



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PENGARUH PENGENDALIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
NUKLIR (PLTN) HTGR TERHADAP PEMBENTUKAN *FOULING*  
PADA *HEAT EXCHANGER***

FATMA AYU NADYANYA  
NRP. 02311640000142

Dosen Pembimbing:  
Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020





**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**PENGARUH PENGENDALIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
NUKLIR (PLTN) HTGR TERHADAP PEMBENTUKAN *FOULING*  
PADA *HEAT EXCHANGER***

**FATMA AYU NADYANYA**  
**NRP. 02311640000142**

Dosen Pembimbing:  
Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***EFFECT OF HTGR NUCLEAR POWER PLANT (NPP)  
CONTROL ON FOULING FORMATION IN HEAT EXCHANGER***

FATMA AYU NADYANYA  
NRP. 02311640000142

Supervisors:  
Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

*Department of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Fatma Ayu Nadyanya  
NRP : 02311640000142  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / SI Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Pengaruh Pengendalian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) HTGR Terhadap Pembentukan Fouling Pada Heat Exchanger**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Fatma Ayu Nadyanya

NRP. 02311640000142

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PENGARUH PENGENDALIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
NUKLIR (PLTN) HTGR TERHADAP PEMBENTUKAN *FOULING* PADA  
*HEAT EXCHANGER***

Oleh:

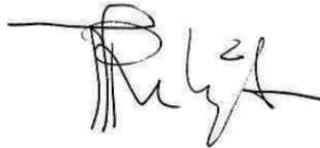
Fatma Ayu Nadyanya

NRP. 02311640000142

Surabaya 3 Agustus 2020,

Menyetujui,

Pembimbing I



Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

NIPN. 19710702 199802 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTI-ITS



Dr. Suyanto, S.T., M.T.  
NIPN. 19471113-199512 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH PENGENDALIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN) HTGR TERHADAP PEMBENTUKAN *FOULING* PADA *HEAT EXCHANGER* .

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Fatma Ayu Nadyanya**

**NRP. 02311640000142**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.  ..... (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  ..... (Ketua Penguji)
3. Ir. Matradji, M. Kom.  ..... (Penguji I)
4. Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc.  ..... (Penguji II)
5. Moh Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC  ..... (Penguji III)

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PENGARUH PENGENDALIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN) HTGR TERHADAP PEMBENTUKAN *FOULING* PADA *HEAT EXCHANGER***

**Nama** : Fatma Ayu Nadyanya  
**NRP** : 02311640000142  
**Departemen** : Teknik Fisika FT-IRS ITS  
**Dosen Pembimbing** : Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Steam generator* adalah sebuah *heat exchanger* besar pada industri PLTN yang menggunakan panas dari pendingin reaktor primer untuk membuat uap di sisi sekunder untuk menggerakkan generator turbin. *Steam generator* memiliki fungsi keselamatan utama yaitu sebagai pembatas antara sisi primer radioaktif dan sisi sekunder non-radioaktif. Segala hal yang mengganggu kerja fungsi ini, dapat menyebabkan kegagalan serentak seperti kebocoran dan akan menjadi masalah keamanan yang sangat krusial. *Steam generator* sering mengalami masalah keandalan dikarenakan degradasi material, penyebabnya adalah pengendapan partikel atau *fouling*. *Fouling* merupakan timbunan membentuk kerak yang terdiri dari zat organik, korosi, dan endapan lainnya yang tidak diinginkan pada permukaan *heat exchanger*. Keseluruhan proses *fouling* diakibatkan oleh faktor pengotoran (*fouling resistance*). Dilakukan simulasi PLTN dengan melakukan perubahan pada beban daya dan pemodelan pada steam generator kemudian dilakukan analisis apa yang akan terjadi pada pembentukan *fouling* di *heat exchanger* tersebut. Setelah dilakukan analisa, didapatkan hasil bahwa semakin besar beban daya yang dihasilkan, maka nilai *fouling resistance* akan semakin kecil. Dikarenakan semakin besar beban daya, aliran massanya pada sisi *shell* akan bertambah sedangkan pada sisi *tube* selisih suhunya akan bertambah yang akan membuat nilai *fouling resistance* menjadi lebih kecil. Bertambahnya nilai *fouling resistance* akan memperkecil koefisien perpindahan panasnya.

**Kata Kunci:** Aliran massa, *Fouling resistance*, *Heat exchanger*, Temperatur

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## ***EFFECT OF HTGR NUCLEAR POWER PLANT (NPP) ON FOULING FORMATION IN HEAT EXCHANGER***

***Name*** : Fatma Ayu Nadyanya  
***NRP*** : 02311640000142  
***Department*** : Engineering Physics FT-IRS ITS  
***Supervisors*** : Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.

### ***ABSTRACT***

*Steam generator is a large heat exchanger in the nuclear power plant industry that uses heat from the primary reactor cooler to make steam on the secondary side to drive the turbine generator. Steam generator has the main safety function as a barrier between the radioactive primary side and the non-radioactive secondary side. All things that interfere with the work of this function, can cause simultaneous failure such as leakage and will be a very crucial security problem. Steam generators often experience reliability problems due to material degradation the cause is particle deposition or fouling. Fouling is a pile forming scale composed of organic substances, corrosion, and other unwanted deposits on the surface of the heat exchanger. The whole process of fouling is caused by a factor of fouling resistance. A nuclear power plant simulation is done by changing the power load and modeling on the steam generator and then analyzing what will happen to the formation of fouling in the heat exchanger. After analysis, the results show that the greater the load of power generated, the smaller the fouling resistance. Due to the greater power load, the mass flow at the shell side will increase while at the tube side the temperature difference will increase which will make the fouling resistance value smaller. Increasing fouling resistance will reduce the coefficient of heat transfer.*

***Keywords: Mass flow, Fouling resistance, Heat exchanger, Temperature.***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan Tugas Akhir yang berjudul:

**“PENGARUH PENGENDALIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
NUKLIR (PLTN) HTGR TERHADAP PEMBENTUKAN *FOULING* PADA  
*HEAT EXCHANGER* ”.**

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FT-IRS ITS. Penulis telah banyak mendapatkan dukungan dan juga bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan bimbingan dan semangat pada penulis.
3. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. selaku dosen wali yang selalu memberikan arahan dan semangat selama penulis menjadi mahasiswa di jurusan Teknik Fisika FT-IRS ITS.
4. Bapak/Ibu dosen pengajar dan seluruh staff di departemen Teknik Fisika - ITS.
5. Bapak Budi Handoyo dan Ibu Dyah Patria selaku orang tua penulis juga adik Fiqa dan Fahmi dan Eyang Putri yang selalu memberikan kebahagiaan dan tak henti-hentinya memberikan doa untuk penulis.
6. Teman-teman asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol yang telah memberikan dukungan dan doa untuk penulis.
7. Kakak senior Mas Ariel, Mas Dio dan Mas Fandi yang bersedia membantu penulis selama penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman S-1 Teknik Fisika yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

9. Firdausi Nuzula A. yang selalu menyemangati dan menjadi teman baik penulis sejak SMA juga semua teman-teman tour.
10. Teman-teman rumpi yang selalu menyemangati penulis dan satu sama lain agar bisa semangat dan kuat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
11. Teman-teman se-dosen pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa berjuang bersama-sama serta saling memberikan motivasi dan semangat dalam mengerjakan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
<i>COVER PAGE</i> .....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
ABSTRAK .....	xi
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL.....	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Lingkup Kajian .....	4
1.5 Sistematika Laporan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir <i>High Temperature Gas-Cooled Reactor</i> (HTGR).....	5
2.2 <i>Steam Generator</i> .....	7
2.3 <i>Heat Exchanger</i> .....	8
2.4 <i>Fouling</i> .....	10
2.5 Pemodelan Sistem dan Simulasi .....	11

BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	15
3.1 Studi Literatur dan Perumusan Masalah .....	16
3.2 Pengumpulan Data RDE PLTN HTGR.....	16
3.3 Simulasi PLTN dengan Variasi <i>Output</i> Beban.....	17
3.4 Pemodelan <i>Heat Exchanger</i> dan <i>Fouling</i> .....	20
3.5 Validasi Simulasi dan Pemodelan .....	25
3.6 Analisa Hasil dan Pembahasan.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	29
4.1 Hasil Kondisi Operasi dan <i>Properties</i> dari <i>Heat Exchanger</i> .....	29
4.2 Hasil Pemodelan <i>Fouling Resistance</i> pada Sisi <i>Tube</i> dan <i>Shell</i> .....	30
4.3 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Total dari <i>Heat Exchanger</i> .....	32
4.4 Pembahasan .....	33
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	35
5.1 Kesimpulan.....	35
5.2 Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA.....	37
LAMPIRAN .....	41
BIODATA PENULIS.....	48

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Skema pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) .....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Skema PLTN RDE HTGR.....	6
<b>Gambar 2. 3</b> <i>Steam generator</i> .....	8
<b>Gambar 2. 4</b> (a) Susunan <i>heat exchanger</i> dengan <i>parallel-flow</i> (b) Susunan <i>heat exchanger</i> dengan <i>counter-flow</i> .....	9
<b>Gambar 2. 5</b> <i>Shell and tube heat exchanger</i> .....	10
<b>Gambar 3. 1</b> Diagram alir penelitian .....	15
<b>Gambar 3. 2</b> PFD PLTN HTGR .....	18
<b>Gambar 3. 3</b> RDE PLTN HTGR dengan kontrol .....	18
<b>Gambar 3. 4</b> Simulasi <i>steady state</i> RDE PLTN HTGR menggunakan HYSYS V10 .....	19
<b>Gambar 3. 5</b> Simulasi <i>dynamic state</i> RDE PLTN HTGR menggunakan HYSYS V10 .....	20
<b>Gambar 4. 1</b> Grafik perbandingan antara <i>fouling resistance</i> pada sisi <i>shell</i> dan <i>tube</i> .....	31
<b>Gambar 4. 2</b> Grafik perbandingan antara koefisien perpindahan panas pada kondisi bersih dan kondisi terjadinya <i>fouling</i> .....	32

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Properti Fluida dan Kondisi Operasi <i>Heat Exchanger</i> .....	16
<b>Tabel 3. 2</b> Geometri <i>Heat Exchanger</i> .....	17
<b>Tabel 3. 3</b> Validasi Proses pada Simulasi <i>Steam Generator</i> pada <i>Plant</i> RDE PLTN HTGR .....	26
<b>Tabel 3. 4</b> Validasi Pemodelan <i>Fouling</i> pada <i>Steam Generator</i> .....	26
<b>Tabel 4. 1</b> <i>Mass Flow</i> di Sisi <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> dengan Variasi Perubahan Beban Daya .....	29
<b>Tabel 4. 2</b> Temperatur di Sisi <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> dengan Variasi Perubahan Beban Daya.....	29
<b>Tabel 4. 3</b> <i>Properties</i> di Sisi <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> dengan Variasi Perubahan Beban Daya .....	30
<b>Tabel 4. 4</b> <i>Properties</i> di Sisi <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> dengan Variasi Perubahan Beban Daya .....	30
<b>Tabel 4. 5</b> <i>Fouling Resistance</i> di Sisi <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> dengan Variasi Perubahan Beban Daya.....	31
<b>Tabel 4. 6</b> Koefisien Perpindahan Panas di Sisi <i>Shell</i> dan <i>Tube</i> dengan Variasi Perubahan Beban Daya.....	32

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sampai saat ini, Indonesia masih kesulitan menghadapi persoalan dalam mencapai target pembangunan bidang energi dan diperkirakan tantangan pemenuhan kebutuhan energi ke depan akan semakin berat (BAPPENAS, 2020). Cadangan sumber energi fosil semakin menipis, sementara pengembangan sumber energi terbarukan juga masih belum signifikan untuk dapat mencukupi kebutuhan kelistrikan Indonesia, sedangkan suplai energi domestik diperkirakan hanya mampu memenuhi 75 persen permintaan energi nasional pada tahun 2030 dan akan terus menurun hingga 28 persen di tahun 2045 (BAPPENAS, 2020). Sejalan dengan meningkatnya kebutuhan energi untuk berbagai macam sektor, maka dibutuhkan pasokan energi yang tidak sedikit. Pasokan listrik hingga saat ini masih didominasi oleh PLTA, PLTU, PLTG, PLTP, dan PLTD. Indonesia sudah mulai mengembangkan penelitian mengenai energi nuklir dalam ketenagalistrikan dengan PLTN (Saepuloh & Indrakoesoema, 2015). Tetapi dikarenakan banyak masyarakat Indonesia yang belum bisa menerima pembangunan PLTN karena alasan keamanan, pembangunan PLTN di Indonesia masih agak sulit diwujudkan. Pada dasarnya, Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) beroperasi dengan prinsip yang sama seperti pembangkit listrik konvensional, hanya saja panas yang digunakan untuk menghasilkan uap tidak dihasilkan dari pembakaran fosil, tetapi dihasilkan dari reaksi pembelahan inti bahan fisis (uranium) dalam suatu reaktor nuklir (Saepuloh & Indrakoesoema, 2015).

Mengelola aspek keselamatan dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) memerlukan implementasi program yang efektif untuk deteksi dan mitigasi yang tepat waktu dari degradasi sistem, penuaan struktur dan komponen yang penting bagi keselamatan, untuk memastikan integritas dan kemampuan fungsionalnya sepanjang kehidupan pelayanan *plant* (IAEA, 1997). Pada PLTN, terdapat beberapa *equipment* yang tergolong penting, salah satunya yaitu *steam generator*. Dalam PLTN *steam generator* memiliki fungsi untuk menghasilkan uap dari panas nuklir yang dihasilkan oleh reaksi fisi, dan sebagai pendingin untuk

menghilangkan panas yang tersisa dari produk fisi selama reaktor normal dimatikan dan untuk skenario pascakecelakaan jika pendinginan teras reaktor terganggu (Turner & Khumsa-Ang, 2017). *Steam generator* adalah sebuah *heat exchanger* besar yang menggunakan panas dari pendingin reaktor primer untuk membuat uap di sisi sekunder untuk menggerakkan generator turbin (IAEA, 1997). Sedangkan *heat exchanger* merupakan suatu alat yang digunakan untuk proses perpindahan panas yang melibatkan dua atau lebih fluida dengan temperatur yang berbeda (Thirumarimurugan, Kannadasan, & Ramasamy, 2008). Kegagalan *steam generator* ini akan mengakibatkan kalor pada reaktor melebihi kapasitas yang bisa ditampung oleh *jacket* dan menyebabkan resiko keamanan yang fatal (OECD, 2015). Kegagalan ini dapat disebabkan oleh tekanan dan suhu yang tinggi pada saat kondisi operasi, juga korosi dan akumulasi kotoran (*pitting*, *fouling*) dapat menyebabkan kebocoran dan aliran terhambat dan juga kesalahan manusia / operator langsung bisa menjadi penyebab kegagalan tersebut (OECD, 2015).

