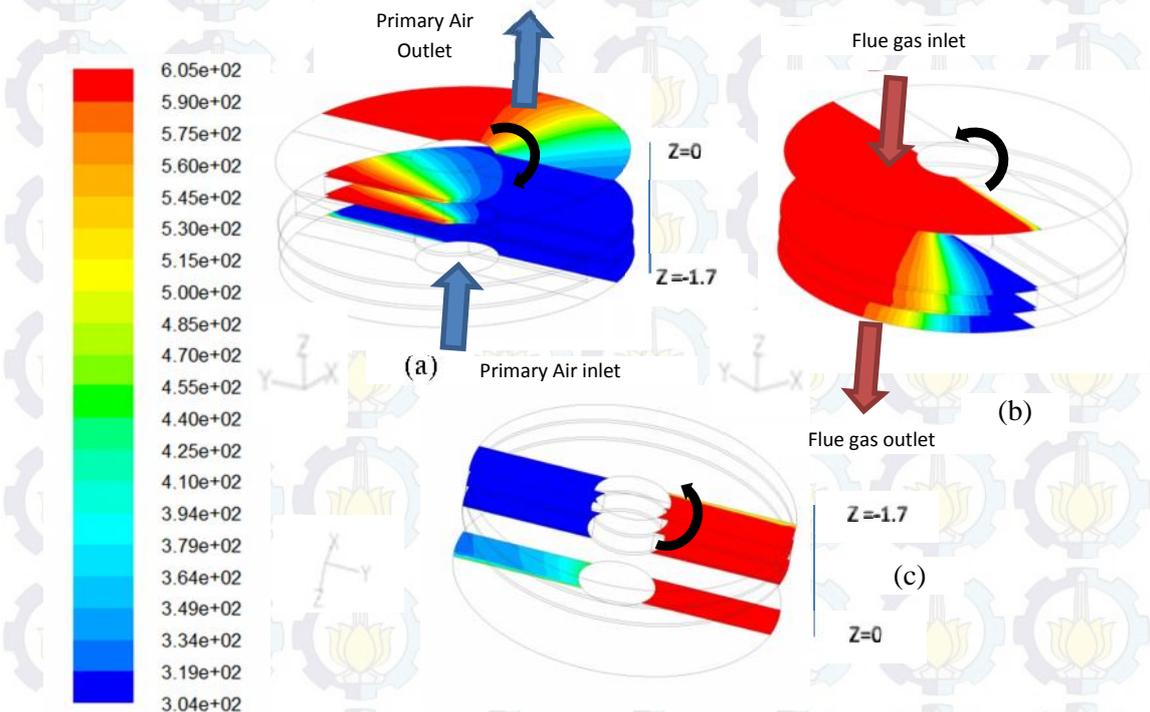
4.3 Analisa temperatur pada kondisi *initial* *air preheater*

Dari simulasi *air preheater* pada kondisi *initial* operasi atau sebelum modifikasi, dapat diketahui distribusi temperatur pada *air preheater*. Gambar 4.2 memperlihatkan distribusi temperatur pada *matrix* dimana posisi *cold layer* dari *air preheater* berada di atas (a), dan posisi *hot layer* berada di atas (b). Gambar 4.3 menunjukkan distribusi temperatur pada irisan sumbu z pada sisi *flue gas* (a), dan *primary air* (b) serta daerah dibawah *separator plate* (c) , Distribusi temperatur pada bidang *inlet* cenderung uniform baik pada *inlet flue gas* maupun *primary air*. *Matrix* temperatur pada *outlet primary air* menunjukkan perubahan secara gradual searah dengan rotasinya. Hal ini terjadi karena fluida yang melalui *outlet air* melewati *matrix* elemen heater yang telah melalui proses pemanasan pada *gas channel* dan mentransfer energinya pada *cold air* dan secara bertahap hingga temperaturnya pun berkurang . Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4.3, yang merupakan pengaruh ketinggian *air preheater* terhadap distribusi temperatur *matrix*, semakin mendekati akhir dari area rotasi pada *primary air channel*, temperatur *matrix* akan menurun mendekati temperatur *primary air inlet*, degradasi kontur temperatur yang serupa juga dapat dilihat bila *matrix* dipandang dari sisi *cold end*. Distribusi temperatur pada bidang vertikal menunjukkan bahwa sisi dengan

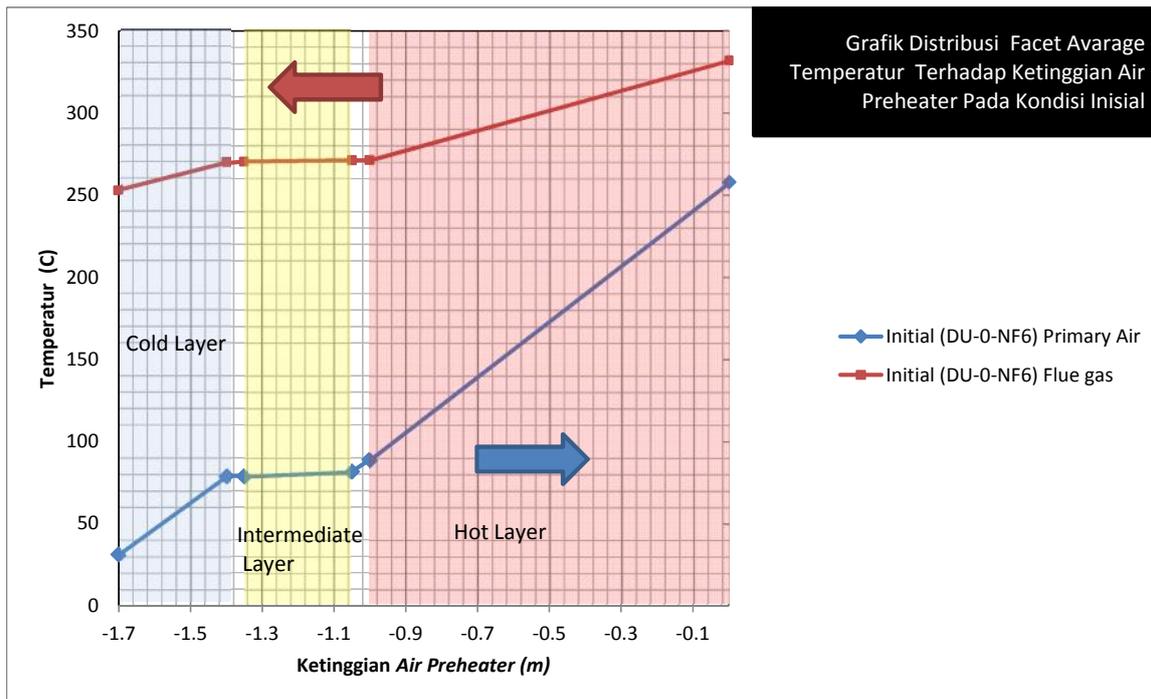
temperatur tertinggi dan sisi dengan temperatur terendah terjadi pada sudut radius maksimum pada *matrix*. Pada daerah dibawah *separator plate* temperatur cenderung *isotherm* dibandingkan dengan daerah lain yang cenderung radial.



Gambar 4.2 Distribusi temperatur *matrix* pada kondisi initial (2,2 rpm)



Gambar 4.3 Distribusi temperatur *matrix* untuk tiap *facet* pada kondisi *initial* (2,2 rpm)



Gambar 4.4 Grafik distribusi temperatur *matrix* pada kondisi *initial* (2,2 rpm)

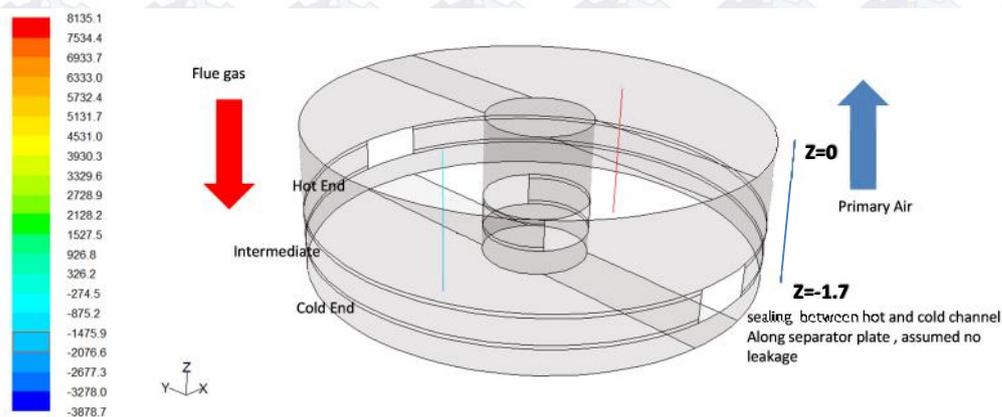
Gambar 4.4 menunjukkan distribusi temperatur pada masing masing posisi *inlet-outlet porous media*. Temperatur *flue gas* berkurang dengan sebanding dengan arah aliran ($z = 0$ ke $z = -1.7$) akibat semakin banyaknya kontak fluida dengan elemen *heater*, energi yang dilepas menuju elemen semakin besar, sehingga temperaturnya pun semakin berkurang sebaliknya temperatur *primary air* bertambah sebanding dengan arah aliran ($z = -1.7$ ke $z = 0$) akibat bertambahnya penyerapan energi panas pada saat melewati susunan *matrix* elemen *heater* yang telah dipanaskan oleh *flue gas*. Kenaikan temperatur yang signifikan terjadi pada saat aliran *primary air* memasuki susunan elemen DU. Meskipun memiliki *porosity* lebih tinggi (0.84) dibandingkan dengan NF6 (0.76) atau tingkat kerapatan *solid* DU yang lebih rendah, namun bentuk profil elemen DU lebih kompleks sehingga *viscous resistance*-nya pun lebih tinggi, luas kontak dengan fluida pun lebih besar sehingga koefisien konveksinya pun semakin besar, akibatnya energi yang dapat diserap maupun dilepaskan juga semakin besar.

