

TERAKREDITASI RISTEKDIKTI No. 36b/E/KPT/2016

---

# Jurnal *Rekayasa Elektrika*

---

VOLUME 15 NOMOR 3

Desember 2019

---

**Perancangan Struktur Kontrol Penggilingan Batubara pada Sistem Pembakaran Batubara** 177-185

*Stefanus Yudi Irwan, Awang N.I. Wardana, dan Ester Wijayanti*

---

JRE	Vol. 15	No. 3	Hal 157-202	Banda Aceh, Desember 2019	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	-------------	------------------------------	--------------------------------------

# Perancangan Struktur Kontrol Penggilingan Batubara pada Sistem Pembakaran Batubara

Stefanus Yudi Irwan, Awang N.I. Wardana\*, dan Ester Wijayanti  
Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281  
e-mail: awang.wardana@ugm.ac.id

**Abstrak**—Ketidakmampuan struktur kontrol penggilingan batubara dalam memonitor dan mengontrol aliran batubara halus menimbulkan kerugian operasional dan lingkungan. Penelitian dilakukan untuk merancang struktur kontrol baru untuk proses penggilingan batubara pada sistem pembakaran batubara sehingga diperoleh peningkatan kinerja pengendalian dari struktur kontrol yang sudah ada sebelumnya. *Cascade control*, *blend station*, dan *feedback control* digunakan untuk mengendalikan aliran massa batubara, aliran primary air, dan suhu batubara halus. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi seluruh tujuan kontrol yang ditetapkan. Aplikasi struktur kontrol hasil perancangan mampu membuat respon *step* proses penggilingan batubara memiliki waktu penetapan rata-rata sebesar 161,75 detik dengan lonjakan maksimum sebesar 0%. Struktur kontrol hasil perancangan juga mampu membuat batubara hasil penggilingan memiliki kehalusan pada rentang nilai 70% hingga 75% dan rentang *moisture content* bernilai 2,18% hingga 2,28%. Hasil evaluasi ini membuat kinerja pengendalian struktur kontrol hasil perancangan lebih baik dibandingkan struktur kontrol yang sudah diterapkan.

**Kata kunci:** *batubara halus, penggilingan batubara, struktur kontrol, tujuan kontrol, kinerja pengendalian*

**Abstract**—The inability of the coal mill control structure to monitor and control pulverized coal flow causes operational and environmental problems. The research was done to design the new control structure for coal mill in coal firing system to achieve an improvement on control system performance compared to the existing control structure. *Cascade control*, *blend station*, and *feedback control* was used to control the flow of coal, the flow of primary air, and temperature of the pulverized coal. The result of the evaluation shows that the new control structure capable of fulfilling all the control objective applied to it. Implementation of the new control structure capable to make the *step response* of the coal mill to have an average settling time at 161.75 seconds with 0% overshoot. The new control structure also capable to make the pulverized coal fineness at the range of 70% to 75% and moisture content at the range of 2.18% to 2.28%. The result of the evaluation makes the control performance of the new control structure is better than the previous coal mill control structure.

**Keywords:** *pulverized coal, coal mill, control structure, control objective, control performance*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

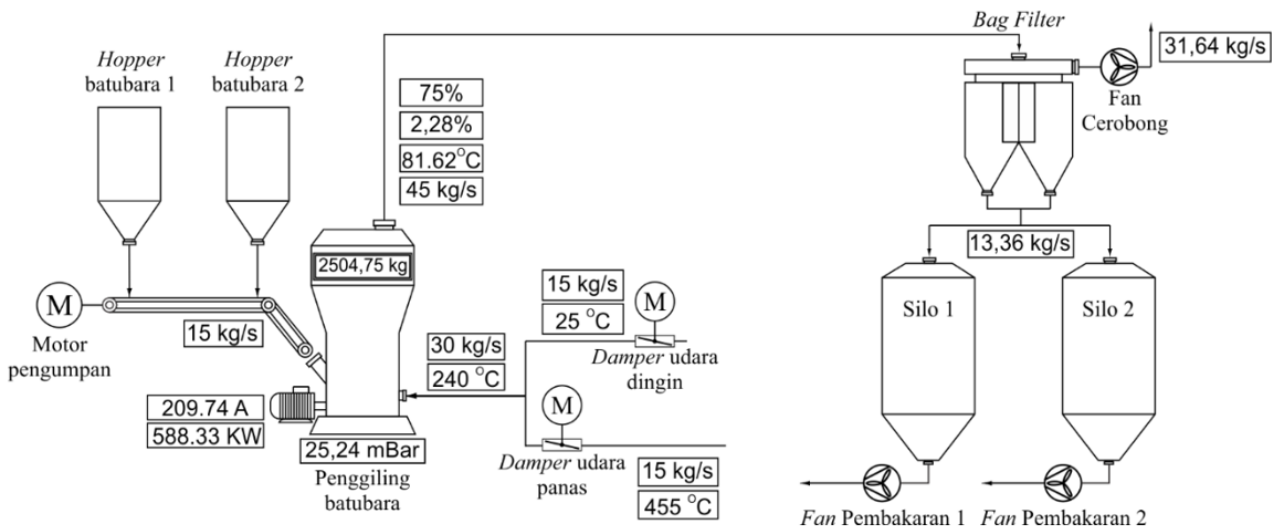
## I. PENDAHULUAN

Sistem pembakaran batubara banyak digunakan oleh industri semen dan pembangkit listrik sebagai penyuplai bahan bakar. Penggiling batubara merupakan alat yang digunakan untuk menggerus batubara kasar menjadi batubara berukuran kecil (112,5  $\mu\text{m}$ ) untuk meningkatkan efisiensi pembakaran. Kinerja dan kehandalan dari sistem pembakaran batubara sangat dipengaruhi oleh pengoperasian penggiling batubara. Kegagalan pada pengoperasian penggiling batubara dapat menimbulkan kerugian finansial dan lingkungan yang cukup besar. Permasalahan yang terjadi pada penggiling batubara salah satunya disebabkan karena struktur kontrol tidak mampu mengendalikan aliran batubara halus hasil penggilingan dengan baik. Sulitnya pengendalian disebabkan karena penggiling batubara merupakan sistem yang sangat *non-*

