



TESIS-TM185400

**MEKANISME PENIPISAN TUBE SUPERHEATER
PADA PEMBANGKIT TIPE TANGENTIALLY
FIRED PULVERIZED COAL**

**MUHAMMAD AUJUL MAJDI, S.T.
NRP. 2111750078017**

Dosen Pembimbing
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



TESIS-TM185400

**MEKANISME PENIPISAN TUBE SUPERHEATER
PADA PEMBANGKIT TIPE TANGENTIALLY
FIRED PULVERIZED COAL**

**MUHAMMAD AUJUL MAJDI, S.T.
NRP. 2111750078017**

**Dosen Pembimbing
Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.**

**Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

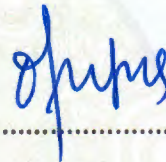
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
MUHAMMAD AUJUL MAJDI
02111750078017

Tanggal Ujian: 17 Januari 2020
Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:
Pembimbing:

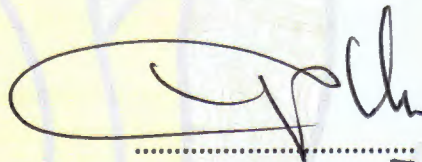
1. Suwarno, S.T., MSc., Ph.D
NIP 198005202005011003



.....

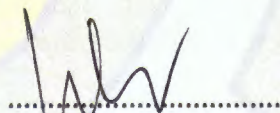
Penguji:

1. Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng
NIP 196505051990031005



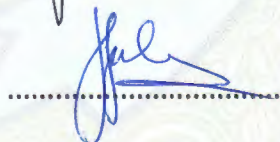
.....

2. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP 197407032000031001



.....


3. Fahmi Mubarak, S.T., MSc., Ph.D
NIP 197801152003121002



.....



Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem


Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng., Sc.
NIP 196604021989031002

Halaman ini sengaja dikosongkan

Mekanisme Penipisan Tube Superheater pada Pembangkit Tipe *Tangentially Fired Pulverized Coal*

Nama Mahasiswa : Muhammad Aujul Majdi
NRP : 2111750078017
Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Boiler sebagai komponen utama dari Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) diharapkan mempunyai tingkat keandalan yang tinggi. Keandalan tersebut salah satunya ditopang oleh program *Boiler & HRSG Management* (BHM). BHM mengelompokkan area-area komponen di dalam boiler menjadi 4 jenis *damage status* (*Active, Incipient, Event Based, Passive*) dan 3 jenis *Inspection Prioritization Index* (A, B, dan C). Area boiler yang wajib di-inspeksi pada setiap *overhaul* adalah area dengan klasifikasi *damage status* A dan IPI A.

Inspeksi yang selalu dilakukan pada setiap *overhaul* di area tersebut adalah *Ultrasonic Testing* (UT) *thickness*. Data hasil pengukuran UT *thickness* tersedia sejak pertama kali implementasi BHM pada tahun 2013. Area yang diambil pada penelitian ini adalah area *superheater* yang berdasarkan data *pareto loss* PLTU Labuan outage akibat kebocoran *boiler* adalah area yang paling banyak mengalami kegagalan, dan pengenaan temperatur dan *flow flue gas* serta tekanan kerja yang tinggi. Data pengukuran *thickness* juga diseleksi lebih lanjut pada area *superheater* yang tidak terkena *sootblower*.

Hasil analisa data menunjukkan adanya anomali trend penipisan berdasarkan kurva distribusi antar periode *overhaul*. Prediksi yang dibuat menghasilkan nilai *thickness* yang mendekati nilai aktual. Anomali tersebut disebabkan oleh ketidaktepatan prosedur pengukuran *thickness*. Pengamatan makroskopis dan mikroskopis pada sampel uji memperlihatkan mekanisme penipisan *fly ash erosion* pada extrados sisi eksternal pipa.

Kata kunci : *Tube Erosion, Thinning Mechanism, Trend Penipisan, Prediksi Thickness, Prosedur, Uji Mikroskopis dan Makroskopis*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Thinning Mechanism on Superheater Tubes at a Tangentially Fired Pulverized Coal Power Plant

Student Name : Muhammad Aujul Majdi
Student Identity Number : 2111750078017
Supervisor : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Boiler as one of the main components of the Coal Fired Steam Power Plant (CFSP) is expected to have a high level of reliability. One of the tools to maintain its reliability is Boiler & HRSG Management (BHM) program. BHM classifies the component areas in the boiler into 4 types of damage status (Active, Incipient, Event Based, Passive) and 3 types of Inspection Prioritization Index (A, B, and C). The boiler area that must be inspected for each overhaul is the area with damage status A and IPI A.

The inspection that is always carried out for every overhaul in the area is Ultrasonic Testing (UT) thickness. Data measured by UT thickness is available since the first BHM implementation in 2013. The area taken in this study is the superheater area which according to the pareto loss Labuan PLTU is the majority cause of boiler failure, and because of the high flue gas temperature and flow and also high work pressure. Thickness measurement data was also selected further in the superheater area that was not affected by the sootblower.

The results of the data analysis showed thinning trend anomaly based on the distribution curve between the overhaul periods. The predictions made provide thickness values that are insignificantly different from actual values. The anomaly is caused by the inaccuracy of the thickness measurement procedures. Macroscopic and microscopic observations on tube samples shows thinning mechanism of fly ash erosion on the external side of the pipe extrados.

Keywords : *Tube Erosion, Thinning Mechanism, Thinning Trend, Thickness Prediction, Procedures, Microscopic and Macroscopic Observation*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia, rahmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “Mekanisme Penipisan Tube Superheater Pada Pembangkit Tipe Tangentially Fired Pulverized Coal”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, do’a, dan dukungan dari beberapa pihak, maka penyusunan tesis ini tidak dapat berjalan sesuai harapan. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua: Ibu Siti Maryam dan Bapak Machasin, keluarga: Istri Heny Purwandani, Anak Azmi Hanan dan Arfin Hamizan yang senantiasa memberikan do’a, dorongan dan dukungan tanpa henti kepada penulis.
2. Dosen pembimbing Bapak Suwarno, M.Sc., Ph.D. yang telah memberikan saran, pencerahan, dan motivasi dalam proses penyelesaian tesis ini.
3. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis selama masa perkuliahan.
4. Seluruh rekan-rekan program S2 Manajemen Energi KKIP yang secara langsung maupun tidak langsung bersinergi ikut membantu dalam proses penulisan tesis ini.
5. Seluruh rekan-rekan Divisi Pengembangan Talenta Kantor Pusat PT Indonesia Power dan Staf Sekretariat Departemen Teknik Mesin atas segala bantuan dan dukungan selama menjalani program S2 Manajemen Energi.
6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu atas segala bantuan serta dukungan untuk penyusunan tesis ini.

Selain itu penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 <i>Literature Review</i>	9
2.2 Dasar Teori.....	26
2.2.1 Pemodelan Erosi Secara Matematis	26
2.2.2 Minimum Wall Thickness.....	28
2.2.3 Metode Pengukuran Akurasi Hasil Prediksi	29
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Analisa Data Thickness.....	32
3.2 Prediksi <i>Thickness</i> Berdasarkan Data <i>Existing</i>	37
3.3 Validasi Hasil	38
3.3.1 Pengukuran <i>Sampling</i> Menggunakan <i>UT Thickness</i>	38
3.3.2 Pengamatan dan Pengukuran Sampel Secara Makro dan Mikroskopis	39
3.3.3 <i>Flowchart</i> Detail Penelitian	40

3.4 Jadwal Penelitian dan Penyusunan Thesis.....	42
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Pengumpulan Data.....	43
4.2 Verifikasi Data dan Prediksi <i>Thickness</i>	45
4.3 Pengujian Makroskopis Sampel Tube.....	50
4.3.1 Pengamatan Makroskopis.....	50
4.3.2 Pengukuran Dimensi Sampel <i>Tube</i>	51
4.3.3 Pengukuran <i>Ultrasonic Thickness</i> Sampel Tube.....	54
4.3.4 <i>Remaining Life</i> (RL) berdasarkan UT <i>Thickness</i>	57
4.4 Pengujian Mikroskopis Sampel Uji.....	59
4.5 Perbaikan Prosedur UT <i>Thickness</i>	62
4.6 Mekanisme Penipisan pada Pipa Primary Superheater.....	66
4.6.1 Simulasi Aliran <i>Flue Gas</i> pada Area <i>Primary Superheater</i>	66
4.6.2 Pengukuran <i>Outer Diameter</i> (OD) Sampel Uji dan <i>Stock Tube</i>	68
4.6.3 Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	69
4.6.4 Analisa Mekanisme Penipisan <i>Tube Primary Superheater</i>	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	77
BIOGRAFI PENULIS.....	131

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pareto Loss Outage PLTU Labuan	7
Gambar 2.2 Kecepatan <i>Flue Gas</i> vs Umur <i>Tube</i> (Sumber: <i>Nalco Guide to Boiler Failure Analysis</i> , 1991).....	17
Gambar 2.3 Cerukan Dalam pada Sisi Panas dari <i>Tube Waterwall</i> (Sumber: <i>Nalco Guide to Boiler Failure Analysis</i> , 1991).....	17
Gambar 2.4 Kontour Kecepatan pada <i>Boiler</i> dengan Variasi Sudut <i>Tilting Burner</i> (Sumber: Hidayat, 2015).....	19
Gambar 2.5 Distribusi Temperatur pada <i>Boiler</i> dengan Variasi Sudut <i>Tilting Burner</i> (Sumber: Hidayat, 2015).....	20
Gambar 2.6 Laju Erosi pada Permukaan Mild Steel pada Kecepatan yang Berbeda (Sumber: Mbabazi, Sheer, & Shandu, 2004)	21
Gambar 2.7 Distribusi Vektor Kecepatan di Area Superheater Bank (Sumber: Wahyu, 2013).....	22
Gambar 2.8 Lepasnya Massa oleh Impingement Angle dari Partikel Abrasif (Sumber: Wahyu, 2013).....	22
Gambar 2.9 Variasi Laju Erosi dengan Temperatur Material Target untuk <i>Carbon Steel</i> (Sumber: Das, Mehrotra, Sastry, & Dey, 2006).....	23
Gambar 2.10 Variasi Laju Erosi dengan Temperatur Material Target untuk <i>1.25Cr-1Mo-V Steel</i> (Sumber: Das, Mehrotra, Sastry, & Dey, 2006).....	24
Gambar 2.11 Korelasi Nonlinear antara Laju Korosi dengan Temperatur Tube (Sumber: <i>Nalco Guide to Boiler Failure Analysis</i> , 1991).....	24
Gambar 2.12 Block Diagram untuk <i>Ultrasonic Testing</i> Menggunakan Transduser (Sumber: Bhowmick, 2011).....	26
Gambar 3.1 <i>Flow Diagram</i> Penelitian	31
Gambar 3.2 Contoh Pelaporan Hasil UT Thickness oleh PLN Puslitbang.....	32
Gambar 3.3 Contoh Pelaporan Hasil UT Thickness oleh UJH.....	33
Gambar 3.4 Skema <i>Boiler</i> PLTU Labuan.....	34
Gambar 3.5 Diagram <i>Primary Superheater</i>	35
Gambar 3.6 Skema Area, (a) <i>Elbow F10</i> , dan (b) <i>Elbow C9</i>	35

Gambar 3.7 Contoh Grafik Penipisan <i>Tube Superheater</i> dengan Sumbu X adalah Periode OH dan Sumbu Y <i>Thickness Tube</i> dalam mm	36
Gambar 3.8 Titik Pengambilan <i>Thickness</i> pada <i>Tube</i>	39
Gambar 3.9 Pengukuran OD dan <i>Thickness Tube</i> Sampel.....	39
Gambar 3.10 Analisis <i>Tube</i> secara Mikroskopis	40
Gambar 3.11 Flowchart Penelitian	41
Gambar 4.1. (a) Contoh Laporan Hasil Pengukuran <i>UT Thickness</i> dari PLN Puslitbang, dan (b) Laporan oleh UJH	44
Gambar 4.2 Distribusi Data <i>UT Thickness</i> pada <i>Elbow F10</i> Pengambilan Sisi Tengah	46
Gambar 4.3 Distribusi Data <i>UT Thickness</i> pada <i>Elbow C9</i> Pengambilan Sisi Tengah	46
Gambar 4.4 Kurva Ketebalan <i>Tube</i> Hasil Prediksi dan Aktual untuk Area <i>Elbow F10</i> , Hasil dari (a) Data yang Menyertakan, dan (b) Data yang Mengesampingkan Hasil Pengukuran Ketebalan <i>Tube</i> pada Periode 16000 Jam	47
Gambar 4.5 Kurva Ketebalan <i>Tube</i> Hasil Prediksi dan Aktual untuk Area <i>Elbow C9</i> , Hasil dari (a) Data yang Menyertakan, dan (B) Data yang Mengesampingkan Hasil Pengukuran Ketebalan <i>Tube</i> pada Periode 16000 Jam	48
Gambar 4.6 Sampel Uji <i>Tube Primary Superheater Elbow F10 Row 1</i>	50
Gambar 4.7 Sampel Uji <i>Tube Primary Superheater Elbow C9 Row 63</i>	51
Gambar 4.8 Lokasi Potongan Sampel Uji <i>Tube Primary Superheater Elbow F10 Row 1</i>	52
Gambar 4.9 Lokasi Potongan Sampel Uji <i>Tube Primary Superheater Elbow C9 Row 63</i>	52
Gambar 4.10 Hasil Pengukuran <i>Thickness</i> Sampel Uji <i>Tube Primary Superheater Elbow F10 Row 1</i>	53
Gambar 4.11 Hasil Pengukuran <i>Thickness</i> Sampel Uji <i>Tube Primary Superheater Elbow C9 Row 63</i>	54
Gambar 4.12 Hasil <i>UT Thickness</i> Sampel Uji <i>Tube Elbow F10 Row 1</i>	55
Gambar 4.13 Hasil <i>UT Thickness</i> Sampel Uji <i>Tube Elbow C9 Row 63</i>	56
Gambar 4.14 Skema dan Formula Deformasi <i>Tube Bend</i>	58
Gambar 4.15 Mikrostruktur <i>Tube Elbow F10 Row 1</i> dengan Perbesaran 200x	60

Gambar 4.16 Mikrostruktur <i>Tube Elbow C9 Row 63</i> dengan Perbesaran 200x	60
Gambar 4.17 Klasifikasi Pembentukan Karbida oleh ERA <i>Technology</i>	61
Gambar 4.18 Prosedur Pengukuran <i>UT Thickness</i>	63
Gambar 4.19 Flowchart (a) Pengukuran <i>UT Thickness</i> , (b) Persiapan Pekerjaan, dan (c) Pelaksanaan Pengukuran.....	65
Gambar 4.20 Vektor dan Magnitudo Kecepatan Aliran Flue Gas pada Elbow F10	67
Gambar 4.21 Vektor dan Magnitudo Kecepatan Aliran Flue Gas pada Elbow F10	68
Gambar 4.22 Citra SEM Sisi Internal <i>Elbow F10 Row 1</i>	69
Gambar 4.23 Citra SEM Sisi Eksternal <i>Elbow F10 Row 1</i>	70
Gambar 4.24 Citra Hasil Pengukuran <i>UT Thickness</i> untuk, (a) <i>Elbow F10 Row 1</i> , dan (b) <i>Elbow C9 Row 63</i>	71
Gambar 4.25 Diagram Mekanisme Penipisan pada <i>Tube Primary Superheater</i> ...	71

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Operasi Boiler	8
Tabel 2.2 Spesifikasi Batubara dan Abu	8
Tabel 2.3 <i>Screening Table</i> untuk Kegagalan <i>Tubing Superheater</i> dan <i>Reheater</i> ..	10
Tabel 2.4 Opsi NDE untuk <i>Tube Superheater</i> dan <i>Reheater</i>	11
Tabel 2.5 Analisa dan Disposisi untuk <i>Tube Superheater</i> dan <i>Reheater</i>	13
Tabel 3.1 Tabel Periode OH dan Area <i>Boiler Tube</i> yang Dilakukan UT <i>Thickness</i>	32
Tabel 3.2 Data UT <i>Thickness</i> pada <i>Primary Superheater F10 Elbow</i> Atas Row 1- 15.....	36
Tabel 3.3 MWT Boiler Tube.....	37
Tabel 3.4 Daftar Material dan Sound Velocity	38
Tabel 4.1 Contoh Hasil Kompilasi Data Pengukuran <i>UT Thickness</i>	45
Tabel 4.2 Hasil T-test <i>Assuming Equal Variances</i> untuk Area F10	48
Tabel 4.3 Hasil T-test <i>Assuming Equal Variances</i> untuk Area C9	49
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan MAPE.....	49
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Pengukuran <i>Thickness</i> dan Deviasinya	57
Tabel 4.6 <i>Remaining Life Elbow</i> F10 Row 1	58
Tabel 4.7 <i>Remaining Life Elbow</i> C9 Row 63	59
Tabel 4.8 Data Parameter Simulasi CFD	67
Tabel 4.9 Perbandingan Pengukuran OD pada Sampel Uji dan <i>Stock Tube</i>	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PLTU Banten 2 Labuan *Operation and Maintenance Unit* (BLB OMU) adalah salah satu unit bisnis PT Indonesia Power yang khusus bergerak di bidang *Jasa Operation and Maintenance* (O&M). BLB OMU berlokasi di PLTU Batubara Banten 2 Labuan dengan PT PLN (Persero) sebagai *asset owner* dan PT Indonesia Power sebagai *asset manager*. PLTU Banten 2 Labuan mempunyai kapasitas daya terpasang sebesar 2 x 300 MW. Bahan bakar yang digunakan adalah batubara dengan kalori rendah (*low rank coal*) 3900-4500 KCal/kg (HHV/*High Heating Value*) dengan konsumsi rata-rata 4000 ton/hari/unit pada beban penuh 300 MW.

Salah satu peralatan utama sebuah pembangkit listrik tenaga uap adalah *boiler*, adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar. Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap superheat dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. *Boiler* PLTU Banten 2 Labuan mempunyai tipe *sub-critical, natural circulation, drum type, single furnace, tangential firing, single reheating, dan balanced draft*.

Boiler sebagai salah satu komponen vital pada PLTU Batubara tentunya memerlukan manajemen pemeliharaan yang optimal guna meminimalisasi *outage* yang diakibatkan oleh kerusakan *boiler* seperti kebocoran *tube boiler*. PLTU Banten 2 Labuan telah memiliki program *Boiler and HRSG Management* (BHM) yang sudah dijalankan sejak 2014. *Boiler and HRSG Management* adalah suatu sistem dan metodologi yang terfokus secara prediktif dan proaktif terhadap *damage mechanism* yang menyebabkan kegagalan *tube boiler*. *Damage mechanism* yang dimaksud disini adalah proses kegagalan *tube boiler* baik berupa proses secara fisik,

kimia, ataupun proses lainnya (dinding *tube* tererosi, retak akibat *cyclic fatigue*, retak akibat korosi).

Metodologi BHM dimulai dengan membuat strategi berupa *Monitoring & Inspection Plan* (M&IP). M&IP adalah suatu *database* yang berisi program rencana pekerjaan secara prediktif-proaktif, juga dapat digunakan sebagai *historical record*, dan dapat dikatakan sebagai panduan utama dari program BHM. Secara umum, strategi BHM dapat dibedakan menjadi 2 yaitu strategi *offload* (unit dalam kondisi offline) dan *onload* (unit dalam kondisi *online*). Strategi *onload* adalah kegiatan monitoring unit dengan memaksimalkan resource online monitoring atau continuous data system dan bekerja sama dengan bagian operation. Data yang didapatkan kemudian dilihat kecenderungannya (*trending*) sehingga mencegah *damage mechanism* menjadi aktif. Sedangkan strategi *offload* ini berupa inspeksi-inspeksi yang telah disusun prioritasnya dan dilakukan setiap ada kesempatan baik pada saat unit dalam kondisi maintenance outage ataupun *Forced Outage* (FO) serta *Planned Outage* (PO). Harapan dari kegiatan inspeksi ini yaitu dapat menangkap data-data *damage mechanism* seperti yang tertuang dalam M&IP sehingga tata kelola penanganan terhadap *damage mechanism* tersebut menjadi lebih efisien. Jika kegiatan BHM ini dilakukan dengan benar dan konsisten, maka *Mean Time Between Failure* (MTBF) unit tersebut akan meningkat dan *Mean Time to Inspect* (MTTI) akan turun. Berdasarkan data outage PLTU Banten 2 Labuan, ditemukan bahwa kegagalan pada *boiler* terjadi sebanyak 12 kali di unit 1 dan 9 kali di unit 2. Kegagalan boiler paling banyak terjadi pada area *superheater* (*cold, panel division, platen*, dan *final*) sebanyak 8 kali di unit 1 dan 5 kali di unit 2. Menimbang dari jumlah kegagalan dan kondisi pengenaan temperatur, tekanan, dan *flow flue gas* yang tinggi sehingga fokus penelitian ini adalah pada area *superheater*.

Salah satu *damage mechanism* yang terjadi di *tube boiler* adalah *fly ash erosion*. Kerusakan akibat *fly ash erosion* sering terjadi pada *economizer*, *superheater*, *reheater*, dan *roof tubing* dan pada lokasi di mana terjadi pemusatan atau pusaran aliran *flue gas* (Zhou, Zhao, Chen, & Lu, 2012)[1]. Besarnya material *tube* yang terlepas akibat erosi *fly ash* tergantung pada besar ukuran partikel, prosentase *ash content* pada batubara, dan prosentase silika (SiO_2) di dalam *ash content* (Das, Mehrotra, Sastry, & Dey, 2006)[2]. Batubara sebagai bahan bakar

utama *boiler* di PLTU Banten 2 Labuan didesain dengan kandungan silika di dalam ash content sebesar 10 – 32%[3].

Salah satu metode pengujian untuk dampak *fly ash erosion* terhadap *tube boiler* adalah dengan *non-destructive test* (NDT) berupa *ultrasonic testing for thickness* (UT). Pengukuran dengan UT dilaksanakan pada saat *outage* baik itu *overhaul* (OH) atau *planned outage* (PO) maupun *maintenance outage* (MO) dan *forced outage* (FO) apabila diperlukan. Hasil dari pengukuran UT adalah *thickness* atau ketebalan dari tiap-tiap area *tube boiler* yang kemudian dikorelasikan terhadap *minimum width thickness* (MWT) *tube* tersebut berdasarkan formulasi ASME.

Data-data pengukuran *thickness* di PLTU Banten 2 Labuan tersedia sejak pertama kali implementasi program BHM pada tahun 2014. Data-data untuk area *tube boiler* yang sudah dilakukan pengukuran *thickness* dikompilasi dalam satu *spreadsheet*. Kompilasi ini dilakukan karena UT *thickness* selama 3 kali OH untuk unit 1 dan 4 kali OH untuk unit 2 dari tahun 2014 hingga 2018 dilaksanakan oleh 2 instansi yang berbeda (PLN Puslitbang dan PT Indonesia Power Maintenance and Service Unit) dengan format rekapitulasi data yang berbeda. Data-data yang tersedia kemudian diteliti dan disortir ulang untuk mengetahui *trend* penurunan tebal atau pengikisan *tube boiler*. Prediksi pengikisan *tube boiler* dari *trend* tersebut kemudian diharapkan dapat digunakan sebagai pedoman dalam menentukan perbaikan *tube boiler* di area tertentu pada periode *overhaul* yang akan datang.

1.2 Perumusan Masalah

Thesis ini difokuskan untuk analisa hasil pengujian *thickness* pada *tube boiler* yang sudah dilaksanakan pada rentang waktu tahun 2014 hingga 2019. Rumusan masalah di dalam thesis ini adalah:

1. Apakah data yang tersedia dapat diuji validitasnya baik dari nilai sampel yang tidak konsisten dan dari segi prosedur pengambilan *thickness*?
2. Apa penyebab nilai sampel yang tidak konsisten tersebut, dari prosedur pengukuran atau dari perubahan fisik material sampel seperti terjadinya *bulging*?
3. Bagaimana pola penurunan ketebalan atau penipisan *tube boiler* pada area *superheater* yang terjadi?

4. Apakah penyebab penurunan ketebalan atau penipisan *tube area superheater* hanya disebabkan oleh *fly ash erosion* atau ada *damage mechanism* lain yang terjadi?
5. Dari hasil analisa yang akan dilakukan, dapatkah kemudian dibuat sebuah prediksi mengenai *thickness tube superheater* yang spesifik pada area tertentu (misal *tube bend* untuk sisi *inlet*) untuk periode OH berikutnya?

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah perlu ditentukan supaya thesis ini sesuai dengan tujuan. Batasan masalah adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran *thickness tube* dilaksanakan di *boiler* unit 1 dan 2 PLTU Banten 2 Labuan.
2. Data pengukuran *thickness tube* yang sudah tersedia adalah dari periode OH unit 1 dan 2 pada rentang tahun 2014 – 2018.
3. Fokus penelitian adalah pada area *superheater*.
4. Pengambilan sampel dilakukan pada *tube superheater* yang dari trend *thickness* mengalami kenaikan (terbaca mengalami penambahan ketebalan).
5. Alat pengukuran *thickness tube* adalah dengan tipe *ultrasonic* GE-DM5E.
6. Hasil pengukuran *thickness* pada OH unit 1 tahun 2019 (bulan Juni – Juli 2019) digunakan untuk validasi hasil prediksi berdasar analisa data yang sudah tersedia.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian mengenai dampak *fly ash erosion* terhadap *tube boiler* adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pola distribusi data *thickness tube boiler* area *superheater* yang terjadi selama rentang tahun 2014 - 2018.
2. Tinjauan prosedur pengukuran *thickness tube* (*Procedural of UT Thickness Measurement*) dapat mengetahui seberapa besar validitas data hasil pengukuran.
3. Mengetahui prediksi sisa umur (*Remaining Life*) *tube superheater* dan *erosion rate* berdasarkan analisa data yang sudah dilakukan.

4. Mengetahui jenis-jenis *damage mechanism* yang dominan terjadi pada *tube superheater*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapatkan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil prediksi ketebalan *tube* dapat digunakan sebagai dasar *predictive maintenance* untuk penggantian *tube boiler* pada masa outage tertentu.
2. Menentukan standarisasi prosedur pengukuran *tube boiler* sehingga data yang dihasilkan lebih teruji validitasnya.
3. Hasil penelitian dapat diterapkan pada unit lain dengan tipe yang serupa di lingkungan PLN dan Anak Perusahaan.
4. Pemutakhiran data *damage mechanism* pada modul BHM di MAXIMO PLTU Banten 2 Labuan OMU.
5. Dapat memetakan area superheater mana yang perlu diperbaiki pada periode tertentu sehingga mempermudah proses pengadaan material dan proses perbaikan itu sendiri.
6. Mempertahankan dan meningkatkan keandalan operasi *boiler*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

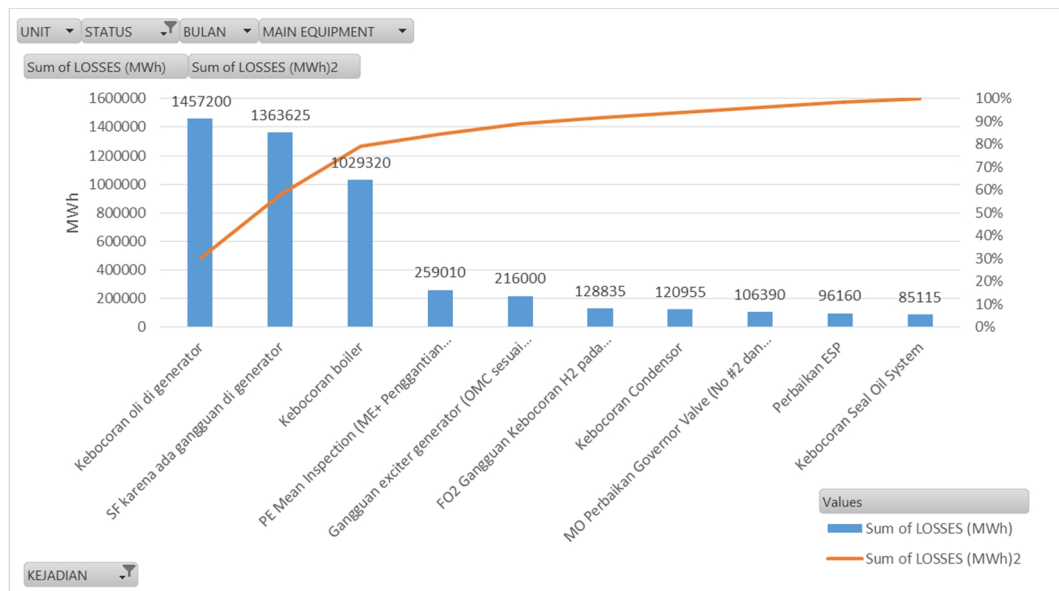
BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Sebuah PLTU mempunyai 3 peralatan utama yang sangat mempengaruhi keandalan operasi, dalam artian apabila salah satu di antara ketiga peralatan tersebut tidak beroperasi maka tidak akan ada produksi daya listrik dari pembangkit. Peralatan-peralatan utama tersebut adalah:

- a. Boiler atau steam generator dan peralatan bantu,
- b. Turbin uap dan peralatan bantu, dan
- c. Generator dan peralatan bantu.

Oleh karena boiler merupakan 1 dari 3 peralatan utama sebuah PLTU maka keandalan atau reliability dari boiler harus dipertahankan. Berdasarkan data pareto loss PLTU Labuan pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa kebocoran boiler dari semenjak COD hingga 2019 menyumbang losses produksi akibat outage sebesar 1029230 MWh dari total losses produksi 4862610 MWh atau 21,1%.



Gambar 2.1 Pareto Loss Outage PLTU Labuan

Prosentase kegagalan boiler terhadap total loss produksi PLTU Labuan yang cukup besar memerlukan adanya improvement pada metode pemeliharaan boiler. Improvement tersebut harus melihat aspek-aspek dari damage mechanism boiler,

lokasi terjadinya damage, metode inspeksi offload, dan tindak lanjut dari inspeksi untuk meminimalisasi terjadinya kegagalan pada boiler. Spesifikasi boiler dari segi parameter operasi dan bahan bakar dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan 2.2 di bawah ini:

Tabel 2.1 Parameter Operasi Boiler

Parameter Operasi	BMCR	BRL
Main steam Flow	1025t/h	959t/h
Main steam outlet Pres.	17.4MPa.g.	17.23MPa.g
Main steam outlet Temp.	541°C	541°C
RH Flow	841t/h	786t/h
RH inlet/outlet Pres.	3.8 / 3.63MPa.g	3.54 / 3.38MPa.g
RH inlet/outlet Temp.	330 / 540°C	322 / 541°C
Feed water Temp.	280°C	275°C
AH inlet air temp.	30°C	30°C
AH outlet air temp.(PA/SA)	363 / 355°C	362/ 354°C

(Sumber: 96M-SM Labuan Boiler Specification)[3]

Tabel 2.2 Spesifikasi Batubara dan Abu

A. Batubara					
No.	Description	Symbol	Unit	Design Coal	Various range
1	Ultimate analysis as received	C _{ar}	%	46	45-60
2		H _{ar}	%	3.77	3.4-3.8
3		O _{ar}	%	13.9	10~25
4		N _{ar}	%	1	0.5-1.5
5		S _{t.ar}	%	0.33	0.1-0.35
6		A _{ar}	%	5	3~6
7	Total moisture	M _{t.ar}	%	30	25-35
8	Air-dried moisture	M _{ad}	%	18	15~25
9	Volatile content	V _{daf}	%	53	45~60
10	LHV	Q _{ner.ar}	kJ/kg	17250	
11	Grindability	HGI	/	>50	45~65

B. Abu					
No.	Description	Symbol	Unit	Design Coal	Various range
1	Ash Content	SiO ₂	%	11.7	10~32

B. Abu					
No.	Description	Symbol	Unit	Design Coal	Various range
2		Fe ₂ O ₃	%	34	8.3~38.5
3		Al ₂ O ₃	%	12	2.63~29.2
4		CaO	%	14	4.18~20
5		MgO	%	12	8.30~16
6		TiO ₂	%	0.3	0.10~0.7
7		SO ₃	%	13.67	0.12~15
8		P ₂ O ₅	%	1.15	0.5~22.7
9		Na ₂ O	%	0.19	0.15~2
10		K ₂ O	%	0.98	0.05~2.4
11		Melting point			
	Deformation Temp.	DT	°C	1150	1150
	Softening Temp.	ST	°C	1200	1200
	Flowing Temp.	FT	°C	1300	1300

(Sumber: 96M-SM Labuan Boiler Specification)[3]

2.1 Literature Review

EPRI *Boiler Condition Assessment Guideline* tahun 2005 menjelaskan bahwa asesmen dan pencegahan kerusakan pada tube *superheater* dan *reheater* menghadirkan banyak tantangan[4]. Fluks panas tinggi dan persoalan kimia yang kompleks terkait dengan banyak mekanisme kerusakan pada permukaan interior dan exterior tube. Suhu dinding yang bervariasi di antara *tube* dan di lokasi yang berbeda di setiap *tube*. Gantungan, pelat dan desain struktur pendukung memusatkan stres di beberapa lokasi. Jarak antar *tube*, jenis desain *furnace*, dan *fouling* dapat memusatkan aliran gas di lokasi tertentu, menghasilkan erosi yang dipercepat, korosi, *slagging*, penumpukan abu, dan fluks panas. Penyumbatan aliran dan penyaluran dapat menyebabkan tekanan karena distribusi panas yang tidak merata. Potensi-potensi kegagalan yang mungkin terjadi menjadi dasar pelaksanaan asesmen pada *tube boiler* ketika *outage*. Salah satu dari damage mechanism yang terjadi pada *tube superheater* di *boiler* adalah *fly ash erosion*.

Damage mechanism fly ash erosion dan penyebab kegagalan yang potensial dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bawah:

Tabel 2.3 *Screening Table* untuk Kegagalan Tubing Superheater dan Reheater

<i>Other Likely Macroscopic and Metallographic Features</i>	<i>Typical Location(s)</i>	<i>Possible Mechanism</i>	<i>Potential Root Cause(s) for SH/RH Tubing Failure</i>
<i>Thin-Edged Fracture Surface</i>			
<i>External polishing of tube surface Localized damage</i>	<i>Most prominent in backpass regions and bends near walls</i>	<i>Fly ash erosion</i>	<i>Excessive local velocities due to non-uniform gas flow attributable to design geometry; distortion or misalignment of tubing rows, gas flow guides, or baffles during maintenance; improperly placed corrective shields or baffles or poorly applied coatings; operation above the design maximum continuous rating above design airflow, or at high excess air; or convective pass fouling</i>

			<i>Increase in particle loading and erosive ash elements, such as quartz and iron pyrite</i>
--	--	--	--

(Sumber: EPRI *Boiler Condition Assessment Guideline*, 2005)[4]

Tabel berikutnya (2.4) menunjukkan inspeksi NDE (Nondestructive Evaluation) yang sesuai untuk tube area superheat dan reheater.

Tabel 2.4 Opsi NDE untuk *Tube Superheater* dan *Reheater*

<i>Component / Location</i>	<i>NDE Detection Technique (Level II)</i>	<i>NDE and Sample Evaluation Techniques (Level III)</i>
<i>Tubing</i>	<i>Visual</i> <i>Video probe</i> <i>Dimensional</i> <i>Hardness testing</i> <i>Conventional ultrasonic testing (UT, for cracking, thickness/inside diameter pitting detection, scale thickness)</i> <i>EMAT (cracking,</i>	<i>UT (metal and steamside oxide thickness, crack sizing)</i> <i>EMAT</i> <i>LFEC</i> <i>Replication</i> <i>RT</i> <i>Phased array (focused) UT—</i> <i>more extensive scan of damage indication, such as linked or oriented cavities</i>

	<p><i>thickness/inside diameter pitting detection)</i></p> <p><i>Low-frequency eddy current (thickness/inside diameter pitting detection)</i></p> <p><i>Magnetostrictive Sensor</i></p> <p><i>Guided-Wave (MsS)</i></p> <p><i>RT (cracking/inside diameter pitting detection, exfoliated scale accumulation in pendant U-bends)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Conventional film</i> • <i>Digital imaging</i> <p><i>Flash thermography/active infrared response</i></p>	<p><i>Time-of-flight diffraction UT— more extensive scan to accurately size flaws</i></p> <p><i>Sample removal and testing:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Visual</i> • <i>Hardness</i> • <i>Oxide dating</i> • <i>Chemical analysis of deposits</i> • <i>Chemical analysis of metallurgy</i> • <i>Visual microscopy, with and without etching</i> • <i>Electron microscopy</i> • <i>Cryogenic cracking</i> • <i>Tensile and toughness testing</i>
--	--	--

(Sumber: EPRI Boiler Condition Assessment Guideline, 2005) [4]

Hasil pengujian yang diperoleh kemudian dapat dijadikan acuan penentuan remaining life (RL) dibandingkan dengan desired life, seperti tercantum pada tabel di bawah ini:

Tabel 2.5 Analisa dan Disposisi untuk *Tube Superheater dan Reheater*

<i>Component / Location</i>	<i>Permissible Flaw Size</i>	<i>Recommended Analytical Techniques and Disposition</i>
<p><i>Tubing (general), especially at bends</i></p>	<p><i>Remaining Life (RL) > Desired Life (DL) to next inspection based on creep life evaluation with wall thickness at DL Damage growth not to exceed limits before next planned inspection</i></p>	<p><i>Calculate remaining creep life and compare to DL Determine remaining wall thickness for representative locations using Level II NDE. Calculate rate of wall loss based on past experience and expected future operating conditions. Use operating history and oxide dating to estimate creep exposure and detect areas of overheating Use Level III material testing techniques to determine existing creep damage, in representative areas of each metallurgy in each SH/RH pass, and provide benchmarking for creep life calculations based on oxide dating Replace tubing with $RL < DL$ Ensure that the full extent of the damage is removed to avoid repeat failures Consider changes in metallurgy and/or SH/RH</i></p>

		<p><i>design</i></p> <p><i>Temporary pad welds should not be used because</i></p> <p><i>of uncertainty associated with base metal condition</i></p> <p><i>Address root causes of overheating and excessive</i></p> <p><i>wall loss, if detected</i></p>
<p><i>Tubing (inside surface)</i></p>	<p><i>Minor wall loss that does not result in wall thickness <70% of design minimum</i></p> <p><i>Minor fatigue or corrosion fatigue cracking, less than 30% through wall</i></p> <p><i>Damage growth not to exceed limits before next planned inspection</i></p>	<p><i>Confirm damage mechanism and determine extent of damage using Level II and/or Level III NDE and material testing techniques</i></p> <p><i>Evaluate stresses and remaining life for wall loss plus crack depth <30% of thickness</i></p> <p><i>Use creep-fatigue crack evaluation methods</i></p> <p><i>As necessary, replace tubing to restore wall integrity</i></p> <p><i>Ensure that the full extent of the damage is removed to avoid repeat failures</i></p> <p><i>Consider changes in metallurgy and/or SH/RH</i></p>

		<p><i>design</i></p> <p><i>Temporary pad welds should not be used because</i></p> <p><i>of uncertainty associated with base metal condition</i></p> <p><i>Address root cause(s) of corrosion pitting, fatigue,</i></p> <p><i>corrosion-fatigue and/or stress corrosion cracking</i></p>
<p><i>Tubing (outside surface)</i></p>	<p><i>Wall loss of less than 30% due to erosion and corrosion</i></p> <p><i>Wall loss associated with creep and short-term overheating damage should be evaluated separately</i></p> <p><i>Damage growth not to exceed limits before next planned inspection</i></p>	<p><i>Confirm damage mechanism and determine extent of damage using Level II and/or Level III NDE and material testing techniques</i></p> <p><i>Evaluate stresses and remaining life for wall loss plus crack depth <30% of thickness</i></p> <p><i>Use creep-fatigue crack evaluation methods</i></p> <p><i>Wall loss can occur via corrosion and erosion mechanisms. Minor wall loss can be trended over time by performing periodic wall thickness measurements</i></p> <p><i>As necessary, replace tubing to restore wall integrity</i></p>

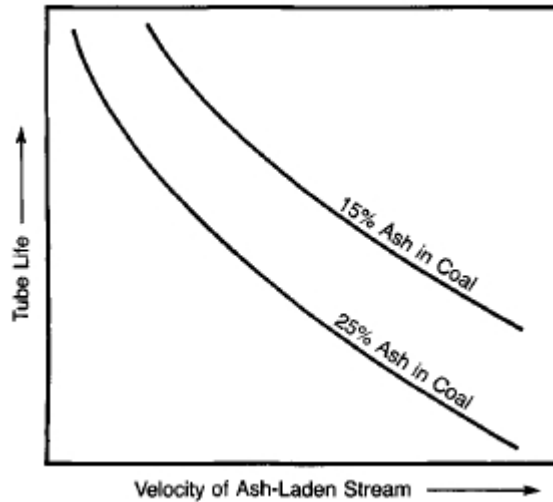
	<p><i>Ensure that the full extent of the damage is removed to avoid repeat failures</i></p> <p><i>Consider changes in metallurgy and/or SH/RH design</i></p> <p><i>Consider addition of tubing shields in key areas</i></p> <p><i>Consider application of corrosion/erosion resistant coatings</i></p> <p><i>Temporary pad welds should not be used because</i></p> <p><i>of uncertainty associated with base metal condition</i></p> <p><i>Address root cause(s) of erosion, corrosion (wastage), fatigue, and/or corrosion-fatigue</i></p>
--	--

(Sumber: EPRI Boiler Condition Assessment Guideline, 2005)[4]

Berdasarkan *Nalco Guide to Boiler Failure Analysis* di tahun 1991, *fly ash erosion* umumnya terjadi pada *economizer*, *superheater*, dan *roof tubing*[5]. *Fly ash* juga menjadi lebih erosif ketika temperaturnya lebih rendah seperti pada *Low Temperature Superheater* dan *economizer*. Lokasi-lokasi di mana terjadi pemusatan dan pusaran gas rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh *fly ash erosion*. Erosi ini umumnya terlokalisasi dan pada banyak kejadian dibatasi pada celah antara *tube row*, *bank*, dan dinding *ducting*.

Fly ash erosion disebabkan oleh *particulate matter* yang terbawa di dalam *flue gas* berkecepatan tinggi dan menghantam permukaan logam. Faktor utama yang mempercepat terjadinya kerusakan adalah kecepatan gas yang tinggi dan jumlah komponen abrasif yang tinggi di dalam *fly ash*. Faktor-faktor ini

mengakselerasi hilangnya material dengan cara menambah jumlah energi kinetik per tumbukan dan menambah jumlah tumbukan per satuan waktu pada daerah tertentu. Kurva 2.2 di bawah ini menunjukkan efek kecepatan dan kandungan abu terhadap umur *tube*:



Gambar 2.2 Kecepatan *Flue Gas* vs Umur *Tube*. (Sumber: *Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, 1991)[5]

Dampak dari *fly ash erosion* ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3 Cerukan Dalam pada Sisi Panas dari *Tube Waterwall*. (Sumber: *Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, 1991)[5]

Setelah mengetahui *damage mechanism* yang mungkin akan terjadi, dalam hal ini adalah *fly ash erosion*, maka menurut strategi *Boiler and HRSG Management* (TBM Overview, P&RO Solutions, 2011) diperlukan data-data *consequences* (dampak) dan *probability* (kemungkinan terjadi)[6]. Berdasarkan *Monitoring & Inspection Plan* (M&IP), yaitu *database* yang berisi program rencana pekerjaan secara prediktif-proaktif, juga dapat digunakan sebagai historical record, data untuk probabilitas direpresentasikan oleh *damage status*. *Damage status* dikategorikan menjadi 4, yaitu:

1. *Active*, apabila kegagalan sudah terjadi.
2. *Incipient*, apabila kemungkinan kegagalan belum pernah terjadi namun diperkirakan besar kemungkinan terjadi.
3. *Event Based*, apabila kegagalan tidak akan terjadi kecuali ada perubahan (operasional, desain, material, prosedur, dan lain-lain).
4. *Passive*, apabila kegagalan tidak mungkin akan terjadi sehingga dapat diabaikan.