Pada Gambar 4.4 juga terlihat bahwa *slop* kemiringan yang menggambarkan perubahan temperatur secara menyeluruh pada aliran *primary air* ($T = 226.87$ C) lebih besar dibandingkan *flue gas* ($T = 79.22$ C). Hal ini terjadi karena laju alir *massa flue gas* hampir 4 kali lebih besar dibanding *primary air*. Secara teori, jika energi yang diserap *primary air* diasumsikan sama dengan energi yang dilepas oleh *flue gas*, dan

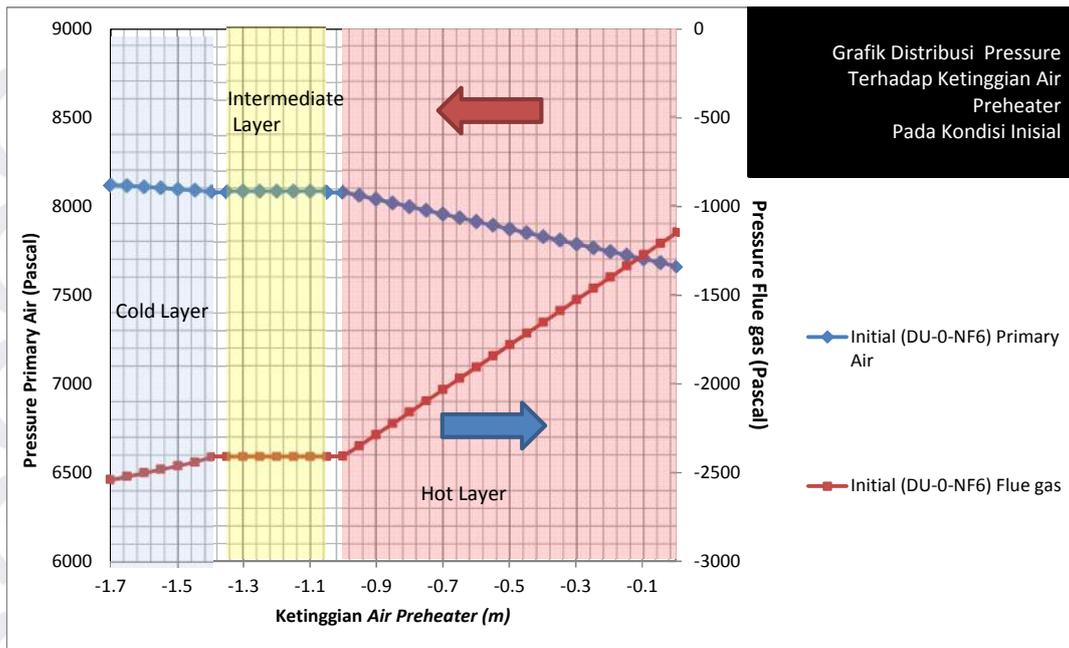
energi sebanding dengan laju alir *massa* dan perubahan temperatur, maka fenomena perbedaan *kemiringan slop* temperatur pada kedua ini sesuai dengan teori.

4.4 Analisa distribusi *pressure* pada kondisi *initial air preheater*

Distribusi *pressure* didalam *air preheater* cenderung seragam pada arah radial sehingga pengambilan data distribusi tekanan dilakukan dengan cara mengambil sample titik pengukuran pada bagian tengah dari masing masing *channel* seperti ilustrasi pada Gambar 4.5. Nilai *pressure* yang didapat di titik sample pada *z* koordinat kemudian diploting pada grafik seperti Gambar 4.6. Titik $Z=0$ merupakan bagian teratas atas dari *air preheater* atau posisi *hot end layer* pada bagian atas. Nilai *pressure* untuk aliran *primary air* ditunjukkan oleh garis *y-ordinat* sebelah kiri sedangkan nilai *pressure* untuk aliran *flue gas* ditunjukkan oleh *y-ordinat* sebelah kanan. Dari grafik dapat dilihat bahwa besar *pressure* menurun berbanding lurus dengan arah aliran (*z*) pada saat melewati *cold end layer* (elemen NF6). Nilai *pressure* pada kedua stream cenderung seragam ketika melewati *intermediate layer*, karena pada bagian ini tidak terdapat susunan elemen *heater*, sehingga nilai *pressure drop*-nya pun sangat kecil. Nilai *pressure* akan turun secara signifikan ketika melewati *hot end layer* (elemen DU). Sebagaimana pada Gambar 4.7, Bentuk profil dan susunan elemen DU memberikan kontribusi *friction factor* yang lebih besar jika dibandingkan dengan NF6 sehingga *pressure drop* aliran pun lebih tinggi pada saat melalui susunan elemen heater ini.



Gambar 4.5 Titik titik pengambilan data distribusi tekanan pada model airpreheater

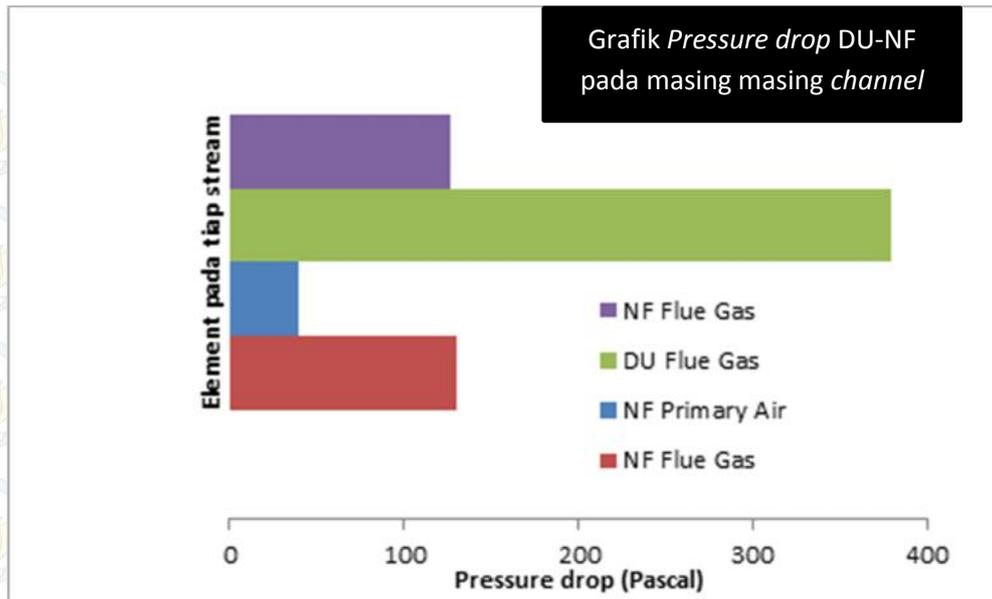


Gambar 4.6 Grafik distribusi tekanan pada model *initial air preheater*

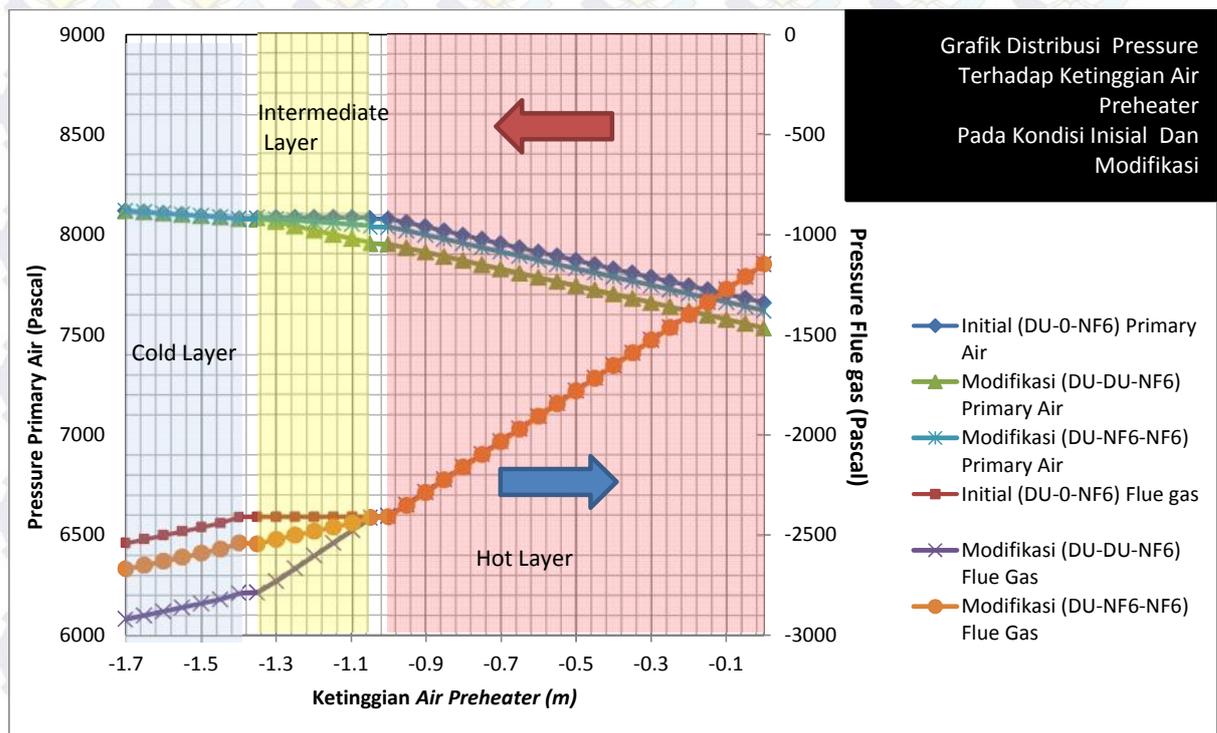
4.5 Analisa pengaruh penambahan elemen heater pada *air preheater*

