UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN *ROASTER* KOPI OTOMATIS

SKRIPSI



Disusun oleh:

Irfan Naufal Ardila **17/413518/TK/45958**

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO DAN TEKNOLOGI INFORMASI

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS GADJAH MADA

2021

KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

SKRIPSI

(Capstone Design Project)

MODUL PEMANTAUAN SUHU DAN PENYANGRAIAN OTOMATIS UNTUK MESIN PENYANGRAI KOPI (COFFEE ROASTO)

Dipersiapkan dan disusun oleh

Irfan Naufal Ardila - 17/413518/TK/45958
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
Revin Dennis R - 17/415114/TK/46403
DESAIN DAN IMPLEMENTASI PERANGKAT KERAS SERTA KALIBRASI TERMOKOPEL MENGGUNAKAN METODE REGRESI LINEAR BERDASAR *PEARSON CORRELATION COEFFICIENT* PADA MODUL COFFEE ROASTO
Abdullah Halim Zuhdi - 17/413888/TK/46328
ANTARMUKA APLIKASI BERBASIS DESKTOP COFFEE ROASTO

Telah dipertahankan di depan dewan penguji
pada tanggal : **03 September 2021**

Susunan Dewan Penguji

Pembimbing Utama	Pembimbing Pendamping
Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng.	**Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.**

Anggota Dewan Penguji Lain

Dr.Eng. Ir. Adha Imam Cahyadi, S.T., M.Eng., IPM.	**Ir. Sujoko Sumaryono, M.T.**
Ir. Addin Suwastono, S.T., M.Eng., IPM.	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal: 01 Januari 1970
Pengelola Program Studi: Sarjana Teknik Elektro

Dr.Eng. Ir. Adha Imam Cahyadi, S.T., M.Eng., IPM.
NIP 197911022008121001

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi

Ir. Hanung Adi Nugroho, S.T., M.E., Ph.D., IPM.
NIP 197802242002121001

UNIVERSITAS
GADJAH MADA

KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Irfan Naufal Ardila

NIM : 17/413518/TK/45958

Tahun terdaftar : 2017

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah skripsi ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suaru Lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/Lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah skripsi ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/ atau sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta, 2 Agustus 2021



Irfan Naufal Ardila

17/413518/TK/45958

UNIVERSITAS
GADJAH MADA

KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN *ROASTER* KOPI OTOMATIS 1
HALAMAN PENGESAHAN 2
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI 3
ABSTRAK 5
ABSTRACT 6
BAB I PENDAHULUAN 7
BAB II LANDASAN TEORI 8
A. Proses Penyangraian Biji Kopi 8
B. Sistem Kendali 8
BAB III IMPLEMENTASI *CAPSTONE PROJECT* 14
A. Program pada Mikrokontroler 14
B. Sistem Kendali 15
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 18
A. Sistem Kendali 18
B. Biji Kopi Hasil Penyangraian 23
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 44
REFERENSI 45
LAMPIRAN 47

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRAK

Perkebunan kopi di Indonesia sangat besar, sehingga diperlukan mekanisme untuk meningkatkan nilai ekonomi dari produk kopi Indonesia. Biji kopi setelah dipanen harus melalui proses sangrai yang bertujuan di antaranya untuk mengurangi kadar air, meningkatkan cita rasa, aroma dari biji kopi. Proses penyangraian dapat dipantau dengan suhu saat proses penyangraian [1]. Suhu penyangraian untuk mesin kopi sederhana dapat dilakukan dengan melakukan pengaturan kondisi api. Kendali bang-bang yang dilakukan pada penelitian ini dapat mengurangi osilasi yang terjadi pada saat proses penyesuaian suhu berlangsung, yang sebelumnya sekitar 4 ℃ menjadi maksimal 2,4 ℃. Hasil penyangraian juga memiliki nilai yang cenderung tidak berbeda jauh antar *batch* dengan metode pengendalian suhu yang dilakukan.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Indonesia has a large coffee plantation. So a mechanism is needed to increase the economic value of coffee products from Indonesia. Coffee beans after being harvested must go through roasting process which aims to reduce the water content, improve the taste and aroma of the coffee beans. The roasting process can be monitored by the temperature during the roasting process [2]. *Temperature for a simple coffee roaster machine can be controlled by setting the fire conditions. Bang bang control carried out in this study can reduce the oscillations that occur during the temperature adjustment process, which was previously around 4* ℃ *to a maximum of 2.4* ℃. *The Coffee roast also not to differ much from one batch to another with the temperature control method used.*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB I PENDAHULUAN

Indonesia merupakan produsen biji kopi yang besar di dunia dengan luas kebun produksi pada tahun 2018 yaitu sebesar 1.252.825 hektare yang dapat memproduksi sebanyak 756.051 ton biji kopi [2]. Produksi kopi tersebut haruslah dipertahankan dan juga ditingkatkan nilai ekonominya, caranya yaitu dengan pengolahan pascapanen dari kopi. Satu di antara proses yang penting dalam proses pengolahan biji kopi yaitu proses penyangraian. Biji kopi harus melalui proses penyangraian terlebih dahulu sebelum dapat dikonsumsi.

Proses penyangraian merupakan proses yang penting untuk meningkatkan aroma, warna, dan rasa yang mendasari kualitas dari kopi [1]. Penyangraian merupakan proses yang kompleks karena suhu biji kopi saat proses penyangraian merupakan komponen yang penting untuk dikendalikan [1]. Hal tersebut menyebabkan diperlukan cara untuk mengurangi adanya kesalahan pada proses penyangraian, khususnya pada suhu biji kopi pada proses penyangraian. Penelitian ini bertujuan untuk membuat mekanisme pengendalian suhu biji kopi saat proses penyangraian dan melihat hubungan antara konsistensi dari grafik suhu biji kopi dengan kualitas dari biji kopi hasil penyangraian. Parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas biji kopi hasil penyangraian yakni kadar air, warna, dan dimensi biji kopi hasil penyangraian.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB II LANDASAN TEORI

A. Proses Penyangraian Biji Kopi

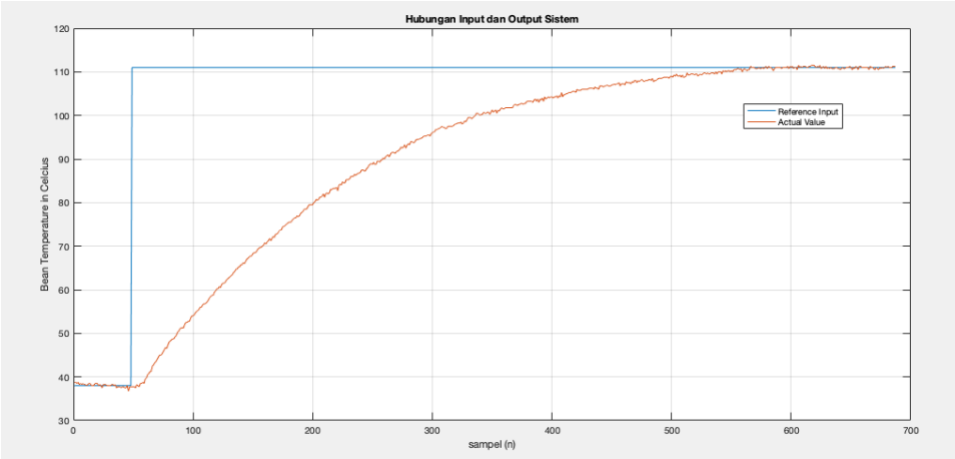
Penyangraian biji kopi merupakan proses yang penting dalam pengolahan biji kopi untuk siap dinikmati oleh konsumen. Kualitas biji kopi selain ditentukan oleh pengolahan sebelum panen namun juga dipengaruhi oleh pengolahan pascapanen, satu di antaranya yaitu proses penyangraian. Proses penyangraian bertujuan untuk mengurangi kadar air biji kopi hingga sesuai dengan standar SNI 8964:2021 yaitu maksimal 5% dari pada saat sebelum proses penyangraian yaitu sebesar maksimal 12,5% menurut SNI 01-2907:2008. Biji hasil penyangraian biasanya dibagi menjadi tiga tingkatan, yakni *light roast, medium roast,* dan *dark roast* [3]. Proses penyangraian dapat diukur dengan tiga cara, yakni dengan aroma dari asap yang dihasilkan pada proses penyangraian, melalui suhu dari biji kopi saat proses penyangraian dan yang terakhir melalui warna dari biji kopi saat proses penyangraian [1]. Proses penyangraian yang dapat dipantau dengan suhu biji kopi membuat penulis melakukan penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan cara mengendalikan suhu biji kopi saat proses penyangraian sehingga dapat sama dengan grafik suhu biji kopi referensi.

B. Sistem Kendali

Sistem kendali digunakan pada bagian penyangraian biji kopi secara otomatis. Sistem kendali diperlukan untuk mengendalikan suhu biji kopi. Suhu biji kopi saat proses penyangraian menjadi variabel yang dapat menentukan progress dari proses *roasting* yang sedang dilakukan [1]. Panas dari proses penyangraian dapat dihasilkan dari dua sumber, yakni kompor dan juga *blower*. Sumber panas untuk mesin *roaster* sederhana dapat hanya menggunakan satu jenis sumber panas, dalam hal ini kompor. Kendali pada sistem yang digunakan harus memenuhi sifat asli dari mesin yang digunakan. Sistem pemanas pada umumnya merupakan sistem orde 1 dengan persamaan umum seperti pada persamaan 1 [4]. Namun masih diperlukan cara untuk menentukan model dari sistem mesin penyangrai kopi yang ada, hal tersebut dapat dilakukan dengan cara memberikan *input* kepada sistem kemudian mencatat respon dari sistem tersebut, untuk mengetahui model dari pemanas pada mesin penyangrai yang ada seperti yang terlihat pada gambar 1.

$$G(s) = \frac{1}{\tau s+1} \quad (1)$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 1 Grafik *Input* dan *Output* dari Mesin *Roaster*

Mesin penyangrai kopi yang ada merupakan sistem Orde 1 dengan *deadtime*. Dengan persamaan matematis sesuai dengan persamaan 2 [5]. Kemudian dari persamaan 2 dimasukkan kedalam *System Identification Toolbox* pada MATLAB dengan mengestimasi *Process Model* dengan sistem orde 1 dengan *time delay* dan dipatkanlah persamaan 3.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s+1} \times e^{-Td \times s} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{1.033}{1+175.11s} \times e^{-7s} \quad (3)$$

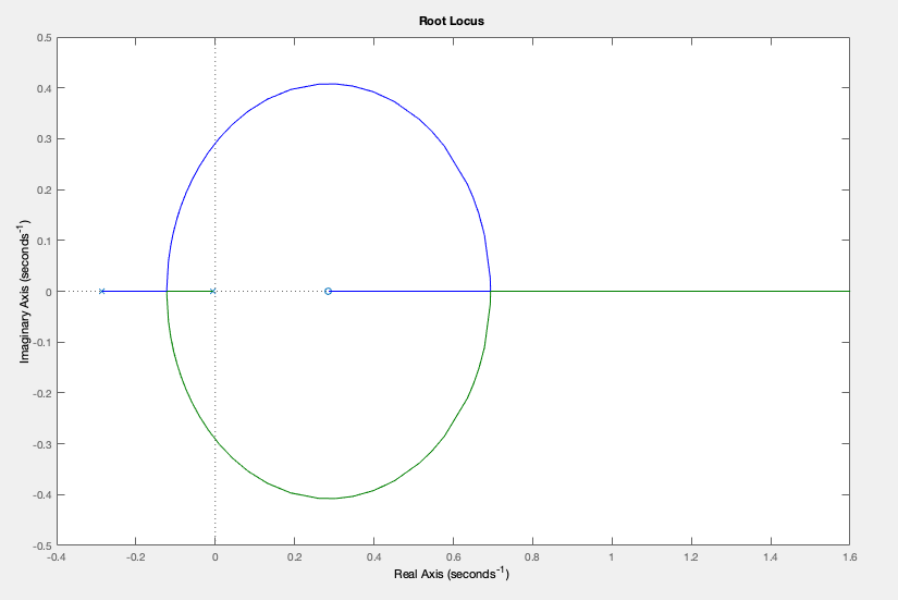
Persamaan 3 mendapatkan nilai *fit to estimate data* sebesar 96.53% terhadap grafik *input* dan *output* data yang telah dilakukan. Sehingga persamaan 3 dapat dianggap sebagai pemodelan dari sistem pemanas mesin *roaster* yang digunakan pada *capstone project* ini.

