



# TESIS

Tesis - TF142320

## KONTROL DAN OPTIMISASI *TEMPERATURE PROFILE* PADA NICKEL KILN UNTUK MENURUNKAN EMISI SO<sub>2</sub> MENGGUNAKAN MPC (*MODEL PREDICTIVE CONTROL*) BERBASIS NEURAL NETWORK

LEO AGUNG ARIE PURNOMO  
NRP. 02311650022011

DOSEN PEMBIMBING  
TOTOK RUKI BIYANTO, ST, MT, PhD

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

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

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Leo Agung Arie Purnomo

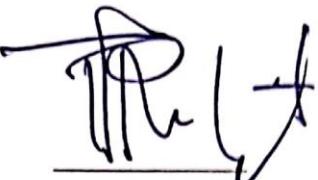
NRP. 02311650022011

Tanggal Sidang Tesis : 10 Januari 2019

Periode Wisuda : Maret 2019

Disetujui oleh:

1. Totok Ruki Biyanto, ST, MT, PhD  
NIP. 19710702 199802 1 001



(Pembimbing)

2. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, PhD.  
NIP. 19780902 200312 1 002



(Pengaji I)

3. Dr. Ir. Ali Musyafa, MSc  
NIP. 19600901 198701 1 001



(Pengaji II)

Dekan Fakultas Teknologi Industri,



Bambang Celono Widjiantoro, S.T., M.T.  
NIP. 19690507 199512 1 001

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **KONTROL DAN OPTIMISASI TEMPERATURE PROFILE PADA NICKEL KILN UNTUK MENURUNKAN EMISI SO<sub>2</sub> MENGGUNAKAN MPC (MODEL PREDICTIVE CONTROL) BERBASIS NEURAL NETWORK**

Nama Mahasiswa : Leo Agung Arie Purnomo  
NRP : 02311650022011  
Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, ST, MT, PhD

## **ABSTRAK**

Proses *pyrometallurgy* pada pemurnian nikel menggunakan *rotary kiln* untuk proses kalsinasi dan reduksi dengan cara dipanaskan (pembakaran). Proses kalsinasi bertujuan untuk menghilangkan *water content* yang terikat secara kimiawi pada *ore* nikel yang sudah dikeringkan. Proses reduksi bertujuan untuk melepaskan oksigen (O) dari ikatan kimiawi metal oksida ( $Fe_2O_3$  dan  $NiO_2$ ). Penambahan sulfur (S) dilakukan agar terjadi proses sulfurisasi antara Fe dan Ni dengan S menjadi  $FeS$  dan  $NiS$ , sedangkan O berikatan dengan C menjadi  $CO_2$ . Proses sulfurisasi yang tidak sempurna membuat S berikatan dengan O menjadi  $SO_2$  yang dibuang pada *stack* sehingga menjadi emisi  $SO_2$  di *stack*. Untuk memastikan proses kalsinasi terjadi maka *temperature profile* harus dijaga secara *gradual* dari *Feed End* ke *Discharge End* dengan cara mengatur proses aerasi sepanjang *kiln*. Proses aerasi dijaga dengan memberikan supply udara pada 4 *tertiary air flow*. Hubungan antara *temperature profile* dan emisi  $SO_2$  merupakan system *multivariable* dan *nonlinear* kompleks sehingga dipilih metode stokastik *Neural Network* untuk mendapatkan pemodelannya dengan menggunakan data-data historical lapangan. Hasilnya akan diaplikasikan pada *Model Predictive Control* untuk mengendalikan *temperature* dengan memanipulasi variabel *tertiary air flow*.  $SO_2$  diminimumkan dengan menggunakan *Duelist Algorithm* untuk mendapatkan setpoint *temperature*. 6 *variable* utama yang terkait dengan kendali  $SO_2$  adalah bahan bakar total, *ore feed*, batubara, sulfur, *temperature* pada titik ke-5 dan  $SO_2$  itu sendiri. Dengan pemodelan *neural network* dan optimisasi *Duelist Algorithm* didapatkan nilai optimum  $F_{tot} = 62814 \text{ kg/h}$ ,  $M_{ore} = 208\text{ton/h}$ ,  $M_{coal} = 7416 \text{ kg/h}$ ,  $S = 1814 \text{ kg/h}$ ,  $T_5 = 834 \text{ C}$  untuk mendapatkan nilai minimum  $SO_2 = 2090 \text{ ppm}$ . Temperature control diaplikasikan menggunakan MPC untuk menjaga nilai  $T_5$  pada setpoint 834 C, didapat parameter tuning *Control interval* = 3 detik, *Prediction horizon* = 70, *Control horizon* = 30. Penelitian ini mengambil study kasus Kiln#5 di PT Vale Indonesia Tbk, Soroako – Sulawesi Selatan.

Kata kunci: Emisi  $SO_2$ , MPC, *Neural Network*, *Rotary Kiln*, *Temperature Profile*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

***CONTROL AND OPTIMIZATION OF TEMPERATURE PROFILE IN NICKEL KILN TO REDUCE SO<sub>2</sub> EMISSION BY NEURAL NETWORK BASED MPC (MODEL PREDICTIVE CONTROL)***

Name	:	Leo Agung Arie Purnomo
NRP	:	02311650022011
Supervisor	:	Totok Ruki Biyanto, ST, MT, PhD

***ABSTRACT***

*Pyrometallurgical process in nickel processing uses rotary kiln to calcination and reduction process by increasing the temperature (burning process). Calcination process is to eliminate water content which is bound chemically in the dried nickel ore. Reduction process is to release oxygen (O) from chemical bond of metal oxide ( $Fe_2O_3$  and  $NiO_2$ ). Sulfur (S) addition is for sulfurization between Fe/Ni and S so that becoming  $FeS$  and  $NiS$ , while O to be bound with C becoming  $CO_2$ . Undesired sulfurization occurs when S to be bound with O becoming  $SO_2$  which will be released in the stack then becoming  $SO_2$  emission. To ensure calcination process occurs, temperature profile shall be maintained gradually from Feed End area into Discharge End area by manipulating aeration process alongside the kiln. The aeration is maintained by injecting fresh air into 4 tertiary air flows. The relationship between temperature profile and  $SO_2$  emission is multivariable and nonlinear complex system then Neural Network stochastic method has been chosen to model by using empirical historian data. The result will be applied into Model Predictive Control to control temperature by manipulating tertiary air flow.  $SO_2$  minimized by using Duelist Algorithm to get temperature setpoint. 6 important variables chosen to control  $SO_2$  are total fuel, nickel ore feed, coal feed, sulfur feed, temperature at point-5 and  $SO_2$  itself. By neural network modeling and Duelist Algorithm optimization, the optimum values are  $F_{tot} = 62814 \text{ kg/h}$ ,  $M_{ore} = 208\text{ton/h}$ ,  $M_{coal} = 7416 \text{ kg/h}$ ,  $S = 1814 \text{ kg/h}$ ,  $T_5 = 834 \text{ C}$  to achieve minimum value of  $SO_2 = 2090 \text{ ppm}$ . Temperature control is applied by MPC to maintain  $T_5$  at setpoint 834 C. parameter tuning of MPC are Control interval = 3 seconds, Prediction horizon = 70, Control horizon = 30. This research is case study of Kiln no.5 in PT Vale Indonesia Tbk, Soroako – South Sulawesi.*

*Keywords:*  $SO_2$  emission, MPC, Neural Network, Rotary Kiln, Temperature Profile

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

### DEO GRATIAS!

Puji Syukur kepada Tuhan Yesus dan Bunda Maria, atas rahmat dan berkatNya sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian dan laporan tesis ini dengan judul

**“KONTROL DAN OPTIMISASI TEMPERATURE PROFILE PADA NICKEL KILN UNTUK MENURUNKAN EMISI SO<sub>2</sub> MENGGUNAKAN MPC (MODEL PREDICTIVE CONTROL) BERBASIS NEURAL NETWORK”**

Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan S2 dalam bidang keahlian Rekayasa Energi Terbarukan pada program studi Pascasarjana Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam penggerjaan penelitian ini ditemukan banyak kesulitan dan tantangan, disamping juga beberapa kemudahan. Oleh karenanya penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan sehingga kritik, usul dan saran sangat membangun demi kesempurnaan penelitian itu sendiri.

Dalam prosesnya, berbagai pihak telah berbaik hati untuk terus memberi semangat beserta bantuan moral dan material. Oleh karenanya dalam kesempatan ini, ijinkan penulis secara khusus mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang tak terhingga kepada:

1. Ani istriku dan Kirana, Danis anak-anakku. Merekalah semangat dan hidupku setiap hari. Bapak Ibu dan adik-adik semua yang selalu membawa dalam doanya.
2. Bapak Profesor Totok Ruki Biyanto, ST, MT, PhD selaku dosen pembimbing, merangkap teman dekat, saudara. Terimakasih atas nasehat, wejangan, ide serta semua bantuan yang telah diberikan. *It's priceless...*
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro atas semua arahan dan kesabaran sehingga program kerjasama industri ini bisa terlaksana.
4. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, PhD. selaku dosen wali sekaligus dosen penguji dan kepala departemen.
5. Bapak Dr.rer.nat.Ir. Aulia M. T. Nasution selaku kaprodi pascasarjana Teknik fisika
6. Bapak Ali Musyafa, Bapak Gunawan Nugroho, Ibu Doty Dewi Risanti, Bapak Syamsul Arifin, Ibu Prof. Aulia SA, Bapak Totok Soehartanto, Ibu Katherin, Bapak Imam Abadi, beserta seluruh dosen dan tenaga kependidikan Teknik fisika ITS.

7. Yanu Sukarno dan Firdaus Muttaqi, Process Engineer PT Vale Indonesia Tbk, atas *sharing knowledge* serta ide yang cemerlang yang melatarbelakangi tema tesis ini
8. Bapak Mohammad Rifai dan Ibu Yunita Rahmuddin selaku supervisor di PT Vale Indonesia Tbk yang memberi saya cukup ruang untuk menyelesaikan studi dan pengajaran tesis
9. Rekan-rekan Electrical-Instrument Section dari Departemen Engineering, rekan-rekan Process Technology dan Kiln area di Process Plant, PT Vale Indonesia Tbk
10. Mbak Martha Hardiyah dan Musryanto selaku tenaga administrasi yang selalu membantu dari sisi Surabaya dan Sorowako
11. Nyoman, Brian, Deni beserta rekan-rekan sesama S2 teknik fisika lainnya yang selalu siap untuk membantu
12. Afin beserta rekan-rekan lab larin serta adik-adik S1 semua
13. Pak Jali beserta jajarannya yang senantiasa mendampingi sejak S1 sampai S2 ini
14. Serta semua pihak yang telah banyak membantu dan mendukung yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Selain itu, penulis mengucapkan permintaan maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kesalahan baik tutur maupun perbuatan selama masa studi di Teknik fisika.

Semoga apa yang disajikan dalam tesis ini bisa bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta sebagai bahan diskusi untuk kemajuan perusahaan PT Vale Indonesia Tbk. Sekian.

Surabaya, Januari 2019

Leo Agung Arie Purnomo

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	v
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
BAB 2 DASAR TEORI .....	5
2.1 Proses <i>Smelting</i> di PT Vale Indonesia Tbk .....	5
2.2 Proses <i>Reduction Kiln</i> di Industri Nikel .....	5
2.2 Neural Network Model .....	11
2.2.1 <i>Multilayer Networks</i> .....	14
2.2.2 <i>Recurrent Networks</i> .....	16
2.3 <i>Model Predictive Control</i> .....	17
2.3.1 <i>Tuning MPC</i> .....	19
BAB 3 METODOLOGI .....	21
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	21
3.2 <i>Setup Software</i> .....	23
BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	25
4.1 Pemodelan <i>Neural Network</i> .....	25
4.2 Optimisasi Output .....	28
4.3 Temperature Control .....	29

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	33
DAFTAR PUSTAKA.....	35
LAMPIRAN A – DATA LAPANGAN .....	39
LAMPIRAN B – GRAFIK R <sup>2</sup> .....	59
BIOGRAFI .....	64

## **DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1 Pemrosesan nikel di PT Vale Indonesia Tbk .....	6
Gambar 2.2 Reduction Kiln Flow Sheet di PT Vale Indonesia Tbk .....	7
Gambar 2.3 HMI Kiln #5 Overview di PT Vale Indonesia Tbk.....	7
Gambar 2.4 Proses fuel atomizing .....	9
Gambar 2.5 Proses cracking rantai karbon .....	9
Gambar 2.6 Hubungan Aerasi Terhadap Temperature .....	10
Gambar 2.7 Profile Temperature pada Kiln 100m dan 5 Air-Pipe .....	11
Gambar 2.8 Struktur neural network.....	14
Gambar 2.9 3-layer Neural network.....	15
Gambar 2.10 Blok Diagram dari 3-layer Neural network.....	15
Gambar 2.11 Hopfield network.....	16
Gambar 2.12 Blok Diagram dari Hopfield Network.....	17
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2 Diagram Alir Neural Network pada Matlab.....	24
Gambar 4.1 Diagram blok Neural Network untuk SO <sub>2</sub> .....	26
Gambar 4.2 Grafik training Neural Network untuk SO <sub>2</sub> .....	27
Gambar 4.3 Grafik validasi Neural Network untuk SO <sub>2</sub> .....	27
Gambar 4.4 Open loop T <sub>5</sub> vs FOPDT model .....	30
Gambar 4.5 Close loop respon T <sub>5</sub> dengan MPC .....	31

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1 R <sup>2</sup> semua variable terhadap SO <sub>2</sub> .....	25
Tabel 4.2 RMSE neural network untuk SO2 .....	27

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Nikel adalah bahan logam yang sangat penting dalam dunia modern dewasa ini baik untuk infrastruktur maupun teknologi. Sekalipun jarang digunakan dalam bentuk murninya, nikel digunakan sebagai material tambahan hampir di semua produk logam yang tersedia di pasaran. Penggunaan paling besar adalah pada *stainless steel*, *alloys*, *electroplating*, dan baterai isi ulang (*rechargeable battery*) [1]. Bahkan dalam produksi *stainless steel*, nikel adalah komponen utama sebagai pembentuk *stainless steel*. Penambahan nikel dalam setiap campuran logam memberikan resistansi korosi yang lebih baik, kekuatan dan ketahanan pada temperature rendah dan tinggi. Di alam bebas, nikel tersedia dalam dua tipe yaitu *laterite ore* dan *sulfide ore* [1]. Karakteristik ketersediaan di alam, proses penambangan dan pemurniannya adalah berbeda untuk kedua tipe tersebut. *Laterite ore* cenderung berada di daerah tropis dengan metode penambangan terbuka, seperti halnya di Indonesia tepatnya di Soroako, Sulawesi Selatan dimana kontrak karya penambangan dan pemurnian nikel dimiliki oleh PT Vale Indonesia Tbk.

Ada dua tipe pengolahan nikel, yaitu metode *hydrometallurgy* dan *pyrometallurgy*. Pada proposal penelitian ini, dengan mengambil obyek studi di PT Vale Indonesia Tbk maka hanya akan dibahas proses *pyrometallurgy* sebagaimana proses operasional di perusahaan tersebut. Proses *pyrometallurgy* adalah dengan melebur *ore* menjadi logam feronikel. Ada dua prinsip utama untuk peleburan *laterite ore* menjadi feronikel yaitu prinsip pertama dengan mereduksi *nickel oxides* dan *iron oxides* menjadi logam nikel dan besi. Prinsip kedua adalah bahwa *laterite ore* tidak bisa dilebur menjadi logam nikel murni yang tanpa besi [2]. Empat langkah utama dari proses ini adalah *dewatering* yaitu menghilangkan kadar air yang ada pada konsentrasi yang terikat secara mekanis, *kalsinasi* yaitu menghilangkan kadar air yang terikat secara kimiawi pada *ore* yang telah kering, reduksi yaitu menghilangkan kadar oksigen dari oksida nikel dan besi pada *calcine* dan *refining* yaitu menghilangkan material pengotor seperti sulfur dan fosfor dari

feronikel cair/lebur [2]. Proses *dewatering* terjadi di *Rotary Dryer*, kalsinasi dan reduksi terjadi di *Reduction Kiln*, *refining* terjadi di *Furnace*. PT Vale Indonesia memiliki 3 *Rotary Dryer*, 5 *Reduction Kiln*, 4 *Electric Furnace* dan 3 *Converter*. Pada proposal penelitian ini akan mengambil obyek studi *Kiln* nomor 5 yang merupakan *kiln* dengan kapasitas terbesar di PT Vale Indonesia Tbk.

Proses pembakaran di *kiln* adalah dengan *counter-current* dengan dijaga agar terjadi pembakaran tidak sempurna di sepanjang *kiln* kecuali di lokasi paling ujung yaitu di *feed-end*. Profil *temperature* harus dijaga dari 650 – 900 C dari ujung *feed-end* sampai *discharge-end* secara *gradual*. *Temperature* ini akan memastikan bahwa proses kalsinasi dan reduksi bisa terjadi. Dengan menjaga agar pembakaran sempurna tidak terjadi di area *discharge-end* maka besi (Fe) dan nikel (Ni) akan melepaskan ikatan dengan O sehingga menjadi tidak stabil dan bermuatan positif. Pada kondisi ini diinjeksikan sulfur (S) dengan tujuan untuk mengikat Fe dan Ni yang tidak stabil tersebut dan diharapkan O akan berikatan dengan C menjadi CO<sub>2</sub>. Proses ini disebut sulfidisasi atau oleh operator disebut *fixasi sulphur* [3]. Fe dan Ni harus dilepas dari O agar tidak terjadi ledakan di ruang *furnace*. Demikian pula sulfur harus segera berikatan dengan Fe dan Ni agar tidak terikat dengan O sehingga menjadi SO<sub>2</sub>, dimana ini merupakan emisi di atmosfer. Proses ini sangat erat kaitannya dengan *temperature* sepanjang *kiln* dengan menjaga aerasi di ruang bakar *kiln*, dimana dalam prosesnya hanya dikendalikan oleh 4 *air pipe* yang berfungsi memberikan *supply* udara ke dalam ruang *kiln*. Namun demikian, proses pembakaran tidak sempurna ini harus sudah selesai sebelum memasuki area *feed-end*. Di area *feed-end* harus diusahakan terjadi pembakaran sempurna agar tidak terbentuk gas CO yang nantinya dilepas ke atmosfer melalui *stack*. Selain menjadi emisi CO berlebih juga berpotensi menimbulkan percikan api di ruang ESP (*Electro Static Precipitator*). Itulah sebabnya kadar CO dan SO<sub>2</sub> yang keluar dari *kiln* harus diminimalkan dari bahaya operasional serta emisi. Hubungan antara aerasi oleh 4 *air-pipe* dengan kadar CO dan SO<sub>2</sub> adalah tidak *linear* dan sangat kompleks, disamping juga *multivariable*. Hal inilah yang menyebabkan keempat *air-pipe* tidak dikendalikan secara *auto* oleh PLC melainkan dikendalikan secara manual oleh operator dengan selalu memperhatikan profil *temperature* dari ujung *feed-end* ke

*discharge-end*, nilai CO dan SO<sub>2</sub> secara terus menerus. Apabila proses ini bisa digantikan secara auto oleh perhitungan secara *real-time* tentunya akan sangat meringankan beban operator, membuat proses lebih *reliable*, tidak terjadi deviasi yang tajam antar shift operator dan kualitas produk akan lebih baik.