Dari hasil analisa kondisi *initial air preheater*, didapatkan nilai *pressure drop* dari masing masing aliran yang melalui susunan elemen *heater* yang dimodelkan dalam bentuk *porous media*. Nilai ini kemudian akan digunakan sebagai input dalam *pressure outlet* pada masing masing *boundary condition*, sehingga dapat diketahui distribusi tekanan pada susunan elemen *heater*. Nilai *total pressure drop* dengan adanya modifikasi ini dan nilai temperatur dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam pemilihan jenis profil elemen yang paling optimal digunakan pada intermediate layer. Ukuran dimensi modifikasi pada intermediate layer telah ditentukan sebesar 300 mm, sehingga perbandingan nilai *pressure drop* masing masing elemen yang telah disesuaikan dengan dimensi dapat dilihat pada Gambar 4.7.

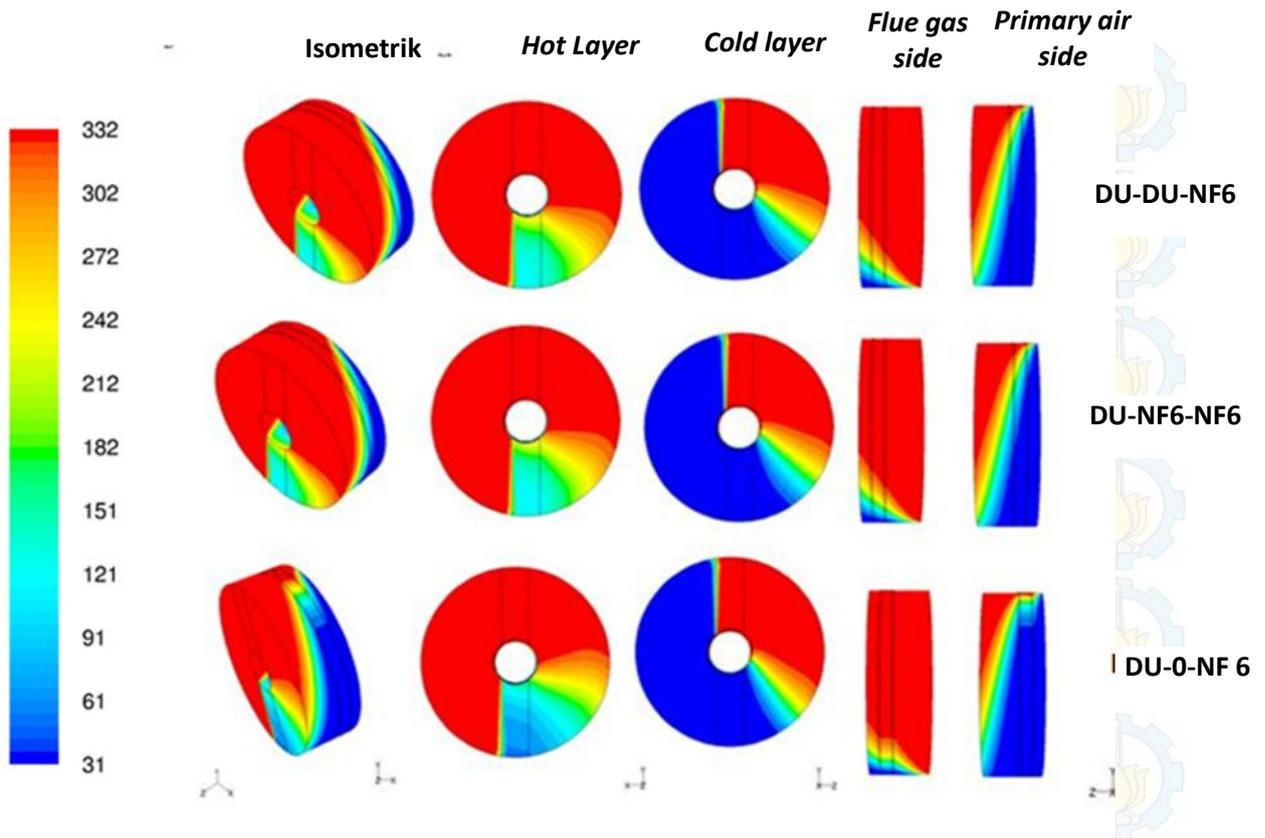
Pada Gambar 4.8, terlihat bahwa nilai pada *pressure outlet* dengan modifikasi (DU-DU-NF6) sebesar -1148.36 pascal pada *aliran flue* dan 7533.37 pascal pada *primary air*, nilainya hampir sama dengan modifikasi (DU-NF6-NF6) yaitu sebesar -1148.42 pascal pada *aliran flue* dan 7619.62 pascal pada *primary air*. Perbedaan nilai ini tidak signifikan terutama untuk *pressure* pada *primary air* yang nilainya masih diatas *primary air duct pressure low alarm*, yaitu sekitar 6227.4 pascal. Sehingga dengan nilai *input pressure* yang sama atau dengan tanpa menambahkan daya *force draft* pada *primary air fan*, modifikasi ini masih layak dilakukan.



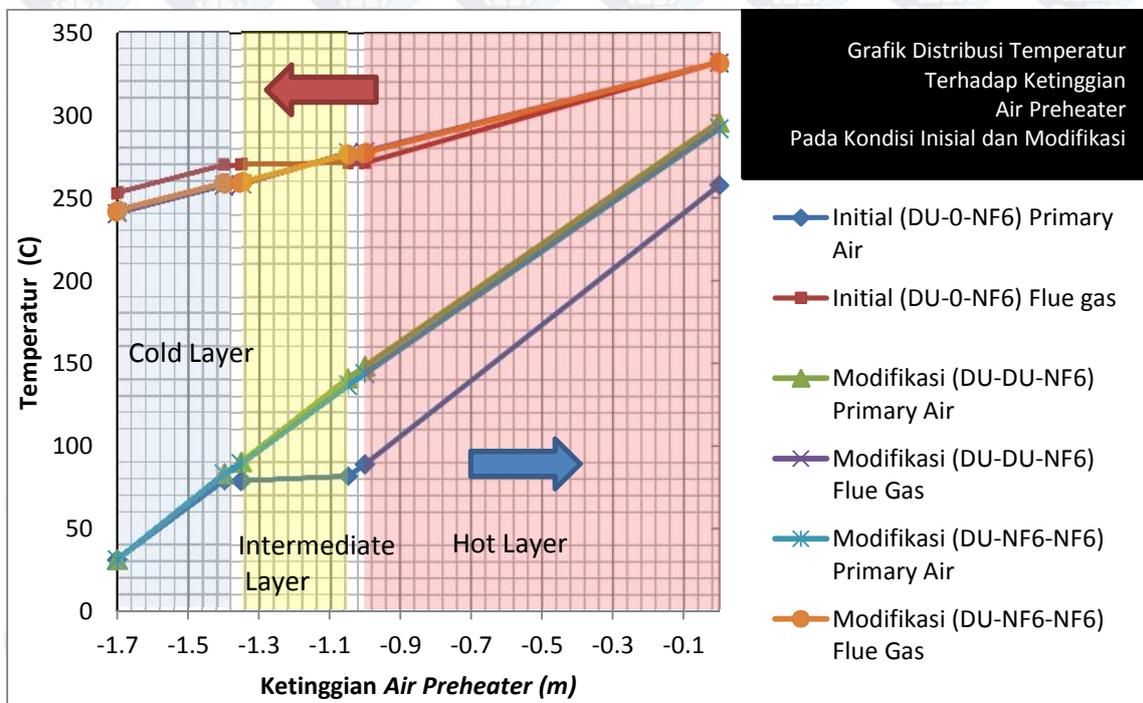
Gambar 4.7 Grafik Pressure drop pada masing masing elemen