Kegiatan selanjutnya adalah dengan pembuatan peta area kerusakan atau *damage maps*. *Damage maps* ini mengilustrasikan *damage mechanism* yang “Active” atau zona untuk memberikan pemahaman kepada seluruh pihak terkait tentang lokasi yang diinginkan. Detail inspeksi dapat dilihat pada *inspection Work Packages* dan juga dalam *BHM Monitoring & Inspection Plan* (M&IP). Detail inspeksi tersebut antara lain fokus pada lokasi lasan (internal atau eksternal tube atau permukaan *header*), posisi pengukuran yang diambil pada bagian *pressure part*, dan juga hal-hal lain yang perlu adanya pertimbangan pada saat inspeksi. *Damage maps* memegang peranan penting sebagai bagian dari perencanaan, penjadualan, dan proses eksekusi.

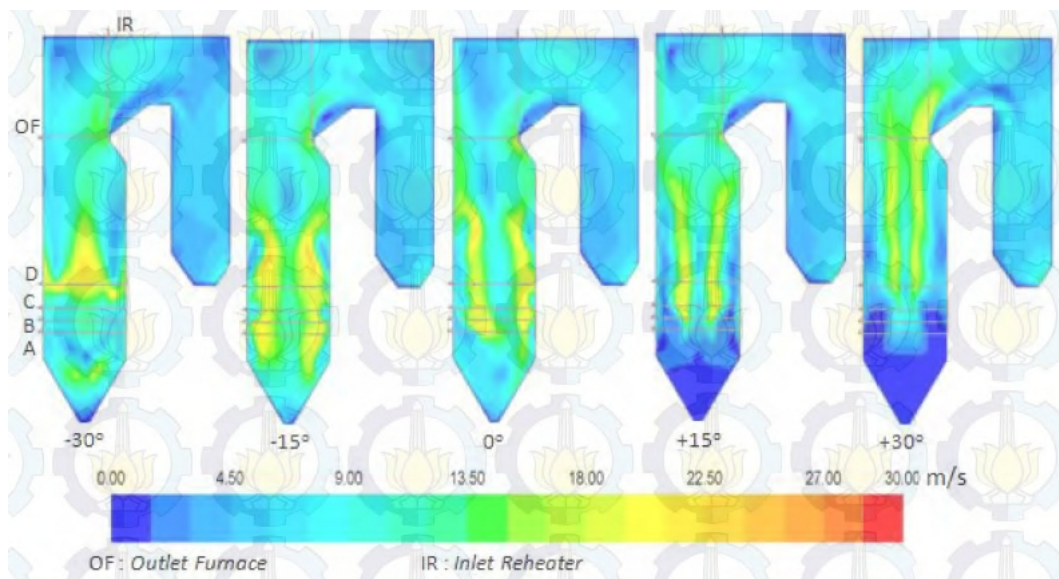
Setelah semua skenario kerusakan dibahas dan diketahui total waktunya, selanjutnya dilakukan perankingan atas skenario tersebut berdasarkan lama waktu perbaikan. Skenario tersebut kemudian dibagi menjadi 3 kelompok yang selanjutnya disebut sebagai *Inspection Prioritization Index* (IPI) yaitu:

1. Kategori A untuk skenario yang memiliki total waktu perbaikan lebih dari 48 jam
2. Kategori B untuk skenario yang memiliki total waktu perbaikan dari 24 jam hingga kurang dari 48 jam

3. Kategori C untuk skenario yang memiliki total waktu perbaikan kurang dari 24 jam

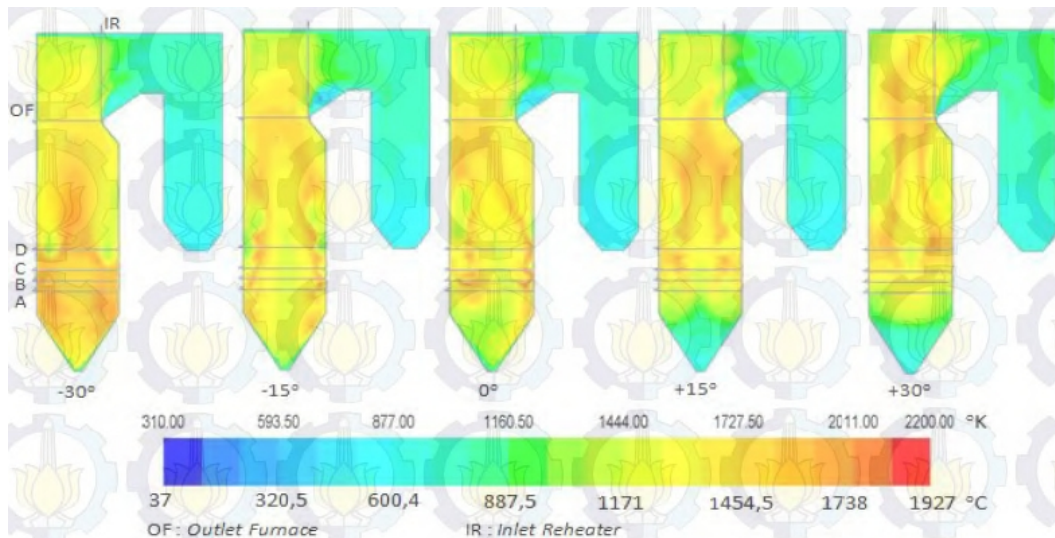
IPI adalah salah satu bagian terpenting dalam M&IP karena dari nilai IPI dapat diketahui resiko yang diakibatkan apabila terjadi kerusakan/kegagalan *boiler*.

Variasi sudut *tilting burner* pada boiler 315 MWe bertipe *tangentially fired pulverized coal* berdampak pada perubahan aliran gas-solid di dalam boiler, baik itu berupa perubahan kecepatan (vektor dan nilai) dan temperatur (Hidayat, 2015) [7]. Tipe *boiler* yang diteliti (PLTU Pacitan) memiliki banyak kesamaan dengan tipe boiler yang ada di PLTU Banten 2 Labuan. *Tilting burner* adalah mekanisme *burner boiler* yang memungkinkan *nozzle* pada setiap *corner* dan *level burner* digerakkan ke atas untuk menaikkan temperatur *superheat* dan *reheat* serta ke bawah untuk menaikkan tekanan *main steam*. Hasil simulasi pada sudut tilting tertentu (-30° , -15° , 0° , $+15^\circ$, $+30^\circ$) menghasilkan kontour kecepatan seperti Diagram 2.4 di bawah ini:



Gambar 2.4 Kontour Kecepatan pada *Boiler* dengan Variasi Sudut *Tilting Burner*. (Sumber: Hidayat, 2015)[7]

Sementara itu, distribusi temperatur ditunjukkan pada Diagram 2.5 di bawah ini:



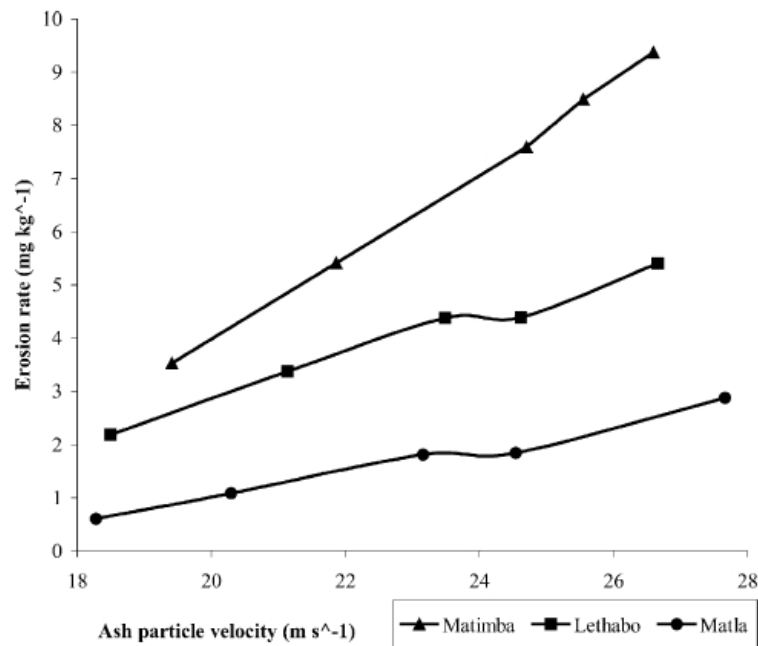
Gambar 2.5 Distribusi Temperatur pada *Boiler* dengan Variasi Sudut *Tilting Burner*. (Sumber: Hidayat, 2015) [7]

Perilaku erosi partikel untuk material tube boiler yang tipikal, termasuk *carbon steel*, *low alloy steel* dan *austenitic steel* pada temperatur tinggi hingga 650 °C diteliti menggunakan partikel silika dengan bentuk acak (Shida & Fujikawa, 1985)[8]. Hasil dari eksperimen adalah:

- Laju erosi adalah fungsi linear dari konsentrasi partikel dalam rentang konsentrasi antara 30 hingga 120 g/m³.
- Erosi puncak didapat pada sudut *impingement* rendah sebesar 20°, untuk kehilangan massa maksimum dan sudut 30° untuk penipisan atau kehilangan ketebalan *maksimum*.
- Ketika temperatur dinaikkan, laju erosi pada sudut *impingement* rendah meningkat secara drastis sementara untuk sudut tinggi tidak berubah secara signifikan.
- Semua material yang dilakukan pengujian menunjukkan kenaikan laju erosi seiring dengan kenaikan temperatur. Setiap material memiliki laju erosi yang berbeda, di mana Alloy 800 adalah yang paling lemah terhadap erosi dan baja 12Cr-1Mo-V yang paling resisten.

Sebuah model untuk memprediksi erosi pada permukaan *mild steel* yang terkena dampak aliran partikel *fly ash* dibuat oleh J.G. Mbabazi, T. J. Sheer, R. Shandu di tahun 2004[9]. Eksperimen dilaksanakan menggunakan abu dari 3 PLTU

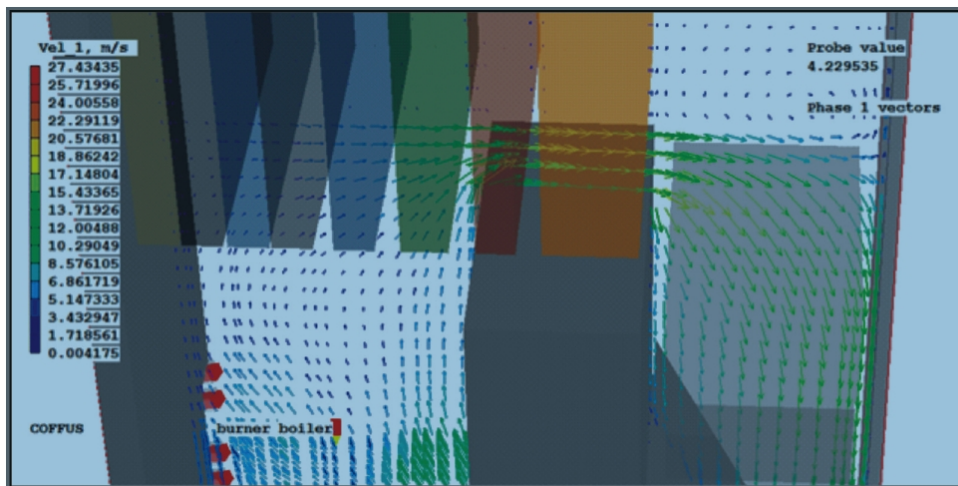
yang berbeda dan kemudian diteliti dampaknya terhadap permukaan *mild steel*. Hasil pengujian dengan impingement angle sebesar 30° untuk laju penipisan maksimum menghasilkan kurva *ash particle velocity vs erosion rate* pada masing-masing sumber abu seperti tertera pada Kurva 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Laju Erosi pada Permukaan Mild Steel pada Kecepatan yang Berbeda. (Sumber: Mbabazi, Sheer, & Shandu, 2004)[9]

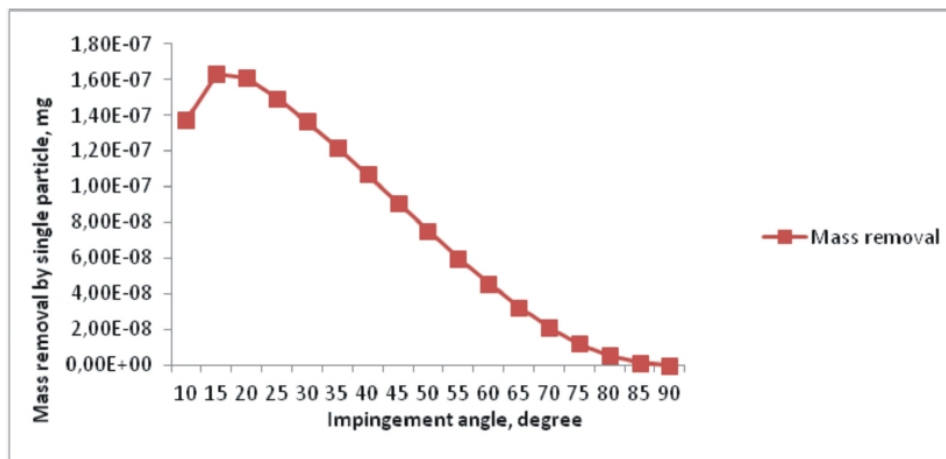
Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa variasi dari laju erosi untuk *mild steel* mengikuti kenaikan dari kecepatan partikel abu. Kandungan silika pada abu juga berperan besar pada laju erosi tersebut.

Fly ash erosion yang terjadi secara spesifik pada *tube superheater* dengan material *alloy steel* A213-T91 dianalisa dengan kombinasi antara simulasi CFD dan model matematis oleh Haifa Wahyu pada tahun 2013[10]. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa kecepatan aliran *flue gas* di sekitar *superheater* bervariasi antara 1 sampai dengan 20 m/s dan *impingement angle* sebesar 0-90 relatif terhadap *tube superheater* vertikal. Distribusi vektor kecepatan di dekat *superheater* bank dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini:



Gambar 2.7 Distribusi Vektor Kecepatan di Area Superheater Bank. (Sumber: Wahyu, 2013)[10].

Berdasarkan variasi impingement angle dan data material setiap partikel abrasif, dari penelitian tersebut didapatkan erosi maksimum terjadi pada 17° seperti Kurva 2.8 di bawah ini:



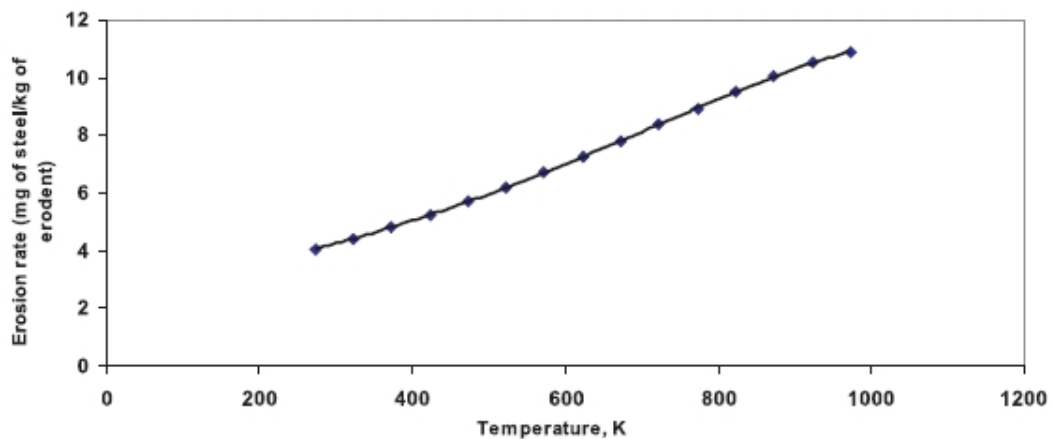
Gambar 2.8 Lepasnya Massa oleh Impingement Angle dari Partikel Abrasif. (Sumber: Wahyu, 2013) [10]

Das, Mehrotra, Sastry, dan Dey di tahun 2006 membuat model analitis untuk perilaku erosi dari partikel *fly ash* yang menumbuk komponen boiler berbahan bakar batubara[2]. Komponen temperatur tinggi pada komponen baja juga dimasukkan ke dalam permodelan tersebut selain kecepatan, sudut tumbuk (*impingement angle*), fraksi massa silika dalam kandungan abu batubara, rerata

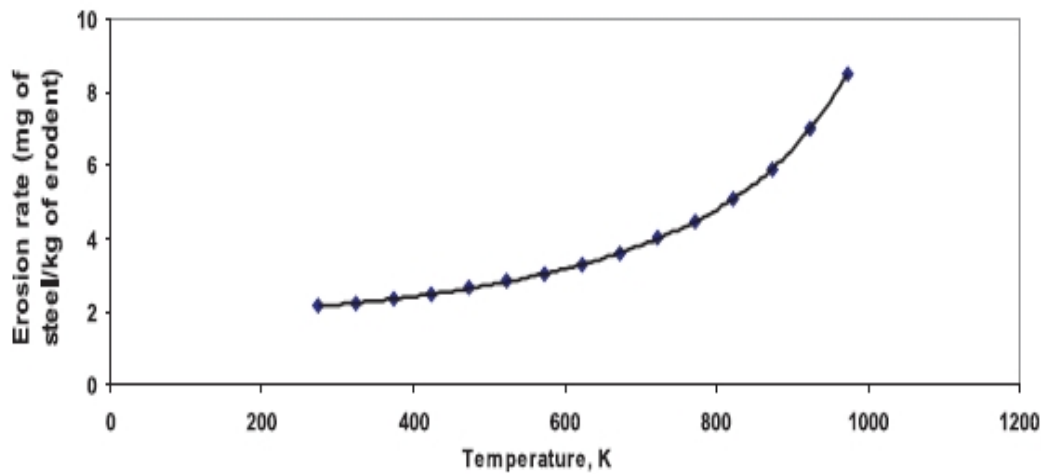
densitas partikel abu, *yield stress* dari komponen baja, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Shida dan Fujikawa di tahun 1985[8]. Terdapat 3 fenomena penting di mana logam dapat terlepas pada temperatur tinggi sebagaimana berikut:

- a. Lepasnya material karena *cutting wear*.
- b. Lepasnya material karena deformasi plastis yang berulang.
- c. Dampak temperatur terhadap properti *tensile* dari material.

Dua fenomena pertama diaplikasikan pada temperatur ruangan, ketika dampak dari temperatur dapat diabaikan. Karena temperatur operasi *boiler* tinggi, maka fenomena ke-3 perlu diteliti dampaknya terhadap komponen *boiler*. Material yang dipakai pada pengujian ini adalah yang umumnya digunakan untuk komponen *boiler* temperatur tinggi, yaitu: *carbon steel*, *1.25Cr-1Mo-V steel*, *2.25Cr-1Mo steel*, *12Cr-1Mo-V steel*, *304 steel*, dan *alloy 800 steel*. *Impingement angle* ditetapkan pada 30° dan *velocity* 19,41 m/s, yaitu pada laju penipisan maksimum. Hasil dari permodelan tersebut di atas dapat dilihat pada Kurva-kurva (2.9, 2.10) di bawah ini.

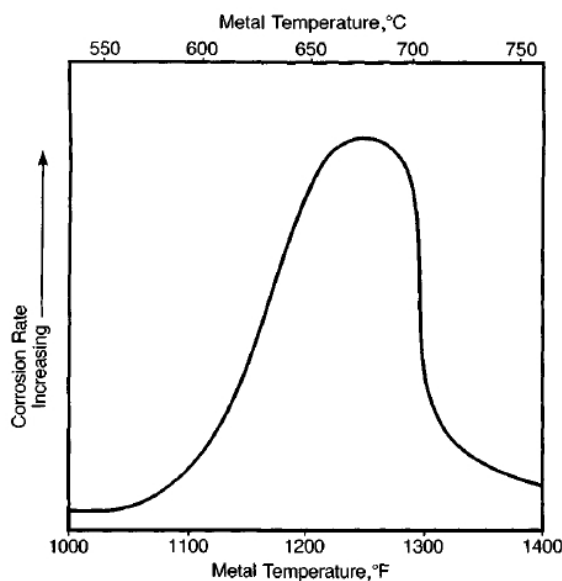


Gambar 2.9 Variasi Laju Erosi dengan Temperatur Material Target untuk *Carbon Steel* (Sumber: Das, Mehrotra, Sastry, & Dey, 2006)[2]



Gambar 2.10 Variasi Laju Erosi dengan Temperatur Material Target untuk 1.25Cr-1Mo-V Steel. (Sumber: Das, Mehrotra, Sastry, & Dey, 2006) [2]

Berdasarkan *Nalco Guide to Boiler Failure Analysis* di tahun 1991, ada mekanisme kerusakan boiler berupa *coal-ash corrosion* yang berkaitan dengan temperatur[5]. Peristiwa ini diidentifikasi dengan pembentukan *slag* dan berakibat pada kehilangan metal. Tube dengan material *low-alloy carbon steel* umumnya menunjukkan sepasang zona datar yang terletak pada kedua sisi *leading face* dari tube pada sudut 30° hingga 45°. Permukaan yang terkena korosi bermuka kasar atau beralur. Hubungan nonlinear antara temperatur dengan laju korosi dapat dilihat pada Kurva 2.17 di bawah ini:



Gambar 2.11 Korelasi Nonlinear antara Laju Korosi dengan Temperatur Tube. (Sumber: *Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*, 1991)[5]

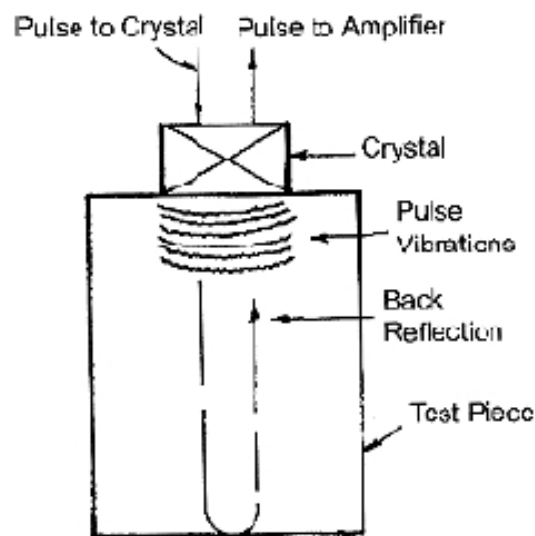
Penelitian oleh Muhajir dkk. (2018) menunjukkan bahwa sisi *elbow tube* mempunyai peringkat risiko kegagalan paling tinggi yang diakibatkan oleh *fly ash erosion*, sebanyak 3 kali lipat lebih tinggi apabila dibandingkan dengan pipa lurus[11]. Studi yang dilakukan oleh R.S.E Putro dkk. (2017) memperlihatkan bahwa deformasi pada sisi *bend* dari pipa mengakibatkan penurunan lokal dari gangguan potensial korosi, yang kemudian menyebabkan proses korosi lokal yang cepat[12]. Korosi erosi pada pipa *superheater* utamanya terjadi secara internal (di dalam pipa) dan dapat diidentifikasi oleh timbulnya formasi oksida yang berakibat pada kehilangan logam. Skenario percepatan korosi dari pipa *superheater* diusulkan oleh Wright & Kung (2017)[13], sementara Gupta dkk. (2017) menginvestigasi korosi oksidasi berlebih di dalam pipa *superheater* dengan material *low alloy steel* yang kemudian berakibat pada kegagalan pipa tersebut[14].

Laju penipisan pada dinding *tube superheater* dapat diketahui dengan melakukan pemeriksaan *wall thickness* pada setiap kesempatan *Planned Outage*, dan kemudian data-data tersebut direkapitulasi untuk kemudian dianalisa. Metode pengukuran *wall thickness* adalah dengan menggunakan *ultrasonic testing* (UT). Vakhguel't dkk. (2017) menganjurkan prosedur baku untuk *Non-Destructive Test* (NDT) dan korelasinya dengan sisa umur dari pipa *boiler*[15]. Yun dkk. (2016) menyebutkan bahwa ketidakpastian data pengukuran disebabkan oleh permukaan kasar, penampang pipa yang kompleks, distorsi pembacaan pada permukaan tidak paralel, dan juga prosedur pengukuran[16]. S. Bhowmick pada tahun 2011 menjelaskan bahwa secara umum, peralatan *ultrasonic testing* terdiri dari komponen-komponen berikut ini[17]:

- a. Sebuah pembangkit sinyal elektronik yang menghasilkan rentetan tegangan bolak-balik.
- b. Sebuah transduser untuk transmisi dan penerimaan gelombang ultrasonik ke dan dari benda uji.
- c. Sebuah *couplant* yang bertindak sebagai medium perambatan gelombang di antara transduser dan benda uji.
- d. Sebuah perangkat elektronik untuk memperkuat atau mengacak atau memodifikasi sinyal dari transduser.

- e. Sebuah layar atau indikator untuk menunjukkan pembacaan *thickness* atau gelombang ultrasonik yang diterima dari bermacam lapisan dari benda uji.
- f. Sebuah jam elektronik atau pengatur waktu untuk mengendalikan urutan tindakan dan bertindak sebagai titik referensi.

Skema prinsip kerja *ultrasonic testing* menggunakan transduser dapat dilihat pada Diagram 2.12 bawah ini:



Gambar 2.12 Block Diagram untuk *Ultrasonic Testing* Menggunakan Transduser (Sumber: Bhowmick, 2011)[17]

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pemodelan Erosi Secara Matematis

Das, Mehrotra, Sastry, dan Dey dalam penelitiannya tahun 2006 menentukan bahwa ada 3 fenomena utama di mana logam dapat terlepas pada temperatur tinggi sebagaimana berikut[2]:

- a. Pelepasan material karena *cutting wear*.
- b. Pelepasan material karena deformasi plastis berulang.
- c. Dampak temperatur pada properti *tensile* dari material.

A. Cutting Wear

Massa dari material yang tererosi akibat mekanisme cutting m_c oleh partikel tunggal yang menumbuk didefinisikan pada persamaan berikut (Mbabazi, Sheer, & Shandu, 2004)[9]:

$$m_c = K_c \rho_m h_m^3 \quad (1)$$

, dengan ρ_m adalah densitas material dan ρ_p adalah densitas partikel dan kedalaman penetrasi maksimum h_{max} yaitu:

$$h_m^3 = (d_p^3/3^3)V^3 s_i^3 \beta (\rho_p/\sigma_y)^{3/2} \quad (2)$$

,sehingga:

$$m_c = K_c \rho_m \rho_p^{3/2} d_p^3 V^3 s_i^3 \beta / (3^3 \sigma_y^{3/2}) \quad (3)$$

K_c pada persamaan ini adalah konstan, sudut β adalah impingement angle, σ_y adalah *yield stress* dari material target, dan d_p adalah diameter partikel. Laju erosi akibat *cutting wear*, ϵ_c , didefinisikan sebagai rasio massa material yang tererosi dengan massa partikel yang menumbuk. Massa partikel yang menumbuk didapatkan dari persamaan berikut:

$$m_p = \frac{1}{6} \rho_p \pi d_p^3 \quad (4)$$

, maka laju erosi adalah:

$$\epsilon_c = \frac{m_c}{m_p} = \frac{K_c \rho_m \rho_p^{3/2} d_p^3 V^3 s_i^3 \beta}{3^3 \sigma_y^{3/2} (\frac{1}{6} \rho_p \pi d_p^3)} \left(3^3 \sigma_y^{3/2} \right) = \frac{K_1 \rho_m \rho_p^{1/2} V^3 s_i^3 \beta}{\sigma_y^{3/2}} \quad (5)$$

B. Deformasi Plastis Berulang

Massa dari material yang tererosi akibat deformasi plastis m_d oleh partikel tunggal yang menumbuk didefinisikan pada persamaan berikut (Mbabazi, Sheer, & Shandu, 2004):

$$m_d = K_p \rho_m h_m^3 \quad (6)$$

, dengan ρ_m adalah densitas material dan ρ_p adalah densitas partikel dan kedalaman penetrasi maksimum h_{max} yaitu:

$$h_m^3 = d_p^3 V^3 s_i^3 \beta (\rho_p/H_V)^{3/2} \quad (7)$$

,sehingga:

$$m_d = K_p \rho_m \rho_p^{1/2} d_p^3 V^3 s_i^3 \beta / (H_V^{3/2}) \quad (8)$$

K_c pada persamaan ini adalah konstan, sudut β adalah *impingement angle*, H_V adalah *Vickers hardness number* dari material target, dan d_p adalah diameter partikel.

Laju erosi akibat deformasi plastis, ε_p , didefinisikan sebagai rasio massa material yang tererosi dengan massa partikel yang menumbuk. Massa partikel yang menumbuk didapatkan dari persamaan (4), sehingga laju erosi adalah:

$$\varepsilon_p = \frac{m_d}{m_p} = \frac{K_p \rho_m \rho_p^{1/2} d_p^3 V^3 s_i^{-3\beta}}{H_V^2 \left(\frac{1}{6} \rho_p \pi p^3 \right)} = \frac{K_2 \rho_m \rho_p^{1/2} V^3 s_i^{-3\beta}}{H_V^{3/2}} \quad (9)$$

C. Erosi Keseluruhan

Hubungan antara *yield stress* logam dengan *vickers hardness number* adalah sebagai berikut:

$$H_V = 2,7 \sigma_y \quad (10)$$

Laju erosi keseluruhan dihasilkan dari menggabungkan kedua laju yang sudah disebutkan sebelumnya menjadi:

$$\varepsilon = \frac{Kx^{4,9} \rho_m \rho_p^{1/2} V^3 s_i^{-3\beta}}{\sigma_y^{3/2}} \quad (11)$$

, dengan K adalah konstanta erosi keseluruhan, x adalah fraksi massa silika. Korelasi suhu terhadap *yield stress* dapat dilihat pada persamaan-persamaan di bawah ini:

- *Carbon steel*

$$\sigma_y = 2 \times 10^{-5} \times T^2 - 0,0353 \times T + 30,871 \quad (12)$$

- *Cr-1Mo-V steel*

$$\sigma_y = -2 \times 10^{-5} \times T^2 - 0,0278 \times T + 48,703 \quad (13)$$

- *2.25Cr-1Mo steel*

$$\sigma_y = -5 \times 10^{-8} \times T^3 + 10^{-5} \times T^2 - 0,0133 \times T + 33,324 \quad (14)$$

- *12Cr-1Mo-V steel*

$$\sigma_y = -5 \times 10^{-7} \times T^3 + 0,0005 \times T^2 - 0,1379 \times T + 59,169 \quad (15)$$

2.2.2 Minimum Wall Thickness

Erosi dan korosi adalah penyebab paling umum untuk penipisan dinding OD (*Outer Diameter*) tube boiler. Erosi terjadi pada tube OD dalam bentuk kehilangan

ketebalan dinding. Wall thickness untuk sebuah tube didesain berdasarkan *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* untuk dapat menahan tekanan, temperatur, dan beban mekanis tertentu[13]. Persamaan MWT dari ASME BPVC adalah:

$$t = \frac{P}{2S+P} + 0,005D \quad (18)$$

, di mana:

- t = minimum *wall thickness*
- P = tekanan desain
- D = diameter luar (OD)
- S = tegangan yang diijinkan (allowable stress)

Produsen boiler Babcock & Wilcock dalam *Steam: Its Generation and Use* (2005), menggunakan pendekatan praktis untuk boiler pembangkit listrik yaitu[18]:

- a. *Water-cooled tubes* (pipa air) sebaiknya diperbaiki atau diganti dengan pipa ukuran tebal dinding semula jika terjadi penipisan hingga di bawah 70% dari ukuran semula.
- b. *Steam-cooled tubes* (pipa uap) sebaiknya diperbaiki atau diganti dengan pipa ukuran tebal dinding semula jika terjadi penipisan hingga di bawah 85% dari ukuran semula.

2.2.4 Metode Pengukuran Akurasi Hasil Prediksi

A. T-test

T-test adalah metode komparasi 2 set rerata untuk melihat apakah kedua rerata tersebut secara signifikan berbeda atau tidak . T-test untuk *equal variance* dapat dihitung menggunakan formula (20) berikut ini [19]:

$$T - v = \frac{m \quad 1-m \quad 2}{\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \times \sqrt{\frac{(n_1-1) \times v_1^2 + (n_2-1) \times v_2^2}{n_1+n_2-2}}} \quad (22)$$

, dengan:

- mean1 dan mean 2 = rerata nilai dari set sampel
- var₁ dan var₂ = varian dari setiap set sampel
- n₁ dan n₂ = jumlah data setiap set sampel, dan
- Degrees of Freedom = n₁+n₂-2

Nilai dari α atau mean difference adalah 0,05 sesuai dengan level ketidakpastian pengukuran pada UT Thickness berdasarkan jurnal dari EPRI (1987)[20].

B. MAPE

Metode berikutnya adalah untuk mengukur tingkat akurasi prediksi. Tingkat akurasi prediksi dapat diukur menggunakan MAPE atau Mean Absolute Percentage Error [21]. Formula MAPE adalah sebagai berikut:

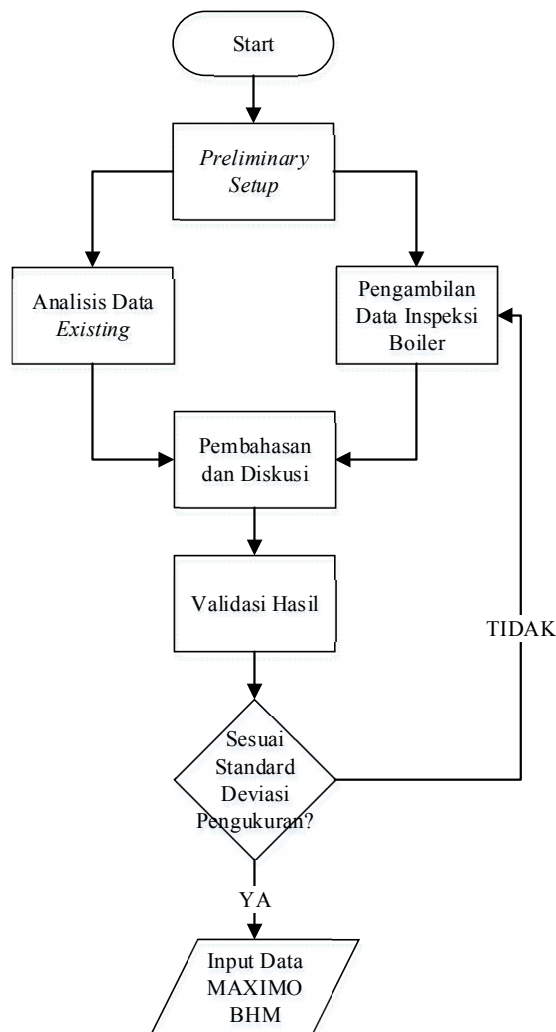
$$M = \frac{1\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (21)$$

, dengan A_t adalah nilai aktual dan F_t adalah nilai prediksi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian pada thesis ini terdiri dari 3 langkah, yaitu analisa data *existing thickness measurement*, analisis dan prediksi *thickness* berdasarkan data *existing*, dan validasi hasil prediksi terhadap *thickness measurement* pada unit yang menjalani overhaul. Pada langkah yang ketiga, selain dilakukan UT pada *superheater tube* juga akan dilakukan pengambilan sampel *tube* untuk diuji laboratorium untuk mengetahui komposisi ketebalan pipa (logam dan *oxide scale*). Secara umum *flow diagram* penelitian ini dapat dilihat pada Diagram 3.1 berikut:



Gambar 3.1 *Flow Diagram* Penelitian

3.1 Analisa Data Thickness

Boiler and HRSG Management (sebelumnya bernama *Targeted Boiler Management – TBM*) sebagai metode manajemen boiler sudah dilaksanakan di PLTU Labuan sejak tahun 2013. Pelaksanaan BHM menghasilkan data-data hasil inspeksi selama unit menjalani *overhaul*. Data-data yang akan digunakan pada penelitian ini adalah data hasil UT *thickness measurement*. Tabel 3.1 berikut menunjukkan periode *overhaul* per unit dan area *tube boiler* yang sudah dilakukan UT thickness sejak pelaksanaan BHM di PLTU Labuan.

Tabel 3.1 Tabel Periode OH dan Area Boiler Tube yang Dilakukan UT *Thickness*

No.	Unit	Unit 1				
	Year	2014	2015	2016	2017	2019
	Area					
1	Panel Division SH	yes	yes		yes	TBD
2	Platen SH	yes	yes		yes	TBD
3	Medium RH	yes	yes		yes	TBD
4	Final RH	yes	yes		yes	TBD
5	Final SH	yes	yes		yes	TBD
6	Cold SH	yes	yes		yes	TBD
7	Economizer	yes	yes		yes	TBD
		Apr-14	Okt-15		Jun-17	Jun-19

Pelaksana pekerjaan UT *thickness* di unit 1 pada periode 2014 dan 2015 adalah PT PLN Puslitbang, sementara untuk periode 2017 dan 2019 oleh PT Indonesia Power Unit Jasa Pemeliharaan (UJH). Dua pelaksana yang berbeda menyebabkan format pelaporan hasil UT *thickness* juga berbeda. Berikut contoh pelaporan hasil UT *thickness* pada Gambar 3.2 dan 3.3.

LOKASI : COLD SH

POSISI : F 16 ELBOW ATAS

No. Row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Tebal (mm)	Kanan	5.59	5.44	5.55	5.45	5.76	5.65	5.56	5.32	5.52	5.57	5.46	5.57	5.72	5.87	5.74
	Tengah	5.46	5.25	5.35	5.18	5.56	5.59	5.41	5.23	5.43	5.49	5.40	5.55	5.49	5.80	5.55
	Kiri	5.46	5.47	5.43	5.57	5.49	5.94	5.59	5.40	5.78	5.55	5.64	5.74	5.86	5.74	5.74

Gambar 3.2 Contoh Pelaporan Hasil UT Thickness oleh PLN Puslitbang

LOKASI : PRIMARY SUPERHEATER LEVEL 3

POSISI : ELBOW A



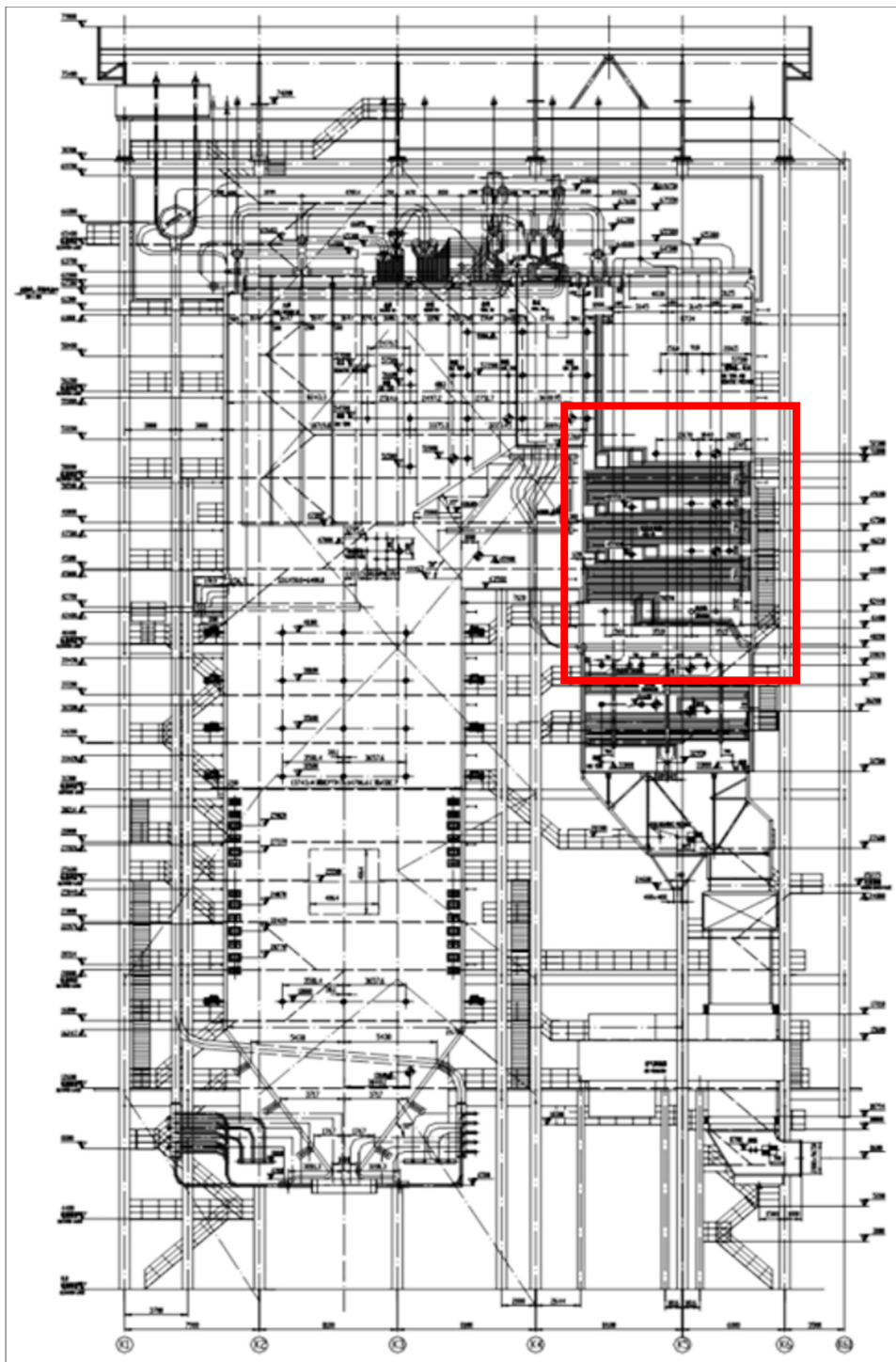
No. Row	Tebal Pipe (mm)		
	Kiri	Tengah	Kanan
64	5.92	5.52	5.42
65	5.78	5.68	5.84

No. Row	Tebal Pipe (mm)		
	Kiri	Tengah	Kanan
85	5.62	5.75	5.67
86	5.79	5.54	5.60

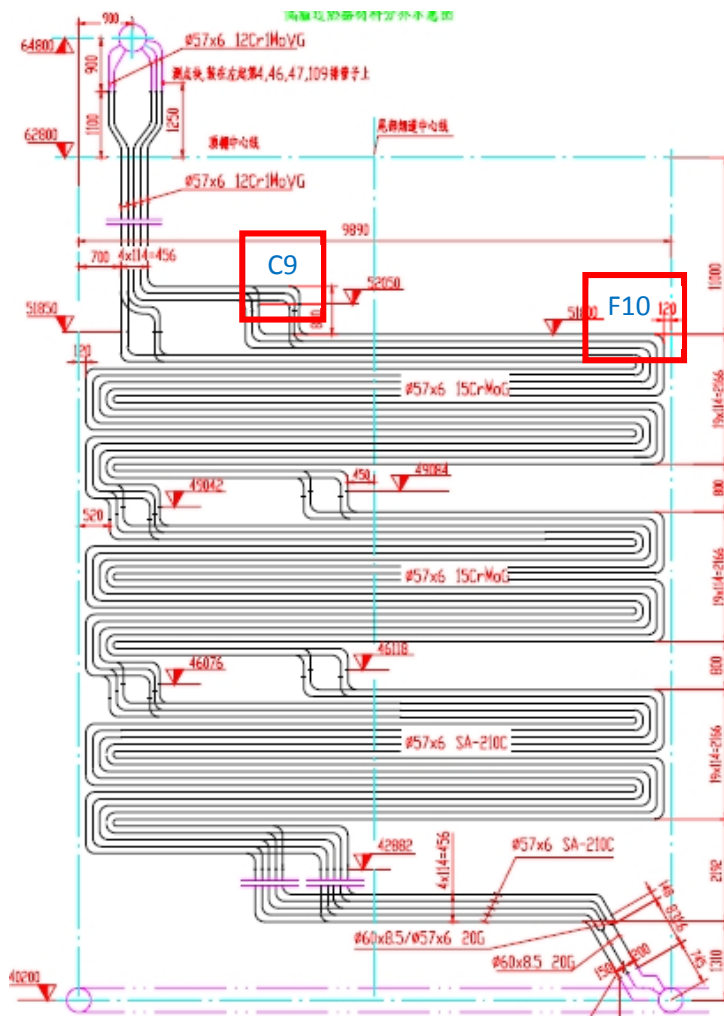
No. Row	Tebal Pipe (mm)		
	Kiri	Tengah	Kanan
106	5.47	5.49	5.47
107	5.19	5.36	5.30