Ketidakmampuan system control konvensional dalam mengendalikan 4 *air-pipe* ini dikarenakan system ini adalah tidak *linear, multivariable* dan memiliki hubungan yang cukup kompleks. Penelitian lain [4] telah berhasil menerapkan MPC (*model predictive control*) pada *real plant* untuk *calciner kiln* di industri semen. Dibandingkan dengan *controller* konvensional, MPC dapat mengatasi gangguan lebih baik sehingga meningkatkan produktivitas, mengurangi konsumsi energy dan kualitas produk yang lebih baik [4].

Untuk mendapatkan model yang tepat dan valid untuk *real plant kiln*, telah dilakukan penelitian menggunakan *neural network* [5]. Hasilnya bisa dengan akurat dan cepat digunakan untuk memprediksi nilai dari dua karakteristik mekanis dari sebuah design *kiln* baru yaitu *maximum stress* dan deformasi di setiap titik pada sisi *shell* sehingga memungkinkan *designer* untuk menyesuaikan parameter design dengan tepat [5][6].

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Emisi SO<sub>2</sub> tidak bisa dikendalikan secara optimal dan auto sampai dengan saat ini.
- b. Profil temperature masih dikontrol manual oleh operator dengan menaik-turunkan nilai *tertiary air flow* berdasarkan insting operator.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Mendapatkan model *Neural Network* untuk menjelaskan hubungan antara *temperature profile* dengan emisi SO<sub>2</sub>

- b. Menerapkan model *Neural Network* yang telah didapatkan ke dalam strategi *control MPC* (*Model Predictive Control*) untuk memberikan input *temperature setpoint* pada 6 titik *thermocouple* sebagai setpoint untuk *controller*.
- c. Menerapkan strategi *temperature control* PID dengan nilai *setpoint* hasil MPC.

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 Proses *Smelting* di PT Vale Indonesia Tbk

PTVI mengoperasikan fasilitas penambangan dan pengolahan nikel yang terintegrasi di Soroako, Sulawesi Selatan. Jenis *ore* yang terdapat di area ini adalah *laterite ore*, ditambang dengan cara mengangkat lapisan *overburden* dan *limonitic*, menurunkan *moisture* bebas dari *ore* sampai kurang lebih 20% di *rotary dryer*, kemudian *re Recover* nikel menjadi nikel *matte* menggunakan system *Reduction Kiln & Electric Furnace* (RKEF). Pabrik ini telah selesai di-commissioning pada 1977 dimana secara bertahap dilakukan ekspansi di tahun 1988 dan 2000. Saat ini *process plant* memiliki 3 *rotary dryer*, 5 *reduction kiln*, 4 *electric furnace* dan 3 *Pierce-Smith converter*, ditambah kemampuan yang meningkat di area pertambangan. Saat ini kapasitas produksi telah meningkat menjadi 78,000 ton nikel per tahun dalam bentuk nikel sulfida *matte*. Karena *laterite ore* tidak mengandung sulfur, maka sulfur harus ditambahkan ke dalam sistem pengolahan yaitu di *kiln* [7]. Secara garis besar proses digambarkan pada gambar 2.1.

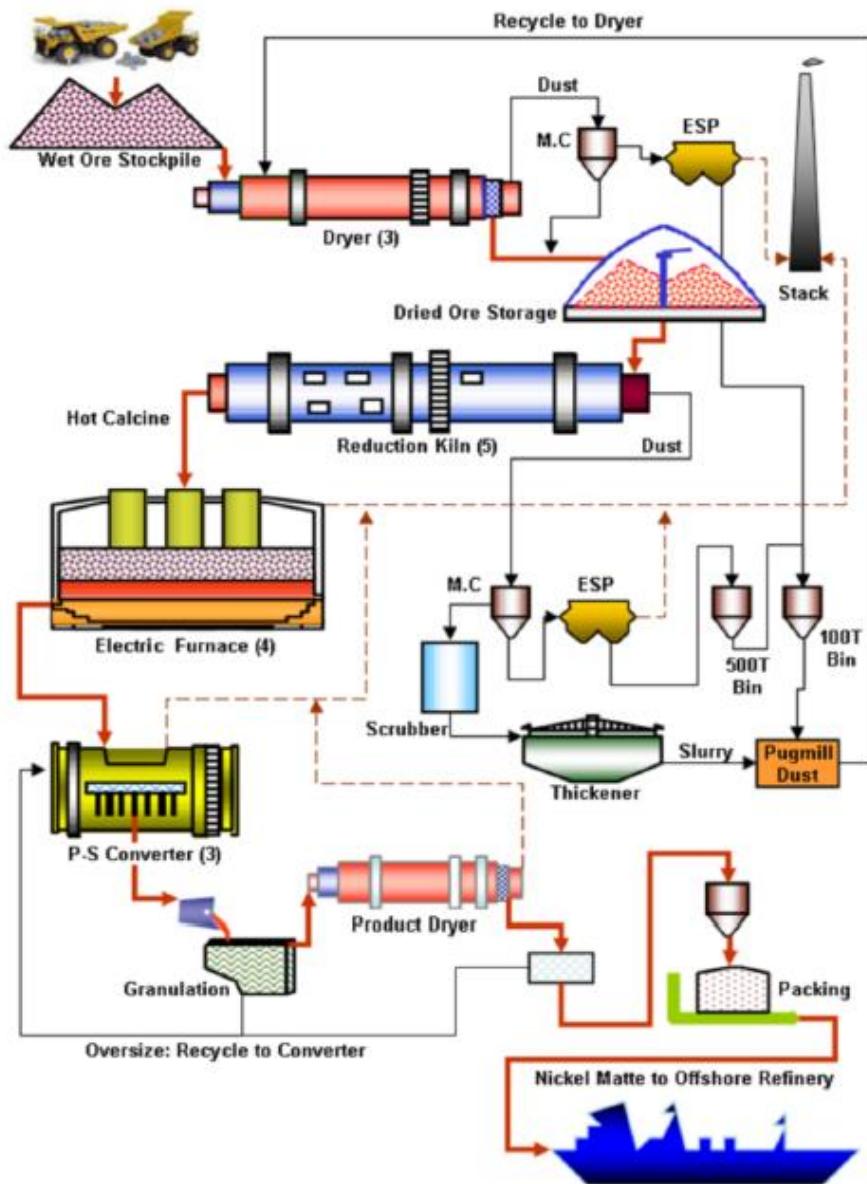
#### 2.2 Proses *Reduction Kiln* di Industri Nikel

Tujuan utama dari *reduction kiln* adalah untuk memproduksi *calcine* berkualitas untuk proses *smelting*. *Calcine* yang berkualitas ditunjukkan dengan beberapa parameter [8] yaitu memiliki *temperature* di atas 700 C, memiliki kandungan kimiawi  $xH_2O$  kurang dari 1%, karbon 1.6 – 1.8% dan nikel tereduksi lebih besar dari 35%. *Reduction kiln* flow sheet ditunjukkan pada gambar 2.2. Tampilan HMI Kiln #5 Overview di layar operator ditunjukkan di gambar 2.3.

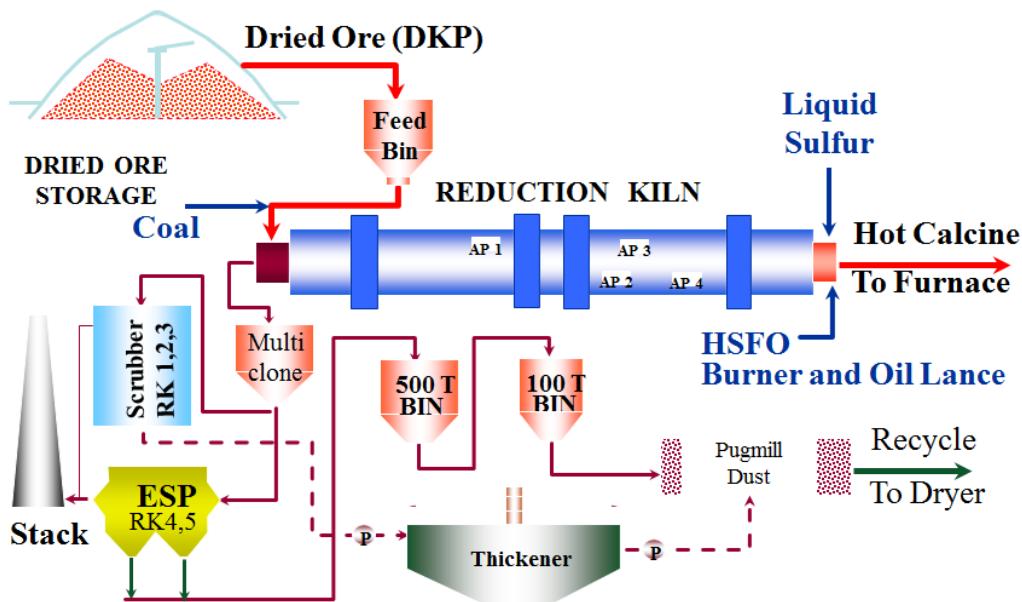
Ada empat proses utama di dalam *reduction kiln*, yaitu:

1. Proses pengeringan, terjadi di area *feed-end – air pipe* 1, yaitu untuk menghilangkan *water content* yang tersisa yaitu sekitar 18-22%  $H_2O$ .
2. Kalsinasi, terjadi di antara *air pipe* 1 – *air pipe* 4, yaitu untuk meningkatkan *temperature* solid menjadi di atas 700 C dan melepaskan *water content* yang terikat secara kimiawi sampai tersisa kurang dari 1%.

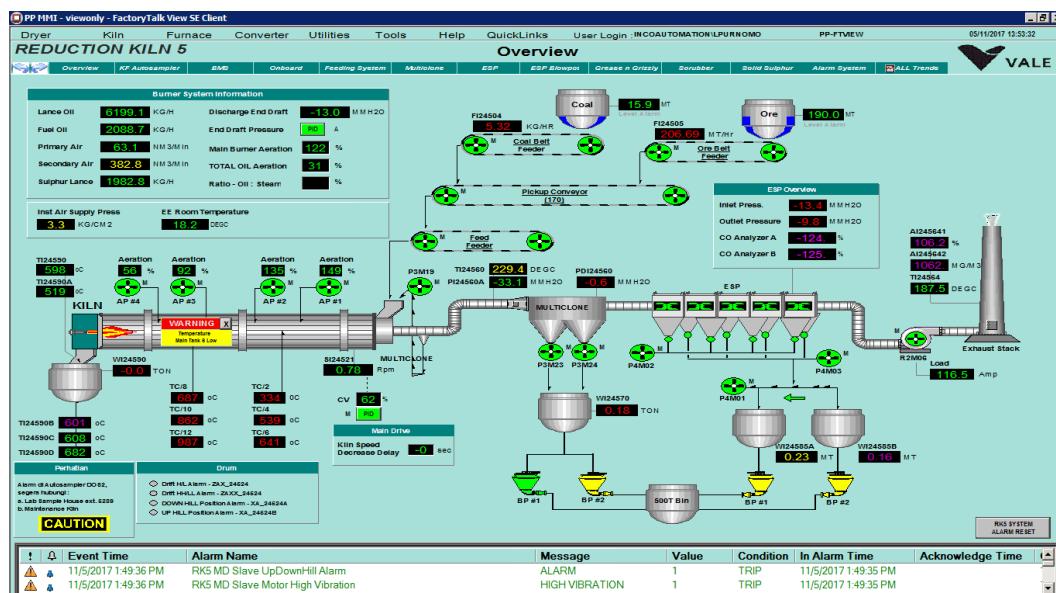
3. Proses reduksi, terjadi di daerah *air pipe* 1 – *discharge end*, yaitu mereduksi beberapa bentuk oksigen dalam metal oksida (NiO dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) menjadi 35% metal Ni dan 2-5% metal Fe.
4. Proses sulfidasi, terjadi di daerah *discharge end*, yaitu mempertemukan Ni dan Fe dengan sulfur untuk membuat ikatan yang lebih stabil.



Gambar 2.1 Pemrosesan nikel di PT Vale Indonesia Tbk

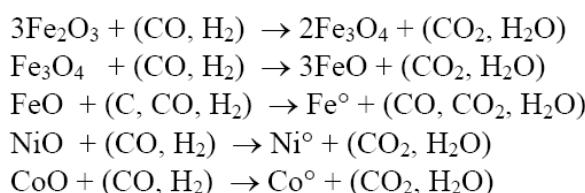


Gambar 2.2 Reduction Kiln Flow Sheet di PT Vale Indonesia Tbk



Gambar 2.3 HMI Kiln #5 Overview di PT Vale Indonesia Tbk

Proses reduksi secara kimiawi ditunjukkan pada reaksi berikut:



Hampir semua Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> direduksi menjadi oksida yang lebih rendah, yaitu 40% menjadi Fe<sup>3+</sup> (*magnetite*), 55% menjadi Fe<sup>2+</sup> (*magnetite and wustite*), 5% menjadi Fe<sup>0</sup> (*metallic iron*). Sementara 40% dari NiO direduksi menjadi metal nikel dan 20% dari CoO direduksi menjadi metal kobalt.

Proses sulfidasi sangat tergantung pada kondisi reduksi. Sulfur secara primer bereaksi dengan metal besi dan nikel. Proses pengikatan sulfur terjadi dalam interval waktu yang sangat pendek, atau dengan kata lain sangat spontan. Di dalam ruang bakar area *discharge end* yang memiliki *temperature* sangat tinggi, proses sulfidasi atau sulfur fixasi sangat tergantung pada seberapa banyak metal besi dan nikel bermuatan positif yang tidak stabil, seberapa banyak kandungan oksigen dalam ruang bakar. Ada dua kemungkinan besar yang bisa terjadi yaitu yang pertama sulfur berikatan dengan Fe dan Ni menjadi FeS dan NiS sedangkan O berikatan dengan C membentuk CO dan CO<sub>2</sub>, yang kedua sulfur berikatan dengan O menjadi SO<sub>2</sub> dan Fe Ni berikatan kembali dengan O menjadi metal oksida. Kemungkinan yang kedua ini sangat dihindari karena SO<sub>2</sub> yang terbentuk terlepas di atmosfer menjadi emisi SO<sub>2</sub>, dan metal oksida yang terbentuk akan menjadi EFF (*electric furnace feed*) dan terbawa ke *electric furnace* yang meningkatkan kemungkinan terjadinya ledakan. SO<sub>2</sub> dan metal oksida dalam EFF adalah dua kondisi yang harus sangat diminimalkan, bahkan dihindari karena meningkatkan level bahaya pada keberlangsungan operasional pabrik.

Di dalam *kiln* terjadi proses pembakaran yang merupakan reaksi antara bahan bakar dan udara. Untuk *kiln #5* menggunakan bahan bakar HSFO (*High Sulfur Fuel Oil*). Proses pembakaran ini akan menghasilkan panas dan gas pereduksi yaitu CO dan H<sub>2</sub> melalui pembakaran tidak sempurna. Pencampuran yang baik antara partikel bahan bakar dengan udara menentukan kualitas dari pembakaran. Ada dua jenis reaksi pembakaran yaitu pembakaran sempurna dan pembakaran tidak sempurna.

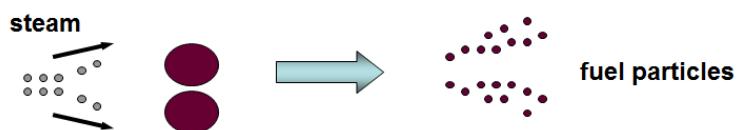
Complete combustion:



Incomplete combustion:



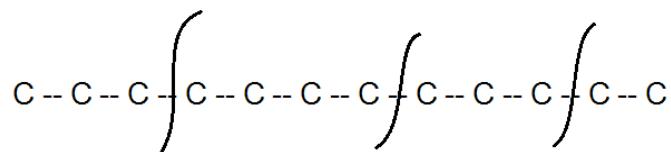
Untuk lebih membuat pembakaran lebih efisien dalam konsumsi bahan bakar maka perlu dilakukan *atomizing*. Yaitu titik-titik bahan bakar dikonversi menjadi partikel yang lebih halus dengan ditumbukkan pada *steam*.



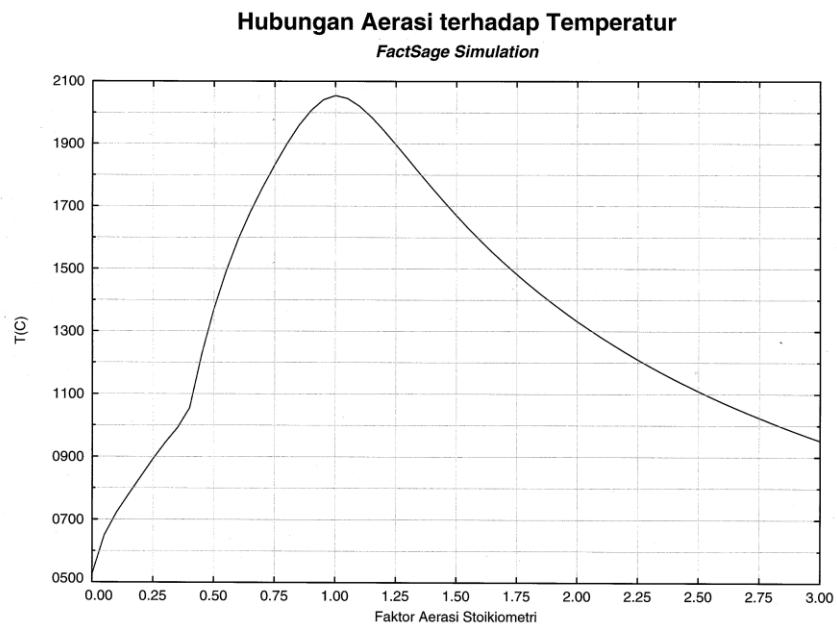
Gambar 2.4 Proses *fuel atomizing*

*Steam* / uap tekanan tinggi akan menghasilkan partikel bahan bakar yang lebih halus atau kecil sehingga membentuk lidah api yang lebih baik. Selain itu dilakukan juga *cracking* atau pemecahan rantai karbon pada bahan bakar.