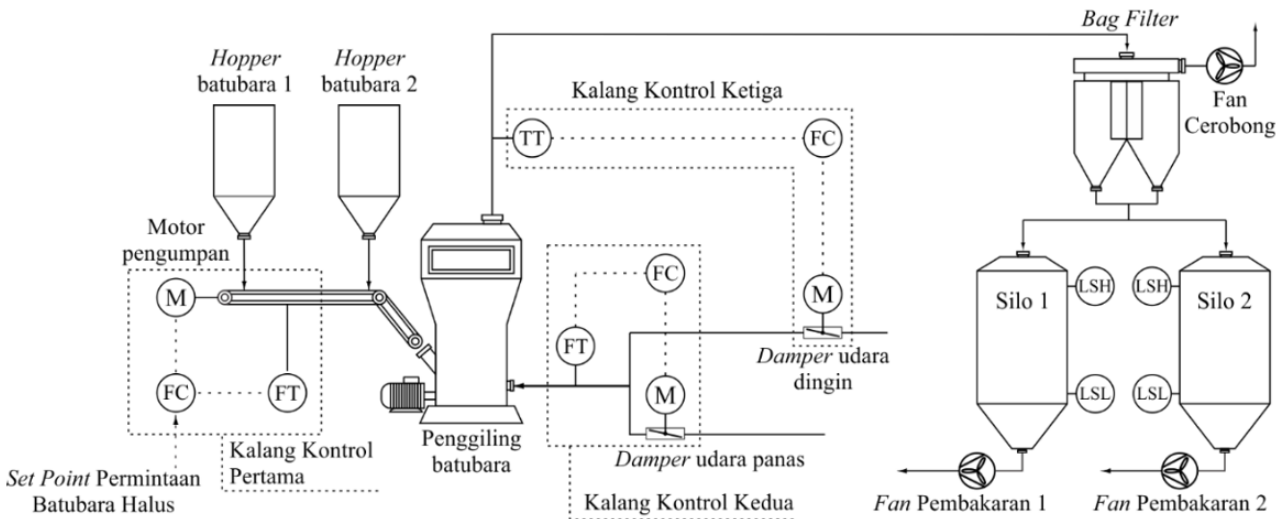
*linear*, memiliki variabel proses yang saling berhubungan, dan pengukuran variabel penting untuk sistem kontrol, seperti aliran batubara halus dan beban penggilingan, sulit dilakukan [1].

Irwan dan Wardana mengembangkan perangkat lunak *distributed coal mill simulator* [2] untuk menguji struktur kontrol penggilingan batubara. *Distributed coal mill simulator* tersusun atas alat-alat proses pada sistem pembakaran batubara halus tidak langsung (Gambar 1). Kondisi dasar di dalam *distributed coal mill simulator* menyatakan nilai-nilai aliran, suhu, kualitas produk, dan penggunaan energi dari pengoperasian penggiling batubara di dalam pengoperasian manual.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang struktur kontrol baru untuk proses penggilingan batubara yang mampu meningkatkan kinerja penggiling batubara, serta mengevaluasi kinerja struktur kontrol hasil



Gambar 1. Skema alat proses pada sistem pembakaran batubara dan kondisi dasar proses penggilingan



Gambar 2. Struktur kontrol *non load line* [1]

perancangan menggunakan perangkat lunak *distributed coal mill simulator*. Perancangan struktur kontrol proses yang dilakukan pada penelitian ini terbatas pada algoritma kontrol proporsional, integral, dan derivatif saja karena algoritma kontrol ini banyak diaplikasikan di industri.

## II. STRUKTUR KONTROL PENGGILINGAN BATUBARA

Secara umum pengendalian penggiling batubara dilakukan untuk mengatur aliran batubara dan udara primer sebagai bahan di dalam proses penggilingan. Terdapat tiga struktur kontrol yang sudah diterapkan untuk mengendalikan penggiling batubara dengan strateginya masing-masing.

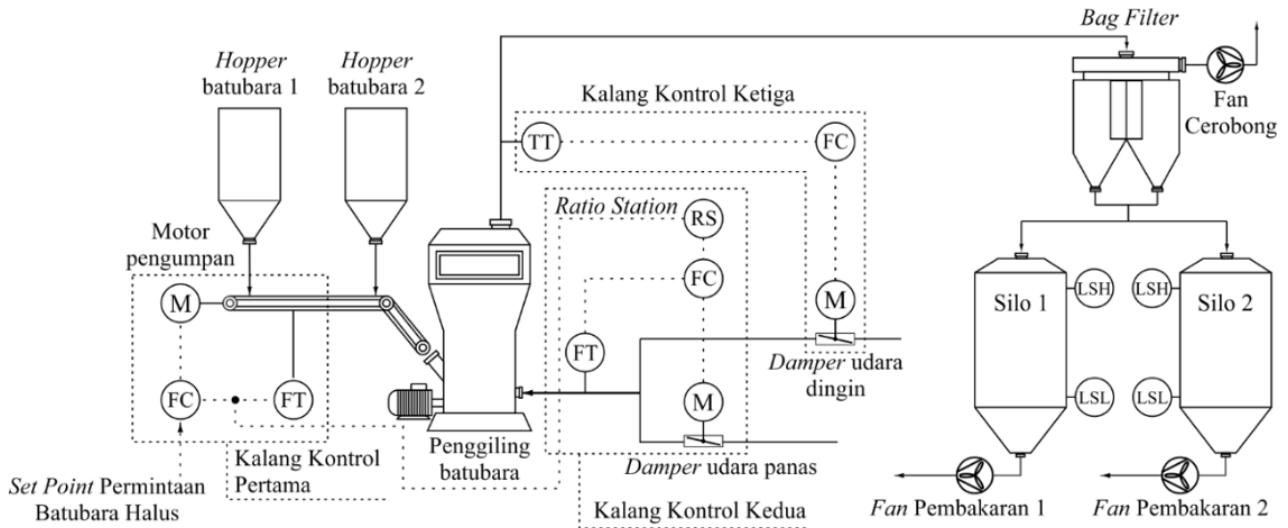
### A. Struktur Kontrol Non Load Line

Agrawal [1] membuat struktur kontrol *non load line* yang tersusun dari tiga kalang kontrol (Gambar 2). Kalang kontrol pertama digunakan untuk mengendalikan aliran batubara halus. Pengukuran batubara umpan dan