Gambar 3.3 Contoh Pelaporan Hasil UT Thickness oleh UJH

Selain format yang berbeda, penamaan area pengambilan pada *tube boiler* pun berbeda, sebagai contoh *Primary Superheater F9* pada laporan Puslitbang adalah bernama *Primary Superheater Elbow B level 4* pada laporan UJH. Perbedaan-perbedaan format tersebut perlu direkap ke dalam satu *spreadsheet* dengan format dan penamaan area yang seragam agar data dapat dianalisa dengan benar. Area pengambilan UT *thickness* antar periode OH juga ditemukan beberapa inkonsistensi, dalam artian pada periode OH satu diambil sementara periode OH lainnya tidak diambil. Penelitian ini menggunakan data yang secara konsisten diambil pada ≥ 3 periode OH dan mengeliminir area yang hanya diambil pada ≤ 2 periode OH. Area yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar-gambar 3.4 dan 3.5 di bawah ini:

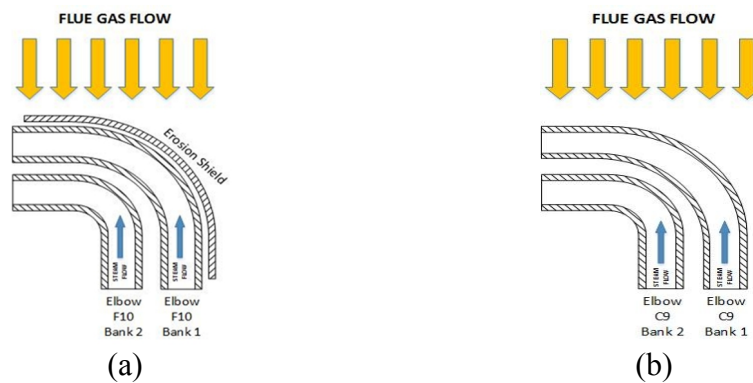


Gambar 3.4 Skema *Boiler* PLTU Labuan



Gambar 3.5 Diagram *Primary Superheater*

Skema dari area *elbow* F10 dan C9 dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



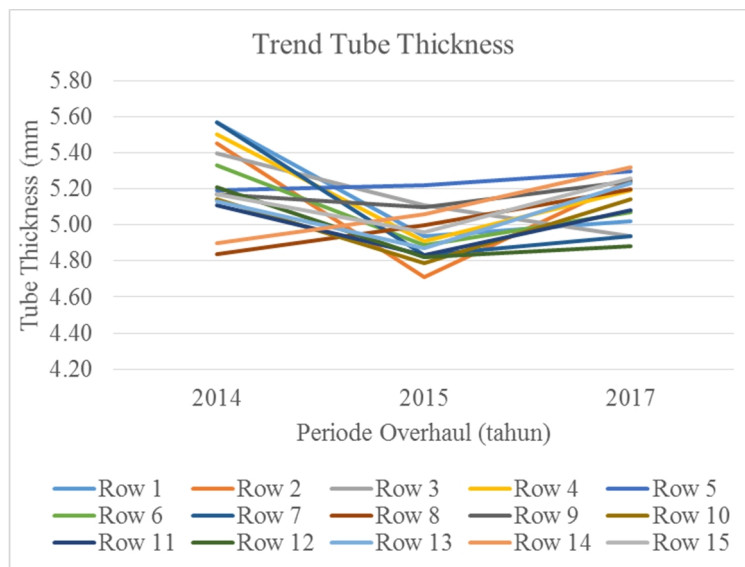
Gambar 3.6 Skema Area, (a) *Elbow* F10, dan (b) *Elbow* C9

Hasil dari kompilasi data tersebut kemudian dimasukkan ke dalam contoh Tabel 3.2 seperti berikut:

Tabel 3.2 Data UT *Thickness* pada *Primary Superheater F10 Elbow Atas Row 1-15*

Row Number	Selected Measurement Points								
	Right Side			Middle Side			Left Side		
	2014	2015	2017	2014	2015	2017	2014	2015	2017
1	5.8	5.03	5.15	5.57	4.94	5.02	5.75	4.96	5.9
2	5.57	4.7	5.31	5.45	4.71	5.25	5.91	4.57	5.08
3	5.52	5.12	4.93	5.40	5.11	4.94	5.44	4.954	5.12
4	5.82	4.88	5.22	5.50	4.91	5.19	5.59	5	5.27
5	5.49	5.25	5.56	5.19	5.22	5.30	5.27	5.24	5.32
6	5.56	5	5.23	5.33	4.89	5.07	5.34	4.76	5.33
7	5.16	4.92	5.09	5.57	4.83	4.94	5.49	4.81	5.34
8	5.23	4.88	5.26	4.84	5.00	5.20	5.03	5.04	5.24
9	5.49	5.06	5.53	5.17	5.10	5.24	5.32	5.12	5.35
10	5.33	4.75	5.21	5.14	4.79	5.14	5.49	4.85	5.27
11	5.34	4.9	5.02	5.11	4.83	5.08	5.31	4.85	5.07
12	5.39	5.15	5.21	5.21	4.82	4.88	5.27	4.85	5.34
13	5.56	4.99	5.49	5.13	4.87	5.23	5.43	4.85	5.35
14	5.27	5.1	5.45	4.90	5.06	5.32	5.27	5.04	5.31
15	5.36	4.88	5.35	5.17	4.96	5.26	5.31	4.89	5.31

Data yang sudah dikompilasi kemudian dimasukkan ke dalam grafik penipisan tube superheater seperti pada contoh Gambar 3.7 di bawah ini:



Gambar 3.7 Contoh Grafik Penipisan *Tube Superheater* dengan Sumbu X adalah Periode OH dan Sumbu Y *Thickness Tube* dalam mm

3.2 Prediksi *Thickness* Berdasarkan Data *Existing*

Tujuan pada tahapan ini adalah untuk menentukan *tube superheater* mana yang akan diganti pada periode OH berikutnya, dalam hal ini adalah *tube superheater* pada unit 1 periode OH Juli 2019. Penggantian *tube* dilakukan berdasarkan nilai *thickness tube* < MWT di tube tersebut. MWT masing-masing area *tube* menggunakan formula dari ASME dan dimasukkan ke contoh Tabel 3.3 di bawah ini:

Tabel 3.3 MWT Boiler Tube

TABEL PERBANDINGAN MINIMUM WALL THICKNESS (MWT) MENURUT STANDAR BOILER TUBE PLTU 2 BANTEN LABUAN										
No.	TUBE SECTION	MATERIAL	OD	T	P	S	t	MWT		
			mm	C	Mpa	Mpa	mm	DEC	ASME	BW
1	Primary Superheater 1	SA 210 C	57	380	19,26	118,5	6	4,6	4,57	5,10
2	Primary Superheater Header	20G	60	372	19,26	94	8,5	6,08	5,88	7,23
3	Primary Superheater 2	15CrMoG	57	432	19,26	124	6	4,61	4,39	5,10
4	Primary Superheater 3	12CrMoVG	57	447	19,26	128	6	4,49	4,27	5,10

Prediksi dilakukan dengan acuan laju penipisan pada bagian-bagian *row* tertentu pada area yang sudah ada data *thicknessnya*. Sebagai contoh pada area *Primary Superheater* F10, terdapat 112 *row* yang kemudian dibagi menjadi 4 bagian *row*, yaitu:

- a. *Row* 1-28 sebagai area dinding sisi turbin
- b. *Row* 29-56 sebagai area tengah 1
- c. *Row* 57-84 sebagai area tengah 2
- d. *Row* 85-112 sebagai area dinding sisi stack

Hasil prediksi kemudian dikompilasikan ke dalam satu *spreadsheet* per area *tube superheater*. Di dalam *spreadsheet* di-input nilai MWT untuk *tube superheater* area tersebut. Setelah input nilai MWT maka dapat diketahui tube mana yang sudah di bawah MWT dan menjadi perhatian pada OH yang akan datang.

3.3 Validasi Hasil

OH Unit 1 pada bulan Juli 2019 diagendakan untuk dilakukan UT *thickness* pada *tube superheater* berdasarkan *scope* BHM untuk area aktif. Hasil pengukuran tersebut akan dijadikan sebagai validasi prediksi penipisan *tube superheater* yang sudah dibahas pada sub bab sebelumnya. Selain itu, akan dilakukan pengambilan sampel untuk *tube superheater* yang sudah di bawah MWT dan yang terjadi inkonsistensi data *thickness*.

Sampel yang diambil kemudian dilakukan dua pengujian, yaitu:

- a. UT *thickness*, untuk mengetahui tingkat error pengambilan data
- b. Pengamatan dan pengukuran makro.
- c. Pengamatan dan pengukuran mikroskopis, baik menggunakan mikroskop optik dan SEM dan untuk mengetahui apakah ketebalan oxide scale mempengaruhi pembacaan UT *thickness*.

Data-data hasil validasi kemudian digunakan untuk perbaikan instruksi kerja dari pengukuran UT *thickness*. Perbaikan tersebut bertujuan untuk mengurangi *error* pengukuran. Metode BHM selama ini pada prakteknya lebih ke arah *condition based maintenance*, sebagai contoh apabila ada *tube* yang di bawah MWT selama inspeksi maka akan diganti. Setelah ada acuan standar yang baku, maka diharapkan *condition based* tersebut dapat diarahkan menuju *predictive maintenance*. *Predictive maintenance boiler* dengan dasar acuan yang benar akan memperkuat *defence mechanism* terhadap *damage* yang terjadi pada boiler, terutama dari segi perencanaan pengadaan tube dan pekerjaan perbaikan.

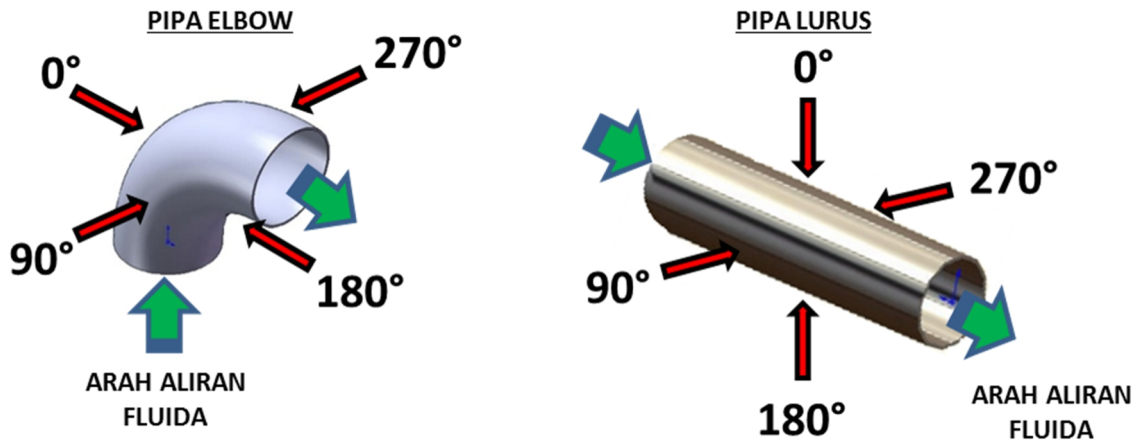
3.3.1 Pengukuran *Sampling* Menggunakan UT *Thickness*

Metode pengukuran UT *thickness* dapat dilihat pada Tabel 3.4 dan Gambar 3.8 di bawah ini:

Tabel 3.4 Daftar Material dan *Sound Velocity*

Material	<i>Sound Velocity</i>	
	(m/s)	(in/ μ s)
Aluminium	6350	0.250
<i>Iron</i>	5893	0.232
<i>Nickel</i>	5639	0.222

<i>Steel</i>	5918	0.233
<i>Stainless Steel</i>	5664	0.223
Titanium	6096	0.240



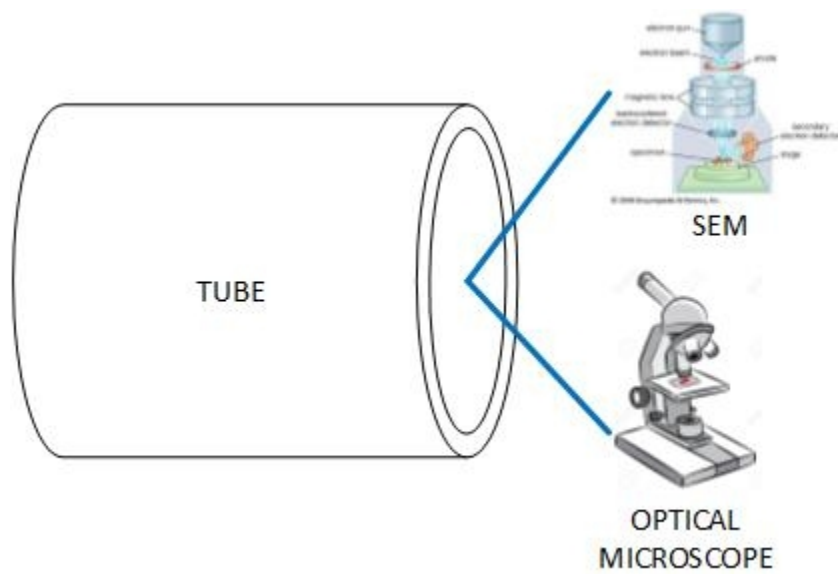
Gambar 3.8 Titik Pengambilan *Thickness* pada *Tube*

3.3.2 Pengamatan dan Pengukuran Sampel Secara Makro dan Mikroskopis

Metode pengamatan dan pengukuran sampel dijabarkan pada Gambar 3.9 dan 3.10 berikut:



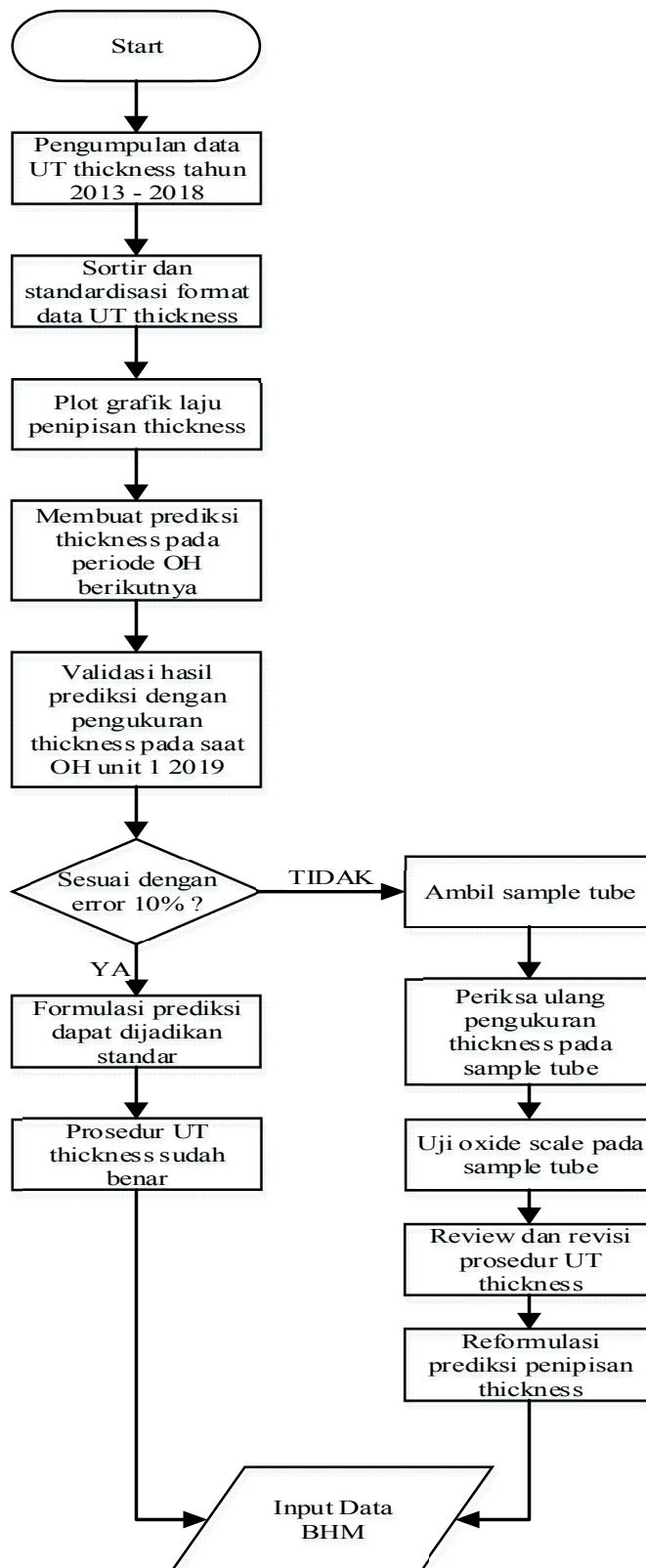
Gambar 3.9 Pengukuran OD dan *Thickness Tube* Sampel



Gambar 3.10 Analisis *Tube* secara Mikroskopis

3.3.3 *Flowchart* Detail Penelitian

Flowchart detail untuk langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada Diagram 3.11 berikut:



Gambar 3.10 Flowchart Penelitian

3.4 Jadwal Penelitian dan Penyusunan Tesis

Berikut jadwal penelitian dan penyusunan thesis ini :

Aktivitas	April 2019				Mei 2019				Juni 2019				Juli 2019				Agustus 2019				September 2019				Oktober 2019				November 2019				Desember 2019			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Literature Review	■	■	■																																	
Pengumpulan Proposal Thesis				■																																
Seminar Proposal Thesis					■																															
Revisi Proposal Thesis						■	■																													
Pengolahan Data Penelitian									■	■	■	■																								
Pembuatan Prediksi Thickness													■	■																						
Pengambilan Sampel Tube															■																					
Validasi Hasil																■																				
Seminar International																																				
Sidang Terjadwal Thesis																																				
Revisi Thesis hasil sidang																																				
Pembuatan buku Thesis																																				
Yudisium Jurusan																																				
Yudisium Institut																																				

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini adalah data pengukuran UT thickness dalam 3 periode *overhaul* (OH) unit 1 dari tahun 2014 sampai dengan tahun 2017. *UT thickness* dilakukan sebagai basis untuk RLA (*Remaining Life Assesment*) dari *tube boiler*. Data UT didapatkan menggunakan prosedur yang terstandardisasi ASME Section V oleh operator yang bersertifikat NDT level 2.

Data-data yang sudah terkumpul kemudian diinput ke dalam format tunggal. Format tersebut diperlukan karena hasil pengukuran pada 3 periode *overhaul* mempunyai format pelaporan yang berbeda. Penamaan area pengukuran juga berbeda sehingga perlu disortir dan disamakan areanya. Contoh laporan *UT thickness* di area *primary superheater* pada pada periode OH yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini:

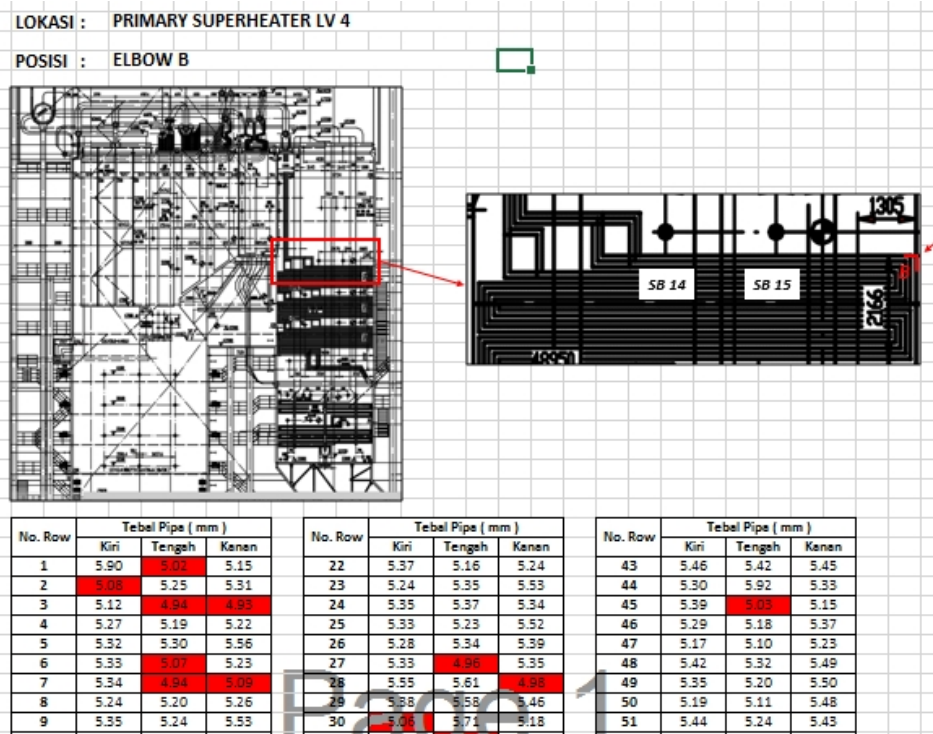
LOKASI : COLD SH
 POSISI : F9 TUBE KE 2 (ELBOW)

No. Row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Kanan	5.80	5.57	5.52	5.82	5.49	5.56	5.16	5.23	5.49	5.33	5.34	5.39	5.56	5.27	5.36	5.65	5.39	5.27	5.42	5.52	5.26	5.37	5.45	5.66	5.60	5.34	5.33	5.51	5.73	5.62	5.73	5.69	5.39	5.74	5.56	5.82	5.75	5.50	5.28	
Tengah	5.57	5.45	5.40	5.50	5.19	5.33	5.57	4.98	5.17	5.14	5.11	5.21	5.13	4.90	5.17	5.15	5.35	4.97	4.98	5.27	4.94	5.00	5.17	5.37	5.24	5.21	5.07	5.63	5.27	5.48	5.38	5.31	5.50	5.00	5.28	5.17	5.40	5.29	5.16	5.10
Kiri	5.75	5.91	5.44	5.59	5.27	5.34	5.49	5.08	5.32	5.49	5.31	5.27	5.43	5.27	5.31	5.43	5.58	5.22	5.16	5.37	5.08	5.25	5.53	5.50	5.43	5.25	5.13	5.43	5.36	5.61	5.61	5.36	5.58	5.32	5.37	5.37	5.35	5.57	5.20	5.23

No. Row	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Kanan	5.74	5.50	5.56	5.51	5.67	5.60	5.43	5.76	5.38	5.62	5.35	5.88	5.24	5.35	5.79	5.45	5.66	5.50	5.68	5.83	5.72	5.45	5.70	5.66	5.44	5.41	5.36	5.46	5.47	5.35	5.41	5.46	5.51	5.41	5.58	5.41	5.24	5.32	5.36	5.22
Tengah	5.29	5.13	5.48	5.29	5.45	5.16	5.32	5.29	4.98	5.23	5.08	5.45	5.08	5.10	5.47	5.30	5.25	5.37	5.65	5.48	5.23	5.37	5.35	5.41	5.23	5.19	5.24	5.33	5.11	5.26	5.32	5.35	5.20	5.15	5.31	5.13	5.15	5.08	4.90	
Kiri	5.33	5.23	5.60	5.56	5.83	5.25	5.25	5.49	5.11	5.39	5.36	5.59	5.49	5.68	5.63	5.33	5.28	5.68	5.77	5.53	5.48	5.44	5.39	5.33	5.56	5.52	5.48	5.58	5.28	5.67	5.44	5.41	5.44	5.24	5.39	5.32	5.38	5.19	5.12	

No. Row	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
Kanan	5.93	5.18	5.43	5.33	5.51	5.26	5.33	5.37	5.50	5.29	5.31	5.36	5.75	5.31	5.50	5.35	5.48	5.41	5.61	5.58	5.40	5.20	5.46	5.78	5.63	5.21	5.46	5.57	5.55	5.29	5.37	5.64
Tengah	5.27	5.08	5.26	5.16	5.50	5.10	5.00	5.08	5.28	5.24	5.21	5.21	5.45	4.90	5.16	5.18	5.00	5.15	5.31	5.37	5.07	4.90	5.00	5.32	5.33	5.21	5.24	5.39	5.26	5.08	4.97	5.25
Kiri	5.16	5.49	5.25	5.51	5.64	5.35	5.26	5.24	5.54	5.31	5.33	5.31	5.35	5.22	5.20	5.40	5.15	5.21	5.55	5.41	5.36	5.28	5.22	5.46	5.47	5.29	5.56	5.53	5.30	5.15	5.10	5.47

(a)



(b)

Gambar 4.1. (a) Contoh Laporan Hasil Pengukuran *UT Thickness* dari PLN Puslitbang, dan (b) Laporan oleh UJH.

Data kemudian disortir dan dimasukkan ke tabel hasil pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 di bawah ini:

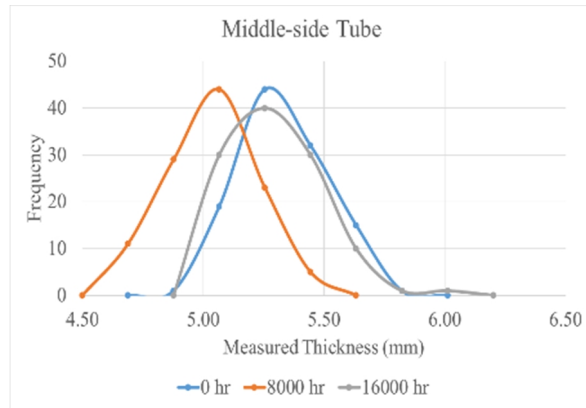
Tabel 4.1 Contoh Hasil Kompilasi Data Pengukuran *UT Thickness*

Row Number	Selected Measurement Points								
	Right Side			Middle Side			Left Side		
	2014	2015	2017	2014	2015	2017	2014	2015	2017
1	5.8	5.03	5.15	5.57	4.94	5.02	5.75	4.96	5.9
2	5.57	4.7	5.31	5.45	4.71	5.25	5.91	4.57	5.08
3	5.52	5.12	4.93	5.40	5.11	4.94	5.44	4.954	5.12
4	5.82	4.88	5.22	5.50	4.91	5.19	5.59	5	5.27
5	5.49	5.25	5.56	5.19	5.22	5.30	5.27	5.24	5.32
6	5.56	5	5.23	5.33	4.89	5.07	5.34	4.76	5.33
7	5.16	4.92	5.09	5.57	4.83	4.94	5.49	4.81	5.34
8	5.23	4.88	5.26	4.84	5.00	5.20	5.03	5.04	5.24
9	5.49	5.06	5.53	5.17	5.10	5.24	5.32	5.12	5.35
10	5.33	4.75	5.21	5.14	4.79	5.14	5.49	4.85	5.27
11	5.34	4.9	5.02	5.11	4.83	5.08	5.31	4.85	5.07
12	5.39	5.15	5.21	5.21	4.82	4.88	5.27	4.85	5.34
13	5.56	4.99	5.49	5.13	4.87	5.23	5.43	4.85	5.35
14	5.27	5.1	5.45	4.90	5.06	5.32	5.27	5.04	5.31
15	5.36	4.88	5.35	5.17	4.96	5.26	5.31	4.89	5.31

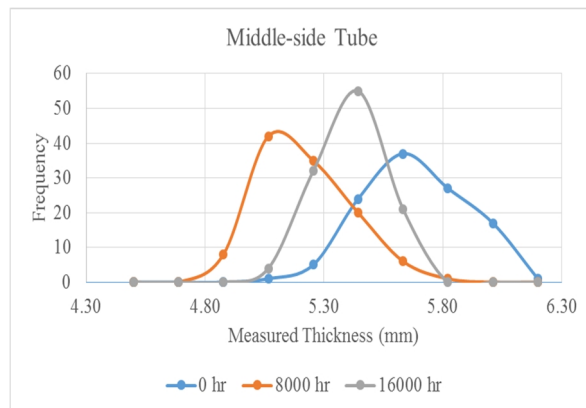
Fokus pengambilan data untuk studi ini adalah pada lokasi *primary superheater elbow* F10 dan C9. Lokasi tersebut dipilih karena pada elbow F10 terdapat indikasi abnormalitas hasil pengukuran thickness pada row 1. Abnormalitas itu berupa hasil pengukuran yang semakin bertambah (nilai *thickness* naik) antar periode overhaul, yang seharusnya terjadi pengurangan. Sedangkan pada *elbow C9 row 63*, berdasarkan data *thickness* selama 3 periode *overhaul* maka pada periode *overhaul* berikutnya (2021) diperkirakan bahwa pipa tersebut *thickness*-nya di bawah MWT sehingga harus diperbaiki.

4.2 Verifikasi Data dan Prediksi *Thickness*

Distribusi data untuk lokasi-lokasi tersebut di atas per periode OH kemudian dianalisa menggunakan kurva distribusi dan di-plot dalam satu diagram seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan 4.3 di bawah ini. Contoh kurva distribusi yang diambil pada pengambilan sisi tengah.



Gambar 4.2 Distribusi Data *UT Thickness* pada *Elbow F10* Pengambilan Sisi Tengah



Gambar 4.3 Distribusi Data *UT Thickness* pada *Elbow C9* Pengambilan Sisi Tengah

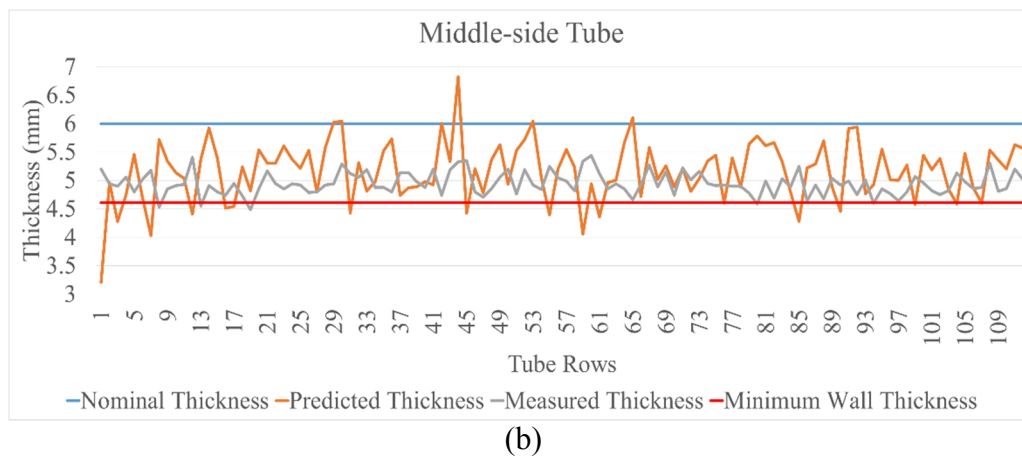
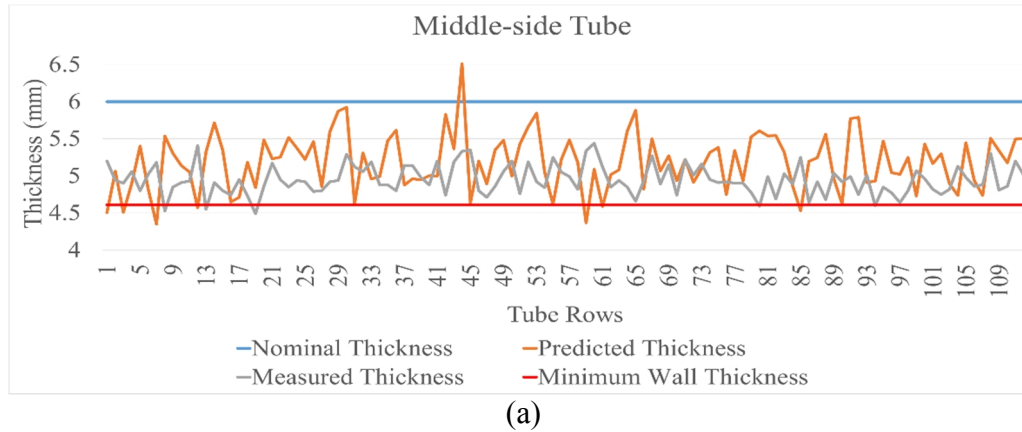
Dari gambar 4.2 dan 4.3 di atas, hasil pengamatan menunjukkan bahwa distribusi data pada tahun 2014 (0 hr) berada pada bagian kurva paling kanan. Distribusi data pada tahun 2015 (8000 hr) seharusnya berada tepat di sebelah kiri dari distribusi tahun 2014, tetapi pada 2 gambar di atas distribusi data tahun 2015 berada pada bagian kurva yang paling kiri. Sementara itu, distribusi data tahun 2017 justru berada di bagian tengah yang seharusnya di bagian paling kiri.

Mengacu dari distribusi di atas, maka untuk selanjutnya disusun prediksi ketebalan *tube*. Prediksi ini menggunakan laju penipisan per tahun berdasarkan laporan hasil pengukuran *thickness*. Prediksi akan dibuat 2 macam untuk membandingkan hasil antara penggunaan data semua periode *overhaul* dan data yang mengesampingkan hasil pengukuran pada periode 16000 jam (2017). Prediksi di-plot dalam grafik yang meliputi:

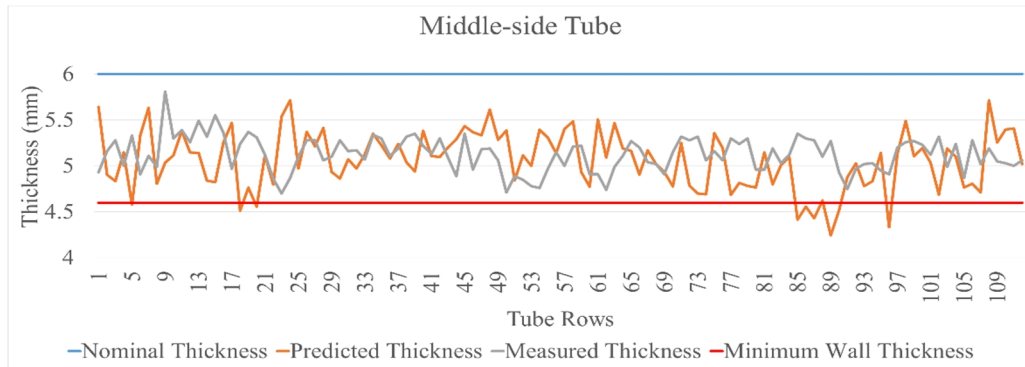
- a. Hasil prediksi atau *predicted thickness*
- b. Pengukuran aktual ketebalan *tube* atau *measured thickness*

- c. Ketebalan minimum *tube* atau *Minimum Wall Thickness*
- d. Ketebalan nominal atau *nominal thickness*

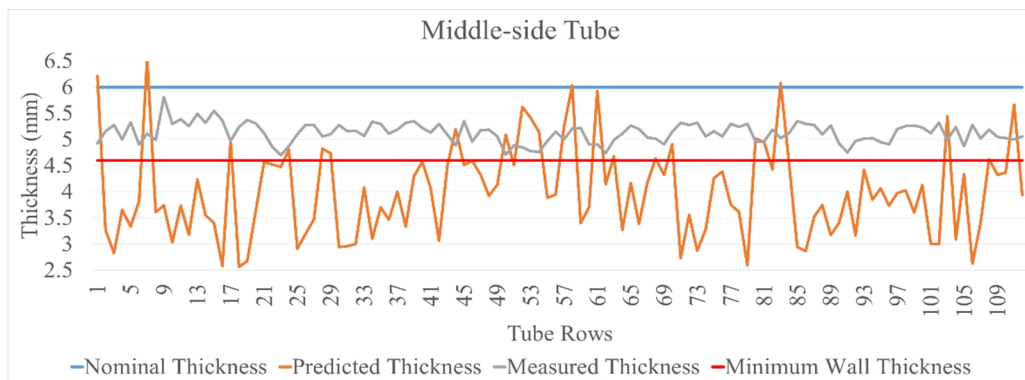
Gambar 4.4 dan 4.5 di bawah ini menunjukkan hasil plot dari prediksi tersebut untuk area pengambilan bagian tengah.



Gambar 4.4 Kurva Ketebalan *Tube* Hasil Prediksi dan Aktual untuk Area *Elbow* F10, Hasil dari (a) Data yang Menyertakan, dan (b) Data yang Mengesampingkan Hasil Pengukuran Ketebalan *Tube* pada Periode 16000 Jam.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Kurva Ketebalan *Tube* Hasil Prediksi dan Aktual untuk Area *Elbow* C9, Hasil dari (a) Data yang Menyertakan, dan (B) Data yang Mengesampingkan Hasil Pengukuran Ketebalan *Tube* pada Periode 16000 Jam.

Langkah berikutnya adalah pengujian 2 set data antara data prediksi dan data aktual apakah mempunyai perbedaan yang signifikan atau tidak. Pengujian ini menggunakan metode T-test. T-test yang dipakai adalah t-test dengan asumsi variasi setara karena jumlah sampel data yang sama yaitu sebanyak 112 sampel. Rerata perbedaan atau α adalah 0,05 sesuai dengan level ketidakpastian pengukuran dalam *UT Thickness*. Hasil t-test untuk area *elbow* F10 dan C9 dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.2 Hasil T-test *Assuming Equal Variances* untuk Area F10

Name	16000-hour data included		16000-hour data omitted	
	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2
Mean	5.183	4.947	5.163	4.945
Variance	0.145	0.0394	0.271	0.0394
Observations	112	112	112	112
Hypothesized Mean Difference	0		0	

df	222		222	
t Stat	5.81		4.093	
P(T<=t) two-tail	2.144E-08		5.968E-05	
t Critical two-tail	1.97		1.97	

Tabel 4.3 Hasil T-test *Assuming Equal Variances* untuk Area C9

Name	16000-hour data included		16000-hour data omitted	
	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2
Mean	5.061657	5.126696	4.001	5.127
Variance	0.09619	0.03579	0.766	0.0358
Observations	112	112	112	112
Hypothesized Mean Difference	0		0	
df	222		222	
t Stat	-1.89465		-13.3	
P(T<=t) two-tail	0.05		4.55E-30	
t Critical two-tail	1.970707		1.970707	

Kedua tabel di atas menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan di antara 2 set data karena nilai P two-tail masih di bawah atau sama dengan nilai $\alpha = 0,05$.

Metode lain yang dapat digunakan untuk menguji akurasi prediksi adalah dengan menentukan nilai *Mean Absolute Percentage Error* atau MAPE. Formula MAPE adalah seperti di bawah ini, dengan A_t merupakan nilai aktual dan F_t adalah nilai forecast atau prediksi.

$$M = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|$$

Hasil dari perhitungan MAPE dapat dilihat pada Tabel 4.4 di bawah ini.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan MAPE

No.	Area	MAPE	
		Termasuk Periode 16000 Jam (%)	Tanpa Periode 16000 Jam (%)
1	<i>Elbow F10</i>	8,71	10,44
2	<i>Elbow C9</i>	6,07	25

Nilai MAPE untuk area F10 pada data yang menyertakan dan mengesampingkan periode 16000 jam menunjukkan level yang sangat bagus atau excellent ($<10\%$). MAPE untuk area C9 menunjukkan level yang bagus (good, $10\% < X < 20\%$) pada

data yang menyertakan periode 16000 jam dan level yang tidak bagus pada data yang mengesampingkan periode 16000 jam (>20%).

4.3 Pengujian Makroskopis Sampel Tube

4.3.1 Pengamatan Makroskopis

Sampel uji yang sudah diambil dari area *elbow* F10 dan C9 selanjutnya diamati secara makroskopis. Sampel uji tube elbow F10 row 1 ditunjukkan pada Gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.6 Sampel Uji Tube *Primary Superheater Elbow* F10 Row 1

Hasil pengamatan menunjukkan adanya *oxide scale* pada bagian luar dari tube terutama pada bagian *extrados* dan *intrados*. Pengamatan sampel uji *primary superheater elbow* C9 ditunjukkan pada Gambar 4.7 di bawah ini.

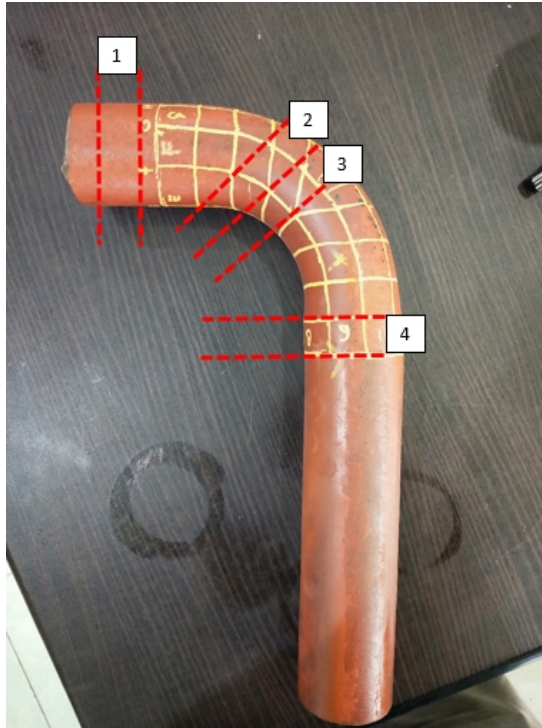


Gambar 4.7 Sampel Uji Tube *Primary Superheater Elbow C9 Row 63*

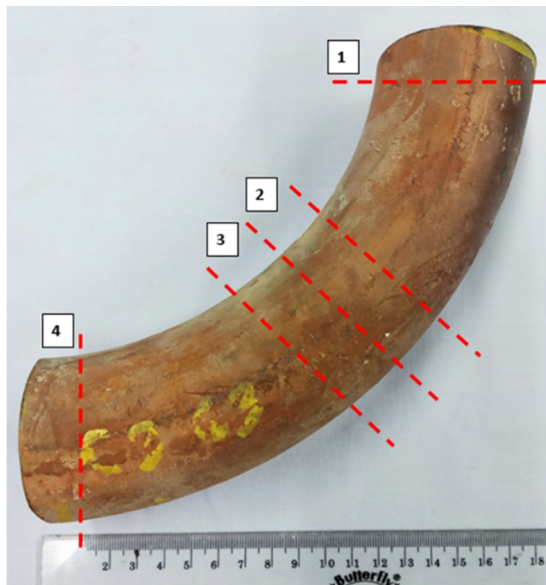
Oxide scale pada *intrados* dan *extrados* dari *tube bend* juga tampak pada sampel uji tersebut. Kuantitas dari *oxide scale* terlihat lebih kecil pada *elbow C9 row 63* daripada *elbow F10 row 1*.

4.3.2 Pengukuran Dimensi Sampel *Tube*

Sampel uji tube elbow F10 dan C9 dipotong pada bagian *tube bend* dan diukur dimensi *thickness*-nya menggunakan sigmat. Titik pengukuran pada 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° . Pengukuran masing-masing titik dilakukan sebanyak 3 kali dan hasilnya dirata-rata. Lokasi potongan sampel uji ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan 4.9 di bawah ini.