*Steam generator* memiliki fungsi keselamatan utama yaitu sebagai pembatas antara sisi primer radioaktif dan sisi sekunder non-radioaktif (IAEA, 1997). Segala hal yang mengganggu kerja fungsi ini, dapat menyebabkan pecahnya *tube* atau kegagalan serentak seperti kebocoran dan akan menjadi masalah keamanan yang sangat krusial (IAEA, 1997). Turner dan Khumsa-Ang (Turner & Khumsa-Ang, 2017) mengatakan, bahwa *steam generator* dapat mengalami degradasi akibat dari akumulasi simpanan yang tidak diinginkan, atau pengotoran, pada permukaan komponen penting dalam *steam generator*. Akumulasi deposit tebal pada komponen-komponen ini menyebabkan masalah termasuk hilangnya kinerja termal *steam generator*, korosi di bawah deposit dan lainnya. Dan menurut Bonavigo dan Salve (Bonavigo & Salve, 2011), *steam generator* sering mengalami masalah keandalan dikarenakan degradasi material, penyebabnya adalah pengendapan partikel atau *fouling*. *Fouling* merupakan timbunan membentuk kerak yang terdiri dari zat organik, korosi, dan endapan lainnya yang tidak diinginkan pada permukaan *heat exchanger* (Nesta & Bennett, 2005).

Keseluruhan proses *fouling* diakibatkan oleh faktor pengotoran,  $R_f$  (*fouling resistance*) yang diukur baik dengan bagian uji atau dievaluasi dari penurunan kapasitas penukar panas yang beroperasi dan juga dapat diukur baik secara

eksperimental atau analitis (Awad, 2011). Banyak telah mempelajari fenomena *fouling* secara teoritis dan eksperimental. Kern (D.Q Kern, 1965), membuat dasar dari studi *fouling*. Nesta dan Bennett (Nesta & Bennett, 2005) menyimpulkan bahwa meminimalkan suhu dinding dan memaksimalkan kecepatan aliran cenderung meminimalkan *fouling*; mereka juga menemukan bahwa bahan penukar panas memiliki efek nyata pada pengotoran terutama ketika pengotoran biologis menjadi perhatian. Pengukuran *fouling resistance* dapat dilakukan dengan beberapa cara, menimbang langsung untuk menilai tingkat deposisinya, pengukuran ketebalan, melihat perubahan *pressure drop* dan ada juga dengan pengukuran pada perpindahan panasnya dengan melihat perubahan perpindahan panas selama terjadinya proses pengendapan (Awad, 2011). Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dengan harapan dapat mendapatkan analisa bagaimana dampak dari kontrol *plant* dengan *output* beban yang berbeda terhadap terbentuknya *fouling* pada *steam generator* yang ada pada pembangkit listrik tenaga nuklir.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang tersebut, maka didapatkan rumusan masalah yang akan diselesaikan sebagai berikut:

- a) Bagaimana dampak perubahan *output* beban pada pembangkit listrik tenaga nuklir terhadap pembentukan *fouling* pada *heat exchanger*?
- b) Bagaimana pengaruh perubahan *fouling* terhadap perubahan koefisien perpindahan panas *heat exchanger*?

## 1.3 Tujuan

Dari perumusan masalah tersebut didapatkan tujuan penelitian yang akan dilakukan, yaitu sebagai berikut:

- a) Menganalisa dampak perubahan *output* beban pada pembangkit listrik tenaga nuklir terhadap pembentukan *fouling* pada *heat exchanger*.
- b) Menganalisa pengaruh perubahan *fouling* terhadap perubahan koefisien perpindahan panas *heat exchanger*

#### **1.4 Lingkup Kajian**

Yang menjadi lingkup kajian yang pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) Komponen yang ditinjau yaitu *steam generator*
- b) Analisa dilakukan pada *fouling resistance* dan koefisien perpindahan panas keseluruhan.
- c) Perubahan dilakukan pada perubahan *output* daya PLTN
- d) Lingkup kerjanya adalah *plant* PLTN HTGR dengan kapasitas daya elektrik 3MW.

#### **1.5 Sistematika Laporan**

Adapun sistematika penulisan laporan tugas akhir ini tersusun atas lima bab dengan rincian sebagai berikut:

##### **BAB I Pendahuluan**

Bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, lingkup kajian dan sistematika penulisan laporan pada tugas akhir ini.

##### **BAB II Teori Penunjang**

Bab II ini membahas teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu meliputi PLTN HTGR, kemudian mengenai *steam generator*, lalu juga teori mengenai *heat exchanger* dan yang terakhir mengenai salah satu permasalahan yang diangkat yaitu mengenai *fouling* dan pemodelannya.

##### **BAB III Metodologi**

Bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan rincian dari langkah-langkah yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

##### **BAB IV Hasil dan Pembahasan**

Bab IV ini berisi tentang data hasil penelitian dan juga pembahasan serta analisa penelitian.

##### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

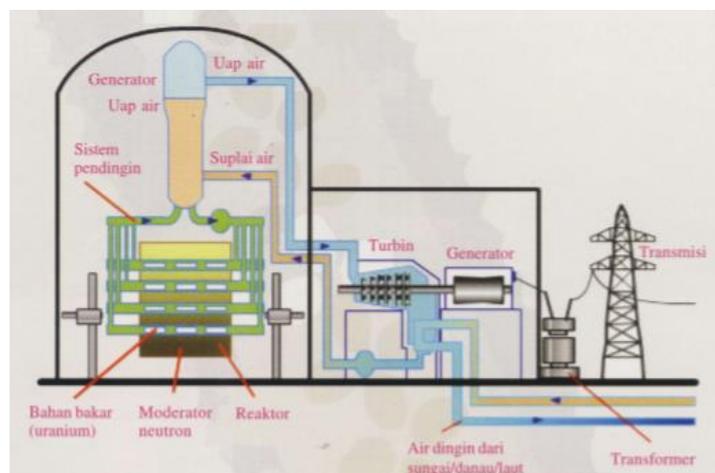
Bab V ini terdiri dari kesimpulan tentang tugas akhir ini dan saran sebagai penunjang tugas akhir selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir *High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)*

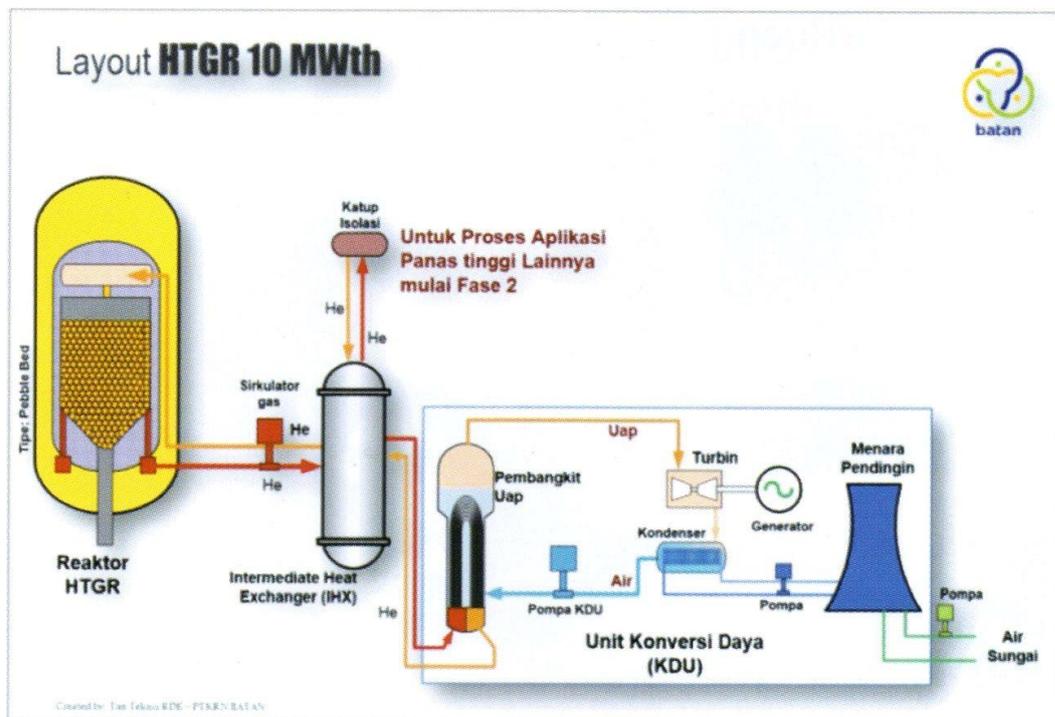
Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan tenaga nuklir sebagai sumber pembangkitan panas (Parmanto & Irawan, 2007). PLTN mirip dengan pembangkit listrik lainnya, yang membedakan hanyalah bahan bakar yang digunakan sebagai sumber pembangkitan panas. Pada kebanyakan pembangkit listrik tenaga uap, proses pendidihan air untuk menghasilkan uap diperoleh dan panas hasil pembakaran minyak, batubara atau gas. Sedangkan PLTN, panas yang digunakan untuk proses pendidihan airnya diperoleh dari reaksi nuklir antara uranium atau unsur lain dengan partikel neutron. Proses pembangkitan listrik ini tidak membebaskan asap atau debu yang mengandung logam berat yang dibuang ke lingkungan atau melepaskan partikel yang berbahaya seperti CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> ke lingkungan, sehingga PLTN ini merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan (PDIN, 2007). Limbah radioaktif yang dihasilkan dari pengoperasian PLTN adalah berupa elemen bakar bekas dalam bentuk padat. Elemen bakar bekas ini untuk sementara bisa disimpan di lokasi PLTN sebelum dilakukan penyimpanan secara lestari.



**Gambar 2. 1** Skema pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) (PDIN, 2007)

Saat ini mayoritas pembangkit listrik tenaga nuklir di dunia adalah reaktor termal yang dimoderasi oleh air (Zohuri, 2019). Mereka dikategorikan sebagai reaktor air ringan atau air berat. *Light Water Reactors* (LWR) menggunakan air alami murni ( $H_2O$ ) sebagai pendingin / moderator, sementara reaktor air berat menggunakan air berat, deuterium oksida ( $D_2O$ ). Dalam *Light Water Reactors* (LWR), air ditekan untuk menjaganya tetap dalam bentuk super panas *Pressurized Water Reactors* (PWR) atau dibiarkan menguap, membentuk campuran air dan uap dalam *Boiling Water Reactors* (BWR).

Karakteristik PLTN berkembang seiring berjalannya waktu juga mengikuti kebutuhan manusia. Sejauh ini, *High Temperature Gas-cooled Reactors* (HTGR), belum beroperasi secara komersial, menawarkan alternatif untuk desain konvensional. Mereka menggunakan grafit sebagai moderator dan helium sebagai pendingin. HTGR memiliki bahan bakar berlapis keramik yang mampu menangani suhu melebihi  $1600^{\circ}C$  dan mendapatkan efisiensinya dengan beroperasi pada suhu  $700-950^{\circ}C$ . Helium dapat menggerakkan turbin gas secara langsung atau digunakan untuk membuat uap. (Association, 2019)



**Gambar 2. 2** Skema PLTN RDE HTGR

Siklus PLTN HTGR terdiri dari tiga *loop* yaitu *loop* primer yang merupakan *loop coolant* dari reaktor berupa gas Helium, kemudian *loop* sekunder berupa air dalam bentuk cair dan uap, serta *loop* ketiga yaitu *loop* air pendingin. Pembangkit ini merupakan Reaktor Daya Eksperimental (RDE), karena bersifat eksperimental maka daya elektrik keluarannya hanya sebesar 3 MW elektrik yang dihasilkan dari daya panas dari reaktor sebesar 10 MW termal. (Putra, 2018)

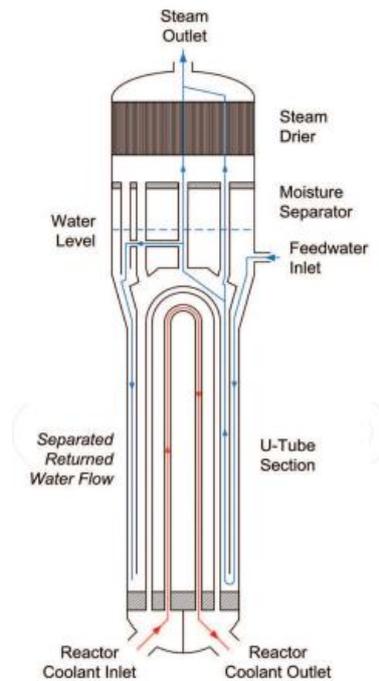
## 2.2 *Steam Generator*

*Steam generator* atau pembangkit uap adalah salah satu komponen logam besar di pembangkit listrik tenaga nuklir. Fungsi pembangkit uap adalah sebagai penghilang daya termal yang dihasilkan ke dalam teras reaktor dan transfernya ke sisi sekunder tabung tempat aliran pendingin sekunder (Bonavigo & Salve, 2011)

Fungsi pembangkit uap dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah untuk menghasilkan uap dari panas nuklir yang dihasilkan oleh reaksi fisi dalam teras, dan untuk bertindak sebagai pendingin untuk menghilangkan sisa panas dari produk fisi selama reaktor normal dimatikan dan sebagai penanggulangan skenario pascakecelakaan jika pendinginan teras reaktor terganggu. Terletak di batas antara sisi nuklir (sistem pendingin primer radioaktif) dan sisi konvensional (sistem pendingin sekunder non-radioaktif), pembangkit uap memainkan dua peran penting keselamatan:

- a. Menjadi penghalang untuk mencegah pelepasan radioaktivitas dari pendingin reaktor primer ke pendingin sekunder di mana ia dapat dilepaskan ke lingkungan; dan,
- b. Menghilangkan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder untuk mempertahankan batas keselamatan

Dengan demikian, integritas pembangkit uap dan komponen internalnya sangat penting untuk memastikan kinerja PLTN yang aman, ekonomis, dan andal (Turner & Khumsa-Ang, 2017)



**Gambar 2.3** *Steam generator* (Šadek & Grgić, 2017)

### 2.3 Heat Exchanger

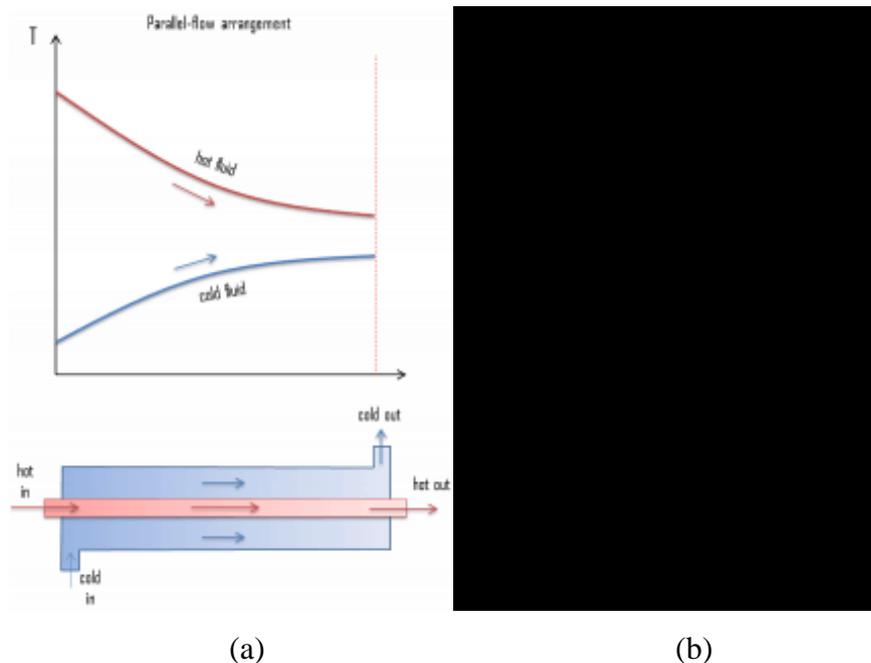
*Heat exchanger* merupakan perangkat yang digunakan untuk menyalurkan energi panas dari satu fluida ke fluida lain tanpa mencampurkan kedua fluida tersebut (Thorme, 2004). Fluida tersebut biasanya dipisahkan oleh dinding padat (dengan konduktivitas termal tinggi) untuk mencegah pencampuran atau kemungkinan bersentuhan langsung.

Pada pembangkit listrik, aplikasi umum penukar panas antara lain generator uap, kipas pendingin, penukar panas air pendingin, dan kondensor. Misalnya, pembangkit uap digunakan untuk mengubah *feedwater* menjadi uap dari panas yang dihasilkan dalam reaktor nuklir. Uap yang dihasilkan akan menggerakkan turbin. Perpindahan panas dalam penukar panas biasanya melibatkan konveksi dalam setiap fluida dan konduksi termal melalui dinding *heat exchanger* nya.

*Heat exchanger* dapat diklasifikasikan menurut susunan arah aliran fluidanya yang dibagi menjadi 2, *parallel flow* dimana arah aliran fluida panas dan fluida dingin masuk dan berakhir pada sisi *heat exchanger* yang sama dan juga arah aliran fluidanya searah dan *counter flow*, dimana fluida panas dan dingin masuk dan

berakhir pada sisi *heat exchanger* yang berlawanan (Bergman, Lavine, & Incropera, 2011).

Dalam kondisi yang dapat dibandingkan, lebih banyak panas yang disalurkan dalam pengaturan *counter flow* dari pada penukar panas *parallel flow*. Maka dari itu, terdapat dua kelemahan utama dalam desain *parallel flow*, yaitu perbedaan suhu yang besar di ujung sisi *heat exchanger* menyebabkan tekanan panas yang besar dan suhu fluida dingin yang keluar dari penukar panas tidak pernah melebihi suhu terendah fluida panas. Desain penukar panas *parallel flow* bisa menguntungkan bila *output* temperatur yang diinginkan untuk kedua fluida (panas dan dingin) hampir sama.

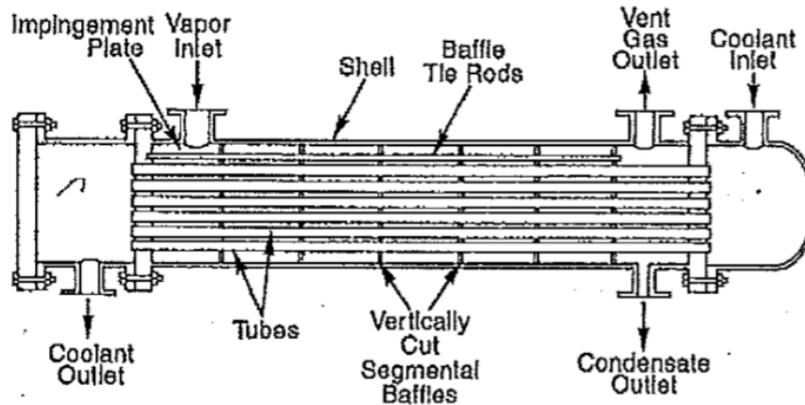


**Gambar 2. 4** (a) Susunan *heat exchanger* dengan *parallel-flow* (b) Susunan *heat exchanger* dengan *counter-flow*

### 2.3.1 *Shell and Tube Heat exchanger*

*Shell and tube heat exchanger* dalam berbagai modifikasi konstruksi mungkin merupakan konfigurasi *heat exchanger* yang paling umum digunakan dalam industri. *Shell and tube heat exchanger* biasanya digunakan untuk aplikasi tekanan tinggi (dengan tekanan lebih besar dari 30 bar dan suhu lebih besar dari 260°C) (Bergman, Lavine, & Incropera, 2011). Ini karena *Shell and tube heat exchanger* dapat menahan tekanan tinggi karena bentuknya. Dalam jenis *heat*

*exchanger* ini, sejumlah pipa bor kecil dipasang antara dua pelat tabung dan aliran fluida primer mengalir melalui tabung-tabung ini. Bundel tabung ditempatkan di dalam *shell* dan cairan sekunder mengalir melalui *shell* dan diluar permukaan tabung.



**Gambar 2. 5** *Shell and tube heat exchanger* (Kakac & Liu, 2002)

Pada rekayasa nuklir, desain *heat exchanger* ini banyak digunakan seperti generator uap, yang digunakan untuk mengubah feedwater menjadi uap dari panas yang dihasilkan dalam teras reaktor nuklir. Untuk meningkatkan jumlah panas yang ditransfer dan daya yang dihasilkan, permukaan *heat exchanger* harus dimaksimalkan. Ini diperoleh dengan menggunakan tabung. Setiap pembangkit uap dapat memuat dari 3.000 hingga 16.000 tabung, masing-masing berdiameter sekitar 19mm (Glasstone, 2001).

## 2.4 *Fouling*

Istilah *fouling* secara umum mengacu pada semua jenis endapan pada permukaan perpindahan panas. Sifat deposit sangat tergantung pada komposisi cairan yang digunakan untuk menukar panas, dapat berasal dari endapan dan dekomposisi organik dalam kondisi suhu dan tekanan yang menguntungkan. Tetapi pengotoran juga bisa berasal dari bahan padat atau semi-padat dalam suspensi dalam fluida (Harche, Absi, & Mouheb, 2014).

Akumulasi produk korosi pada permukaan *steam generator* dapat sangat menurunkan kinerja *steam generator* dan meningkatkan risiko degradasi bahan sebagai akibat dari (Turner & Khumsa-Ang, 2017) :

1. Pembentukan lapisan endapan deposit pada permukaan tabung yang dapat mengurangi transfer laju panas dari pendingin primer ke sekunder dan mengurangi batas keselamatan,
2. Akumulasi pengotor ion untuk membentuk larutan pekat yang agresif untuk integritas tabung di bawah endapan yang tebal atau dalam celah-celah berisi endapan antara tabung dan struktur pendukung tabung,
3. Pembatasan pergerakan tabung yang disebabkan oleh akumulasi deposit pada struktur pendukung tabung; "penguncian" tabung yang mengarah pada kelelahan siklus tinggi,
4. Penyumbatan aliran aliran dari struktur pendukung tabung, mengakibatkan beberapa masalah degradasi operasional dan material

Akumulasi tumpukan lumpur tebal pada tabung tabung yang menjadi semakin terkonsolidasi dengan waktu, dengan konsekuensi yang merusak integritas tabung.

## **2.5 Pemodelan Sistem dan Simulasi**

Sistem adalah perangkat unsur yang secara teratur saling berkaitan sehingga membentuk suatu totalitas (KBBI, 2020) atau bisa juga dikatakan bahwa sistem merupakan kumpulan elemen yang bekerja sama untuk mencapai suatu tujuan tertentu.

Prosedur desain sistem dimulai dengan mengetahui spesifikasi yang harus dipenuhi dan dinamika komponen, juga parameter desain. Spesifikasi mungkin saja diberikan dalam hal nilai numerik yang tepat dan deskripsi kualitatif yang kurang jelas. Spesifikasi teknik biasanya mencakup pernyataan tentang faktor-faktor seperti biaya, keandalan, ruang, berat, dan kemudahan perawatan. Penting untuk dicatat bahwa spesifikasi dapat berubah ketika desain berlangsung, karena analisis terperinci dapat mengungkapkan bahwa persyaratan tertentu tidak mungkin bertemu (Ogata, 2004).

Selanjutnya, membangun model matematika sistem. Setelah masalah desain diformulasikan dalam bentuk model, dilakukan desain matematika yang menghasilkan solusi untuk versi matematika dari masalah desain. Dengan desain matematika selesai, insinyur mensimulasikan model pada komputer untuk menguji

efek dari berbagai *input* dan gangguan pada perilaku sistem yang dihasilkan. Jika konfigurasi sistem awal tidak memuaskan, sistem harus dirancang ulang dan analisis yang sesuai diselesaikan (Ogata, 2004).

Proses desain dan analisis ini diulang sampai ditemukan sistem yang memuaskan. Kemudian sistem fisik prototipe dapat dibangun. Perhatikan bahwa proses membangun prototipe adalah kebalikan dari pemodelan matematika.

Ada beberapa cara untuk dapat merancang, menganalisis dan mengoperasikan suatu sistem. Salah satunya adalah dengan melakukan pemodelan, dan simulasi.

### **2.5.1 Pemodelan Sistem**

Model didefinisikan sebagai suatu deskripsi logis tentang bagaimana sistem bekerja atau komponen-komponen berinteraksi. Dengan membuat model dari suatu sistem maka diharapkan dapat lebih mudah untuk melakukan analisis. Hal ini merupakan prinsip pemodelan, yaitu bahwa pemodelan bertujuan untuk mempermudah analisis dan pengembangannya. Melakukan pemodelan adalah suatu cara untuk mempelajari sistem dan model itu sendiri dan juga bermacam-macam perbedaan perilakunya.

Pemodelan dalam *science dan engineering* dilakukan dengan menurunkan perilaku sistem yang sebenarnya dalam bentuk variabel-variabel dimana keterkaitan diantaranya dapat diperlihatkan dalam suatu persamaan matematis. Ada tiga tahapan pemodelan matematis (Ogata, 2004):

1. Membuat struktur dari masalah/sistem yang akan dimodelkan;
2. Membentuk persamaan dasar dari hubungan antara variabel sistem dan konstanta berdasarkan persamaan dan hukum fisika.
3. Untuk memverifikasi validitas model, kinerja yang diprediksi, diperoleh dengan menyelesaikan persamaan model, dibandingkan dengan hasil eksperimen.

### **2.5.2 Simulasi**

Simulasi merupakan suatu teknik meniru operasi-operasi atau proses-proses yang terjadi dalam suatu sistem dengan bantuan perangkat komputer dan

dilandasi oleh beberapa asumsi tertentu sehingga sistem tersebut bisa dipelajari secara ilmiah (Law & Kelton, 2002)

Simulasi merupakan alat yang tepat untuk digunakan terutama jika diharuskan untuk melakukan eksperimen dalam rangka mencari komentar terbaik dari komponen-komponen sistem. Hal ini dikarenakan sangat mahal dan memerlukan waktu yang lama jika eksperimen dicoba secara riil. Dengan melakukan studi simulasi maka dalam waktu singkat dapat ditentukan keputusan yang tepat serta dengan biaya yang tidak terlalu besar karena semuanya cukup dilakukan dengan komputer.