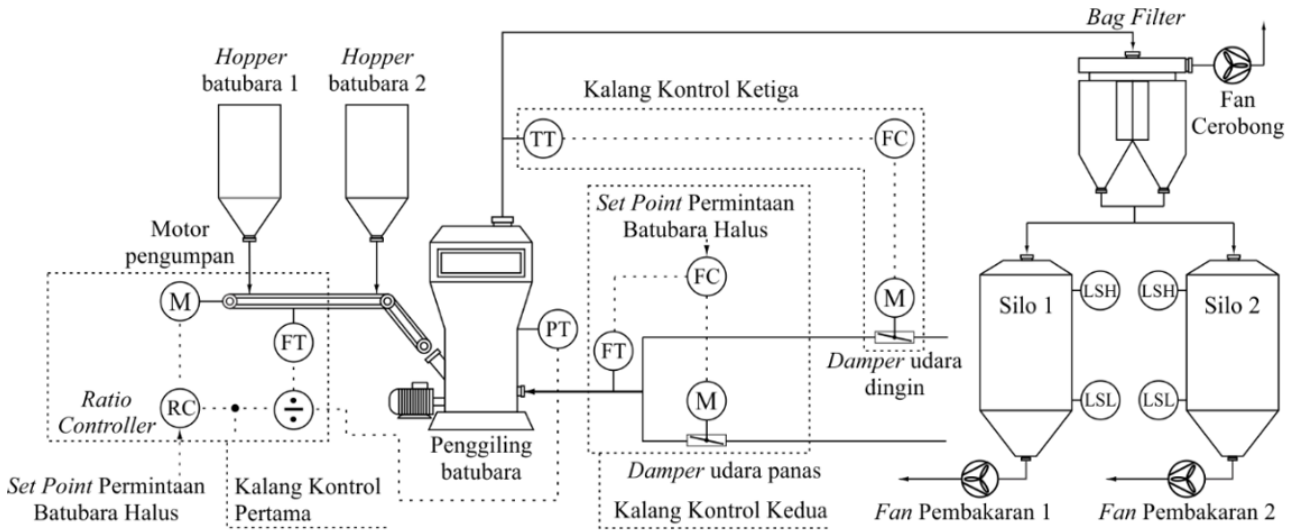
*set point* dengan kompensator *moisture* dijadikan sebagai masukan *controller*. Motor pengumpan sebagai variabel termanipulasi kalang kontrol pertama, digunakan untuk mengatur aliran batubara umpan. Kalang kontrol kedua digunakan untuk mengendalikan aliran udara primer. Pengukuran aliran udara primer dan *set point* yang dibuat tetap sebesar 30 kg/s dijadikan sebagai masukan *controller*. *Damper* udara panas digunakan untuk mengatur jumlah aliran udara primer yang masuk ke dalam proses penggilingan. Kalang kontrol ketiga digunakan untuk mengendalikan suhu batubara halus. Pengukuran suhu batubara halus dan *set point* yang dibuat tetap sebesar 82 dijadikan masukan *controller*. *Damper* udara dingin kemudian digunakan untuk mengatur suhu batubara halus.

### B. Struktur Kontrol Air Following

Rees dan Fan [3] membuat struktur kontrol *air following* (Gambar 3). Kalang kontrol pada struktur kontrol *air following* mirip seperti kalang kontrol pada struktur kontrol *non load line*. Perbedaannya terhadap struktur



Gambar 3. Struktur kontrol air following [3]



Gambar 4. Struktur kontrol coal following [3]

kontrol *non load line* terletak pada penggunaan *ratio control* pada kalang kontrol kedua untuk mengendalikan aliran udara primer. *Ratio control* diimplementasikan menggunakan *ratio station* dengan menerapkan konsep *load line*. *Load line* menyatakan komposisi yang sesuai antara aliran batubara umpan dengan aliran udara primer untuk proses penggilingan. *Ratio station* mendapatkan masukan dari pengukuran aliran batubara umpan. Hasil perhitungan *ratio station* ini menjadi masukan *set point* aliran udara primer.

C. Struktur Kontrol Coal Following

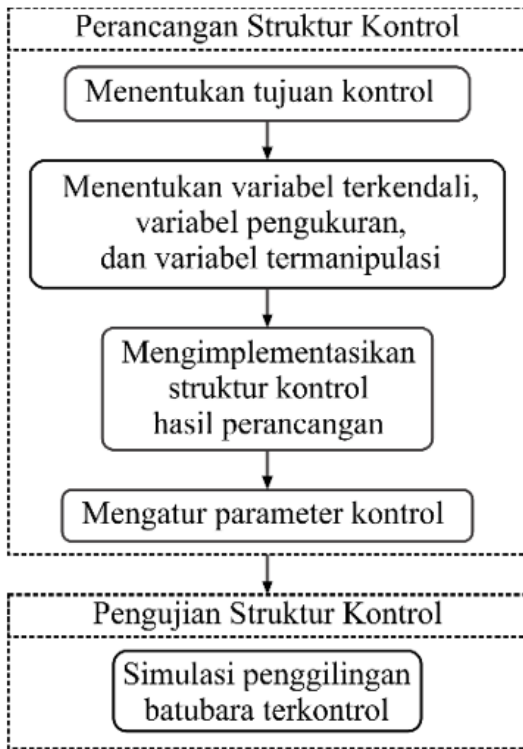
Struktur kontrol *coal following* buatan Rees dan Fan [3] terdiri atas tiga kalang kontrol (Gambar 4). Kalang kontrol pertama digunakan untuk mengatur akumulasi massa batubara di dalam penggiling. Rasio antara pengukuran perbedaan tekanan di dalam penggiling dengan pengukuran aliran udara primer dijadikan sebagai variabel pengukuran untuk *ratio controller*. *Ratio controller* digunakan untuk mengatur motor pengumpan sehingga akumulasi massa

batubara di dalam penggiling dapat dikendalikan. Kalang kontrol kedua digunakan untuk mengatur aliran batubara halus. Pengukuran aliran udara primer dan pengaturan *set point* yang dikompensasi menggunakan *load line* dijadikan sebagai masukan *controller*. Kompensasi menggunakan *load line* diperlukan sehingga kalang kontrol dapat mengatur aliran batubara halus secara tidak langsung melalui udara primer. Kalang kontrol ketiga sama seperti kalang kontrol ketiga pada struktur kontrol *non load line* maupun *air following*. Kalang ini digunakan untuk mengatur suhu batubara halus hasil penggilingan menggunakan pengukuran suhu batubara halus dengan *set point* yang tetap.

III. METODE PENELITIAN

A. Perangkat Lunak dan Keras

Penelitian dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak dan keras. Perangkat lunak yaitu *distributed coal mill simulator* [2] digunakan untuk menguji kinerja dari



Gambar 5. Langkah kerja penelitian

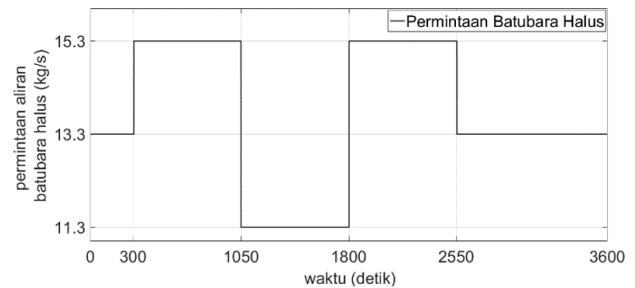
struktur kontrol hasil perancangan, dan perangkat keras yaitu komputer digunakan untuk menjalankan perangkat lunak tersebut. Kriteria minimal yang harus dimiliki oleh komputer yang digunakan adalah terpasangnya perangkat lunak Java 1.8 sebagai sistem operasi untuk mengoperasikan perangkat lunak *distributed coal mill simulator*.