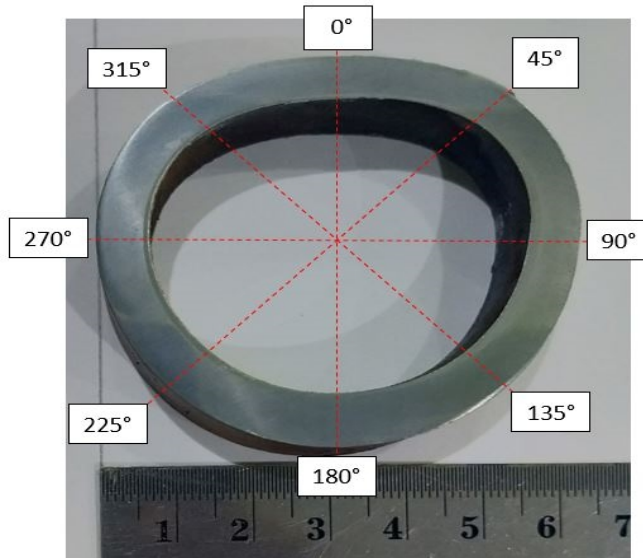


Gambar 4.8 Lokasi Potongan Sampel Uji *Tube Primary Superheater Elbow F10 Row 1*



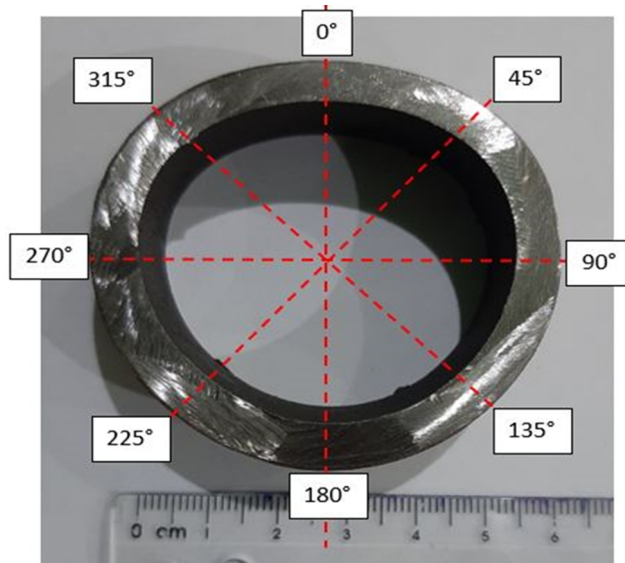
Gambar 4.9 Lokasi Potongan Sampel Uji *Tube Primary Superheater Elbow C9 Row 63*

Lokasi potongan per sampel pipa berjumlah 4. Dari ke-4 lokasi tersebut yang berada pada titik pengukuran *UT Thickness* adalah potongan nomor 2. Hasil dari pengukuran potongan 2 dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan 4.11 di bawah ini.



Potongan 2	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Pengukuran ke:	5.8	6	6.58	7.4	7.6	7.46	6.72	6.24
	5.8	5.98	6.4	7.4	7.6	7.38	6.78	6.24
	5.86	5.98	6.44	7.28	7.56	7.36	6.68	6.2
Rerata	5.82	5.98	6.47	7.36	7.58	7.4	6.73	6.22

Gambar 4.10 Hasil Pengukuran *Thickness* Sampel Uji *Tube Primary Superheater Elbow F10 Row 1*



Potongan 2	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Pengukuran ke:	5.40	5.58	6.04	6.50	6.74	6.60	6.20	5.80
	5.44	5.56	6	6.48	6.74	6.56	6.20	5.74
	5.42	5.58	6	6.52	6.72	6.58	6.18	5.7
Rerata	5.42	5.57	6.01	6.5	6.73	6.58	6.19	5.75

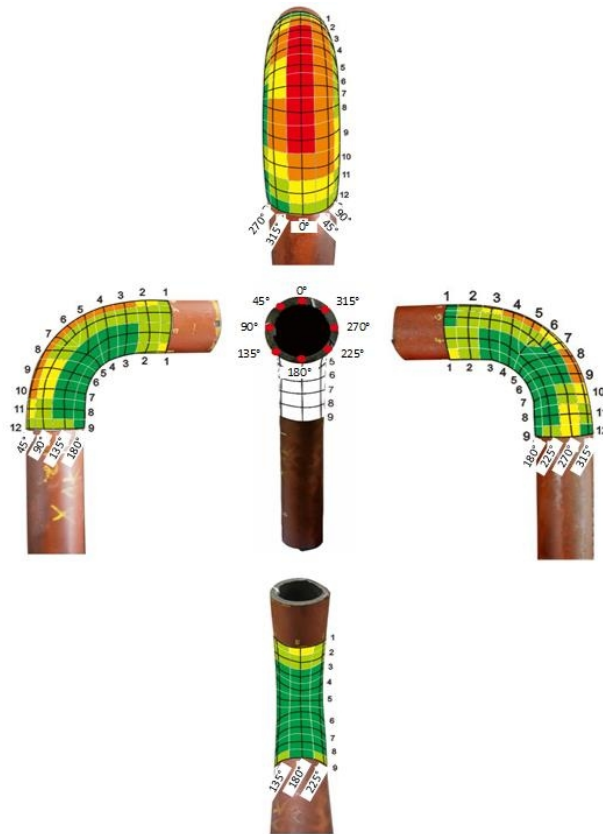
Gambar 4.11 Hasil Pengukuran *Thickness* Sampel Uji *Tube Primary Superheater Elbow C9 Row 63*

Hasil pengukuran di atas menunjukkan bahwa pada area tube bend, dimensi OD maupun thickness mengalami perubahan yang cukup signifikan. Dimensi OD pada umumnya akan menjadi oval yaitu mengecil pada sisi dalam dan luar tube bend dan membesar pada sisi samping. Thickness juga mengalami perubahan pada area extrados (lebih kecil) dan intrados (lebih besar).

4.3.3 Pengukuran *Ultrasonic Testing Thickness* Sampel Tube

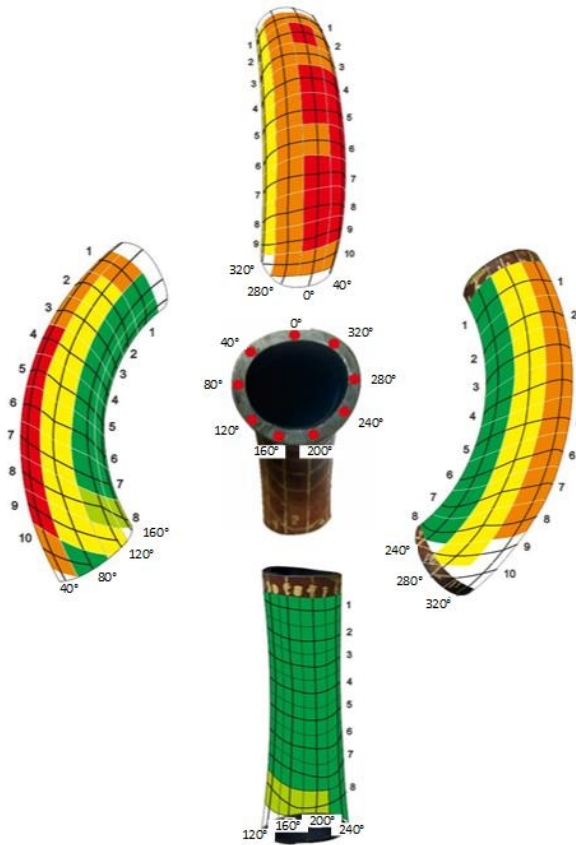
Metode berikutnya dari penelitian ini adalah dengan melaksanakan pengukuran *thickness* menggunakan peralatan *UT Thickness*. Peralatan yang digunakan adalah 38DL+, yang digunakan sebagai perbandingan dengan hasil

pengukuran aktual di *site* yang menggunakan DM5E. Hasil dari pengukuran dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan 4.16 di bawah ini.



No.	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	6.26	6.1	6.18	6.12	5.98	6.08	6.28	6.22
2	6.02	5.99	6.16	6.09	6.03	6.11	6.16	6.09
3	5.63	5.74	6.14	6.42	6.6	6.53	6.11	5.92
4	5.48	5.53	6.06	6.8	7.5	6.95	6.14	5.73
5	5.29	5.53	6.09	6.94	7.76	6.84	6.17	5.73
6	5.47	5.54	6.07	6.67	7.64	6.81	6.14	5.82
7	5.46	5.56	6.06	6.67	7.56	6.92	6.32	5.82
8	5.47	5.56	6.01	6.47	7.01	6.78	6.58	5.75
9	5.38	5.57	5.94	6.09	6.21	6.18	6.47	5.79
10	5.59	5.64	5.88				6.08	5.85
11	5.82	5.8	6.09					6.13
12	6.02	6.09	6.13					6.23

Gambar 4.12 Hasil *UT Thickness* Sampel Uji *Tube Elbow F10 Row 1*



No.	0°	40°	80°	120°	160°	200°	240°	280°	320°
1	5.42	5.45	5.68	6.29	6.66	6.76	6.3	5.9	5.58
2	5.3	5.46	5.8	6.33	6.64	6.71	6.33	5.89	5.63
3	5.42	5.49	5.86	6.31	6.75	6.72	6.28	5.86	5.55
4	5.39	5.35	5.89	6.3	6.73	6.83	6.29	5.9	5.5
5	5.35	5.36	5.86	6.31	6.65	6.73	6.29	5.88	5.56
6	5.4	5.34	5.84	6.29	6.62	6.92	6.35	5.92	5.57
7	5.37	5.3	5.84	6.39	6.48	6.63	6.32	5.93	5.57
8	5.33	5.34	5.87	6.2	6.11	6.06	6.31	5.86	5.53
9	5.36	5.34	5.88	5.92				5.94	5.58
10	5.49	5.47	6.53						5.7

Gambar 4.13 Hasil *UT Thickness* Sampel Uji *Tube Elbow C9 Row 63*

Hasil pengukuran *UT Thickness* menunjukkan bahwa secara konsisten pada area *extrados* mempunyai nilai *thickness* yang paling kecil dan *intrados* yang paling besar. Hasil pengukuran dengan peralatan *UT Thickness* apabila dibandingkan dengan pengukuran *sigmat* menunjukkan perbedaan yang dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

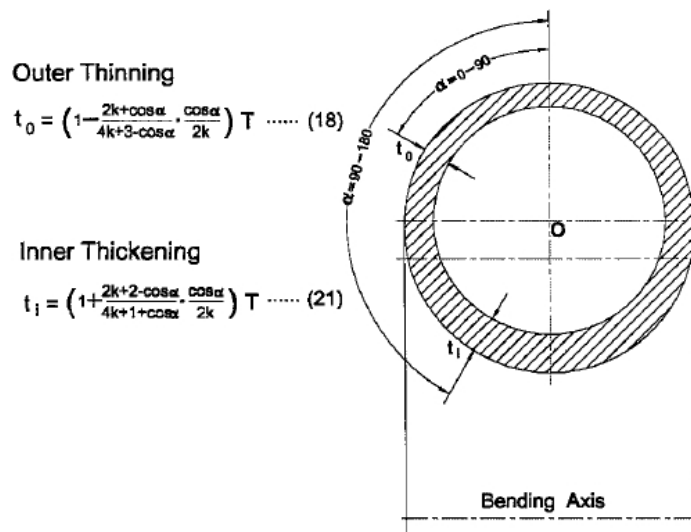
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Pengukuran *Thickness* dan Deviasinya

No.	Lokasi	Posisi Pengukuran	Hasil Pengukuran Thickness (mm)				
			Sigmat	DM5E	Deviasi	38DL+	Deviasi
1	PSH	Kanan	5.98	5.25	12%	5.47	9%
	<i>Elbow</i>	Tengah	5.82	5.2	11%	5.56	4%
	F10	Kiri	6.22	5.1	18%	5.25	16%
	<i>Row 1</i>	Rerata Deviasi			14%		10%
2	PSH	Kanan	5.57	4.88	12%	5.35	4%
	<i>Elbow</i>	Tengah	5.42	4.99	8%	5.36	1%
	<i>C9 Row</i>	Kiri	5.75	5.01	13%	5.56	3%
	63	Rerata Deviasi			11%		3%

Tabel 4.5 di atas menunjukkan deviasi hasil pengukuran terbesar adalah pada pengukuran dengan peralatan DM5E. *UT Thickness* DM5E adalah peralatan yang digunakan untuk mengukur *thickness boiler tube* pada saat *overhaul* di PLTU lokasi riset. Faktor yang mempengaruhi deviasi pengukuran selain perbedaan *probe* antara DM5E dan 38DL+ adalah metode pengambilan pengukuran yaitu di dalam *workshop* dengan di dalam *boiler* yang mempunyai ruang dan akses yang sempit.

4.3.4 Remaining Life (RL) berdasarkan *UT Thickness*

Berdasarkan pada hasil pengukuran *UT Thickness* pada sub sub bab 4.3.3 di atas maka dapat ditentukan *Remaning Life* (RL) dari tube bend tersebut. RL dihitung dari *thickness* awal ketika pemasangan sampai dengan *thickness* yang diukur pada sampel uji dan dihitung sampai dengan mencapai nilai MWT. Skema dan formula deformasi pipa *tube bend* dapat dilihat pada Gambar 4.14 di bawah ini.



Gambar 4.14 Skema dan Formula Deformasi Tube Bend

Berdasarkan formula di atas maka untuk *elbow* F10 row 1 secara rata-rata didapatkan nilai *thickness* 5,87 mm dan *elbow* C9 row 63 5,73 mm. Jam operasi boiler unit 1 semenjak COD 2010 hingga tahun 2019 adalah 76996 jam. *Remaining life* dari masing-masing sampel uji ditunjukkan pada Tabel 4.6 dan 4.7 di bawah ini.

Tabel 4.6 *Remaining Life Elbow* F10 Row 1

No.	Thickness Awal	0°	45°	Erosion Rate /1000 jam (0°)	Erosion Rate /1000 jam (45°)	MWT	RLA (0°) dalam ribu jam	RLA (45°) dalam ribu jam
1	6.2	6.26	6.1	-0.000779	0.0012988	4.6	-2130.223	1154.94
2	6	6.02	5.99	-0.00026	0.0027274	4.6	-5466.716	509.6402
3	5.87	5.63	5.74	0.003117	0.0059743	4.6	330.44117	190.8162
4	5.87	5.48	5.53	0.0050652	0.0087018	4.6	173.73456	106.875
5	5.87	5.29	5.53	0.0075329	0.0087018	4.6	91.59869	106.875
6	5.87	5.47	5.54	0.0051951	0.0085719	4.6	167.4663	109.661
7	5.87	5.46	5.56	0.005325	0.0083121	4.6	161.5038	115.494
8	5.87	5.47	5.56	0.0051951	0.0083121	4.6	167.4663	115.494

9	5.87	5.38	5.57	0.006364	0.0081822	4.6	122.56506	118.5494
10	5.87	5.59	5.64	0.0036366	0.0072731	4.6	272.23586	142.9926
11	5.87	5.82	5.8	0.0006494	0.0051951	4.6	1878.7024	230.988

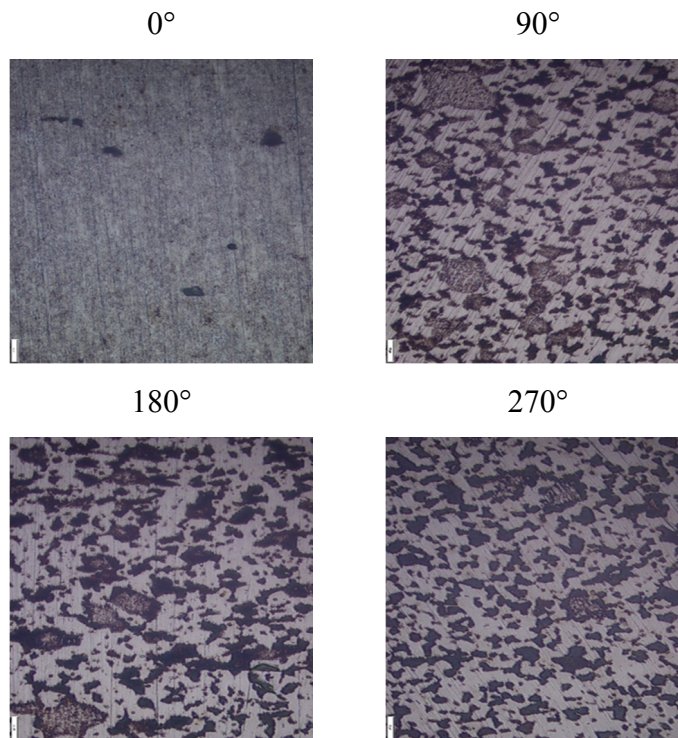
Tabel 4.7 *Remaining Life Elbow C9 Row 63*

No.	Thickness Awal	0°	40°	Erosion Rate /1000 jam (0°)	Erosion Rate /1000 jam (45°)	MWT	RLA (0°) dalam ribu jam	RLA (45°) dalam ribu jam
1	5.73	5.42	5.45	0.0040262	0.0036366	4.6	203.66684	233.7379
2	5.73	5.3	5.46	0.0055847	0.0035067	4.6	125.34233	245.2465
3	5.73	5.42	5.49	0.0040262	0.003117	4.6	203.66684	285.5268
4	5.73	5.39	5.35	0.0044158	0.0049353	4.6	178.90247	151.9658
5	5.73	5.35	5.36	0.0049353	0.0048054	4.6	151.96579	158.1539
6	5.73	5.4	5.34	0.0042859	0.0050652	4.6	186.65697	146.095
7	5.73	5.37	5.3	0.0046756	0.0055847	4.6	164.68589	125.3423
8	5.73	5.33	5.34	0.0051951	0.0050652	4.6	140.5177	146.095
9	5.73	5.36	5.34	0.0048054	0.0050652	4.6	158.15395	146.095
10	5.73	5.49	5.47	0.003117	0.0033768	4.6	285.52683	257.6405

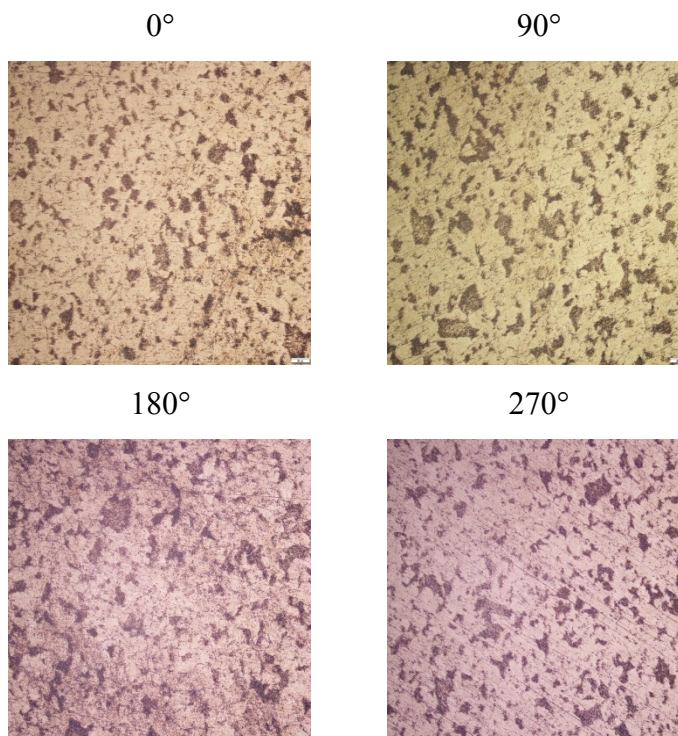
Remaining life dari sampel uji apabila diambil nilai terendah adalah 91.600 jam untuk *elbow* F10 row 1 dan 125.343 jam untuk *elbow* C9 row 63.

4.4 Pengujian Mikroskopis Sampel Uji

Metode pengujian yang dilakukan berikutnya adalah pengujian mikrostruktur pada sampel uji. Pengambilan etsa untuk metalografi dilakukan pada potongan 2 di setiap sampel uji. Hasil dari pengujian metalografi pada potongan *tube elbow* F10 row 1 dan *elbow* C9 row 63 pada perbesaran 200x ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan 4.15 di bawah ini.



Gambar 4.15 Mikrostruktur *Tube Elbow* F10 Row 1 dengan Perbesaran 200x



Gambar 4.16 Mikrostruktur *Tube Elbow* C9 Row 63 dengan Perbesaran 200x

Hasil etsa tersebut kemudian dikomparasi dengan standard ERA *technology* untuk menentukan umur material berdasarkan pembentukan karbida. Pembentukan karbida merupakan ciri utama akibat *thermal aging*, di mana perubahan fasa hanya dipicu oleh faktor suhu saja. Kondisi tersebut akan mengakibatkan penurunan kekuatan material. Diagram klasifikasi berdasarkan standard ERA dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut ini.

FERRITE/PEARLITE & FERRITE/BAINITE BY ERA TECHNOLOGY						
Ferrite/Bainite						
Ferrite/Pearlite						
Class/Stadium	A	B	C	D	E	F
Approx. Damage	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	End Of Life
Approx. Life Remaining	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	None
Nature	No Creep Defect, Ferrite and distinct transformation product	Incipient Spheroidisation and isolated carbide precipitation, notably at grain boundaries	Evident Spheroidisation of transformation product Ferrite and transformation product easily distinguishable	Full Spheroidisation of transformation product. No significant carbide precipitation within ferrite grains	Full Spheroidisation. Carbides evenly dispersed throughout grains and at grain boundaries	Full Spheroidisation. Significant coalescence between carbides
Action	None	Reinspection after Approx. 100,000 service hours	Reinspection after Approx. 50,000 service hours	Reinspection after Approx. 35,000 service hours	Reinspection after Approx. 10,000 service hours	Management must be informed immediately grinding to determine crack depth

Gambar 4.17 Klasifikasi Pembentukan Karbida oleh ERA *Technology*

Citra mikrostruktur *elbow* F10 row 1 dan *elbow* C9 row 63 apabila dibandingkan dengan klasifikasi pembentukan karbida pada Gambar 4.16 di atas maka kondisi sampel uji dapat ditentukan. *Elbow* F10 row 1 menunjukkan citra *ferrite/pearlite* yang sama dengan stadium B pada klasifikasi ERA, yang berarti *remaining life* masih 80% dan diinspeksi kembali setelah 100.000 jam operasi. Sedangkan pada *elbow* C9 row 63 menunjukkan citra *ferrite/pearlite* yang sama dengan stadium C pada klasifikasi ERA, yaitu dengan *remaining life* 60% dan diinspeksi kembali setelah 50.000 jam operasi. Perbedaan umur ini dimungkinkan karena *elbow* C9 berada pada area yang lebih terpapar panas karena sampel diambil

pada *bank 1* (sisi terluar) apabila dibandingkan dengan *elbow F10* yang terletak pada *bank 2* yang terlindungi *bank 1* dan *erosion shield*.

4.5 Perbaikan Prosedur UT *Thickness*

Pengujian pengukuran pada sub bab 4.3 menunjukkan bahwa hasil pengukuran *UT Thickness* untuk peralatan DM5E mempunyai deviasi yang paling besar dengan rerata 14% untuk *elbow F10 row 1* dan 11% untuk *elbow C9 row 63*. Deviasi yang besar ini sangat berpengaruh terhadap pengambilan keputusan unit dalam menentukan perlu atau tidaknya *tube boiler* pada area tersebut diperbaiki atau diganti. Sebagai contoh, MWT *tube primary superheater* dengan material SA-210C adalah sebesar 4,6 mm, apabila ditemukan hasil pengukuran *thickness* adalah 4,4 mm maka sesuai prosedur *tube* tersebut harus diganti. Akan tetapi, dengan temuan deviasi pengukuran sebesar 14% menimbulkan keraguan akan dimensi *thickness tube* yang aktual. *Nominal thickness* yang terbaca adalah 4,4 mm dengan deviasi 14% maka kemungkinan *nominal thickness* aktual adalah 5,016 mm, masih di atas batas MWT 4,6 mm dan mengacu kepada manual boiler, *tube* tersebut tidak perlu diganti.

Perhitungan *Remaining Life* (RL) pada sampel uji menunjukkan nilai yang masih besar (umur masih panjang), yaitu sebesar 91.600 jam *elbow F10 row 1* dan 125.343 jam untuk *elbow C9 row 63*. Selain itu, pengujian mikrostruktur pada sub bab sebelumnya menghasilkan rekomendasi penggantian atau reinspeksi tube setelah 50.000 jam untuk *elbow C9 row 63* dan 100.000 jam untuk *elbow F10 row 1*. *Remaining life* dan periode reinspeksi yang masih lama, menjadi justifikasi bahwa tube tersebut belum perlu diganti. Terdapat 3 justifikasi utama untuk penundaan *repair tube*, yaitu deviasi pengukuran *thickness*, RL yang masih panjang, dan hasil metalografi *tube*.

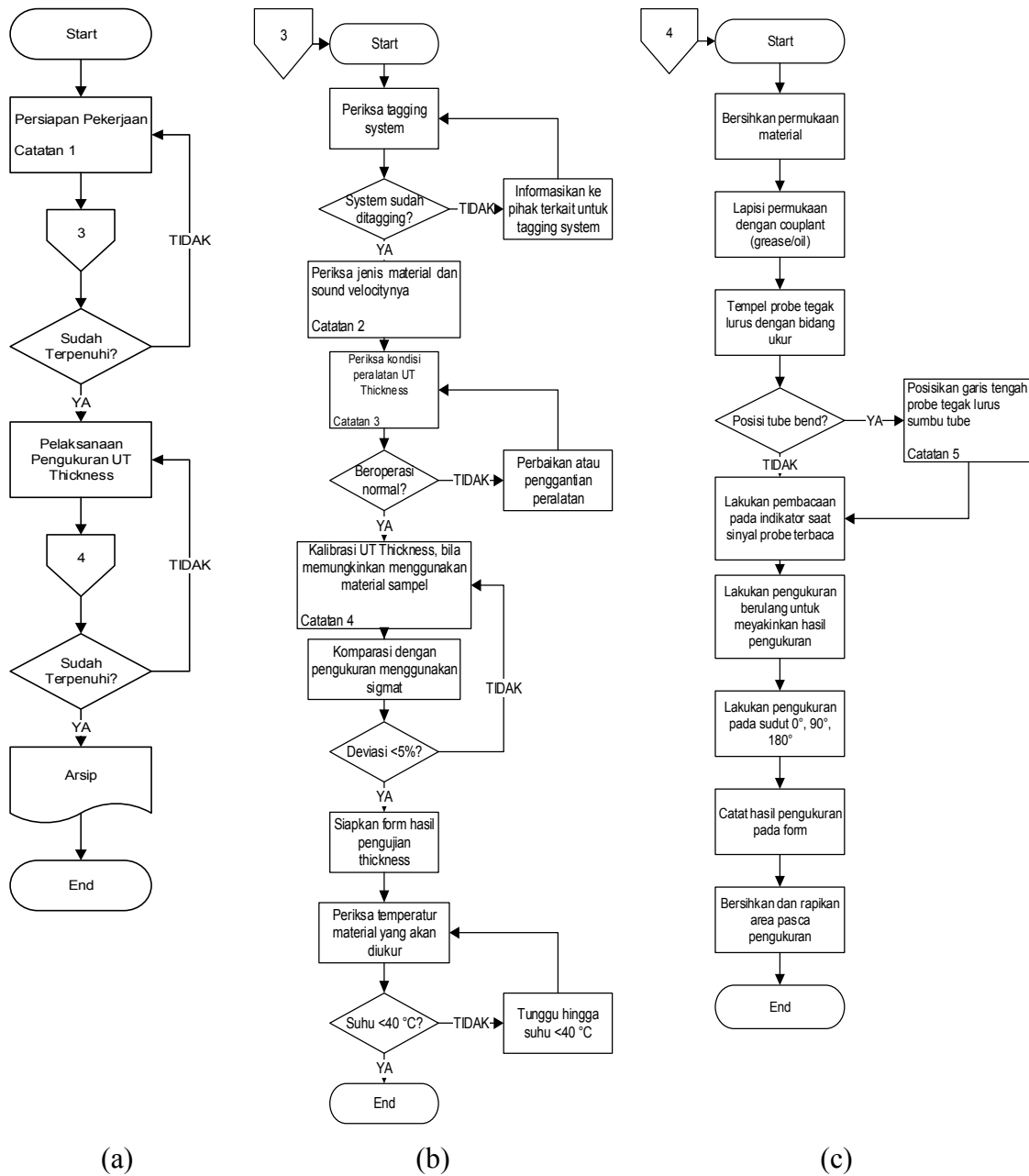
Temuan deviasi yang cukup signifikan ini salah satu penyebab utamanya adalah dari kesalahan pengukuran. Kesalahan pengukuran bisa terjadi karena kurang komprehensifnya prosedur yang digunakan. Prosedur yang digunakan pada saat ini untuk *UT Thickness* dapat dilihat pada Gambar 4.18 di bawah ini.

kemudian dijabarkan ke dalam IP *Integrated Procedure Manual* (IPM) atau bisa disebut dengan Prosedur IP-IMS dan Instruksi Kerja (IK) yang mencakup kegiatan operasional di lingkup PT Indonesia Power dalam pemenuhan dan kesesuaian terhadap standar sistem manajemen yang diadopsi seperti tersebut di atas. Manual IP-IMS ini menjelaskan secara garis besar pemenuhan kesesuaian terhadap standar secara urut berdasarkan urutan yang digunakan dalam PAS 99:2012 *Specification of Common Management System Requirement as a Framework for Integration* atau berupa *guidance*/standar dalam melakukan integrasi terhadap beberapa sistem manajemen, sehingga secara ringkas akan menjelaskan seluruh kegiatan di PT Indonesia Power dalam merespon persyaratan dari sistem manajemen yang diadopsi[22].

Prosedur *UT Thickness* yang sudah ada hendaknya diubah ke dalam format IP-ISM, dengan bentuk *flowchart* dan ditambahkan catatan-catatan dengan mengacu pada format yang lama. Penambahan lain yang diperlukan untuk melengkapi prosedur tersebut adalah:

- a. Metode kalibrasi menggunakan material yang sama dengan material *tube* yang akan diukur *thickness*-nya.
- b. Komparasi hasil pengukuran *UT Thickness* dengan pengukuran sigmat.
- c. Metode pemasangan *probe* pada *tube bend*, garis tengah *probe* harus tegak lurus dengan sumbu pipa.

Flowchart prosedur ditunjukkan pada Gambar 4.19 di bawah ini.



Gambar 4.19 Flowchart (a) Pengukuran *UT Thickness*, (b) Persiapan Pekerjaan, dan (c) Pelaksanaan Pengukuran.

Perubahan format dan penambahan langkah pada prosedur pengukuran *UT thickness* diharapkan dapat meningkatkan kualitas hasil pengukuran. Kualitas hasil pengukuran yang lebih baik berdampak kepada:

- a. Kepercayaan klien (dalam hal ini unit pembangkitan) yang lebih baik terhadap hasil RLA secara keseluruhan.

- b. Sebagai basis yang akurat untuk pengambilan keputusan tindak lanjut temuan, bilamana terdapat pipa *boiler* yang terukur tebal pipanya di bawah MWT.
- c. Sebagai basis yang akurat untuk memprediksi umur atau *lifetime* dari pipa *boiler* dan rencana penggantian atau perbaikannya.

4.6 Mekanisme Penipisan pada Pipa Primary Superheater

Berdasarkan data yang diperoleh pada sub bab 4.3 di atas maka dapat diperoleh hipotesa mengenai mekanisme penipisan pipa. Data UT yang diambil oleh alat 38DL+ menunjukkan pada area *extrados tube bend* mempunyai *thickness* yang paling rendah (berwarna merah). EPRI *Field Guide: Boiler Tube Failure* (2009) menyebutkan bahwa area pada *tube bend* dekat dinding mempunyai potensi paling besar terkena *fly ash erosion* [23]. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Muhajir dkk. (2018) selama 3 tahun periode *overhaul* dengan membandingkan data *thickness straight tube* dan *bend tube superheater* menyimpulkan bahwa *remaining life bend tube* adalah $1/3 \times \textit{straight tube}$ [11].

R.S.E Putro dkk. (2017) dalam penelitian tentang pipa HRSG menyatakan bahwa penipisan pipa paling besar terjadi pada sisi eksternal *extrados tube bend*, pada sisi internal cenderung lebih minimal penipisannya [12]. Pipa *boiler* pada umumnya terpapar temperatur dan laju aliran partikel yang lebih tinggi daripada pipa HRSG. Shida dan Fujikawa (1985) menyimpulkan sudut tumbuk (*impingement angle*) aliran partikel yang berdampak paling besar terhadap erosi pipa adalah pada sudut θ $20^\circ - 30^\circ$ [8]. Apabila melihat konstruksi pipa *primary superheater*, maka yang paling terdampak adalah pada area *tube bend* bukan pada pipa lurus (*straight*), karena sudut tumbuk pada pipa lurus adalah 0° .

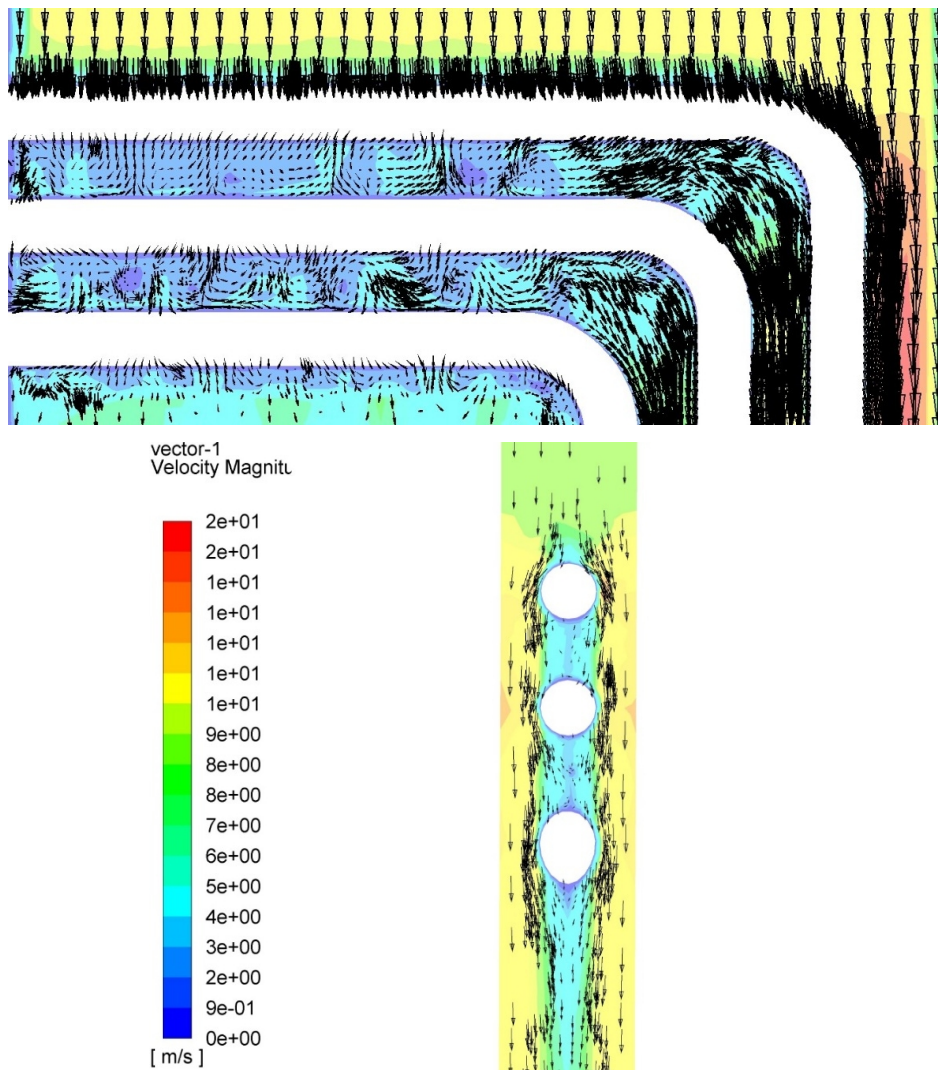
4.6.1 Simulasi Aliran *Flue Gas* pada Area *Primary Superheater*

Metode untuk mengetahui apakah pada area elbow F10 dan C9 terkena aliran flue gas dengan *impingement angle* sebesar $20^\circ - 30^\circ$ adalah dengan simulasi aliran flue gas. Simulasi menggunakan program *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan data-data yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 di bawah ini.

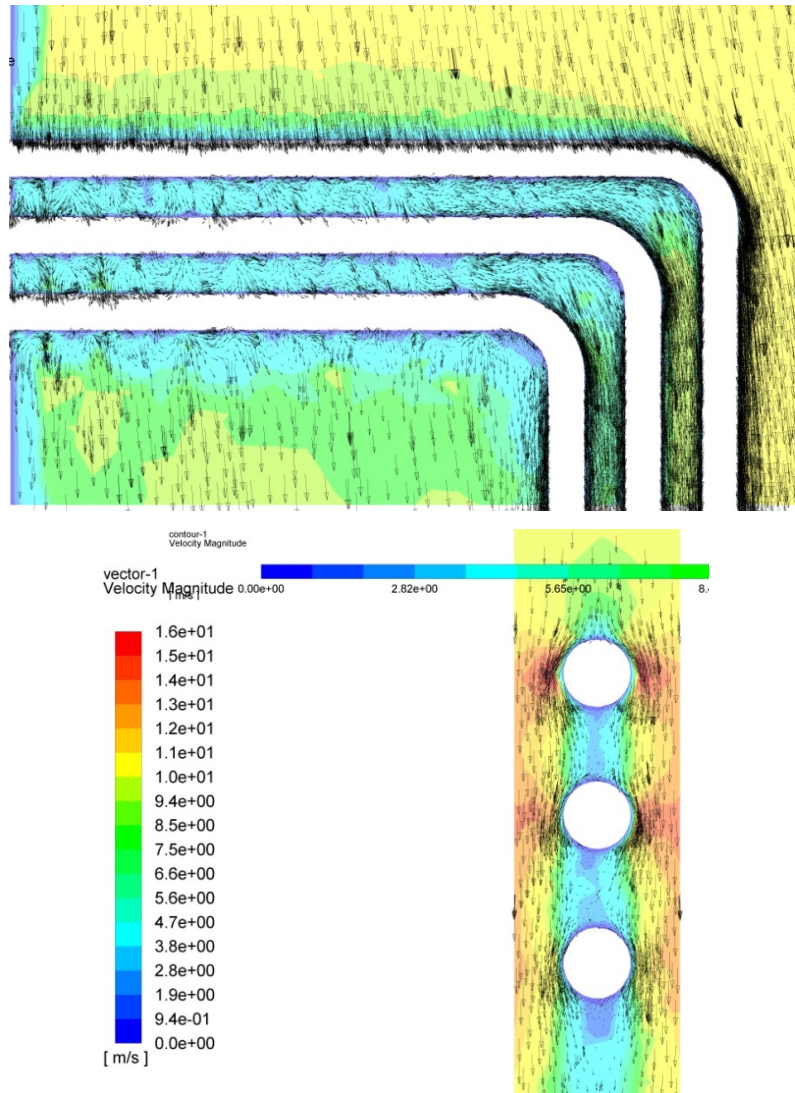
Tabel 4.8 Data Parameter Simulasi CFD

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	<i>Flue gas velocity</i>	10,2	m/s
2	R_e	9.775×10^3	-
3	<i>OD Tube</i>	57	mm
4	<i>Radius bend elbow F10</i>	100	mm
5	<i>Radius bend elbow C9</i>	150	mm

Hasil dari simulasi aliran flue gas berupa vektor dan magnitudo kecepatannya ditunjukkan pada Gambar 4.20 dan 4.21 berikut ini.



Gambar 4.20 Vektor dan Magnitudo Kecepatan Aliran Flue Gas pada Elbow F10



Gambar 4.21 Vektor dan Magnitudo Kecepatan Aliran Flue Gas pada Elbow F10

Citra yang dihasilkan pada Gambar 4.18 dan 4.19 di atas menunjukkan bahwa pada extrados tube bend terkena aliran flue gas dengan sudut $20^\circ - 30^\circ$ dengan kecepatan 10 m/s pada elbow F10 dan 14 m/s pada elbow C9. Hasil simulasi ini mengkonfirmasi bahwa area yang paling terdampak aliran flue gas adalah pada extrados sisi eksternal tube bend.

4.6.2 Pengukuran *Outer Diameter* (OD) Sampel Uji dan *Stock Tube*

Pengujian pertama untuk menentukan bahwa terjadi penipisan pada sisi eksternal tube bend adalah dengan pengukuran OD. OD yang diukur adalah minimum OD tube bend dan OD straight tube. Pengukuran dilakukan sebanyak 3

kali per titik ukur, baik pada sampel uji maupun pada stock tube yang ada di gudang sebagai pembanding. Hasil pengukuran secara rata-rata ditampilkan pada tabel 4.6 berikut.

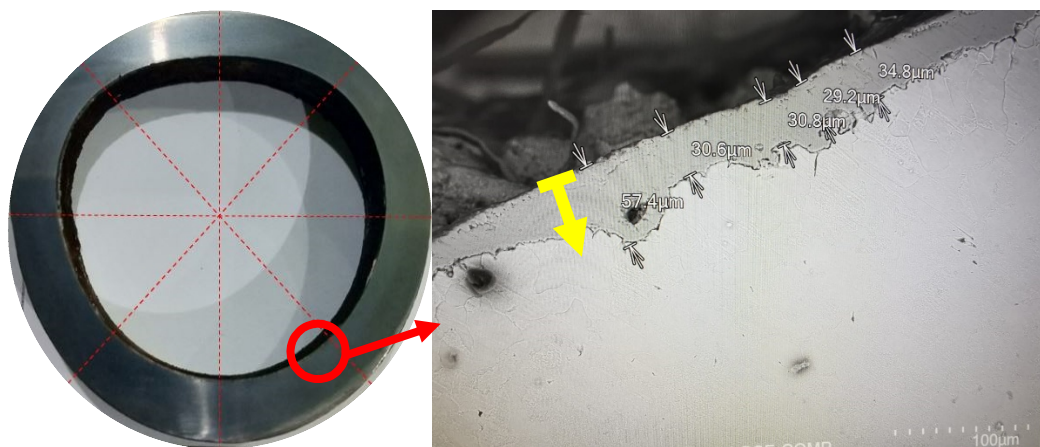
Tabel 4.9 Perbandingan Pengukuran OD pada Sampel Uji dan *Stock Tube*

No.	Nama	Tube	OD <i>stock tube</i> (mm)	OD sampel uji (mm)	Selisih OD (mm)
1	Elbow F10	<i>Bend</i>	n/a	53,45	n/a
		<i>Straight</i>	n/a	57,39	n/a
2	Elbow C9	<i>Bend</i>	53,66	53,3	0,33
		<i>Straight</i>	57,45	57,45	0

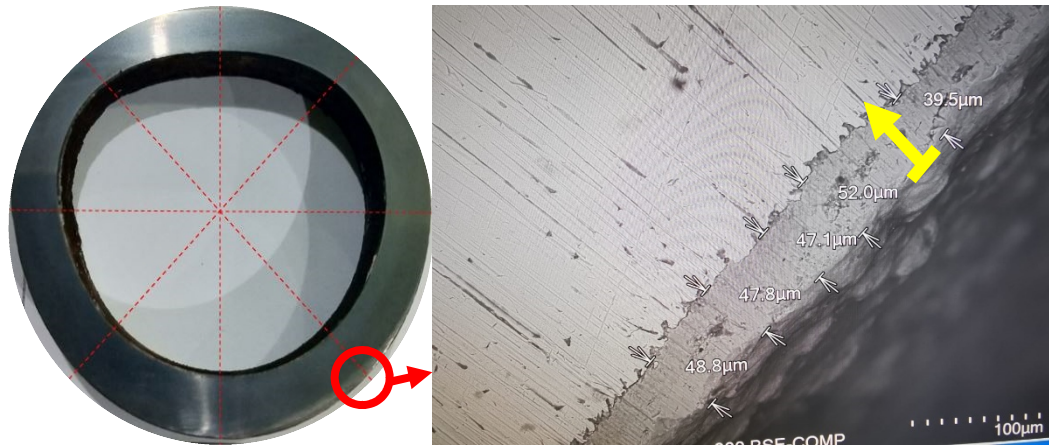
Tabel 4.6 di atas menunjukkan bahwa terjadi pengurangan OD pada tube bend sampel uji apabila dibandingkan dengan stock tube yang ada di gudang. Hasil pengukuran pada straight tube menunjukkan pengurangan yang minimal atau relatif tidak ada. Pengurangan OD pada tube bend ini memperlihatkan bahwa terjadi penipisan pada extrados tube bend selama beroperasinya boiler unit 1.

4.6.3 Pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Metode pengujian berikutnya untuk menentukan mekanisme penipisan *tube* adalah dengan pengujian SEM. Sampel yang diuji SEM adalah *elbow* F10 row 1. Citra SEM ditunjukkan pada Gambar 4.20 dan 4.21 berikut ini.