Gambar 4.8 Grafik perbandingan distribusi pressure pada masing masing modifikasi



Gambar 4.9 Grafik perbandingan kuantitatif temperatur *air preheater* dengan modifikasi



Gambar 4.10 Grafik perbandingan kuantitatif temperatur *air preheater* dengan modifikasi

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan distribusi temperatur antara kondisi *initial* (DU-0-NF6) dan modifikasi *intermediate layer* (DU-DU-NF6) maupun (DU-DU-NF6) pada kecepatan rotasi 2.2 rpm. Pada kondisi *initial* dipandang dari sisi *flue gas* maupun *primary air*, gradien temperatur searah aliran (Z) disekitar *intermediate layer* cenderung seragam, karena pada bagian tersebut tidak terdapat elemen *heater*, yang berperan dalam proses *heat transfer*, sehingga tidak terjadi proses penyerapan dan pelepasan energi pada elemen, sedangkan pada modifikasi DU maupun NF6 terdapat perubahan temperatur pada *intermediate layer*. Secara visual distribusi temperatur antara ketiga variasi cenderung sama, namun secara kuantitatif terdapat perbedaan nilai distribusi temperatur pada ketiga variasi tersebut untuk 2.2 rpm dapat dilihat pada Gambar 4.10

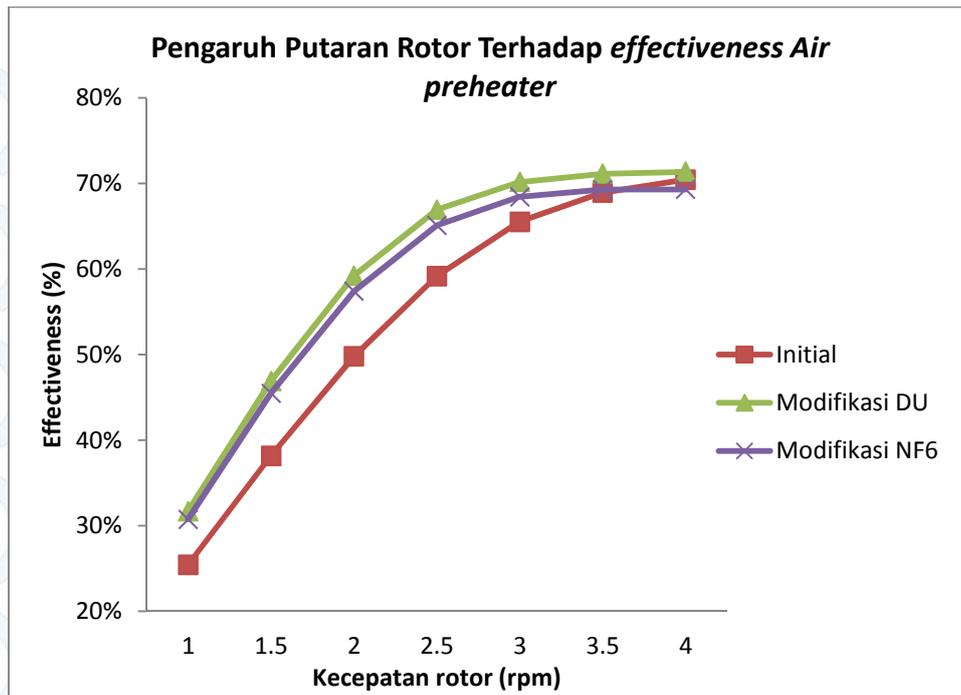
Faktor lain yang perlu dipertimbangkan dari modifikasi ini adalah *metal* temperatur pada *cold end layer* atau *matrix* yang berada paling dekat dengan *flue gas outlet*. Adanya penambahan elemen *heater* pada *intermediate layer* menyebabkan terjadinya penyerapan energi lebih banyak oleh susunan *matrix* yang melalui *flue gas channel*, sehingga berpotensi menurunkan temperatur *outlet flue gas* hingga mencapai *sulfur dew point temperature*. Hal ini berpotensi menyebabkan korosi pada cold end layer matrix sehingga menyebabkan menurunnya effectiveness *air preheater*. *Sulfur dew point temperature* tergantung dari kadar *moisture* dan SO_3 pada *flue gas*. Berdasarkan Gambar 2.12, Dengan kadar *moisture* flue gas PLTU Paiton sekitar 6.2% dan SO_3 sebanyak 5 ppm, maka kondensasi sulfur dapat terjadi pada temperatur 124 C. Untuk mengatasi hal ini pada unit paiton temperatur *outlet flue gas* dijaga minimal sebesar 130 C, sehingga tidak menimbulkan *sulfur dew point corrosion*. Penambahan DU elemen *heater* pada *intermediate layer* menyebabkan penurunan temperatur *outlet flue gas* hingga mencapai 240 C, sedangkan NF sebesar 242 C, sehingga potensi korosi terhadap temperatur *dew point* masih dapat dikendalikan.

Temperatur *primary air outlet* yang dapat dihasilkan dari modifikasi dengan menggunakan DU adalah sebesar 296.02 C, dengan peningkatan efisiensi dari 54% menjadi 63% sedangkan untuk NF6 sebesar 292.10 C, dengan peningkatan efisiensi menjadi 61% (dapat dilihat pada gambar 4.11). Secara umum, perbedaan temperatur *primary air outlet* diantara keduanya tidak signifikan, sehingga kedua jenis elemen dapat digunakan, namun demikian jenis elemen profil yang paling tepat digunakan menurut perhitungan ini adalah DU.

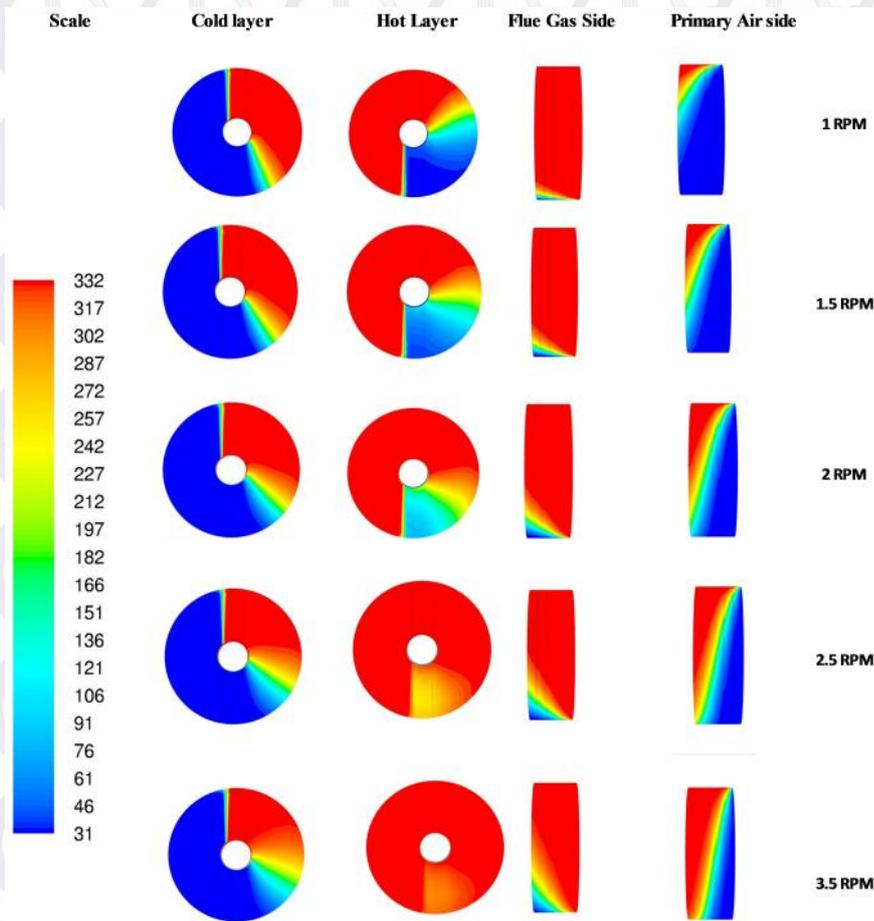
4.6 Analisa pengaruh variasi putaran rotor terhadap *effectiveness air preheater*

Salah satu cara meningkatkan efisiensi *air preheater* adalah dengan meningkatkan putaran rotor. Semakin tinggi putaran rotor, temperatur *primary air* yang meninggalkan *air preheater* menjadi semakin tinggi, sedangkan temperatur *flue gas outlet* menjadi berkurang. Hal ini terjadi karena temperatur kedua fluida, baik *primary air* maupun *flue gas* memiliki periode kontak dengan dinding *matrix* yang sama lebih lama, sehingga perpindahan panas yang terjadi lebih besar dan efisiensinya pun meningkat

Gambar 4.11 merupakan grafik pengaruh kecepatan rotor terhadap *effectiveness air preheater*. *Effectiveness* meningkat secara signifikan dengan semakin meningkatnya putaran rotor, hingga mencapai 3 rpm. Diatas nilai tersebut pengaruh peningkatan kecepatan terhadap temperatur cenderung konstan atau tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan *effectiveness*. Hal ini juga dapat dijelaskan dengan Gambar 4.12 dimana merupakan representasi distribusi temperatur, dengan modifikasi penambahan DU pada *intermedite layer* (DU-DU-NF6), yang dilihat dari berbagai sisi. Distribusi temperatur diilustrasikan dengan degradasi warna yang nilainya dapat dilihat pada skala. Pada putaran rendah (1 rpm), perpindahan panas yang terjadi cenderung lebih kecil dibandingkan dengan variasi putaran yang lebih tinggi. Degradasi temperatur semakin melebar dengan bertambahnya kecepatan, hingga pada kecepatan putar mencapai 3.5 rpm, temperatur *primary air outlet* hampir mendekati temperatur *inlet flue gas*. Putaran rotor yang paling optimal adalah 3 rpm pada modifikasi *intermediate layer* dengan profil elemen DU (DU-DU-NF6) dengan nilai efisiensi sebesar 70%.