Terdapat beberapa sistem kendali yang dapat digunakan yakni P, PI, PID, dan juga kendali *bang-bang*. Keempat kendali tersebut akan coba diimplementasikan menggunakan MATLAB dengan menggunakan persamaan 3 sebagai model persamaan dari mesin *roaster*, yang sebelumnya telah dilakukan aproksimasi nilai *time delay* dengan menggunakan fungsi 'pade' pada MATLAB. Pade merupakan fungsi untuk melakukan perkiraan nilai tunda waktu yang merupakan nilai eksponensial dengan menggunakan *pade approximation formulas* [6]. Pade pada MATLAB untuk persamaan 3 dapat dilihat pada persamaan 4. Persamaan 3 memiliki nilai *rise time* yang sangat besar saat diberikan *input step*, sehingga diperlukan sebuah pengendali yang dapat melakukan pengecilan nilai *rise time* dari persamaan 3 yang

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

merupakan model dari mesin *roaster*. Gambar *root locus* dari persamaan 4 ditunjukkan oleh Gambar 2.

$$G(s) = \frac{-1{,}033s + 0{,}2951}{175{,}1s^2 + 51{,}03s + 0{,}2857} \quad (4)$$

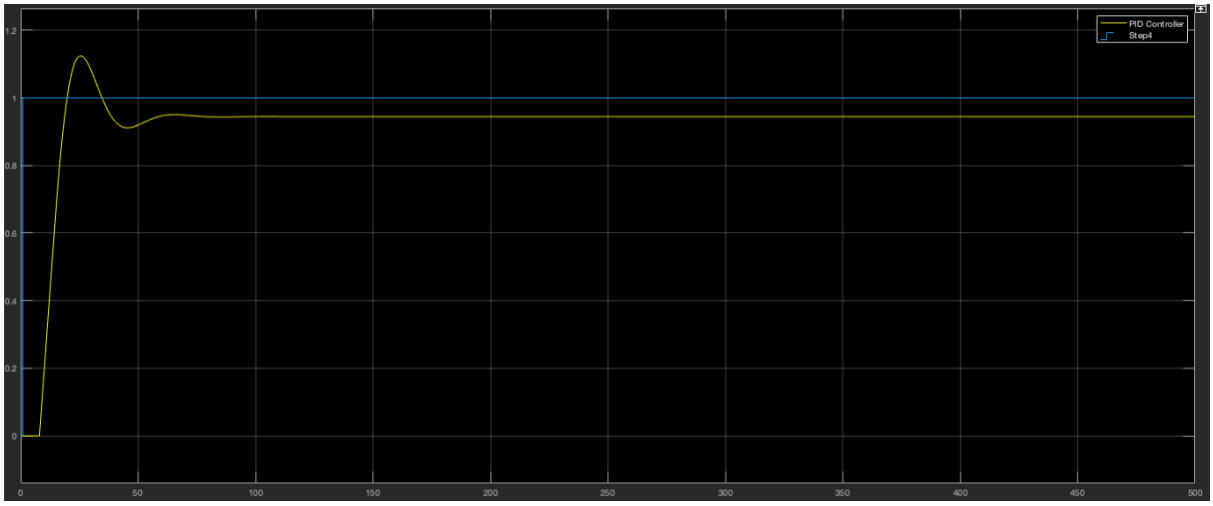


Gambar 2 *Root Locus* Persamaan 4

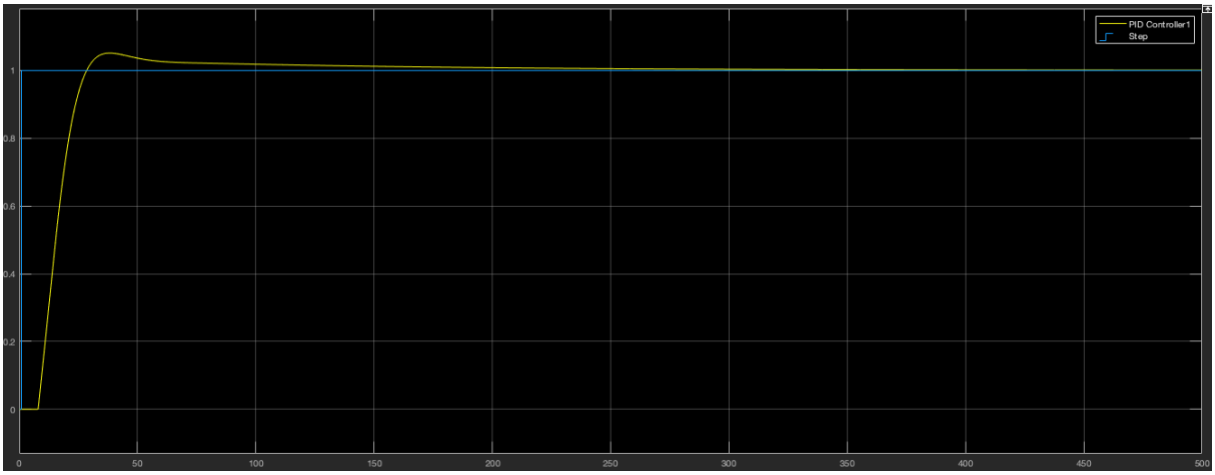
Pengendali yang akan didesain seperti yang telah disebutkan sebelumnya yakni pengendali P, PI, PID, dan juga *bang-bang control*. Pengendali yang diimplementasikan di MATLAB yakni pengendali P, PI dan PID. Penulis menggunakan fitur PID *tuner* pada Simulink untuk melakukan *tuning* respon yang diinginkan. Pada pengendali P maka nilai I dan D tidak digunakan, sedangkan pada PI nilai D tidak digunakan, dan untuk PID ketiga nilai variabel digunakan. Pengendali P setelah dilakukan *tuning* maka didapat nilai Kp = 16,5. Dengan nilai Kp tersebut menghasilkan respon pengendalian suhu seperti pada Gambar 3. Terlihat bahwa sistem belum dapat mengikuti suhu yang diinginkan. Kemudian selanjutnya menggunakan pengendali PI. Penulis menggunakan cara yang sama seperti saat melakukan desain pada pengendali P maka didapatkan nilai Kp dan Ki yakni 11,4 dan 0,0897. Dengan nilai Kp dan Ki tersebut didapatkan respon seperti pada Gambar 4. Terlihat bahwa sistem belum dapat mendekati nilai yang diinginkan secara cepat dan juga akurat. Kemudian yang terakhir yakni dengan menggunakan pengendali PID. Pengendali

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

PID dengan menggunkan Simulink maka didapatkan nilai Kp=4,6, Ki=0,0427, Kd=66,6. Dengan nilai Kp, Ki, dan Kd tersebut didapatkan respon seperti pada Gambar 5.

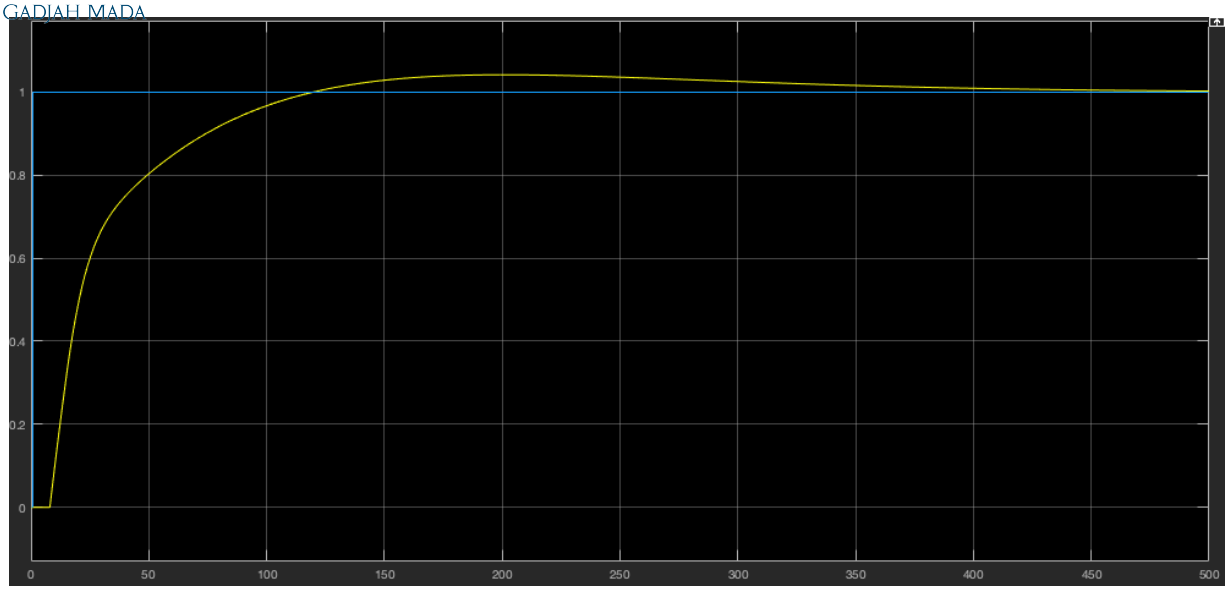


Gambar 3 Respon Pengendali P

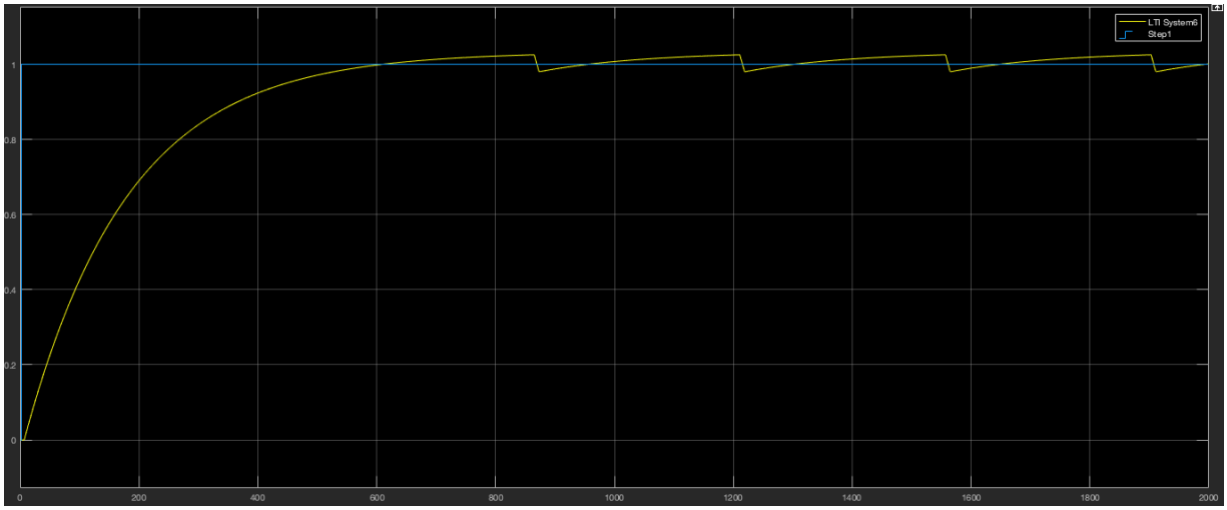


Gambar 4 Respon Pengendali PI

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 5 Respon Pengendali PID

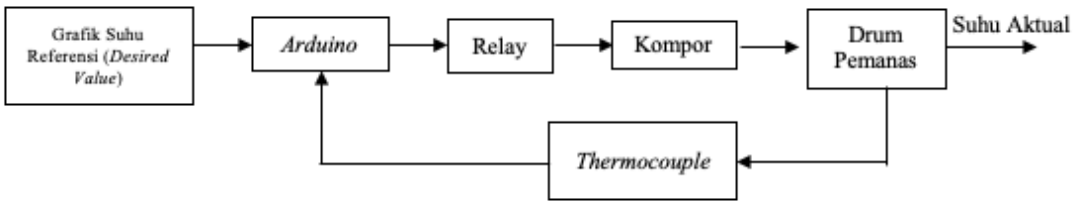


Gambar 6 Respon Pengendali Bang-Bang

Percobaan yang telah dilakukan sebenarnya memastikan bahwa penggunaan kendali PI lebih baik dibandingkan dengan pengendali lainnya yang telah dilakukan. Pemilihan metode kendali juga memerhatikan dari harga perangkat keras yang ada dipasaran agar tetap bisa diterima oleh target pasar yaitu UMKM. Memerhatikan hal tersebut maka kendali yang mungkin untuk diimplementasikan yaitu kendali *bang-bang* dengan kondisi *on-off* yang dimodifikasi. Melakukan modifikasi *on-off* diperlukan untuk mengurangi osilasi yang terjadi pada saat proses penyesuaian

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

suhu, dan juga mengurangi efek dari *deadtime* yang ada pada mesin. Diagram dari sistem kendali yang akan diterapkan adalah seperti pada Gambar 7.