Gambar 4.22 Citra SEM Sisi Internal *Elbow* F10 Row 1



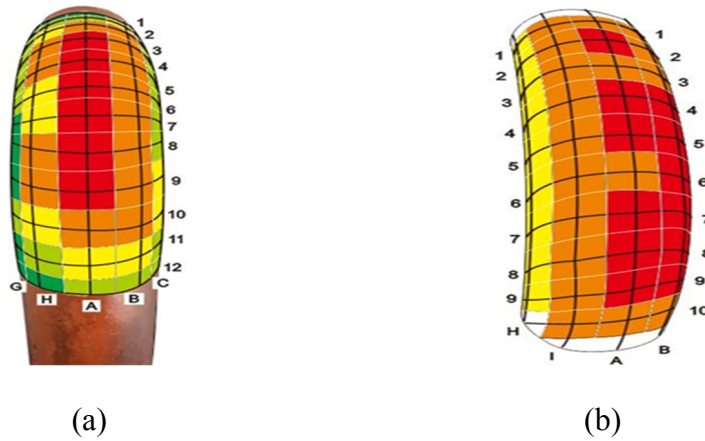
Gambar 4.23 Citra SEM Sisi Eksternal *Elbow* F10 Row 1

Citra SEM pada Gambar 4.20 dan 4.21 di atas menunjukkan lapisan *oxide* baik pada sisi internal maupun eksternal sampel uji. Ketebalan lapisan *oxide* pada sisi eksternal secara lebih besar daripada sisi internal, yaitu rerata 47,04 μm (eksternal) dan 36,56 μm .

Pembentukan *oxide* pada sisi internal mengarah ke luar atau eksternal yang ditunjukkan panah kuning, sementara pada sisi eksternal pembentukan *oxide* mengarah ke dalam atau internal. Lapisan *oxide* pada sisi eksternal ini kemudian tergerus oleh tumbukan aliran *flue gas* yang mengandung *fly ash*. Hal ini mempercepat penipisan terutama pada extrados sisi eksternal *tube bend*.

4.6.4 Analisa Mekanisme Penipisan *Tube Primary Superheater*

Kesimpulan dari penelitian-penelitian tersebut pada awal sub bab 4.3 konsisten dengan hasil pengujian dan simulasi yang dilakukan pada sub sub bab 4.6.1 hingga 4.6.3. Pengujian dan simulasi tersebut juga mengkonfirmasi bahwa penipisan terjadi pada extrados sampel uji yang ditunjukkan dengan warna merah seperti pada Gambar 4.22 di bawah ini.

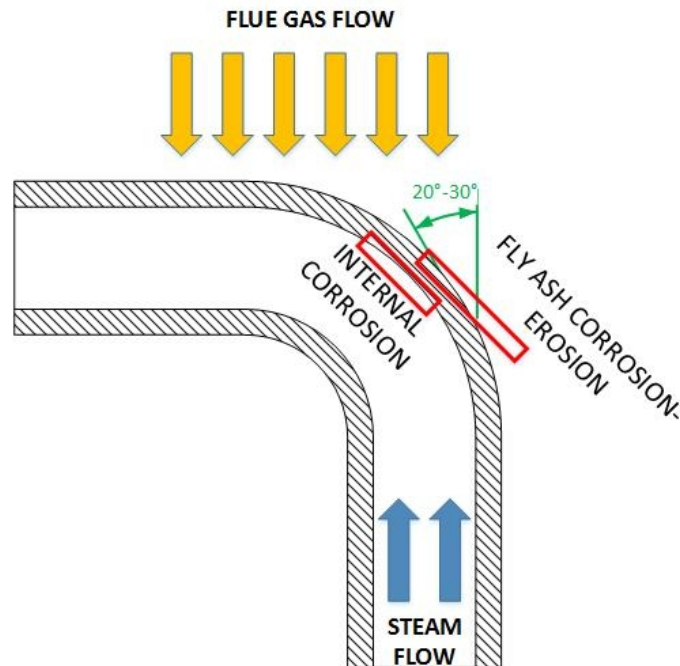


Gambar 4.24 Citra Hasil Pengukuran UT *Thickness* untuk, (a) *Elbow F10 Row 1*, dan (b) *Elbow C9 Row 63*

Mengacu pada 4 (empat) referensi penelitian yang sudah disampaikan dan hasil pengujian sampel uji serta simulasi CFD aliran flue gas, maka mekanisme penipisan *tube primary superheater* pada penelitian ini adalah:

- a. Penipisan dominan terjadi pada extrados sisi eksternal *tube bend*.
- b. Penipisan pipa terjadi karena *fly ash erosion-corrosion*.

Mekanisme penipisan pipa boiler dengan θ adalah *impingement angle* dari aliran partikel dalam flue gas dapat dilihat pada gambar 4.20 berikut ini.



Gambar 4.25 Diagram Mekanisme Penipisan pada *Tube Primary Superheater*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan metode-metode yang sudah dilaksanakan, maka hasil penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Terdapat anomali distribusi data UT *thickness* yang seharusnya kurva distribusi antar periode *overhaul* bergeser dari kanan (*thickness* paling besar) ke kiri (*thickness* paling kecil) tetapi yang terbaca adalah pada tahun 2014 berada pada bagian kurva paling kanan, tahun 2015 pada kurva paling kiri dan tahun 2017 tepat berada di tengah.
2. Prediksi *thickness* menggunakan *erosion rate* linear menghasilkan nilai yang dapat diterima berdasarkan hasil T-test: $P \text{ two-tail} \leq \alpha$ yang berarti tidak ada perbedaan signifikan antara nilai prediksi dan nilai aktual, dan MAPE bernilai $\leq 10\%$ (*excellent*).
3. Hasil pengamatan makroskopis menunjukkan adanya *oxide scale* pada *tube* sampel uji, dengan kuantitas pada *elbow* F10 row 1 lebih besar daripada *elbow* C9 row 63.
4. Hasil perbandingan pengukuran antar UT Thickness Measurement Tool dengan pengukuran sigmat pada potongan 2 masing-masing sampel uji menunjukkan deviasi 14% (DM5E) dan 10% (38DL+) untuk *elbow* F10 row 1, serta 11% (DM5E) dan 3% (38DL+) untuk *elbow* C9 row 63.
5. *Remaining life* berdasarkan hasil UT *thickness* menghasilkan nilai 91.000 jam dengan *erosion rate* 0,0075 mm/1000 jam untuk *elbow* F10 row 1 dan 125.343 jam dengan *erosion rate* 0,0056 mm/1000 jam untuk *elbow* C9 row 63.
6. Pengujian metalografi pada sampel uji memperlihatkan *remaining life* yang berbeda antara 2 jenis *tube* apabila mengacu pada *chart* ERA Technology tentang pembentukan karbida. *Elbow* F10 row 1 mempunyai *remaining life* 80% atau reinspeksi pada 100.000 jam operasi dan *elbow* C9 row 63 mempunyai *remaining life* 60% atau reinspeksi setelah 50.000 jam operasi.

7. Deviasi yang cukup besar untuk tool DM5E disebabkan oleh prosedur pengukuran yang belum komprehensif berdasarkan standard kualitas perusahaan. Oleh karena itu, disusun prosedur baru yang sesuai dengan standard perusahaan dan menambahkan langkah-langkah tertentu supaya meminimalisasi kesalahan pengukuran.
8. Simulasi CFD untuk aliran flue gas menunjukkan bahwa pada tube bend baik elbow F10 maupun C9 terpapar aliran flue gas dengan impingement angle 20° - 30° yang mengakibatkan laju erosi fly ash paling tinggi.
9. Pengukuran OD sampel uji dibandingkan dengan OD stock tube menunjukkan bahwa terjadi pengurangan OD atau semakin tipis.
10. Hasil dari uji SEM memperlihatkan lapisan oxide lebih tebal pada sisi eksterna apabila dibandingkan dengan sisi internal, dan pembentukan lapisan oxide mengarah ke luar untuk sisi internal dan ke dalam untuk sisi eksternal.
11. Mengacu kepada simulasi CFD, pengukuran OD, dan uji SEM dapat disimpulkan bahwa penipisan pipa dominan terjadi pada extrados sisi eksternal pipa yang disebabkan oleh *fly ash erosion-corrosion*.

5.2 Saran

Saran-saran yang dapat diajukan untuk kegiatan penelitian selanjutnya dan metode *Remaining Life Assessment* untuk *tube boiler* adalah sebagai berikut:

1. Hendaknya dilakukan penelitian mengenai laju penipisan pada internal *tube* dan dibandingkan antara sisi *inlet*, *intermediate*, dan *outlet* pada *Primary Superheater*.
2. Juga dilakukan penelitian mengenai mekanisme penipisan pada area lain di luar *Primary Superheater* secara detail.
3. Melakukan *review* dan revisi prosedur *Remaining Life Assessment* (RLA) boiler.
4. Hasil pengukuran *thickness* pada periode *overhaul* setelah perbaikan prosedur dapat dijadikan *baseline* untuk pengukuran *thickness* berikutnya dan untuk perencanaan *repair tube* pada periode *overhaul* selanjutnya.
5. Perbaikan prosedur RLA diharapkan dapat memperbaiki tingkat kepercayaan klien terhadap hasil dan rekomendasi RLA tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhou, Y., Zhao, Y., Chen, T., & Lu, G. (2012). *Analysis of Flue-Gas Side Abrasion in Thermal Power Plant Boiler*. Advanced Materials Research.
- [2] Das, S., Mehrotra, S., Sastry, K., & Dey, P. (2006). *Analytical Model for Erosion Behaviour of Impacted Fly-ash Particles on Coal-fired Boiler Components*. National Metallurgical Laboratory, India.
- [3] Dongfang Boiler Group Co. Ltd. (2008). *96M-SM Labuan Boiler Specification*. Dongfang Electric Co. Ltd.
- [4] Tilley, R., & Worrell, E. (2006). *Boiler Condition Assessment Guideline*. Electric Power Research Institute.
- [5] Port, R., & Herro, H. (1991). *The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis*. McGraw-Hill, Inc.
- [6] P&RO Solutions (2011). *Targeted Boiler Management Overview*. P&RO Solutions.
- [7] Hidayat, R. (2015). *Studi Numerik Karakteristik Aliran Gas-Solid dan Pembakaran Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler 315 MWe dengan Variasi Sudut Tilting dan Nilai Kalor Batubara (Studi Kasus PLTU Pacitan Unit 1)*. Thesis Program Magister Bidang Keahlian Rekayasa Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [8] Shida, Y., & Fujikawa, H. (1985). *Particle Erosion Behaviour of Boiler Tube Materials at Elevated Temperature*. Wear 103 via ScienceDirect.
- [9] Mbabazi, J. G.; Sheer, T. J.; Shandu, R. (2004). *A Model to Predict Erosion on Mild Steel Surfaces Impacted by Boiler Fly Ash Particles*. Wear 257 via ScienceDirect.
- [10] Wahyu, H. (2013). *Computational Analysis of Ash Erosion on Superheater Tubes in Coal Fired Power Plant*. Indonesian Mining Journal.
- [11] Muhajir, H., Haryadi, G. D., & Widodo, A. (2018). *Remaining Life Assessment of Superheater Tube in Boiler of Coal Fired Power Plant*. MATEC Web of Conference 159.

- [12] Putro, R. S. E., Hariyadi, A., & Suwarno (2017). *Failure Analysis of Bend Tube Preheater on Heat Recovery Steam Generator*. The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences.
- [13] Wright, I. G., & Kung, S. C. (2017). *Possible Scenarios For The Causes Of Accelerated Fireside Corrosion Of Superheater Tubes In Coal-fired Boilers*. Materials At High Temperatures.
- [14] Gupta G., & Chattopadhyaya, S. (2017). *Critical Failure Analysis of Superheater Tubes of Coal-Based Boiler*. Journal of Mechanical Engineering via Research Gate.
- [15] Vakhguel, A., Kapayeva, S.D., & Bergander, M. J. (2017). *Combination Non-Destructive Test (NDT) Method for Early Damage Detection and Condition Assessment of Boiler Tubes*. Procedia Engineering via ScienceDirect.
- [16] Yun, H., Moon, S.-J., & Oh, Y.-J. (2016). *Development of Wall-Thinning Evaluation Procedure for Nuclear Power Plant Piping - Part 1: Quantification of Thickness Measurement Deviation*. Nuclear Engineering and Technology.
- [17] Bhowmick, S. (2011). *Ultrasonic Inspection for Wall Thickness Measurement at Thermal Power Stations*. International Journal of Engineering Research and Technology via ResearchGate.
- [18] The Babcock and Wilcox Company (2005). *Steam: Its Generation and Use Edition 41*. The Babcock and Wilcox Company.
- [19] Bruce, P. C. (2015). *Introductory Statistics and Analytics: A Resampling Perspective*. John Wiley and Sons Inc.
- [20] Electric Power Research Institute (EPRI) (1987). *NP-5410, NDE of Ferritic Piping for Erosion/Corrosion*. Electric Power Research Institute.
- [21] Lewis, C.D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods*. Butterworth.
- [22] PT Indonesia Power (2019). *Indonesia Power Integrated System Manual (IP-ISM)*. PT Indonesia Power.
- [23] Electric Power Research Institute (EPRI) (2009). *Field Guide: Boiler Tube Failure*. Electric Power Research Institute.

Lampiran 1 Rekapitulasi Data Thickness, Prediksi, dan Komparasi Prediksi-Aktual (dengan Data 16000 Jam)

A. Elbow F10

No. ROW	KANAN							
	2014	2015	2017	avg-rate / 1000hr	2019-Prediction	2019-Actual	difference	abs. Error
1	5.8	5.03	5.15	0.040625	4.540625	5.25	-13.51%	0.135119
2	5.57	4.7	5.31	0.01625	5.06625	5.1	-0.66%	0.006618
3	5.52	5.12	4.93	0.036875	4.376875	4.88	-10.31%	0.103099
4	5.82	4.88	5.22	0.0375	4.6575	5.19	-10.26%	0.102601
5	5.49	5.25	5.56	-0.00437	5.625625	4.88	15.28%	0.152792
6	5.56	5	5.23	0.020625	4.920625	5.1	-3.52%	0.035172
7	5.16	4.92	5.09	0.004375	5.024375	5.31	-5.38%	0.05379
8	5.23	4.88	5.26	-0.00187	5.288125	4.56	15.97%	0.159677
9	5.49	5.06	5.53	-0.0025	5.5675	5	11.35%	0.1135
10	5.33	4.75	5.21	0.0075	5.0975	4.86	4.89%	0.048868
11	5.34	4.9	5.02	0.02	4.72	4.85	-2.68%	0.026804
12	5.39	5.15	5.21	0.01125	5.04125	5.46	-7.67%	0.076694
13	5.56	4.99	5.49	0.004375	5.424375	4.74	14.44%	0.144383
14	5.27	5.1	5.45	-0.01125	5.61875	4.93	13.97%	0.139706
15	5.36	4.88	5.35	0.000625	5.340625	4.93	8.33%	0.083291
16	5.65	4.75	5.14	0.031875	4.661875	4.81	-3.08%	0.030795
17	5.39	4.93	5.02	0.023125	4.673125	4.98	-6.16%	0.061621
18	5.27	5.04	5.08	0.011875	4.901875	4.72	3.85%	0.038533
19	5.42	5.09	4.88	0.03375	4.37375	4.66	-6.14%	0.061427
20	5.52	5.14	5.32	0.0125	5.1325	4.77	7.60%	0.075996
21	5.26	4.97	5.31	-0.00312	5.356875	5.32	0.69%	0.006931
22	5.37	5.27	5.24	0.008125	5.118125	4.75	7.75%	0.0775
23	5.45	5.02	5.53	-0.005	5.605	4.87	15.09%	0.150924
24	5.66	5.34	5.34	0.02	5.04	5.07	-0.59%	0.005917
25	5.6	4.88	5.52	0.005	5.445	4.91	10.90%	0.108961
26	5.6	5.05	5.39	0.013125	5.193125	4.68	10.96%	0.109642
27	5.34	5.1	5.35	-0.00062	5.359375	4.79	11.89%	0.118867
28	5.33	5.23	4.98	0.021875	4.651875	4.85	-4.09%	0.040851
29	5.51	4.91	5.46	0.003125	5.413125	4.84	11.84%	0.118414
30	5.73	4.99	5.18	0.034375	4.664375	5.26	-11.32%	0.113237
31	5.62	4.99	5.25	0.023125	4.903125	5.32	-7.84%	0.07836
32	5.73	5.07	5.45	0.0175	5.1875	5.02	3.34%	0.033367
33	5.69	4.63	5.23	0.02875	4.79875	5.19	-7.54%	0.075385
34	5.39	4.7	5.32	0.004375	5.254375	4.81	9.24%	0.092386

35	5.74	4.81	5.37	0.023125	5.023125	4.95	1.48%	0.014773
36	5.56	4.92	5.56	0	5.56	4.75	17.05%	0.170526
37	5.82	4.98	5.35	0.029375	4.909375	5.04	-2.59%	0.025918
38	5.75	4.81	5.2	0.034375	4.684375	5.03	-6.87%	0.068713
39	5.5	5.11	5.3	0.0125	5.1125	4.94	3.49%	0.034919
40	5.28	4.9	5.3	-0.00125	5.31875	4.74	12.21%	0.122099
41	5.74	5.06	5.08	0.04125	4.46125	5.12	-12.87%	0.128662
42	5.5	5.2	5.38	0.0075	5.2675	4.76	10.66%	0.106618
43	5.56	4.96	5.45	0.006875	5.346875	5.18	3.22%	0.032215
44	5.51	5.19	5.33	0.01125	5.16125	5.23	-1.31%	0.013145
45	5.67	5.04	5.15	0.0325	4.6625	5.18	-9.99%	0.099903
46	5.6	5.14	5.37	0.014375	5.154375	4.76	8.29%	0.082852
47	5.43	5.22	5.23	0.0125	5.0425	4.9	2.91%	0.029082
48	5.76	4.93	5.49	0.016875	5.236875	5.03	4.11%	0.041128
49	5.38	5.18	5.5	-0.0075	5.6125	4.95	13.38%	0.133838
50	5.62	5.04	5.48	0.00875	5.34875	5.38	-0.58%	0.005809
51	5.35	5.28	5.43	-0.005	5.505	4.9	12.35%	0.123469
52	5.88	5.07	5.68	0.0125	5.4925	5.17	6.24%	0.062379
53	5.24	5.24	5.38	-0.00875	5.51125	4.82	14.34%	0.143413
54	5.35	5.2	5.12	0.014375	4.904375	4.93	-0.52%	0.005198
55	5.79	4.75	5.21	0.03625	4.66625	5.16	-9.57%	0.095688
56	5.45	5.08	5.57	-0.0075	5.6825	5	13.65%	0.1365
57	5.66	5.56	5.38	0.0175	5.1175	5.12	-0.05%	0.000488
58	5.5	5.24	5.08	0.02625	4.68625	4.81	-2.57%	0.025728
59	5.68	4.81	5.12	0.035	4.595	5.43	-15.38%	0.153775
60	5.83	4.96	5.5	0.020625	5.190625	5.31	-2.25%	0.022481
61	5.72	5.18	5.27	0.028125	4.848125	5.08	-4.56%	0.045645
62	5.45	4.88	5.2	0.015625	4.965625	4.88	1.75%	0.017546
63	5.7	4.88	5.3	0.025	4.925	5.01	-1.70%	0.016966
64	5.66	4.63	5.49	0.010625	5.330625	5.16	3.31%	0.033067
65	5.44	4.98	5.05	0.024375	4.684375	4.75	-1.38%	0.013816
66	5.41	4.95	5.09	0.02	4.79	5.02	-4.58%	0.045817
67	5.36	4.86	5.49	-0.00812	5.611875	4.93	13.83%	0.138311
68	5.46	5.16	5.24	0.01375	5.03375	5.03	0.07%	0.000746
69	5.47	5	5.38	0.005625	5.295625	5.14	3.03%	0.030277
70	5.35	5.11	5.37	-0.00125	5.38875	4.84	11.34%	0.113378
71	5.41	4.8	5.31	0.00625	5.21625	5.01	4.12%	0.041168
72	5.46	5.06	5.4	0.00375	5.34375	4.96	7.74%	0.077369
73	5.51	5.15	5.38	0.008125	5.258125	5	5.16%	0.051625
74	5.41	4.98	5.42	-0.00062	5.429375	5.09	6.67%	0.066675
75	5.58	5.02	5.46	0.0075	5.3475	4.88	9.58%	0.095799
76	5.41	5.08	5.15	0.01625	4.90625	5.01	-2.07%	0.020709

77	5.24	5.06	5.48	-0.015	5.705	4.96	15.02%	0.150202	
78	5.32	4.8	5.55	-0.01438	5.765625	4.96	16.24%	0.162424	
79	5.36	5.04	5.54	-0.01125	5.70875	4.82	18.44%	0.184388	
80	5.22	5.29	5.38	-0.01	5.53	4.64	19.18%	0.19181	
81	5.93	5.17	5.54	0.024375	5.174375	5.01	3.28%	0.032809	
82	5.18	5.3	5.46	-0.0175	5.7225	4.8	19.22%	0.192188	
83	5.43	5.12	5.48	-0.00313	5.526875	4.83	14.43%	0.144281	
84	5.33	5.41	4.92	0.025625	4.535625	5.06	-10.36%	0.103631	
85	5.51	4.99	5.29	0.01375	5.08375	5.22	-2.61%	0.026102	
86	5.26	5.22	5.39	-0.00812	5.511875	4.91	12.26%	0.122581	
87	5.33	4.78	5.32	0.000625	5.310625	4.85	9.50%	0.094974	
88	5.37	5.05	5.35	0.00125	5.33125	4.7	13.43%	0.134309	
89	5.5	5.12	5.32	0.01125	5.15125	5.11	0.81%	0.008072	
90	5.29	5.43	5.58	-0.01813	5.851875	4.96	17.98%	0.179814	
91	5.31	4.83	5.48	-0.01063	5.639375	5.12	10.14%	0.10144	
92	5.36	4.73	5.28	0.005	5.205	4.83	7.76%	0.07764	
93	5.75	5.08	5.01	0.04625	4.31625	5.13	-15.86%	0.158626	
94	5.31	5.12	5.02	0.018125	4.748125	4.55	4.35%	0.043544	
95	5.5	4.83	5.44	0.00375	5.38375	4.9	9.87%	0.098724	
96	5.35	5.12	5.48	-0.00813	5.601875	4.91	14.09%	0.140911	
97	5.48	4.8	5.27	0.013125	5.073125	4.67	8.63%	0.086322	
98	5.41	5	5.47	-0.00375	5.52625	4.78	15.61%	0.156119	
99	5.61	5.1	5.09	0.0325	4.6025	5.16	-10.80%	0.108043	
100	5.58	4.92	5.43	0.009375	5.289375	5.02	5.37%	0.05366	
101	5.4	4.84	5.35	0.003125	5.303125	4.88	8.67%	0.086706	
102	5.2	4.85	5.29	-0.00562	5.374375	4.67	15.08%	0.15083	
103	5.46	4.95	5.32	0.00875	5.18875	4.8	8.10%	0.08099	
104	5.78	4.83	5.11	0.041875	4.481875	5.26	-14.79%	0.147933	
105	5.63	4.86	5.51	0.0075	5.3975	5	7.95%	0.0795	
106	5.21	5.06	5.28	-0.00438	5.345625	4.94	8.21%	0.08211	
107	5.46	4.83	5.11	0.021875	4.781875	4.78	0.04%	0.000392	
108	5.57	5.06	5.07	0.03125	4.60125	5.27	-12.69%	0.126898	
109	5.55	5.06	5.59	-0.0025	5.6275	4.99	12.78%	0.127756	
110	5.29	5.01	5.28	0.000625	5.270625	4.97	6.05%	0.060488	
111	5.37	5.43	5.18	0.011875	5.001875	5.09	-1.73%	0.017313	
112	5.64	5.14	5.52	0.0075	5.4075	4.99	8.37%	0.083667	
5.49								9.266658	
								MAPE	8.273802

No. ROW	TENGAH							
	2014	2015	2017	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	differenc e	abs. Error
1	5.57	4.94	5.02	0.034375	4.504375	5.2	-13.38%	0.133774
2	5.45	4.71	5.25	0.0125	5.0625	4.94	2.48%	0.024798
3	5.40	5.11	4.94	0.02875	4.50875	4.9	-7.98%	0.079847
4	5.50	4.91	5.19	0.019375	4.899375	5.06	-3.17%	0.031744
5	5.19	5.22	5.30	-0.00687	5.403125	4.8	12.57%	0.125651
6	5.33	4.89	5.07	0.01625	4.82625	5.02	-3.86%	0.038596
7	5.57	4.83	4.94	0.039375	4.349375	5.18	-16.04%	0.160352
8	4.84	5.00	5.20	-0.0225	5.5375	4.53	22.24%	0.222406
9	5.17	5.10	5.24	-0.00438	5.305625	4.85	9.39%	0.093943
10	5.14	4.79	5.14	0	5.14	4.91	4.68%	0.046843
11	5.11	4.83	5.08	0.001875	5.051875	4.93	2.47%	0.024721
12	5.21	4.82	4.88	0.020625	4.570625	5.41	-15.52%	0.155152
13	5.13	4.87	5.23	-0.00625	5.32375	4.55	17.01%	0.170055
14	4.90	5.06	5.32	-0.02625	5.71375	4.91	16.37%	0.163697
15	5.17	4.96	5.26	-0.00562	5.344375	4.8	11.34%	0.113411
16	5.15	4.76	4.89	0.01625	4.64625	4.74	-1.98%	0.019778
17	5.35	4.85	5.02	0.020625	4.710625	4.95	-4.84%	0.048359
18	4.97	4.80	5.08	-0.00688	5.183125	4.73	9.58%	0.095798
19	4.94	4.75	4.89	0.003125	4.843125	4.49	7.86%	0.078647
20	5.27	5.06	5.38	-0.00688	5.483125	4.86	12.82%	0.128215
21	4.94	5.02	5.09	-0.00937	5.230625	5.17	1.17%	0.011726
22	5.06	4.96	5.16	-0.00625	5.25375	4.95	6.14%	0.061364
23	5.17	4.95	5.35	-0.01125	5.51875	4.85	13.79%	0.137887
24	5.37	5.14	5.37	0	5.37	4.94	8.70%	0.087045
25	5.24	4.66	5.23	0.000625	5.220625	4.92	6.11%	0.061103
26	5.21	4.83	5.34	-0.00812	5.461875	4.79	14.03%	0.140266
27	5.07	4.68	4.96	0.006875	4.856875	4.8	1.18%	0.011849
28	5.63	5.19	5.61	0.00125	5.59125	4.92	13.64%	0.136433
29	5.27	5.11	5.58	-0.01938	5.870625	4.94	18.84%	0.188386
30	5.48	4.83	5.71	-0.01438	5.925625	5.29	12.02%	0.120156
31	5.38	4.91	4.99	0.024375	4.624375	5.12	-9.68%	0.096802
32	5.31	5.11	5.31	0	5.31	5.06	4.94%	0.049407
33	5.50	4.66	5.22	0.0175	4.9575	5.19	-4.48%	0.044798
34	5.05	4.75	5.02	0.001875	4.991875	4.88	2.29%	0.022925
35	5.28	5.01	5.38	-0.00625	5.47375	4.88	12.17%	0.12167
36	5.17	4.90	5.40	-0.01438	5.615625	4.8	16.99%	0.169922
37	5.40	4.98	5.13	0.016875	4.876875	5.14	-5.12%	0.051192
38	5.29	5.04	5.12	0.010625	4.960625	5.14	-3.49%	0.034898

39	5.16	4.97	5.05	0.006875	4.946875	4.98	-0.67%	0.006652
40	5.10	4.92	5.05	0.003125	5.003125	4.88	2.52%	0.025231
41	5.29	4.92	5.14	0.009375	4.999375	5.2	-3.86%	0.038582
42	5.13	4.99	5.49	-0.0225	5.8275	4.74	22.94%	0.22943
43	5.48	4.93	5.42	0.00375	5.36375	5.19	3.35%	0.033478
44	5.29	5.08	5.92	-0.03938	6.510625	5.33	22.15%	0.221506
45	5.45	4.98	5.03	0.02625	4.63625	5.35	-13.34%	0.133411
46	5.16	5.08	5.18	-0.00125	5.19875	4.8	8.31%	0.083073
47	5.32	5.07	5.10	0.01375	4.89375	4.71	3.90%	0.039013
48	5.29	5.01	5.32	-0.00188	5.348125	4.86	10.04%	0.100437
49	4.90	4.95	5.20	-0.01875	5.48125	5.06	8.33%	0.083251
50	5.23	5.05	5.11	0.0075	4.9975	5.2	-3.89%	0.038942
51	5.04	5.07	5.24	-0.0125	5.4275	4.76	14.02%	0.140231
52	5.45	5.09	5.56	-0.00687	5.663125	5.19	9.12%	0.091161
53	5.09	5.22	5.48	-0.02438	5.845625	4.92	18.81%	0.188135
54	5.07	5.28	5.06	0.000625	5.050625	4.84	4.35%	0.043518
55	5.47	4.70	5.03	0.0275	4.6175	5.25	-12.05%	0.120476
56	5.30	4.90	5.26	0.0025	5.2225	5.05	3.42%	0.034158
57	5.25	5.16	5.37	-0.0075	5.4825	4.99	9.87%	0.098697
58	4.97	5.28	5.08	-0.00688	5.183125	4.82	7.53%	0.075337
59	5.57	4.77	4.95	0.03875	4.36875	5.34	-18.19%	0.181882
60	5.65	5.07	5.36	0.018125	5.088125	5.44	-6.47%	0.064683
61	5.48	5.37	5.02	0.02875	4.58875	5.12	-10.38%	0.10376
62	5.23	4.83	5.12	0.006875	5.016875	4.85	3.44%	0.034407
63	5.37	4.96	5.22	0.009375	5.079375	4.94	2.82%	0.028214
64	5.35	4.56	5.48	-0.00813	5.601875	4.85	15.50%	0.155026
65	5.01	4.87	5.46	-0.02813	5.881875	4.66	26.22%	0.262205
66	5.23	4.92	5.02	0.013125	4.823125	4.93	-2.17%	0.021678
67	5.19	4.72	5.35	-0.01	5.5	5.27	4.36%	0.043643
68	5.24	5.27	5.15	0.005625	5.065625	4.89	3.59%	0.035915
69	5.33	5.02	5.30	0.001875	5.271875	5.15	2.37%	0.023665
70	5.11	5.11	5.02	0.005625	4.935625	4.74	4.13%	0.041271
71	5.26	4.68	5.24	0.00125	5.22125	5.22	0.02%	0.000239
72	5.32	5.00	5.11	0.013125	4.913125	5.01	-1.93%	0.019336
73	5.35	4.94	5.22	0.008125	5.098125	5.16	-1.20%	0.011991
74	5.20	4.77	5.26	-0.00375	5.31625	4.95	7.40%	0.07399
75	5.15	4.91	5.27	-0.0075	5.3825	4.91	9.62%	0.096232
76	5.31	4.95	5.02	0.018125	4.748125	4.92	-3.49%	0.034934
77	5.13	5.12	5.24	-0.00688	5.343125	4.9	9.04%	0.090434
78	5.15	4.81	5.04	0.006875	4.936875	4.9	0.75%	0.007526
79	5.06	4.67	5.30	-0.015	5.525	4.78	15.59%	0.155858
80	4.93	5.07	5.28	-0.02188	5.608125	4.59	22.18%	0.221814

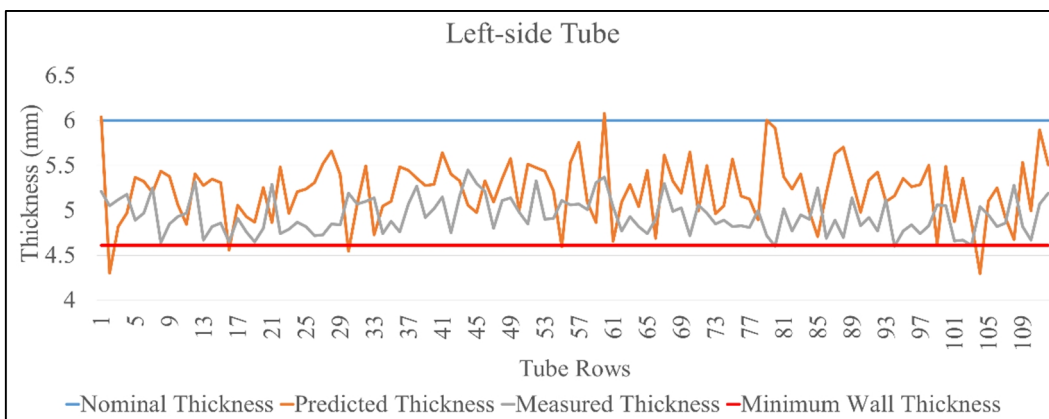
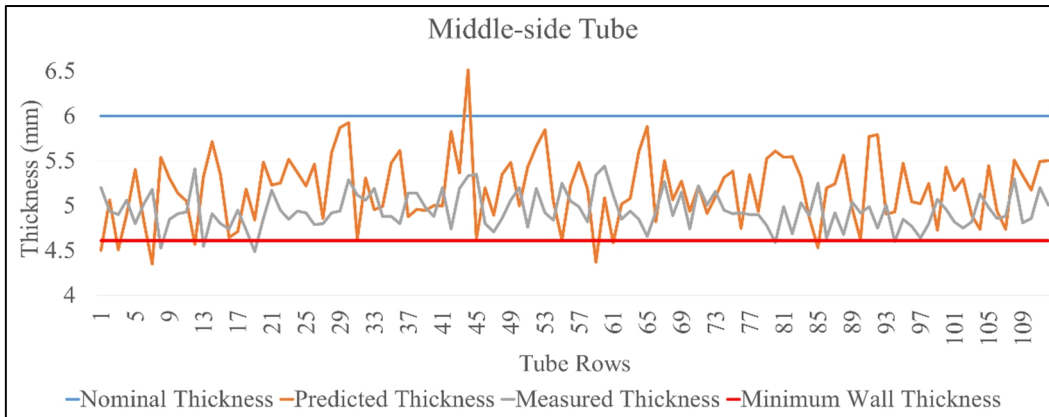
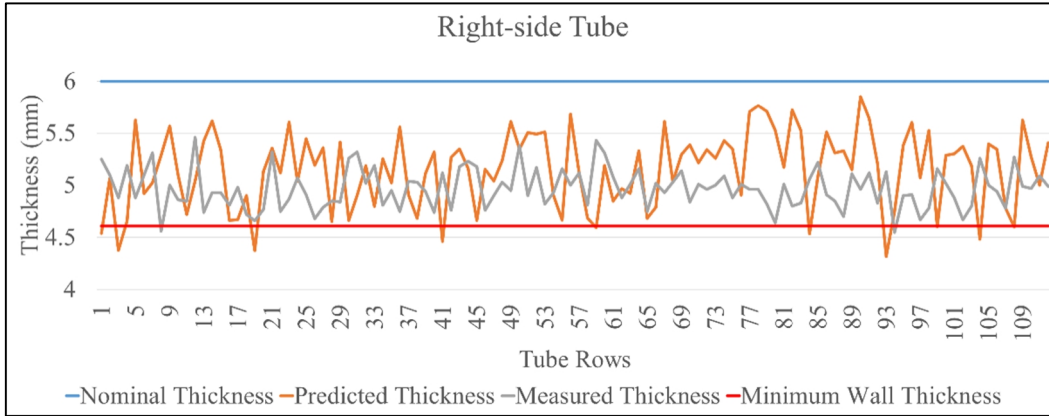
81	5.27	5.08	5.41	-0.00875	5.54125	4.99	11.05%	0.110471
82	5.08	4.98	5.32	-0.015	5.545	4.69	18.23%	0.182303
83	5.26	5.01	5.29	-0.00188	5.318125	5.03	5.73%	0.057281
84	5.16	5.15	5.01	0.009375	4.869375	4.89	-0.42%	0.004218
85	5.50	4.82	5.00	0.03125	4.53125	5.25	-13.69%	0.136905
86	5.10	4.68	5.15	-0.00313	5.196875	4.64	12.00%	0.120016
87	5.05	4.75	5.15	-0.00625	5.24375	4.92	6.58%	0.065803
88	5.04	4.96	5.31	-0.01688	5.563125	4.68	18.87%	0.188702
89	5.28	4.94	5.12	0.01	4.97	5.04	-1.39%	0.013889
90	5.24	4.86	4.92	0.02	4.62	4.92	-6.10%	0.060976
91	5.21	4.74	5.50	-0.01813	5.771875	4.99	15.67%	0.156688
92	5.21	4.58	5.51	-0.01875	5.79125	4.75	21.92%	0.219211
93	5.45	4.95	5.17	0.0175	4.9075	5.01	-2.05%	0.020459
94	4.95	4.66	4.94	0.000625	4.930625	4.6	7.19%	0.071875
95	5.16	4.73	5.32	-0.01	5.47	4.85	12.78%	0.127835
96	5.18	5.04	5.11	0.004375	5.044375	4.77	5.75%	0.057521
97	5.08	4.83	5.05	0.001875	5.021875	4.64	8.23%	0.082301
98	5.15	4.90	5.20	-0.00312	5.246875	4.8	9.31%	0.093099
99	5.31	4.57	5.01	0.01875	4.72875	5.07	-6.73%	0.067308
100	5.37	4.88	5.40	-0.00188	5.428125	4.96	9.44%	0.09438
101	5.07	4.89	5.12	-0.00312	5.166875	4.82	7.20%	0.071966
102	4.95	4.75	5.13	-0.01125	5.29875	4.75	11.55%	0.115526
103	5.05	4.92	4.97	0.005	4.895	4.82	1.56%	0.01556
104	5.32	4.77	5.02	0.01875	4.73875	5.13	-7.63%	0.076267
105	5.33	4.64	5.39	-0.00375	5.44625	4.98	9.36%	0.093624
106	5.21	5.11	5.07	0.00875	4.93875	4.86	1.62%	0.016204
107	5.24	5.00	4.98	0.01625	4.73625	4.88	-2.95%	0.029457
108	5.39	4.72	5.45	-0.00375	5.50625	5.3	3.89%	0.038915
109	5.26	5.11	5.30	-0.0025	5.3375	4.81	10.97%	0.109667
110	5.06	4.92	5.12	-0.00375	5.17625	4.86	6.51%	0.065072
111	4.97	5.27	5.24	-0.01688	5.493125	5.2	5.64%	0.05637
112	5.25	5.13	5.38	-0.00812	5.501875	5.01	9.82%	0.098179
								9.755084
						MAPE		8.709896

No. ROW	KIRI							
	2014	2015	2017	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.75	4.96	5.9	-0.00938	6.040625	5.21	15.94%	0.159429
2	5.91	4.57	5.08	0.051875	4.301875	5.05	-14.81%	0.148144
3	5.44	4.954	5.12	0.02	4.82	5.12	-5.86%	0.058594
4	5.59	5	5.27	0.02	4.97	5.18	-4.05%	0.040541
5	5.27	5.24	5.32	-0.00313	5.366875	4.89	9.75%	0.09752
6	5.34	4.76	5.33	0.000625	5.320625	4.97	7.05%	0.070548
7	5.49	4.81	5.34	0.009375	5.199375	5.25	-0.96%	0.009643
8	5.03	5.04	5.24	-0.01313	5.436875	4.64	17.17%	0.17174
9	5.32	5.12	5.35	-0.00187	5.378125	4.85	10.89%	0.108892
10	5.49	4.85	5.27	0.01375	5.06375	4.93	2.71%	0.02713
11	5.31	4.85	5.07	0.015	4.845	4.97	-2.52%	0.025151
12	5.27	4.85	5.34	-0.00438	5.405625	5.32	1.61%	0.016095
13	5.43	4.85	5.35	0.005	5.275	4.67	12.96%	0.12955
14	5.27	5.04	5.31	-0.0025	5.3475	4.82	10.94%	0.10944
15	5.31	4.89	5.31	0	5.31	4.86	9.26%	0.092593
16	5.43	4.85	4.98	0.028125	4.558125	4.65	-1.98%	0.019758
17	5.58	5.02	5.31	0.016875	5.056875	4.91	2.99%	0.029913
18	5.22	4.81	5.07	0.009375	4.929375	4.76	3.56%	0.035583
19	5.16	4.64	5.01	0.009375	4.869375	4.65	4.72%	0.047177
20	5.37	5.02	5.31	0.00375	5.25375	4.8	9.45%	0.094531
21	5.06	5.02	4.96	0.00625	4.86625	5.29	-8.01%	0.080104
22	5.25	4.89	5.37	-0.0075	5.4825	4.74	15.66%	0.156646
23	5.53	5	5.24	0.018125	4.968125	4.79	3.72%	0.037187
24	5.5	5.22	5.35	0.009375	5.209375	4.87	6.97%	0.069687
25	5.43	4.98	5.33	0.00625	5.23625	4.82	8.64%	0.086359
26	5.25	4.8	5.28	-0.00188	5.308125	4.72	12.46%	0.124603
27	5.13	4.72	5.33	-0.0125	5.5175	4.73	16.65%	0.16649
28	5.43	5.25	5.55	-0.0075	5.6625	4.85	16.75%	0.167526
29	5.36	5.1	5.38	-0.00125	5.39875	4.84	11.54%	0.115444
30	5.61	4.87	5.06	0.034375	4.544375	5.19	-12.44%	0.124398
31	5.61	4.73	5.33	0.0175	5.0675	5.07	-0.05%	0.000493
32	5.36	5.06	5.43	-0.00437	5.495625	5.1	7.76%	0.077574
33	5.58	4.92	5.14	0.0275	4.7275	5.14	-8.03%	0.080253
34	5.32	4.95	5.18	0.00875	5.04875	4.74	6.51%	0.065137
35	5.37	4.97	5.23	0.00875	5.09875	4.88	4.48%	0.044826
36	5.37	4.97	5.43	-0.00375	5.48625	4.76	15.26%	0.152574
37	5.35	4.99	5.4	-0.00313	5.446875	5.07	7.43%	0.074334
38	5.57	5.12	5.46	0.006875	5.356875	5.27	1.65%	0.016485