Hubungan aerasi terhadap temperature ditunjukkan pada grafik di bawah ini

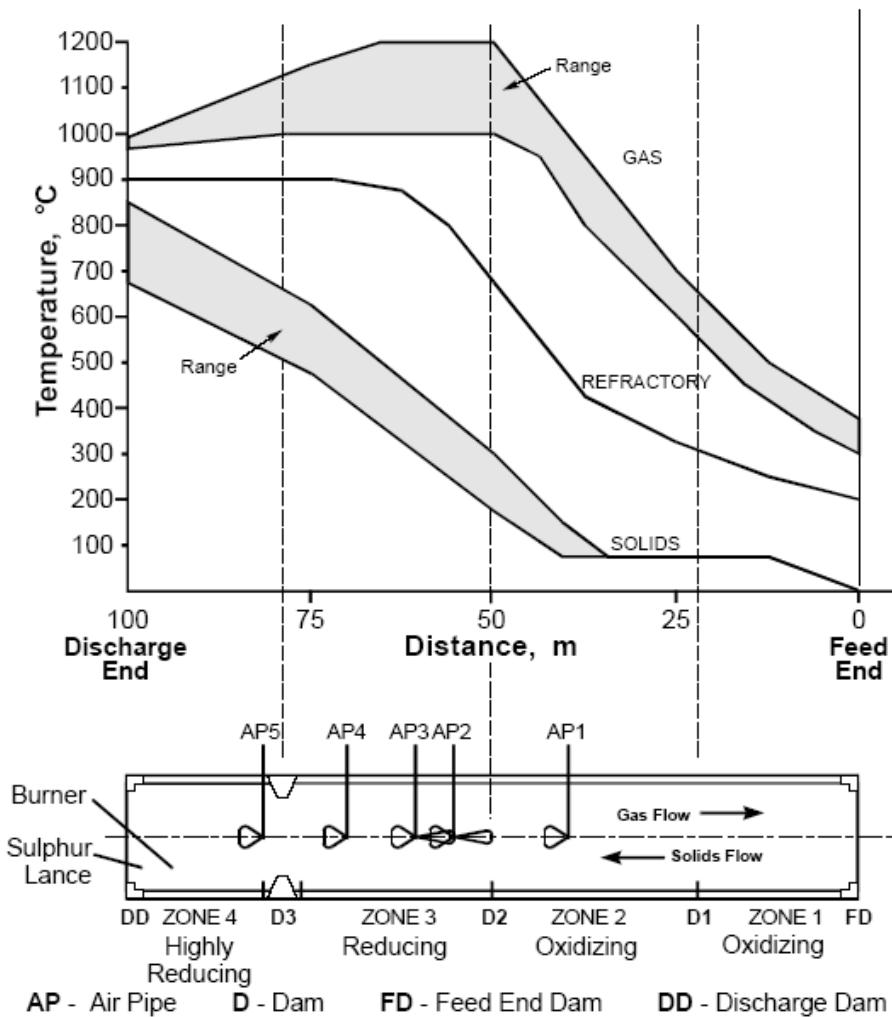


Gambar 2.5 Proses *cracking* rantai karbon



Gambar 2.6 Hubungan Aerasi Terhadap Temperature

Sebaran temperature sepanjang kiln sepanjang 100 meter dengan memiliki 5 air-pipe ditunjukkan pada grafik 2.2.



Gambar 2.7 Profile Temperature pada Kiln 100m dan 5 Air-Pipe

## 2.2 Neural Network Model

Pemodelan dengan jaringan saraf tiruan (JST) adalah pemodelan Black Box dimana input dipasangkan dengan output yang sesuai. Di dalam jaringan saraf tiruan terdiri dari sambungan (connections) dan elemen pemrosesan (neuron). Untuk pemodelan sistem, ada beberapa keuntungan menggunakan jaringan saraf tiruan yaitu:

- a. Sistem Nonlinear. Jaringan saraf tiruan mempunyai kemampuan untuk memetakan hubungan yang tidak linier, sehingga sangat menjanjikan untuk mengatasi permasalahan kontrol nonlinier.
- b. Pembelajaran dan beradaptasi. Jaringan saraf tiruan yang telah dilatih menggunakan satu set data akan mampu mengeluarkan output sama atau mendekati output pasangan input yang diberikan, bahkan mampu mengeluarkan output dengan input yang belum pernah dilatihkan. Jaringan saraf tiruan mampu juga dilatih on-line.
- c. Sistem Multivariabel. Jaringan saraf tiruan aplikable untuk multi-variabel proses.

Struktur jaringan saraf tiruan yang umum adalah multi layer perceptron (MLP). Gambar 2 menggambarkan struktur MLP, yang terdiri dari input, hidden dan output layer.

Model JST yang menggunakan fungsi aktifasi hiperbolik tangent pada sebuah hidden layer dan fungsi linier pada output layer -nya, dapat memprediksi dengan akurat semua sistem yang dimodelkan. Dalam rangka menentukan bobot misalnya output  $y_i$  dihubungkan dengan input  $\phi_i$ , maka memerlukan suatu usaha yang disebut pelatihan/pembelajaran (training/ learning). Dalam training bobot disesuaikan agar memperoleh output jaringan yang sesuai dengan output proses atau target. Algoritma pembelajaran ini akan terus menyesuaikan bobot sampai target yang diinginkan tercapai. Secara matematis MLP dapat dituliskan:

$$y_i = F_i \left[ \sum_{j=1}^{n_h} W_{ij} \cdot f_j \left( \sum_{l=1}^{n_o} w_{jl} \phi_l + w_{j0} \right) + W_{i0} \right]$$

Algoritma pembelajaran yang digunakan dalam penelitian ini adalah algoritma Levenberg Marquardt. Meskipun algoritma ini lebih kompleks dibandingkan algoritma backpropagation, tetapi algoritma ini dapat memberikan hasil yang lebih baik. Penurunan algoritma ini dapat dilihat pada Norgaard dkk. (1999) dan dapat dijelaskan sebagai berikut. Data training adalah satu set input  $u(k)$  yang berpasangan dengan output yang diinginkan  $y(k)$ . atau dapat dituliskan:

$$Z^N = \{ [u(k), y(k)] | k=1, \dots, N \}$$

Tujuan pembelajaran ini menentukan bobot yang mungkin dari pasangan data yang diberikan :

$$Z^N \rightarrow w$$

Sehingga jaringan akan mengeluarkan perkiraan output  $y(k)$  yang sama atau mendekati output  $y(k)$ . Perkiraan error akan didekati dengan mean square error criterion:

$$\begin{aligned} V_N(w, Z^N) &= L^{\theta}(w) \\ &= \frac{1}{2N} \sum [y(k) - \hat{y}(k|w)]^T [y(k) - \hat{y}(k|w)] \end{aligned}$$

Bobot yang diperoleh :

$$w = \arg \min_w V_N(w, Z^N)$$

$$w^{(i+1)} = w^{(i)} + \mu^{(i)} f^{(i)}$$

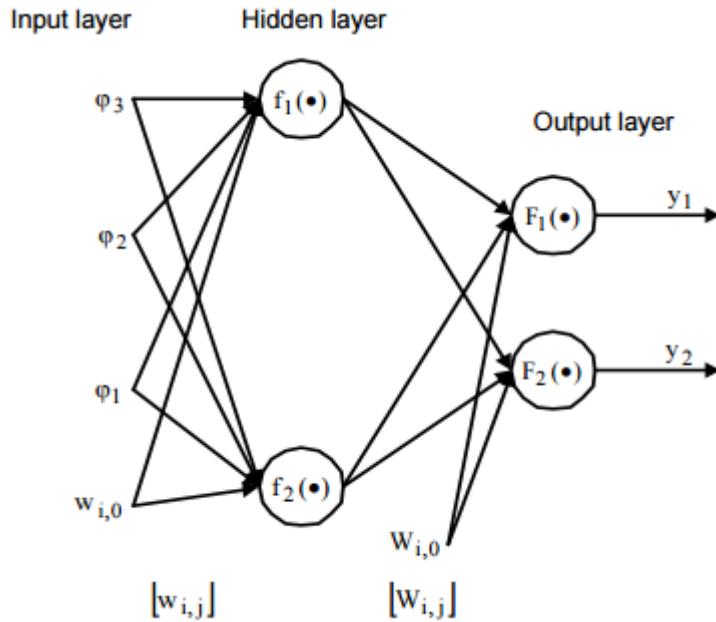
wi bobot saat ini,  $f(i)$  adalah arah pencarian dan  $\mu$  (i) adalah besar langkah. Levenberg Marquardt adalah metoda standar untuk minimisasi dari mean square error criterion. Pada algoritma ini mempunyai parameter 1 untuk menjaga konvergensi. Harga l dikontrol dengan rasio antara penuruan harga aktual dan harga prediksi.

$$r^{(i)} = \frac{V_N(w^{(i)}, Z^N) - V_N(w^{(i)} + f^{(i)}, Z^N)}{V_N(w^{(i)}, Z^N) - L^{\theta}(w^{(i)} + f^{(i)})}$$

Dimana

$$\begin{aligned} L(w^{(i)} + f) &= \sum_{k=1}^N \left( y(k) - \hat{y}(k|w) - f^T \frac{\partial \hat{y}(k|w)}{\partial w} \right)^2 \\ &= V_N(w^{(i)}, Z^N) + f^T G(w^{(i)}) + \frac{1}{2} f^T R(w^{(i)}) f \end{aligned}$$

G menunjukkan gradien kriteria dengan mengacu pada bobot dan R adalah pendekatan dari Hessian. Jika rasio mendekati satu,  $L(i)$  ( $w(i) + f$ ) mendekati  $V_N$ , dan  $\lambda$  seharusnya dikurangi dengan beberapa faktor. Begitu juga sebaliknya jika rasio kecil atau negatif maka  $\lambda$  sebaiknya ditambah.



Gambar 2.8 Struktur *neural network*

*Neural network* dapat digunakan untuk menangkap dinamika dari system *nonlinear* dan kompleks serta *multivariable* berdasarkan kemampuan pemrosesan parallel, nonlinearitas di alam dan kemampuannya untuk memodelkan tanpa pengetahuan awal. Walaupun berbagai variasi dari *neural network* bermunculan seperti misalnya *multilayer perception* (MLP), jaringan *radial basis function* (RBF), dan *recurrent neural network* (RNN), semuanya memiliki fitur dasar yang sama yaitu: *nodes*, *layers* dan *koneksi*. Dalam penelitian ini akan digunakan *neural network feedforward* dengan satu *layer* tersembunyi dan satu *layer* keluaran karena *neural network* ini adalah termasuk yang paling popular dan arsitektur *neural network* yang sukses dalam berbagai aplikasi seperti prediksi, pemodelan proses dan *control*. Pada bagian ini akan dijelaskan dengan singkat dua kelas dari *neural network*. [9]

### 2.2.1 Multilayer Networks

*Multilayer network* dengan sebuah *layer input*, sebuah *layer output* dan dua *layer* tersembunyi ditunjukkan pada gambar 2.4. Untuk lebih memudahkan maka dibuat dalam bentuk blok diagram seperti pada gambar 2.5 dengan tiga matriks *weight* W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>, W<sub>3</sub> dan operator diagonal *nonlinear* Γ dengan elemen *sigmoidal*

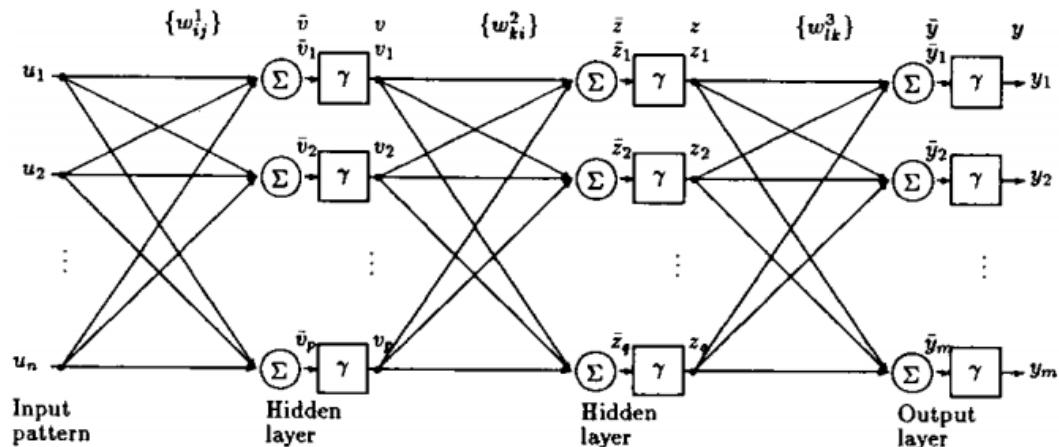
*identic*  $\gamma$  (yaitu  $\gamma(x) = 1 - e^{-x} / 1 + e^{-x}$ ). Setiap *layer* dari *network* bisa direpresentasikan oleh operator [9]

$$N_i[u] = \Gamma[W^i u] \quad (1)$$

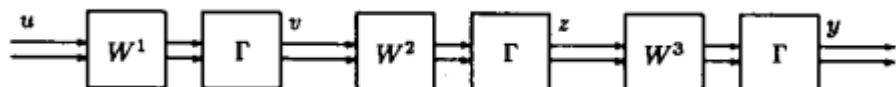
Dan *input-output mapping* dari *multilayer network* bisa ditunjukkan menjadi

$$y = N[u] = \Gamma\left[W^3\Gamma\left[W^2\Gamma\left[W^1 u\right]\right]\right] = N_3 N_2 N_1[u] \quad (2)$$

Dalam prakteknya, *multilayer network* telah sukses diterapkan pada masalah *pattern recognition*. *Weight* dari *network*  $W^1$ ,  $W^2$ ,  $W^3$  disesuaikan untuk meminimalisir fungsi *error*  $e$  antara *output*  $y$  dari *network* dan *output* yang diinginkan  $y_d$ . Dari sudut pandang teori sebuah system, *multilayer network* bisa disebut sebagai *versatile nonlinear maps* dengan elemen matriks *weight* sebagai parameter.

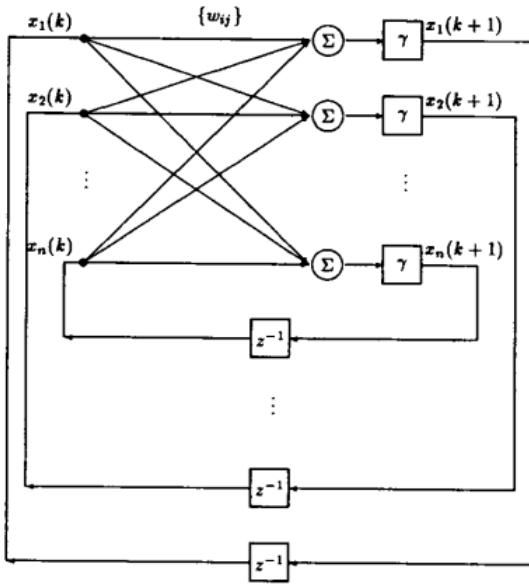


Gambar 2.9 3-layer Neural network



Gambar 2.10 Blok Diagram dari 3-layer Neural network

## 2.2.2 Recurrent Networks



Gambar 2.11 Hopfield *network*

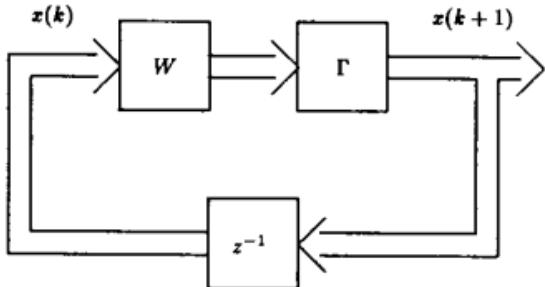
*Recurrent network* diperkenalkan oleh Hopfield dan telah didiskusikan secara luas dalam berbagai literatur, sehingga memberikan pendekatan alternatif untuk *pattern recognition*. Salah satu versi yang dikenalkan oleh Hopfield terdiri dari *single layer network*  $N_1$  termasuk dalam konfigurasi *feedback* dengan sebuah *time delay*, ditunjukkan pada gambar 2.5 dan 2.6. Sebuah *network* bisa ditunjukkan sebagai dinamika system diskrit dan dirumuskan menjadi

$$x(k+1) = N_1[x(k)], \quad x(0) = x_0 \quad (3)$$

Dengan sebuah nilai awal  $x_0$ , dinamika system menjadi *equilibrium* jika  $N_1$  dipilih dengan tepat. Sekumpulan kondisi awal dalam status yang sama dengan  $x_0$  dimana konvergen pada kondisi *equilibrium* yang sama selanjutnya akan diidentikkan dengan kondisi tersebut. “*Associative memory*” digunakan untuk menyebut system seperti itu. Saat ini, baik *recurrent network* kontinyu maupun diskrit telah dipelajari dengan input konstan. Sekumpulan input dari pada kondisi awal lebih menunjukkan pola dari yang harus diklasifikasikan pada kasus ini. Pada kasus kontinyu, dinamika system pada jalur *feedback* memiliki matriks transfer diagonal yang identik dengan elemen  $1 / (s + \alpha)$  sepanjang diagonal. System tersebut direpresentasikan oleh persamaan

$$\dot{x} = -\alpha x + N_1[x] + I \quad (4)$$

Sehingga  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  adalah kondisi system pada waktu t, dan *vector* konstan  $I \in \mathbb{R}^n$  dari input.



Gambar 2.12 Blok Diagram dari *Hopfield Network*

### 2.3 Model Predictive Control

*Model Predictive Control* (MPC) telah dipelajari secara luas dan diaplikasikan pada sejumlah masalah industrial di plant nyata. Keuntungan utama dari MPC adalah kemampuannya sebagai *controller* MIMO, mengakomodir batasan-batasan input dan output, dan bisa diterapkan pada skala waktu yang lebih lambat pada process control. Sebagian besar aplikasi MPC bertumpu pada model dinamika linear baik pada kondisi *state-space* maupun bentuk *step-response*. Dan dalam bentuk standar memungkinkan penerapan gangguan *feedforward*, koreksi *offset* pada ketidakcocokan model, serta tahan terhadap noise. Namun, jika proses memunculkan nonlinearitas, kegunaan MPC yang berdasarkan sebuah model linear menjadi terbatas, terutama jika digunakan untuk mentransfer proses dari satu titik operasi ke titik lain. Pada beberapa kasus, penggunaan model *nonlinear* bisa meningkatkan operasi dari proses. Oleh karenanya, penggunaan *nonlinear* MPC semakin berkembang seiring kebutuhan proses yang menuntut spesifikasi kualitas produk dan aturan lingkungan yang lebih ketat[6].

Ada sejumlah kesulitan pada implementasi NMPC. Salah satu yang utama adalah sulitnya menemukan model *nonlinear* yang tepat yang memasukkan model *first-principle* dan model empiris dari identifikasi. Model prinsip pertama adalah berdasarkan hukum fisika yang mengatur perilaku dari system yang sebenarnya dan

dapat memprediksi dinamika system seluruh rentang operasi. Namun pengembangan dari model model prinsip pertama yang terpercaya umumnya adalah pekerjaan sulit dan menghabiskan waktu. Sebuah model prinsip pertama normalnya dibentuk oleh serangkaian persamaan diferensial *nonlinear* dan aljabar dimana mungkin tidak cocok diterapkan pada *online control* karena menghabiskan waktu dan masalah *numeric*. Model empiris didapat dari pengukuran input dan output dari *real plant* dan memiliki keuntungan dibandingkan model prinsip pertama dalam hal waktu dan usaha untuk mendapatkannya. Namun kenyataannya sebuah model empiris yang berkualitas tinggi yang didapat dari percobaan laboratorium maupun industri adalah sangat sulit. Pada banyak literatur ilmiah, model empiris didapatkan dari simulasi model prinsip pertama. Seperti halnya mengembangkan model *neural network*, hal ini cukup mudah untuk mendapatkan sejumlah besar simulasi untuk diumpulkan ke dalam *neural network*. Pendekatan empiris termasuk *polynomial* (misalnya: *autoregressive moving average model with exogenous inputs*, ARMAX), *artificial neural network*, *piecewise linear model*, *volterra series*, *Wiener and Hammerstein model*, dll. Pada model empiris di atas, *neural network* telah diaplikasikan secara luas karena kemampuannya dalam mengatasi masalah *nonlinear* dan kompleks serta mengurangi beban usaha *engineering* yang diperlukan dalam pengembangan model *controller*.