Gambar 7 Diagram Alir Sistem Kendali yang Dirancang

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB III IMPLEMENTASI *CAPSTONE PROJECT*

A. Program pada Mikrokontroler

Program pada perangkat Arduino sebagai program gabungan antara kendali untuk melakukan penyangraian otomatis, menyalakan atau mematikan aktuator secara manual, memberikan suhu referensi biji kopi secara manual, dan melakukan pemanasan drum penyangraian. Diagram alir program pada perangkat Arduino terdapat pada bagian lampiran.

Gambar 28 pada lampiran merupakan diagram alir dari kondisi *idle* sekaligus sebagai kondisi siap menerima *input* awal dari pengguna. *Input* awal yang dapat dikirimkan oleh pengguna yakni menyalakan atau mematikan akuator (kompor, *blower*, *cooler*, dan motor penggerak drum), memberikan suhu referensi, mengirimkan sinyal untuk melakukan proses pemanasan drum ataupun melakukan *roasting* secara otomatis. Suhu referensi yang dimasukkan oleh pengguna akan diolah oleh mikrokontroler untuk dijadikan sebagai suhu referensi biji kopi (TR). Suhu referensi (TR) tersebutlah yang akan menjadi acuan dalam melakukan kendali otomatis, hal tersebut akan megendalikan suhu biji kopi aktual menjadi sama dengan suhu referensi tersebut.

Gambar 29 pada merupakan diagram alir dari proses pengambilan data suhu dari termokopel drum dan juga termokopel biji kopi. Suhu dari drum dan biji kopi diambil dengan periode sampel selama dua detik. Banyak sampel dari suhu yang dicuplik yaitu sebanyak empat sampel. Semakin banyak sampel yang diambil kemudian dirata-rata akan semakin membuat fluktuasi dari pembacaan semakin kecil, namun juga akan memengaruhi nilai suhu sebagai suhu aktual [7]. Rata-rata dari sampel yang telah diambil menggunakan persamaan 4.

$$\text{Suhu Tertampil} = \frac{\sum_i^N Suhu\ Terkalibrasi_i}{N} \quad (5)$$

Gambar 30 pada lampiran menunjukkan diagram alir dari mode penyangraian otomatis, pada mode ini pengguna hanya bisa mengendalikan secara manual *cooler*, sedangkan untuk kompor, motor penggerak drum dan juga *blower* tidak bisa dikendalikan secara manual. Mode penyangraian secara otomatis memerlukan nilai suhu biji kopi referensi. Pada bagian antarmuka dijelaskan bahwa antarmuka akan mengirimkan data suhu referensi sebanyak 10 data secara sekaligus ke perangkat Arduino apabila pengguna sudah menekan tombol *start*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

yang menandakan bahwa biji kopi sudah dimasukkan kedalam mesin sangrai. Metode pengiriman data ini memerlukan mekanisme pemisahan bentuk *string* yang dikirimkan menjadi *array* dalam tipe data *float*, hal ini diperlukan agar data tersebut dapat digunakan sebagai kondisi untuk menentukan menyala atau matinya kompor. Kondisi sebelum tombol *start* ditekan yakni merupakan kondisi saat biji kopi belum dimasukkan sehingga suhu awal yang ditentukan yaitu 150℃. Mode otomatis akan berhenti pada saat suhu referensi yang dikirimkan oleh antarmuka habis, dalam hal ini Arduino akan membaca suhu referensi bernilai 0℃. Apabila hal tersebut terjadi, Arduino akan mengirimkan informasi ke antarmuka yang menandakan bahwa mode otomatis telah selesai untuk kemudian diolah kembali oleh antarmuka.

Gambar 31 pada lampiran menunjukkan diagram alir dari mode *heating*. Mode *heating* adalah mode yang bertujuan untuk melakukan pemanasan drum penyangraian sampai suhu tertentu, agar drum siap untuk menyangrai kopi. Penentuan lama dan juga suhu maksimal yang diperlukan oleh masing masing drum akan berbeda. Penulis menentukan untuk *heating* akan berlangsung selama 10 menit. Mode *heating* prosesnya mirip dengan mode penyangraian otomatis, perbedaannya terletak pada penggunaan suhu referensi dan juga kondisi akhir pada tiap mode. Mode otomatis menggunakan suhu referensi yang berubah setiap ada pembaharuan suhu yang didapatkan dari antarmuka sedangkan untuk mode *heating* suhu referensinya akan tetap konstan. Sedangkan untuk kondisi akhir mode *heating* akan selesai apabila proses *heating* tersebut sudah lebih dari atau sama dengan waktu referensi yang sudah ditentukan sebelumnya, yakni 10 menit.

B. Sistem Kendali

Penggunaan kendali histeresis atau kendali bang-bang dikarenakan oleh perangkat keras untuk kendali proporsional yang sulit dicari dipasaran sehingga akan menyulitkan untuk implementasi alat dan juga harga yang mahal untuk implementasi target pasar yang merupakan pengusaha mikro. Selain alasan tersebut, alasan lainnya yaitu karena adanya *ignition control* HW211 pada mesin saat ini, yang dapat dilihat pada gambar 8. Perangkat ini dapat melakukan proses pemantikan dan juga pembukaan katup melalui aktuator *solenoid valve* yang terhubung dengan *ignition control*. Sehingga prinsip kerja dari kendali bang-bang dapat diterapkan pada *capstone project* ini.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 8 HW211 *Ignition Control*

Kendali bang-bang merupakan kendali dengan 2 keadaan keluaran yaitu *on* dan *off*. Dengan model yang memiliki *deadtime* seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, sehingga modifikasi kondisi *on-off* pada kendali bang-bang diperlukan untuk mengurangi osilasi yang terjadi pada saat proses pengendalian suhu. Gambar 9 menunjukkan hasil dari proses implementasi dengan menggunakan kondisi seperti berikut

On ➔ Suhu aktual biji kopi $<$ suhu referensi

Off ➔ Suhu aktual biji kopi $\geq$ suhu referensi

Gambar 9 memperlihatkan bahwa sistem memiliki osilasi yang besar untuk menjalankan proses penyesuaian suhu yakni sebesar $\pm 4℃$. Kemudian dilakukan perubahan kondisi dengan menggunakan kondisi seperti berikut

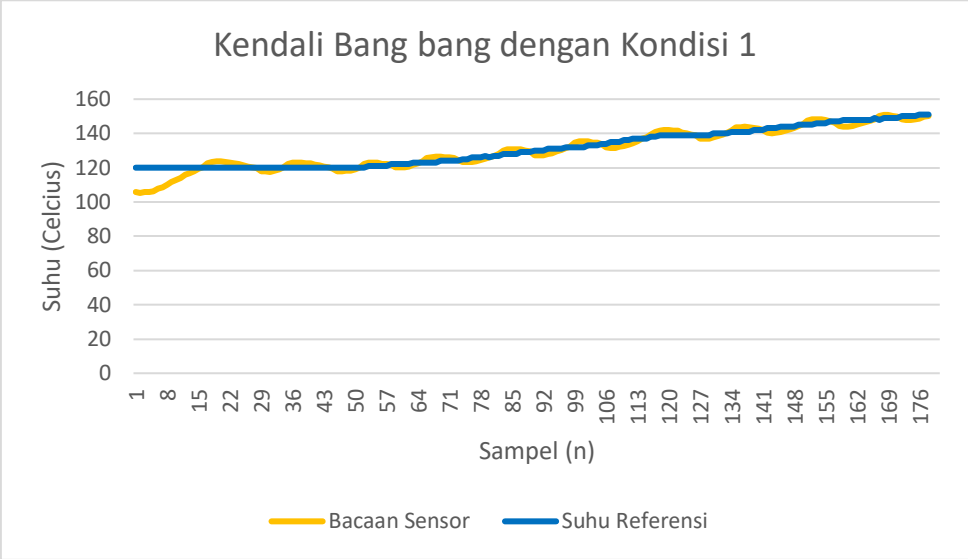
On ➔ Suhu aktual biji kopi saat ini + (Suhu aktual biji kopi saat ini – Suhu aktual biji kopi sebelumnya) $<$ Suhu referensi

Off ➔ Suhu aktual biji kopi saat ini + (Suhu aktual biji kopi saat ini – Suhu aktual biji kopi sebelumnya) $\geq$ Suhu referensi

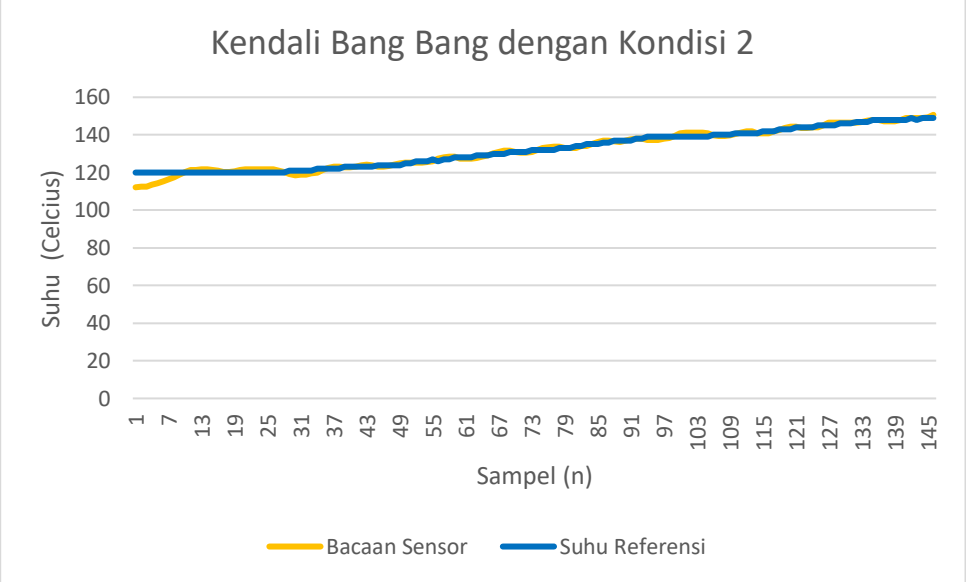
Perubahan kondisi yang dilakukan kemudian digunakan ke mesin dan dari percobaan tersebut didapatkanlah grafik pada gambar 10. Perbandingan perbedaan suhu antara menggunakan kondisi pertama dengan kondisi kedua dapat dilihat pada gambar 10. Pada gambar 9 dan 10 terlihat bahwa kondisi pertama dan kedua memiliki nilai osilasi yang berbeda. Osilasi pada kondisi satu yakni sebesar $\pm 4℃$ dari suhu referensi. Pada kondisi kedua selisih

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

absolut maksimal yakni sebesar 2,46℃. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa kondisi kedua akan memiliki nilai selisih yang lebih kecil dengan suhu referensi pada saat proses pengendalian suhu dengan besar katup gas yang sama, yakni pada 36-42 mbar pada mesin yang digunakan pada *capstone project* ini.