39	5.2	5.07	5.24	-0.0025	5.2775	4.92	7.27%	0.072663
40	5.23	5.01	5.26	-0.00187	5.288125	5.02	5.34%	0.053411
41	5.33	4.89	5.49	-0.01	5.64	5.15	9.51%	0.095146
42	5.23	4.91	5.32	-0.00562	5.404375	4.75	13.78%	0.137763
43	5.6	4.89	5.46	0.00875	5.32875	5.16	3.27%	0.032703
44	5.56	5.15	5.3	0.01625	5.05625	5.45	-7.22%	0.072248
45	5.83	5.07	5.39	0.0275	4.9775	5.3	-6.08%	0.060849
46	5.25	5.16	5.29	-0.0025	5.3275	5.21	2.26%	0.022553
47	5.25	4.93	5.17	0.005	5.095	4.8	6.15%	0.061458
48	5.49	4.97	5.42	0.004375	5.354375	5.11	4.78%	0.047823
49	5.11	4.91	5.35	-0.015	5.575	5.14	8.46%	0.08463
50	5.39	5.07	5.19	0.0125	5.0025	4.98	0.45%	0.004518
51	5.36	5.07	5.44	-0.005	5.515	4.85	13.71%	0.137113
52	5.59	5.13	5.53	0.00375	5.47375	5.33	2.70%	0.02697
53	5.59	5.27	5.51	0.005	5.435	4.9	10.92%	0.109184
54	5.49	5.1	5.35	0.00875	5.21875	4.91	6.29%	0.062882
55	5.68	4.69	5.12	0.035	4.595	5.11	-10.08%	0.100783
56	5.63	5.08	5.58	0.003125	5.533125	5.06	9.35%	0.093503
57	5.33	5.03	5.55	-0.01375	5.75625	5.07	13.54%	0.135355
58	5.28	5.1	5.18	0.00625	5.08625	5.01	1.52%	0.01522
59	5.68	4.83	5.26	0.02625	4.86625	5.31	-8.36%	0.083569
60	5.77	5.04	5.93	-0.01	6.08	5.37	13.22%	0.132216
61	5.53	5.29	5.08	0.028125	4.658125	5.04	-7.58%	0.075769
62	5.48	4.69	5.28	0.0125	5.0925	4.77	6.76%	0.06761
63	5.44	5.14	5.36	0.005	5.285	4.93	7.20%	0.072008
64	5.39	4.66	5.21	0.01125	5.04125	4.82	4.59%	0.045902
65	5.33	5.05	5.39	-0.00375	5.44625	4.74	14.90%	0.148998
66	5.56	4.99	5.11	0.028125	4.688125	4.9	-4.32%	0.04324
67	5.52	4.84	5.57	-0.00313	5.616875	5.3	5.98%	0.059788
68	5.48	5.35	5.4	0.005	5.325	4.99	6.71%	0.067134
69	5.58	5.21	5.38	0.0125	5.1925	5.03	3.23%	0.032306
70	5.28	5.08	5.47	-0.01188	5.648125	4.72	19.66%	0.196637
71	5.67	4.75	5.32	0.021875	4.991875	5.06	-1.35%	0.013463
72	5.44	5.16	5.47	-0.00187	5.498125	4.97	10.63%	0.106263
73	5.41	4.96	5.18	0.014375	4.964375	4.85	2.36%	0.023582
74	5.44	4.83	5.24	0.0125	5.0525	4.89	3.32%	0.033231
75	5.24	5.12	5.41	-0.01063	5.569375	4.82	15.55%	0.155472
76	5.39	5.05	5.27	0.0075	5.1575	4.83	6.78%	0.067805
77	5.32	4.94	5.22	0.00625	5.12625	4.81	6.57%	0.065748
78	5.38	4.92	5.13	0.015625	4.895625	5	-2.09%	0.020875
79	5.19	4.78	5.61	-0.02625	6.00375	4.72	27.20%	0.271981
80	5.12	5.01	5.53	-0.02563	5.914375	4.6	28.57%	0.285734

81	5.16	5.17	5.27	-0.00687	5.373125	5.02	7.03%	0.070344	
82	5.49	4.96	5.36	0.008125	5.238125	4.77	9.81%	0.098139	
83	5.25	5.09	5.33	-0.005	5.405	4.95	9.19%	0.091919	
84	5.51	5.23	5.24	0.016875	4.986875	4.9	1.77%	0.01773	
85	5.64	4.88	5.16	0.03	4.71	5.25	-10.29%	0.102857	
86	5.35	4.75	5.27	0.005	5.195	4.69	10.77%	0.107676	
87	5.26	4.95	5.45	-0.01188	5.628125	4.89	15.09%	0.150946	
88	5.24	4.99	5.48	-0.015	5.705	4.7	21.38%	0.21383	
89	5.54	5.01	5.44	0.00625	5.34625	5.14	4.01%	0.040126	
90	5.31	4.96	5.14	0.010625	4.980625	4.83	3.12%	0.031185	
91	5.53	4.71	5.43	0.00625	5.33625	4.92	8.46%	0.084604	
92	5.31	4.74	5.37	-0.00375	5.42625	4.77	13.76%	0.137579	
93	5.35	4.88	5.22	0.008125	5.098125	5.12	-0.43%	0.004272	
94	5.22	4.67	5.19	0.001875	5.161875	4.6	12.21%	0.122147	
95	5.2	4.65	5.28	-0.005	5.355	4.77	12.26%	0.122642	
96	5.4	5	5.33	0.004375	5.264375	4.84	8.77%	0.087681	
97	5.15	5.02	5.22	-0.00437	5.285625	4.74	11.51%	0.115111	
98	5.21	4.95	5.36	-0.00938	5.500625	4.83	13.88%	0.138846	
99	5.55	4.62	5.07	0.03	4.62	5.06	-8.70%	0.086957	
100	5.41	4.77	5.45	-0.0025	5.4875	5.05	8.66%	0.086634	
101	5.36	4.52	5.11	0.015625	4.875625	4.66	4.63%	0.046271	
102	5.28	4.81	5.32	-0.0025	5.3575	4.67	14.72%	0.147216	
103	5.22	4.8	5.04	0.01125	4.87125	4.61	5.67%	0.05667	
104	5.46	4.86	4.86	0.0375	4.2975	5.04	-14.73%	0.147321	
105	5.47	4.83	5.28	0.011875	5.101875	4.95	3.07%	0.030682	
106	5.29	4.98	5.27	0.00125	5.25125	4.82	8.95%	0.089471	
107	5.56	5.13	5.23	0.020625	4.920625	4.86	1.25%	0.012474	
108	5.53	4.8	5.09	0.0275	4.6775	5.28	-11.41%	0.11411	
109	5.3	5.15	5.42	-0.0075	5.5325	4.82	14.78%	0.147822	
110	5.15	4.91	5.07	0.005	4.995	4.67	6.96%	0.069593	
111	5.1	4.91	5.51	-0.02563	5.894375	5.07	16.26%	0.162599	
112	5.47	5.22	5.49	-0.00125	5.50875	5.19	6.14%	0.061416	
5.40								9.625066	
								MAPE	8.593809

B. Kurva Prediksi vs Aktual Elbow F10



C. Elbow C9

No. ROW	KANAN							
	2014	2015	2017	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.68	5.17	5.67	0.000625	5.660625	4.94	14.59%	0.145876
2	5.64	5.54	5.39	0.015625	5.155625	5.13	0.50%	0.004995
3	5.81	5.15	5.29	0.0325	4.8025	5.33	-9.90%	0.098968
4	5.64	5.21	5.37	0.016875	5.116875	4.98	2.75%	0.027485
5	5.25	5.42	5.52	-0.01688	5.773125	5.3	8.93%	0.089269
6	5.62	5.06	5.47	0.009375	5.329375	4.93	8.10%	0.081009
7	5.72	5.29	5.56	0.01	5.41	5.17	4.64%	0.046422
8	5.68	5.17	5.23	0.028125	4.808125	5.02	-4.22%	0.042206
9	5.79	5.17	5.49	0.01875	5.20875	5.64	-7.65%	0.076463
10	5.96	5.17	5.42	0.03375	4.91375	5.54	-11.30%	0.113042
11	5.63	4.98	5.4	0.014375	5.184375	5.33	-2.73%	0.027322
12	5.97	5.11	5.47	0.03125	5.00125	5.21	-4.01%	0.040067
13	5.92	5.29	5.59	0.020625	5.280625	5.63	-6.21%	0.062056
14	5.72	5.42	5.48	0.015	5.255	5.22	0.67%	0.006705
15	5.9	5.31	5.38	0.0325	4.8925	5.38	-9.06%	0.090613
16	5.73	5.26	5.64	0.005625	5.555625	5.24	6.02%	0.060234
17	5.22	5.1	5.36	-0.00875	5.49125	4.91	11.84%	0.118381
18	5.85	5.2	5.41	0.0275	4.9975	5.31	-5.89%	0.058851
19	5.82	5.02	5.46	0.0225	5.1225	5.24	-2.24%	0.022424
20	5.92	5.59	5.26	0.04125	4.64125	5.41	-14.21%	0.142098
21	5.49	5.56	5.43	0.00375	5.37375	5.07	5.99%	0.059911
22	5.67	5.05	5.19	0.03	4.74	5.09	-6.88%	0.068762
23	5.72	5.17	5.44	0.0175	5.1775	4.69	10.39%	0.103945
24	5.63	5.29	5.63	0	5.63	4.88	15.37%	0.153689
25	5.8	4.93	5.42	0.02375	5.06375	5.09	-0.52%	0.005157
26	5.65	5.17	5.74	-0.00562	5.824375	5.28	10.31%	0.103101
27	5.81	4.81	5.54	0.016875	5.286875	5.16	2.46%	0.024588
28	5.66	5.42	5.35	0.019375	5.059375	4.99	1.39%	0.013903
29	5.71	5.45	5.23	0.03	4.78	5.08	-5.91%	0.059055
30	5.89	5.22	5.36	0.033125	4.863125	5.26	-7.55%	0.075452
31	5.7	5.17	5.39	0.019375	5.099375	5.25	-2.87%	0.02869
32	5.72	4.81	5.33	0.024375	4.964375	5.17	-3.98%	0.039773
33	5.53	5.11	5.31	0.01375	5.10375	5	2.07%	0.02075
34	6.02	5.05	5.65	0.023125	5.303125	5.35	-0.88%	0.008762
35	5.76	5.19	5.59	0.010625	5.430625	5.25	3.44%	0.034405
36	5.63	5.16	5.49	0.00875	5.35875	5.06	5.90%	0.059042
37	5.51	5.06	5.37	0.00875	5.23875	5.2	0.75%	0.007452

38	6.02	5.44	5.42	0.0375	4.8575	5.36	-9.38%	0.09375
39	5.78	5.29	5.54	0.015	5.315	5.41	-1.76%	0.01756
40	5.85	5.42	5.51	0.02125	5.19125	5.17	0.41%	0.00411
41	5.45	5.31	5.45	0	5.45	5.23	4.21%	0.042065
42	5.81	5.42	5.65	0.01	5.5	5.32	3.38%	0.033835
43	5.53	5.27	5.43	0.00625	5.33625	5.04	5.88%	0.05878
44	5.55	5.17	5.42	0.008125	5.298125	4.92	7.69%	0.076855
45	5.62	5.19	5.41	0.013125	5.213125	5.25	-0.70%	0.007024
46	5.32	5.23	5.44	-0.0075	5.5525	4.91	13.09%	0.130855
47	5.79	5.21	5.6	0.011875	5.421875	5.17	4.87%	0.048719
48	5.62	5.25	5.65	-0.00188	5.678125	5.18	9.62%	0.096163
49	5.8	5.16	5.38	0.02625	4.98625	5.07	-1.65%	0.016519
50	5.28	5.29	5.31	-0.00187	5.338125	4.75	12.38%	0.123816
51	5.36	5.1	5.18	0.01125	5.01125	4.94	1.44%	0.014423
52	5.42	5.29	5.27	0.009375	5.129375	4.85	5.76%	0.057603
53	5.78	5.66	5.32	0.02875	4.88875	4.77	2.49%	0.024895
54	5.6	5.57	5.51	0.005625	5.425625	4.75	14.22%	0.142237
55	5.52	4.29	5.44	0.005	5.365	4.96	8.17%	0.081653
56	5.85	5.08	5.46	0.024375	5.094375	5.11	-0.31%	0.003058
57	5.6	5.54	5.6	0	5.6	4.94	13.36%	0.133603
58	5.28	5.19	5.29	-0.00062	5.299375	5.13	3.30%	0.033017
59	5.62	4.89	5.34	0.0175	5.0775	5.24	-3.10%	0.031011
60	5.5	5.11	5.32	0.01125	5.15125	4.95	4.07%	0.040657
61	5.51	5.42	5.25	0.01625	5.00625	4.98	0.53%	0.005271
62	5.31	5.31	5.27	0.0025	5.2325	4.82	8.56%	0.085581
63	5.58	5.29	5.27	0.019375	4.979375	5.01	-0.61%	0.006113
64	5.47	5.2	5.58	-0.00688	5.683125	5.22	8.87%	0.088721
65	5.89	5.554	5.56	0.020625	5.250625	5.26	-0.18%	0.001782
66	5.84	5.11	5.48	0.0225	5.1425	5.19	-0.92%	0.009152
67	5.56	4.93	5.27	0.018125	4.998125	4.95	0.97%	0.009722
68	5.73	5.29	5.48	0.015625	5.245625	4.97	5.55%	0.055458
69	5.5	5.16	5.35	0.009375	5.209375	4.99	4.40%	0.043963
70	5.74	5.54	5.31	0.026875	4.906875	5.16	-4.91%	0.049055
71	5.9	5.02	5.43	0.029375	4.989375	5.35	-6.74%	0.067407
72	5.84	5.14	5.24	0.0375	4.6775	5.29	-11.58%	0.115784
73	5.79	5.23	5.39	0.025	5.015	5.22	-3.93%	0.039272
74	5.75	5.16	5.18	0.035625	4.645625	5.14	-9.62%	0.096182
75	5.73	5.23	5.42	0.019375	5.129375	5.13	-0.01%	0.000122
76	5.58	5.09	5.37	0.013125	5.173125	5.23	-1.09%	0.010875
77	5.52	5.25	5.5	0.00125	5.48125	5.34	2.65%	0.026451
78	5.55	5.15	5.36	0.011875	5.181875	5.37	-3.50%	0.035033
79	5.67	5.11	5.39	0.0175	5.1275	5.27	-2.70%	0.02704

80	5.62	5.26	5.22	0.025	4.845	5.02	-3.49%	0.034861
81	5.36	5.17	5.13	0.014375	4.914375	5.05	-2.69%	0.026856
82	5.74	5.23	5.14	0.0375	4.5775	5.07	-9.71%	0.09714
83	5.43	5.42	5.33	0.00625	5.23625	5.01	4.52%	0.04516
84	5.37	5.05	5.33	0.0025	5.2925	5.1	3.77%	0.037745
85	5.85	5.28	5.23	0.03875	4.64875	5.39	-13.75%	0.137523
86	5.87	5.27	5.2	0.041875	4.571875	5.31	-13.90%	0.139007
87	5.96	5.17	5.3	0.04125	4.68125	5.27	-11.17%	0.111717
88	5.55	5.28	5.13	0.02625	4.73625	5.07	-6.58%	0.065828
89	5.96	5.54	5.2	0.0475	4.4875	5.29	-15.17%	0.151701
90	5.51	5.43	5.14	0.023125	4.793125	4.94	-2.97%	0.029732
91	5.69	5.45	5.12	0.035625	4.585625	4.77	-3.87%	0.038653
92	5.7	5.04	5.21	0.030625	4.750625	4.9	-3.05%	0.030485
93	5.82	5.31	5.4	0.02625	5.00625	4.99	0.33%	0.003257
94	5.76	4.93	5.34	0.02625	4.94625	5.01	-1.27%	0.012725
95	5.82	4.95	5.38	0.0275	4.9675	4.92	0.97%	0.009654
96	5.81	5.29	5.07	0.04625	4.37625	5.03	-13.00%	0.12997
97	5.86	5.19	5.55	0.019375	5.259375	5.21	0.95%	0.009477
98	5.77	5.21	5.67	0.00625	5.57625	5.36	4.03%	0.040345
99	5.78	4.92	5.39	0.024375	5.024375	5.14	-2.25%	0.022495
100	5.66	5.21	5.44	0.01375	5.23375	5.21	0.46%	0.004559
101	5.76	5.11	5.51	0.015625	5.275625	5.12	3.04%	0.030396
102	5.91	4.97	5.25	0.04125	4.63125	5.3	-12.62%	0.126179
103	5.56	5.17	5.65	-0.00563	5.734375	5.13	11.78%	0.117812
104	5.81	4.81	5.37	0.0275	4.9575	5.26	-5.75%	0.05751
105	5.63	5.29	5.27	0.0225	4.9325	4.82	2.33%	0.02334
106	5.89	5.05	5.49	0.025	5.115	5.28	-3.12%	0.03125
107	5.77	5.14	5.3	0.029375	4.859375	4.99	-2.62%	0.026177
108	5.6	5.26	5.73	-0.00813	5.851875	5.24	11.68%	0.11677
109	5.43	5.14	5.38	0.003125	5.333125	5.02	6.24%	0.062375
110	5.56	5.17	5.67	-0.00688	5.773125	5.04	14.55%	0.145461
111	5.38	5.42	5.56	-0.01125	5.72875	5.01	14.35%	0.143463
112	5.66	5.18	5.39	0.016875	5.136875	5.12	0.33%	0.003296
								6.36903
							MAPE	5.686634

No. ROW	TENGAH							
	2014	2015	2017	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.39	5.63	5.52	-0.00812	5.641875	4.93	14.44%	0.144397
2	5.62	4.93	5.25	0.023125	4.903125	5.16	-4.98%	0.049782
3	5.92	5.04	5.36	0.035	4.835	5.28	-8.43%	0.08428
4	5.63	5.03	5.38	0.015625	5.145625	5	2.91%	0.029125
5	6.11	5.42	5.32	0.049375	4.579375	5.33	-14.08%	0.14083
6	5.47	4.92	5.40	0.004375	5.334375	4.91	8.64%	0.086431
7	5.40	5.76	5.52	-0.0075	5.6325	5.11	10.23%	0.10225
8	5.60	5.05	5.19	0.025625	4.805625	4.99	-3.69%	0.036949
9	5.81	5.23	5.41	0.025	5.035	5.81	-13.34%	0.133391
10	5.62	4.81	5.36	0.01625	5.11625	5.3	-3.47%	0.03467
11	5.67	5.05	5.52	0.009375	5.379375	5.39	-0.20%	0.001971
12	5.71	4.93	5.42	0.018125	5.148125	5.26	-2.13%	0.021269
13	5.53	5.15	5.33	0.0125	5.1425	5.49	-6.33%	0.063297
14	5.75	5.15	5.28	0.029375	4.839375	5.32	-9.03%	0.090343
15	5.87	5.20	5.33	0.03375	4.82375	5.55	-13.09%	0.130856
16	5.84	4.81	5.54	0.01875	5.25875	5.36	-1.89%	0.01889
17	5.14	5.03	5.31	-0.01063	5.469375	4.97	10.05%	0.100478
18	5.83	4.93	5.15	0.0425	4.5125	5.24	-13.88%	0.138836
19	5.79	4.89	5.26	0.033125	4.763125	5.37	-11.30%	0.113012
20	5.72	5.20	5.12	0.0375	4.5575	5.31	-14.17%	0.141714
21	5.41	5.17	5.26	0.009375	5.119375	5.12	-0.01%	0.000122
22	5.36	5.17	5.07	0.018125	4.798125	4.86	-1.27%	0.012731
23	5.48	5.12	5.51	-0.00187	5.538125	4.7	17.83%	0.178324
24	5.50	5.22	5.61	-0.00688	5.713125	4.87	17.31%	0.173126
25	5.65	4.82	5.30	0.021875	4.971875	5.1	-2.51%	0.025123
26	5.74	4.92	5.55	0.011875	5.371875	5.28	1.74%	0.017401
27	5.60	4.93	5.40	0.0125	5.2125	5.28	-1.28%	0.012784
28	5.51	5.29	5.46	0.003125	5.413125	5.06	6.98%	0.069788
29	5.42	5.27	5.17	0.015625	4.935625	5.1	-3.22%	0.03223
30	5.89	5.05	5.36	0.033125	4.863125	5.28	-7.90%	0.078954
31	5.81	4.95	5.43	0.02375	5.07375	5.16	-1.67%	0.016715
32	5.65	4.85	5.30	0.021875	4.971875	5.17	-3.83%	0.038322
33	5.34	4.94	5.23	0.006875	5.126875	5.07	1.12%	0.011218
34	5.64	4.81	5.49	0.009375	5.349375	5.34	0.18%	0.001756
35	5.65	5.05	5.43	0.01375	5.22375	5.3	-1.44%	0.014387
36	5.72	5.05	5.39	0.020625	5.080625	5.11	-0.57%	0.005749
37	5.53	5.05	5.38	0.009375	5.239375	5.19	0.95%	0.009513
38	5.62	4.93	5.32	0.01875	5.03875	5.32	-5.29%	0.052867

39	5.58	5.25	5.25	0.020625	4.940625	5.35	-7.65%	0.076519
40	5.44	5.15	5.41	0.001875	5.381875	5.22	3.10%	0.031011
41	5.65	5.20	5.37	0.0175	5.1075	5.13	-0.44%	0.004386
42	5.95	5.10	5.51	0.0275	5.0975	5.3	-3.82%	0.038208
43	5.55	5.25	5.37	0.01125	5.20125	5.09	2.19%	0.021857
44	5.33	5.29	5.31	0.00125	5.29125	4.89	8.21%	0.082055
45	5.55	5.21	5.49	0.00375	5.43375	5.35	1.57%	0.015654
46	5.31	5.05	5.34	-0.00188	5.368125	4.96	8.23%	0.082283
47	5.45	5.08	5.39	0.00375	5.33375	5.18	2.97%	0.029681
48	5.63	5.04	5.62	0.000625	5.610625	5.19	8.10%	0.081045
49	5.46	5.03	5.37	0.005625	5.285625	5.06	4.46%	0.04459
50	5.25	5.17	5.32	-0.00438	5.385625	4.71	14.34%	0.143445
51	5.23	5.05	5.03	0.0125	4.8425	4.89	-0.97%	0.009714
52	5.27	5.42	5.19	0.005	5.115	4.85	5.46%	0.054639
53	5.33	5.42	5.16	0.010625	5.000625	4.78	4.62%	0.046156
54	5.53	5.42	5.46	0.004375	5.394375	4.76	13.33%	0.133272
55	5.58	5.04	5.44	0.00875	5.30875	4.97	6.82%	0.068159
56	5.70	5.19	5.41	0.018125	5.138125	5.15	-0.23%	0.002306
57	5.50	5.43	5.45	0.003125	5.403125	5	8.06%	0.080625
58	5.02	5.29	5.26	-0.015	5.485	5.21	5.28%	0.052783
59	5.57	4.93	5.24	0.020625	4.930625	5.22	-5.54%	0.055436
60	5.55	5.05	5.15	0.025	4.775	4.91	-2.75%	0.027495
61	5.37	5.54	5.44	-0.00438	5.505625	4.91	12.13%	0.121309
62	5.15	4.81	5.12	0.001875	5.091875	4.74	7.42%	0.074235
63	5.33	5.08	5.40	-0.00438	5.465625	4.99	9.53%	0.095316
64	5.50	4.78	5.34	0.01	5.19	5.11	1.57%	0.015656
65	5.90	5.43	5.52	0.02375	5.16375	5.27	-2.02%	0.020161
66	5.76	5.09	5.32	0.0275	4.9075	5.2	-5.62%	0.05625
67	5.44	5.05	5.30	0.00875	5.16875	5.04	2.55%	0.025546
68	5.66	5.42	5.33	0.020625	5.020625	5.02	0.01%	0.000125
69	5.40	5.11	5.16	0.015	4.935	4.91	0.51%	0.005092
70	5.34	5.29	5.05	0.018125	4.778125	5.15	-7.22%	0.072209
71	5.87	4.89	5.55	0.02	5.25	5.32	-1.32%	0.013158
72	5.58	5.02	5.17	0.025625	4.785625	5.28	-9.36%	0.093632
73	5.92	5.08	5.29	0.039375	4.699375	5.32	-11.67%	0.116659
74	5.64	4.99	5.15	0.030625	4.690625	5.06	-7.30%	0.072999
75	5.59	5.17	5.47	0.0075	5.3575	5.16	3.83%	0.038275
76	5.37	5.06	5.28	0.005625	5.195625	5.06	2.68%	0.026803
77	5.79	5.28	5.22	0.035625	4.685625	5.3	-11.59%	0.11592
78	5.61	5.06	5.20	0.025625	4.815625	5.24	-8.10%	0.080988
79	5.85	4.91	5.30	0.034375	4.784375	5.3	-9.73%	0.097288
80	5.29	5.29	5.02	0.016875	4.766875	4.96	-3.89%	0.038936

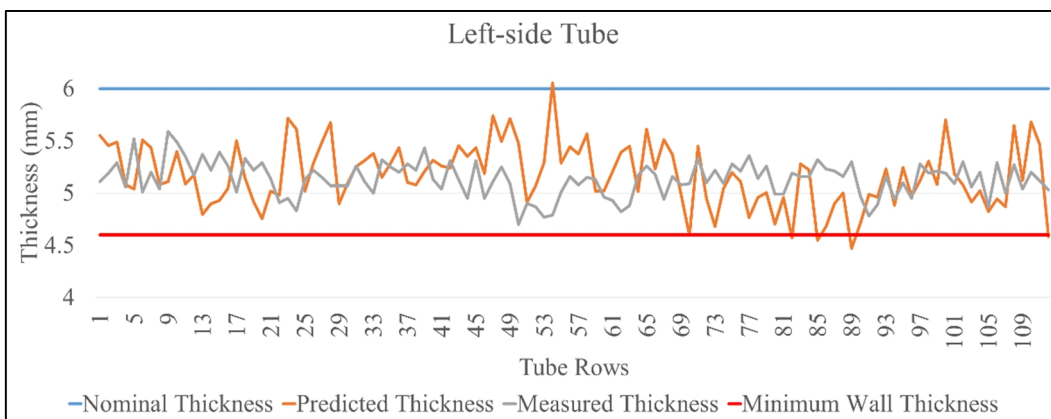
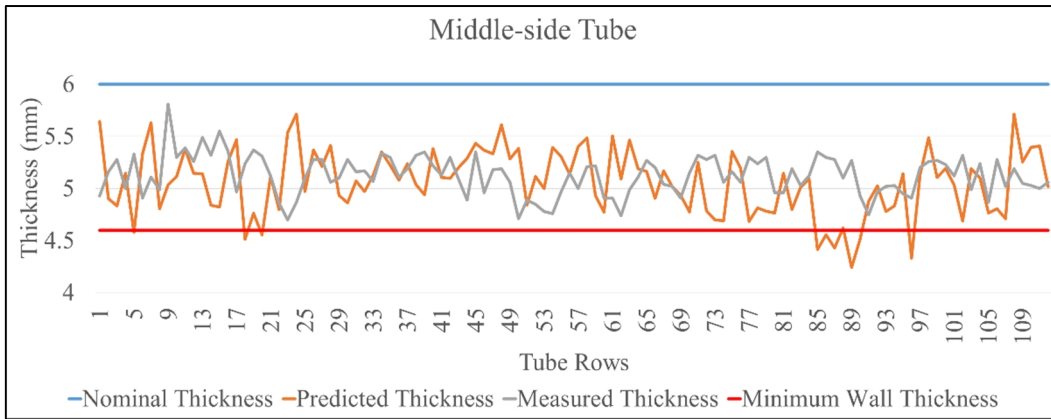
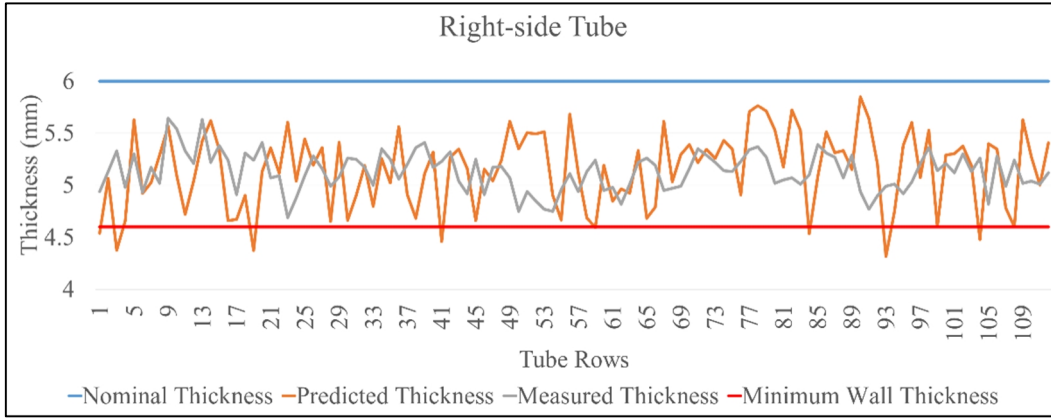
81	5.40	5.29	5.27	0.008125	5.148125	4.96	3.79%	0.037928
82	5.40	5.17	5.09	0.019375	4.799375	5.19	-7.53%	0.075265
83	5.26	5.59	5.13	0.008125	5.008125	5.03	-0.43%	0.004349
84	5.25	5.03	5.17	0.005	5.095	5.12	-0.49%	0.004883
85	5.83	5.08	5.10	0.045625	4.415625	5.35	-17.46%	0.17465
86	5.70	4.92	5.11	0.036875	4.556875	5.3	-14.02%	0.140212
87	6.00	5.42	5.19	0.050625	4.430625	5.28	-16.09%	0.160866
88	5.61	5.14	5.10	0.031875	4.621875	5.1	-9.38%	0.09375
89	5.95	5.29	5.07	0.055	4.245	5.27	-19.45%	0.194497
90	5.66	5.08	5.07	0.036875	4.516875	4.93	-8.38%	0.083798
91	5.44	5.04	5.15	0.018125	4.878125	4.75	2.70%	0.026974
92	5.57	4.83	5.29	0.0175	5.0275	4.97	1.16%	0.011569
93	5.75	5.46	5.25	0.03125	4.78125	5.02	-4.76%	0.04756
94	5.59	5.12	5.20	0.024375	4.834375	5.03	-3.89%	0.038892
95	5.47	5.04	5.30	0.010625	5.140625	4.95	3.85%	0.03851
96	5.71	5.27	5.00	0.044375	4.334375	4.91	-11.72%	0.117235
97	5.83	5.31	5.47	0.0225	5.1325	5.2	-1.30%	0.012981
98	5.74	5.19	5.61	0.008125	5.488125	5.26	4.34%	0.04337
99	5.63	5.02	5.36	0.016875	5.106875	5.27	-3.10%	0.030954
100	5.60	5.16	5.39	0.013125	5.193125	5.23	-0.71%	0.007051
101	5.83	4.99	5.42	0.025625	5.035625	5.12	-1.65%	0.016479
102	5.89	5.10	5.27	0.03875	4.68875	5.32	-11.87%	0.118656
103	5.54	5.57	5.36	0.01125	5.19125	4.99	4.03%	0.040331
104	5.76	4.95	5.42	0.02125	5.10125	5.24	-2.65%	0.026479
105	5.60	5.31	5.17	0.026875	4.766875	4.87	-2.12%	0.021176
106	5.95	5.00	5.36	0.036875	4.806875	5.28	-8.96%	0.089607
107	5.70	5.08	5.19	0.031875	4.711875	5.02	-6.14%	0.061379
108	5.54	5.19	5.63	-0.00562	5.714375	5.19	10.10%	0.101036
109	5.41	5.06	5.33	0.005	5.255	5.05	4.06%	0.040594
110	5.59	5.20	5.49	0.00625	5.39625	5.03	7.28%	0.072813
111	5.35	5.45	5.38	-0.00188	5.408125	5	8.16%	0.081625
112	5.70	5.21	5.35	0.021875	5.021875	5.06	-0.75%	0.007535
								6.798755
							MAPE	6.070317

No. ROW	KIRI							
	2014	2015	2017	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.65	5.28	5.6	0.003125	5.553125	5.11	8.67%	0.086717
2	5.59	5.03	5.52	0.004375	5.454375	5.19	5.09%	0.050939
3	5.78	5.43	5.63	0.009375	5.489375	5.29	3.77%	0.037689
4	5.76	5.42	5.41	0.021875	5.081875	5.06	0.43%	0.004323
5	5.64	5.48	5.33	0.019375	5.039375	5.52	-8.71%	0.08707
6	5.45	5.26	5.48	-0.00188	5.508125	5.01	9.94%	0.099426
7	5.61	5.29	5.52	0.005625	5.435625	5.2	4.53%	0.045312
8	5.45	5.22	5.26	0.011875	5.081875	5.04	0.83%	0.008309
9	5.73	5.44	5.41	0.02	5.11	5.59	-8.59%	0.085868
10	5.57	5.08	5.48	0.005625	5.395625	5.49	-1.72%	0.01719
11	5.9	4.91	5.48	0.02625	5.08625	5.35	-4.93%	0.049299
12	5.56	5.05	5.36	0.0125	5.1725	5.17	0.05%	0.000484
13	5.59	5.05	5.18	0.025625	4.795625	5.37	-10.70%	0.10696
14	5.75	5.29	5.31	0.0275	4.8975	5.22	-6.18%	0.061782
15	5.88	5.2	5.39	0.030625	4.930625	5.39	-8.52%	0.085227
16	5.8	5.04	5.41	0.024375	5.044375	5.26	-4.10%	0.040993
17	5.17	5.42	5.34	-0.01063	5.499375	5.01	9.77%	0.09768
18	5.3	5.02	5.22	0.005	5.145	5.33	-3.47%	0.034709
19	5.52	5.05	5.21	0.019375	4.919375	5.22	-5.76%	0.057591
20	5.88	5.42	5.3	0.03625	4.75625	5.29	-10.09%	0.100898
21	5.58	5.31	5.29	0.018125	5.018125	5.14	-2.37%	0.023711
22	5.37	5.43	5.17	0.0125	4.9825	4.91	1.48%	0.014766
23	5.25	5.08	5.49	-0.015	5.715	4.95	15.45%	0.154545
24	5.67	5.17	5.64	0.001875	5.611875	4.83	16.19%	0.161879
25	5.64	5.11	5.32	0.02	5.02	5.13	-2.14%	0.021442
26	5.81	5.09	5.54	0.016875	5.286875	5.22	1.28%	0.012811
27	5.41	5.29	5.45	-0.0025	5.4875	5.15	6.55%	0.065534
28	5.54	5.55	5.61	-0.00438	5.675625	5.07	11.95%	0.119453
29	5.48	5.17	5.18	0.01875	4.89875	5.07	-3.38%	0.033777
30	5.52	5.29	5.3	0.01375	5.09375	5.07	0.47%	0.004684
31	5.66	5.05	5.45	0.013125	5.253125	5.26	-0.13%	0.001307
32	5.68	5.12	5.49	0.011875	5.311875	5.11	3.95%	0.039506
33	5.4	4.81	5.39	0.000625	5.380625	5	7.61%	0.076125
34	5.81	5.2	5.47	0.02125	5.15125	5.32	-3.17%	0.03172
35	5.4	4.93	5.34	0.00375	5.28375	5.25	0.64%	0.006429
36	5.53	5.2	5.48	0.003125	5.433125	5.2	4.48%	0.044832
37	5.74	5.42	5.41	0.020625	5.100625	5.28	-3.40%	0.033973
38	5.97	5.04	5.51	0.02875	5.07875	5.22	-2.71%	0.027059

39	5.48	5.5	5.34	0.00875	5.20875	5.43	-4.07%	0.040746
40	5.47	5.09	5.39	0.005	5.315	5.13	3.61%	0.036062
41	5.51	5.29	5.38	0.008125	5.258125	5.04	4.33%	0.043279
42	6.11	5.43	5.66	0.028125	5.238125	5.31	-1.35%	0.013536
43	5.59	5.23	5.52	0.004375	5.454375	5.13	6.32%	0.063231
44	5.43	5.44	5.39	0.0025	5.3525	4.95	8.13%	0.081313
45	5.53	5.31	5.48	0.003125	5.433125	5.31	2.32%	0.023187
46	5.4	5.42	5.29	0.006875	5.186875	4.95	4.79%	0.047854
47	5.49	5.17	5.62	-0.00812	5.741875	5.11	12.37%	0.123655
48	5.63	5.23	5.56	0.004375	5.494375	5.25	4.65%	0.046548
49	5.44	5.14	5.58	-0.00875	5.71125	5.09	12.21%	0.122053
50	5.38	5.23	5.43	-0.00312	5.476875	4.7	16.53%	0.165293
51	5.34	5.42	5.12	0.01375	4.91375	4.9	0.28%	0.002806
52	5.26	5.48	5.16	0.00625	5.06625	4.87	4.03%	0.040298
53	5.33	5.56	5.31	0.00125	5.29125	4.77	10.93%	0.109277
54	5.57	5.6	5.82	-0.01563	6.054375	4.79	26.40%	0.263961
55	5.56	5.03	5.42	0.00875	5.28875	5.01	5.56%	0.055639
56	5.5	5.16	5.47	0.001875	5.441875	5.16	5.46%	0.054627
57	5.49	5.46	5.43	0.00375	5.37375	5.08	5.78%	0.057825
58	5.1	5.42	5.34	-0.015	5.565	5.15	8.06%	0.080583
59	5.58	5.06	5.29	0.018125	5.018125	5.13	-2.18%	0.021808
60	5.39	5.14	5.2	0.011875	5.021875	4.96	1.25%	0.012475
61	5.32	5.56	5.26	0.00375	5.20375	4.93	5.55%	0.055527
62	5.12	4.89	5.26	-0.00875	5.39125	4.82	11.85%	0.118517
63	5.41	5.19	5.43	-0.00125	5.44875	4.88	11.65%	0.116547
64	5.83	4.98	5.41	0.02625	5.01625	5.17	-2.97%	0.029739
65	5.65	5.19	5.63	0.00125	5.61125	5.26	6.68%	0.066778
66	5.52	5.26	5.37	0.009375	5.229375	5.18	0.95%	0.009532
67	5.59	4.98	5.55	0.0025	5.5125	4.94	11.59%	0.115891
68	5.62	5.31	5.49	0.008125	5.368125	5.16	4.03%	0.040334
69	5.42	5.05	5.2	0.01375	4.99375	5.08	-1.70%	0.016978
70	5.66	5.42	5.11	0.034375	4.594375	5.09	-9.74%	0.097372
71	5.76	4.93	5.6	0.01	5.45	5.33	2.25%	0.022514
72	5.51	5.12	5.22	0.018125	4.948125	5.1	-2.98%	0.029779
73	5.65	5.06	5.15	0.03125	4.68125	5.22	-10.32%	0.103209
74	5.49	5.21	5.26	0.014375	5.044375	5.09	-0.90%	0.008964
75	5.72	5.31	5.45	0.016875	5.196875	5.28	-1.57%	0.015743
76	5.46	5.16	5.28	0.01125	5.11125	5.21	-1.90%	0.018954
77	5.89	5.29	5.31	0.03625	4.76625	5.36	-11.08%	0.110774
78	5.56	5.29	5.25	0.019375	4.959375	5.14	-3.51%	0.035141
79	5.72	5.19	5.35	0.023125	5.003125	5.26	-4.88%	0.048836
80	5.42	5.16	5.05	0.023125	4.703125	4.99	-5.75%	0.05749

81	5.54	5.09	5.24	0.01875	4.95875	4.99	-0.63%	0.006263
82	5.52	5.2	5.03	0.030625	4.570625	5.19	-11.93%	0.11934
83	5.26	5.26	5.27	-0.00062	5.279375	5.16	2.31%	0.023135
84	5.3	5.17	5.26	0.0025	5.2225	5.16	1.21%	0.012112
85	5.77	5.16	5.14	0.039375	4.549375	5.32	-14.49%	0.144854
86	5.63	5.42	5.14	0.030625	4.680625	5.23	-10.50%	0.105043
87	5.91	5.06	5.39	0.0325	4.9025	5.21	-5.90%	0.059021
88	5.39	5.23	5.19	0.0125	5.0025	5.16	-3.05%	0.030523
89	5.75	5.49	5.09	0.04125	4.47125	5.3	-15.64%	0.156368
90	5.68	5.22	5.18	0.03125	4.71125	4.97	-5.21%	0.052062
91	5.51	4.89	5.24	0.016875	4.986875	4.78	4.33%	0.043279
92	5.6	4.92	5.27	0.020625	4.960625	4.89	1.44%	0.014443
93	5.6	5.28	5.41	0.011875	5.231875	5.16	1.39%	0.013929
94	5.64	5.25	5.25	0.024375	4.884375	4.94	-1.13%	0.01126
95	5.4	4.75	5.32	0.005	5.245	5.1	2.84%	0.028431
96	5.57	5.21	5.26	0.019375	4.969375	4.95	0.39%	0.003914
97	6.01	5.2	5.55	0.02875	5.11875	5.28	-3.05%	0.03054
98	5.81	5.08	5.55	0.01625	5.30625	5.19	2.24%	0.022399
99	5.8	5.29	5.43	0.023125	5.083125	5.21	-2.44%	0.024352
100	5.43	5.1	5.57	-0.00875	5.70125	5.19	9.85%	0.098507
101	5.61	5.04	5.39	0.01375	5.18375	5.09	1.84%	0.018418
102	5.68	5.12	5.37	0.019375	5.079375	5.3	-4.16%	0.041627
103	5.44	5.06	5.17	0.016875	4.916875	5.06	-2.83%	0.028286
104	5.72	5.06	5.36	0.0225	5.0225	5.2	-3.41%	0.034135
105	5.56	5.3	5.18	0.02375	4.82375	4.87	-0.95%	0.009497
106	5.99	5.02	5.45	0.03375	4.94375	5.29	-6.55%	0.065454
107	5.76	5.28	5.3	0.02875	4.86875	5	-2.63%	0.02625
108	5.55	5.28	5.6	-0.00312	5.646875	5.27	7.15%	0.071513
109	5.53	5.23	5.32	0.013125	5.123125	5.04	1.65%	0.016493
110	5.72	5.05	5.7	0.00125	5.68125	5.2	9.25%	0.092548
111	5.41	5.6	5.44	-0.00188	5.468125	5.12	6.80%	0.067993
112	5.88	5.41	5.21	0.041875	4.581875	5.03	-8.91%	0.08909
								6.217773
							MAPE	5.551583

D. Kurva Prediksi vs Aktual Elbow C9



Lampiran 2 Rekapitulasi Data Thickness, Prediksi, dan Komparasi Prediksi-Aktual (tanpa Data 16000 Jam)

A. Elbow F10

No. ROW	KANAN						
	2014	2015	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.8	5.03	0.09625	2.81625	5.25	-46.36%	0.463571
2	5.57	4.7	0.10875	2.19875	5.1	-56.89%	0.568873
3	5.52	5.12	0.05	3.97	4.88	-18.65%	0.186475
4	5.82	4.88	0.1175	2.1775	5.19	-58.04%	0.580443
5	5.49	5.25	0.03	4.56	4.88	-6.56%	0.065574
6	5.56	5	0.07	3.39	5.1	-33.53%	0.335294
7	5.16	4.92	0.03	4.23	5.31	-20.34%	0.20339
8	5.23	4.88	0.04375	3.87375	4.56	-15.05%	0.150493
9	5.49	5.06	0.05375	3.82375	5	-23.53%	0.23525
10	5.33	4.75	0.0725	3.0825	4.86	-36.57%	0.365741
11	5.34	4.9	0.055	3.635	4.85	-25.05%	0.250515
12	5.39	5.15	0.03	4.46	5.46	-18.32%	0.18315
13	5.56	4.99	0.07125	3.35125	4.74	-29.30%	0.292985
14	5.27	5.1	0.02125	4.61125	4.93	-6.47%	0.064655
15	5.36	4.88	0.06	3.5	4.93	-29.01%	0.290061
16	5.65	4.75	0.1125	2.1625	4.81	-55.04%	0.550416
17	5.39	4.93	0.0575	3.6075	4.98	-27.56%	0.275602
18	5.27	5.04	0.02875	4.37875	4.72	-7.23%	0.072299
19	5.42	5.09	0.04125	4.14125	4.66	-11.13%	0.11132
20	5.52	5.14	0.0475	4.0475	4.77	-15.15%	0.151468
21	5.26	4.97	0.03625	4.13625	5.32	-22.25%	0.222509
22	5.37	5.27	0.0125	4.9825	4.75	4.89%	0.048947
23	5.45	5.02	0.05375	3.78375	4.87	-22.30%	0.223049
24	5.66	5.34	0.04	4.42	5.07	-12.82%	0.128205
25	5.6	4.88	0.09	2.81	4.91	-42.77%	0.427699
26	5.6	5.05	0.06875	3.46875	4.68	-25.88%	0.258814
27	5.34	5.1	0.03	4.41	4.79	-7.93%	0.079332
28	5.33	5.23	0.0125	4.9425	4.85	1.91%	0.019072
29	5.51	4.91	0.075	3.185	4.84	-34.19%	0.341942
30	5.73	4.99	0.0925	2.8625	5.26	-45.58%	0.455798
31	5.62	4.99	0.07875	3.17875	5.32	-40.25%	0.402491
32	5.73	5.07	0.0825	3.1725	5.02	-36.80%	0.368028
33	5.69	4.63	0.1325	1.5825	5.19	-69.51%	0.695087
34	5.39	4.7	0.08625	2.71625	4.81	-43.53%	0.435291