Tantangan lain dari aplikasi NMPC adalah permasalahan optimisasi *nonlinear* yang biasanya *non-convex* dan biasanya menghabiskan waktu disebabkan oleh model *nonlinear* yang digunakan untuk meminimalkan fungsi dan batasan. Sebagai tambahan, implementasi NMPC perlu menyelesaikan serangkaian masalah seperti misalnya kebutuhan model yang akurat atau kompensasi *online* dari ketidaksesuaian model serta ketahanan (*robustness*) dari optimisasi *online* dalam ketidakpastian. Oleh karenanya pemanfaatan NMPC di industri masih sangat terbatas. Sebagai alternatif pada NMPC adalah menemukan pendekatan *linear* dari model *nonlinear* dan kemudian menggunakan model yang telah dilinearakan untuk prediksi. Hasil dari masalah *linear optimal control* bisa diselesaikan dengan *quadratic programming* (QP). *Nonlinear model* dilinearakan pada setiap waktu *sample* dan model linear dengan representasi *state space* diaplikasikan untuk MPC.

MPC algoritma berdasarkan linearisasi *local* untuk model *neural network* diaplikasikan pada beberapa proses netralisasi pH, fermentasi dan reactor biokimia. [10][11][12]

### 2.3.1 Tuning MPC

MPC memiliki beberapa parameter tertentu yang harus ditentukan untuk mencapai performansi yang optimum. Diantaranya adalah *sampling time* (T), *prediction horizon* (P), *model horizon* (N), *control horizon* (M), *controlled variable weights* ( $\gamma_s^2$ ) dan *suppression koefisien* ( $\lambda_s^2$ ). Metode tuning untuk multivariable MPC dan *unconstraint SISO* berdasarkan model FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) pada system [28] adalah sebagai berikut:

Dinamika proses dari pasangan input output *controller* dengan FOPDT model adalah

$$\frac{y_r(s)}{u_r(s)} = \frac{K_{rs}e^{-\theta_{rs}s}}{\tau_{rs}+1} \text{ dimana } (r = 1, 2, \dots, R; s = 1, 2, \dots, S)$$

1. Pilih waktu sample sedekat mungkin dengan

$$T_{rs} = \text{Max}(0.1\tau_{rs}, 0.5\theta_{rs})$$

$$T = \text{Min}(T_{rs})$$

$$\text{dimana } (r = 1, 2, \dots, R; s = 1, 2, \dots, S)$$

2. Hitung prediction horizon P dan model horizon N

$$P = N = \text{Max}\left(\frac{5\tau_{rs}}{T} + k_{rs}\right) \text{ dimana } k_{rs} = \left(\frac{\theta_{rs}}{T} + 1\right),$$

$$(r = 1, 2, \dots, R; s = 1, 2, \dots, S)$$

3. Hitung control horizon M

$$M = \text{Max}\left(\frac{\tau_{rs}}{T} + k_{rs}\right) (r = 1, 2, \dots, R; s = 1, 2, \dots, S)$$

4. Pilih controlled variable weights ( $\gamma_s^2$ ) sedemikian hingga agar unit process variable menjadi sama

5. Hitung move suppression coefficient ( $\lambda_s^2$ )

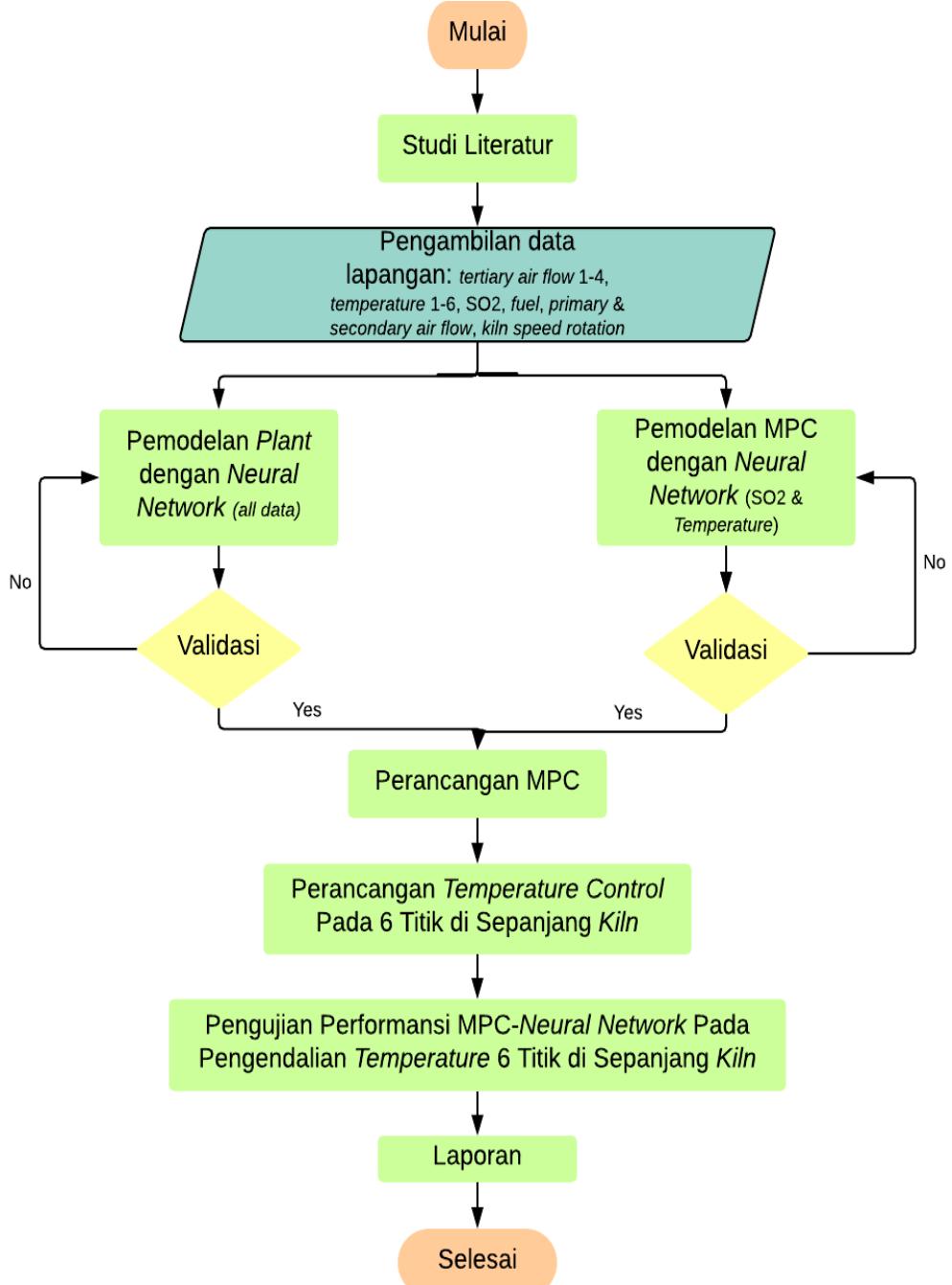
$$\lambda_s^2 = \frac{M}{10} \sum_{r=1}^R \left[ \gamma_s^2 K_{rs}^2 \left\{ P - k_{rs} - \frac{3}{2} \frac{\tau_{rs}}{T} + 2 - \frac{(M-1)}{2} \right\} \right] (s = 1, 2, \dots, S)$$

6. Implementasikan MPC menggunakan step response matrix pada actual proses dengan nilai awal yang telah didapat dari perhitungan 1-5 di atas

## BAB 3

# METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Data dari lapangan diperlukan untuk dilakukan pemodelan. Data-data yang dipilih adalah:

1. laju masukan dari material untuk kiln, yaitu ada material ore, batubara dan sulfur. Material utama untuk feeding adalah ore yang merupakan produk dari rotary dryer. Batubara diperlukan sebagai pereduksi di dalam proses mereduksi logam nikel dan besi. Sedangkan sulfur diperlukan untuk proses sulfidisasi yaitu proses pengikatan logam nikel dan besi dengan sulfur setelah proses reduksi berhasil. Karena ketiga material ini merupakan material penting dalam proses reduksi kiln maka datanya perlu dipertimbangkan.
2. Laju aliran dari bahan bakar *burner* yaitu HSFO *main burner* dan *lance oil*. Dikarenakan besar kecilnya laju aliran bahan bakar menentukan besar kecilnya api yang terbentuk di dalam kiln, maka variable tersebut perlu dipertimbangkan untuk diambil datanya. Selain itu, bahan bakar masih merupakan komponen biaya terbesar dari operasional kiln. Maka tantangannya adalah bagaimana bisa menekan konsumsi bahan bakar tetapi tidak mengorbankan proses pembakaran yang terjadi di dalam kiln. Optimisasi dan efisiensi menjadi tantangan operasional kiln di masa depan.
3. *Tertiary air flow* yang merupakan udara tambahan yang dimasukkan ke dalam internal kiln. Ada 4 fan dengan masing-masing mensupply udara untuk menjaga proses pembakaran di dalam kiln sehingga profil temperature bisa dijaga.
4. Rotasi pada kiln dalam rpm yang menentukan seberapa lama waktu tinggal material di dalam kiln. Dengan rotasi semakin cepat maka temperature di dalam kiln akan menurun material akan meluncur lebih cepat pula sehingga temperature pada material akan belum mencapai yang titik yang diharapkan. Hal ini akan sangat berbahaya karena bisa jadi proses reduksi dan sulfidisasi belum sempat terjadi atau masih ‘miskin/poor’.
5. Temperature di sepanjang kiln. Ada 6 titik pengukuran temperature di sepanjang kiln. Semua titik ini perlu dimonitor untuk menjaga profil temperature yang diharapkan agar proses reduksi dan sulfidisasi bisa terjadi.

6. SO<sub>2</sub> pada jalur off-gas. Variable ini merupakan emisi yang harus dioptimisasi serendah mungkin karena ada nilai ambang batas yang dipersyaratkan oleh pemerintah kepada perusahaan. Apabila melebihi ambang batas akan mencemari lingkungan udara di sekitar.

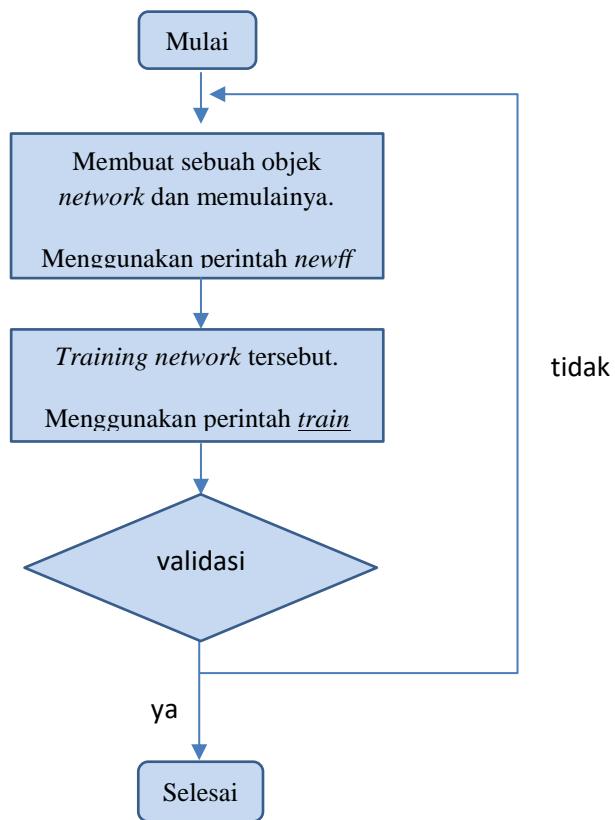
Data yang diperlukan akan diambil dari system historian yang dimiliki oleh PT Vale Indonesia Tbk. Dari penjelasan di atas, maka secara spesifik *variable* tersebut adalah:

1. Laju aliran udara *tertiary* 1
2. Laju aliran udara *tertiary* 2
3. Laju aliran udara *tertiary* 3
4. Laju aliran udara *tertiary* 4
5. *Temperature* TC-2
6. *Temperature* TC-4
7. *Temperature* TC-6
8. *Temperature* TC-8
9. *Temperature* TC-10
10. *Temperature* TC-12
11. SO<sub>2</sub> di *stack*
12. Konsumsi bahan bakar di *burner*
13. *Secondary Oil - lance*
14. *Nickel Ore feed*
15. *Coal feed*
16. *Sulfur feed*
17. *Kiln speed rotation*

Data-data tersebut terlebih dulu dilakukan sortir dan rekonsiliasi untuk hanya menggunakan data-data yang valid dan bagus, minim dari *noise* dan *disturbance*. Nantinya data akan dibagi dua, yaitu untuk pemodelan dan validasi.

### **3.2 Setup Software**

Pada penelitian ini digunakan MATLAB untuk semua simulasi yang akan dilakukan. Untuk mendapatkan model dari system berdasarkan data *real plant input-output*, akan menggunakan *Neural Network Toolbox* pada Matlab dan Simulink. Demikian juga untuk validasi modelnya menggunakan software yang sama.



Gambar 3.2 Diagram Alir *Neural Network* pada Matlab

Demikian juga untuk *Model Predictive Control* juga menggunakan Matlab dan Simulink yaitu *Model Predictive Control Toolbox*.

## **BAB 4**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Pemodelan Neural Network**

Dari data-data yang sudah diambil di atas, diteliti masing-masing variable yang mana yang paling mempunyai hubungan paling kuat antara satu dengan yang lain. Dari 16 variable tersebut, kemudian dilakukan analisa  $R^2$  untuk menentukan keterkaitan dengan  $SO_2$ . Kemudian nilai tersebut disajikan dalam table berikut:

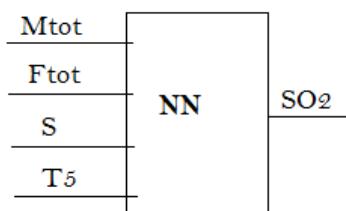
Tabel 4.1  $R^2$  semua variable terhadap  $SO_2$

Variable	$R^2$
$F_{main}$	0.2945
$F_{lance}$	0.1126
$M_{coal}$	0.1473
$M_{ore}$	0.1377
S	0.2309
RPM	0.0332
$AP_1$	0.0696
$AP_2$	0.0645
$AP_3$	0.1881
$AP_4$	n/a
$T_1$	0.0163
$T_2$	0.0031
$T_3$	0.007
$T_4$	0.1007
$T_5$	0.2232
$T_6$	0.0256

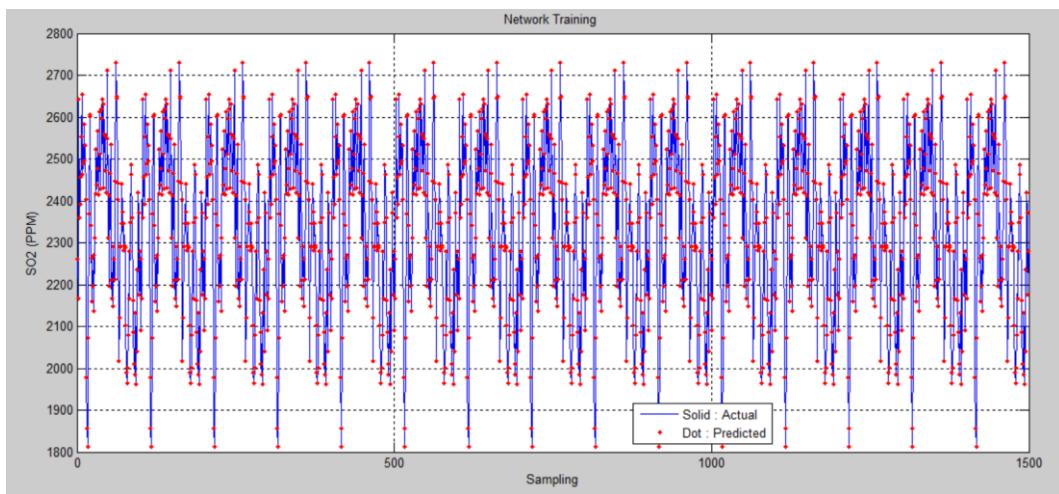
Dari variable tersebut maka dipilih 6 variable utama yang akan dimodelkan menggunakan metode neural network. Keempat variable utama tersebut adalah:

1.  $M_{ore}$ , laju material utama, yaitu total *ore*
2.  $M_{coal}$ , laju batubara
3.  $S$ , laju aliran sulfur sebagai material utama untuk proses sulfidisasi
4.  $F_{tot}$ , total bahan bakar pada proses pembakaran yaitu HSFO *main burner* dan *lance*
5.  $T_5$  yaitu temperature pada titik ke-5
6.  $SO_2$ , emisi sulfur dioksida

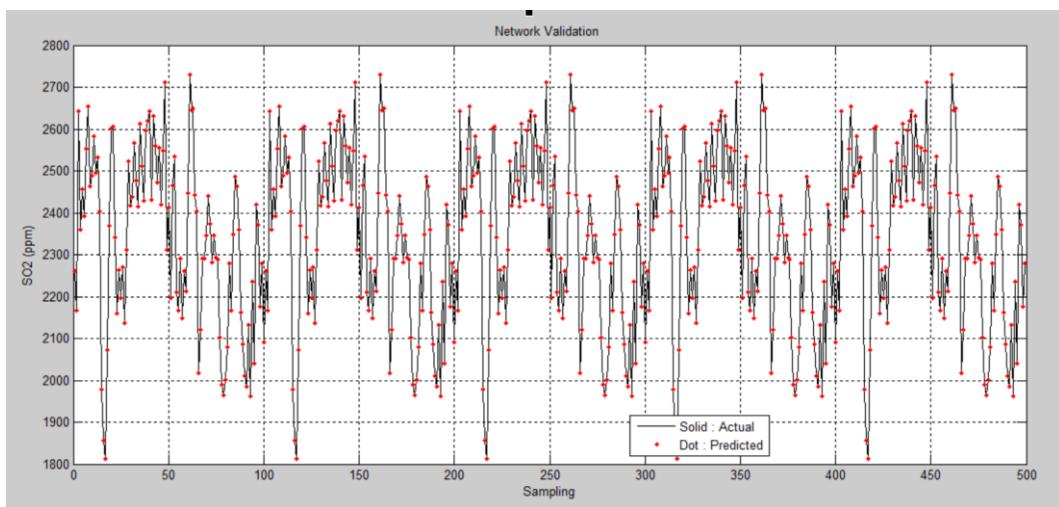
Variable  $M_{ore}$ ,  $M_{coal}$ ,  $S$ ,  $F_{tot}$ ,  $T_5$  adalah *variable input* pada *neural network*, sedangkan  $SO_2$  adalah *variable output*. Dari 2000 pasang data, selanjutnya dilakukan *network training* untuk 1500 pasang data, dan 500 pasang data untuk *network validasi*. Berikut ditampilkan blok sederhana untuk *neural network* tersebut. selanjutnya ditunjukkan juga grafik *network training* dan *validasi* terhadap output  $SO_2$  untuk 2000 pasang data. Setelah itu untuk memvalidasi bahwa model yang didapat adalah yang terbaik, maka *training & validation* dilakukan beberapa kali untuk beberapa *hidden node* sampai didapatkan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) terkecil. Dari table yang ditampilkan di bawah, ditunjukkan nilai RMSE untuk *training* dan *validasi* untuk setiap *hidden node* yang dilakukan *trial and error*. Dari hasil table tersebut, maka dipilih *hidden node* 15 yang terbaik.