4.11 Grafik pengaruh putaran rotor terhadap *effectiveness*



4.12 Pengaruh putaran rotor terhadap distribusi temperatur pada DU-DU-NF6

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

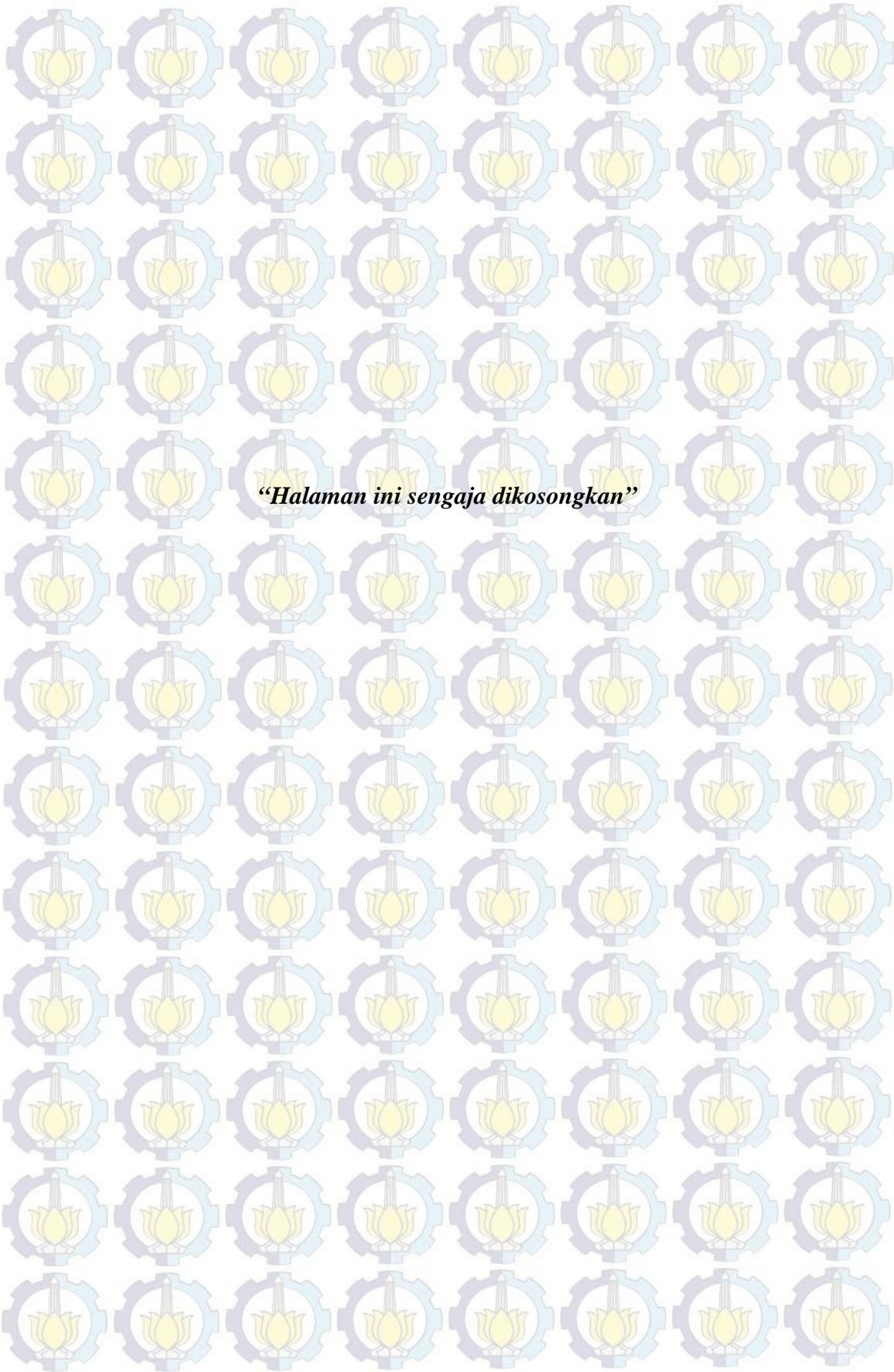
5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi CFD Fluent terhadap *air preheater*, dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Modifikasi dengan penambahan elemen *heater* pada *intermediate layer* baik element DU maupun NF6 tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai *pressure drop*. *Pressure primary air outlet* yang dihasilkan adalah sebesar 7533.37 pascal pada konfigurasi DU-DU-NF6 dan 7619.62 pascal pada konfigurasi DU-NF6-NF6, nilai keduanya masih lebih besar dibandingkan *primary air duct pressure low alarm*, yaitu sekitar 6227.4 pascal, sehingga keduanya dapat digunakan sebagai elemen pada modifikasi *intermediate layer*
2. Penambahan elemen heater pada *intermediate layer* pada element DU menyebabkan penurunan *outlet gas temperature* hingga mencapai 296.02 C dan NF6 sebesar 296.10 C, sehingga potensi korosi terhadap *sulfur dew point temperature* masih dapat dikendalikan.
3. Putaran rotor memberikan pengaruh terhadap *effectiveness*. Modifikasi *intermediate layer* yang paling optimal adalah menggunakan elemen DU dengan putaran sebesar 3 rpm yang mana akan didapatkan efisiensi sebesar 70%

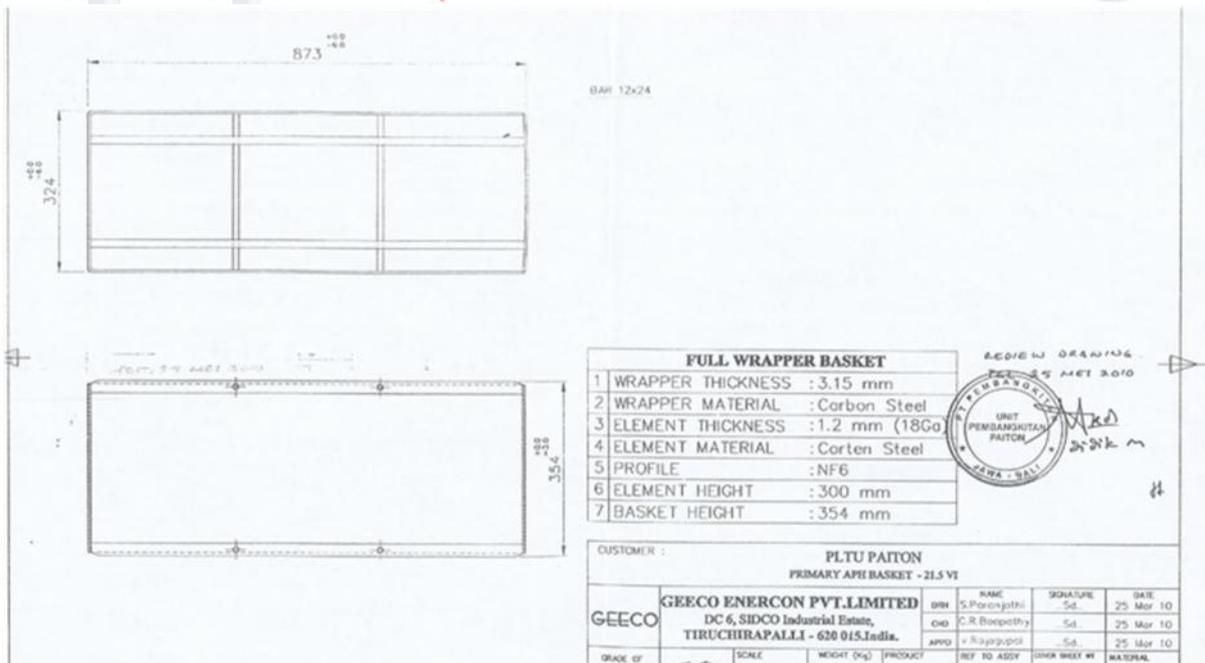
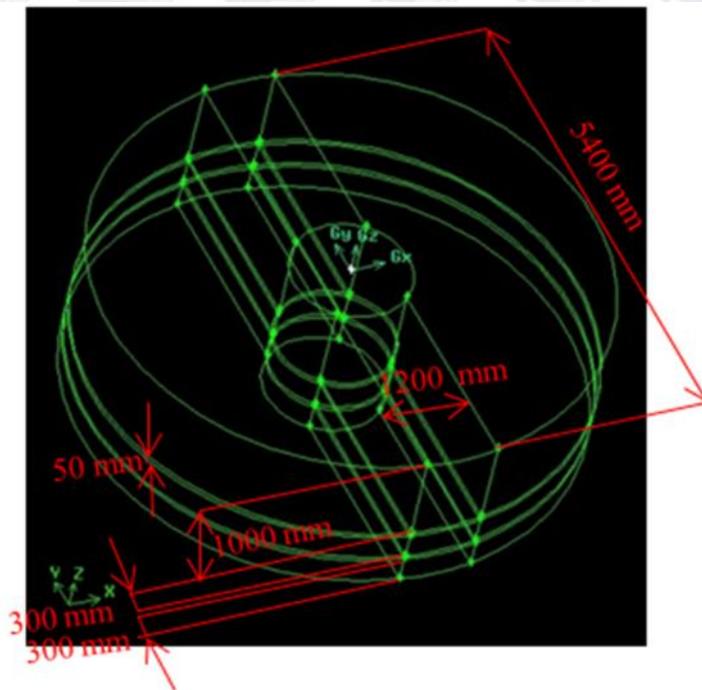
5.2 Saran