Gambar 9 Grafik Suhu Aktual dan Suhu Referensi dengan kondisi 1



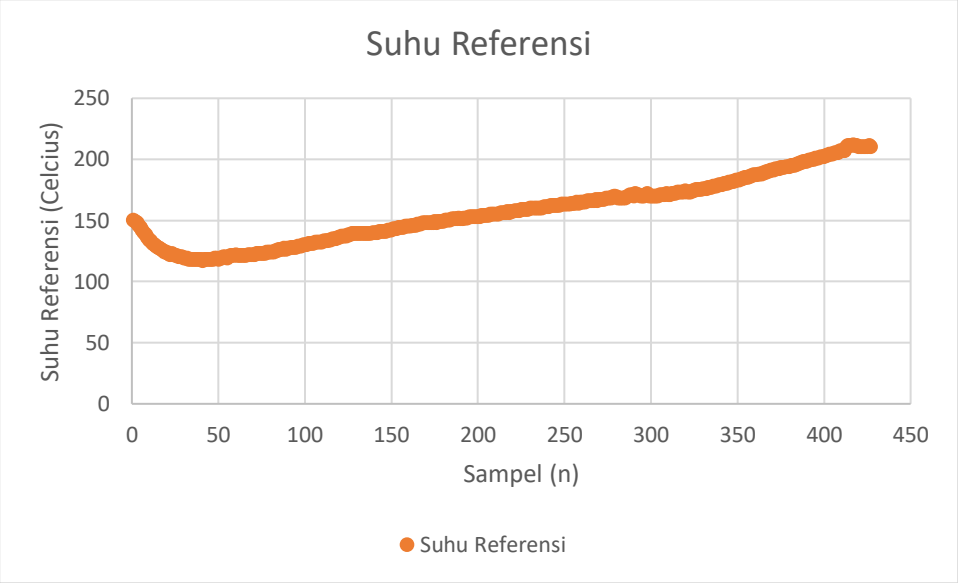
Gambar 10 Grafik Suhu Aktual dan Suhu Referensi dengan Kondisi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sistem Kendali

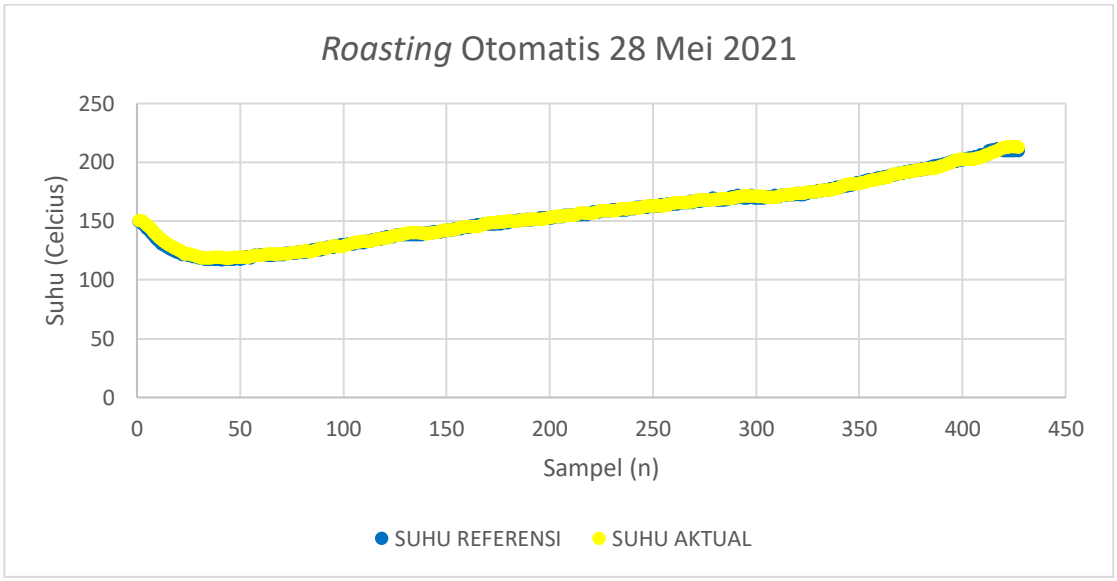
Proses pengujian sistem kendali suhu pada mesin *roaster* dilakukan dengan cara melakukan penyangraian biji kopi secara otomatis dengan penggunan grafik suhu referensi yang sama dan juga dengan besar api yang sama. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem dapat melakukan pengendalian suhu dengan baik dan juga memiliki persen *error* yang kecil terhadap nilai suhu referensi yang telah ditentukan. Grafik suhu referensi yang telah dibuat merupakan sebuah grafik suhu biji kopi yang penulis ambil dengan menggunakan mesin yang sama namun dengan metode *roasting* biji kopi yang manual. Gambar 12 menunjukkan grafik suhu referensi yang telah dipantau dan juga dijadikan sebagai grafik referensi untuk proses pengujian ini. Suhu referensi tersebut kemudian ditanam ke perangkat Arduino untuk kemudian menjadi acuan kondisi dalam menentukan *on-off* pada kompor untuk mengendalikan suhu aktual biji kopi mendekati grafik suhu referensi tersebut.



Gambar 11 Grafik Suhu Referensi

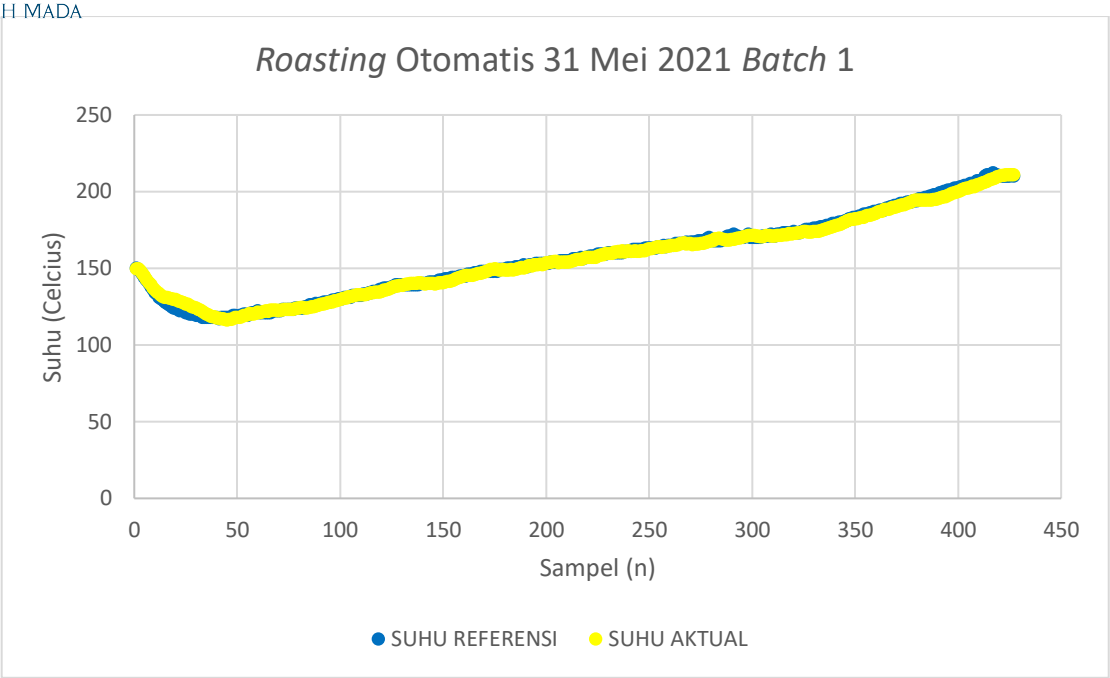
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Metode pengujian yang dilakukan yaitu dengan melakukan 4 kali percobaan dengan kondisi api yang dibuat sebisa mungkin untuk tetap sama. Pengujian ini selain digunakan untuk konsistensi *tracking* suhu biji kopi, juga digunakan untuk melihat konsistensi dari biji kopi hasil penyangraian. Gambar 13 sampai 16 menunjukkan hasil grafik suhu dari pengujian yang penulis lakukan. Gambar 17 sampai 20 menujukkan persen *error* untuk masing masing pengujian. Grafik persen *error* terlihat bahwa suhu biji kopi sudah berhasil untuk dikendalikan agar mengikuti suhu referensi yang diberikan dengan persen *error* maksimal 5%. Dari proses tersebut juga dapat dilihat bahwa suhu aktual dapat mengikuti bentuk grafik referensi dengan rata-rata selisih absolut pada *penyangraian* tanggal 28 Mei 2021 yakni sebesar 0,77℃ sedangkan untuk percobaan *penyangraian* tanggal 31 Mei 2021 berturut-turut yakni sebesar 1,18℃, 0,95℃, dan 1,1℃.

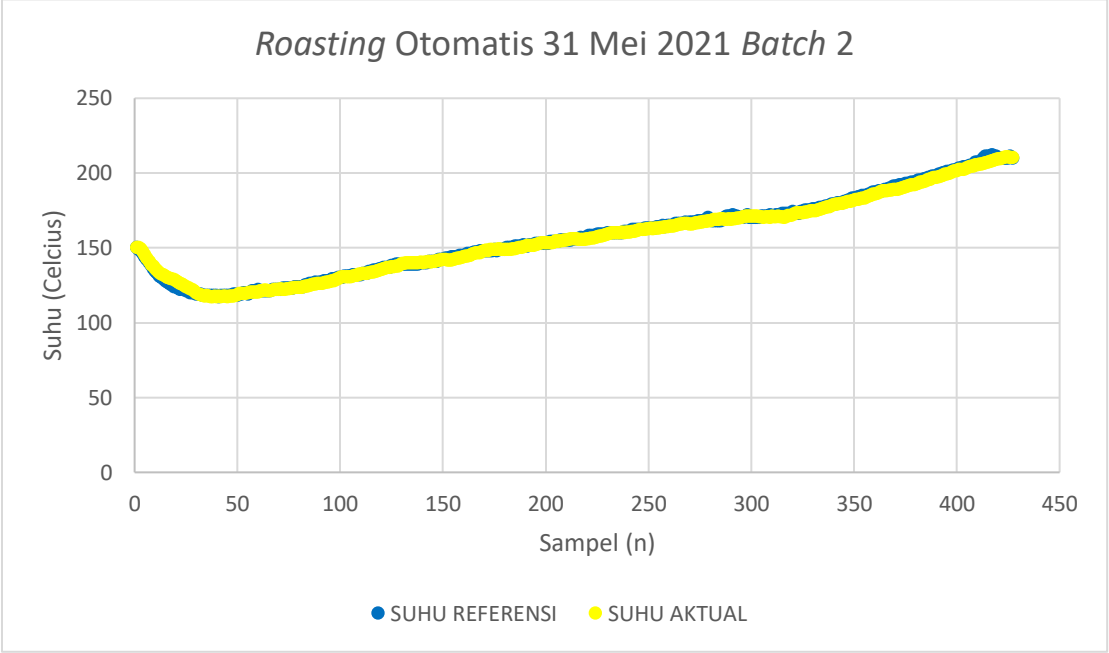


Gambar 12 Grafik Suhu Biji Kopi dan Suhu Referensi *Roasting* Otomatis 28 Mei 2021