Gambar 4.1 Diagram blok *Neural Network* untuk SO<sub>2</sub>



Gambar 4.2 Grafik training *Neural Network* untuk SO<sub>2</sub>



Gambar 4.3 Grafik validasi *Neural Network* untuk SO<sub>2</sub>

Tabel 4.2 RMSE neural network untuk SO<sub>2</sub>

Hidden node	RMSE Training	RMSE Validasi
1	189.99	189.76
2	156.95	156.72
3	131.84	131.55
4	110.20	109.38
5	121.37	120.61
6	105.86	105.33
7	90.48	89.88
8	79.60	79.23
9	48.28	48.31

Hidden node	RMSE Training	RMSE Validasi
10	46.86	46.77
11	34.31	34.31
12	18.60	18.61
13	13.91	13.92
14	3.35	3.36
15	0.00	0.00
16	0.00	0.00
17	0.00	0.00
18	0.00	0.00
19	0.00	0.00
20	0.00	0.00

Dari hasil tersebut maka bisa disimpulkan bahwa model neural network dengan hidden node 15 adalah model yang sesuai dalam merepresentasikan system yang sedang diteliti.

## 4.2 Optimisasi Output

Langkah selanjutnya adalah mengoptimisasi nilai keluaran SO<sub>2</sub> agar didapatkan angka serendah-rendahnya namun masih bisa diterima oleh batasan-batasan nilai input. Algoritma yang digunakan adalah Duelist Algorithm. Batas atas dan bawah (*upper and lower bound*) dari nilai variable tersebut dipilih dari nilai minimum dan maksimum dari data lapangan, yaitu:

$$207.36 \leq M_{ore} \leq 284.29$$

$$1503.15 \leq M_{coal} \leq 9874.64$$

$$1005.11 \leq S \leq 2246.57$$

$$49725.79 \leq F_{tot} \leq 67589.68$$

$$641.97 \leq T_5 \leq 931.7$$

$$1813.13 \leq SO_2 \leq 2730.82$$

Setelah dilakukan simulasi, didapatkan nilai SO<sub>2</sub> terendah yang bisa diterima oleh system adalah 2090 ppm. Dengan nilai ini, maka didapat untuk nilai variable lain yang optimum adalah

$$F_{tot} = 62814 \text{ kg/h}$$

$$M_{ore} = 208\text{ton/h}$$

$$M_{coal} = 7416 \text{ kg/h}$$

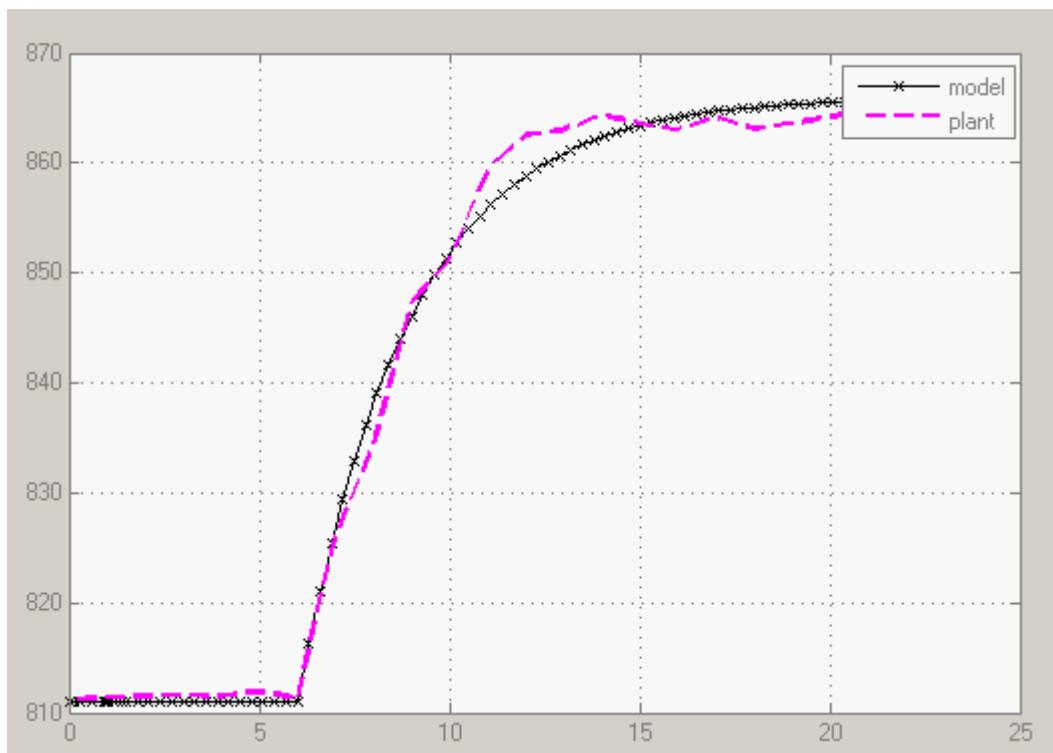
$$S = 1814 \text{ kg/h}$$

$$T_5 = 834 \text{ C}$$

Dari kelima variable di atas, 4 diantaranya bisa dianggap konstan yaitu  $F_{tot}$ ,  $M_{ore}$ ,  $M_{coal}$ , dan  $S$ . sedangkan  $T_5$  adalah variable yang harus dikontrol, yaitu dengan temperature control. Yang dikendalikan adalah tertiary air supply 3 yang merupakan manipulated variable terdekat dan memiliki hubungan paling dekat dengan sensor  $T_5$ . Hubungan antara keduanya adalah berbanding lurus, yaitu apabila tertiary *air supply* 3 meningkat, maka pembakaran di area tersebut akan lebih sempurna sehingga temperature akan naik pula.

### 4.3 Temperature Control

Untuk mengendalikan temperature maka supply udara perlu dimanipulasi untuk memenuhi kebutuhan *air to fuel ratio*, dengan asumsi konsumsi bahan bakar dibuat konstan. Untuk mensimulasikannya, digunakan software Simulink. Temperature control disini akan menggunakan MPC sebagai controller. Data lapangan telah dipilih yang menunjukkan perubahan temperature  $T_5$  terhadap perubahan supply udara tertiary 3. Data tersebut disajikan dalam grafik pada gambar 4.4. pada grafik tersebut dilakukan analisis FOPDT (*First Order Plus Dead Time*) sebagai pendekatan model untuk kemudian didapatkan parameter  $K_p$ ,  $\tau$  dan  $\theta$  dimana ketiga parameter tersebut akan digunakan dalam tuning MPC sesuai yang telah dijabarkan pada subbab 2.3.1.



Gambar 4.4 *Open loop T<sub>5</sub> vs FOPDT model*

Pada gambar 4.4 dan 4.5, satu unit waktu adalah 10 detik, sehingga nilai  $\tau$  dan  $\theta$  dikalikan 10 detik. Dari hasil perhitungan didapat ketiga nilai tersebut:

$$K_p = 0.11$$

$$\tau = 2.95 = 29.5 \text{ detik}$$

$$\theta = 6 = 60 \text{ detik}$$

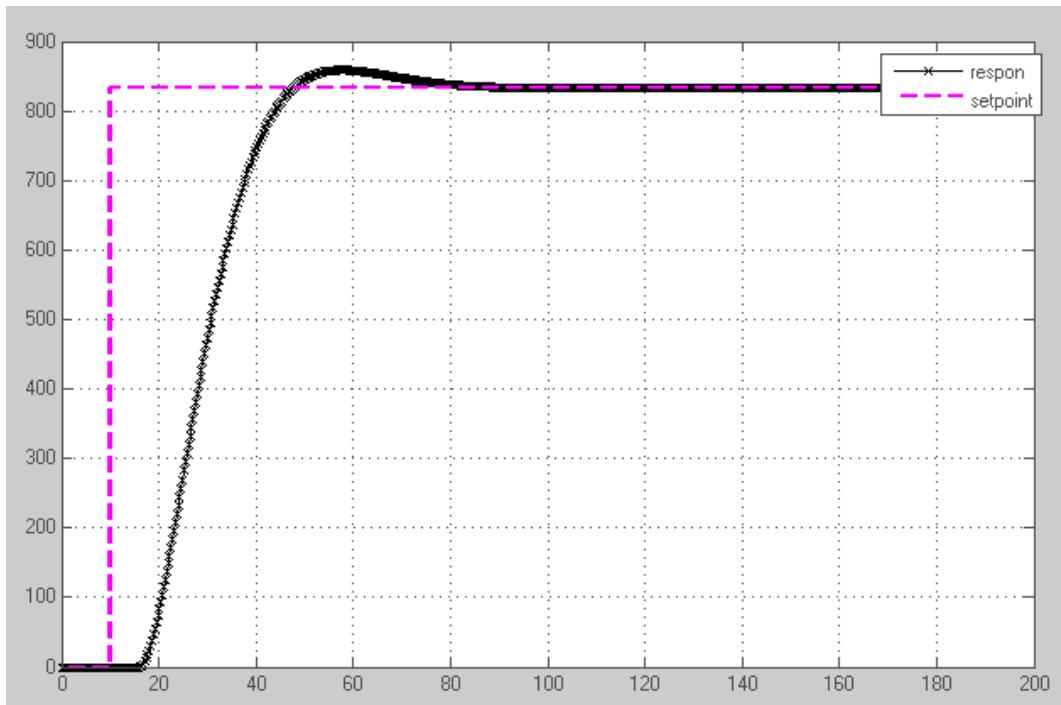
Dari ketiga nilai di atas, dilakukan perhitungan beberapa parameter yang dibutuhkan untuk tuning MPC seperti telah dijelaskan pada subbab 2.3.1. Nilai yang didapatkan adalah:

$$T (\text{sampling time dan control interval}) = 0.3 = 3 \text{ detik}$$

$$P (\text{prediction horizon}) = 70$$

$$M (\text{control horizon}) = 30$$

Respon yang didapatkan adalah seperti ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 *Close loop* respon T<sub>5</sub> dengan MPC

Yaitu dengan uji setpoint 834 C sesuai nilai T<sub>5</sub> optimum pada saat SO<sub>2</sub> minimum, didapat nilai stabil pada waktu ke 76 yaitu detik ke 760 atau 12.6 menit. Hal ini sesuai dengan kondisi di lapangan, bahwa untuk menaikkan temperature dari kondisi normal sampai di temperature tersebut dibutuhkan waktu beberapa menit, dengan asumsi nyala burner sudah normal dan konsumsi bahan bakar sudah konstan.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa hasil yang bisa diambil kesimpulan, yaitu sebagai berikut:

1. Dari 17 variable penting yang terukur pada proses di kiln, didapatkan hasil bahwa hanya 6 yang merupakan variable utama yang terkait dengan kendali SO<sub>2</sub>. Variable tersebut adalah bahan bakar total, ore feed, batubara, sulfur, temperature pada titik ke-5 dan SO<sub>2</sub> itu sendiri.
2. Simulasi *neural network* untuk memodelkan variable tersebut mendapatkan hasil yang memuaskan, didapatkan nilai RMSE training dan validasi hampir mendekati nol pada hidden node ke-15.
3. Model hasil *neural network* tersebut, dengan menggunakan Duelist Algorithm bisa didapatkan nilai minimum SO<sub>2</sub> = 2090 ppm, dengan nilai optimal variabel input adalah F<sub>tot</sub> = 62814 kg/h, M<sub>ore</sub> = 208ton/h, M<sub>coal</sub> = 7416 kg/h, S = 1814 kg/h, T<sub>5</sub> = 834 C
4. Temperature control diaplikasikan menggunakan MPC untuk menjaga nilai T<sub>5</sub> pada setpoint 834 C, didapat parameter tuning Control interval = 3 detik, Prediction horizon = 70, Control horizon = 30.

Saran untuk penelitian ke depan adalah:

1. Pengambilan data pada operating condition yang lain agar lebih bisa mewakili karakteristik system yang lebih luas
2. Pemasangan alat ukur atau analyzer untuk mengukur massa Fe, Ni dan unsur kimia yang lain pada *material feeding* agar mendapatkan gambaran massa balance lebih tepat
3. Dilakukan analisa penyebaran panas menggunakan software yang lebih handal untuk mendapatkan profile temperature yang lebih actual dan terpercaya

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gavin M. Mudd. "Global Trend and Environmental Issues in Nickel Mining: Sulfides versus Laterites". *Ore Geology Reviews*. Volume 38, Issues 1–2, October 2010, Pages 9-26.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136810000569>
- [2] Frank K. Crundwell, Michael S. Moats. "Chapter 4: Overview of the Smelting of Nickel Laterite to Ferronickel". *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*, Pages 49–53. 2011.
- [3] Yale Zhang, Brian K. Tsang, Brandon Peterson. "Nickel Smelter Production Improvement Study Using Discrete Event Simulation". *IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries*. Gifu, Japan. September 10-12, 2012.
- [4] Ravi Teja, Sridhar P., Guruprasath M. "Control and Optimization of a Triple String Rotary Cement Kiln using Model Predictive Control". *IFAC-PapersOnline* 49-1 (2016) 748-753.
- [5] K. Pazand, M. Shariat Panahi, M. Pourabdoli. "Simulating The Mechanical Behavior of a Rotary Cement Kiln using Artificial Neural Networks". *Material and Design* 30 (2009) 3468-3473.
- [6] Shi Li, Yue-Yang Li. "Neural Network Based Nonlinear Model Predictive Control for an Intensified Continuous Reactor". *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 96 (2015) 14-27.
- [7] Brian K. Tsang, Yale Zhang. "Energy Challenges for a Nickel Laterite Mining and Smelting Facility". *IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries*. Gifu, Japan. September 10-12, 2012.
- [8] Syukirman. "Reduction Kiln Presentation - Process Engineer Engagement". *PT International Nickel Indonesia, Soroako, South Sulawesi, Indonesia*, 92984. 2009.
- [9] Kumpati S. Narendra, Kannan Parthasarathy. "Identification and Control of Dynamical Systems using Neural Network". *IEEE Transactions on Neural Networks*. Vol. 1. No. 1, March 1990.
- [10] M. Lawrynczuk, Practical nonlinear predictive control algorithms for neural Wiener models, *J. Process Control* 23 (2013) 696–714.
- [11] M. Lawrynczuk, On-line set-point optimization and predictive control using neural Hammerstein models, *Chem. Eng. J.* 166 (2011) 269–287.
- [12] M. Lawrynczuk, Modelling and nonlinear predictive control of a yeast fermentation biochemical reactor using neural networks, *Chem. Eng. J.* 145 (2008) 290–307.

- [13] J.D. Guiry, A.D. Dalvi. "PT INCO's Indonesian Nickel Project: An Updating". *International Journal of Mineral Processing*, 19 (1987) 199-214
- [14] Marion Seiersten, Per Kofstad. "The High Temperature Corrosion of Nickel in SO<sub>2</sub> at 500-800 C". *Corrosion Science*, Vol.22. No.5 pp. 487-506, 1982.
- [15] Saige Wang, Bin Chen. "Accounting of SO<sub>2</sub> Emissions from Combustion in Industrial Boilers". *CUE2015-Applied Energy Symposium and Summit 2015: Low Carbon Cities and Urban Energy Systems*. Energy Procedia 88 (2016)325-329.
- [16] Peng Liu, Baokuan Li, Sherman C.P. Cheung, Wenyuan Wu. "Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving". *Applied Thermal Engineering*. 109 (2016) 542-559.
- [17] Jiuxiang Gu, Zhenhua Wang, Jason Kuen, Lianyang Ma, Amir Shahroudy, Bing Shuai, Ting Liu, Xingxing Wang, Gang Wang, Jianfei Cai, Tsuhan Chen. "Recent advance in convolutional neural networks". *Pattern Recognition*. 000 (2017) 1-24.
- [18] Anne Oxley, Nic Barcza. "Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites". *Mineral Engineering*. 54 (2016) 2-13.
- [19] Tomas Mares, Eliska Janouchova, Anna Kucerova. "Artificial neural networks in the calibration of nonlinear mechanical models". *Advance in Engineering Software*. 95 (2016) 68-81.
- [20] Xiaomo Jiang, Sankaran Mahadevan, Yong Yuan. "Fuzzy stochastic neural network model for structural system identification". *Mechanical System and Signal Processing*. 82 (2017) 394-411.
- [21] Qian Yin, Wen-Jing Du, Xing-Lin Ji, Lin Cheng. "Optimization design and economic analyses of heat recovery exchangers on rotary kilns". *Applied Energy*. 180 (2016) 743-756.
- [22] T. Norgate, S. Jahanshahi. "Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing". *Mineral Engineering*. 24 (2011) 698-707.
- [23] Qian Yin, Wen-Jing Du, Lin Cheng. "Optimization design of heat recovery systems on rotary kilns using genetic algorithms". *Applied Energy*. 202 (2017) 153-168.
- [24] Nahed Soussi, Wassim Kriaa, Hatem Mhiri, Philippe Bournot. "Reduction of the energy consumption of a tunnel kiln by optimization of the recovered air mass flow from the cooling zone to the firing zone". *Applied Thermal Engineering*. 124 (2017) 1382-1391.
- [25] David Kriesel. "A brief introduction to Neural Networks". ZETA2-EN.