35	5.74	4.81	0.11625	2.13625	4.95	-56.84%	0.568434
36	5.56	4.92	0.08	3.08	4.75	-35.16%	0.351579
37	5.82	4.98	0.105	2.565	5.04	-49.11%	0.491071
38	5.75	4.81	0.1175	2.1075	5.03	-58.10%	0.581014
39	5.5	5.11	0.04875	3.98875	4.94	-19.26%	0.192561
40	5.28	4.9	0.0475	3.8075	4.74	-19.67%	0.19673
41	5.74	5.06	0.085	3.105	5.12	-39.36%	0.393555
42	5.5	5.2	0.0375	4.3375	4.76	-8.88%	0.088761
43	5.56	4.96	0.075	3.235	5.18	-37.55%	0.375483
44	5.51	5.19	0.04	4.27	5.23	-18.36%	0.183556
45	5.67	5.04	0.07875	3.22875	5.18	-37.67%	0.376689
46	5.6	5.14	0.0575	3.8175	4.76	-19.80%	0.198004
47	5.43	5.22	0.02625	4.61625	4.9	-5.79%	0.057908
48	5.76	4.93	0.10375	2.54375	5.03	-49.43%	0.494284
49	5.38	5.18	0.025	4.605	4.95	-6.97%	0.069697
50	5.62	5.04	0.0725	3.3725	5.38	-37.31%	0.373141
51	5.35	5.28	0.00875	5.07875	4.9	3.65%	0.03648
52	5.88	5.07	0.10125	2.74125	5.17	-46.98%	0.469778
53	5.24	5.24	0	5.24	4.82	8.71%	0.087137
54	5.35	5.2	0.01875	4.76875	4.93	-3.27%	0.032708
55	5.79	4.75	0.13	1.76	5.16	-65.89%	0.658915
56	5.45	5.08	0.04625	4.01625	5	-19.68%	0.19675
57	5.66	5.56	0.0125	5.2725	5.12	2.98%	0.029785
58	5.5	5.24	0.0325	4.4925	4.81	-6.60%	0.066008
59	5.68	4.81	0.10875	2.30875	5.43	-57.48%	0.574816
60	5.83	4.96	0.10875	2.45875	5.31	-53.70%	0.536959
61	5.72	5.18	0.0675	3.6275	5.08	-28.59%	0.285925
62	5.45	4.88	0.07125	3.24125	4.88	-33.58%	0.335809
63	5.7	4.88	0.1025	2.5225	5.01	-49.65%	0.496507
64	5.66	4.63	0.12875	1.66875	5.16	-67.66%	0.676599
65	5.44	4.98	0.0575	3.6575	4.75	-23.00%	0.23
66	5.41	4.95	0.0575	3.6275	5.02	-27.74%	0.27739
67	5.36	4.86	0.0625	3.4225	4.93	-30.58%	0.305781
68	5.46	5.16	0.0375	4.2975	5.03	-14.56%	0.145626
69	5.47	5	0.05875	3.64875	5.14	-29.01%	0.290126
70	5.35	5.11	0.03	4.42	4.84	-8.68%	0.086777
71	5.41	4.8	0.07625	3.04625	5.01	-39.20%	0.391966
72	5.46	5.06	0.05	3.91	4.96	-21.17%	0.211694
73	5.51	5.15	0.045	4.115	5	-17.70%	0.177
74	5.41	4.98	0.05375	3.74375	5.09	-26.45%	0.264489
75	5.58	5.02	0.07	3.41	4.88	-30.12%	0.30123
76	5.41	5.08	0.04125	4.13125	5.01	-17.54%	0.175399

77	5.24	5.06	0.0225	4.5425	4.96	-8.42%	0.084173	
78	5.32	4.8	0.065	3.305	4.96	-33.37%	0.333669	
79	5.36	5.04	0.04	4.12	4.82	-14.52%	0.145228	
80	5.22	5.29	0.00875	5.49125	4.64	18.35%	0.183459	
81	5.93	5.17	0.095	2.985	5.01	-40.42%	0.404192	
82	5.18	5.3	-0.015	5.645	4.8	17.60%	0.176042	
83	5.43	5.12	0.03875	4.22875	4.83	-12.45%	0.124482	
84	5.33	5.41	-0.01	5.64	5.06	11.46%	0.114625	
85	5.51	4.99	0.065	3.495	5.22	-33.05%	0.33046	
86	5.26	5.22	0.005	5.105	4.91	3.97%	0.039715	
87	5.33	4.78	0.06875	3.19875	4.85	-34.05%	0.340464	
88	5.37	5.05	0.04	4.13	4.7	-12.13%	0.121277	
89	5.5	5.12	0.0475	4.0275	5.11	-21.18%	0.21184	
90	5.29	5.43	-0.0175	5.8325	4.96	17.59%	0.175907	
91	5.31	4.83	0.06	3.45	5.12	-32.62%	0.326172	
92	5.36	4.73	0.07875	2.91875	4.83	-39.57%	0.395704	
93	5.75	5.08	0.08375	3.15375	5.13	-38.52%	0.385234	
94	5.31	5.12	0.02375	4.57375	4.55	0.52%	0.00522	
95	5.5	4.83	0.08375	2.90375	4.9	-40.74%	0.407398	
96	5.35	5.12	0.02875	4.45875	4.91	-9.19%	0.091904	
97	5.48	4.8	0.085	2.845	4.67	-39.08%	0.390792	
98	5.41	5	0.05125	3.82125	4.78	-20.06%	0.200575	
99	5.61	5.1	0.06375	3.63375	5.16	-29.58%	0.295785	
100	5.58	4.92	0.0825	3.0225	5.02	-39.79%	0.397908	
101	5.4	4.84	0.07	3.23	4.88	-33.81%	0.338115	
102	5.2	4.85	0.04375	3.84375	4.67	-17.69%	0.176927	
103	5.46	4.95	0.06375	3.48375	4.8	-27.42%	0.274219	
104	5.78	4.83	0.11875	2.09875	5.26	-60.10%	0.600998	
105	5.63	4.86	0.09625	2.64625	5	-47.08%	0.47075	
106	5.21	5.06	0.01875	4.62875	4.94	-6.30%	0.063006	
107	5.46	4.83	0.07875	3.01875	4.78	-36.85%	0.368462	
108	5.57	5.06	0.06375	3.59375	5.27	-31.81%	0.318074	
109	5.55	5.06	0.06125	3.65125	4.99	-26.83%	0.268287	
110	5.29	5.01	0.035	4.205	4.97	-15.39%	0.153924	
111	5.37	5.43	-0.0075	5.6025	5.09	10.07%	0.100688	
112	5.64	5.14	0.0625	3.7025	4.99	-25.80%	0.258016	
							30.91	
							MAPE	27.6

No. ROW	TENGAH						
	2014	2015	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.57	4.94	0.07875	3.20875	5.2	-38.29%	0.382933
2	5.45	4.71	0.0125	4.9625	4.94	0.46%	0.004555
3	5.40	5.11	0.02875	4.27875	4.9	-12.68%	0.126786
4	5.50	4.91	0.019375	4.744375	5.06	-6.24%	0.062376
5	5.19	5.22	-0.00687	5.458125	4.8	13.71%	0.137109
6	5.33	4.89	0.01625	4.69625	5.02	-6.45%	0.064492
7	5.57	4.83	0.039375	4.034375	5.18	-22.12%	0.221163
8	4.84	5.00	-0.0225	5.7175	4.53	26.21%	0.262141
9	5.17	5.10	-0.00438	5.340625	4.85	10.12%	0.10116
10	5.14	4.79	0	5.14	4.91	4.68%	0.046843
11	5.11	4.83	0.001875	5.036875	4.93	2.17%	0.021678
12	5.21	4.82	0.020625	4.405625	5.41	-18.57%	0.185652
13	5.13	4.87	-0.00625	5.37375	4.55	18.10%	0.181044
14	4.90	5.06	-0.02625	5.92375	4.91	20.65%	0.206466
15	5.17	4.96	-0.00562	5.389375	4.8	12.28%	0.122786
16	5.15	4.76	0.01625	4.51625	4.74	-4.72%	0.047205
17	5.35	4.85	0.020625	4.545625	4.95	-8.17%	0.081692
18	4.97	4.80	-0.00688	5.238125	4.73	10.74%	0.107426
19	4.94	4.75	0.003125	4.818125	4.49	7.31%	0.073079
20	5.27	5.06	-0.00688	5.538125	4.86	13.95%	0.139532
21	4.94	5.02	-0.00937	5.305625	5.17	2.62%	0.026233
22	5.06	4.96	-0.00625	5.30375	4.95	7.15%	0.071465
23	5.17	4.95	-0.01125	5.60875	4.85	15.64%	0.156443
24	5.37	5.14	0	5.37	4.94	8.70%	0.087045
25	5.24	4.66	0.000625	5.215625	4.92	6.01%	0.060086
26	5.21	4.83	-0.00812	5.526875	4.79	15.38%	0.153836
27	5.07	4.68	0.006875	4.801875	4.8	0.04%	0.000391
28	5.63	5.19	0.00125	5.58125	4.92	13.44%	0.1344
29	5.27	5.11	-0.01938	6.025625	4.94	21.98%	0.219762
30	5.48	4.83	-0.01438	6.040625	5.29	14.19%	0.141895
31	5.38	4.91	0.024375	4.429375	5.12	-13.49%	0.134888
32	5.31	5.11	0	5.31	5.06	4.94%	0.049407
33	5.50	4.66	0.0175	4.8175	5.19	-7.18%	0.071773
34	5.05	4.75	0.001875	4.976875	4.88	1.99%	0.019851
35	5.28	5.01	-0.00625	5.52375	4.88	13.19%	0.131916
36	5.17	4.90	-0.01438	5.730625	4.8	19.39%	0.19388
37	5.40	4.98	0.016875	4.741875	5.14	-7.75%	0.077456
38	5.29	5.04	0.010625	4.875625	5.14	-5.14%	0.051435

39	5.16	4.97	0.006875	4.891875	4.98	-1.77%	0.017696
40	5.10	4.92	0.003125	4.978125	4.88	2.01%	0.020108
41	5.29	4.92	0.009375	4.924375	5.2	-5.30%	0.053005
42	5.13	4.99	-0.0225	6.0075	4.74	26.74%	0.267405
43	5.48	4.93	0.00375	5.33375	5.19	2.77%	0.027697
44	5.29	5.08	-0.03938	6.825625	5.33	28.06%	0.280605
45	5.45	4.98	0.02625	4.42625	5.35	-17.27%	0.172664
46	5.16	5.08	-0.00125	5.20875	4.8	8.52%	0.085156
47	5.32	5.07	0.01375	4.78375	4.71	1.57%	0.015658
48	5.29	5.01	-0.00188	5.363125	4.86	10.35%	0.103524
49	4.90	4.95	-0.01875	5.63125	5.06	11.29%	0.112895
50	5.23	5.05	0.0075	4.9375	5.2	-5.05%	0.050481
51	5.04	5.07	-0.0125	5.5275	4.76	16.12%	0.161239
52	5.45	5.09	-0.00687	5.718125	5.19	10.18%	0.101758
53	5.09	5.22	-0.02438	6.040625	4.92	22.78%	0.227769
54	5.07	5.28	0.000625	5.045625	4.84	4.25%	0.042485
55	5.47	4.70	0.0275	4.3975	5.25	-16.24%	0.162381
56	5.30	4.90	0.0025	5.2025	5.05	3.02%	0.030198
57	5.25	5.16	-0.0075	5.5425	4.99	11.07%	0.110721
58	4.97	5.28	-0.00688	5.238125	4.82	8.67%	0.086748
59	5.57	4.77	0.03875	4.05875	5.34	-23.99%	0.239934
60	5.65	5.07	0.018125	4.943125	5.44	-9.13%	0.091337
61	5.48	5.37	0.02875	4.35875	5.12	-14.87%	0.148682
62	5.23	4.83	0.006875	4.961875	4.85	2.31%	0.023067
63	5.37	4.96	0.009375	5.004375	4.94	1.30%	0.013031
64	5.35	4.56	-0.00813	5.666875	4.85	16.84%	0.168428
65	5.01	4.87	-0.02813	6.106875	4.66	31.05%	0.310488
66	5.23	4.92	0.013125	4.718125	4.93	-4.30%	0.042977
67	5.19	4.72	-0.01	5.58	5.27	5.88%	0.058824
68	5.24	5.27	0.005625	5.020625	4.89	2.67%	0.026713
69	5.33	5.02	0.001875	5.256875	5.15	2.08%	0.020752
70	5.11	5.11	0.005625	4.890625	4.74	3.18%	0.031777
71	5.26	4.68	0.00125	5.21125	5.22	-0.17%	0.001676
72	5.32	5.00	0.013125	4.808125	5.01	-4.03%	0.040294
73	5.35	4.94	0.008125	5.033125	5.16	-2.46%	0.024588
74	5.20	4.77	-0.00375	5.34625	4.95	8.01%	0.080051
75	5.15	4.91	-0.0075	5.4425	4.91	10.85%	0.108452
76	5.31	4.95	0.018125	4.603125	4.92	-6.44%	0.064405
77	5.13	5.12	-0.00688	5.398125	4.9	10.17%	0.101658
78	5.15	4.81	0.006875	4.881875	4.9	-0.37%	0.003699
79	5.06	4.67	-0.015	5.645	4.78	18.10%	0.180962
80	4.93	5.07	-0.02188	5.783125	4.59	25.99%	0.25994

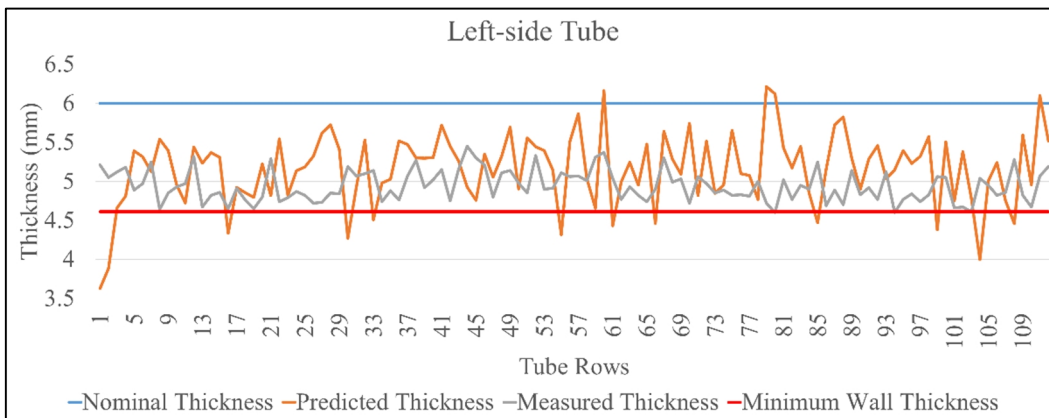
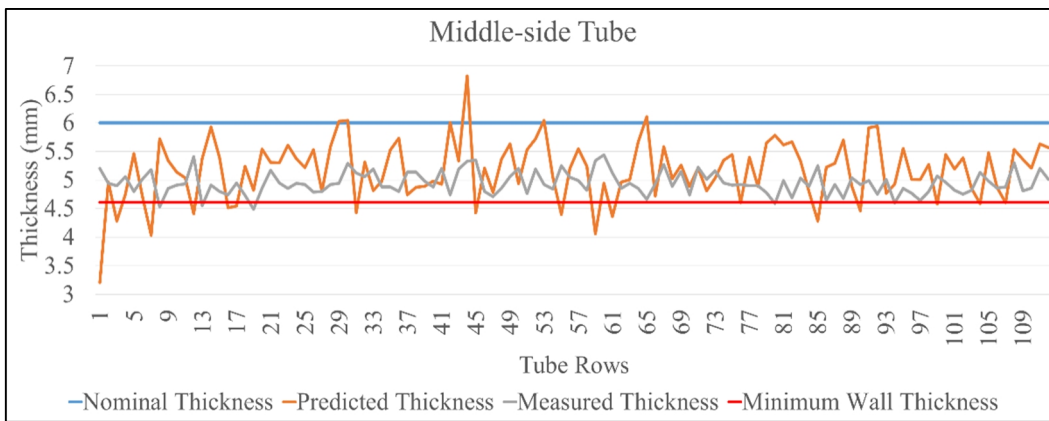
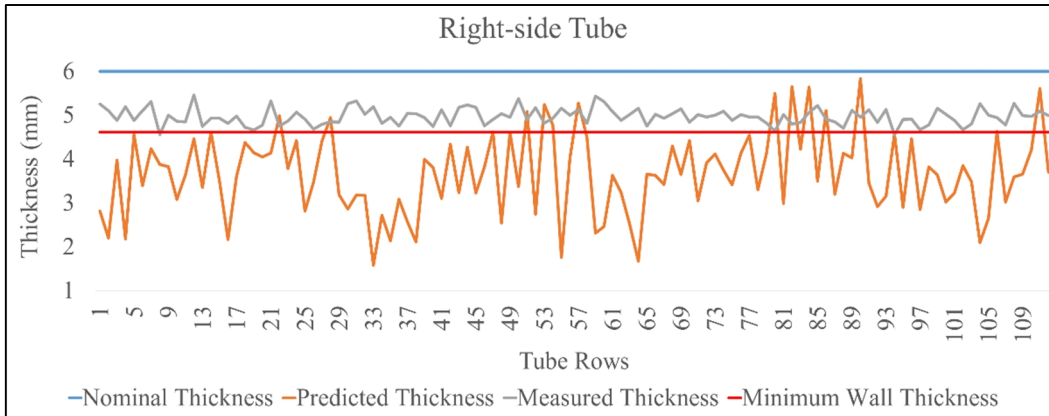
81	5.27	5.08	-0.00875	5.61125	4.99	12.45%	0.124499
82	5.08	4.98	-0.015	5.665	4.69	20.79%	0.207889
83	5.26	5.01	-0.00188	5.333125	5.03	6.03%	0.060263
84	5.16	5.15	0.009375	4.794375	4.89	-1.96%	0.019555
85	5.50	4.82	0.03125	4.28125	5.25	-18.45%	0.184524
86	5.10	4.68	-0.00313	5.221875	4.64	12.54%	0.125404
87	5.05	4.75	-0.00625	5.29375	4.92	7.60%	0.075965
88	5.04	4.96	-0.01688	5.698125	4.68	21.75%	0.217548
89	5.28	4.94	0.01	4.89	5.04	-2.98%	0.029762
90	5.24	4.86	0.02	4.46	4.92	-9.35%	0.093496
91	5.21	4.74	-0.01813	5.916875	4.99	18.57%	0.185746
92	5.21	4.58	-0.01875	5.94125	4.75	25.08%	0.250789
93	5.45	4.95	0.0175	4.7675	5.01	-4.84%	0.048403
94	4.95	4.66	0.000625	4.925625	4.6	7.08%	0.070788
95	5.16	4.73	-0.01	5.55	4.85	14.43%	0.14433
96	5.18	5.04	0.004375	5.009375	4.77	5.02%	0.050183
97	5.08	4.83	0.001875	5.006875	4.64	7.91%	0.079068
98	5.15	4.90	-0.00312	5.271875	4.8	9.83%	0.098307
99	5.31	4.57	0.01875	4.57875	5.07	-9.69%	0.096893
100	5.37	4.88	-0.00188	5.443125	4.96	9.74%	0.097404
101	5.07	4.89	-0.00312	5.191875	4.82	7.72%	0.077152
102	4.95	4.75	-0.01125	5.38875	4.75	13.45%	0.134474
103	5.05	4.92	0.005	4.855	4.82	0.73%	0.007261
104	5.32	4.77	0.01875	4.58875	5.13	-10.55%	0.105507
105	5.33	4.64	-0.00375	5.47625	4.98	9.96%	0.099649
106	5.21	5.11	0.00875	4.86875	4.86	0.18%	0.0018
107	5.24	5.00	0.01625	4.60625	4.88	-5.61%	0.056096
108	5.39	4.72	-0.00375	5.53625	5.3	4.46%	0.044575
109	5.26	5.11	-0.0025	5.3575	4.81	11.38%	0.113825
110	5.06	4.92	-0.00375	5.20625	4.86	7.12%	0.071245
111	4.97	5.27	-0.01688	5.628125	5.2	8.23%	0.082332
112	5.25	5.13	-0.00812	5.566875	5.01	11.12%	0.111153
							11.7
						MAPE	10.44

No. ROW	KIRI						
	2014	2015	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.75	4.96	0.09875	3.62875	5.21	-30.35%	0.303503
2	5.91	4.57	0.051875	3.886875	5.05	-23.03%	0.230322
3	5.44	4.954	0.02	4.66	5.12	-8.98%	0.089844
4	5.59	5	0.02	4.81	5.18	-7.14%	0.071429
5	5.27	5.24	-0.00313	5.391875	4.89	10.26%	0.102633
6	5.34	4.76	0.000625	5.315625	4.97	6.95%	0.069542
7	5.49	4.81	0.009375	5.124375	5.25	-2.39%	0.023929
8	5.03	5.04	-0.01313	5.541875	4.64	19.44%	0.19437
9	5.32	5.12	-0.00187	5.393125	4.85	11.20%	0.111985
10	5.49	4.85	0.01375	4.95375	4.93	0.48%	0.004817
11	5.31	4.85	0.015	4.725	4.97	-4.93%	0.049296
12	5.27	4.85	-0.00438	5.440625	5.32	2.27%	0.022674
13	5.43	4.85	0.005	5.235	4.67	12.10%	0.120985
14	5.27	5.04	-0.0025	5.3675	4.82	11.36%	0.113589
15	5.31	4.89	0	5.31	4.86	9.26%	0.092593
16	5.43	4.85	0.028125	4.333125	4.65	-6.81%	0.068145
17	5.58	5.02	0.016875	4.921875	4.91	0.24%	0.002419
18	5.22	4.81	0.009375	4.854375	4.76	1.98%	0.019827
19	5.16	4.64	0.009375	4.794375	4.65	3.10%	0.031048
20	5.37	5.02	0.00375	5.22375	4.8	8.83%	0.088281
21	5.06	5.02	0.00625	4.81625	5.29	-8.96%	0.089556
22	5.25	4.89	-0.0075	5.5425	4.74	16.93%	0.169304
23	5.53	5	0.018125	4.823125	4.79	0.69%	0.006915
24	5.5	5.22	0.009375	5.134375	4.87	5.43%	0.054286
25	5.43	4.98	0.00625	5.18625	4.82	7.60%	0.075985
26	5.25	4.8	-0.00188	5.323125	4.72	12.78%	0.127781
27	5.13	4.72	-0.0125	5.6175	4.73	18.76%	0.187632
28	5.43	5.25	-0.0075	5.7225	4.85	17.99%	0.179897
29	5.36	5.1	-0.00125	5.40875	4.84	11.75%	0.11751
30	5.61	4.87	0.034375	4.269375	5.19	-17.74%	0.177384
31	5.61	4.73	0.0175	4.9275	5.07	-2.81%	0.028107
32	5.36	5.06	-0.00437	5.530625	5.1	8.44%	0.084436
33	5.58	4.92	0.0275	4.5075	5.14	-12.31%	0.123054
34	5.32	4.95	0.00875	4.97875	4.74	5.04%	0.050369
35	5.37	4.97	0.00875	5.02875	4.88	3.05%	0.030482
36	5.37	4.97	-0.00375	5.51625	4.76	15.89%	0.158876
37	5.35	4.99	-0.00313	5.471875	5.07	7.93%	0.079265
38	5.57	5.12	0.006875	5.301875	5.27	0.60%	0.006048

39	5.2	5.07	-0.0025	5.2975	4.92	7.67%	0.076728
40	5.23	5.01	-0.00187	5.303125	5.02	5.64%	0.056399
41	5.33	4.89	-0.01	5.72	5.15	11.07%	0.11068
42	5.23	4.91	-0.00562	5.449375	4.75	14.72%	0.147237
43	5.6	4.89	0.00875	5.25875	5.16	1.91%	0.019138
44	5.56	5.15	0.01625	4.92625	5.45	-9.61%	0.096101
45	5.83	5.07	0.0275	4.7575	5.3	-10.24%	0.102358
46	5.25	5.16	-0.0025	5.3475	5.21	2.64%	0.026392
47	5.25	4.93	0.005	5.055	4.8	5.31%	0.053125
48	5.49	4.97	0.004375	5.319375	5.11	4.10%	0.040974
49	5.11	4.91	-0.015	5.695	5.14	10.80%	0.107977
50	5.39	5.07	0.0125	4.9025	4.98	-1.56%	0.015562
51	5.36	5.07	-0.005	5.555	4.85	14.54%	0.145361
52	5.59	5.13	0.00375	5.44375	5.33	2.13%	0.021341
53	5.59	5.27	0.005	5.395	4.9	10.10%	0.10102
54	5.49	5.1	0.00875	5.14875	4.91	4.86%	0.048625
55	5.68	4.69	0.035	4.315	5.11	-15.56%	0.155577
56	5.63	5.08	0.003125	5.508125	5.06	8.86%	0.088562
57	5.33	5.03	-0.01375	5.86625	5.07	15.71%	0.157051
58	5.28	5.1	0.00625	5.03625	5.01	0.52%	0.00524
59	5.68	4.83	0.02625	4.65625	5.31	-12.31%	0.123117
60	5.77	5.04	-0.01	6.16	5.37	14.71%	0.147114
61	5.53	5.29	0.028125	4.433125	5.04	-12.04%	0.120412
62	5.48	4.69	0.0125	4.9925	4.77	4.66%	0.046646
63	5.44	5.14	0.005	5.245	4.93	6.39%	0.063895
64	5.39	4.66	0.01125	4.95125	4.82	2.72%	0.02723
65	5.33	5.05	-0.00375	5.47625	4.74	15.53%	0.155327
66	5.56	4.99	0.028125	4.463125	4.9	-8.92%	0.089158
67	5.52	4.84	-0.00313	5.641875	5.3	6.45%	0.064505
68	5.48	5.35	0.005	5.285	4.99	5.91%	0.059118
69	5.58	5.21	0.0125	5.0925	5.03	1.24%	0.012425
70	5.28	5.08	-0.01188	5.743125	4.72	21.68%	0.216764
71	5.67	4.75	0.021875	4.816875	5.06	-4.80%	0.048048
72	5.44	5.16	-0.00187	5.513125	4.97	10.93%	0.109281
73	5.41	4.96	0.014375	4.849375	4.85	-0.01%	0.000129
74	5.44	4.83	0.0125	4.9525	4.89	1.28%	0.012781
75	5.24	5.12	-0.01063	5.654375	4.82	17.31%	0.173107
76	5.39	5.05	0.0075	5.0975	4.83	5.54%	0.055383
77	5.32	4.94	0.00625	5.07625	4.81	5.54%	0.055353
78	5.38	4.92	0.015625	4.770625	5	-4.59%	0.045875
79	5.19	4.78	-0.02625	6.21375	4.72	31.65%	0.316472
80	5.12	5.01	-0.02563	6.119375	4.6	33.03%	0.330299

81	5.16	5.17	-0.00687	5.428125	5.02	8.13%	0.0813
82	5.49	4.96	0.008125	5.173125	4.77	8.45%	0.084513
83	5.25	5.09	-0.005	5.445	4.95	10.00%	0.1
84	5.51	5.23	0.016875	4.851875	4.9	-0.98%	0.009821
85	5.64	4.88	0.03	4.47	5.25	-14.86%	0.148571
86	5.35	4.75	0.005	5.155	4.69	9.91%	0.099147
87	5.26	4.95	-0.01188	5.723125	4.89	17.04%	0.170373
88	5.24	4.99	-0.015	5.825	4.7	23.94%	0.239362
89	5.54	5.01	0.00625	5.29625	5.14	3.04%	0.030399
90	5.31	4.96	0.010625	4.895625	4.83	1.36%	0.013587
91	5.53	4.71	0.00625	5.28625	4.92	7.44%	0.074441
92	5.31	4.74	-0.00375	5.45625	4.77	14.39%	0.143868
93	5.35	4.88	0.008125	5.033125	5.12	-1.70%	0.016968
94	5.22	4.67	0.001875	5.146875	4.6	11.89%	0.118886
95	5.2	4.65	-0.005	5.395	4.77	13.10%	0.131027
96	5.4	5	0.004375	5.229375	4.84	8.04%	0.080449
97	5.15	5.02	-0.00437	5.320625	4.74	12.25%	0.122495
98	5.21	4.95	-0.00938	5.575625	4.83	15.44%	0.154374
99	5.55	4.62	0.03	4.38	5.06	-13.44%	0.134387
100	5.41	4.77	-0.0025	5.5075	5.05	9.06%	0.090594
101	5.36	4.52	0.015625	4.750625	4.66	1.94%	0.019447
102	5.28	4.81	-0.0025	5.3775	4.67	15.15%	0.151499
103	5.22	4.8	0.01125	4.78125	4.61	3.71%	0.037148
104	5.46	4.86	0.0375	3.9975	5.04	-20.68%	0.206845
105	5.47	4.83	0.011875	5.006875	4.95	1.15%	0.01149
106	5.29	4.98	0.00125	5.24125	4.82	8.74%	0.087396
107	5.56	5.13	0.020625	4.755625	4.86	-2.15%	0.021476
108	5.53	4.8	0.0275	4.4575	5.28	-15.58%	0.155777
109	5.3	5.15	-0.0075	5.5925	4.82	16.03%	0.16027
110	5.15	4.91	0.005	4.955	4.67	6.10%	0.061028
111	5.1	4.91	-0.02563	6.099375	5.07	20.30%	0.203033
112	5.47	5.22	-0.00125	5.51875	5.19	6.33%	0.063343
							10.63
						MAPE	9.49

B. Kurva Prediksi vs Aktual Elbow F10



C. Elbow C9

No. ROW	KANAN						
	2014	2015	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.68	5.17	0.06375	4.20375	4.94	-14.90%	0.149038
2	5.64	5.54	0.0125	5.1025	5.13	-0.54%	0.005361
3	5.81	5.15	0.0825	3.3925	5.33	-36.35%	0.363508
4	5.64	5.21	0.05375	4.13375	4.98	-16.99%	0.16993
5	5.25	5.42	0.02125	6.00875	5.3	13.37%	0.133726
6	5.62	5.06	0.07	3.86	4.93	-21.70%	0.217039
7	5.72	5.29	0.05375	4.32375	5.17	-16.37%	0.163685
8	5.68	5.17	0.06375	3.76375	5.02	-25.02%	0.250249
9	5.79	5.17	0.0775	3.7075	5.64	-34.26%	0.342642
10	5.96	5.17	0.09875	3.14875	5.54	-43.16%	0.431634
11	5.63	4.98	0.08125	3.53125	5.33	-33.75%	0.337477
12	5.97	5.11	0.1075	2.9975	5.21	-42.47%	0.424664
13	5.92	5.29	0.07875	3.77875	5.63	-32.88%	0.328819
14	5.72	5.42	0.0375	4.6175	5.22	-11.54%	0.115421
15	5.9	5.31	0.07375	3.68375	5.38	-31.53%	0.315288
16	5.73	5.26	0.05875	4.28875	5.24	-18.15%	0.181536
17	5.22	5.1	0.015	5.015	4.91	2.14%	0.021385
18	5.85	5.2	0.08125	3.54125	5.31	-33.31%	0.333098
19	5.82	5.02	0.1	3.16	5.24	-39.69%	0.396947
20	5.92	5.59	0.04125	4.31125	5.41	-20.31%	0.203096
21	5.49	5.56	0.00875	5.63125	5.07	11.07%	0.1107
22	5.67	5.05	0.0775	3.4075	5.09	-33.06%	0.33055
23	5.72	5.17	0.06875	3.85875	4.69	-17.72%	0.177239
24	5.63	5.29	0.0425	4.6525	4.88	-4.66%	0.046619
25	5.8	4.93	0.10875	2.91875	5.09	-42.66%	0.426572
26	5.65	5.17	0.06	4.36	5.28	-17.42%	0.174242
27	5.81	4.81	0.125	2.665	5.16	-48.35%	0.483527
28	5.66	5.42	0.03	4.66	4.99	-6.61%	0.066132
29	5.71	5.45	0.0325	4.4825	5.08	-11.76%	0.117618
30	5.89	5.22	0.08375	3.43375	5.26	-34.72%	0.347196
31	5.7	5.17	0.06625	3.86625	5.25	-26.36%	0.263571
32	5.72	4.81	0.11375	2.71375	5.17	-47.51%	0.475097
33	5.53	5.11	0.0525	4.1025	5	-17.95%	0.1795
34	6.02	5.05	0.12125	2.86125	5.35	-46.52%	0.465187
35	5.76	5.19	0.07125	3.95125	5.25	-24.74%	0.247381
36	5.63	5.16	0.05875	4.13875	5.06	-18.21%	0.182065
37	5.51	5.06	0.05625	4.07625	5.2	-21.61%	0.216106

38	6.02	5.44	0.0725	3.7525	5.36	-29.99%	0.299907
39	5.78	5.29	0.06125	4.13125	5.41	-23.64%	0.236368
40	5.85	5.42	0.05375	4.27375	5.17	-17.34%	0.173356
41	5.45	5.31	0.0175	5.0475	5.23	-3.49%	0.034895
42	5.81	5.42	0.04875	4.52875	5.32	-14.87%	0.148731
43	5.53	5.27	0.0325	4.6825	5.04	-7.09%	0.070933
44	5.55	5.17	0.0475	4.3275	4.92	-12.04%	0.120427
45	5.62	5.19	0.05375	4.17375	5.25	-20.50%	0.205
46	5.32	5.23	0.01125	5.18125	4.91	5.52%	0.055244
47	5.79	5.21	0.0725	3.9325	5.17	-23.94%	0.239362
48	5.62	5.25	0.04625	4.58625	5.18	-11.46%	0.114624
49	5.8	5.16	0.08	3.54	5.07	-30.18%	0.301775
50	5.28	5.29	0.00125	5.33875	4.75	12.39%	0.123947
51	5.36	5.1	0.0325	4.4325	4.94	-10.27%	0.102733
52	5.42	5.29	0.01625	4.89625	4.85	0.95%	0.009536
53	5.78	5.66	0.015	4.975	4.77	4.30%	0.042977
54	5.6	5.57	0.00375	5.42375	4.75	14.18%	0.141842
55	5.52	4.29	0.15375	1.90375	4.96	-61.62%	0.616179
56	5.85	5.08	0.09625	3.24625	5.11	-36.47%	0.364726
57	5.6	5.54	0.0075	5.4275	4.94	9.87%	0.098684
58	5.28	5.19	0.01125	5.03125	5.13	-1.92%	0.01925
59	5.62	4.89	0.09125	3.24125	5.24	-38.14%	0.381441
60	5.5	5.11	0.04875	4.19875	4.95	-15.18%	0.151768
61	5.51	5.42	0.01125	4.99125	4.98	0.23%	0.002259
62	5.31	5.31	0	5.27	4.82	9.34%	0.093361
63	5.58	5.29	0.03625	4.43625	5.01	-11.45%	0.114521
64	5.47	5.2	0.03375	4.80375	5.22	-7.97%	0.079741
65	5.89	5.554	0.042	4.594	5.26	-12.66%	0.126616
66	5.84	5.11	0.09125	3.38125	5.19	-34.85%	0.348507
67	5.56	4.93	0.07875	3.45875	4.95	-30.13%	0.301263
68	5.73	5.29	0.055	4.215	4.97	-15.19%	0.151911
69	5.5	5.16	0.0425	4.3725	4.99	-12.37%	0.123747
70	5.74	5.54	0.025	4.735	5.16	-8.24%	0.082364
71	5.9	5.02	0.11	2.9	5.35	-45.79%	0.457944
72	5.84	5.14	0.0875	3.2275	5.29	-38.99%	0.389887
73	5.79	5.23	0.07	3.78	5.22	-27.59%	0.275862
74	5.75	5.16	0.07375	3.48375	5.14	-32.22%	0.322228
75	5.73	5.23	0.0625	3.9825	5.13	-22.37%	0.223684
76	5.58	5.09	0.06125	3.96125	5.23	-24.26%	0.242591
77	5.52	5.25	0.03375	4.72375	5.34	-11.54%	0.115403
78	5.55	5.15	0.05	4.21	5.37	-21.60%	0.216015
79	5.67	5.11	0.07	3.78	5.27	-28.27%	0.282732

80	5.62	5.26	0.045	4.185	5.02	-16.63%	0.166335
81	5.36	5.17	0.02375	4.58375	5.05	-9.23%	0.092327
82	5.74	5.23	0.06375	3.67375	5.07	-27.54%	0.275394
83	5.43	5.42	0.00125	5.30125	5.01	5.81%	0.058134
84	5.37	5.05	0.04	4.41	5.1	-13.53%	0.135294
85	5.85	5.28	0.07125	3.59125	5.39	-33.37%	0.33372
86	5.87	5.27	0.075	3.475	5.31	-34.56%	0.345574
87	5.96	5.17	0.09875	3.02875	5.27	-42.53%	0.425285
88	5.55	5.28	0.03375	4.35375	5.07	-14.13%	0.141272
89	5.96	5.54	0.0525	3.9925	5.29	-24.53%	0.245274
90	5.51	5.43	0.01	4.91	4.94	-0.61%	0.006073
91	5.69	5.45	0.03	4.43	4.77	-7.13%	0.071279
92	5.7	5.04	0.0825	3.3125	4.9	-32.40%	0.32398
93	5.82	5.31	0.06375	3.93375	4.99	-21.17%	0.211673
94	5.76	4.93	0.10375	2.95375	5.01	-41.04%	0.410429
95	5.82	4.95	0.10875	2.87875	4.92	-41.49%	0.414888
96	5.81	5.29	0.065	3.575	5.03	-28.93%	0.289264
97	5.86	5.19	0.08375	3.62375	5.21	-30.45%	0.304463
98	5.77	5.21	0.07	4.06	5.36	-24.25%	0.242537
99	5.78	4.92	0.1075	2.9175	5.14	-43.24%	0.432393
100	5.66	5.21	0.05625	4.14625	5.21	-20.42%	0.204175
101	5.76	5.11	0.08125	3.64125	5.12	-28.88%	0.288818
102	5.91	4.97	0.1175	2.5475	5.3	-51.93%	0.51934
103	5.56	5.17	0.04875	4.52875	5.13	-11.72%	0.117203
104	5.81	4.81	0.125	2.495	5.26	-52.57%	0.525665
105	5.63	5.29	0.0425	4.2925	4.82	-10.94%	0.10944
106	5.89	5.05	0.105	3.075	5.28	-41.76%	0.417614
107	5.77	5.14	0.07875	3.48875	4.99	-30.09%	0.300852
108	5.6	5.26	0.0425	4.7525	5.24	-9.30%	0.093034
109	5.43	5.14	0.03625	4.54625	5.02	-9.44%	0.094373
110	5.56	5.17	0.04875	4.54875	5.04	-9.75%	0.09747
111	5.38	5.42	-0.005	5.675	5.01	13.27%	0.132735
112	5.66	5.18	0.06	4.01	5.12	-21.68%	0.216797
							25.24129
						MAPE	22.53686

No. ROW	TENGAH						
	2014	2015	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.39	5.63	-0.03	6.21	4.93	25.96%	0.259635
2	5.62	4.93	0.08625	3.26625	5.16	-36.70%	0.367006
3	5.92	5.04	0.11	2.83	5.28	-46.40%	0.464015
4	5.63	5.03	0.075	3.655	5	-26.90%	0.269
5	6.11	5.42	0.08625	3.33625	5.33	-37.41%	0.374062
6	5.47	4.92	0.06875	3.81875	4.91	-22.23%	0.222251
7	5.40	5.76	-0.045	6.555	5.11	28.28%	0.282779
8	5.60	5.05	0.06875	3.60875	4.99	-27.68%	0.276804
9	5.81	5.23	0.0725	3.7425	5.81	-35.59%	0.355852
10	5.62	4.81	0.10125	3.03125	5.3	-42.81%	0.428066
11	5.67	5.05	0.0775	3.7375	5.39	-30.66%	0.306586
12	5.71	4.93	0.0975	3.1775	5.26	-39.59%	0.395913
13	5.53	5.15	0.0475	4.2375	5.49	-22.81%	0.228142
14	5.75	5.15	0.075	3.555	5.32	-33.18%	0.331767
15	5.87	5.20	0.08375	3.40375	5.55	-38.67%	0.386712
16	5.84	4.81	0.12875	2.57875	5.36	-51.89%	0.51889
17	5.14	5.03	0.01375	4.99375	4.97	0.48%	0.004779
18	5.83	4.93	0.1125	2.5625	5.24	-51.10%	0.510973
19	5.79	4.89	0.1125	2.6725	5.37	-50.23%	0.502328
20	5.72	5.20	0.065	3.625	5.31	-31.73%	0.317326
21	5.41	5.17	0.03	4.57	5.12	-10.74%	0.107422
22	5.36	5.17	0.02375	4.52375	4.86	-6.92%	0.069187
23	5.48	5.12	0.045	4.475	4.7	-4.79%	0.047872
24	5.50	5.22	0.035	4.805	4.87	-1.33%	0.013347
25	5.65	4.82	0.10375	2.91375	5.1	-42.87%	0.428676
26	5.74	4.92	0.1025	3.1925	5.28	-39.54%	0.39536
27	5.60	4.93	0.08375	3.47375	5.28	-34.21%	0.342093
28	5.51	5.29	0.0275	4.8275	5.06	-4.59%	0.045949
29	5.42	5.27	0.01875	4.73875	5.1	-7.08%	0.070833
30	5.89	5.05	0.105	2.945	5.28	-44.22%	0.442235
31	5.81	4.95	0.1075	2.9575	5.16	-42.68%	0.426841
32	5.65	4.85	0.1	3	5.17	-41.97%	0.419729
33	5.34	4.94	0.05	4.08	5.07	-19.53%	0.195266
34	5.64	4.81	0.10375	3.10375	5.34	-41.88%	0.418773
35	5.65	5.05	0.075	3.705	5.3	-30.09%	0.300943
36	5.72	5.05	0.08375	3.46375	5.11	-32.22%	0.322162
37	5.53	5.05	0.06	4	5.19	-22.93%	0.229287
38	5.62	4.93	0.08625	3.33625	5.32	-37.29%	0.372885

39	5.58	5.25	0.04125	4.30125	5.35	-19.60%	0.196028
40	5.44	5.15	0.03625	4.57625	5.22	-12.33%	0.123324
41	5.65	5.20	0.05625	4.07625	5.13	-20.54%	0.205409
42	5.95	5.10	0.10625	3.06625	5.3	-42.15%	0.421462
43	5.55	5.25	0.0375	4.5075	5.09	-11.44%	0.11444
44	5.33	5.29	0.005	5.195	4.89	6.24%	0.062372
45	5.55	5.21	0.0425	4.5125	5.35	-15.65%	0.156542
46	5.31	5.05	0.0325	4.5925	4.96	-7.41%	0.074093
47	5.45	5.08	0.04625	4.32625	5.18	-16.48%	0.164817
48	5.63	5.04	0.07375	3.92375	5.19	-24.40%	0.243979
49	5.46	5.03	0.05375	4.13375	5.06	-18.31%	0.183053
50	5.25	5.17	0.01	5.09	4.71	8.07%	0.080679
51	5.23	5.05	0.0225	4.5125	4.89	-7.72%	0.077198
52	5.27	5.42	-0.01875	5.62125	4.85	15.90%	0.159021
53	5.33	5.42	-0.01125	5.41875	4.78	13.36%	0.13363
54	5.53	5.42	0.01375	5.14375	4.76	8.06%	0.08062
55	5.58	5.04	0.0675	3.8875	4.97	-21.78%	0.217807
56	5.70	5.19	0.06375	3.94375	5.15	-23.42%	0.234223
57	5.50	5.43	0.00875	5.24875	5	4.97%	0.04975
58	5.02	5.29	-0.03375	6.03625	5.21	15.86%	0.158589
59	5.57	4.93	0.08	3.4	5.22	-34.87%	0.348659
60	5.55	5.05	0.0625	3.7125	4.91	-24.39%	0.24389
61	5.37	5.54	-0.02125	5.92875	4.91	20.75%	0.207485
62	5.15	4.81	0.0425	4.1425	4.74	-12.61%	0.126055
63	5.33	5.08	0.03125	4.68125	4.99	-6.19%	0.061874
64	5.50	4.78	0.09	3.27	5.11	-36.01%	0.360078
65	5.90	5.43	0.05875	4.16875	5.27	-20.90%	0.208966
66	5.76	5.09	0.08375	3.39375	5.2	-34.74%	0.347356
67	5.44	5.05	0.04875	4.17875	5.04	-17.09%	0.170883
68	5.66	5.42	0.03	4.64	5.02	-7.57%	0.075697
69	5.40	5.11	0.03625	4.32625	4.91	-11.89%	0.11889
70	5.34	5.29	0.00625	4.90625	5.15	-4.73%	0.04733
71	5.87	4.89	0.1225	2.7325	5.32	-48.64%	0.486372
72	5.58	5.02	0.07	3.56	5.28	-32.58%	0.325758
73	5.92	5.08	0.105	2.875	5.32	-45.96%	0.459586
74	5.64	4.99	0.08125	3.28125	5.06	-35.15%	0.351532
75	5.59	5.17	0.0525	4.2625	5.16	-17.39%	0.173934
76	5.37	5.06	0.03875	4.38875	5.06	-13.27%	0.132658
77	5.79	5.28	0.06375	3.75375	5.3	-29.17%	0.291745