*Distributed coal mill simulator* merupakan perangkat lunak yang dikembangkan untuk merancang struktur kontrol. Model yang digunakan pada perangkat lunak ini adalah model penggilingan batubara yang diciptakan oleh Agrawal [4]. Proses penggilingan batubara pada perangkat lunak *distributed coal mill simulator* ini merupakan penggilingan batubara untuk sistem pembakaran batubara halus tidak langsung (Gambar 1) dengan jenis penggiling batubara *vertical spindle mill*.

### B. Prosedur Perancangan Struktur Kontrol

Perancangan struktur kontrol dilakukan melalui empat tahap (Gambar 5). Tahap pertama yaitu menentukan tujuan kontrol. Tujuan kontrol ditentukan agar struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi tuntutan pengoperasian proses penggilingan batubara. Tahap kedua yaitu menentukan variabel terkendali, variabel pengukuran, dan variabel termanipulasi yang akan digunakan pada struktur kontrol. Tahap kedua ini dilakukan untuk membangun kalang kontrol yang menyusun struktur kontrol.

Tahap ketiga yaitu mengimplementasikan struktur kontrol hasil perancangan ke dalam perangkat lunak *distributed coal mill simulator*. Tahap keempat yaitu



Gambar 6. Perubahan permintaan batubara halus

mengatur parameter PID struktur kontrol hasil perancangan. Parameter kontrol yang akan ditentukan untuk masing-masing struktur kontrol terdiri dari parameter  $K_p$ ,  $T_n$ , dan  $T_v$  seperti pada persamaan (1) dengan  $e(t)$  merupakan selisih antara *set point* dengan nilai pengukuran aktual.

$$PID = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^{\infty} e(t) dt + T_v \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

$K_p$  merupakan parameter untuk mengatur kendali proporsional,  $T_n$  merupakan parameter untuk mengatur kendali integral, dan  $T_v$  merupakan parameter untuk mengatur kendali derivatif. Pengaturan parameter kontrol diperlukan untuk mengoperasikan struktur kontrol hasil perancangan secara otomatis.

### C. Pengujian Struktur Kontrol

Pengujian dilakukan dengan menjalankan proses penggilingan batubara pada perangkat lunak *distributed coal mill simulator* menggunakan struktur kontrol hasil perancangan. Pengujian dilakukan selama kurang lebih satu jam dengan merubah *set point* permintaan batubara halus pada rentang nilai 11,3 kg/s hingga 15,3 kg/s (Gambar 6). Perubahan permintaan batubara halus dilakukan untuk mensimulasikan beban sistem pembakaran yang berubah-ubah setiap waktunya.

Hasil pengujian struktur kontrol hasil perancangan kemudian dievaluasi menggunakan perbandingan terhadap tujuan kontrol dan hasil pengujian struktur kontrol lain yang sudah diterapkan.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Perancangan Struktur Kontrol

#### 1. Tujuan Kontrol

Tujuan kontrol dibedakan menjadi tujuan dalam variabel proses dan tujuan dalam variabel kontrol. Tujuan pada variabel proses ditetapkan untuk membuat produk yang dihasilkan, yaitu batubara halus, memiliki spesifikasi produk yang baik sebagai bahan bakar. Selain dari aspek kualitas, penentuan variabel proses juga dibuat untuk mengamankan proses penggilingan batubara.

Tujuan pada variabel kontrol ditetapkan untuk mengatur respon pengendalian proses penggilingan batubara terhadap perubahan permintaan batubara halus.

Tabel 1. Tujuan rancangan struktur kontrol

Jenis Variabel	Variabel	Nilai
Variabel Proses	Kehalusan batubara halus (%)	70 s/d 75
	Moisture content batubara halus (%)	1 s/d 3
	Akumulasi massa batubara di dalam penggiling (kg)	1900 s/d 3460
	Suhu keluar batubara halus (OC)	80 s/d 100
	Waktu penetapan (detik)	< 250
Variabel Kontrol (Permintaan batubara halus)	Lonjakan maksimum (%)	< 20
	Kesalahan keadaan tunak (kg/s)	± 2% Nilai keadaan tunak
	Decay ratio (%)	< 10

Respon pengendalian dari proses penggilingan batubara perlu diatur sehingga proses penggilingan batubara memiliki respon yang baik terhadap perubahan permintaan batubara halus yang tidak menentu.