- [26] Heikki N. Koivo. "Neural Networks: Basic using Matlab Neural Network Toolbox". 2008.
- [27] Kevin Gurney. "An introduction to neural networks". UCL Press Limited. London. 1997.
- [28] Danielle Dougherty and Doug Cooper. "A Practical Multiple Model Adaptive Strategy for Multivariable Model Predictive Control". *Control Engineering Practice*. 11 (2003) 649-664.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN A – DATA LAPANGAN

Time	Lance Oil Flow Rate kg/h	Main Burner Oil Flow Rate kg/h	Coal Feed Rate kg/h	Ore Feed Rate T/h	Sulfur Flowrate kg/h	Main Drive Speed rpm	Air Pipe 1 Flow Rate kg/h	Air Pipe 2 Flow Rate kg/h	Air Pipe 3 Flow Rate kg/h	Air Pipe 4 Flow Rate kg/h
9/9/2018 15:34:00	52016.41	3034.90	6129.43	250.19	1770.05	0.8	230.42	609.11	503.06	372
9/9/2018 15:34:00	48495.71	3024.97	6019.61	256.22	1780.19	0.8	230.43	609.13	503.06	372
9/9/2018 15:34:10	48751.05	3024.97	5738.69	257.98	1781.24	0.8	230.28	609.15	503.08	372
9/9/2018 15:34:20	50733.55	3030.01	5848.33	257.5	1772.14	0.8	230.43	609.12	503.07	372
9/9/2018 15:34:30	48470.92	3015.38	5734.79	259.14	1771.12	0.8	230.44	609.12	503.06	372
9/9/2018 15:34:40	47634.44	3028.42	1503.15	257.04	1767.51	0.8	230.44	609.11	503.05	372
9/9/2018 15:34:50	52414.30	3028.69	5844.61	269.43	1849.94	0.84	230.44	609.1	503.06	372
9/9/2018 15:35:00	52105.24	3030.90	5978.56	262.38	1823.38	0.82	230.43	609.11	503.05	372
9/9/2018 15:35:10	51527.82	3024.63	5791.46	245.23	1772.95	0.8	230.43	609.11	503.04	372
9/9/2018 15:35:20	50572.98	3025.17	5824.10	250.06	1766.23	0.8	230.42	609.09	503.01	372
9/9/2018 15:35:30	53195.84	3028.49	5808.97	242.35	1763.33	0.8	208.38	609.09	503.02	372
9/9/2018 15:35:40	53596.30	3027.00	5527.90	244.75	1685.49	0.76	230.44	609.11	503.02	372
9/9/2018 15:35:50	52709.86	3025.30	5783.97	255.62	1777.54	0.8	230.43	609.11	503.03	372
9/9/2018 15:36:00	52219.93	3036.54	5725.64	252.62	1764.26	0.8	230.43	609.1	503.04	372

9/9/2018 15:36:10	55000.52	2504.69	5179.02	256.72	1693.65	0.76	208.38	609.09	503.02	372
9/9/2018 15:36:20	58369.31	2580.94	4777.95	237.44	1546.66	0.7	208.39	609.09	503.01	372
9/9/2018 15:36:30	58433.71	2492.83	5468.26	260.3	1765.94	0.8	208.39	609.07	503	372
9/9/2018 15:36:40	58353.23	2505.89	5375.65	258.74	1760.87	0.8	208.4	609.1	503.04	372
9/9/2018 15:36:50	56723.02	2497.47	5345.13	265.85	1774.7	0.8	208.37	609.09	503.05	372
9/9/2018 15:37:00	57967.24	2503.78	5350.61	256.49	1769.45	0.8	208.38	609.13	503.01	372
9/9/2018 15:37:10	58146.16	2500.95	5163.89	258.05	1777.88	0.8	208.38	609.1	503.01	372
9/9/2018 15:37:20	57018.88	2717.01	5312.01	276.27	1798.31	0.81	208.37	609.11	503.01	372
9/9/2018 15:37:30	54947.05	2922.07	5735.87	264.53	1896.54	0.85	208.39	646.63	503.03	372
9/9/2018 15:37:40	57046.73	2960.67	9454.09	275.19	1892.84	0.85	208.37	646.64	503.03	372
9/9/2018 15:37:50	57688.26	3000.53	9874.64	271.98	1859.44	0.84	208.38	646.57	503.11	372
9/9/2018 15:38:00	54667.58	2799.87	5650.59	284.29	1885.46	0.85	208.38	646.49	503	372
9/9/2018 15:38:10	55746.85	2875.76	5392.52	255.81	1744.32	0.78	208.39	646.48	502.99	372
9/9/2018 15:38:20	53529.74	3008.46	4934.76	250.93	1679.75	0.76	208.22	609.03	503.09	372
9/9/2018 15:38:30	54378.58	3011.98	4434.17	245.66	1754.02	0.79	208.37	609	503.06	372
9/9/2018 15:38:40	55211.10	3013.47	5284.20	255.49	1769.03	0.8	208.39	608.98	503.02	372
9/9/2018 15:38:50	55130.33	3008.57	5548.68	276.58	1857.5	0.84	208.38	608.99	503	372
9/9/2018 15:39:00	53566.44	3000.46	5718.27	266.87	1888.33	0.85	208.38	608.97	503.01	372
9/9/2018 15:39:10	54382.00	2993.54	5590.98	261.46	1826.18	0.82	208.37	608.98	502.98	372

9/9/2018 15:39:20	55024.83	3005.37	5292.23	259.83	1778.41	0.8	208.39	609.02	502.99	372
9/9/2018 15:39:30	54949.28	2994.27	5066.38	245.91	1665.53	0.75	208.4	608.98	502.99	372
9/9/2018 15:39:40	59846.79	2503.08	5580.81	249.58	1905.35	0.79	208.38	608.99	514.5	372
9/9/2018 15:39:50	60012.54	2503.08	5699.62	253.2	1930.88	0.8	208.38	608.99	514.5	372
9/9/2018 15:40:00	59848.34	2509.71	5525.40	251.18	1930.21	0.8	208.38	608.98	514.49	372
9/9/2018 15:40:10	59899.26	2504.96	5455.36	253.17	1934.43	0.8	208.37	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:40:20	60283.88	2504.57	5769.80	266.07	1993.27	0.82	208.38	608.99	514.48	372
9/9/2018 15:40:30	60180.67	2495.80	5763.69	258.95	1987.44	0.83	208.39	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:40:40	59986.18	2509.85	5590.56	246.81	1921.96	0.8	208.4	608.96	514.52	372
9/9/2018 15:40:50	59812.67	2458.62	6047.97	263.68	1960.12	0.81	208.37	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:41:00	62941.34	2248.82	6282.20	275.29	2052.05	0.85	208.39	608.98	514.49	372
9/9/2018 15:41:10	64518.10	2255.23	6112.70	275.07	2048.3	0.85	208.39	608.97	514.5	372
9/9/2018 15:41:20	63981.99	2262.03	6218.26	271.06	2051.92	0.85	208.39	608.98	514.53	372
9/9/2018 15:41:30	63735.73	2254.01	5913.30	259.34	1957.94	0.81	208.23	609.01	514.48	372
9/9/2018 15:41:40	63681.59	2257.11	5771.49	263.12	1955.81	0.81	208.22	608.99	514.53	372
9/9/2018 15:41:50	63704.81	2270.67	5707.31	253.28	1960.07	0.81	208.39	609	514.5	372
9/9/2018 15:42:00	64513.07	2244.12	5841.17	250.75	1967.27	0.81	208.39	608.97	514.55	372
9/9/2018 15:42:10	64200.16	2257.32	5749.25	274.72	2063.75	0.85	208.39	608.99	514.53	372
9/9/2018 15:42:19	64057.87	2264.10	5515.15	267.37	1966.24	0.81	208.24	608.99	514.53	372

9/9/2018 15:42:30	62814.05	2256.71	5707.60	256.29	1967.7	0.81	208.25	608.98	514.53	372
9/9/2018 15:42:40	62211.74	2252.52	5506.11	244.63	1896.78	0.78	208.37	608.99	514.51	372
9/9/2018 15:42:50	64176.11	2239.18	5101.09	229.63	1764.49	0.71	208.38	608.98	514.52	372
9/9/2018 15:43:00	62138.15	2248.87	4991.69	226.21	1716.56	0.71	208.39	608.98	514.52	372
9/9/2018 15:43:10	50204.45	3044.58	5822.34	257.69	2030.96	0.84	208.32	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:43:20	49140.93	3050.08	5833.52	263.13	2022.51	0.83	208.32	608.97	514.5	372
9/9/2018 15:43:30	47552.80	3071.58	5195.68	233.77	1777.92	0.74	296.31	609.01	400	372
9/9/2018 15:43:40	48344.90	3057.18	5149.98	231.42	1769.9	0.73	296.3	609	514.55	372
9/9/2018 15:43:50	48250.58	3048.56	5331.84	233.44	1782.15	0.73	296.32	608.98	514.52	372
9/9/2018 15:43:59	48180.52	3052.30	5106.34	230.48	1778.64	0.74	296.32	609.01	514.51	372
9/9/2018 15:44:10	48459.52	3057.00	5195.14	231.18	1782.85	0.73	296.32	609	514.51	372
9/9/2018 15:44:19	48408.50	3051.71	5127.97	226.86	1779.42	0.74	296.31	609.01	514.52	372
9/9/2018 15:44:30	50225.02	3034.43	4926.15	215.35	1652.84	0.68	296.31	608.99	514.51	372
9/9/2018 15:44:40	51506.80	3049.62	4973.85	215.93	1658.73	0.68	296.3	609.01	514.52	372
9/9/2018 15:44:50	63310.41	2174.25	5853.23	263.65	1998.58	0.82	296.31	608.99	514.53	372
9/9/2018 15:44:59	64104.25	2172.99	5814.43	266.25	1989.33	0.82	252.37	609	503.03	372
9/9/2018 15:45:10	64486.07	2174.46	5791.67	253.13	1934.97	0.8	252.35	609	503.06	372
9/9/2018 15:45:20	63876.59	2183.82	5865.51	247.47	1945.85	0.8	252.36	609	503.05	372
9/9/2018 15:45:30	53387.11	2955.48	5624.98	241.58	1933.11	0.8	252.37	609.03	503.05	372

9/9/2018 15:45:40	59079.14	2531.17	5407.03	236.3	1934.72	0.8	230.27	609.04	503.04	372
9/9/2018 15:45:50	58553.95	2532.80	5311.57	228.39	1839.37	0.76	230.28	609.01	503.04	372
9/9/2018 15:46:00	59025.95	2518.12	5428.42	242.03	1869.03	0.77	230.27	609.03	503.04	372
9/9/2018 15:46:10	60345.18	2549.39	5673.27	238.34	1968.71	0.81	230.27	609	503.05	372
9/9/2018 15:46:20	63667.22	2534.06	5481.33	239.47	1900.43	0.79	230.28	609	503.05	372
9/9/2018 15:46:30	60085.85	2529.61	5436.66	240.72	1895.27	0.79	230.28	609	503.03	372
9/9/2018 15:46:40	59820.85	2529.43	5404.57	235.82	1790.54	0.76	230.28	608.98	503.01	372
9/9/2018 15:46:50	61307.43	2544.88	1620.32	232.57	1849.72	0.76	230.29	609.02	503.04	372
9/9/2018 15:47:00	61565.59	2543.70	5780.93	245.95	1999.22	0.82	230.28	609.01	503.01	372
9/9/2018 15:47:10	62206.69	2530.31	5991.25	247.65	1990.13	0.82	230.28	609.01	503.03	372
9/9/2018 15:47:20	51382.08	3033.56	4953.35	208.84	1049.78	0.7	230.29	609	503.03	289
9/9/2018 15:47:30	51461.13	3033.84	4992.36	207.36	1012.62	0.7	230.27	609.01	503.04	289
9/9/2018 15:47:40	51468.96	3033.49	5216.85	216.12	1014.75	0.72	230.28	609.03	503.04	289
9/9/2018 15:47:50	51785.93	3041.83	5101.71	212.76	1014.52	0.72	230.27	609.01	503.05	289
9/9/2018 15:48:00	51463.01	3033.50	5169.84	213.13	1005.11	0.72	230.27	609.03	503.04	289
9/9/2018 15:48:10	51530.91	3039.72	5178.76	219.84	1805.24	0.75	230.28	608.99	503.05	289
9/9/2018 15:48:20	51754.50	3049.93	5883.27	249.12	1996.03	0.82	208.25	608.99	503.05	289
9/9/2018 15:48:30	53850.41	2591.12	5623.78	240.67	1891.89	0.79	208.22	608.6	503.13	372
9/9/2018 15:48:40	50578.34	2488.71	6046.82	257.08	2055.22	0.85	208.24	608.8	514.71	344

9/9/2018 15:48:50	54920.21	2508.15	5827.29	270.26	2246.57	0.89	208.25	608.81	514.66	372
9/9/2018 15:49:00	56517.68	2496.79	5803.03	261.55	2117.62	0.84	208.24	608.83	514.65	372
9/9/2018 15:49:10	56522.09	2500.12	5998.01	259.92	2135.91	0.85	208.23	608.84	514.64	372
9/9/2018 15:49:20	56488.42	2512.63	5778.43	274.34	2138.31	0.85	208.23	608.84	514.64	372
9/9/2018 15:49:30	55460.77	2533.13	6048.61	276.73	2135.68	0.85	208.23	608.82	514.65	372
9/9/2018 15:49:40	56520.74	2566.32	5643.96	264.96	2135.91	0.85	208.22	608.82	514.62	372
9/9/2018 15:49:50	56510.74	2547.94	5344.31	255.89	2074.96	0.83	208.23	608.81	514.63	372
9/9/2018 15:50:00	56510.84	2549.67	5272.06	248.53	2017.32	0.8	208.22	608.81	514.61	372
9/9/2018 15:50:10	58685.17	2528.95	4817.00	226	1845.93	0.73	208.21	608.83	514.62	372
9/9/2018 15:50:20	59104.88	2522.20	4943.75	229.42	1855.6	0.73	208.23	608.8	514.63	372
9/9/2018 15:50:30	52016.41	3034.90	6129.43	250.19	1770.05	0.8	230.42	609.11	503.06	372
9/9/2018 15:50:40	48495.71	3024.97	6019.61	256.22	1780.19	0.8	230.43	609.13	503.06	372
9/9/2018 15:50:50	48751.05	3024.97	5738.69	257.98	1781.24	0.8	230.28	609.15	503.08	372
9/9/2018 15:51:00	50733.55	3030.01	5848.33	257.5	1772.14	0.8	230.43	609.12	503.07	372
9/9/2018 15:51:10	48470.92	3015.38	5734.79	259.14	1771.12	0.8	230.44	609.12	503.06	372
9/9/2018 15:51:20	47634.44	3028.42	1503.15	257.04	1767.51	0.8	230.44	609.11	503.05	372
9/9/2018 15:51:30	52414.30	3028.69	5844.61	269.43	1849.94	0.84	230.44	609.1	503.06	372
9/9/2018 15:51:40	52105.24	3030.90	5978.56	262.38	1823.38	0.82	230.43	609.11	503.05	372
9/9/2018 15:51:50	51527.82	3024.63	5791.46	245.23	1772.95	0.8	230.43	609.11	503.04	372

9/9/2018 15:52:00	50572.98	3025.17	5824.10	250.06	1766.23	0.8	230.42	609.09	503.01	372
9/9/2018 15:52:10	53195.84	3028.49	5808.97	242.35	1763.33	0.8	208.38	609.09	503.02	372
9/9/2018 15:52:20	53596.30	3027.00	5527.90	244.75	1685.49	0.76	230.44	609.11	503.02	372
9/9/2018 15:52:30	52709.86	3025.30	5783.97	255.62	1777.54	0.8	230.43	609.11	503.03	372
9/9/2018 15:52:40	52219.93	3036.54	5725.64	252.62	1764.26	0.8	230.43	609.1	503.04	372
9/9/2018 15:52:50	55000.52	2504.69	5179.02	256.72	1693.65	0.76	208.38	609.09	503.02	372
9/9/2018 15:53:00	58369.31	2580.94	4777.95	237.44	1546.66	0.7	208.39	609.09	503.01	372
9/9/2018 15:53:10	58433.71	2492.83	5468.26	260.3	1765.94	0.8	208.39	609.07	503	372
9/9/2018 15:53:20	58353.23	2505.89	5375.65	258.74	1760.87	0.8	208.4	609.1	503.04	372
9/9/2018 15:53:30	56723.02	2497.47	5345.13	265.85	1774.7	0.8	208.37	609.09	503.05	372
9/9/2018 15:53:40	57967.24	2503.78	5350.61	256.49	1769.45	0.8	208.38	609.13	503.01	372
9/9/2018 15:53:50	58146.16	2500.95	5163.89	258.05	1777.88	0.8	208.38	609.1	503.01	372
9/9/2018 15:54:00	57018.88	2717.01	5312.01	276.27	1798.31	0.81	208.37	609.11	503.01	372
9/9/2018 15:54:10	54947.05	2922.07	5735.87	264.53	1896.54	0.85	208.39	646.63	503.03	372
9/9/2018 15:54:20	57046.73	2960.67	9454.09	275.19	1892.84	0.85	208.37	646.64	503.03	372
9/9/2018 15:54:30	57688.26	3000.53	9874.64	271.98	1859.44	0.84	208.38	646.57	503.11	372
9/9/2018 15:54:40	54667.58	2799.87	5650.59	284.29	1885.46	0.85	208.38	646.49	503	372
9/9/2018 15:54:50	55746.85	2875.76	5392.52	255.81	1744.32	0.78	208.39	646.48	502.99	372
9/9/2018 15:55:00	53529.74	3008.46	4934.76	250.93	1679.75	0.76	208.22	609.03	503.09	372

9/9/2018 15:55:10	54378.58	3011.98	4434.17	245.66	1754.02	0.79	208.37	609	503.06	372
9/9/2018 15:55:20	55211.10	3013.47	5284.20	255.49	1769.03	0.8	208.39	608.98	503.02	372
9/9/2018 15:55:30	55130.33	3008.57	5548.68	276.58	1857.5	0.84	208.38	608.99	503	372
9/9/2018 15:55:40	53566.44	3000.46	5718.27	266.87	1888.33	0.85	208.38	608.97	503.01	372
9/9/2018 15:55:51	54382.00	2993.54	5590.98	261.46	1826.18	0.82	208.37	608.98	502.98	372
9/9/2018 15:56:01	55024.83	3005.37	5292.23	259.83	1778.41	0.8	208.39	609.02	502.99	372
9/9/2018 15:56:11	54949.28	2994.27	5066.38	245.91	1665.53	0.75	208.4	608.98	502.99	372
9/9/2018 15:56:21	59846.79	2503.08	5580.81	249.58	1905.35	0.79	208.38	608.99	514.5	372
9/9/2018 15:56:31	60012.54	2503.08	5699.62	253.2	1930.88	0.8	208.38	608.99	514.5	372
9/9/2018 15:56:41	59848.34	2509.71	5525.40	251.18	1930.21	0.8	208.38	608.98	514.49	372
9/9/2018 15:56:50	59899.26	2504.96	5455.36	253.17	1934.43	0.8	208.37	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:57:00	60283.88	2504.57	5769.80	266.07	1993.27	0.82	208.38	608.99	514.48	372
9/9/2018 15:57:10	60180.67	2495.80	5763.69	258.95	1987.44	0.83	208.39	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:57:20	59986.18	2509.85	5590.56	246.81	1921.96	0.8	208.4	608.96	514.52	372
9/9/2018 15:57:30	59812.67	2458.62	6047.97	263.68	1960.12	0.81	208.37	608.97	514.49	372
9/9/2018 15:57:39	62941.34	2248.82	6282.20	275.29	2052.05	0.85	208.39	608.98	514.49	372
9/9/2018 15:57:49	64518.10	2255.23	6112.70	275.07	2048.3	0.85	208.39	608.97	514.5	372
9/9/2018 15:58:00	63981.99	2262.03	6218.26	271.06	2051.92	0.85	208.39	608.98	514.53	372
9/9/2018 15:58:10	63735.73	2254.01	5913.30	259.34	1957.94	0.81	208.23	609.01	514.48	372

9/9/2018 15:58:20	63681.59	2257.11	5771.49	263.12	1955.81	0.81	208.22	608.99	514.53	372
9/9/2018 15:58:30	63704.81	2270.67	5707.31	253.28	1960.07	0.81	208.39	609	514.5	372
9/9/2018 15:58:40	64513.07	2244.12	5841.17	250.75	1967.27	0.81	208.39	608.97	514.55	372
9/9/2018 15:58:50	64200.16	2257.32	5749.25	274.72	2063.75	0.85	208.39	608.99	514.53	372
9/9/2018 15:58:59	64057.87	2264.10	5515.15	267.37	1966.24	0.81	208.24	608.99	514.53	372
9/9/2018 15:59:10	62814.05	2256.71	5707.60	256.29	1967.7	0.81	208.25	608.98	514.53	372
9/9/2018 15:59:19	62211.74	2252.52	5506.11	244.63	1896.78	0.78	208.37	608.99	514.51	372
9/9/2018 15:59:29	64176.11	2239.18	5101.09	229.63	1764.49	0.71	208.38	608.98	514.52	372
9/9/2018 15:59:40	62138.15	2248.87	4991.69	226.21	1716.56	0.71	208.39	608.98	514.52	372
9/9/2018 15:59:50	50204.45	3044.58	5822.34	257.69	2030.96	0.84	208.32	608.97	514.49	372
9/9/2018 16:00:00	49140.93	3050.08	5833.52	263.13	2022.51	0.83	208.32	608.97	514.5	372
9/9/2018 16:00:10	47552.80	3071.58	5195.68	233.77	1777.92	0.74	296.31	609.01	400	372
9/9/2018 16:00:20	48344.90	3057.18	5149.98	231.42	1769.9	0.73	296.3	609	514.55	372
9/9/2018 16:00:30	48250.58	3048.56	5331.84	233.44	1782.15	0.73	296.32	608.98	514.52	372
9/9/2018 16:00:40	48180.52	3052.30	5106.34	230.48	1778.64	0.74	296.32	609.01	514.51	372
9/9/2018 16:00:50	48459.52	3057.00	5195.14	231.18	1782.85	0.73	296.32	609	514.51	372
9/9/2018 16:01:00	48408.50	3051.71	5127.97	226.86	1779.42	0.74	296.31	609.01	514.52	372
9/9/2018 16:01:10	50225.02	3034.43	4926.15	215.35	1652.84	0.68	296.31	608.99	514.51	372
9/9/2018 16:01:20	51506.80	3049.62	4973.85	215.93	1658.73	0.68	296.3	609.01	514.52	372