1. Untuk meminimalkan eror pada perhitungan, sebaiknya properti *flue gas* yang digunakan adalah properti aktual dari *flue gas* dan mempertimbangkan pengaruh *ash fouling* terhadap perpindahan panas
2. Pengaruh *losses* karena *sealing* pada *airpreheater* sebaiknya dipertimbangkan agar hasil simulasi lebih akurat
3. Pengukuran dengan menggunakan *portable pressure gauge* dan *portable thermocouple* perlu dilakukan sebagai validasi pada pembacaan di CCR (*Central Control Room*)
4. Dilakukan studi eksperimen untuk mendapatkan nilai *viscous resistance* dan *friction factor* pada elemen DU dan NF sehingga perhitungan validasi lebih akurat.



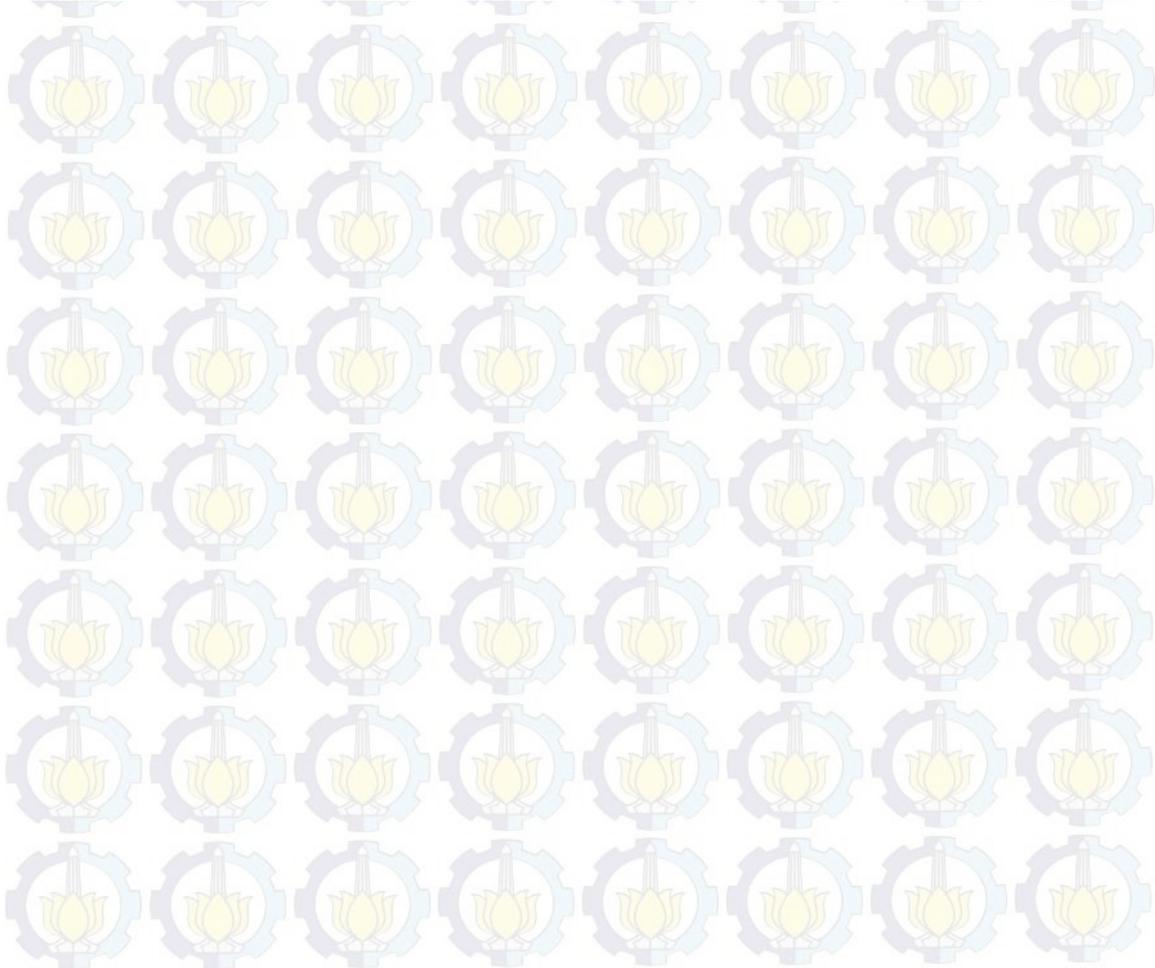
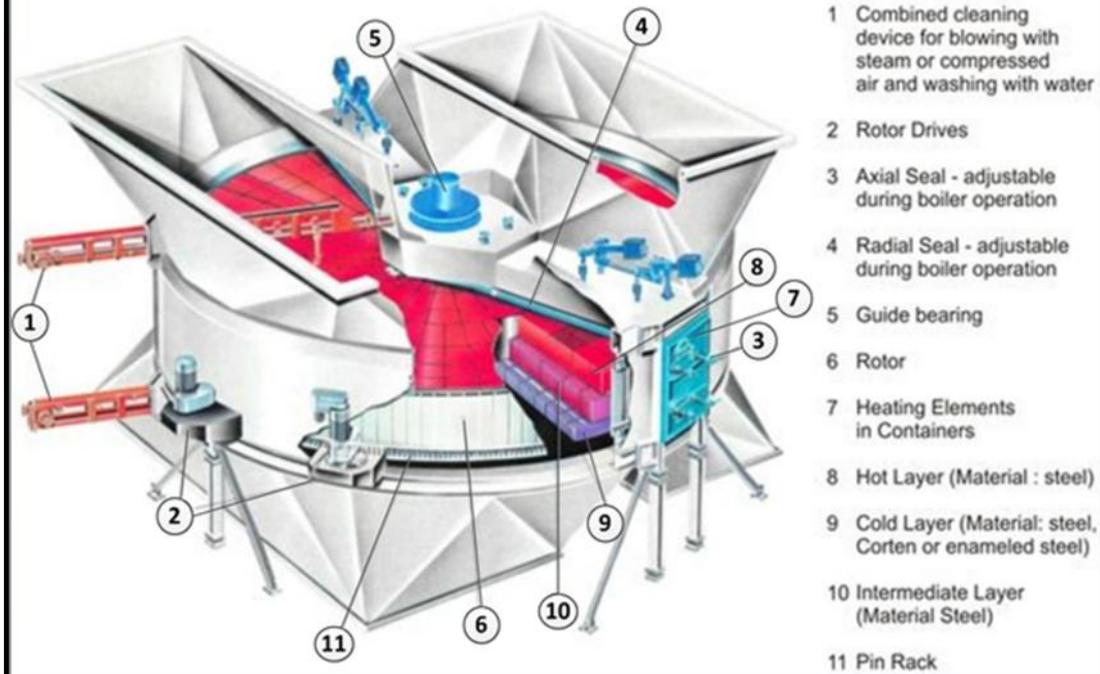
LAMPIRAN 1

DIMENSI DAN KOMPONEN AIRPREHEATER



Layer	Size	profile	Elemen height	Basket height
Hot end	18'' (45,72 cm)	DU	450 mm	450 (+25 atas +25 bawah)
Hot Intermediete	42'' (106,68cm)	DU	1050 mm	(1050 +25 atas +25 bawah)
Cold Intermediete	12'' (30,48 cm)	To be Variated	300 /+4 mm	354 /-3 mm
Cold End	12'' (30,48 cm)	NF6	300 /+4 mm	354/-3 mm

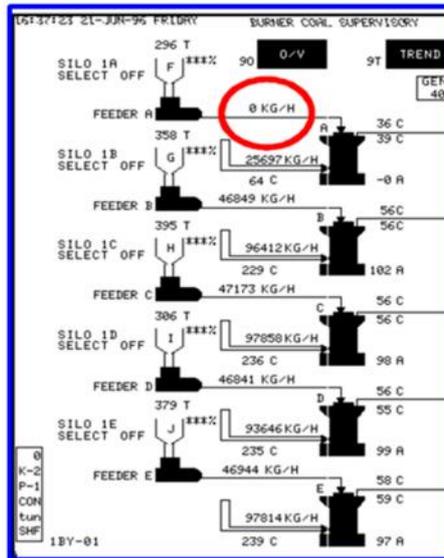
KOMPONEN ROTARY AIR PREHEATER (LJUNGSTORM AIR PREHEATER)