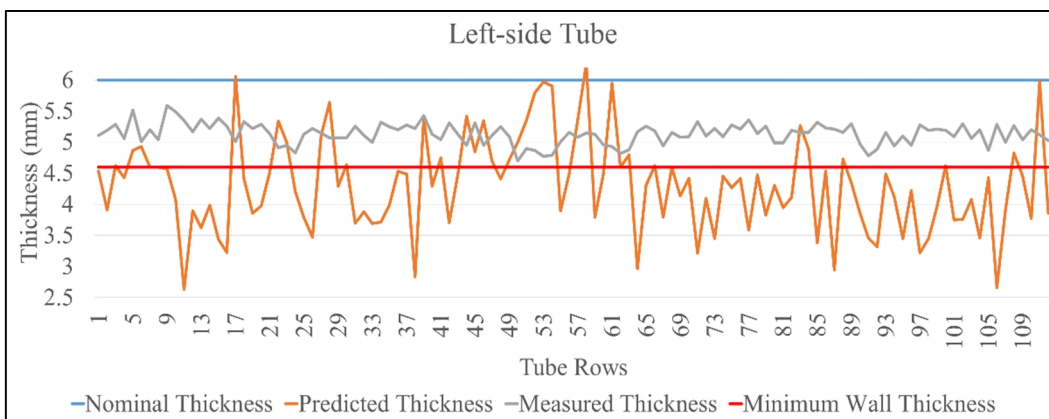
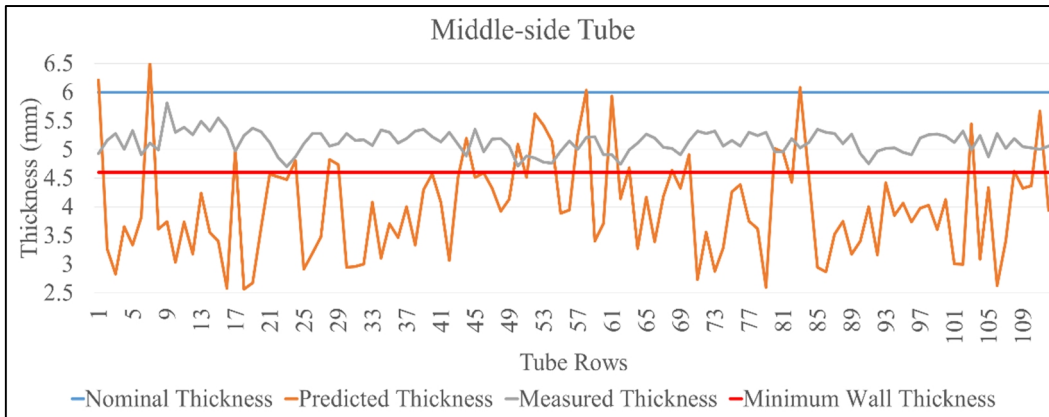
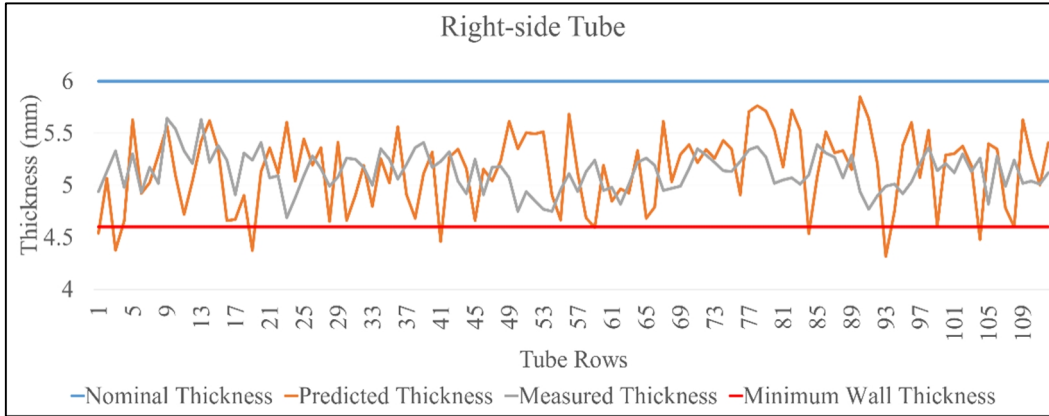
78	5.61	5.06	0.06875	3.61875	5.24	-30.94%	0.309399
79	5.85	4.91	0.1175	2.5975	5.3	-50.99%	0.509906
80	5.29	5.29	0	5.02	4.96	1.21%	0.012097
81	5.40	5.29	0.01375	4.95375	4.96	-0.13%	0.00126
82	5.40	5.17	0.02875	4.42875	5.19	-14.67%	0.146676
83	5.26	5.59	-0.04125	6.07875	5.03	20.85%	0.208499
84	5.25	5.03	0.0275	4.5375	5.12	-11.38%	0.11377
85	5.83	5.08	0.09375	2.94375	5.35	-44.98%	0.449766
86	5.70	4.92	0.0975	2.8675	5.3	-45.90%	0.458962
87	6.00	5.42	0.0725	3.5225	5.28	-33.29%	0.33286
88	5.61	5.14	0.05875	3.74875	5.1	-26.50%	0.264951
89	5.95	5.29	0.0825	3.1725	5.27	-39.80%	0.398008
90	5.66	5.08	0.0725	3.4025	4.93	-30.98%	0.309838
91	5.44	5.04	0.05	4	4.75	-15.79%	0.157895
92	5.57	4.83	0.0925	3.1625	4.97	-36.37%	0.363682
93	5.75	5.46	0.03625	4.41625	5.02	-12.03%	0.120269
94	5.59	5.12	0.05875	3.84875	5.03	-23.48%	0.234841
95	5.47	5.04	0.05375	4.06375	4.95	-17.90%	0.17904
96	5.71	5.27	0.055	3.735	4.91	-23.93%	0.239308
97	5.83	5.31	0.065	3.975	5.2	-23.56%	0.235577
98	5.74	5.19	0.06875	4.02875	5.26	-23.41%	0.234078
99	5.63	5.02	0.07625	3.60625	5.27	-31.57%	0.315702
100	5.60	5.16	0.055	4.125	5.23	-21.13%	0.211281
101	5.83	4.99	0.105	3.005	5.12	-41.31%	0.413086
102	5.89	5.10	0.09875	2.99875	5.32	-43.63%	0.436325
103	5.54	5.57	-0.00375	5.44625	4.99	9.14%	0.091433
104	5.76	4.95	0.10125	3.09125	5.24	-41.01%	0.410067
105	5.60	5.31	0.03625	4.33625	4.87	-10.96%	0.1096
106	5.95	5.00	0.11875	2.62875	5.28	-50.21%	0.502131
107	5.70	5.08	0.0775	3.4075	5.02	-32.12%	0.321215
108	5.54	5.19	0.04375	4.62375	5.19	-10.91%	0.109104
109	5.41	5.06	0.04375	4.32375	5.05	-14.38%	0.143812
110	5.59	5.20	0.04875	4.36875	5.03	-13.15%	0.131461
111	5.35	5.45	-0.0125	5.6675	5	13.35%	0.1335
112	5.70	5.21	0.06125	3.94125	5.06	-22.11%	0.221097
							27.95802
						MAPE	24.96252

No. ROW	KIRI						
	2014	2015	avg-rate / 1000hr	2019- Prediction	2019- Actual	difference	abs. Error
1	5.65	5.28	0.04625	4.53625	5.11	-11.23%	0.11228
2	5.59	5.03	0.07	3.91	5.19	-24.66%	0.246628
3	5.78	5.43	0.04375	4.62375	5.29	-12.59%	0.125945
4	5.76	5.42	0.0425	4.4325	5.06	-12.40%	0.124012
5	5.64	5.48	0.02	4.87	5.52	-11.78%	0.117754
6	5.45	5.26	0.02375	4.93375	5.01	-1.52%	0.01522
7	5.61	5.29	0.04	4.6	5.2	-11.54%	0.115385
8	5.45	5.22	0.02875	4.59875	5.04	-8.75%	0.08755
9	5.73	5.44	0.03625	4.57625	5.59	-18.14%	0.181351
10	5.57	5.08	0.06125	4.07125	5.49	-25.84%	0.258424
11	5.9	4.91	0.12375	2.63375	5.35	-50.77%	0.50771
12	5.56	5.05	0.06375	3.89375	5.17	-24.69%	0.246857
13	5.59	5.05	0.0675	3.6275	5.37	-32.45%	0.324488
14	5.75	5.29	0.0575	3.9875	5.22	-23.61%	0.236111
15	5.88	5.2	0.085	3.435	5.39	-36.27%	0.362709
16	5.8	5.04	0.095	3.225	5.26	-38.69%	0.386882
17	5.17	5.42	- 0.03125	6.05875	5.01	20.93%	0.209331
18	5.3	5.02	0.035	4.415	5.33	-17.17%	0.17167
19	5.52	5.05	0.05875	3.85875	5.22	-26.08%	0.260776
20	5.88	5.42	0.0575	3.9775	5.29	-24.81%	0.24811
21	5.58	5.31	0.03375	4.51375	5.14	-12.18%	0.121839
22	5.37	5.43	-0.0075	5.3425	4.91	8.81%	0.088086
23	5.25	5.08	0.02125	5.00125	4.95	1.04%	0.010354
24	5.67	5.17	0.0625	4.2025	4.83	-12.99%	0.129917
25	5.64	5.11	0.06625	3.79625	5.13	-26.00%	0.25999
26	5.81	5.09	0.09	3.47	5.22	-33.52%	0.335249
27	5.41	5.29	0.015	5.105	5.15	-0.87%	0.008738
28	5.54	5.55	- 0.00125	5.63875	5.07	11.22%	0.112179
29	5.48	5.17	0.03875	4.28875	5.07	-15.41%	0.154093
30	5.52	5.29	0.02875	4.63875	5.07	-8.51%	0.085059
31	5.66	5.05	0.07625	3.69625	5.26	-29.73%	0.297291
32	5.68	5.12	0.07	3.88	5.11	-24.07%	0.240705
33	5.4	4.81	0.07375	3.69375	5	-26.13%	0.26125
34	5.81	5.2	0.07625	3.71625	5.32	-30.15%	0.301457
35	5.4	4.93	0.05875	3.98875	5.25	-24.02%	0.240238
36	5.53	5.2	0.04125	4.53125	5.2	-12.86%	0.128606
37	5.74	5.42	0.04	4.49	5.28	-14.96%	0.149621

38	5.97	5.04	0.11625	2.83625	5.22	-45.67%	0.456657
39	5.48	5.5	-0.0025	5.3975	5.43	-0.60%	0.005985
40	5.47	5.09	0.0475	4.2975	5.13	-16.23%	0.162281
41	5.51	5.29	0.0275	4.7475	5.04	-5.80%	0.058036
42	6.11	5.43	0.085	3.705	5.31	-30.23%	0.30226
43	5.59	5.23	0.045	4.485	5.13	-12.57%	0.125731
44	5.43	5.44	-0.00125	5.41875	4.95	9.47%	0.094697
45	5.53	5.31	0.0275	4.8475	5.31	-8.71%	0.0871
46	5.4	5.42	-0.0025	5.3475	4.95	8.03%	0.080303
47	5.49	5.17	0.04	4.7	5.11	-8.02%	0.080235
48	5.63	5.23	0.05	4.41	5.25	-16.00%	0.16
49	5.44	5.14	0.0375	4.7175	5.09	-7.32%	0.073183
50	5.38	5.23	0.01875	4.99875	4.7	6.36%	0.063564
51	5.34	5.42	-0.01	5.35	4.9	9.18%	0.091837
52	5.26	5.48	-0.0275	5.7925	4.87	18.94%	0.189425
53	5.33	5.56	-0.02875	5.97125	4.77	25.18%	0.251834
54	5.57	5.6	-0.00375	5.90625	4.79	23.30%	0.233038
55	5.56	5.03	0.06625	3.89625	5.01	-22.23%	0.222305
56	5.5	5.16	0.0425	4.4925	5.16	-12.94%	0.12936
57	5.49	5.46	0.00375	5.34375	5.08	5.19%	0.051919
58	5.1	5.42	-0.04	6.26	5.15	21.55%	0.215534
59	5.58	5.06	0.065	3.795	5.13	-26.02%	0.260234
60	5.39	5.14	0.03125	4.48125	4.96	-9.65%	0.096522
61	5.32	5.56	-0.03	5.95	4.93	20.69%	0.206897
62	5.12	4.89	0.02875	4.59875	4.82	-4.59%	0.045902
63	5.41	5.19	0.0275	4.7975	4.88	-1.69%	0.016906
64	5.83	4.98	0.10625	2.96625	5.17	-42.63%	0.426257
65	5.65	5.19	0.0575	4.3075	5.26	-18.11%	0.181084
66	5.52	5.26	0.0325	4.6225	5.18	-10.76%	0.107625
67	5.59	4.98	0.07625	3.79625	4.94	-23.15%	0.231528
68	5.62	5.31	0.03875	4.59875	5.16	-10.88%	0.108769
69	5.42	5.05	0.04625	4.13625	5.08	-18.58%	0.185778
70	5.66	5.42	0.03	4.42	5.09	-13.16%	0.131631
71	5.76	4.93	0.10375	3.21375	5.33	-39.70%	0.397045
72	5.51	5.12	0.04875	4.09875	5.1	-19.63%	0.196324
73	5.65	5.06	0.07375	3.45375	5.22	-33.84%	0.338362
74	5.49	5.21	0.035	4.455	5.09	-12.48%	0.124754
75	5.72	5.31	0.05125	4.27125	5.28	-19.11%	0.191051
76	5.46	5.16	0.0375	4.4175	5.21	-15.21%	0.152111
77	5.89	5.29	0.075	3.585	5.36	-33.12%	0.331157

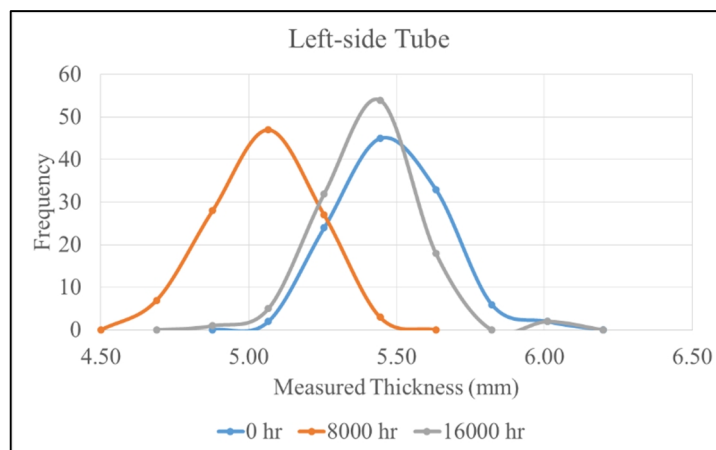
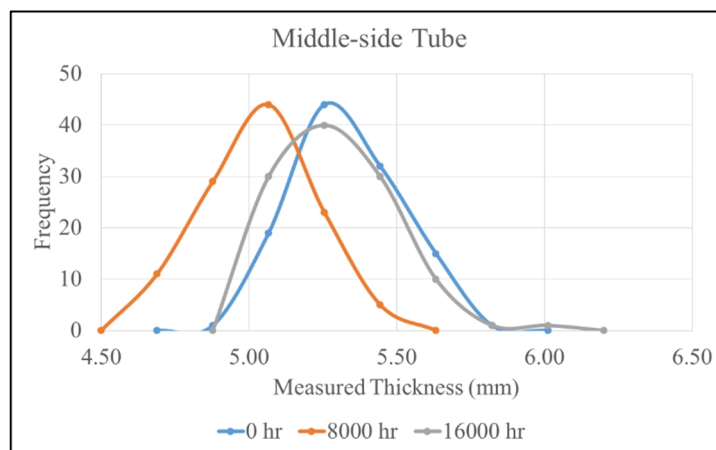
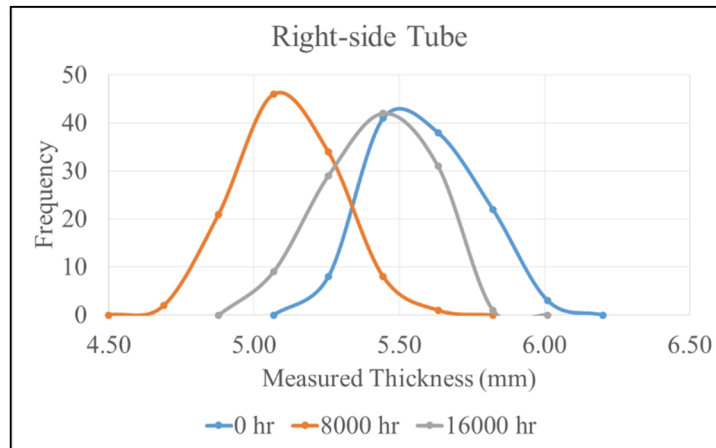
78	5.56	5.29	0.03375	4.47375	5.14	-12.96%	0.129621
79	5.72	5.19	0.06625	3.82625	5.26	-27.26%	0.272576
80	5.42	5.16	0.0325	4.3025	4.99	-13.78%	0.137776
81	5.54	5.09	0.05625	3.94625	4.99	-20.92%	0.209168
82	5.52	5.2	0.04	4.11	5.19	-20.81%	0.208092
83	5.26	5.26	0	5.27	5.16	2.13%	0.021318
84	5.3	5.17	0.01625	4.88625	5.16	-5.31%	0.053052
85	5.77	5.16	0.07625	3.38625	5.32	-36.35%	0.363487
86	5.63	5.42	0.02625	4.53625	5.23	-13.26%	0.132648
87	5.91	5.06	0.10625	2.94625	5.21	-43.45%	0.434501
88	5.39	5.23	0.02	4.73	5.16	-8.33%	0.083333
89	5.75	5.49	0.0325	4.3425	5.3	-18.07%	0.18066
90	5.68	5.22	0.0575	3.8575	4.97	-22.38%	0.223843
91	5.51	4.89	0.0775	3.4575	4.78	-27.67%	0.276674
92	5.6	4.92	0.085	3.315	4.89	-32.21%	0.322086
93	5.6	5.28	0.04	4.49	5.16	-12.98%	0.129845
94	5.64	5.25	0.04875	4.12875	4.94	-16.42%	0.164221
95	5.4	4.75	0.08125	3.45125	5.1	-32.33%	0.323284
96	5.57	5.21	0.045	4.225	4.95	-14.65%	0.146465
97	6.01	5.2	0.10125	3.22125	5.28	-38.99%	0.389915
98	5.81	5.08	0.09125	3.45125	5.19	-33.50%	0.335019
99	5.8	5.29	0.06375	3.96375	5.21	-23.92%	0.239203
100	5.43	5.1	0.04125	4.62125	5.19	-10.96%	0.109586
101	5.61	5.04	0.07125	3.75125	5.09	-26.30%	0.263016
102	5.68	5.12	0.07	3.76	5.3	-29.06%	0.290566
103	5.44	5.06	0.0475	4.0775	5.06	-19.42%	0.19417
104	5.72	5.06	0.0825	3.4625	5.2	-33.41%	0.334135
105	5.56	5.3	0.0325	4.4325	4.87	-8.98%	0.089836
106	5.99	5.02	0.12125	2.66125	5.29	-49.69%	0.496928
107	5.76	5.28	0.06	3.92	5	-21.60%	0.216
108	5.55	5.28	0.03375	4.82375	5.27	-8.47%	0.084677
109	5.53	5.23	0.0375	4.4575	5.04	-11.56%	0.115575
110	5.72	5.05	0.08375	3.77375	5.2	-27.43%	0.274279
111	5.41	5.6	-0.02375	5.98625	5.12	16.92%	0.169189
112	5.88	5.41	0.05875	3.85875	5.03	-23.29%	0.232853
							21.77668
						MAPE	19.44346

D. Kurva Prediksi vs Aktual Elbow C9

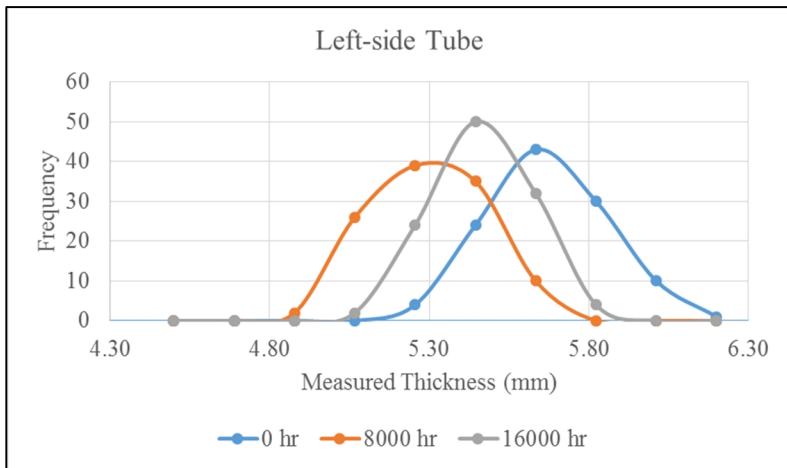
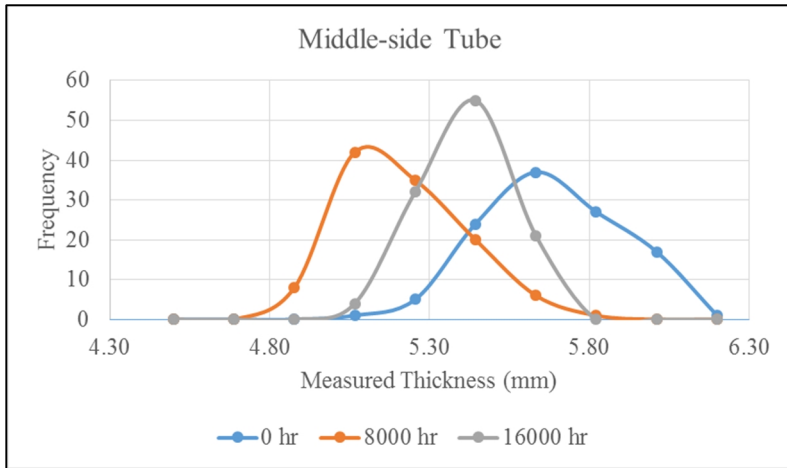
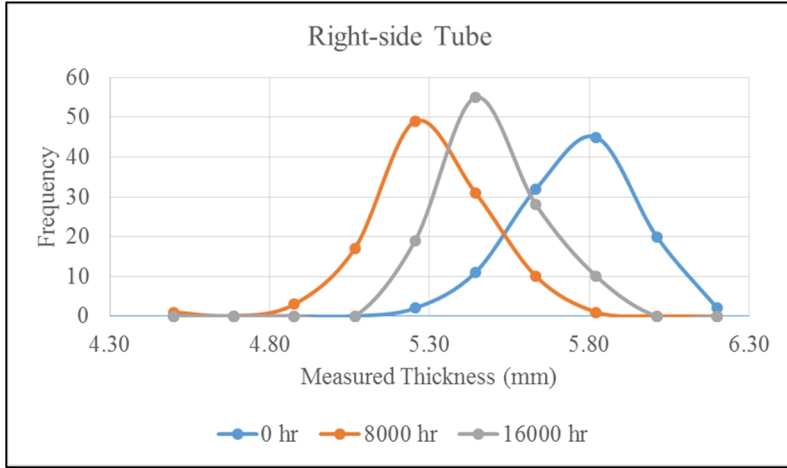


Lampiran 3 Kurva Distribusi

A. Elbow F10



B. Elbow C9



Lampiran 4 Prosedur Pengukuran Thickness



**INDONESIA POWER
INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM**

PROSEDUR In Power IMS

**THICKNESS
MEASUREMENT
BOILER & HRSG**

**NOMOR DOKUMEN : IPM.UJH.XX.XX
UNIT JASA PEMELIHARAAN**

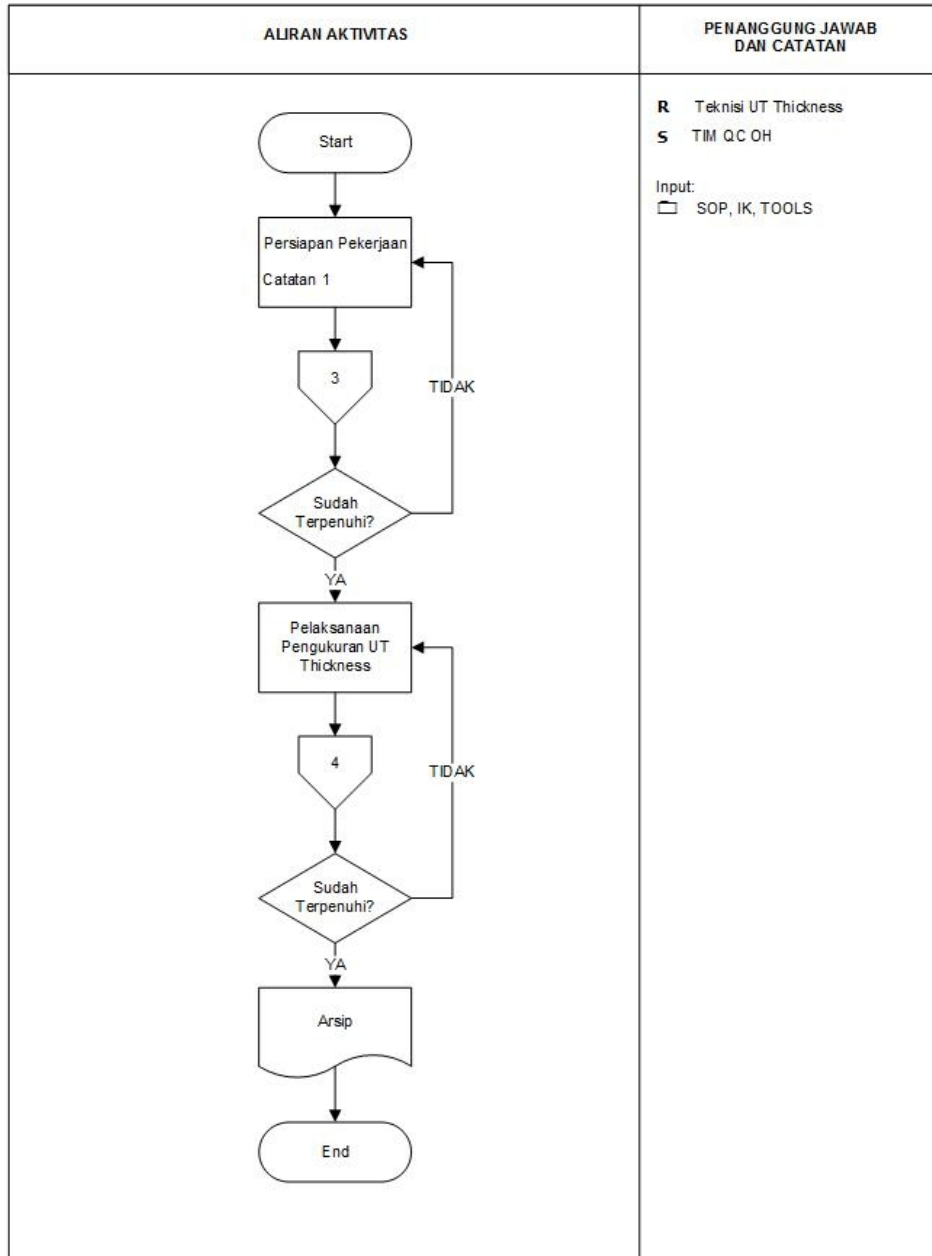


	PT INDONESIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN	Nomor Dokumen : IPM.UJH.XX.XX
	INDONESIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG	Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES	Halaman : 2/8

- 1. Sasaran** Sebagai pedoman teknis dalam melaksanakan **pengukuran thickness tube** sebagai salah satu metode asesmen kondisi komponen utama boiler dan HRSG untuk menjamin keselamatan (*safety*), ketersediaan (*availability*) dan keandalan (*reliability*) peralatan agar dapat beroperasi sesuai dengan umur desain yang telah ditentukan
- 2. Ruang Lingkup** Pedoman ini mencakup metodologi yang digunakan dalam pelaksanaan Pengukuran thickness tube boiler/HRSG pembangkit listrik tenaga uap *sub critical*
- 3. Definisi**
- K3L : Keselamatan dan Kesehatan Kerja dan Lingkungan
BA : Berita Acara
MSRV : Manajer Services
SRV : Bidang Services
QAS : Quality Assurance & Safety
UJH : Unit Jasa Pemeliharaan
DGMH : Deputy General Manager Bidang Pemeliharaan
GM : General Manager
KKP : Kelompok Keahlian Profesi
UP/UJP/URJP : Unit Pembangkitan/Unit Jasa Pemeliharaan/Unit Pembangkitan dan Jasa Pembangkitan
- 5. Ukuran Kinerja**
- Kinerja Proses : Terlaksananya pengukuran thickness tube boiler & HRSG sesuai scope overhaul
 - Kinerja produk : Hasil pengukuran thickness tube boiler & HRSG dapat dipertanggungjawabkan dan menjadi basis RLA
- 6. Klausul ISO 9001** : 7.5.1 Pengendalian Produksi dan Pemberian Layanan
- 7. Klausul ISO 14001** : 4.4.1 Sumber daya, Peran, Tanggung jawab dan Kewenangan
- 8. Klausul OHSAS 18001** : 4.4.1 Sumber daya, Peran, Tanggung jawab, Akuntabilitas dan Wewenang
- 9. Klausul ISO 55001** : 4.5.1 Aktivitas Siklus Waktu
- 10. Klausul ISO 50001** : -
- 11. SMK3** : 6.5 Pemeliharaan, Perbaikan, dan Perubahan Sarana Produksi
- 12. SMP** : Elemen 6 Pelatihan, Kepedulian dan Kompetensi Pengamanan
- 13. Kriteria Malcolm Baldrige** : -

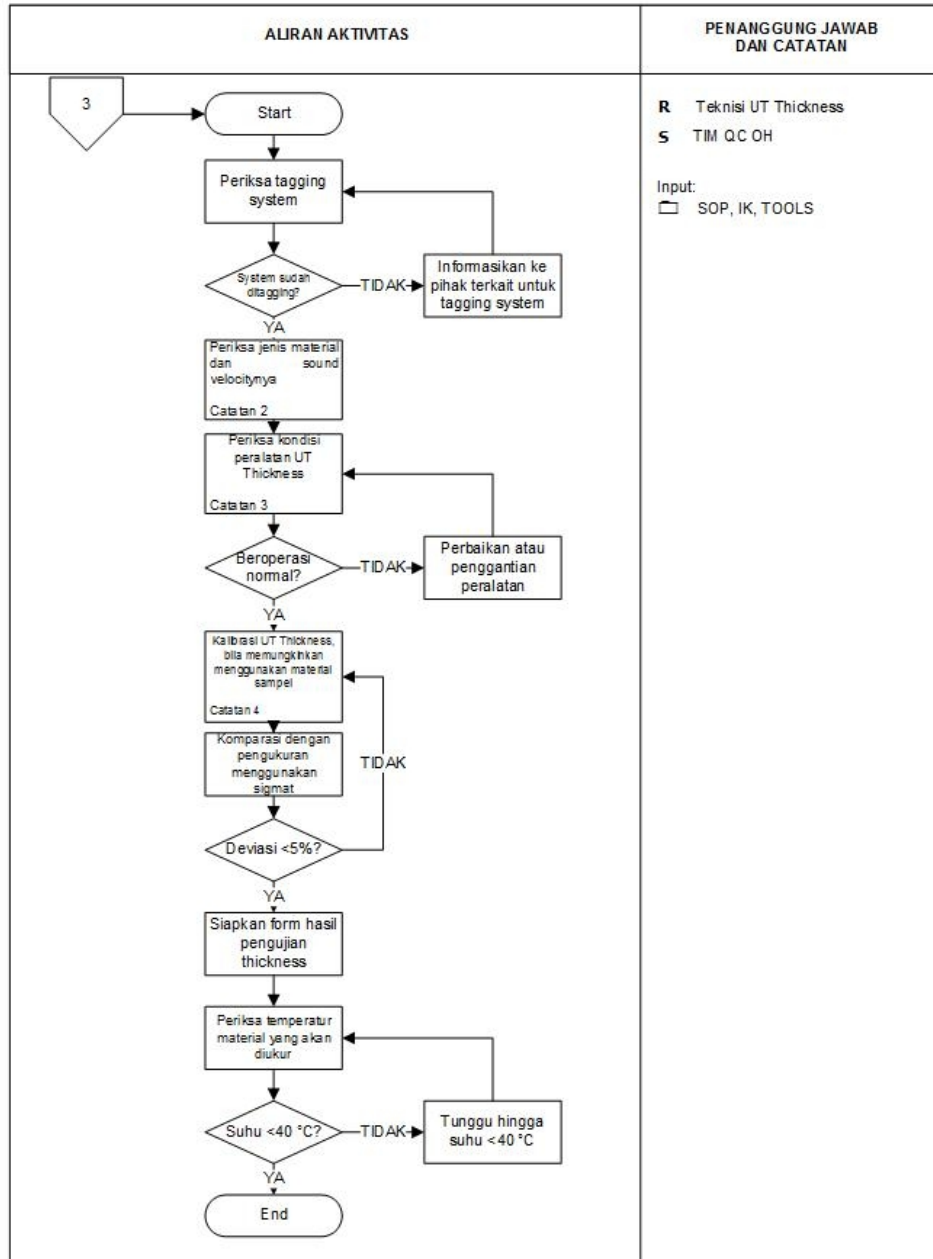
	PT INDONESIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN	Nomor Dokumen : IPM.UJH.XX.XX
	INDONESIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG	Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES	Halaman : 3/8

14. Rincian Prosedur



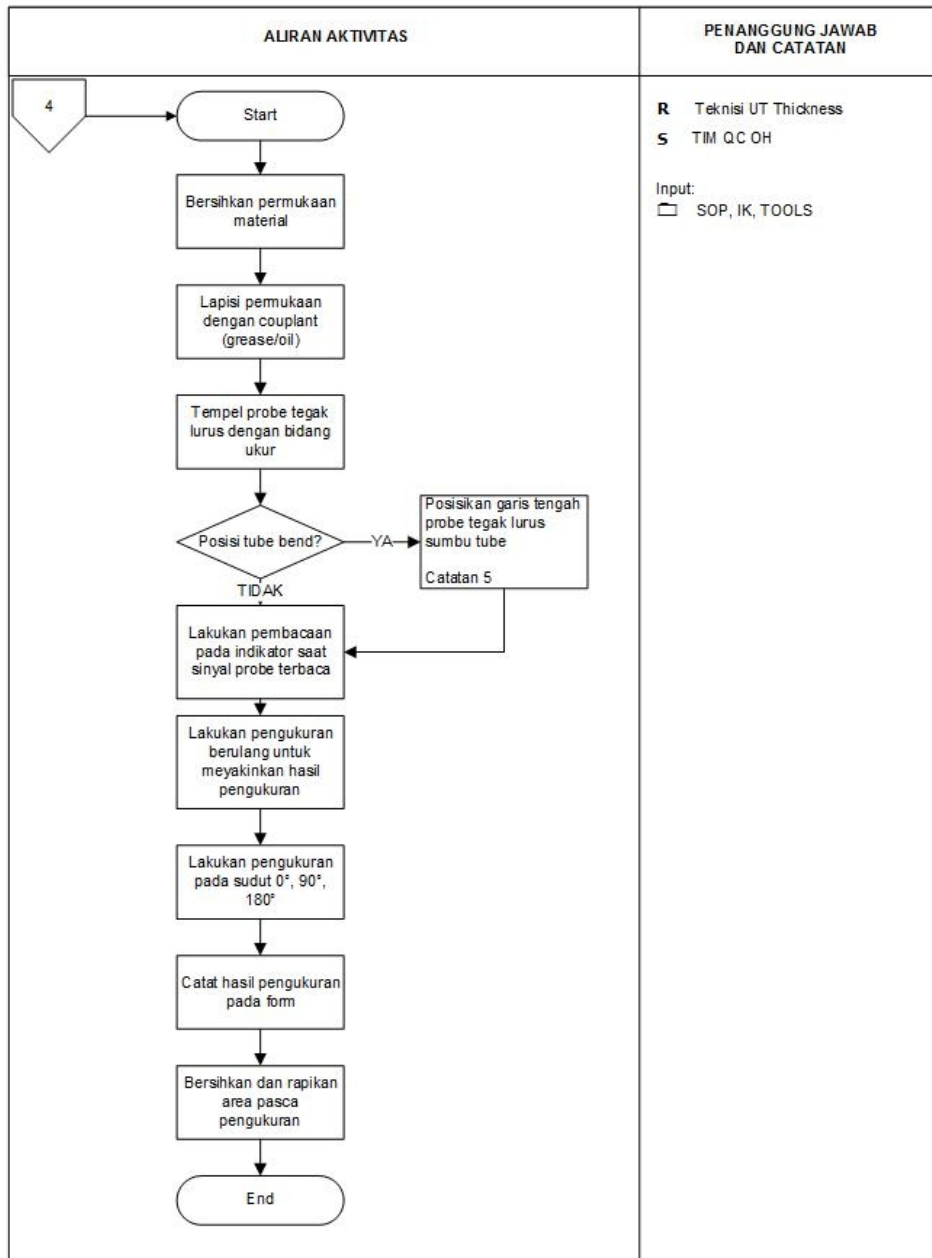
	PT INDONE SIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN	Nomor Dokumen : IPM.UJH.XX.XX
	INDONE SIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG	Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES	Halaman : 4/8

14. Rincian Prosedur



	PT INDONESIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN	Nomor Dokumen : IPM.UJH.XX.XX
	INDONESIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG	Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES	Halaman : 5/8

14. Rincian Prosedur



	PT INDONE SIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN	Nomor Dokumen : IPM.UJH.xx.xx
	INDONE SIA POWER INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM	Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG	Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES	Halaman : 6/8

15. Catatan Tambahan

Catatan 1 :

Risk assessment untuk pekerjaan ini adalah:

1. Bekerja dengan peralatan listrik, lingkungan berdebu, dan berada pada ketinggian
2. Bahaya tersengat aliran listrik, bahaya terjatuh, bahaya terkena percikan kotoran dari wire brush ke mata, bahaya peralatan rusak

Peralatan yang harus dipersiapkan sebelum pelaksanaan UT Thicness Boiler & HRSG

A. Safety Equipment:

1. Safety shoes
2. Safety harness
3. Safety helmet
4. Safety glass

B. Peralatan Kerja:

1. Thickness gauge dan probe
2. Rol kabel
3. Gerinda tangan
4. Sarung tangan
5. Masker debu
6. Baby grinder
7. Lampu kerja
8. Senter

Catatan 2 :

Jenis material dan sound velocitynya:

Material	Sound velocity		Material	Sound velocity	
	(m/s)	(in/s)		(m/s)	(in/s)
Aluminium	6350	0.250	Paraffin	2278	0.267
Bismuth	2164	0.086	Platinum	3162	0.156
Brass	4394	0.173	Plenoglas	2662	0.106
Cadmium	2769	0.109	Polystyrene	2337	0.092
Cast Iron	4572	0.180	Porcelain	5842	0.230
		(Approx.)			(Approx.)
Constantan	5232	0.206	PVC	2368	0.094
Copper	4674	0.184	Quartz Glass	5636	0.222
Epoxy Resin	3549	0.100	Rubber Vulcanized	2311	0.091
		(Approx.)			
German Silver	4750	0.187	Silver	3607	0.142
Glass, Crown	3664	0.223	Steel	5916	0.233
Glass, Flint	4267	0.168	Steel, Stainless	5664	0.223
Gold	3257	0.128	Stellite	6685	0.275
Ice	3088	0.157			(Approx.)
Iron	5893	0.232	Teflon	1422	0.056
Lead	2159	0.085	Tin	3327	0.131
Magnesium	5791	0.228	Titanium	6066	0.240
Mercury	1448	0.057	Tungsten	5334	0.210
Nickel	3636	0.227	Water	1473	0.058
Nylon	2591	0.102	Zinc	4216	0.166
		(Approx.)			

Catatan 3 :

Yang harus diperiksa pada thickness gauge dan probe:

1. Thickness gauge bisa dinyalakan atau tidak
2. Pembacaan baterai (penuh atau kosong), jika indikasi kosong segera ganti baterai (tipe AA)
3. Cek kondisi probe, bersihkan bila kotor
4. Pasang socket kabel probe ke thickness gauge

	PT INDONESIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN	Nomor Dokumen : IPM.UJH.xx.xx
	INDONESIA POWER <i>INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM</i>	Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG	Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES	Halaman : 7/8

15. Catatan Tambahan

Catatan 4 :
 Koordinasi dengan pihak UJP/OMU untuk bisa mendapatkan sampel material (potongan bekas repair maupun material yang di gudang) pada area pipa boiler & hrsg yang diukur thickness nya.

Catatan 5 :

Gambar probe pengukuran UT Thickness:

Posisi garis tengah ujung probe (yang dilingkari) apabila digunakan untuk pengukuran area tube bend diposisikan tegak lurus dengan sumbu pipa



Disusun Oleh : SpS Perencanaan SRV	Diperiksa Oleh : MSRV	Disahkan Oleh : MR

	PT INDONESIA POWER UNIT JASA PEMELIHARAAN		Nomor Dokumen : IPM.UJH.xx.xx
	INDONESIA POWER <i>INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEM</i>		Tanggal Terbit : 01 Desember 2019
	THICKNESS MEASUREMENT BOILER & HRSG		Revisi :
	SPS PERENCANAAN SERVICES		Halaman : 8/8

16. Riwayat Perubahan

NO	TANGGAL	BAGIAN YANG DIUBAH		PERUBAHAN	
		POIN	URAIAN	POIN	URAIAN

Lampiran 5 Perbandingan Pengukuran antara DM5E dengan Sigmat pada Tube Bend

A. Pengukuran dengan Sigmat



Pengukuran 1



Pengukuran 2

B. Pengukuran dengan DM5E sudut 0° terhadap Sumbu Pipa



Pengukuran 1



Pengukuran 2

C. Pengukuran Thickness dengan DM5E sudut 90° terhadap Sumbu Pipa



Pengukuran 1



Pengukuran 2

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



MUHAMMAD AUJUL MAJDI, lahir di Yogyakarta pada hari Rabu tanggal 5 Desember 1984 merupakan putra sulung dari pasangan Ibu Siti Maryam dan Bapak Machasin. Penulis sudah berkeluarga dengan 1 orang istri Heny Purwandani dan 2 orang anak Azmi Hanan Majdi dan Arfin Hamizan Majdi. Pendidikan formal dasar ditempuh di SD Negeri Terban Taman 1 Sleman Yogyakarta, dan lulus pada tahun 1996. Pendidikan selanjutnya ditempuh di SMP Negeri 8 Yogyakarta, lulus tahun 1999, dan di SMA Negeri 3 Yogyakarta, lulus tahun 2002. Dari jenjang SMA penulis melanjutkan ke jenjang Sarjana Jurusan Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada yang dijalani sejak tahun 2002 hingga tahun 2007. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan studi pascasarjana di Departemen Teknik Mesin, Program Studi S2 Manajemen Energi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Alamat e-mail: ma.majdi@indonesiapower.co.id atau aujul.majdi@gmail.com.