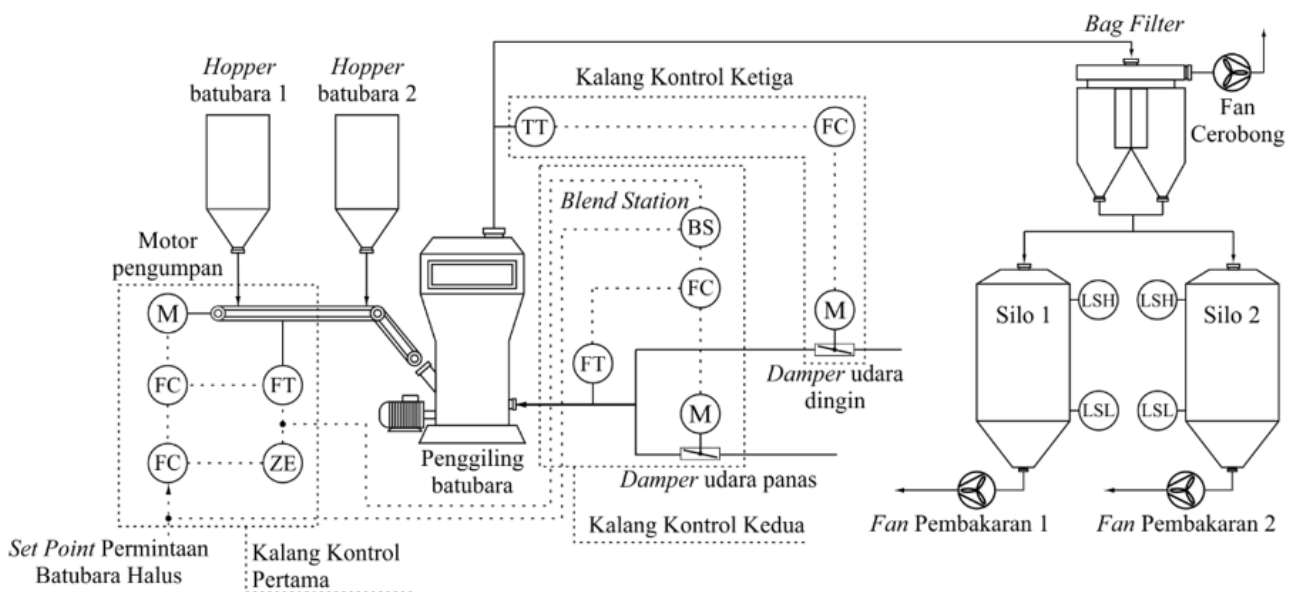
2. Perancangan Kalang Kontrol

Struktur kontrol yang baru (Gambar 7) dirancang berdasarkan tujuan kontrol (Tabel 1). Jumlah aktuator pada model proses menentukan jumlah kalang kontrol pada struktur kontrol baru. Terdapat tiga jenis aktuator yaitu motor pengumpan, damper udara panas, dan damper udara dingin. Ketiga macam aktuator ini membuat struktur kontrol yang baru terdiri dari tiga kalang kontrol.

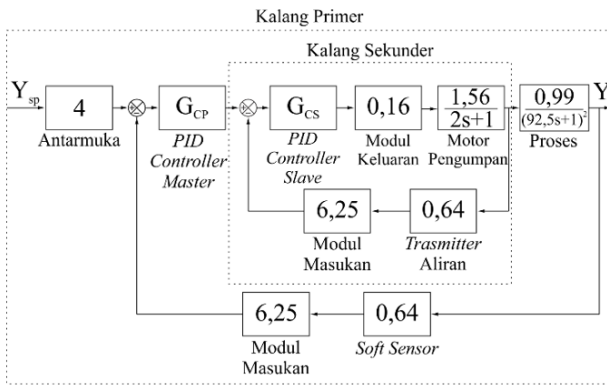
Kalang kontrol pertama digunakan untuk mengendalikan aliran massa batubara halus. Variabel terkendali kalang kontrol pertama adalah aliran batubara umpan dan aliran batubara halus. Aliran batubara umpan dipilih agar akumulasi massa batubara di dalam penggiling

tidak terlalu besar, sedangkan aliran batubara halus dipilih karena variabel ini berkaitan langsung dengan permintaan produk penggilingan batubara. Kedua variabel ini dipilih karena massa batubara yang dikendalikan berpengaruh besar terhadap respon perubahan permintaan batubara halus. Pengukuran terhadap aliran batubara umpan dan aliran batubara halus diperlukan sehingga kalang kontrol mampu mengetahui keadaan aktual dari variabel yang dikendalikan. Aliran batubara umpan merupakan variabel yang dapat diukur, sedangkan aliran batubara halus merupakan variabel yang tidak dapat diukur. Pengukuran aliran batubara halus kemudian disubstitusi dengan estimasi menggunakan teknik *soft sensor* [5]. Pengukuran aliran batubara umpan dan estimasi aliran batubara halus oleh *soft sensor* kemudian dijadikan sebagai variabel pengukuran bagi kalang kontrol pertama. Variabel termanipulasi yang digunakan pada kalang kontrol pertama adalah motor pengumpan. Motor pengumpan dipilih karena piranti ini langsung mengatur laju aliran batubara umpan. *Cascade control* digunakan sebagai kalang kontrol pertama karena terdapat dua variabel pengukuran dan satu variabel termanipulasi.

Kalang kontrol kedua digunakan untuk mengendalikan laju aliran udara primer yang masuk ke dalam penggiling batubara. Pemilihan aliran udara primer sebagai variabel terkendali didasarkan karena variabel ini berpengaruh besar terhadap kehalusan batubara halus, akumulasi massa batubara di dalam penggiling dan respon *step* permintaan batubara halus. Aliran udara primer merupakan variabel yang dapat diukur, sehingga variabel ini juga menjadi variabel pengukuran untuk kalang kontrol kedua. Aktuator yang dipilih untuk mengendalikan aliran udara primer adalah *damper* udara panas. Pemilihan *damper* udara panas sebagai aktuator didasarkan karena *damper* udara dingin lebih cocok digunakan pada pengendalian suhu batubara halus. Struktur kontrol rasio dengan algoritma *blend station* [6] diterapkan pada kalang kontrol kedua untuk



Gambar 7. Struktur kontrol hasil rancangan



Gambar 8. Diagram balok kalang kontrol pertama

Tabel 2. Parameter struktur kontrol hasil perancangan

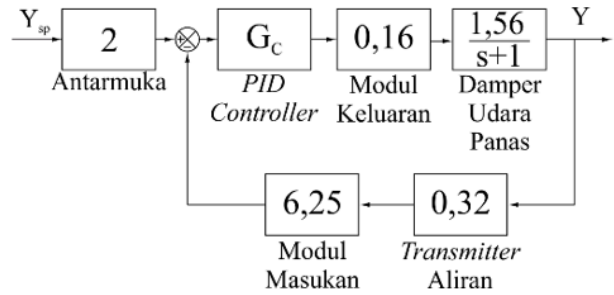
Kalang Kontrol	Parameter Kontrol		
	Kp	Tn	Tv
Pertama : Master	4,07	185,05	47,00
Pertama : Slave	2,00	2,00	0,00
Kedua	-96,25	195,00	0,00
Ketiga	1,00	1,00	0,00

mempercepat respon pengendalian proses penggilingan batubara terhadap permintaan batubara halus. Aliran udara primer ditetapkan pada rentang nilai 30 kg/s hingga 30,87 kg/s untuk menjaga kehalusan batubara halus hasil penggilingan berada pada rentang nilai yang optimum yaitu 70% hingga 75% [4].