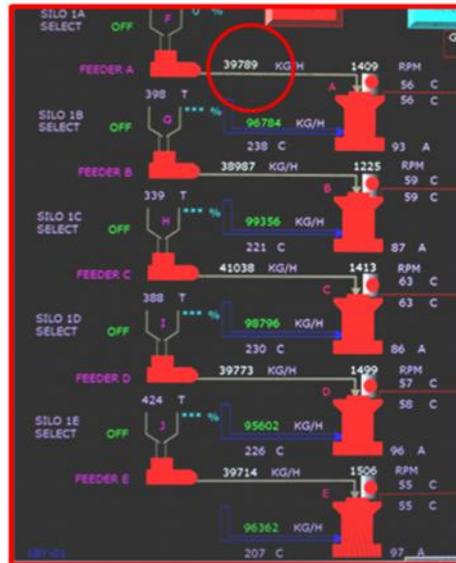
LAMPIRAN 2



BALANCE DRAFT CCR



Normal operation base on design using medium rank, June 1996



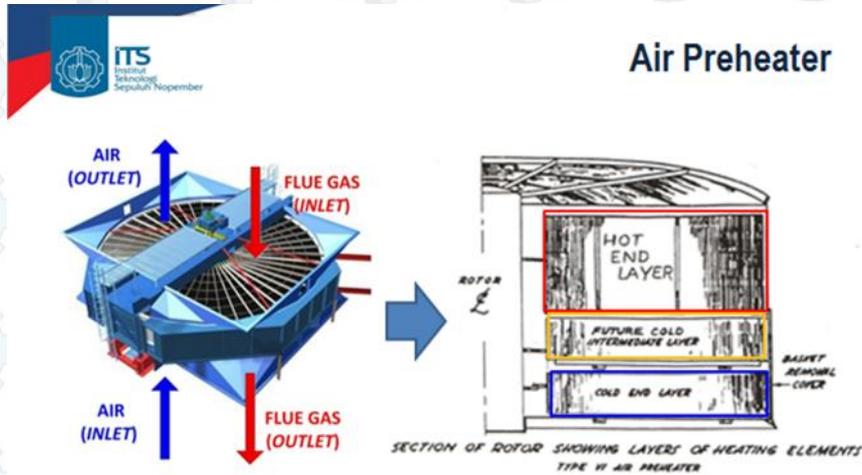
Actual operation using low rank coal, August 2014

PT PEMBANGKITAN JAWA-BALI SERVICES
TOTAL SOLUTION FOR POWER GENERATION



LAMPIRAN 3

ELEMEN HEATER



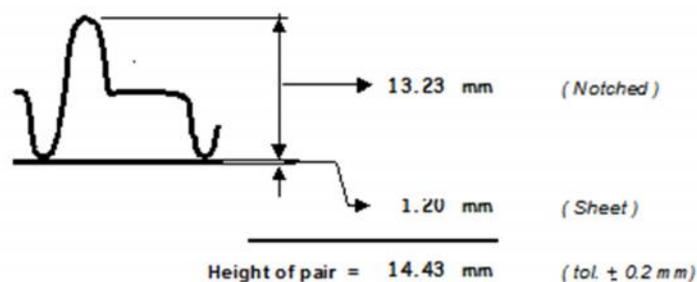
9

PT PEMBANGKITAN JAWA-BALI SERVICES
TOTAL SOLUTION FOR POWER GENERATION



Specification for Paiton #1 Cold End Element Primary (T302PSP)

ELEMENT CONFIGURATION OF PAITON 1 /2 PRIMARY COLD END



- ▶ **ROTOR SIZE** : 21.5 VIR 54
- ▶ **Layer description** :
 - NF8
 - Thickness 1.2 mm / LACR
 - Wide 300 mm
- ▶ **Total of Pair to each** :
 - Basket A = 35 Pairs (tol. \pm 1 pair)
 - Basket B = 43 Pairs (tol. \pm 1 pair)
 - Basket C = 60 Pairs (tol. \pm 1 pair)
 - Basket CC = 60 Pairs (tol. \pm 1 pair)

HEATING ELEMENT CUTTING LIST

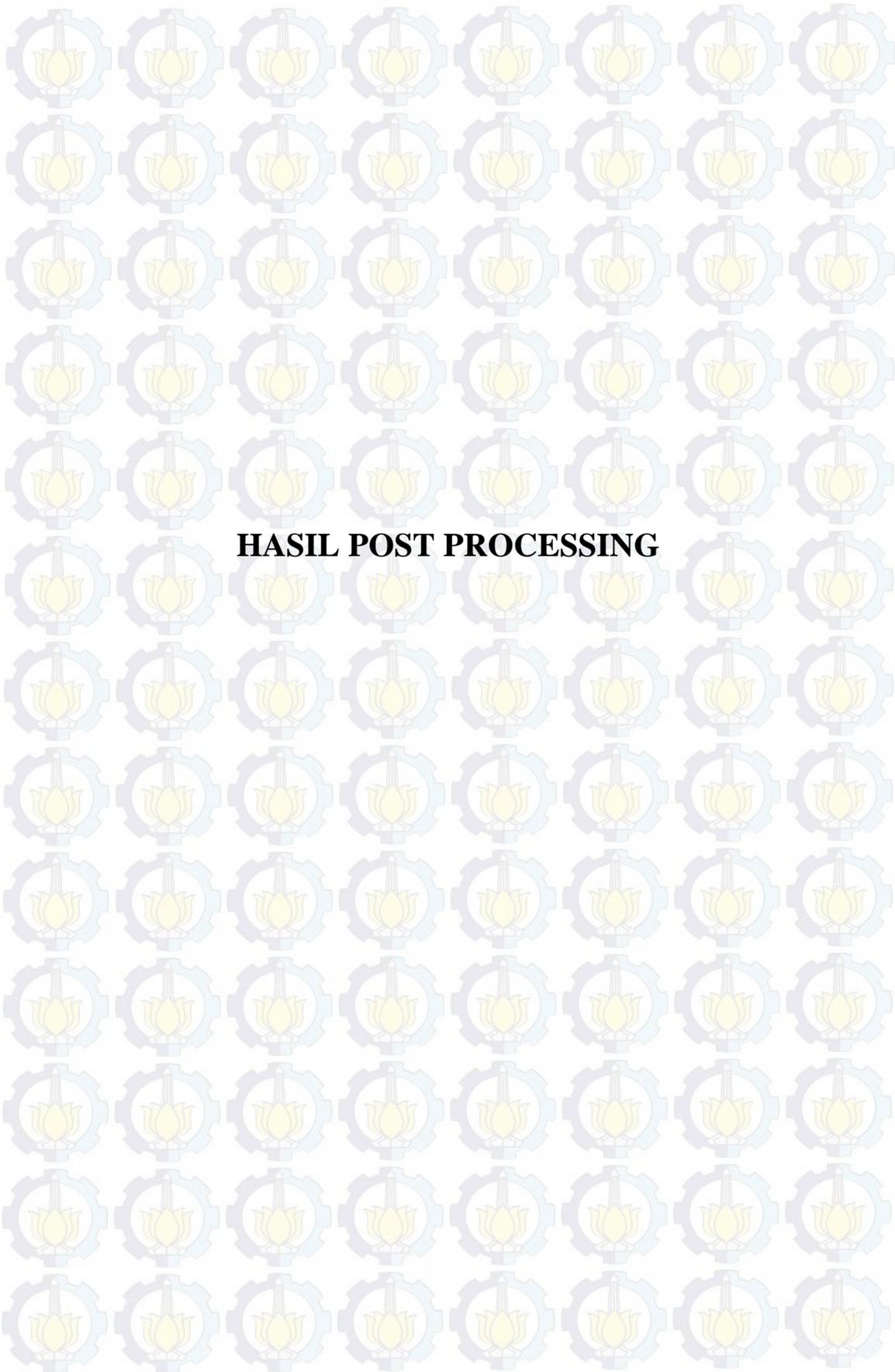
CUSTOMER NAME : PAITON Unit 1 & 2
 JOB NUMBER : T 407 P 8F
 ROTOR SIZE : 31.5 V-V1
 NAME OF BASKET : SECONDARY COLD END
 BASKET TYPE : FULL WRAPPER
 ELEMENT SPECIFICATION : Thickness : 0.8 mm (40 Gauge)
 Depth : 350 mm
 Configuration : 3F-OU
 Material : LACR



A	NOTCH	: 9.292 MM	± 0.202 mm Tolerance
B	UNDULATED	: 3.835 MM	± 0.075 mm Tolerance
	TOTAL HEIGHT	: 13.232 MM	± 0.272 mm Tolerance

NO	SERIES OF BASKET	NUMBER OF PAIR(S)	TOLERANCE OF PAIR(S)	RE MARK
1	A	69	± 2 Pairs	
2	B	70	± 2 Pairs	
3	C	70	± 2 Pairs	
4	D	70	± 2 Pairs	
5	E	47	± 2 Pairs	
6	F	60	± 2 Pairs	

LAMPIRAN 4



HASIL POST PROCESSING

LAMPIRAN 5

PROCESSING



Processing Solver

Stream	Profile	Mass flow rate	Area channel mm ²	Area cell mm ²	cell number	Mass Flow rate	viscosity kg/m-s	Wetted perimeter, m	Reynold Number	flow type
Primary Air	DU	57.56	9172217.8	264.33	29148.41	0.001658878	1.79E-05	2820619.766	4562.03	Turbulent
	NF6	57.56	9172217.8	333.63	21444.10	0.002093807	1.79E-05	2233377.418	5761.56	Turbulent
Flue gas	DU	255.54	9172217.8	264.33	29148.41	0.007364059	1.79E-05	2820619.766	20251.67	Turbulent
	NF6	255.54	9172217.8	333.63	21444.10	0.00929479	1.79E-05	2233377.418	25576.62	Turbulent

The image shows three overlapping dialog boxes from the ANSYS software interface:

- Solver:** Shows settings for Solver (Pressure Based), Space (3D), Velocity Formulation (Absolute), and Gradient Option (Green-Gauss Cell Based).
- Viscous Model:** Shows Model (k-epsilon), k-epsilon Model (Standard), Near-Wall Treatment (Standard Wall Functions), and Options (Viscous Heating).
- Energy:** A small dialog box with the "Energy Equation" checked.