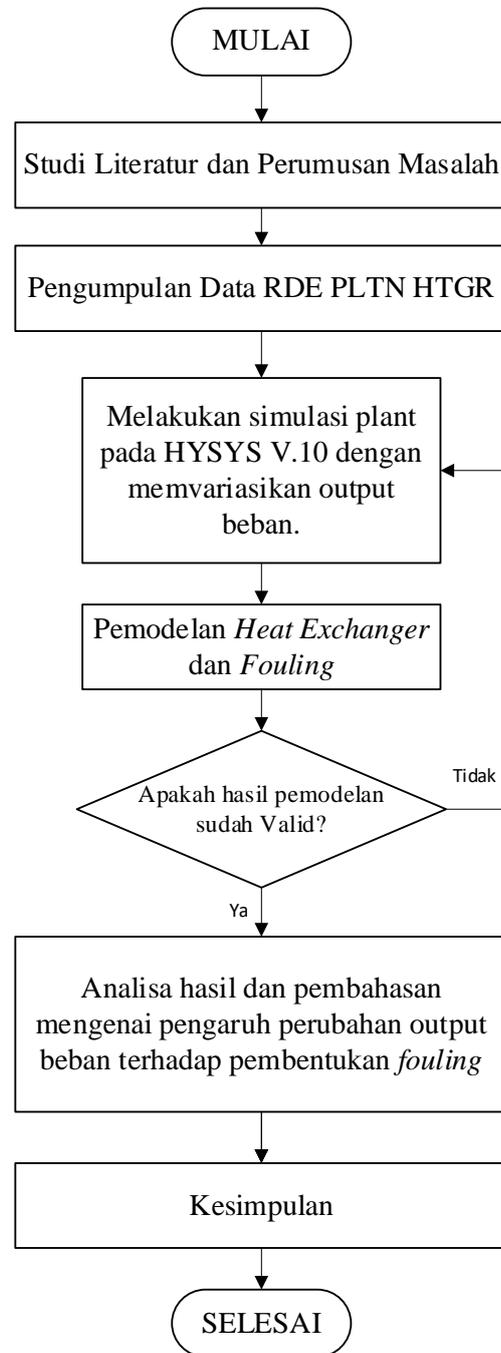
Validasi model simulasi dilakukan dengan partisipasi analis, pengambil keputusan dan manajer sistem. Uji validasi model digunakan untuk menunjukkan apakah pengambil keputusan dapat mempercayai model yang digunakan sebagai bagian dari proses pengambilan keputusan. Tidak ada teknik tunggal untuk melakukan validasi model. Prosedur validasi model simulasi tergantung dari sistem yang sedang dimodelkann dan lingkungan pemodelan. Salah satu metode validasi yang bisa digunakan adalah dengan membandingkan *output* simulasi dengan sistem nyata (Arif, 2017).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dirancang dengan beberapa tahap yang dapat dilihat dari diagram alir dibawah ini



**Gambar 3. 1** Diagram alir penelitian

### 3.1 Studi Literatur dan Perumusan Masalah

Studi literatur perlu dilakukan untuk menambah pemahaman konsep agar dapat menemukan solusi dari permasalahan yang ada. Studi literatur pada penelitian ini meliputi PLTN HTGR, *steam generator*, *heat exchanger*, *fouling* dan pemodelannya. Literatur yang digunakan adalah buku, jurnal penelitian ilmiah, artikel ilmiah dan laporan tugas akhir.

Dari hal hal tersebut, diangkat 2 permasalahan yang menjadi fokus pada tugas akhir ini yaitu untuk menganalisis pembentukan *fouling* pada *heat exchanger* yang ada di PLTN yang sudah di kontrol dengan cara memvariasikan *output* bebannya dan juga pengaruh perubahan *fouling* terhadap koefisien perpindahan panasnya.

### 3.2 Pengumpulan Data RDE PLTN HTGR

Pada tahap ini, data diambil dari reaktor daya eksperimental (RDE) HTGR di kawasan Tapak Puspipstek Serpong. Karena sifatnya eksperimental, maka *output* daya elektrik yang dihasilkan dari daya termal reaktornya hanya sebesar 3MW dari 10MW.

Data yang diambil yaitu data *properties* dan data kondisi operasinya yang tertera pada tabel 3.1 dan data dimensi *heat exchanger* yang tertera pada tabel 3.2.

**Tabel 3. 1** Properti Fluida dan Kondisi Operasi *Heat Exchanger*

<i>fluid allocation</i>			<i>Shell</i> (fluida dingin)		<i>Tube</i> (fluida panas)	
			<i>in</i>	<i>out</i>	<i>in</i>	<i>out</i>
<i>fluid circulate</i>			<i>Steam</i>		<i>Helium</i>	
<i>fluid quantity</i>	m	kg/s	3,4900	3,4900	4.4000	4.4000
<i>temperature</i>	T	°C	104	450	700	250
<i>density</i>	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	947,2300	21,0870	1.4825	1.6835
<i>viscosity</i>	$\mu$	kg/ m s	0,0002677	0,0000266	0.0043781	0.0006357
<i>specific heat</i>	Cp	J/kg °C	4392,7	2447,4	5197.6	5198.9
<i>thermal conductivity</i>	K	W/m °C	0,6823	0,0707	0.2515	0.1844
<i>inlet pressure</i>	P	kPa	6000		3000	
<i>velocity</i>	V	m/s	0,3400		206,0600	
<i>pressure drop</i>	$\Delta p$	kPa	2,4200		2,4200	
<i>fouling resist.</i>	Rf	m <sup>2</sup> K/W	0,000073		0,000455	

**Tabel 3. 2** Geometri *Heat Exchanger*

<i>shell side</i>	$N_s$	<i>no. of pass shell</i>		1,0000
	$D_s$	<i>inside diameter</i>	m	0,6000
<i>tube side</i>	$N_p$	<i>no. of passes tubes</i>		2,0000
	$N_t$	<i>no. of tubes</i>		94,0000
	$d_o$	<i>outer diameter</i>	m	0,0230
	$t_w$	<i>thickness</i>	m	0,002769
	$L_{to}$	<i>length</i>	m	5,0000
	$L_{tp}$	<i>pitch</i>	m	0,02875
	$\theta_{tp}$	<i>layout</i>	°	30,0000
	<i>baffle</i>	$N_b$	<i>no. of baffles</i>	
$\theta$		<i>helix angle</i>	Deg	45,0000
$L_{bc}$		<i>spacing central</i>	m	0,7000
$L_{bi}$		<i>spacing inlet</i>	m	0,70000
$L_{bo}$		<i>spacing outlet</i>	m	0,90000

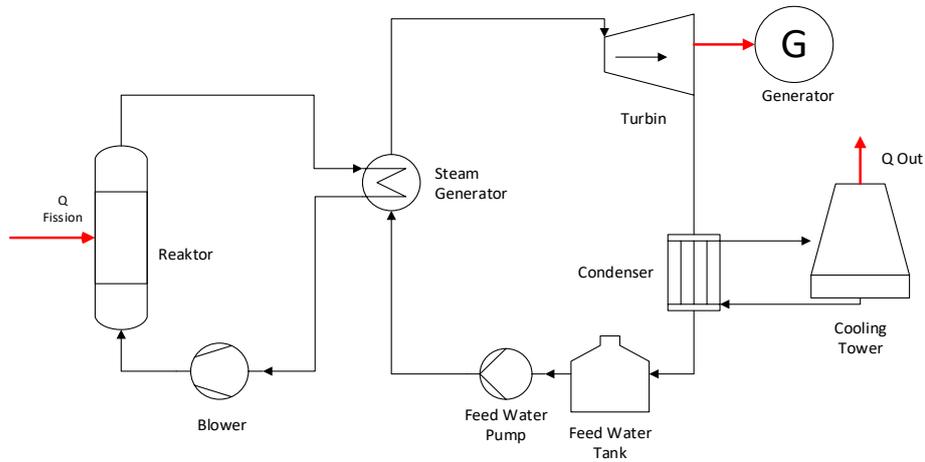
Desain *steam generator* yang digunakan pada PLTN HTGR ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Jenis	: <i>Helical tube</i>
Kapasitas maksimum transfer panas	: ~10 MWth
Luas permukaan perpindahan panas	: ~70 m <sup>2</sup>
Jumlah <i>tube</i> penukar panas	: 93
Ukuran <i>tube</i>	
- <i>Preheater/evaporator</i>	: 23 x 2,5 mm
- <i>Superheater</i>	: 23 x 4,2 mm
Diameter luar maksimum	: 23 mm
Tinggi total	: 4000 mm
Berat angkut	: ~14 Ton

### 3.3 Simulasi PLTN dengan Variasi *Output* Beban

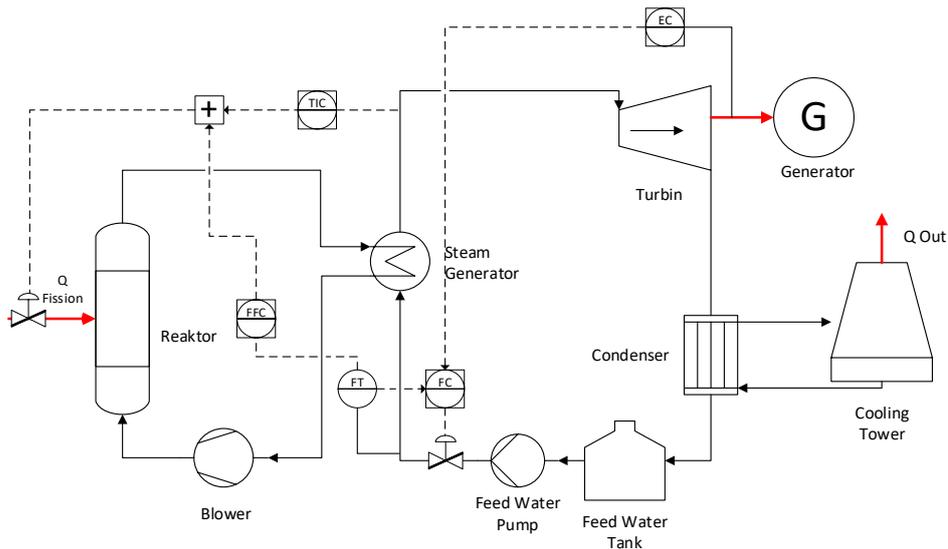
Pertama dilakukan perancangan RDE PLTN HTGR pada *software* HYSYS V.10 mengikuti PFD pada gambar 3.2. Gambar 3.2 merupakan gambar *process flow diagram* dari Reaktor Daya Eksperimental PLTN HTGR yang digunakan pada tugas akhir ini. Ketika melakukan simulasi atau pemodelan, harus dilengkapi dengan

loop validasi, untuk perancangan kontrol harus dilengkapi dengan loop terkontrol. Yang akan dilakukan setelah simulasi selesai dibuat.



**Gambar 3. 2** PFD PLTN HTGR

Setelah ini akan ditambahkan sistem untuk mengontrol PLTN tersebut dan gambarnya dapat dilihat pada gambar 3.3. Pada gambar 3.3, PLTN dikontrol dengan 3 macam *controller*, pertama kontrol tegangan, kontrol flow dan kontrol temperatur.

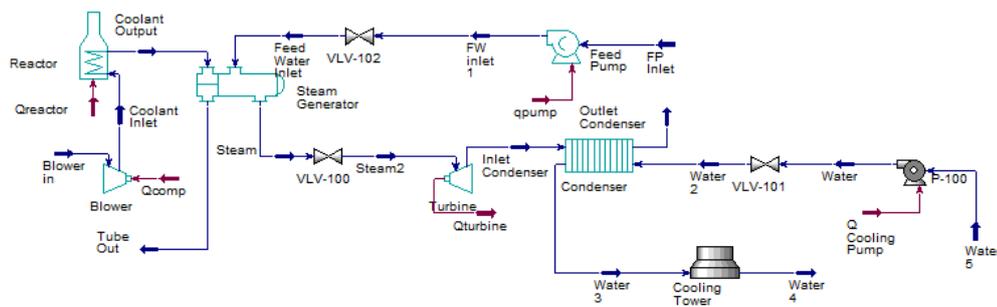


**Gambar 3. 3** RDE PLTN HTGR dengan kontrol

Untuk deskripsi kontrolnya, pertama-tama, ketika beban daya berubah, misal bertambah, kontrol daya akan mengirim sinyal ke kontrol *flow* pada *feed water* untuk menambah *feedwater* yang masuk ke *steam generator* dengan tujuan untuk menambah produksi uap. Tetapi dengan bertambahnya *feedwater* akan

membuat suhu berubah sehingga dibutuhkan energi tambahan agar *output* suhu tetap seperti yang dikontrol, maka dari itu kontrol temperatur pada sisi keluar *shell* akan mengirim sinyal ke reaktor yang juga mendapat sinyal dari kontrol *flow* untuk memperbanyak produksi energi panas yang bisa digunakan untuk mempertahankan suhu keluaran *steam generator*. Sedangkan untuk spesifikasi peralatannya, diambil dari *datasheet* seperti yang ada pada subbab 3.2 dan juga data lainnya dari *datasheet* yang didapat dari lapangan.

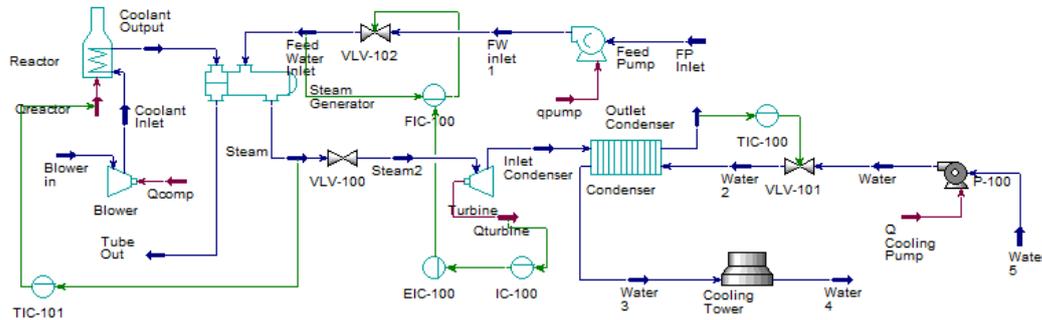
Dalam melakukan simulasi *plant* menggunakan *software* HYSYS V.10, yang pertama harus dilakukan yaitu menambahkan komponen yang digunakan pada proses yaitu H<sub>2</sub>O dan Helium. Kemudian memilih *fluid package* untuk memilih persamaan keadaan (*equation of state*) yang sesuai dengan proses. Untuk proses dengan komponen utama air, maka dipilih persamaan keadaan milik “Peng-Robinson”. Setelah menambahkan komposisi dan persamaan keadaan yang digunakan, maka menuju *flowsheet case* untuk membuat simulasi proses. Untuk simulasi yang dilakukan pada *software* HYSYS V.10, dapat dilihat di gambar 3.4.