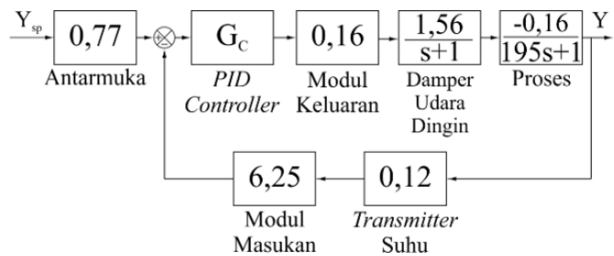
Kalang kontrol ketiga digunakan untuk mengendalikan suhu batubara halus. Pemilihan suhu batubara halus sebagai variabel terkendali didasarkan karena variabel ini berpengaruh terhadap *moisture content* batubara halus. Suhu batubara halus juga dikendalikan agar tidak merusak *bag filter* dan meminimalisir terjadinya suhu yang terlalu tinggi pada penyimpanan di dalam silo. Suhu batubara halus merupakan variabel yang dapat diukur sehingga variabel ini juga menjadi variabel pengukuran untuk kalang kontrol ketiga. Variabel termanipulasi yang dipilih untuk mengendalikan suhu keluar batubara halus adalah *dampier* udara dingin. Pemilihan *dampier* udara dingin sebagai variabel termanipulasi pada kalang kontrol ketiga didasarkan karena suhu udara dingin yang masuk ke dalam penggiling mampu menurunkan suhu keluar batubara halus dengan lebih cepat dibandingkan dengan mengurangi aliran udara panas yang masuk ke dalam penggiling. *Feedback control* digunakan pada kalang kontrol ketiga karena terdapat satu variabel pengukuran dan satu variabel termanipulasi. Suhu batubara halus ditetapkan untuk dijaga pada nilai 82 sehingga *moisture content* batubara halus hasil penggilingan juga diharapkan berada pada nilai 2%, sesuai dengan nilai median tujuan kontrol *moisture content*.

### 3. Penalaan Parameter Kontrol

Parameter kontrol untuk masing-masing kalang kontrol perlu diatur sehingga struktur kontrol dapat



Gambar 9. Diagram balok kalang kontrol kedua



Gambar 10. Diagram balok kalang kontrol ketiga

mengendalikan proses penggilingan batubara secara otomatis. Metode penalaan parameter kontrol dilakukan dengan menggunakan metode *cascade internal model control* dan *direct synthesis*. Dua metode penalaan ini dipilih karena dilakukan secara analitik menggunakan susunan diagram balok dari masing-masing kalang kontrol.

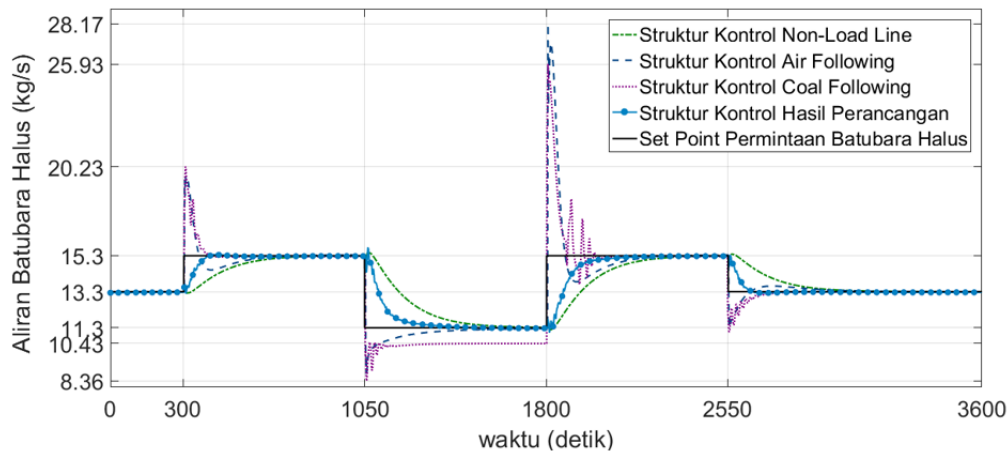
Penalaan parameter kontrol pada kalang kontrol pertama dilakukan menggunakan metode *cascade internal model control* [7] karena kalang kontrol pertama menggunakan cascade control. Kalkulasi metode cascade internal model control dilakukan terhadap diagram balok kalang kontrol pertama (Gambar 8) untuk mendapatkan parameter kontrol yang dikehendaki.

Penalaan parameter kontrol pada kalang kontrol kedua dan ketiga dilakukan menggunakan metode *direct synthesis* [8]. Kalkulasi metode *direct synthesis* dilakukan terhadap susunan diagram balok dari kalang kontrol kedua dan ketiga (Gambar 9-10). Diagram balok kalang kontrol kedua, yang menggunakan algoritma *blend station*, disederhanakan menjadi susunan diagram balok kontrol feedback untuk menyederhanakan proses penalaan tanpa menghilangkan bagian penting di dalam kalkulasi parameter kontrol.

Hasil penalaan parameter kontrol (Tabel 2) dijadikan sebagai parameter kontrol pada proses pengujian struktur kontrol.

### B. Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur kontrol hasil perancangan. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kinerja dari proses penggilingan batubara yang dikendalikan oleh struktur kontrol hasil perancangan terhadap tujuan kontrol (Tabel 1) dan terhadap kinerja proses penggilingan batubara yang dikendalikan oleh struktur kontrol lain.

Gambar 11. Grafik perbandingan respon *step*

Tabel 3. Perbandingan kinerja struktur kontrol hasil perancangan

Parameter	Struktur Kontrol			Hasil Perancangan	
	<i>Non-Load Line</i>	<i>Air Following</i>	<i>Coal following</i>	Nilai	Pemenuhan Tujuan Kontrol
Waktu Penetapan (detik)	431±0	356,25±66,60	135±54,25	161,75±80,60	Terpenuhi
Kesalahan Keadaan Tunak (kg/s)	0,01±0,01	0,01±0,05	-0,25±0,41	0,03±0	Terpenuhi
Lonjakan Maksimum (%)	0±0	176,41±118,70	174,21±96,13	1,88±2,59	Terpenuhi
Decay ratio (%)	0±0	0,15±0,03	0,64±0,25	0±0	Terpenuhi

### 1. Hasil Evaluasi Respon Step

Evaluasi respon *step* dilakukan untuk mengetahui respon struktur kontrol hasil perancangan terhadap perubahan permintaan batubara halus. Hasil perbandingan dengan tujuan kontrol (Tabel 3) menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi seluruh tujuan pada variabel kontrol.

Grafik perbandingan respon *step* (Gambar 11) memperlihatkan bahwa waktu untuk mencapai kondisi permintaan batubara halus yang baru dari struktur kontrol hasil perancangan lebih cepat dibandingkan dengan struktur kontrol *non load line* ataupun *air following*, namun tidak lebih cepat dibanding struktur kontrol *coal following*. Berdasarkan tabel perbandingan kinerja (Tabel 3), struktur kontrol hasil perancangan memiliki rata-rata waktu penetapan bernilai 161,75 detik. Waktu penetapan tercepat kedua ini merupakan hasil dari penggunaan teknik *soft sensor* dan variasi aliran udara primer dalam rentang 30 kg/s hingga 30,87 kg/s. Estimasi *soft sensor* membuat respon yang diberikan kalang kontrol pertama mampu mempercepat aliran batubara halus. Perubahan aliran udara primer juga menimbulkan perubahan gaya angkat terhadap batubara yang sudah digiling, sehingga mampu mempercepat waktu penetapan.