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

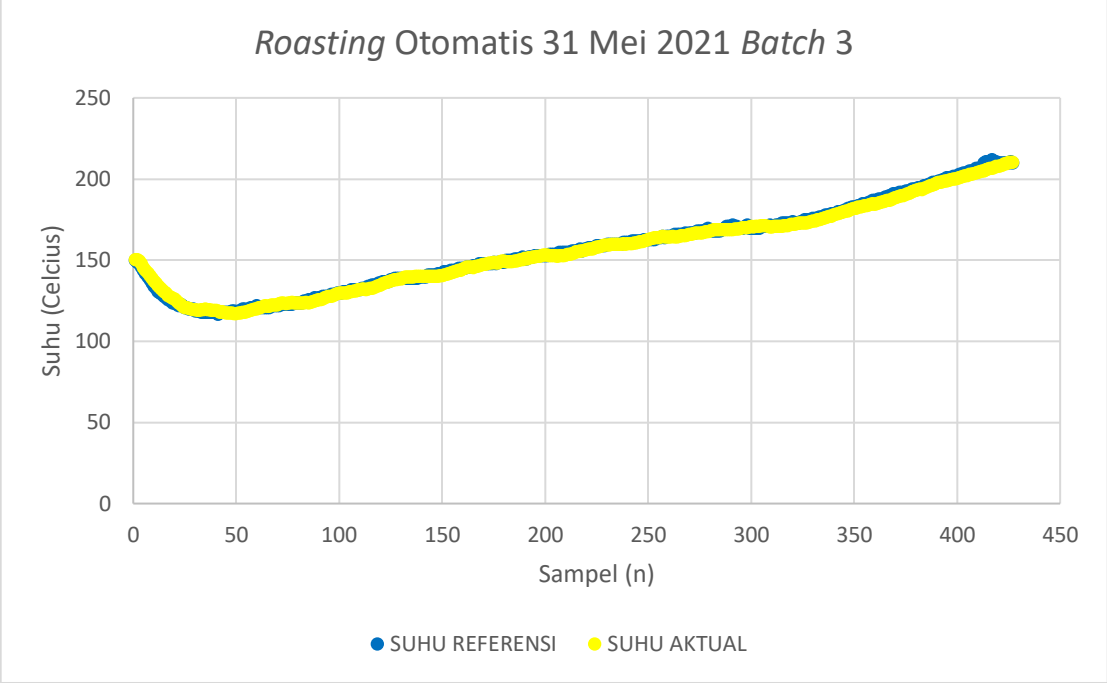


Gambar 13 Grafik Suhu Biji Kopi dan Suhu Referensi *Roasting* Otomatis 31 Mei 2021 *Batch* 1

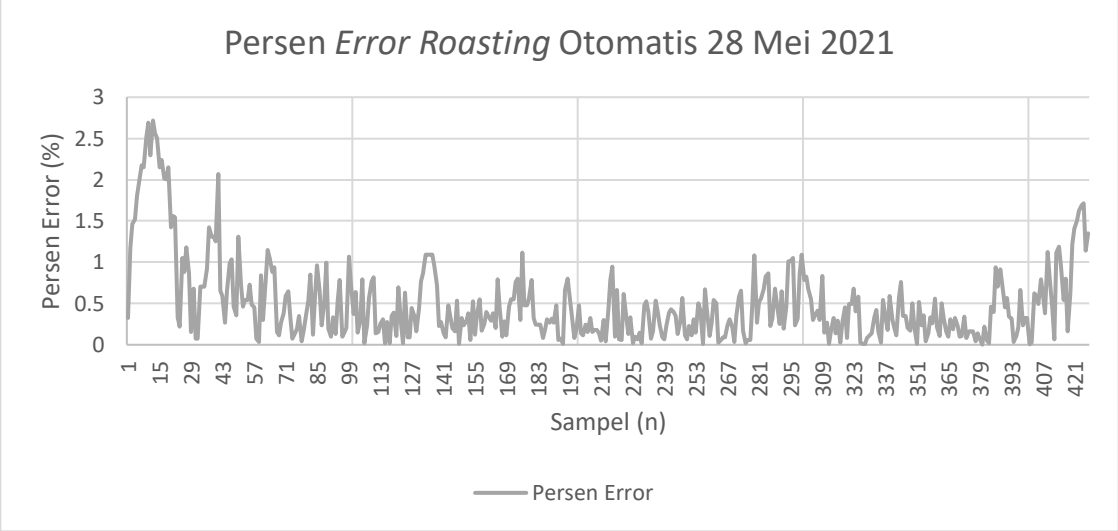


Gambar 14 Grafik Suhu Biji Kopi dan Suhu Referensi *Roasting* Otomatis 31 Mei 2021 *Batch* 2

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

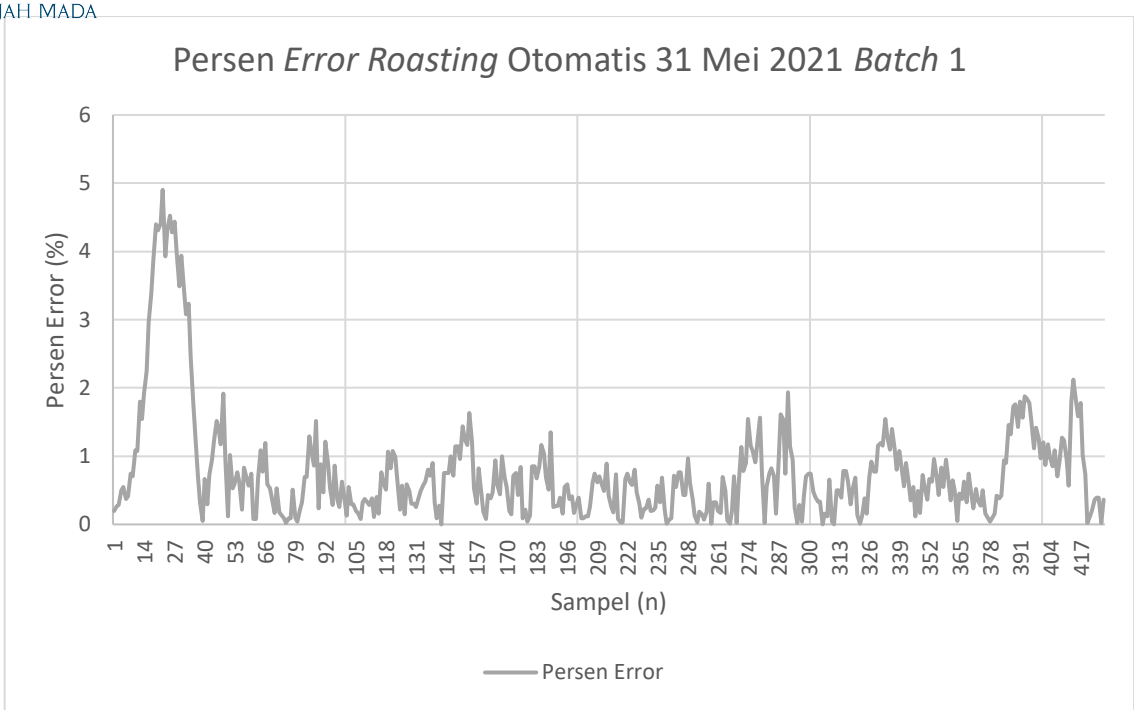


Gambar 15 Grafik Suhu Biji Kopi dan Suhu Referensi *Roasting* Otomatis 31 Mei 2021 *Batch* 3

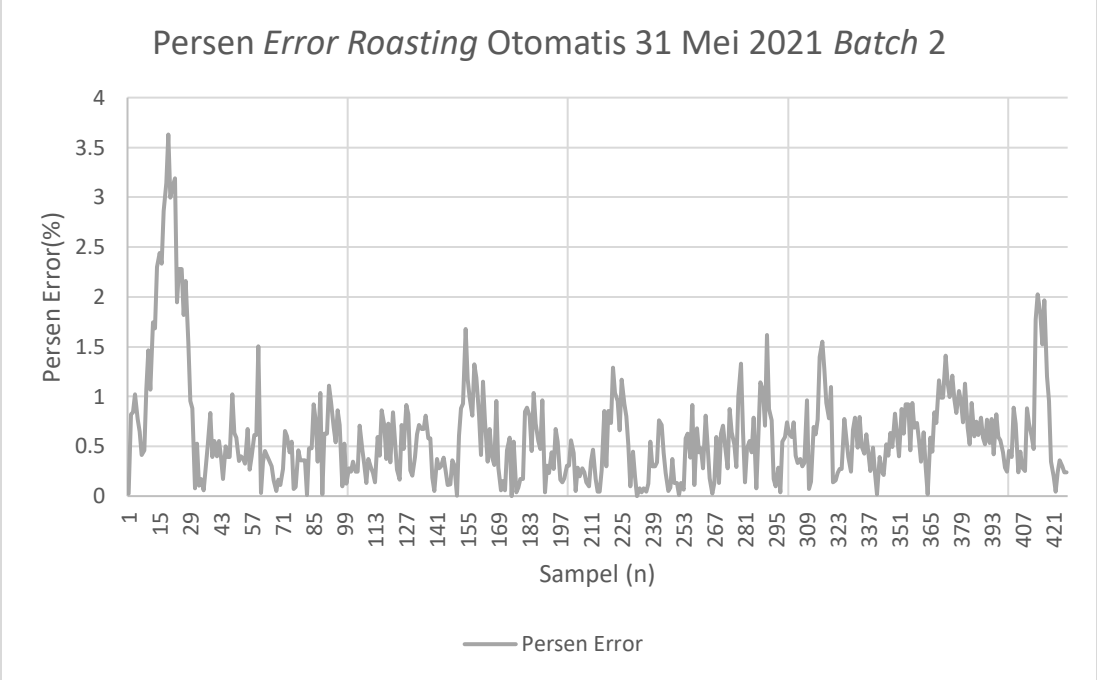


Gambar 16 Persen *Error Roasting* Otomatis 28 Mei 2021

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

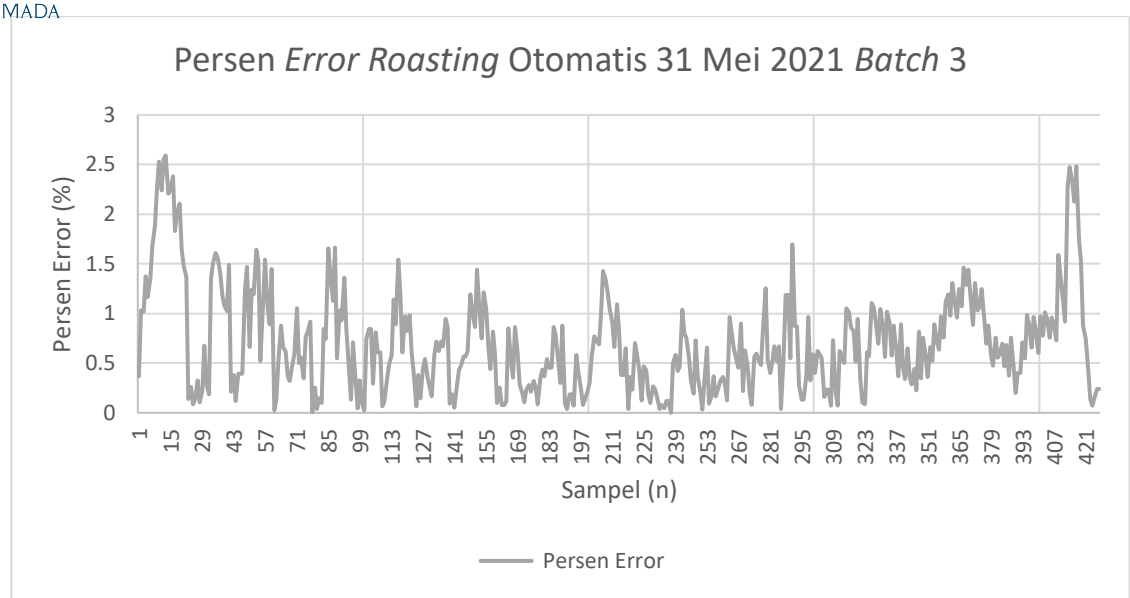


Gambar 17 Persen *Error Roasting* Otomatis 31 Mei 2021 *Batch* 1



Gambar 18 Persen *Error Roasting* Otomatis 31 Mei 2021 *Batch* 2

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 19 Persen *Error Roasting* Otomatis 31 Mei 2021 *Batch* 3

B. Biji Kopi Hasil Penyangraian

Pengujian biji kopi hasil penyangraian dilakukan di Laboratorium Teknik Pangan dan Pascapanen Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada. Pengujian yang dilakukan mengacu pada standar nasional indonesia. Pengujian yang dilakukan di antaranya yaitu dimensi, kadar air, dan warna biji kopi hasil penyangraian.