**Gambar 3. 4** Simulasi *steady state* RDE PLTN HTGR menggunakan HYSYS V10

Desain dalam keadaan *steady state* untuk proses tangki telah berhasil dilakukan dengan tanda seluruh stream berwarna biru tua seperti pada gambar 3.4. Langkah selanjutnya adalah mengubah keadaan proses menjadi dinamik dengan memilih menu *Dynamics* dan melihat pada *Dynamics Assistant* untuk mengetahui kondisi-kondisi yang diperlukan apabila sistem diubah dari keadaan *steady state* menuju dinamik. Kondisi tersebut harus terpenuhi hingga bar pada *dynamic assistant* berubah hijau agar bisa melanjutkan menambahkan kontrol pada simulasinya. Tambahkan *PID Controller* pada *flowsheet*, setelah selesai, proses siap

diubah dari keadaan *steady state* menuju *dynamic*. Hasil setelah penambahan *controller* dapat dilihat pada gambar 3.5.



**Gambar 3. 5** Simulasi *dynamic state* RDE PLTN HTGR menggunakan HYSYS V.10

Perubahan *output* daya dilakukan dengan mengganti *heat flow* pada *Q turbine* dengan 500 kW, 1000 kW, 1500 kW, 2000 kW, 2500 kW, dan 3000 kW. Setelah dilakukan perubahan *output* daya, simulasi dijalankan kemudian dilakukan pencatatan kondisi operasi juga properti fluida pada *steam generator* yang nantinya akan digunakan untuk melakukan pemodelan sistem.

### 3.4 Pemodelan *Heat Exchanger* dan *Fouling*

Pemodelan ini dilakukan pada *heat exchanger* untuk menentukan koefisien perpindahan panas sisi *shell* dan *tube*, yang digunakan untuk menghitung pemodelan koefisien perpindahan panas keseluruhan, dan juga pemodelan *fouling*-nya. Untuk hasil perhitungannya dapat dilihat di Lampiran.

#### 3.4.1 Koefisien Perpindahan Panas Pada Sisi *Shell* dan *Tube*

Koefisien perpindahan panas pada sisi *tube* dan *shell* berbeda tergantung pada dimensi *heat exchanger*, kondisi operasi serta properties fluida.

a) Koefisien perpindahan panas pada sisi *tube*

Koefisien perpindahan panas pada sisi *tube* dapat dihitung dengan menggunakan metode Bell-Delaware (Thulukkanam, 2013).

(3. 1)

dengan:

= koefisien perpindahan panas pada sisi *tube* ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ )

= konduktifitas termal pada sisi *tube* (W/ m °C)

= bilangan Nusselt pada fluida di sisi *tube*

= diameter dalam *tube* (m)

Dimana adalah banyak jumlah *tube* dan adalah jumlah *tube pass*.

Nilai adalah diameter dalam *tube* yang dipengaruhi oleh diameter luar *tube* ( ) dan ketebalan dinding *tube* ( ) yang dapat dihitung dengan persamaan (3.2) sebagai berikut

(3. 2)

Bilangan Nusselt adalah bilangan Nusselt pada sisi *tube*, yang menyatakan rasio perpindahan panas secara konveksi dan konduksi secara normal. Nilai bilangan Nusselt untuk sisi *tube* ditentukan berdasarkan bilangan Reynold, dimana dapat dengan persamaan berikut (Souhaimi & Matsuura, 2011).

Untuk aliran turbulen dengan  $Re_t > 104$  menggunakan persamaan Side-Tate (Mac Adamas) (Thulukkanam, 2013).

(3. 3)

Untuk aliran intermediate dengan  $2100 < Re_t < 104$  menggunakan persamaan Colburn (Thulukkanam, 2013).

(3. 4)

Untuk aliran laminar dengan  $Re_t \leq 2100$  menggunakan persamaan Side-Tate (Mac Adamas) (Thulukkanam, 2013).

(3. 5)

Dimana setiap symbol dapat diartikan sebagai

$Re_t$  = bilangan Reynold pada sisi *tube*

= diameter dalam *tube* (m)

= bilangan Prandtl pada sisi *tube*

$L$  = panjang *tube* (m)

= viskositas fluida pada sisi *tube* ( $\text{kg/m s}^{-1}$ )

= viskositas fluida pada temperatur *wall tube* ( $\text{kg/m s}^{-1}$ )

Untuk menentukan bilangan Reynold digunakan persamaan :

$$\text{---} \quad (3.6)$$

Dimana  $\rho$  adalah nilai dari kecepatan aliran massa fluida yang mengalir di sisi *tube* dapat diperoleh dari persamaan

$$\text{---} \quad (3.7)$$

Dan  $A_t$  adalah luas permukaan pada *tube* yang dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{---} \quad (3.8)$$

Bilangan Prandtl pada *tube* yang merupakan nilai yang menyatakan distribusi temperatur pada aliran *tube* dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$\text{---} \quad (3.9)$$

b) Koefisien perpindahan panas pada sisi *shell*

Koefisien perpindahan panas pada sisi *shell* dihitung melalui persamaan berikut ini (Wang, Xie, Peng, & Zeng, 2007)

$$\text{---} \quad (3.10)$$

Dimana

= koefisien perpindahan panas pada sisi *shell* ( $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ )

= konduktifitas termal pada sisi *shell* ( $\text{W}/\text{m }^\circ\text{C}$ )

= bilangan Nusselt pada fluida di sisi *shell*

= diameter luar *tube* (m)

Dengan  $k$  adalah *thermal conductivity*, dan  $d_o$  adalah *outside diameter tube*. *Nusselt number* ( $h d_o / k$ ), dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{---} \quad (3.11)$$

*Prandtl number* pada *shell* ( $\mu / k$ ), dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{---} \quad (3.12)$$

*Reynold number* pada *shell*, , digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\text{---} \quad (3.13)$$

Dengan, sebagai kecepatan aliran fluida di sisi *shell* yang dinyatakan melalui persamaan:

$$\text{---} \quad (3.14)$$

Dimana menyatakan laju aliran massa dari fluida yang mengalir di sisi *shell*, menyatakan densitas fluida yang mengalir pada sisi *shell*, dan menyatakan viskositas dari fluida yang mengalir paa sisi *shell*. Sedangkan menyatakan *Crossflow area* pada *shell*, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (Gao dkk., 2015):

$$\text{---} \quad (3.15)$$

Dimana adalah *inside diameter shell*, adalah *inside diameter tube*, adalah *outer diameter tube*. Selanjutnya adalah *tube pitch* yang tegak lurus dengan arah *flow* dan adalah *tube pitch*. Dengan, sebagai *helical pitch* yang dinyatakan melalui persamaan:

$$(3.16)$$

### 3.4.2 Koefisien Perpindahan Panas keseluruhan

Pada perhitungan koefisien perpindahan panas keseluruhan dapat dicari dengan persamaan berikut

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{r}{k} + \frac{1}{h_o} \tag{3.17}$$

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{r}{k} + \frac{1}{h_o} + R_f \tag{3.18}$$

Dimana,

$U_c$  = Koefisien perpindahan panas keseluruhan pada kondisi bersih ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

Cond = Perpindahan panas konduksi ( $m^2 \text{ } ^\circ C /W$ )

$K_w$  = konduktifitas termal material *tube* ( $W/ m \text{ } ^\circ C$ )

Sedangkan koefisien perpindahan panas keseluruhan pada kondisi terjadi *fouling* dapat dihitung dengan persamaan berikut (Thulukkanam, 2013):

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{r}{k} + \frac{1}{h_o} + R_{ft} + R_{fs} \tag{3.19}$$

Dimana

= koefisien perpindahan panas keseluruhan pada kondisi terjadi *fouling* ( $W/ m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$R_{ft}$  = Resistansi *fouling* pada *tube* ( $m^2 \text{ } ^\circ C /W$ )

$R_{fs}$  = Resistansi *fouling* pada *shell* ( $m^2 \text{ } ^\circ C /W$ )

$h_t$  = Koefisien perpindahan panas pada *tube* ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$h_s$  = Koefisien perpindahan panas pada *shell* ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

$K_w$  = Konduktifitas termal material *tube* ( $W/ m \text{ } ^\circ C$ )

### 3.4.3 Pemodelan *Fouling Resistance*

Untuk menghitung *fouling resistance* pada *shell and tube heat exchanger* menggunakan Polley *model* sebagai berikut.

$$R_f = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \tag{3.20}$$

dengan:

— = *fouling resistance* ( $m^2 \text{ } K/J$ )

$$\begin{aligned}
 T_w &= \text{temperatur } tube \text{ wall (K)} \\
 &= 277,8 \text{ m}^2\text{K/J} \\
 E_a &= 48 \text{ KJ/mol} \\
 &= 4,17 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ K/J} \\
 R &= 0,008314 \text{ KJ/mol K}
 \end{aligned}$$

Temperatur *tube wall* dihitung dengan persamaan berikut.

$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \quad (3. 21)$$

Dimana,

$T_{t,av}$  = temperatur rata-rata pada *tube* ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{s,av}$  = temperatur rata-rata pada *shell* ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 3.5 Validasi Simulasi dan Pemodelan

Validasi digunakan untuk menentukan seberapa valid hasil simulasi dan juga hasil pemodelan yang telah dihitung. Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan dengan *data sheet* atau data desain *heat exchanger*. Data desain tersebut dianggap data yang paling benar yang sesuai dengan kondisi yang ada di lapangan, sehingga data desain dijadikan pedoman untuk melakukan validasi. Hasil pemodelan dikatakan valid apabila variasi antara hasil pemodelan dengan *data sheet* kecil atau sama. Apabila hasil pemodelan telah valid kemudian lanjut ke proses berikutnya. Apabila hasil pemodelan belum valid, maka perlu untuk dilakukan simulasi ulang dan memodelkan ulang *heat exchanger* dan *fouling resistance*.

Untuk simulasi, parameter yang diperhatikan antara lain temperatur, densitas, viskositas, *specific heat* dan *thermal conductivity* fluida masuk dan keluar di sisi *shell* dan *tube*, kemudian aliran massa pada sisi *shell* dan *tube*. Sedangkan untuk pemodelan, karena hanya dilakukan pemodelan pada *fouling resistance*, jadi parameter yang diperhatikan hanya *fouling resistance*.

**Tabel 3. 3** Validasi Proses pada Simulasi *Steam Generator* pada *Plant RDE PLTN HTGR*

Variabel	Satuan	Shell			Tube		
		Simulasi	Data Sheet	Dev	Simulasi	Data Sheet	Dev
<i>fluid quantity</i>	kg/s	3.68	3.49	0.05	4.4	4.4	0.00
<i>In</i>							
<i>temperature</i>	°C	161.1	104	0.55	624.4	700	-0.11
<i>density</i>	kg/m <sup>3</sup>	896	947.23	-0.05	1.281	1.4825	-0.14
<i>viscosity</i>	kg/m s	1,68 x 10 <sup>-4</sup>	2,68 x 10 <sup>-4</sup>	-0.37	0.004243	0.0043781	-0.03
<i>specific heat</i>	J/kg °C	4602	4392.7	0.05	5197	5197.6	0.00
<i>thermal conductivity</i>	W/m °C	0.6841	0.6823	0.00	0.2501	0.2515	-0.01
<i>Out</i>							
<i>temperature</i>	°C	529.8	450	0.18	255.9	250	0.02
<i>density</i>	kg/m <sup>3</sup>	15.88	21.087	-0.25	2.375	1.6835	0.41
<i>viscosity</i>	kg/m s	3,02 x 10 <sup>-5</sup>	2,66 x 10 <sup>-5</sup>	0.13	0.0005873	0.0006357	-0.08
<i>specific heat</i>	J/kg °C	2331	2447.4	-0.05	5200	5198.9	0.00
<i>thermal conductivity</i>	W/m °C	0.07639	0.0707	0.08	0.1823	0.1844	-0.01

Pada tabel 3.3 dapat dilihat hasil validasi untuk simulai yang dilakukan pada *software HYSYS V.10*. Simulasi dilakukan untuk mengetahui kondisi operasi dan juga properti fluida pada *steam generator* yang nantinya digunakan untuk pemodelan *foulingnya*.

Sedangkan pada tabel 3.4, adalah hasil pemodelan *fouling resistance* yang divalidasi dengan nilai *fouling resistance* pada *datasheet*. Hasil ini dapat dikatakan valid karena nilai hasil pemodelan dan nilai pada *data sheet* memiliki deviasi yang sangat kecil yaitu 0.01. Maka dari itu, dapat dilanjutkan ke tahap analisis. Karena hasil pemodelannya besarnya lebih kecil dari *data sheet*, dapat di terima.

**Tabel 3. 4** Validasi Pemodelan *Fouling* pada *Steam Generator*

Variabel	Satuan	Pemodelan	Data Sheet	Dev	Pemodelan	Data Sheet	Dev
<i>fouling resist.</i>	m <sup>2</sup> K/W	<i>Shell</i>			<i>Tube</i>		
		0.0000725	0.0000730	-0.01	0.0004520	0.0004550	-0.01

### **3.6 Analisa Hasil dan Pembahasan**

Analisa dilakukan terhadap hasil pemodelan *fouling* dan juga perhitungan koefisien perpindahan panas secara keseluruhan. Kemudian dilakukan analisa secara menyeluruh juga terhadap perubahan kondisi operasi dan properti fluida pada *heat exchanger*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Kondisi Operasi dan *Properties* dari *Heat Exchanger*

Setelah dilakukan perubahan *output* daya, didapatkan data kondisi operasi dan *properties* seperti yang tercantum pada tabel 4.1 sampai 4.4. Pada tabel 4.1 dapat dilihat untuk *mass flow* fluida pada sisi *tube* yang membawa gas helium cenderung konstan sedangkan pada sisi *shell* yang membawa *feed water* terjadi kenaikan setiap beban dayanya bertambah.

**Tabel 4. 1** *Mass Flow* di Sisi *Shell* dan *Tube* dengan Variasi Perubahan Beban Daya

Beban (kW)	<i>Mass flow</i> (kg/s)	
	<i>Tube</i>	<i>Shell</i>
500	4,429	0,497
1000	4,429	0,959
1500	4,429	1,492
2000	4,426	2,089
2500	4,416	2,782
3000	4,400	3.680

Kemudian dilanjutkan ke tabel 4.2 yang menunjukkan perubahan *temperature* di sisi *shell* dan *tube*. Di sisi *tube*, temperatur mengalami kenaikan seiring bertambahnya beban daya, sementara untuk temperatur pada sisi *shell* lebih konstan.