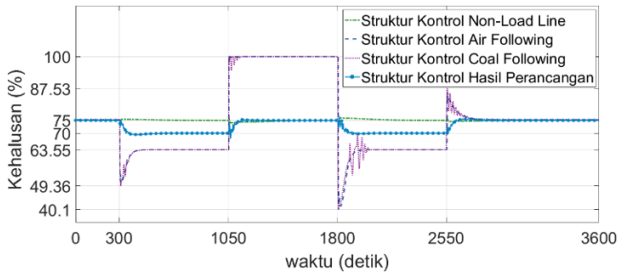
Struktur kontrol hasil perancangan memiliki kesalahan keadaan tunak rata-rata 0,03 kg/s. Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan kesalahan keadaan tunak dari struktur kontrol *non load line* dan *air following* yaitu 0,01 kg/s dan lebih kecil dibandingkan dengan struktur kontrol *coal following* yaitu 0,25 kg/s. Standar deviasi kesalahan

keadaan tunak dari struktur kontrol hasil perancangan bernilai paling kecil dibandingkan struktur kontrol lainnya. Hal ini disebabkan karena variasi aliran udara primer berada pada rentang yang kecil, yaitu 30 kg/s hingga 30,87 kg/s, sedangkan variasi aliran udara primer pada struktur kontrol *air following* dan *coal following* berada pada rentang yang lebih besar.

Struktur kontrol hasil perancangan memiliki rata-rata lonjakan maksimum bernilai 1,88%. Grafik perbandingan respon *step* (Gambar 11) memperlihatkan dengan jelas perbedaan lonjakan yang terjadi antara struktur kontrol hasil perancangan terhadap struktur kontrol *air following* dan *coal following*. Perbandingan lonjakan sekitar 100 kali lebih kecil disebabkan karena variasi perubahan aliran udara primer pada struktur kontrol hasil perancangan dibatasi pada rentang yang sempit. Lonjakan maksimum pada struktur kontrol hasil perancangan masih lebih tinggi dibandingkan lonjakan maksimum pada struktur kontrol *non load line* yang bernilai 0%. Tidak terjadinya lonjakan pada struktur kontrol *non load line* disebabkan karena aliran udara primer yang dijaga konstan pada nilai 30 kg/s.

Struktur kontrol hasil perancangan memiliki *decay ratio* bernilai 0%. Nilai *decay ratio* ini menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan tidak mengalami osilasi apabila terdapat perubahan permintaan batubara halus. Hasil evaluasi respon *step* menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu mengendalikan proses penggilingan batubara dengan sangat baik dibandingkan dengan struktur kontrol yang lain.





Gambar 12. Grafik perbandingan kehalusan

Tabel 4. Perbandingan kehalusan

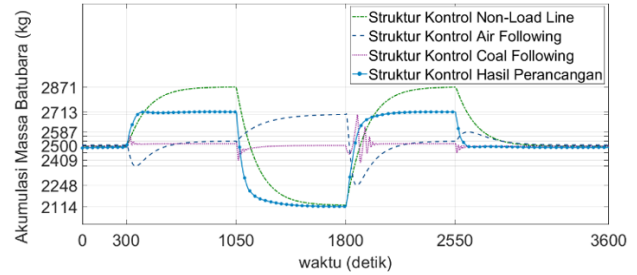
Struktur Kontrol	Rentang Kehalusan (%)	Lonjakan Tertinggi (%)
<i>Non-Load Line</i>	75	1,00
<i>Air Following</i>	63,55 s/d 100	23,45
<i>Coal following</i>	63,55 s/d 100	23,15
Hasil Perancangan	Nilai Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi
	70 s/d 75	0,71

2. Hasil Evaluasi Kehalusan Batubara Halus

Perbandingan kehalusan batubara terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol kehalusan yang ditetapkan sebesar 70% hingga 75% (Tabel 1). Grafik perbandingan kehalusan (Gambar 12) memperlihatkan bahwa kehalusan batubara halus yang dihasilkan oleh struktur kontrol hasil perancangan memiliki rentang nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan struktur kontrol *air following* dan *coal following*. Berdasarkan tabel perbandingan kehalusan (Tabel 4), struktur kontrol hasil perancangan mampu menghasilkan batubara halus dengan kehalusan 70% hingga 75%. Nilai kehalusan ini merupakan nilai standar untuk bahan bakar batubara. Kemampuan struktur kontrol hasil perancangan untuk menjaga nilai kehalusan disebabkan karena aliran udara primer ditetapkan pada rentang 30 kg/s hingga 30,87 kg/s. Penetapan aliran udara primer tersebut membuat batubara halus yang terangkat keluar penggiling didominasi oleh batubara yang berukuran kecil, sehingga kehalusan batubara halus dapat dijaga pada rentang 70% hingga 75%.

3. Hasil Evaluasi Akumulasi Batubara

Perbandingan akumulasi batubara didalam penggiling terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol akumulasi batubara yang ditetapkan pada nilai 1900 kg hingga 3600 kg (Tabel 1). Akumulasi massa batubara yang dihasilkan oleh struktur kontrol baru bernilai 2114 kg hingga 2713 kg (Tabel 5). Nilai akumulasi massa ini mendekati nilai akumulasi massa yang dimiliki oleh struktur kontrol *non load line*, namun berbeda secara signifikan terhadap akumulasi massa dari struktur kontrol *air following* dan *coal following* (Gambar 13). Kemiripan nilai akumulasi massa terhadap struktur kontrol *non load line* disebabkan karena variasi aliran udara primer pada struktur kontrol



Gambar 13. Grafik perbandingan akumulasi massa batubara

Tabel 5. Perbandingan akumulasi massa batubara

Struktur Kontrol	Akumulasi Massa (kg)	Lonjakan Tertinggi (kg)
<i>Non-Load Line</i>	2123 s/d 2871	0
<i>Air Following</i>	2503 s/d 2698	280
<i>Coal following</i>	2497 s/d 2512	182
Hasil Perancangan	Nilai Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi
	2114 s/d 2713	0