B.1. Dimensi Biji Kopi Hasil Penyangraian

Pengujian dimensi biji kopi hasil *roasting* dilakukan dengan cara mengukur dimensi dari cuplikan biji kopi sebanyak lima biji kopi untuk masing masing hasil *roasting.* Dimensi diukur dengan mengukur panjang, lebar, dan tinggi dari biji kopi seperti pada gambar 15. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran dimensi lima biji kopi.



Gambar 20 Pengukuran Dimensi Biji Kopi

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 1 Dimensi Biji Kopi Hasil Penyangraian

Dimensi (28,mei 2021)	1 (cm)	2 (cm)	3 (cm)	4 (cm)	5 (cm)	Rata - rata
Panjang	1,566	1,303	1,25	1,47	1,263	1,3224
Lebar	0,975	0,882	0,96	0,9	0,854	0,9176
Tinggi	0,556	0,547	0,626	0,535	0,659	0,5766
Dimensi (31 mei 2021)(III)	1 (cm)	2 (cm)	3 (cm)	4 (cm)	5 (cm)	Rata - rata
Panjang	1,294	1,324	1,245	1,061	1,487	1,2561
Lebar	0,86	0,934	0,843	0,768	0,916	0,8948
Tinggi	0,53	0,58	0,53	0,62	0,544	0,5493
Dimensi (31 mei 2021)(II)	1 (cm)	2 (cm)	3 (cm)	4 (cm)	5 (cm)	Rata - rata
Panjang	1,335	1,386	1,125	1,31	1,319	1,2447
Lebar	0,857	0,921	0,861	0,96	1,029	0,88
Tinggi	0,526	0,538	0,521	0,686	0,694	0,5892
Dimensi (31 mei 2021)(I)	1 (cm)	2 (cm)	3 (cm)	4 (cm)	5 (cm)	Rata - rata
Panjang	1,242	1,183	1,042	1,235	1,382	1,2612
Lebar	0,932	0,943	0,819	0,925	1,038	0,9581
Tinggi	0,588	0,554	0,641	0,567	0,581	0,6315

Data pada tabel 1 diuji T untuk menentukan signifikansi perbedaan antar *batch.* Uji T dapat dilakukan apabila telah mengetahui sampel terdistribusi secara normal, dan pasang data yang akan diuji homogen. Uji normalitas dapat dilakukan dengan uji normalitas Shaviro Wilk. Uji normalitas Shaviro Wilk dapat dilakukan dengan persamaan 5 [8].

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

$$b^2 = \frac{1}{S^2}\left[\sum_{i=1}^{k} a_{n-i+1}(x_{n-i+1} - x_i)\right]^2 \quad (5)$$

Dengan

$$S^2 = \sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

x_{n-i+1} =nilai ke n-i+1 dari data yang telah diurutkan

x_i = nilai ke I dari data yang telah diurutkan

$\bar{x}$ = rata-rata data

D = koofisien Shaviro Wilk

T_3 = Nilai Uji Shaviro Wilk

a_i = Nilai konstanta a ke i pada tabel Shaviro Wilk

Hasil uji normalitas dimensi biji kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada tabel 2. Terlihat pada tabel 2 bahwa dimensi hasil penyangraian biji kopi yang diambil terdistribusi secara normal karena memiliki nilai b^2 >0,715 untuk selang kepercayaan 98%.

Tabel 2 Uji Normalitas Dimensi Biji Kopi

Keterangan	b^2 (Panjang)	b^2 (Lebar)	b^2 (Tinggi)	Kesimpulan
28 Mei 2021	0,858	0,924	0,862	Normal
31 Mei 2021 (1)	0,9623	0,93	0,89	Normal
31 Mei 2021 (2)	0,814	0,92	0,748	Normal
31 Mei 2021 (3)	0,97	0,947	0,854	Normal

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Uji homogenitas selanjutnya dapat dilakukan karena data dimensi biji kopi sudah terbukti tersebar dengan normal. Uji homogenitas dapat dilakukan dengan menghitung *variance* dari masing-masing sampel data kemudian menggunakan persamaan 7 [9]. Nilai F tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai pada Tabel F dengan hipotesis apabila F hitung < nilai F pada tabel F maka data dapat dikatakan homogen. Hasil uji homogenitas yang dilakukan dapat dilihat pada tabel 3. Terlihat pada tabel 3 data dimensi juga homogen karena nilai F tabel kurang dari 10,9 untuk selang kepercayaan 98%.

$$F = \frac{Variance\ Terbesar}{Variance\ Terkecil} \tag{7}$$

Tabel 3 Uji Homogenitas Dimensi Biji Kopi

Keterangan	F (Panjang)	F (Lebar)	F (Tinggi)	Kesimpulan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (1)	1,15	1,5	1,64	Homogen
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (2)	1,41	1,39	1,63	Homogen
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (3)	1,09	1,27	1,4	Homogen
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (2)	1,23	1,08	2,67	Homogen
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (3)	1,25	1,18	1,17	Homogen

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Keterangan	F (Panjang)	F (Lebar)	F (Tinggi)	Kesimpulan
31 Mei 2021 (2) dan 31 Mei 2021 (3)	1,54	1,1	2,28	Homogen

Uji normalitas dan uji homogenitas menujukkan bahwa dimensi biji kopi memenuhi syarat untuk uji T dengan menggunakan *pooled variance estimated* karena dimensi biji kopi terdistribusi normal dan juga memiliki variance yang sama [10]. Uji T dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 8 [10]. Hasil uji T dapat dilihat pada tabel 4. Terlihat pada tabel 4 bahwa dimensi biji kopi hasil penyangraian tidak berbeda signifikan, karena nilai T_{hitung} < 2,896 untuk DF = 8 dan tingkat kepercayaan 98%.

$$T_{hitung} = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{\frac{S_p^2}{n1} + \frac{S_p^2}{n2}} \quad (8)$$

Dengan

$$S_p 2 = \frac{(n1-1)SD_1^2 + (n2-1)SD_2^2}{n1+n2-2} \quad (9)$$

$$DF = n1 + n2 - 2 \quad (10)$$

$n2$ = jumlah sampel kelompok pertama

$n1$ = jumlah sampel kelompok kedua

SD_1^2 = *variance* kelompok pertama

SD_2^2 = *variance* kelompok kedua

$\overline{X_1}$ = rata-rata kelompok pertama

$\overline{X_2}$ = rata-rata kelompok kedua

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 4 Uji T Dimensi Biji Kopi Hasil *Roasting*

Keterangan	T_{hitung} (Panjang)	T_{hitung} (Lebar)	T_{hitung} (Tinggi)	Kesimpulan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (1)	1,844401466	-0,41216082	-0,05590852	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (2)	0,980233113	-0,28756355	-0,18013727	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (3)	0,948617452	1,337893511	0,793465589	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (2)	-1,10848524	0,122344901	-0,16030693	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (3)	-0,74506611	1,476121152	1,108990567	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (2) dan 31 Mei 2021 (3)	0,156537715	1,407649806	0,742629722	Tidak Berbeda Signifikan

B.2. Kadar Air Biji Kopi Hasil Penyangraian

Pengujian kadar air dimaksudkan untuk membuktikan bahwa kadar air dari biji kopi hasil penyangraian memiliki nilai yang sesuai dengan standar nasional indonesia dan juga memiliki nilai yang konsisten. Standar nasional indonesia menentukan bahwa batas maksimal untuk kadar air pada biji kopi bubuk yaitu sebesar 5%. Cara pengujian kadar air pada biji kopi yakni dengan cara melakukan pemanasan pada biji kopi selama 16 ± 1 jam, dengan suhu 105 ± 1℃ [11].

Proses pertama yakni melakukan penimbangan terhadap wadah penampung biji kopi, seperti pada gambar 16.a. Timbangan yang digunakan diharuskan memiliki ketelitian 0,1 mg [11]. Kemudian timbang biji kopi seberat 10 g seperti pada gambar 16.b. Kemudian proses selanjutnya yaitu melakukan pemanasan dengan oven seperti

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

pada gambar 16.c. Setelah proses pemanasan berlangsung selama 16 jam, biji kopi kemudian dimasukkan kedalam eksikator sampai suhu dari biji kopi sama dengan suhu ruang [11]. Hal tersebut penulis lakukan seperti pada gambar 16.d.



(a) (b) (c) (d)

Gambar 21 Proses Pengukuran Kadar Air Biji Kopi Hasil *Roasting*

Kopi yang telah didinginkan dalam eksikator kemudian ditimbang kembali dengan menggunakan timbangan yang sama dengan yang sebelum dipanaskan. Kemudian menggunakan persamaan 11 untuk menghitung kadar air dari biji kopi tersebut [11]. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada tabel 5.

$$Kadar\ Air\ (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} x100 \quad (11)$$

Dengan :

m_0=Berat cawan dan tutup

m_1=Berat cawan, tutup, dan cuplikan kopi sebelum pengeringan

m_2=Berat cawan, tutup, dan cuplikan kopi setelah pengeringan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 5 Kadar Air Biji Kopi Hasil *Roasting*

28 Mei		1	2	3
Sebelum Oven	Cawan (gr)	5,1328	2,7936	4,5995
	Biji (gr)	10,0091	10,0244	10,002
Setelah Oven	Cawan+Biji (gr)	14,9328	12,6059	14,3914
Kadar Air (%)		2,08909892	2,11583736	2,10057988

31 Mei (I)		1	2	3
Sebelum Oven	Cawan (gr)	4,6181	4,6538	4,6723
	Biji (gr)	10,1128	10,013	10,146
Setelah Oven	Cawan+Biji (gr)	14,5242	14,4663	14,609
Kadar Air (%)		2,04394431	2,00239688	2,06288192

31 Mei (II)		1	2	3
Sebelum Oven	Cawan (gr)	2,7126	3,2593	3,3053
	Biji (gr)	10,173	10,0295	10,0753
Setelah Oven	Cawan+Biji (gr)	12,6745	13,0822	13,1741
Kadar Air (%)		2,07510076	2,05992323	2,04956676

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

31 Mei (III)		1	2	3
Sebelum Oven	Cawan (gr)	4,8663	4,9802	4,7254
	Biji (gr)	10,1697	10,0652	10,0772
Setelah Oven	Cawan+Biji (gr)	14,8389	14,8425	14,6014
Kadar Air (%)		1,93811027	2,01585661	1,99658635

Dari tabel 5 terlihat bahwa kopi hasil penyangraian pada tanggal 28 Mei dan 31 Mei (1-3), yang dilakukan dengan metode kendali otomatis ini sudah memenuhi standar kopi bubuk menurut SNI yakni maksimal 5% [11]. Data kadar air kemudian dilakukan uji T untuk melakukan uji apakah empat *batch* penyangraian yang telah dilakukan memiliki nilai yang pengaruhnya tidak signifikan atau bisa dikatakan sama atau tidak memiliki perbedaan yang signifikan pada masing-masing data. Seperti pada pengujian dimensi biji kopi hasil penyangraian, maka uji T dilakukan setelah melakukan uji normlitas dan uji homgenitas. Uji normalitas dapat dilakukan dengan uji normalitas Shaviro Wilk. Uji normalitas pada kadar air biji kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6 Uji Normalitas Kadar Air Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan	b^2	Kesimpulan
28 Mei 2021	0,99337535	Normal
31 Mei 2021 (1)	0,955477	Normal
31 Mei 2021 (2)	0,98823759	Normal
31 Mei 2021 (3)	0,92184041	Normal

Penetapan hipotesis pada Uji Normalitas Shaviro Wilk yaitu pada saat nilai $b^2 > 0{,}756$ (untuk selang kepercayaan 98%) maka data tersebut terdistribusi normal. Tabel

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

6 menunjukkan hasil uji normalitas pada data kadar air yang mengindikasikan bahwa data kadar air pada tabel 5 terdistribusi secara normal. Uji homogenitas kemudian dilakukan terhadap data kadar air seperti yang dilakukan pada data dimensi pada bagian sebelumnya. Hasil uji homogenitas kadar air biji kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada tabel 7. Pada tabel 7 terlihat bahwa nilai F masing-masing pasangan data bernilai dibawah F tabel yaitu 16. Sehingga kadar air biji kopi hasil penyangraian merupakan data yang homogen.