**Tabel 4. 2** Temperatur di Sisi *Shell* dan *Tube* dengan Variasi Perubahan Beban Daya

Beban (kW)	<i>Temperature</i> (°C)					
	<i>Tube</i>			<i>Shell</i>		
	<i>In</i>	<i>Out</i>	$\Delta$	<i>In</i>	<i>Out</i>	$\Delta$
500	530,400	480,800	49,600	167,400	530,000	362,600
1000	531,000	423,500	107,500	163,900	530,100	366,200
1500	532,000	357,600	174,400	162,500	529,600	367,100
2000	549,800	300,600	249,200	161,800	530,900	369,100
2500	599,600	263,400	336,200	161,300	530,100	368,800
3000	689,400	237,900	451,500	161,100	529,800	368,700

Dan di tabel 4.3 dan 4.4 terdapat *properties* dari fluida pada sisi *shell* dan *tube* setelah dilakukan perubahan beban daya yang pada tahap selanjutnya akan digunakan untuk perhitungan nilai *fouling*.

**Tabel 4.3** *Properties* di Sisi *Shell* dan *Tube* dengan Variasi Perubahan Beban Daya

Beban (kW)	<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )				<i>Specific Heat</i> (J/kg °C)			
	<i>Tube</i>		<i>Shell</i>		<i>Tube</i>		<i>Shell</i>	
	<i>In</i>	<i>Out</i>	<i>In</i>	<i>Out</i>	<i>In</i>	<i>Out</i>	<i>In</i>	<i>Out</i>
500	1,5310	1,6100	912,7000	153,0000	5198	5198	4480	4364
1000	1,5300	1,7430	904,3000	69,7600	5198	5198	4542	3035
1500	1,5280	1,9240	900,9000	43,1200	5198	5199	4568	2660
2000	1,4950	2,1160	899,1000	30,5100	5198	5199	4583	2501
2500	1,4110	2,2620	898,0000	23,0900	5198	5200	4591	2413
3000	1,2810	2,3750	896,0000	15,8800	5197	5200	4602	2331

**Tabel 4.4** *Properties* di Sisi *Shell* dan *Tube* dengan Variasi Perubahan Beban Daya

Beban (kW)	<i>Viscosity</i> (kg/ m s)				<i>Thermal Conductivity</i> (W/m °C)			
	<i>Tube</i>		<i>Shell</i>		<i>Tube</i>		<i>Shell</i>	
	<i>In</i>	<i>Out</i>	<i>In</i>	<i>Out</i>	<i>In</i>	<i>Out</i>	<i>In</i>	<i>Out</i>
500	0,0025	0,0021	1,61 x 10 <sup>-4</sup>	3,69 x 10 <sup>-5</sup>	0,2285	0,2214	0,6820	0,1407
1000	0,0025	0,0016	1,65 x 10 <sup>-4</sup>	3,24 x 10 <sup>-5</sup>	0,2286	0,2128	0,6832	0,0097
1500	0,0025	0,0012	1,66 x 10 <sup>-4</sup>	3,12 x 10 <sup>-5</sup>	0,2288	0,2025	0,6836	0,0861
2000	0,0027	0,0009	1,67 x 10 <sup>-4</sup>	3,08 x 10 <sup>-5</sup>	0,2313	0,1932	0,6839	0,0817
2500	0,0032	0,0007	1,68 x 10 <sup>-4</sup>	3,05 x 10 <sup>-5</sup>	0,2382	0,1868	0,6840	0,0789
3000	0,0042	0,0006	1,68 x 10 <sup>-4</sup>	3,02 x 10 <sup>-5</sup>	0,2501	0,1823	0,6841	0,0764

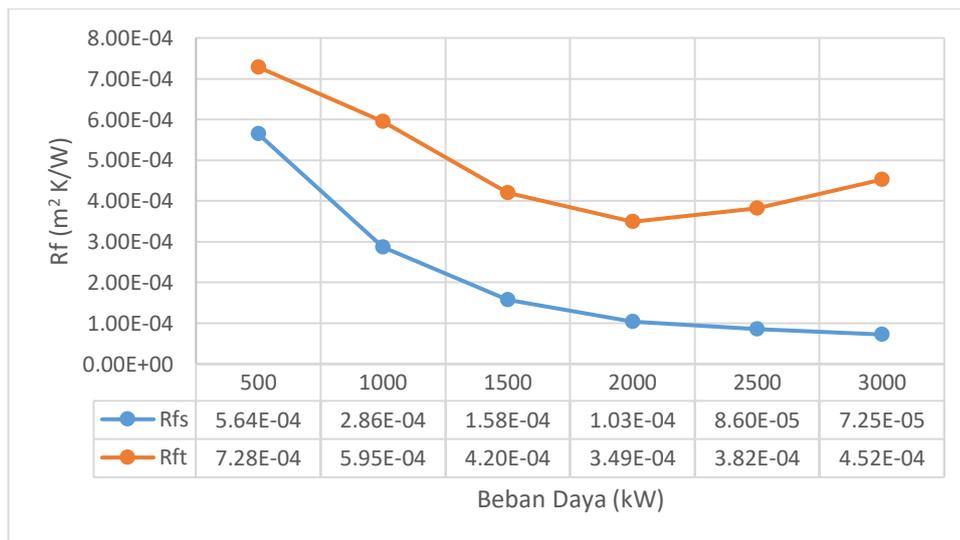
#### 4.2 Hasil Pemodelan *Fouling Resistance* pada Sisi *Tube* dan *Shell*

Setelah didapatkan data *mass flow*, *temperature*, dan data properti setelah dilakukan perubahan beban daya, dapat dilanjutkan ke pemodelan dan perhitungan *fouling resistance*. Untuk menghitung *fouling resistance*, sebelumnya harus dihitung terlebih dahulu nilai *Reynold number* dan *prandtl number*. Untuk perhitungan *Reynold number* pada sisi *shell* dan *tube* dapat digunakan persamaan (3.13) dan persamaan (3.6), kemudian untuk perhitungan *Prandtl number* pada sisi *shell* dan *tube* dapat digunakan persamaan (3.12) dan persamaan (3.9). Sedangkan untuk perhitungan *fouling resistance* digunakan persamaan (3.20)

**Tabel 4. 5** *Fouling Resistance* di Sisi *Shell* dan *Tube* dengan Variasi Perubahan Beban Daya

Beban (kW)	<i>Shell</i>			<i>Tube</i>		
	Reys	Prs	Rfs	Reyt	Prt	Rft
500	3404,045	1,065	$5,463 \times 10^{-4}$	1510,788	52,546	$7,284 \times 10^{-4}$
1000	6591,292	1,078	$2,846 \times 10^{-4}$	1672,198	48,388	$5,949 \times 10^{-4}$
1500	10240,230	0,927	$1,580 \times 10^{-4}$	1865,110	44,404	$4,197 \times 10^{-4}$
2000	14312,336	0,916	$1,033 \times 10^{-4}$	1938,350	43,381	$3,490 \times 10^{-4}$
2500	19042,954	0,909	$8,601 \times 10^{-5}$	1765,240	47,476	$3,821 \times 10^{-4}$
3000	25199,996	0,902	$7,246 \times 10^{-5}$	1413,178	58,072	$4,520 \times 10^{-4}$

Dari tabel 4.5 dapat dilihat untuk sisi *shell*, *Reynold number* bertambah seiring bertambahnya beban daya sedangkan *fouling resistencenya* mengalami penurunan seiring bertambahnya beban daya. Kemudian untuk sisi *tube*, *Reynold number*nya juga bertambah, tetapi pada beban daya 2500 kW nilai *Reynold number*nya turun dan membuat nilai *fouling resistance* yang sebelumnya mengalami penurunan juga pada 2500kW mengalami kenaikan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat di gambar 4.1.



**Gambar 4. 1** Grafik perbandingan antara *fouling resistance* pada sisi *shell* dan *tube*

Dari gambar 4.1 dapat dilihat lebih jelas mengenai kecenderungan *fouling resistance* yang hasilnya akan mengecil ketika beban dayanya bertambah, itu dikarenakan seperti yang sudah sedikit dijelaskan di paragraph sebelumnya.

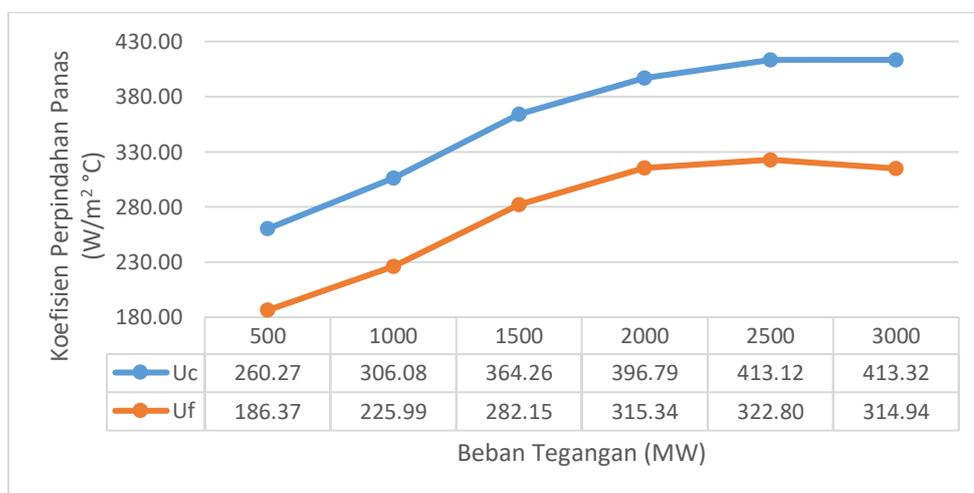
### 4.3 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas Total dari *Heat Exchanger*

Kemudian dapat juga dihitung koefisien perpindahan panasnya,  $U_c$  merupakan koefisien perpindahan panas dalam kondisi bersih sedangkan  $U_f$  merupakan koefisien perpindahan panas ketika adanya *fouling*. Untuk mendapatkan nilai  $U_c$  dan  $U_f$ , digunakan persamaan (3.17) dan (3.19) secara berturut-turut.

**Tabel 4. 6** Koefisien Perpindahan Panas di Sisi *Shell* dan *Tube* dengan Variasi Perubahan Beban Daya

Beban (kW)	$U_c$ (W/ m <sup>2</sup> °C)	$U_f$ (W/ m <sup>2</sup> °C)
500	260,27	186,37
1000	306,08	225,99
1500	364,26	282,15
2000	396,79	315,34
2500	413,12	322,80
3000	413,32	314,94

Lihat pada tabel 4.6, koefisien perpindahan panas ketika kondisi bersih mengalami kenaikan dengan bertambahnya beban daya, begitu juga dengan koefisien perpindahan panas ketika kondisi adanya *fouling*, tetapi saat beban daya 3000kW, nilai koefisien perpindahan panasnya turun, untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada gambar 4.2. Dan juga adanya *fouling* menyebabkan koefisien perpindahan panasnya mengalami penurunan.



**Gambar 4.2** Grafik perbandingan antara koefisien perpindahan panas pada kondisi bersih dan kondisi terjadinya *fouling*

#### 4.4 Pembahasan

Pertama-tama akan dibahas terlebih dahulu mengenai sistem kerja pembangkit listrik tenaga nuklir yang sudah dikontrol. Variabel yang dikendalikan adalah beban daya dengan memanipulasi laju aliran *steam feedwater*. Ketika terjadi kenaikan beban daya, aliran massa *feed water* akan bertambah tetapi menyebabkan temperatur dari *steam* ini turun. Karena temperatur *steam* dijaga pada suhu 530°C, untuk menjaga pada suhu tersebut, dibutuhkan energi dari yang lebih tinggi dan bisa didapatkan dari *loop* primer. Meningkatkan energi dari *loop* primer dilakukan dengan cara peningkatan temperatur gas helium pada reaktor yang akan membantu meningkatkan lagi *temperature* dari *steam* agar tetap pada suhu 530°C.

Jika dilihat dari tabel 4.1 dan 4.2, sisi *tube* yang membawa gas helium mengalami kenaikan temperatur tetapi aliran massa fluidanya cenderung tetap, sedangkan pada sisi *shell* yang membawa *feed water*, dikarenakan suhunya sudah di kontrol agar tetap pada 530°C, yang mengalami perubahan adalah aliran massa fluidanya yang mengalami kenaikan setiap bertambahnya beban daya.

Bertambahnya aliran massa pada sisi *shell* akan menyebabkan bertambahnya kecepatan aliran fluida pada sisi *shell* dan membuat *Reynold number* juga mengalami kenaikan. Jika dilihat dari tabel 4.4, pada sisi *shell* ketika *Reynold number*nya mengalami kenaikan, nilai *fouling resistance* akan berkurang. Dapat dikatakan bahwa *fouling resistance* dipengaruhi oleh aliran massa fluida, karena nilai *fouling resistance* akan mengecil ketika aliran massa fluida semakin besar yang menyebabkan kecepatan aliran juga makin besar dan juga sebaliknya.

Sedangkan pada sisi *tube* yang aliran massa gas heliumnya cenderung sama walaupun pada beban daya 2500 kW dan 3000 kW massa aliran gasnya mengalami sedikit penurunan sekitar 0,01 kg/s dan 0,026 kg/s. Temperatur yang mengalami kenaikan mempengaruhi perhitungan *temperature tube wall* seperti pada persamaan (3.21) menyebabkan *tempeature wall tubenya* mengalami penurunan. Jika dilihat dari tabel 4.4 sisi *tube*, hubungan antara *fouling resistance* dengan *Reynold number* juga sama, berbanding terbalik. Semakin besar *Reynold number*, nilai *fouling resistance* akan semakin kecil, tetapi jika diperhatikan lagi, agar lebih mudah bisa dilihat pada gambar 4.1, disitu terlihat bahwa *fouling resistance* sempat mengalami kenaikan pada beban daya 2500 kW dan 3000 kW. Karena itu, dilakukan

perhitungan *Logarithmic Mean Temperature Difference* (LMTD) yang merupakan indikator perbedaan suhu rata-rata antara cairan panas dan dingin dalam penukar panas. Setelah dilakukan, didapatkan hasil LMTD untuk 500 kW, 1500 kW, 2000 kW, 2500 kW dan 3000 kW berturut-turut adalah 46,97°C; 45,67°C, 43,82°C; °C; 60,13°C; 84,76°C dan 113,20°C. Memang setelah 2000 kW, nilai *fouling resistance* akan naik. Jadi dapat dikatakan bahwa selain aliran massa fluida, selisih *temperature* juga berpengaruh terhadap berubahnya nilai *fouling resistance* karena nilai selisih *temperature* sebanding dengan nilai *fouling resistance*.