PT PEMBANGKITAN JAWA-BALI SERVICES
TOTAL SOLUTION FOR POWER GENERATION



Processing Materials

The image shows two overlapping dialog boxes from the ANSYS Materials interface:

- Materials (Left):** Shows properties for 'air' (fluid). Properties include Density (1.225 kg/m³), Cp (1006.43 J/kg-k), Thermal Conductivity (0.0242 W/m-k), and Viscosity (1.7894e-05 kg/m-s).
- Order Materials By (Right):** Shows properties for 'corten' (solid). Properties include Density (7700 kg/m³), Cp (460 J/kg-k), and Thermal Conductivity (25 W/m-k).

Boundary Condition pada Momentum

Motion | Porous Zone | Reaction | Source Terms | Fixed Values

Z (m) 0 Z 1

Motion Type **Moving Reference Frame**

Rotational Velocity Translational Velocity

Speed (rpm) 2.2 X (m/s) 0
Y (m/s) 0

OK Cancel Help

Inertial Resistance

Alternative Formulation

Direction-1 (1/m) 0 constant

Direction-2 (1/m) 0 constant

Direction-3 (1/m) 2.87 constant

OK Cancel Help

Direction-1 Vector

X 1 constant

Y 0 constant

Z 0 constant

Direction-2 Vector

Conical

Relative Velocity Resistance Formulation

Viscous Resistance

Direction-1 (1/m²) 9e+10 constant

Direction-2 (1/m²) 9e+10 constant

Direction-3 (1/m²) 6000000 constant

OK Cancel Help

Fluid

Zone Name cold_layer

Material Name air Edit...

Porous Zone
 Laminar Zone
 Source Terms
 Fixed Values

Motion Porous Zone | Reaction | Source Terms | Fixed Values

Conical

Power Law Model

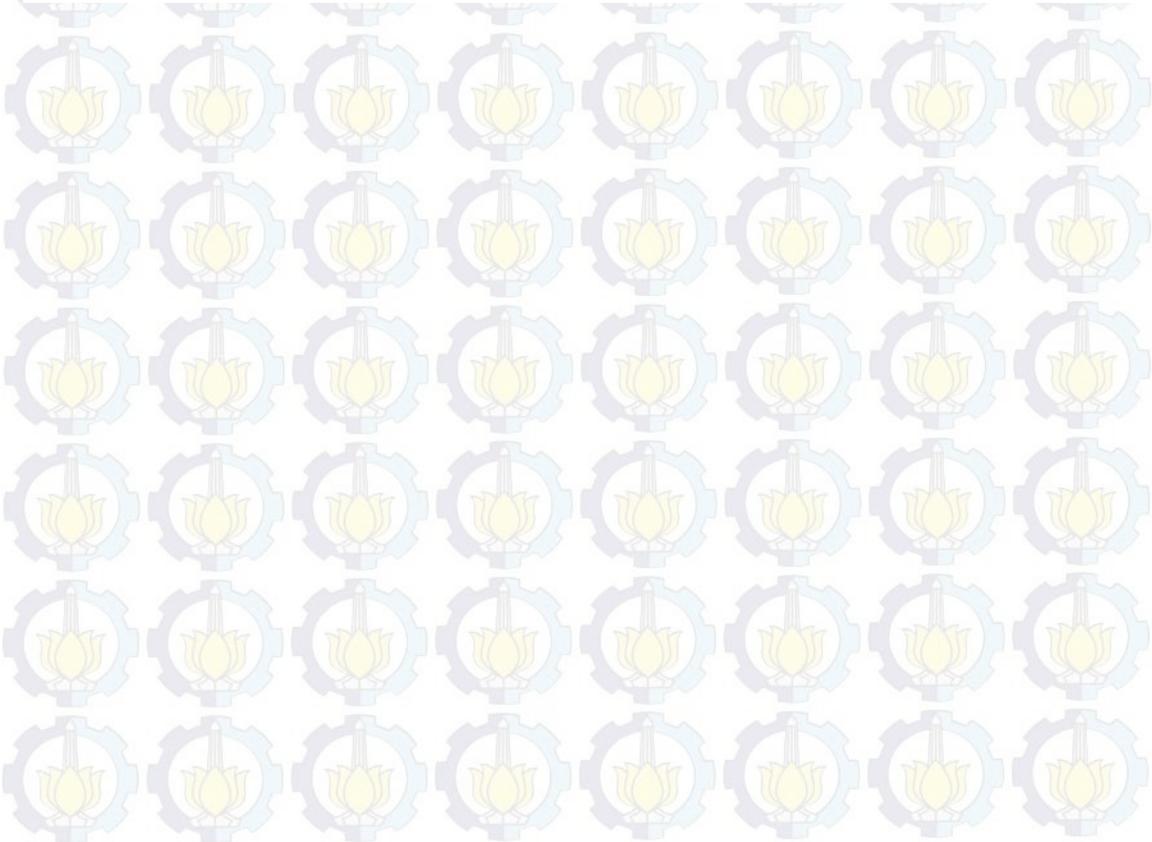
C0 0 C1 0

Fluid Porosity

Porosity 0.76 constant

Solid Material Name corten Edit...

OK Cancel Help



DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS FLUENT. 2006. *FLUENT 6.3 User's Guide*. Macrovision Corporation
- Alagic, Sandira, Et al. 2005. *Numerical Analysis OF Heat Transfer And Fluid Flow in Rotary Regenerative Airpreheater*.
- Arora A.K. 2014. *Experience With Regenerative Airheater Performance Assesment And Improvement Initiative*. National Seminar on Thermal Power Plant Performance Management.
- Kaydan, Armin, Heidari, Hajidavallo, Ebrahim. 2014. *Three Dimentional Simulation Of Rotary Air Preheater In Steam Power Plant*. Applied Thermal Engineering.
- Mioralli, P.C, Ganzarolli, M.M.2012. *Thermal Analysis Of A Rotary Regenerator With Fixed Pressure Drop Or Fixed Pumping Power*. Applied Thermal Engineering
- Sarunac, Nenad, 2011. *Power 101: Improving the Performance of Boiler Auxiliaries, Part II*. Powermag.
- Strom, Stephen K, Guffre, John. 2010. *Experience With Regenerative Air Heater Performance Evaluatian And Optimization*. Power-Gen Europe
- Strom, Stephen K, Guffre, John. 2011. *Recent Regenerative Airheter Improvement at HECO Kahe Point, Oahu*. Electric Power Conference.
- Warren, I. 1982. *Ljungstrom Heat Exchanger For Waste Heat Recovery*. Pergamon Press Ltd.
- Zhang, Lei, Cje, Defu. 2012. *An Experimental And Numerical Investigation On The Thermal-Hydraulic Performance od Double Notch Plate*. ASME

BIOGRAFI PENULIS



Dian Mustikaning Kusuma dilahirkan di Bondowoso, Jawa Timur pada hari Minggu, 20 Mei 1984 dan dibesarkan di Surabaya. Penulis merupakan putri pertama dari pasangan Rosihan Anwar dan Wardani Endang Herliastuti. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Teknik Material dan Metalurgi dan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2006 dan menyelesaikan pendidikan S2 Teknik Mesin di institusi yang sama pada tahun 2015. Penulis

memiliki pengalaman bekerja di PT Advance Interconnect Technologies (AIT)/ PT. Unisem Batam pada tahun 2007-2009 sebelum kemudian bergabung dengan PT PJB Services sejak tahun 2009 hingga sekarang.

Selama bekerja di PT. PJB Services, penulis mendapatkan pengalaman di beberapa unit pembangkit, diantaranya PLTU 1-2 Paiton, Probolinggo (2009-2010), PLTU Paiton 9, Probolinggo (2010-2012), Datong Louhe *Power Plant*, Huainan, Anhui, China (2012) dan PLTU Tanjung Awar-Awar, Tuban (2012-2013). Pada tahun 2013 penulis mendapatkan kesempatan beasiswa tugas belajar pendidikan S2 Teknik Mesin di ITS dengan bidang keahlian rekayasa energi.

Email : dianmustika84@gmail.com