Tabel 7 Uji Homogenitas Kadar Air Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan	F	Kesimpulan
28 Mei dan 31 Mei (1)	5,32	Homogen
28 Mei dan 31 Mei (2)	1,09	Homogen
28 Mei dan 31 Mei (3)	9,11	Homogen
31 Mei (1) dan 31 Mei (2)	5,8	Homogen
31 Mei (1) dan 31 Mei (3)	1,71	Homogen
31 Mei (2) dan 31 Mei (3)	9,94	Homogen

Uji normalitas dan uji homogenitas menujukkan bahwa kadar air biji kopi hasil penyangraian memenuhi syarat untuk uji T dengan menggunakan *pooled variance estimated* karena dimensi biji kopi terdistribusi normal dan juga memiliki variance yang homogen. Hasil uji T dapat dilihat pada tabel 8. Terlihat pada tabel 8 bahwa kadar air biji kopi hasil penyangraian berbeda signifikan pada penyangraian 28 Mei dengan 31 Mei *batch* 1 dan 2, karena nilai T_{hitung} > 3,747 untuk DF = 3 dan tingkat kepercayaan 98%.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 8 Uji T Kadar Air Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan	T_{hitung}	Kesimpulan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (1)	3,360766208	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (2)	3,759559488	Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (3)	4,804955834	Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (2)	-1,29897289	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (3)	1,797819019	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (2) dan 31 Mei 2021 (3)	3,181184032	Tidak Berbeda Signifikan

B.3. Warna Biji dan Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

Pengujian ini dilakukan dengan cara menggunakan *color meter* dan ditembakkan ke biji kopi saat dalam keadaan masih berbentuk biji dan juga saat berbentuk bubuk. SNI tidak mengatur warna khusus untuk kopi hasil *roasting.* SNI hanya menyatakan bahwa kopi bubuk yang lolos standar memiliki warna yang normal saat dilihat dengan mata normal [12].

Proses pengambilan data yang dilakukan yakni dengan cara menembak biji kopi hasil penyangraian saat masih menjadi biji dan juga saat sudah menjadi bubuk kopi. Alat ukur yang digunakan yaitu TES 135A *color meter* seperti yang ditunjukkan pada gambar 17. TES 135A mendeteksi warna dalam ruang warna CIELAB yang masing masing merupakan ruang warna tiga dimensi dengan L*, a*, dan b* merupakan sumbu–sumbunya. L* merupakan sebuah sumbu yang menyatakan gelap terang sebuah warna, semakin besar nilai L maka berarti bawah semakin terang warna tersebut, dan semakin kecil angka tersebut semakin gelap warnanya. Jarak antara gelap dan juga terang diwakili oleh angka 0 untuk sangat gelap (hitam) dan 100 untuk sangat terang (putih) [13]. Kemudian variabel a* merupakan sumbu yang mewakili dua warna yaitu antara merah dan hijau, dengan nilai a* negatif mewakili warna hijau, sedangkan positif mewakili warna merah [13]. Terakhir variabel b* mewakili warna biru saat bernilai negatif dan juga warna kuning saat bernilai positif [13].

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 22 TES 135A Color Meter

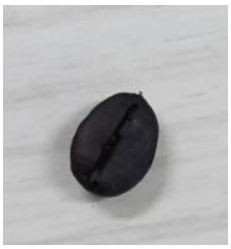
Hal yang dilakukan pertama yaitu melakukan penyortiran biji kopi hasil *roasting* untuk mengetahui seberapa besar ketidaksesuaian warna yang terlihat secara kasat mata. Data ini dapat dilihat pada tabel 9. Pembagian tersebut berdasarkan warna dari masing masing biji kopi dengan dicuplik sebanyak 100 biji. Contoh pemilihan biji yang dilakukan yaitu seperti pada gambar 18. Gambar 18.a merupakan kondisi saat biji *under roast.* Gambar 18.b yakni kondisi normal *roast.* Gambar 18.c merupakan kondisi *over roast.*

Tabel 9 Klasifikasi Sampel Biji Kopi Hasil Penyangraian

	28 Mei	31 Mei (I)	31 mei (II)	31 Mei (III)	Komersial
Under Roast (%)	3	7	5	6	2
Normal (%)	92	90	92	91	98
Over Roast (%)	5	3	3	3	0







(a) (b) (c)

Gambar 23 Klasifikasi Biji Kopi Hasil Penyangraian

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Proses dilanjutkan dengan pengukuran warna biji kopi dengan *color meter* untuk biji dengan kategori normal untuk masing masing *batch roasting* yang telah dilakukan, seperti yang terlihat pada gambar 19. Data tersebut diambil sebanyak 5 kali untuk masing-masing *batch*.



Gambar 24 Proses Pengambilan Data Warna pada Biji Kopi Hasil *Roasting*

Data warna biji kopi dan bubuk kopi tersebut dapat dilihat pada tabel 10. Pada tabel terlihat bahwa masing masing *batch* memiliki nilai yang serupa khususnya pada nilai L atau kegelapan warna dari kopi. Perbedaan nilai pada proses ini juga dipengaruhi karena pada saat proses pengambilan data gambar 49 terdapat rongga-rongga antara biji kopi yang akhirnya juga membuat sensor pada alat pengukur membaca warna dari meja, sehingga, dilakukan juga pengujian kedua yakni dengan menggiling kopi yang dihasilkan untuk kemudian dilakukan proses seperti pada gambar 20. Maka didapatkanlah nilai seperti pada tabel 11.

Tabel 10 Warna Biji Kopi Hasil Penyangraian

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 28 Mei	18,7	18,044	5,02	4,694	13,86	11,85
	19,73		6,5		12,79	
	18,1		2,83		7,91	
	17		3,66		12,48	
	16,69		5,46		12,21	

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 31 Mei (I)	14,18	16,778	7,75	5,814	13,24	10,928
	18,16		2,15		11,73	
	16,88		2,45		11,22	
	16,96		10,71		9,28	
	17,71		6,01		9,17	

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 31 Mei (II)	17,22	16,764	1,08	3,17	11,41	12,57
	15,58		2,75		12,75	
	16,88		4,5		15,48	
	16,55		2,25		10,07	
	17,59		5,27		13,14	

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 31 Mei (III)	17,27	17,108	4,65	7,362	9,62	11,334
	17,05		5,73		14,21	
	16,43		8,67		12,66	
	15,51		10,04		10,83	
	19,28		7,72		9,35	

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 25 Proses Pengambilan Data Warna Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

Tabel 11 Warna Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 28 Mei	30,32	32,178	7,72	8,724	19,11	19,87
	32,11		8,34		19,55	
	32,49		8,78		20,35	
	33,92		9,93		20,96	
	32,05		8,85		19,38	

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 31 Mei (I)	30,49	31,782	8,16	9,144	18,85	19,488
	31,44		9,16		19,69	
	32,65		9,66		19,62	
	32,45		9,12		20,01	
	31,88		9,62		19,27	

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 31 Mei (II)	33,94	33,786	10,06	9,8	20,69	20,094
	32,97		9,76		19,49	
	34,21		9,97		20,73	
	34,44		9,26		19,56	
	33,37		9,95		20	

	L*	L* rata-rata	a*	a* rata-rata	b*	b* rata-rata
Roasting 31 Mei (III)	34,26	33,342	9,74	9,978	20,47	20,482
	30,22		10,6		21,51	
	33,22		9,73		19,86	
	33,94		9,98		20,36	
	35,07		9,84		20,21	

Data warna biji dan bubuk kopi hasil penyangraian kemudian dilakukan uji T untuk menguji empat *batch* penyangraian yang telah dilakukan memiliki nilai yang tidak berbeda. Seperti pada pengujian dimensi dan kadar air biji kopi hasil penyangraian maka uji T dilakukan setelah melakukan uji normalitas dan uji homogenitas. Uji normalitas dapat dilakukan dengan uji normalitas Shaviro Wilk. Nilai variabel L* digunakan pada uji ini, yang menunjukkan kecerahan dari biji atau bubuk kopi hasil penyangraian. Uji normalitas pada warna biji dan bubuk kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada tabel 12 dan 13.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Tabel 12 Uji Normalitas Warna Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan (Biji Kopi)	b^2 (L*)	Kesimpulan
28 Mei 2021	0,953	Normal
31 Mei 2021 (1)	0,8459	Normal
31 Mei 2021 (2)	0,9537	Normal
31 Mei 2021 (3)	0,9451	Normal

Tabel 13 Uji Normalitas Warna Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan (Bubuk Kopi)	b^2 (L*)	Kesimpulan
28 Mei 2021	0,9453	Normal
31 Mei 2021 (1)	0,9414	Normal
31 Mei 2021 (2)	0,9466	Normal
31 Mei 2021 (3)	0,8654	Normal

Penetapan hipotesis pada Uji Normalitas Shaviro Wilk yaitu pada saat nilai $b^2 > 0{,}715$ (untuk selang kepercayaan 98%) maka data tersebut berdistribusi normal. Uji homogenitas kemudian dilakukan terhadap data warna biji kopi dan bubuk kopi seperti yang dilakukan pada bagian sebelumnya. Hasil uji homogenitas warna biji dan bubuk kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada tabel 14 dan tabel 15. Pada tabel 14 dan tabel 15 terlihat bahwa Nilai F masing-masing pasangan data bernilai dibawah F tabel yaitu 6,388. Sehingga kadar air biji kopi hasil penyangraian merupakan data yang homogen

Tabel 14 Uji Homogenitas Warna Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan (Biji Kopi)	F	Kesimpulan
28 Mei dan 31 Mei (1)	1,2426	Homogen
28 Mei dan 31 Mei (2)	1,6237	Homogen

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Keterangan (Biji Kopi)	F	Kesimpulan
28 Mei dan 31 Mei (3)	1,1189	Homogen
31 Mei (1) dan 31 Mei (2)	2,0176	Homogen
31 Mei (1) dan 31 Mei (3)	1,1106	Homogen
31 Mei (2) dan 31 Mei (3)	1,8167	Homogen

Tabel 15 Uji Homogenitas Warna Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan (Bubuk Kopi)	F	Kesimpulan
28 Mei dan 31 Mei (1)	1,4849	Homogen
28 Mei dan 31 Mei (2)	2,1196	Homogen
28 Mei dan 31 Mei (3)	1,4532	Homogen
31 Mei (1) dan 31 Mei (2)	1,4274	Homogen
31 Mei (1) dan 31 Mei (3)	2,1579	Homogen
31 Mei (2) dan 31 Mei (3)	3,0802	Homogen

Uji normalitas dan uji homogenitas menujukkan bahwa kadar air biji kopi hasil penyangraian memenuhi syarat untuk uji T dengan menggunakan *pooled variance estimated* karena warna biji kopi terdistribusi normal dan juga memiliki *variance* yang homogen. Hasil Uji T warna biji dan bubuk kopi hasil penyangraian dapat dilihat pada tabel 16 dan tabel 17.