Jika dilihat dari nilai *fouling resistance* yang sudah dimodelkan, kondisi operasi terbaik adalah ketika PLTN menghasilkan daya sebesar 3000 kW dikarenakan nilai *fouling resistance* pada sisi *shell* dan *tube* nya ketika beban dayanya 3000 kW adalah yang terkecil dibandingkan ketika PLTN menghasilkan beban daya yang lebih kecil dari 3000kW.

Kemudian untuk koefisien perpindahan panas total pada kondisi bersih menurut persamaan (3.17) dan persamaan (3.18), nilainya dipengaruhi koefisien perpindahan panas pada sisi *shell* dan *tube*, yang setelah dilakukannya, kedua koefisien tersebut cenderung naik nilainya. Dan jika dilihat pada tabel 4.5 koefisien perpindahan panasnya juga mengalami kenaikan dengan bertambahnya beban daya. Sedangkan untuk koefisien perpindahan panas total pada kondisi ada *fouling*, selain dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas pada sisi *shell* dan *tube*, dipengaruhi juga oleh *fouling resistance* sisi *shell* dan *tube* persamaan (3.19). Ketika nilai *fouling resistance* mengecil, koefisien perpindahan panas total saat kondisi *fouling* akan mengalami kenaikan. Dapat dikatakan bahwa keduanya tidak sebanding dan semakin besar *fouling resistance* akan membuat kerja *heat exchanger* menurun karena koefisien perpindahan panas totalnya menurun.

Dan dari pembahasan tersebut, dapat juga dikatakan bahwa kondisi terbaik adalah ketika PLTN menghasilkan daya sebesar 3000 kW, karena ketika nilai *fouling resistance* sangat kecil, nilai koefisien perpindahan panasnya akan menjadi lebih besar dibanding dengan ketika PLTN menghasilkan beban daya dibawah 3000 kW.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Perubahan *output* beban menyebabkan perubahan aliran massa fluida pada sisi *shell* dan juga perubahan *temperature* pada sisi *tube*. Setelah dilakukan analisa, dapat dikatakan bahwa *fouling resistance* dipengaruhi oleh aliran massa fluida, karena nilai *fouling resistance* akan mengecil ketika aliran massa fluida semakin besar yang menyebabkan kecepatan aliran juga makin besar dan juga sebaliknya. Begitu juga dengan selisih *temperature*. Selisih temperatur juga berpengaruh terhadap berubahnya nilai *fouling resistance* karena nilai selisih temperatur sebanding dengan nilai *fouling resistance*, jika nilai selisih temperatur bertambah, nilai *fouling resistance* juga akan bertambah.

Nilai *fouling resistance* mempengaruhi koefisien perpindahan panas, dengan adanya *fouling*, nilai koefisien perpindahan panas keseluruhan akan mengalami penurunan. Semakin besar *fouling resistance* akan nilai koefisien perpindahan panas totalnya menurun.

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

Melakukan simulasi dengan variable bebas lainnya untuk dapat menemukan faktor lain yang dapat menyebabkan *fouling*.

Melakukan desain *heat exchanger* agar dapat dilakukan validasi pemodelan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Arif, M. (2017). *Pemodelan Sistem*. Yogyakarta: Deepublish.
- Association, W. N. (2019). *Pocket Guide*. England: World Nuclear Association .
- Awad, M. M. (2011). Fouling of Heat Transfer Surfaces. In A. Belmiloudi, *Heat Transfer - Theoretical analysys, Experimental Investigations and Industrial System* (pp. 505-542). Rijeka, Croatia: InTech.
- BAPPENAS, K. P. (2020, June 28). Rancangan Teknokratik. *RPJMN IV 2020-2024 : Indonesia Berpenghasilan Menengah - Tinggi yang Sejahtera, Adil dan Berkesinambungan*, pp. 22-23.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., & Incropera, F. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th Edition*. John Wiley & Sons Inc.
- Bonavigo, L., & Salve, M. D. (2011). Issues for Nuclear Power Plants Steam Generators . *Steam Generator Systems: Operational Reliability and Efficiency* , 371-392.
- D.Q Kern. (1965). *Process Heat Transfer*. New York: Mc Graw-Hill Book Company.
- Glasstone, S. (2001). *Nuclear Reactor Engineering : Reactor Systems Engineering 4th Edition*.
- Harche, R., Absi , R., & Mouheb, A. (2014). Study of the fouling deposit in the heat exchangers of Algiers refinery. *Int J Ind Chem* (p. 8). Springer.
- IAEA. (1997). *Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: Steam generators*. Austria: IAEA.
- J., N., & A., B. C. (2005). Fouling Mitigation by Design. *6th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*.
- Kakac, S., & Liu, H. (2002). *Heat Exchangers Selecrion, Rating and Thermal Design 2nd Edition*. Corel Gables, Florida: CRC Press LLC.
- KBBI. (2020, July 23). *KBBI*. Retrieved from Kamus Besar Bahasa Indonesia: <https://kbbi.kemdikbud.go.id/>
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (2002). *Simulation Modeling & Analysis 2nd Edition*. Singapore: McGraw Hill.

- Nesta, J., & Bennett, C. (2005). Fouling Mitigation by Design. *International Conference of Heat Exchanger Fouling and Cleaning - Challenges and Opportunities*. Germany.
- Novak, S., & Podest, M. (1987). *Nuclear power plant ageing and life extension : Safety aspects*. IAEA.
- OECD. (2015). *Collection and Analysis of Common-cause Failures of Heat Exchangers*. OLIS.
- Ogata, K. (2004). *System Dynamics 4th edition*. New Jersey: Pearson Prentice Hall
- Parmanto, E. M., & Irawan, D. (2007). *Mengenal PLTN dan Prospeknya di Indonesia*. Jakarta: Pusat Diseminasi Iptek Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- PDIN. (2007). Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. In *ATOMS* (pp. 1-6). Jakarta: Pusat Diseminasi Iptek Nuklir.
- Putra, A. F. (2018). *Desain Plantwide Control Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Tipe High Temperature Gas-Cooled Reactor*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Šadek, S., & Grgić, D. (2017). Operation and Performance Analysis of Steam Generators in Nuclear Power Plants. In *Heat Exchangers - Advanced Features and Applications*. InTech.
- Saepuloh, A., & Indrakoesoema, K. (2015). Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir. *1*(1), 16-25.
- Thirumarimurugan, M., Kannadasan, T., & Ramasamy, E. (2008). Performance Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger Using Miscible System. *American Journal of Applied Sciences*, *5*(5), 548 - 522.
- Thorme, J. R. (2004). *Engineering Data Book III*. Wolverine Tube Inc.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook*. New York: CRC Press.
- Turner, C. W., & Khumsa-Ang, K. (2017). Corrosion Product transport and fouling in nuclear steam generators. In C. W. Turner, & K. Khumsa-Ang, *Steam Generators for Nuclear Power Plants* (pp. 215-271). Deep River, ON, Canada: Canadian Nuclear Laboratories.

- Wang, Q.-W., Xie, G., Peng, B.-T., & Zeng, M. (2007). Experimental Study and Genetic-Algorithm-Based Correlation on Shell-Side Heat Transfer and Flow Performance of Three Different Types of Shell-and-Tube Heat Exchangers. *JOURNAL OF HEAT TRANSFER-TRANSACTIONS OF THE ASME*, 129, 1277-1285.
- Zohuri, B. (2019). *Introduction to the Nuclear Power Industry*. New Mexico: Springer International Publishing AG.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

### LAMPIRAN A. Daftar simbol

**Tabel A1.** Daftar simbol dan keterangan

<b>Variabel</b>	<b>Satuan</b>	<b>Keterangan</b>
$d_o$	M	Diameter luar <i>tube</i>
$n_b$		Jumlah <i>baffle</i>
$d_s$	M	Diameter dalam <i>shell</i>
$l_{bi}$	M	Jarak <i>baffle</i> inlet
$l_{bo}$	M	Jarak <i>baffle</i> outlet
$L_{to}$	M	Panjang <i>tube</i> efektif
$L_{bc}$	M	Jarak antar <i>baffle</i>
$G_s$	Kg / s m <sup>2</sup>	Kecepatan aliran massa pada <i>shell</i>
$Res$		Bilangan <i>Reynold</i> pada <i>shell</i>
$Prs$		Nilai Prandtl pada <i>shell</i>
$h_s$	W/m <sup>2</sup> °C	Koefisien perpindahan panas pada <i>shell</i>
$d_i$	M	Diameter dalam <i>tube</i>
$A_t$	m <sup>2</sup>	Luas permukaan <i>tube</i>
$G_t$	Kg / s m <sup>2</sup>	Kecepatan aliran massa pada <i>tube</i>
$Ret$		Bilangan <i>Reynold</i> pada <i>tube</i>
$Prt$		Bilangan Prandtl pada <i>tube</i>
$h_t$	W / m <sup>2</sup> °C	Koefisien perpindahan panas pada <i>tube</i>
	m <sup>2</sup> K / J	Konstanta deposit
$E_a$	KJ / mol	Energi aktivasi
	m <sup>2</sup> K / J	Konstanta supresi
$R$	kJ / mol K	Konstanta gas konstan
$R_{fs}$	m <sup>2</sup> °C /W	<i>Fouling resistance</i> pada <i>shell</i>
$R_{ft}$	m <sup>2</sup> °C /W	<i>Fouling resistance</i> pada <i>tube</i>
$cond$	m <sup>2</sup> °C /W	Perpindahan panas konduksi
$U_f$	W /m <sup>2</sup> °C	Koefisien perpindahan panas keseluruhan pada kondisi <i>fouling</i>
$A_o$	m <sup>2</sup>	Luas permukaan keseluruhan <i>heat exchanger</i>
$N_t$		Jumlah <i>tube</i>
$T_{c,i}$	°C	Temperatur masuk fluida dingin
$T_{c,o}$	°C	Temperatur keluar fluida dingin
$T_{h,i}$	°C	Temperatur masuk fluida panas
$T_{h,o}$	°C	Temperatur keluar fluida panas

## LAMPIRAN B. Hasil Simulasi dengan perubahan beban daya

**Tabel B1.** Data properti dan kondisi operasi simulasi saat beban 500 kW

Name	Unit	Coolant Output	Tube Out	Feed Water Inlet	Steam
		(Tube in)	(Tube Out)	(Shell In)	(Shell Out)
Temperature	C	530,4	480,8	167,4	530
Mass Flow	kg/s	4,429	4,429	0,4974	0,4974
Heat Flow	kW	11630	10490	-7574	-6434
density	$\rho$	1,531	1,61	912,7	153
specific heat	Cp	5198	5198	4480	4364
viscosity	$\mu$	0,002493	0,002055	0,0001612	0,0000369
thermal conductivity	K	0,2285	0,2214	0,682	0,1407

**Tabel B2.** Data properti dan kondisi operasi simulasi saat beban 1000 kW

Name	Unit	Coolant Output	Tube Out	Feed Water Inlet	Steam
		(Tube in)	(Tube Out)	(Shell In)	(Shell Out)
Temperature	C	531	423,5	163,9	530,1
Mass Flow	kg/s	4,429	4,429	0,9586	0,9586
Heat Flow	kW	11650	9172	-14630	-12152
density	$\rho$	1,53	1,743	904,3	69,76
specific heat	Cp	5198	5198	4542	3035
viscosity	$\mu$	0,002499	0,00161	0,0001648	3,237E-05
thermal conductivity	K	0,2286	0,2128	0,6832	0,009681

**Tabel B3.** Data properti dan kondisi operasi simulasi saat beban 1500 kW

Name	Unit	Coolant Output	Tube Out	Feed Water Inlet	Steam
		(Tube in)	(Tube Out)	(Shell In)	(Shell Out)
Temperature	C	532	357,6	162,5	529,6
Mass Flow	kg/s	4,429	4,429	1,492	1,492
Heat Flow	kW	11670	7656	-22794	-18780
density	$\rho$	1,528	1,924	900,9	43,12
specific heat	Cp	5198	5199	4568	2660
viscosity	$\mu$	0,002508	0,001176	0,0001663	3,123E-05
thermal conductivity	K	0,2288	0,2025	0,6836	0,08613

**Tabel B4.** Data properti dan kondisi operasi simulasi saat beban 2000 kW

<i>Name</i>	<i>Unit</i>	<i>Coolant Output</i>	<i>Tube Out</i>	<i>Feed Water Inlet</i>	<i>Steam</i>
		<i>(Tube in)</i>	<i>(Tube Out)</i>	<i>(Shell In)</i>	<i>(Shell Out)</i>
<i>Temperature</i>	C	549,8	300,6	161,8	530,9
<i>Mass Flow</i>	kg/s	4,426	4,426	2,089	2,089
<i>Heat Flow</i>	kW	12077	6337	-31920	-26180
<i>density</i>	$\rho$	1,495	2,116	899,1	30,51
<i>specific heat</i>	Cp	5198	5199	4583	2501
<i>viscosity</i>	$\mu$	0,002678	0,0008644	0,0001671	3,078E-05
<i>thermal conductivity</i>	K	0,2313	0,1932	0,6839	0,08165

**Tabel B5.** Data properti dan kondisi operasi simulasi saat beban 2500 kW

<i>Name</i>	<i>Unit</i>	<i>Coolant Output</i>	<i>Tube Out</i>	<i>Feed Water Inlet</i>	<i>Steam</i>
		<i>(Tube in)</i>	<i>(Tube Out)</i>	<i>(Shell In)</i>	<i>(Shell Out)</i>
<i>Temperature</i>	C	599,6	263,4	161,3	530,1
<i>Mass Flow</i>	kg/s	4,416	4,416	2,782	2,782
<i>Heat Flow</i>	kW	13190	5469	-42521	-34800
<i>density</i>	$\rho$	1,411	2,262	898	23,09
<i>specific heat</i>	Cp	5198	5200	4591	2413
<i>viscosity</i>	$\mu$	0,003189	0,000692	0,0001676	3,046E-05
<i>thermal conductivity</i>	K	0,2382	0,1868	0,684	0,07891