9/9/2018 16:01:30	63310.41	2174.25	5853.23	263.65	1998.58	0.82	296.31	608.99	514.53	372
9/9/2018 16:01:40	64104.25	2172.99	5814.43	266.25	1989.33	0.82	252.37	609	503.03	372
9/9/2018 16:01:50	64486.07	2174.46	5791.67	253.13	1934.97	0.8	252.35	609	503.06	372
9/9/2018 16:02:00	63876.59	2183.82	5865.51	247.47	1945.85	0.8	252.36	609	503.05	372
9/9/2018 16:02:10	53387.11	2955.48	5624.98	241.58	1933.11	0.8	252.37	609.03	503.05	372
9/9/2018 16:02:19	59079.14	2531.17	5407.03	236.3	1934.72	0.8	230.27	609.04	503.04	372
9/9/2018 16:02:29	58553.95	2532.80	5311.57	228.39	1839.37	0.76	230.28	609.01	503.04	372
9/9/2018 16:02:40	59025.95	2518.12	5428.42	242.03	1869.03	0.77	230.27	609.03	503.04	372
9/9/2018 16:02:50	60345.18	2549.39	5673.27	238.34	1968.71	0.81	230.27	609	503.05	372
9/9/2018 16:03:00	63667.22	2534.06	5481.33	239.47	1900.43	0.79	230.28	609	503.05	372
9/9/2018 16:03:09	60085.85	2529.61	5436.66	240.72	1895.27	0.79	230.28	609	503.03	372
9/9/2018 16:03:20	59820.85	2529.43	5404.57	235.82	1790.54	0.76	230.28	608.98	503.01	372
9/9/2018 16:03:30	61307.43	2544.88	1620.32	232.57	1849.72	0.76	230.29	609.02	503.04	372
9/9/2018 16:03:40	61565.59	2543.70	5780.93	245.95	1999.22	0.82	230.28	609.01	503.01	372
9/9/2018 16:03:50	62206.69	2530.31	5991.25	247.65	1990.13	0.82	230.28	609.01	503.03	372
9/9/2018 16:04:00	51382.08	3033.56	4953.35	208.84	1049.78	0.7	230.29	609	503.03	289
9/9/2018 16:04:10	51461.13	3033.84	4992.36	207.36	1012.62	0.7	230.27	609.01	503.04	289
9/9/2018 16:04:20	51468.96	3033.49	5216.85	216.12	1014.75	0.72	230.28	609.03	503.04	289
9/9/2018 16:04:29	51785.93	3041.83	5101.71	212.76	1014.52	0.72	230.27	609.01	503.05	289

9/9/2018 16:04:40	51463.01	3033.50	5169.84	213.13	1005.11	0.72	230.27	609.03	503.04	289
9/9/2018 16:04:50	51530.91	3039.72	5178.76	219.84	1805.24	0.75	230.28	608.99	503.05	289
9/9/2018 16:05:00	51754.50	3049.93	5883.27	249.12	1996.03	0.82	208.25	608.99	503.05	289
9/9/2018 16:05:09	53850.41	2591.12	5623.78	240.67	1891.89	0.79	208.22	608.6	503.13	372
9/9/2018 16:05:20	50578.34	2488.71	6046.82	257.08	2055.22	0.85	208.24	608.8	514.71	344
9/9/2018 16:05:29	54920.21	2508.15	5827.29	270.26	2246.57	0.89	208.25	608.81	514.66	372
9/9/2018 16:05:40	56517.68	2496.79	5803.03	261.55	2117.62	0.84	208.24	608.83	514.65	372
9/9/2018 16:05:50	56522.09	2500.12	5998.01	259.92	2135.91	0.85	208.23	608.84	514.64	372
9/9/2018 16:05:59	56488.42	2512.63	5778.43	274.34	2138.31	0.85	208.23	608.84	514.64	372

<b>TC2</b>	<b>TC4</b>	<b>TC6</b>	<b>TC8</b>	<b>TC10</b>	<b>TC12</b>	<b>SO2 (ppm)</b>
271.36	459.06	594.23	644.66	818.89	882.81	2090.1
301.99	496.2	601.53	636.46	814.6	856.3	2260.7
314.45	527.56	642.93	684.97	824.39	838.89	2166.38
308.01	500.01	601.78	656.31	802.85	818.66	2643.58
298.18	479	588.86	635.53	809.89	827.05	2358.9
349.45	535.58	586.84	642.45	828.23	841.09	2457.16
359.71	558.34	601.41	651.54	815.4	823.79	2391.68
336.95	562.16	623.12	672.32	838.88	877.45	2552.41
338.37	558.02	624.19	685.06	840.82	877.44	2655.14
352.63	584.52	630.17	683.42	829.71	854.28	2463.58
347.23	546.88	632.03	685.81	854.37	864.48	2488.39
270.72	514.85	603.39	649.75	815.4	818.36	2582.91
272.07	454.66	575.33	623.92	811.61	838.78	2495.83
368.87	452.27	577.65	629.62	819.48	836.83	2531.41
246.98	418.36	573	621	837.98	881.11	2402.69
241.91	402.52	556.83	590.21	801.25	839.35	1977.67
241.91	409.2	559.59	600.73	806.24	854.22	1855.66
270.19	452.54	579.74	602.2	804.17	850.8	1813.13
328.32	553.87	631.27	659.91	807.28	834.4	2071.95
330.06	574.01	667.52	696.73	851.12	888.07	2369.28
407.14	567.58	648.69	708.05	859.4	879.32	2601.61

319.46	565.68	678.92	739.31	888.57	938.45	2604.65
389.8	627.64	658.77	713.93	869.83	915.48	2342.51
370.9	614.65	672.84	735.37	870.39	891.67	2159.48
335.36	593.76	665.4	713.48	865.55	890.11	2262.51
316.7	557.44	647.71	694.98	862.92	880	2197.16
344.41	571.62	631.06	682.67	848.18	872.32	2270.95
354.47	567.07	627.84	673.05	833.1	858.89	2137.92
302.01	521.39	622.77	684.23	828.74	844.78	2312.05
289.1	533.46	654.85	723.33	879.42	873.48	2523.83
276.63	483.33	608.73	673.61	876.56	910.21	2417.75
276.89	478.64	594.73	645.54	844.85	876.28	2438.48
281.74	483.89	607.7	665.26	871.78	894.58	2565.59
273.55	462.25	591.58	648.45	839.51	906.93	2477.74
274.34	454.46	595.01	649.18	833.81	844.39	2415.33
270.05	452.46	600.86	668.61	865.73	904.52	2612.52
282.43	466.78	600.48	663.24	852.87	894.33	2511.59
273.01	446.49	600.82	667.26	850.12	872.79	2427.62
287.56	465.5	615.86	668.76	868.54	894.1	2596.4
343.61	549.9	656.51	714.46	879.18	916.81	2620.43
302.12	490.6	615.36	692.32	858.16	868.21	2641.85
268.98	449.36	580.76	652.91	816.48	832.84	2429.99
269.18	441.03	557.27	639.67	798.51	826.28	2630.86
254.24	425.62	552.09	624.22	795.28	829.17	2560.79
258.96	425.18	551.82	626.43	793.31	822.91	2471.79
332.27	500.46	566.8	617.76	776.45	806.77	2556.18

429.46	669.64	674.8	691.6	815.41	835.9	2419.85
359.63	608.15	715.91	755.01	894.64	952.36	2549.18
330.05	537.42	664.24	717.99	879.82	961.42	2710.94
291.89	488.26	584.85	662.27	641.97	895.68	2312.39
293.83	487.88	577.95	648.25	801.56	854.62	2413.68
308.01	521.94	611.16	668.89	827.03	910.82	2196.29
314.3	527.07	643	693.74	855.63	916.67	2465.16
318.89	545.11	650.15	710.21	879.24	935.77	2533.5
306.52	514.93	641.28	681.94	853.65	917.05	2210.11
279.12	460.65	610.69	628.08	823.56	883.64	2166.84
303.02	545.63	693.56	727.48	897.08	919.32	2290.17
297.34	526.47	685.84	730.02	931.7	975	2147.89
277.22	485.58	651.05	1260.05	908.6	951.73	2259.81
242.82	424.74	598.04	658.2	864.7	891.22	2212.95
244.29	429.39	595.86	675.07	847.17	869.74	2448.26
249.46	433.34	579.89	621.43	803.03	840.56	2730.82
238.58	415.78	569.75	615.36	830.88	859	2643.8
233.15	404.58	569.21	611.72	851.17	857.52	2649.84
223.67	380.57	544.93	600.88	821.51	815.73	2443.03
215.96	376.62	517.64	580.61	788.92	796.19	2403.26
222.87	378.88	538.73	587	799.61	841.59	2017.24
246.25	406.81	567.76	619.99	789.43	866.11	2120.12
263.14	443.31	587.91	650.36	846.7	896.16	2290.18
287.9	469.61	603.64	658.72	820.87	878.2	2291.56
313.76	513.22	623.13	679.16	836.52	901.65	2345.99

320.72	511.51	612.68	681.01	833.01	878.46	2440.06
363.16	539.21	602.23	653.49	799.78	868.51	2373.15
329.2	512.33	612	667.11	832.72	897.41	2282.46
297.94	481.22	588.18	634.97	804.54	865.67	2346.58
297.82	482.33	596.91	656.87	831.63	885.35	2292.53
263.25	449.41	597.03	672.03	857.15	936.99	2287.76
218.61	370.77	524.62	603.57	816.7	869.37	2103.16
261.05	446.12	619.39	662.42	858.81	946.21	1989.99
279.52	474.36	631.6	665.37	868.25	949.11	1965.28
278.41	476.47	626.7	658.7	853.13	910.54	2000.25
279.4	479.05	646.49	701.17	877.19	924.36	2079.59
268.64	467	610.28	666.8	867.48	947.14	2279.75
283.36	490.1	628.38	675.63	854.85	913.25	2166.8
290.82	495.2	630.15	684.43	884.53	938.79	2348.18
295.89	495.9	633.84	713.92	900.16	961.63	2486.34
293.22	483.77	615.38	695.45	870.89	927.15	2462.93
272.48	463.4	584.89	678.08	856.67	925.5	2358.79
272.37	453.53	581.62	661.16	847.18	894.62	2161.12
266.39	448.22	571.4	651.97	831.23	896.81	2087.32
270.84	449.6	583.76	655.96	829.52	903.33	2010.8
264.12	447.7	592.39	672.47	842.37	897.86	1984.74
274.02	458.24	578.3	620.4	814.9	884.61	2131.41
285.89	478.23	583.54	634.69	808.05	858.22	1961.98
317.81	538.74	630.6	673.02	837.36	866.48	2236.58
297.28	500.83	637.04	704.22	916.6	957.25	2040.05

289.54	476.53	599.95	654.32	858.07	891.97	2419.93
298.93	479.87	592.9	643.93	836.72	876.33	2371.65
302.9	495.52	602.1	667.73	847.93	859.61	2175.74
303.03	509.84	625.02	693.64	854.35	913.59	2278.94
271.36	459.06	594.23	644.66	818.89	882.81	2090.1
301.99	496.2	601.53	636.46	814.6	856.3	2260.7
314.45	527.56	642.93	684.97	824.39	838.89	2166.38
308.01	500.01	601.78	656.31	802.85	818.66	2643.58
298.18	479	588.86	635.53	809.89	827.05	2358.9
349.45	535.58	586.84	642.45	828.23	841.09	2457.16
359.71	558.34	601.41	651.54	815.4	823.79	2391.68
336.95	562.16	623.12	672.32	838.88	877.45	2552.41
338.37	558.02	624.19	685.06	840.82	877.44	2655.14
352.63	584.52	630.17	683.42	829.71	854.28	2463.58
347.23	546.88	632.03	685.81	854.37	864.48	2488.39
270.72	514.85	603.39	649.75	815.4	818.36	2582.91
272.07	454.66	575.33	623.92	811.61	838.78	2495.83
368.87	452.27	577.65	629.62	819.48	836.83	2531.41
246.98	418.36	573	621	837.98	881.11	2402.69
241.91	402.52	556.83	590.21	801.25	839.35	1977.67
241.91	409.2	559.59	600.73	806.24	854.22	1855.66
270.19	452.54	579.74	602.2	804.17	850.8	1813.13
328.32	553.87	631.27	659.91	807.28	834.4	2071.95
330.06	574.01	667.52	696.73	851.12	888.07	2369.28
407.14	567.58	648.69	708.05	859.4	879.32	2601.61

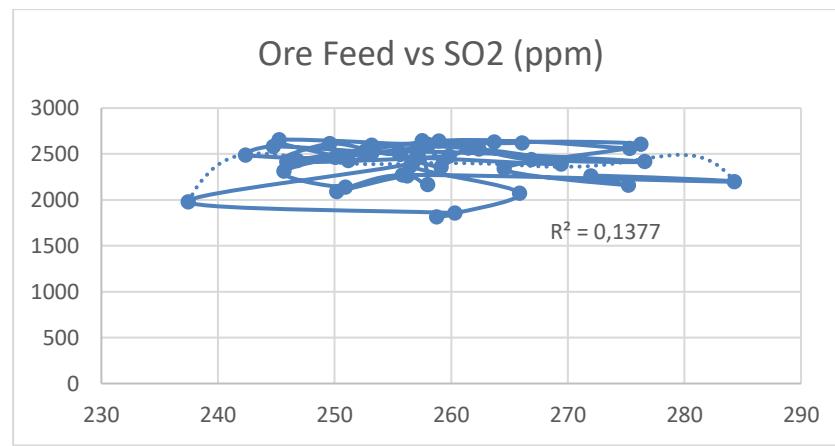
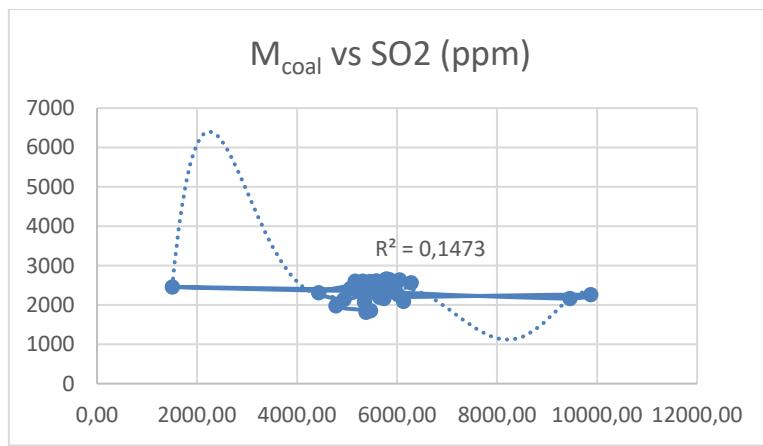
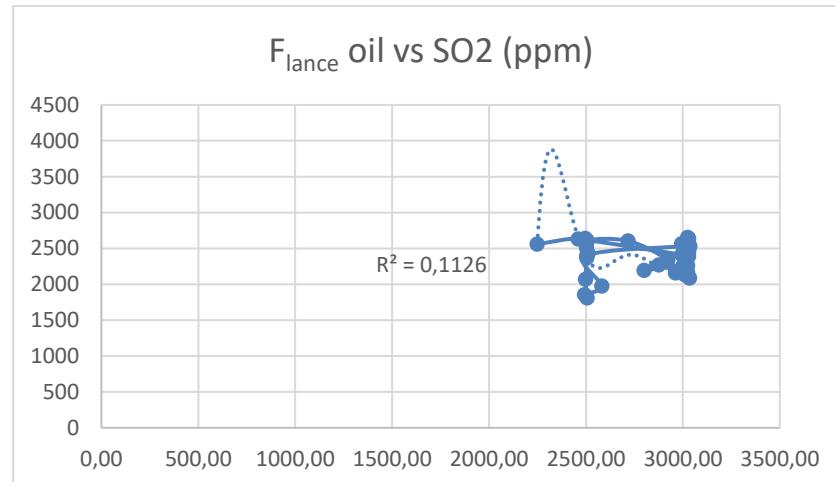
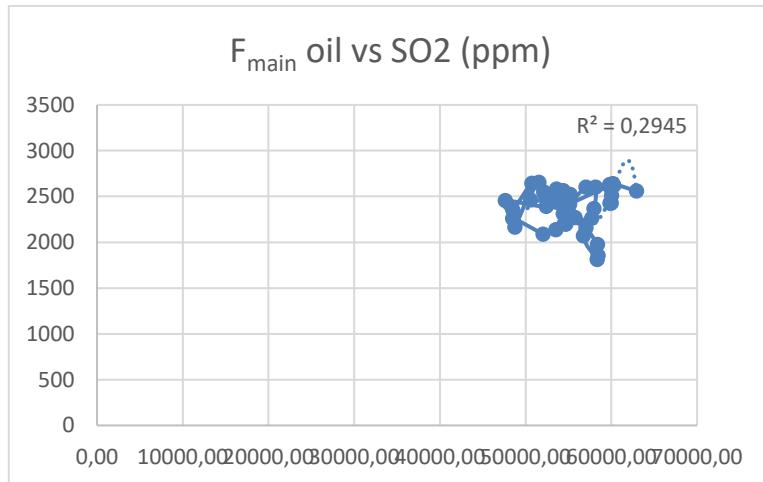
319.46	565.68	678.92	739.31	888.57	938.45	2604.65
389.8	627.64	658.77	713.93	869.83	915.48	2342.51
370.9	614.65	672.84	735.37	870.39	891.67	2159.48
335.36	593.76	665.4	713.48	865.55	890.11	2262.51
316.7	557.44	647.71	694.98	862.92	880	2197.16
344.41	571.62	631.06	682.67	848.18	872.32	2270.95
354.47	567.07	627.84	673.05	833.1	858.89	2137.92
302.01	521.39	622.77	684.23	828.74	844.78	2312.05
289.1	533.46	654.85	723.33	879.42	873.48	2523.83
276.63	483.33	608.73	673.61	876.56	910.21	2417.75
276.89	478.64	594.73	645.54	844.85	876.28	2438.48
281.74	483.89	607.7	665.26	871.78	894.58	2565.59
273.55	462.25	591.58	648.45	839.51	906.93	2477.74
274.34	454.46	595.01	649.18	833.81	844.39	2415.33
270.05	452.46	600.86	668.61	865.73	904.52	2612.52
282.43	466.78	600.48	663.24	852.87	894.33	2511.59
273.01	446.49	600.82	667.26	850.12	872.79	2427.62
287.56	465.5	615.86	668.76	868.54	894.1	2596.4
343.61	549.9	656.51	714.46	879.18	916.81	2620.43
302.12	490.6	615.36	692.32	858.16	868.21	2641.85
268.98	449.36	580.76	652.91	816.48	832.84	2429.99
269.18	441.03	557.27	639.67	798.51	826.28	2630.86
254.24	425.62	552.09	624.22	795.28	829.17	2560.79
258.96	425.18	551.82	626.43	793.31	822.91	2471.79
332.27	500.46	566.8	617.76	776.45	806.77	2556.18