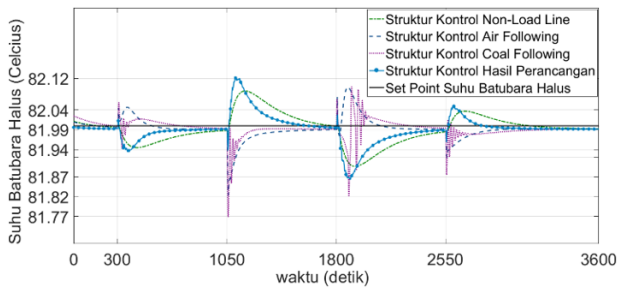
hasil perancangan memiliki rentang yang kecil, hal ini menyebabkan variasi gaya angkat yang dihasilkan struktur kontrol hasil perancangan mirip seperti struktur kontrol *non load line*. Perbedaan yang signifikan terhadap struktur kontrol *air following* dan *coal following* disebabkan karena variasi gaya angkat udara primer pada struktur kontrol *air following* dan *coal following* memiliki rentang yang lebih besar dibanding struktur kontrol hasil perancangan.

C. Hasil Evaluasi Suhu Batubara Halus

Perbandingan suhu batubara halus terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol untuk menjaga suhu pada nilai 80°C hingga 100°C (Tabel 1). Grafik perbandingan suhu batubara halus (Gambar 14) menunjukkan bahwa kinerja struktur kontrol hasil perancangan dalam menjaga suhu batubara halus mendekati kinerja dari struktur kontrol *non load line*. Berdasarkan tabel perbandingan suhu batubara halus (Tabel 6), struktur kontrol hasil perancangan mampu menjaga suhu batubara halus pada nilai 81,99 sama seperti struktur kontrol yang lain. Kemampuan yang sama dari struktur kontrol hasil perancangan dalam menjaga suhu dikarenakan kalang kontrol ketiga, untuk menjaga suhu batubara halus, pada struktur kontrol hasil perancangan menggunakan skema yang sama seperti kalang kontrol ketiga pada struktur kontrol lainnya.

D. Hasil Evaluasi Moisture Content Batubara Halus

Perbandingan *moisture content* batubara halus terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol *moisture content* (Tabel 1). Grafik perbandingan *moisture content* batubara halus (Gambar 15) menunjukkan kinerja



Gambar 14. Grafik perbandingan suhu batubara halus

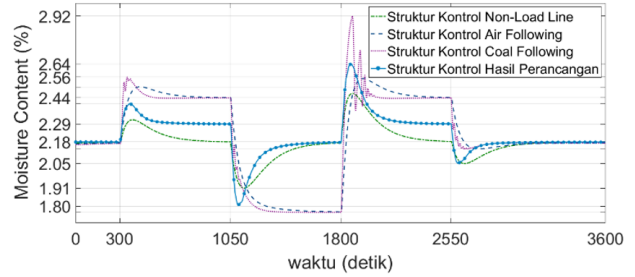
Tabel 6. Perbandingan suhu batubara halus

Struktur Kontrol	Rentang Suhu Batubara Halus (OC)	Lonjakan Tertinggi (OC)
<i>Non-Load Line</i>	81,98 – 82	0,09
<i>Air Following</i>	81,99	0,17
<i>Coal following</i>	81,99	0,22
Hasil Peancangan	Nilai	81,99
	Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi

struktur kontrol dalam menjaga nilai *moisture content*. *Moisture content* yang dihasilkan oleh struktur kontrol hasil perancangan, yaitu 2,18% hingga 2,28% (Tabel 7), mendekati *moisture content* yang dihasilkan oleh struktur kontrol *non load line*, namun berbeda secara signifikan terhadap rentang *moisture content* dari struktur kontrol *air following* dan *coal following*. Kemiripan nilai rentang *moisture content* terhadap struktur kontrol *non load line* dikarenakan rentang akumulasi massa struktur kontrol hasil perancangan mendekati rentang akumulasi massa struktur kontrol *non load line*. Perbedaan yang signifikan terhadap akumulasi massa struktur kontrol *air following* dan *coal following* disebabkan karena rentang akumulasi massa yang sangat berbeda.

V. KESIMPULAN

Proses perancangan mampu menghasilkan struktur kontrol baru untuk mengendalikan proses penggilingan batubara pada sistem pembakaran batubara. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi seluruh tujuan kontrol yang sudah ditetapkan. Keunggulan struktur kontrol hasil perancangan dibandingkan dengan struktur kontrol lain yaitu mampu menghasilkan kehalusan batubara halus pada rentang



Gambar 15. Grafik perbandingan *moisture content* batubara halus

Tabel 7. Perbandingan suhu batubara halus

Struktur Kontrol	Rentang Moisture Content (%)	Lonjakan Tertinggi (%)
<i>Non Load Line</i>	2,17 s/d 2,18	0,29
<i>Air Following</i>	1,77 s/d 2,44	0,11
<i>Coal following</i>	1,76 s/d 2,44	0,48
Hasil Peancangan	Nilai	2,18 s/d 2,28
	Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi

nilai 70% hingga 75% dengan nilai *moisture content* pada rentang nilai 2,18% hingga 2,28% dimana nilai ini merupakan nilai optimum batubara halus sebagai bahan bakar.

REFERENSI

- [1] V. Agrawal, B. K. Panigrahi, dan P. M. V. Subbarao, "Review of control and fault diagnosis methods applied to coal mills," *J. Process Control*, vol. 32, pp. 138–153, 2015.
- [2] S. Y. Irwan dan A. N. I. Wardana, "Distributed Coal Mill Simulator based on IEC 61499," in *The 5<sup>th</sup> UGM International Conference of Science and Technology*, 2019.
- [3] N. Rees dan G. Fan, "Modelling and control of pulverised fuel coal mills," *Therm. Power Plant Simul. Control*, pp. 63–100, 2011.
- [4] V. Agrawal, B. K. Panigrahi, dan P. M. V. Subbarao, "A unified thermo-mechanical model for coal mill operation," *Control Eng. Pract.*, vol. 44, pp. 157–171, 2015.
- [5] Zadiraka, "Pulverizer Control System," 1985.
- [6] H. Tore, "The Blend station-a new ratio control structure," *Control Eng. Pract.*, vol. 9, pp. 1215–1220, 2001.
- [7] Y. Lee, S. Park, dan M. Lee, "PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 1859–1865, 1998.
- [8] D. E. Seborg, T. F. Edgar, dan D. A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, 4th ed. Wiley, 2017.

**Penerbit:**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: [rekayasa.elektrika@unsyiah.net](mailto:rekayasa.elektrika@unsyiah.net)

Telp/Fax: (0651) 7554336