**Tabel B6.** Data properti dan kondisi operasi simulasi saat beban 3000 kW

<i>Name</i>	<i>Unit</i>	<i>Coolant Output</i>	<i>Tube Out</i>	<i>Feed Water Inlet</i>	<i>Steam</i>
		<i>(Tube in)</i>	<i>(Tube Out)</i>	<i>(Shell In)</i>	<i>(Shell Out)</i>
<i>Temperature</i>	C	624,4	255,9	161,1	529,8
<i>Mass Flow</i>	kg/s	4,4	4,4	3,68	3,68
<i>Heat Flow</i>	kW	15196	4866	-56250	-45920
<i>density</i>	$\rho$	1,281	2,375	896	15,88
<i>specific heat</i>	Cp	5197	5200	4602	2331
<i>viscosity</i>	$\mu$	0,004243	0,0005873	0,0001678	3,018E-05
<i>thermal conductivity</i>	K	0,2501	0,1823	0,6841	0,07639

**LAMPIRAN C. Perhitungan *fouling***

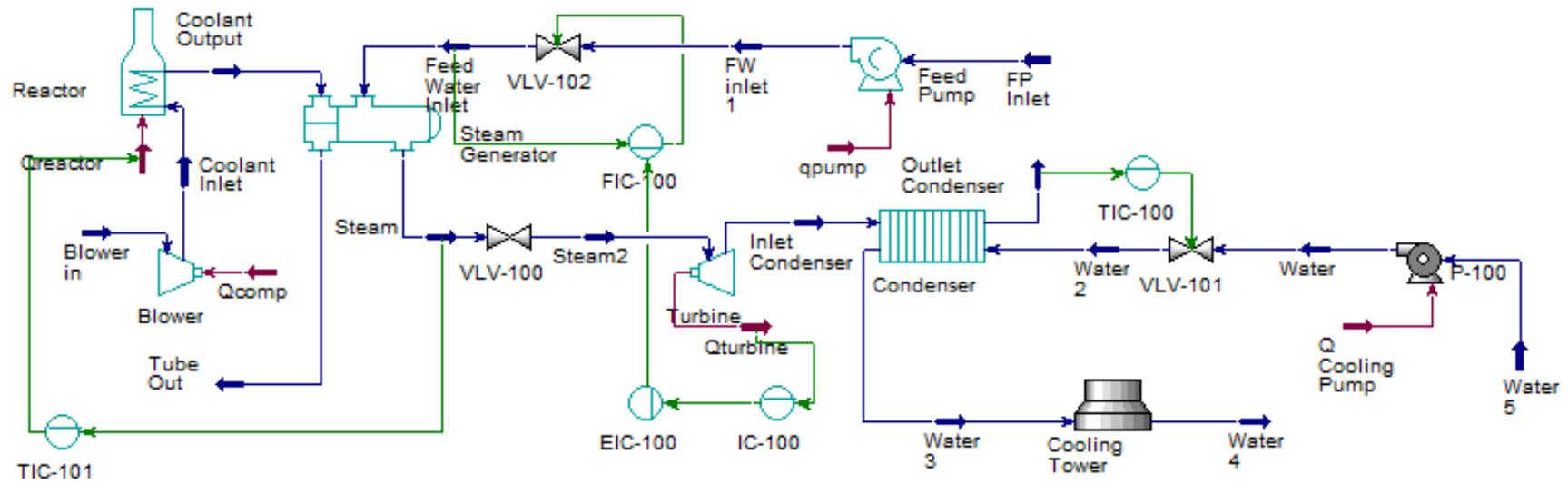
**Tabel C1. Perhitungan *fouling* di sisi *shell***

Beban (kW)	Mass flow	Temperature		As	Us	Reys	Prs	Nus	hs	Rfs
		In	Out							
500	0,4974	167,400	530,000	0,03393	0,02751167	3404,044881	1,06478449	25,878136	462,8248361	0,0005643
1000	0,9586	163,900	530,100	0,03393	0,05800933	6591,292130	1,07807624	38,6130838	581,6146116	0,0002864
1500	1,4920	162,500	529,600	0,03393	0,093160919	10240,230477	0,92743354	48,0759625	804,4676215	0,0001580
2000	2,0890	161,800	530,900	0,03393	0,132459707	14312,335573	0,9155391	58,5445786	974,3217862	0,0001033
2500	2,7820	161,300	530,100	0,03393	0,17803328	19042,954204	0,90915851	69,3409497	1150,019651	0,00008601
3000	3,6800	161,100	529,800	0,03393	0,237879088	25199,995939	0,90244141	81,8508694	1353,190601	0,00007246

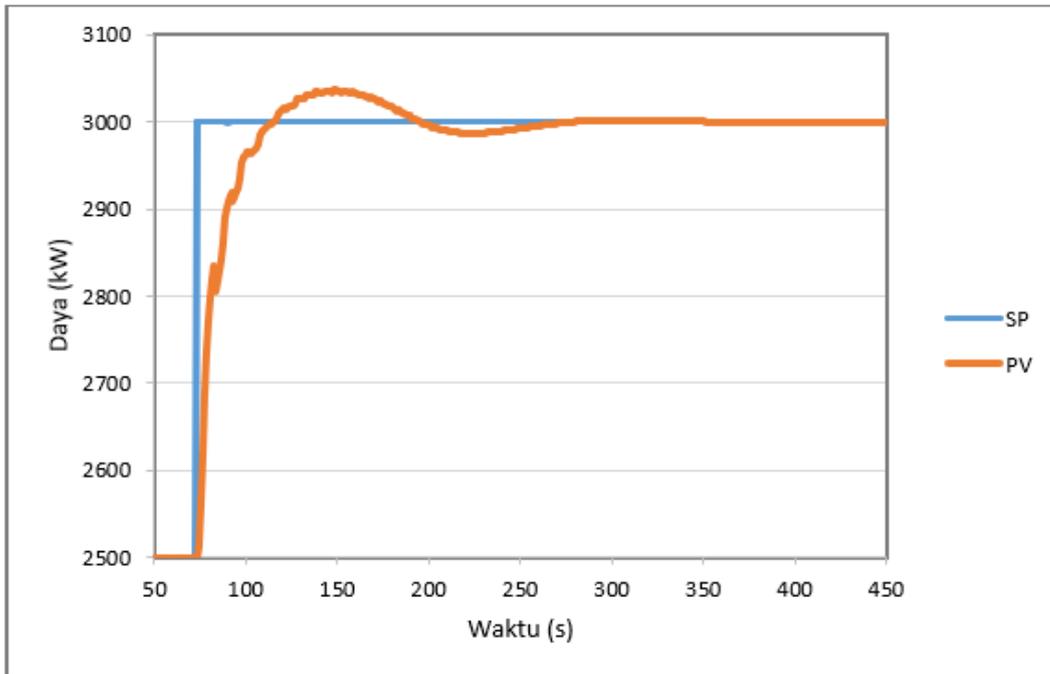
**Tabel C2. Perhitungan *fouling* di sisi *tube***

Beban (kW)	Mass flow	Temperature		At	Gt	Reyt	Prt	Nut	ht	Rft
		In	Out							
500	4,4290	530,400	480,800	0,0450231	196,7433118	1510,7879112	52,5461303	64,1627949	826,5617177	0,0007284
1000	4,4290	531,000	423,500	0,0450231	196,7433118	1672,1984473	48,3882691	67,3333876	851,0181339	0,0005949
1500	4,4290	532,000	357,600	0,0450231	196,7433118	1865,1095060	44,4036031	70,9961716	876,7795445	0,0004197
2000	4,4260	549,800	300,600	0,0450231	196,6100469	1938,3495029	43,3808396	72,5385764	881,7038625	0,0003490
2500	4,4160	599,600	263,400	0,0450231	196,1658308	1765,2397516	47,4760447	69,7809614	849,1841880	0,0003821
3000	4,4000	689,400	237,900	0,0450231	195,4550851	1413,1779373	58,0719578	63,3064912	783,8084642	0,0004520

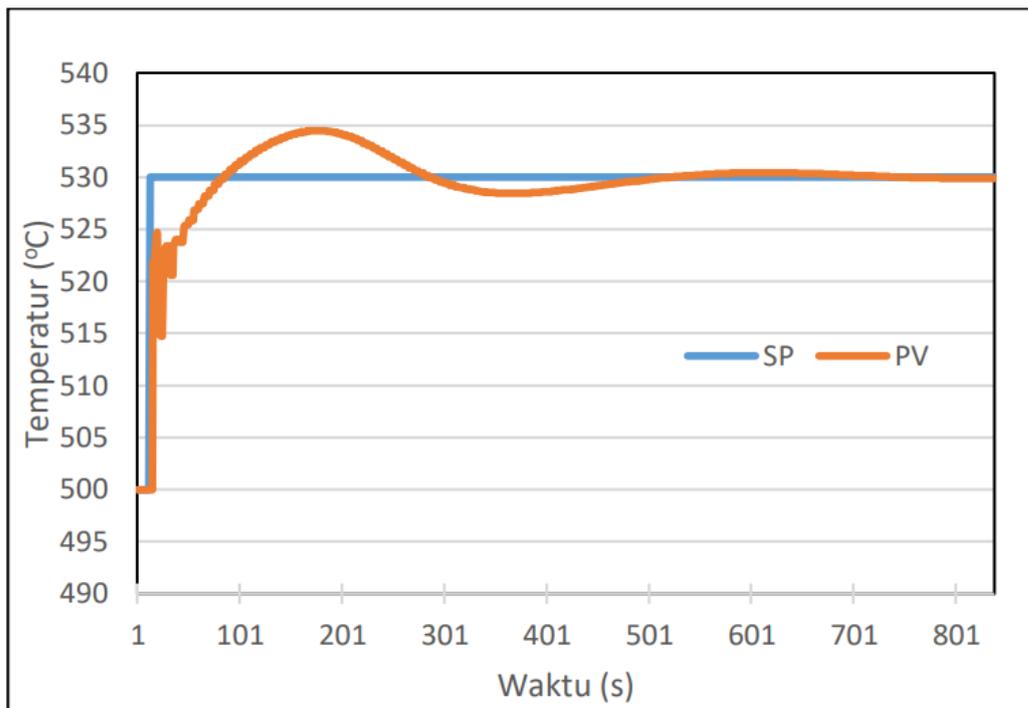
LAMPIRAN D. Simulasi PLTN



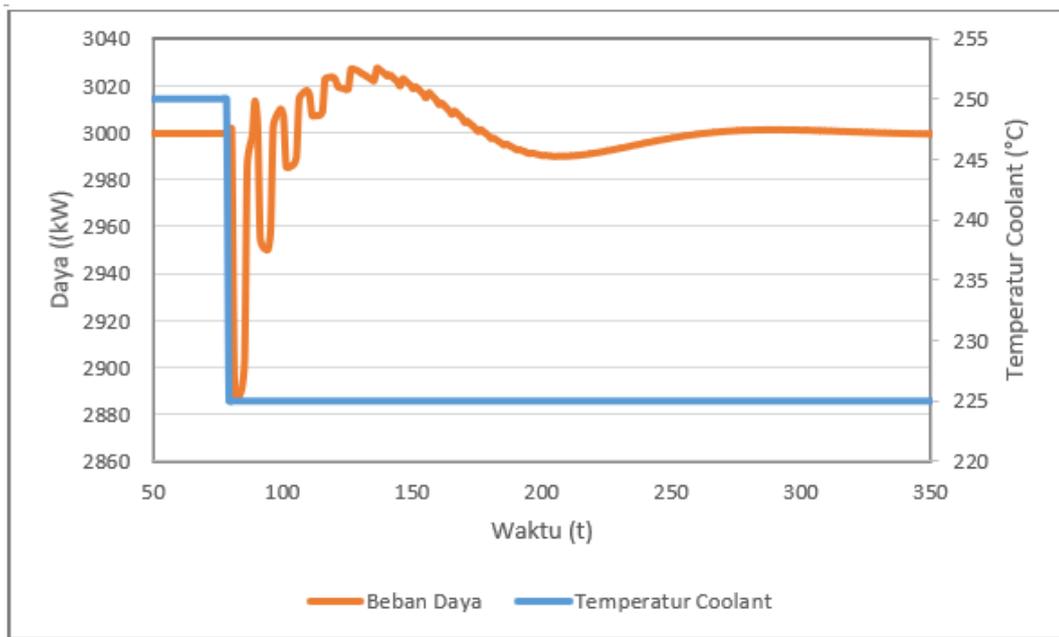
Gambar D1. Simulas kontrol PLTN pada software HYSYS v.10



**Gambar D2.** Grafik respon uji set poin kontrol daya



**Gambar D3.** Grafik respon uji set poin kontrol temperatur



**Gambar D4.** Grafik respon uji *disturbance*

## BIODATA PENULIS



Nama lengkap penulis adalah Fatma Ayu Nadyanya, lahir di Jakarta pada tanggal 15 Juli 1998 dari pasangan Bapak Budi Handoyo Kusumo dan Ibu Dyah Patria Nurhayati. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pada tahun 2010 penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Islam Ar-Raudhah BSD, Tangerang Selatan, pada tahun 2013 menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 8 Kota Tangerang Selatan, pada tahun 2016 menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 2 Kota Tangerang Selatan. Pada tahun yang sama penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen

Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis telah aktif dalam organisasi kemahasiswaan menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Departemen Teknik Fisika 2017/2018 dan 2018/2019 Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS) ITS serta sebagai asisten di Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol.

Konsentrasi tugas akhir yang didalami adalah bidang rekayasa instrumentasi dan kontrol. Pada bulan Agustus 2020 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Pengaruh Pengendalian Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) HTGR Terhadap Pembentukan *Fouling* Pada *Heat exchanger***.

Apabila pembaca ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir, serta memberikan kritik dan saran maka dapat menghubungi penulis melalui *email* : [Fatma.an1507@gmail.com](mailto:Fatma.an1507@gmail.com)