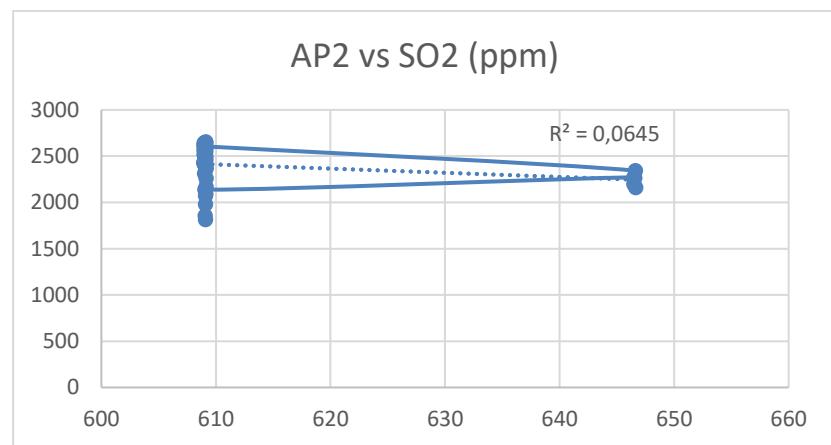
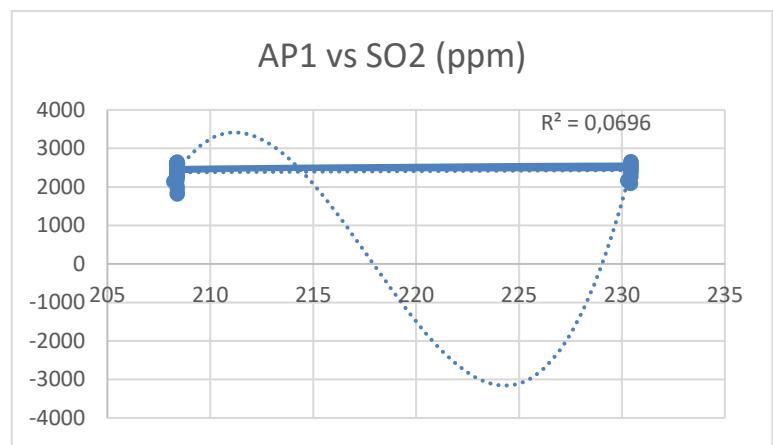
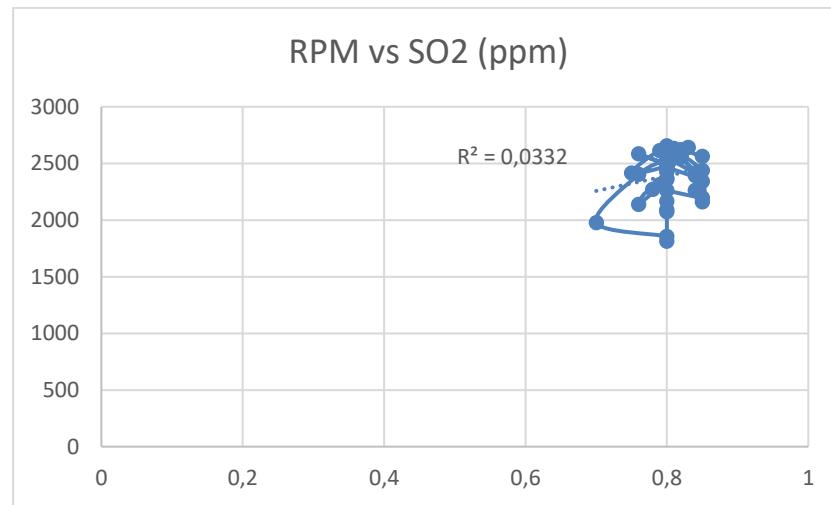
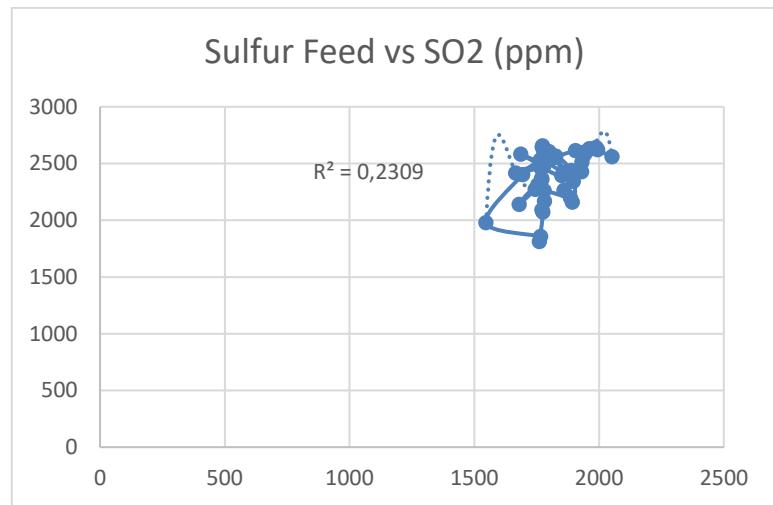
429.46	669.64	674.8	691.6	815.41	835.9	2419.85
359.63	608.15	715.91	755.01	894.64	952.36	2549.18
330.05	537.42	664.24	717.99	879.82	961.42	2710.94
291.89	488.26	584.85	662.27	641.97	895.68	2312.39
293.83	487.88	577.95	648.25	801.56	854.62	2413.68
308.01	521.94	611.16	668.89	827.03	910.82	2196.29
314.3	527.07	643	693.74	855.63	916.67	2465.16
318.89	545.11	650.15	710.21	879.24	935.77	2533.5
306.52	514.93	641.28	681.94	853.65	917.05	2210.11
279.12	460.65	610.69	628.08	823.56	883.64	2166.84
303.02	545.63	693.56	727.48	897.08	919.32	2290.17
297.34	526.47	685.84	730.02	931.7	975	2147.89
277.22	485.58	651.05	1260.05	908.6	951.73	2259.81
242.82	424.74	598.04	658.2	864.7	891.22	2212.95
244.29	429.39	595.86	675.07	847.17	869.74	2448.26
249.46	433.34	579.89	621.43	803.03	840.56	2730.82
238.58	415.78	569.75	615.36	830.88	859	2643.8
233.15	404.58	569.21	611.72	851.17	857.52	2649.84
223.67	380.57	544.93	600.88	821.51	815.73	2443.03
215.96	376.62	517.64	580.61	788.92	796.19	2403.26
222.87	378.88	538.73	587	799.61	841.59	2017.24
246.25	406.81	567.76	619.99	789.43	866.11	2120.12
263.14	443.31	587.91	650.36	846.7	896.16	2290.18
287.9	469.61	603.64	658.72	820.87	878.2	2291.56
313.76	513.22	623.13	679.16	836.52	901.65	2345.99

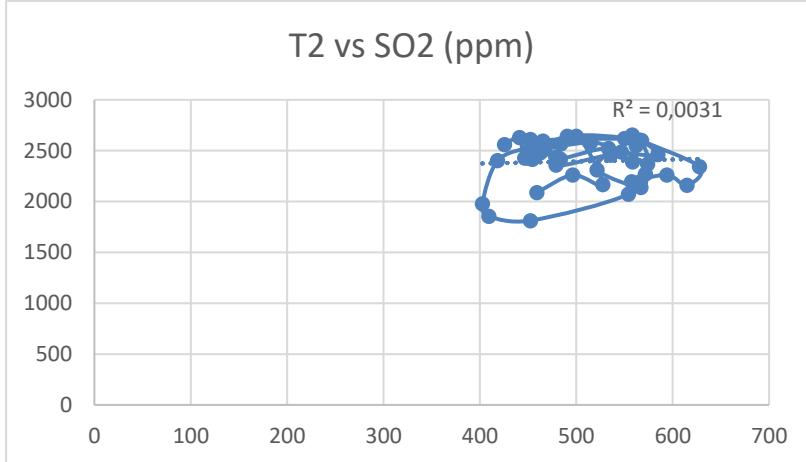
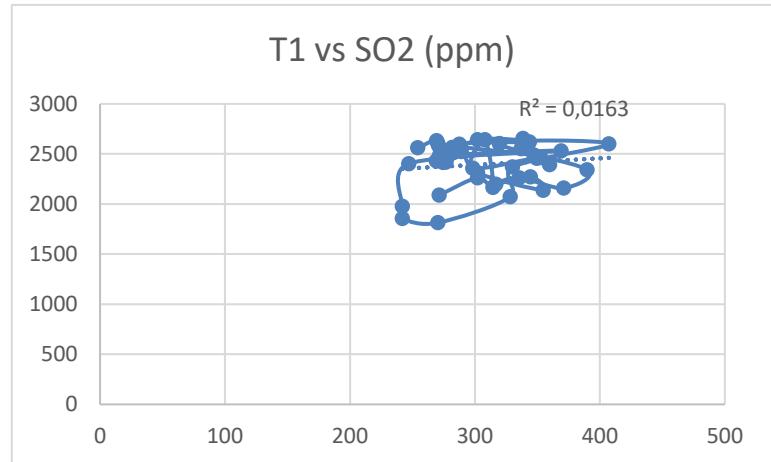
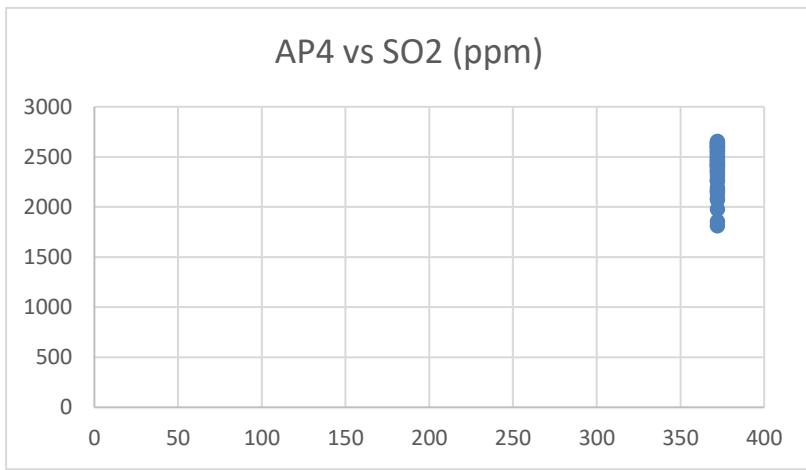
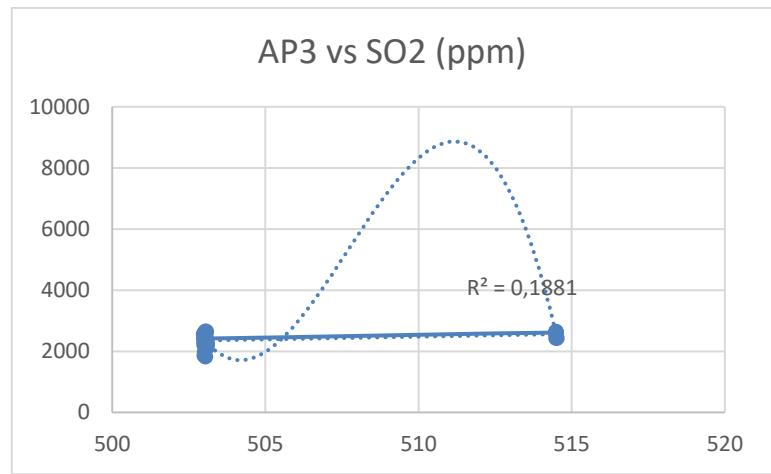
320.72	511.51	612.68	681.01	833.01	878.46	2440.06
363.16	539.21	602.23	653.49	799.78	868.51	2373.15
329.2	512.33	612	667.11	832.72	897.41	2282.46
297.94	481.22	588.18	634.97	804.54	865.67	2346.58
297.82	482.33	596.91	656.87	831.63	885.35	2292.53
263.25	449.41	597.03	672.03	857.15	936.99	2287.76
218.61	370.77	524.62	603.57	816.7	869.37	2103.16
261.05	446.12	619.39	662.42	858.81	946.21	1989.99
279.52	474.36	631.6	665.37	868.25	949.11	1965.28
278.41	476.47	626.7	658.7	853.13	910.54	2000.25
279.4	479.05	646.49	701.17	877.19	924.36	2079.59
268.64	467	610.28	666.8	867.48	947.14	2279.75
283.36	490.1	628.38	675.63	854.85	913.25	2166.8
290.82	495.2	630.15	684.43	884.53	938.79	2348.18
295.89	495.9	633.84	713.92	900.16	961.63	2486.34
293.22	483.77	615.38	695.45	870.89	927.15	2462.93
272.48	463.4	584.89	678.08	856.67	925.5	2358.79
272.37	453.53	581.62	661.16	847.18	894.62	2161.12
266.39	448.22	571.4	651.97	831.23	896.81	2087.32
270.84	449.6	583.76	655.96	829.52	903.33	2010.8
264.12	447.7	592.39	672.47	842.37	897.86	1984.74
274.02	458.24	578.3	620.4	814.9	884.61	2131.41
285.89	478.23	583.54	634.69	808.05	858.22	1961.98

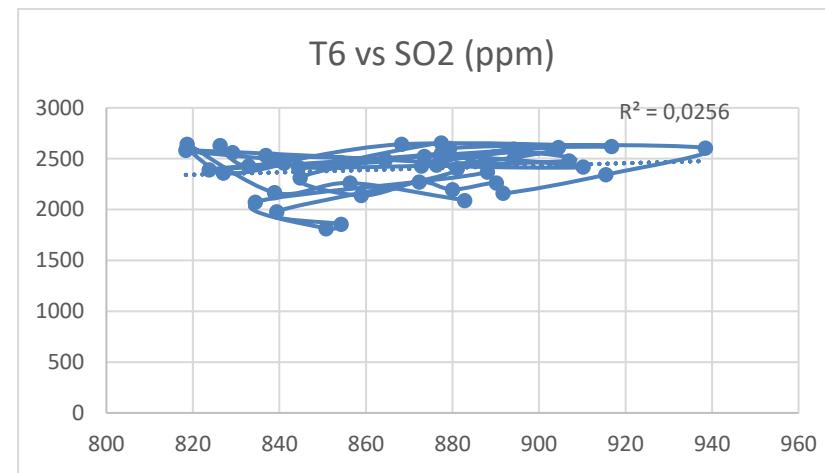
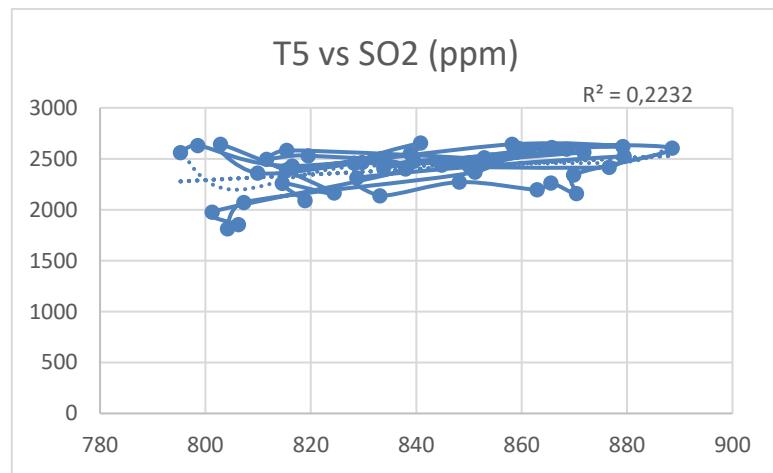
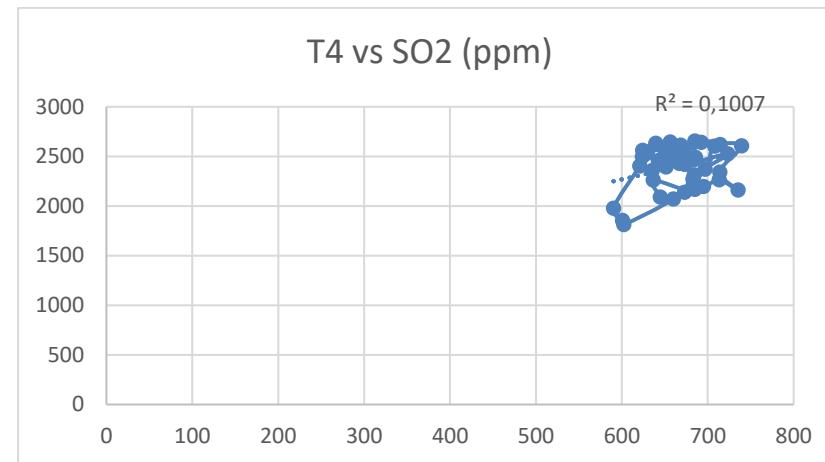
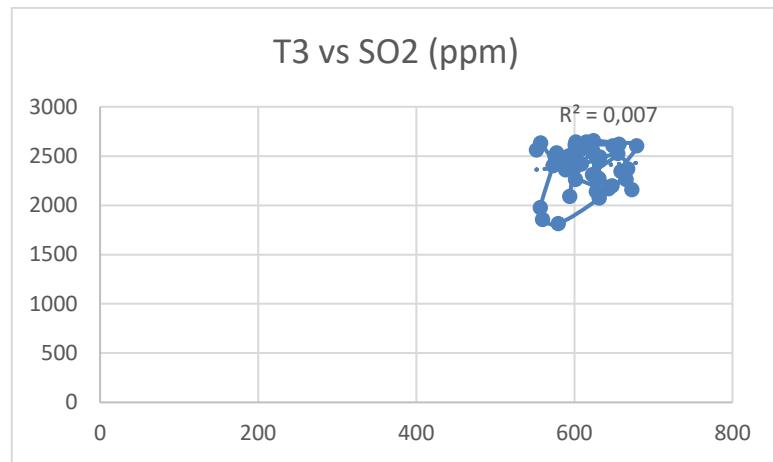
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN B – GRAFIK R<sup>2</sup>











## BIOGRAFI



Leo Agung Arie Purnomo, lahir di Boyolali, 9 Oktober 1985, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Menghabiskan masa kecil dan remaja di Mojokerto sampai tahun 2000 untuk menjalani masa SMA di sebuah sekolah asrama di Blitar, yaitu SMUK Seminari St Vincentius a Paulo, Garum – Blitar. Selanjutnya di tahun 2004 meneruskan Pendidikan di S1 Teknik Fisika ITS, dengan konsentrasi studi pada bidang instrumentasi dan control. Lulus di tahun 2010. Selanjutnya bekerja sebagai Instrument Maintenance Engineer di PT Pabrik Kertas Tjiwi Kimia Tbk pada tahun 2010-2012 awal, sebelum pindah ke PT Vale Indonesia Tbk pada Maret 2012 sebagai Junior Instrument Engineer. Pada tahun 2016 dipromosikan menjadi Instrument Engineer untuk meng-handle project-project yang lebih besar. Kemudian di tahun 2017 meneruskan studi S2 di pascasarjana Teknik Fisika ITS, untuk memperdalam ilmu di bidang instrumentasi dan control serta bidang rekayasa energi terbarukan.

Konsentrasi tesis yang diambil berusaha mengambil topik pada 2 bidang yang digeluti saat ini yaitu rekayasa energi terbarukan yang terwakili pada reduksi emisi, dan control yang terwakili pada system kendali dan optimisasi.

Penulis memiliki ketertarikan yang lebih pada system proses dan process control, dimana didalamnya akan diaplikasikan system instrumentasi, system kendali, konvensional atau advance process control, dll.

Apabila ingin berdiskusi lebih lanjut, penulis bisa dihubungi melalui [Leoagung.ariep@gmail.com](mailto:Leoagung.ariep@gmail.com)