Tabel 16 Uji T Warna Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan	T_{hitung}	Kesimpulan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (1)	1,425670252	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (2)	1,957607663	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (3)	1,120343628	Tidak Berbeda Signifikan

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Keterangan	T_{hitung}	Kesimpulan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (2)	0,01813219	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (3)	-0,35448886	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (2) dan 31 Mei 2021 (3)	-0,48379258	Tidak Berbeda Signifikan

Tabel 17 Uji T Warna Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan	T_{hitung}	Kesimpulan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (1)	0,5715601	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (2)	-2,5306052	Tidak Berbeda Signifikan
28 Mei 2021 dan 31 Mei 2021 (3)	-1,1482294	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (2)	-4,2410443	Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (1) dan 31 Mei 2021 (3)	-1,6948734	Tidak Berbeda Signifikan
31 Mei 2021 (2) dan 31 Mei 2021 (3)	0,50568623	Tidak Berbeda Signifikan

Terlihat dari tabel 16 dan tabel 17 bahwa warna dari biji kopi tidak berbeda signifikan antar *batch*, namun saat biji kopi digiling maka terdapat perbedaan signifikan pada nilai penyangraian tanggal 31 Mei 2021 *batch* satu dan juga *batch* dua, untuk selang kepercayaan 98%. Warna dari benda dengan Ruang warna CIELAB akan dikatakan berbeda saat nilai ΔE sekitar 2,3 [14]. ΔE dapat dihitung dengan persamaan 12 [14]. Tabel 18 dan tabel 19 menunjukkan nilai ΔE biji kopi dan juga bubuk kopi.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (12)$$

Tabel 18 ΔE Biji Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan (Biji Kopi)	ΔE	Kesimpulan
28 Mei dan 31 Mei (1)	1,92541943	Sama
28 Mei dan 31 Mei (2)	2,11645364	Sama
28 Mei dan 31 Mei (3)	2,87412178	Berbeda

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Keterangan (Biji Kopi)	ΔE	Kesimpulan
31 Mei (1) dan 31 Mei (2)	3,11241	Berbeda
31 Mei (1) dan 31 Mei (3)	1,6340257	Sama
31 Mei (2) dan 31 Mei (3)	4,38393613	Berbeda

Tabel 19 ΔE Bubuk Kopi Hasil Penyangraian

Keterangan (Bubuk Kopi)	ΔE	Kesimpulan
28 Mei dan 31 Mei (1)	0,69219939	Sama
28 Mei dan 31 Mei (2)	1,94772072	Sama
28 Mei dan 31 Mei (3)	1,8171285	Sama
31 Mei (1) dan 31 Mei (2)	2,19398906	Sama
31 Mei (1) dan 31 Mei (3)	2,02908649	Sama
31 Mei (2) dan 31 Mei (3)	0,61592532	Sama

Tabel 18 dan tabel 19 terlihat bahwa warna biji kopi menurut rata-rata alat ukur *color meter* menunjukkan bahwa warna biji kopi antara hasil tanggal 28 Mei dengan 31 Mei *batch* 3, 31 Mei *batch* 1 dengan 31 Mei *batch* 2 dan 31 Mei *batch* 2 dengan 31 Mei *batch* 3 dalam kondisi yang berbeda karena memiliki nilai ΔE lebih dari 2,3 sedangkan pada kondisi bubuk maka semua *batch* memiliki warna yang sama karena nilai ΔE kurang dari 2,3.

B.4. Keadaan Fisik Biji Kopi Hasil Penyangraian

Biji kopi hasil penyangraian yang ideal akan memiliki warna yang seragam pada setiap bagiannya. Sedangkan hasil penyangraian menggunakan mesin yang ada saat ini memiliki cacat hasil penyangraian. Cacat fisik yang ditemukan pada biji kopi hasil penyangraian yakni *scorching* dan *tipping. Scorching* adalah kondisi biji kopi gosong pada bagian permukaan datar pada biji kopi [15]. Biji kopi yang mengalami *scorching*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

dapat dilihat pada gambar 21.a. Kemudian Cacat yang juga terdapat pada hasil penyangraian yaitu *tipping*. *Tipping* adalah kondisi saat biji kopi mengalami gosong pada bagian ujung biji kopi [16]. Biji kopi yang menggalami *tipping* dapat dilihat pada gambar 21.b.



(a) (b)

Gambar 26 Cacat Fisik Biji Kopi Hasil Penyangraian

Scorching dapat terjadi karena drum yang terlalu panas, atau juga karena putaran drum yang terlalu rendah. Kecepatan putar drum yang direkomendasikan, yakni 10-25 % dari persamaan 13 [17]. Sehingga putaran yang direkomendasikan untuk mesin yang ada saat ini yaitu berkisar 50-70 rpm. Sedangkan kecepatan drum pada mesin yang ada hanya 39 rpm, sehingga kecepatan motor DC ini berada dibawah rekomendasi. Hal lain yang disoroti dari kondisi drum yakni sistem pengadukan biji kopi pada drum. Sistem pengadukan yang digunakan hanya untuk setengah dari panjang drum keseluruhan sehingga biji kopi tidak teraduk secara sempurna. Hal ini akan mengakibatkan adanya bagian pada biji kopi yang sangat lama terkena drum sehingga akan lebih cepat gosong dibandingkan dengan biji kopi lainnya.

$$D_s = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{g}{r}} \tag{13}$$

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada *capstone project* ini didapatkan kesimpulan bahwa kondisi 2 dengan memanfaatkan delta suhu sebelumnya dapat mengurangi osilasi menjadi maksimal 2,4℃ dari suhu referensi. Kendali bang-bang untuk pengendalian suhu biji kopi juga dapat digunakan pada mesin *roaster* kopi karena memiliki hasil penyangraian yang cenderung sama, variabel uji yang bernilai berbeda yakni hanya pada kadar air antara hasil penyangraian tanggal 28 Mei 2021 dengan 31 Mei 2021 *batch* 3 dan juga warna biji kopi saat menjadi bubuk antara hasil penyangraian 28 Mei 2021 dengan 31 Mei 2021 *batch* 2. Cacat pada biji kopi hasil *penyangraian* diakibatkan oleh satu di antaranya putaran drum yang kurang dari kecepatan rekomendasi.

Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu memastikan bahwa kendali bang-bang dapat mengakomodir untuk besaran api yang beragam untuk mengetahui pengaruhnya terhadap hasil penyangraian atau mengganti sistem kendali menjadi kendali katub gas secara kontinyu. Melakukan penggantian motor penggerak dari mesin *roaster* agar mencapai kecepatan putar yang direkomendasikan yaitu sekitar 50-70 rpm.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

REFERENSI

[1] K. Davids, Home Coffee Roasting, Macmillan, 2013.

[2] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Statistik Perkebunan Indonesia (Kopi) Tahun 2018-2020, Jakarta, 2019.

[3] National Coffee Association USA EST, Coffee Roast, 1911.

[4] K. Ogata, Modern Control Engineering Third Edition, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

[5] A. S. Maharani, Aplikasi Kontrol PID untuk Pengendalian Ketinggian Level Cairan dengan Menggunakan TCP/IP, Semarang, 2011.

[6] G. H. Golub y F. V. L. C., Matrix Computations, Baltimore: John Hopkins University Press, 1989.

[7] R. Septiana, I. Roihan, J. Karnadi y R. A. Koestoer, «Calibration of K-Type Thermocouple and MAX6675 Module With Reference DS18B20 Thermistor Based on Arduino DAQ,» de *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin*, Jakarta, 2019.

[8] S. S. Shapiro y M. B. Wilk, «An Analysis of Varinace Test for Normality (complete samples),» *Biometrika*, vol. 52, nº 3/4, pp. 591-611, 1965.

[9] U. «Pengujian Persyaratan Analisis (Uji Homogentitas dan Uji Normalitas),» *Inovasi Pendidikan*, vol. 7, nº 1, pp. 50-62, 2020.

[10] S. Naseh y M. Hasyimi, «Beberapa Contoh Penggunaan Uji T Bidang Kesehatan Untuk Perbedaan Rata-Rata dari Dua Kelompok Data,» 1996. [Online]. Available: https://media.neliti.com/media/publications/151752-ID-beberapa-contoh-penggunaan-uji-t-bidang.pdf. [Last Accessed: 23 Juli 2021].

[11] Badan Standarisasi Nasional, SNI 01-2907 Tahun 2008 Tentang Biji Kopi, Jakarta, 2008.

[12] Badan Standarisasi Nasional, SNI 8964 Tahun 2021 Tentang Kopi Sangrai dan Kopi Bubuk, Jakarta, 2021.

[13] A. S. Sinaga, «Color-Based Segmentation of Batik Using the L*a*b Color Space,» *Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, vol. 3, nº 2, pp. 175-179, 2019.

[14] G. Sharma, Digital Color Imaging Handbook, New York: CRC Press LLC, 2003.

[15] Giesen Coffee Roaster, «Scorching,» [Online]. Available: https://www.giesencoffeeroasters.eu/knowledge-base/scorching/. [Last Accessed: 2021 Juli 7].

[16] Giesen Coffee Roaster, «Tipping,» [Online]. Available: https://www.giesencoffeeroasters.eu/knowledge-base/tipping/. [Last Accessed: 2021 Juli 7].

[17] [Online]. Available: https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/aiche-2005/topical/pdffiles/T9/papers/600b.pdf. [Last Accessed: 2021 Juli 7].

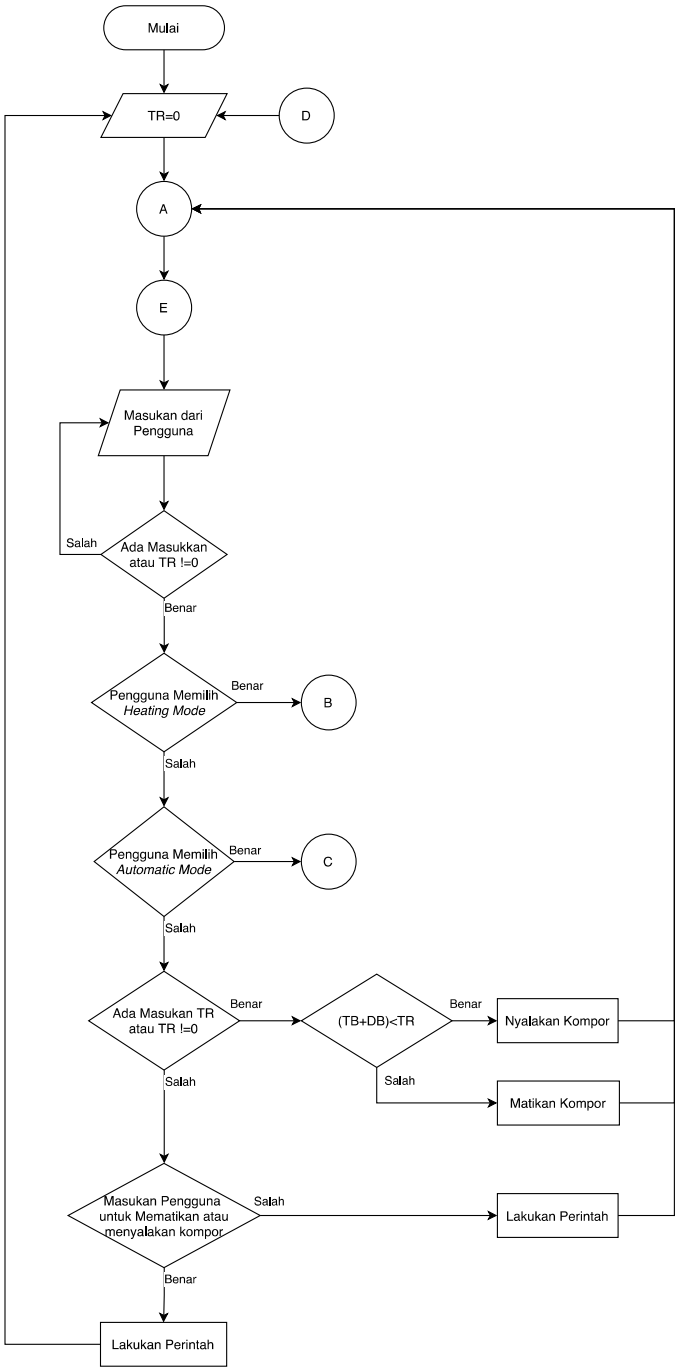
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

[18] N. P. A. Purnamayanti, I. B. P. Gunadnya y G. Arda, «Pengaruh Suhu dan Lama PEnyangraian terhadap Karakteristik Fisik dan Mutu Sensori Kopi Arabika (Coffea arabica L),» *Jurnal Biosistem dan Teknik Pertanian,* vol. 5, nº 2, pp. 39-48, 2017.

[19] T. B. Edvan, R. Edison y M. Same, «Pengaruh Jenis dan Lama Penyangraian pada Mutu Kopi Robusta (Coffea robusta),» *Jurnal Agro Industri Perkebunan,* vol. 4, nº 1, pp. 31-40, 2016.

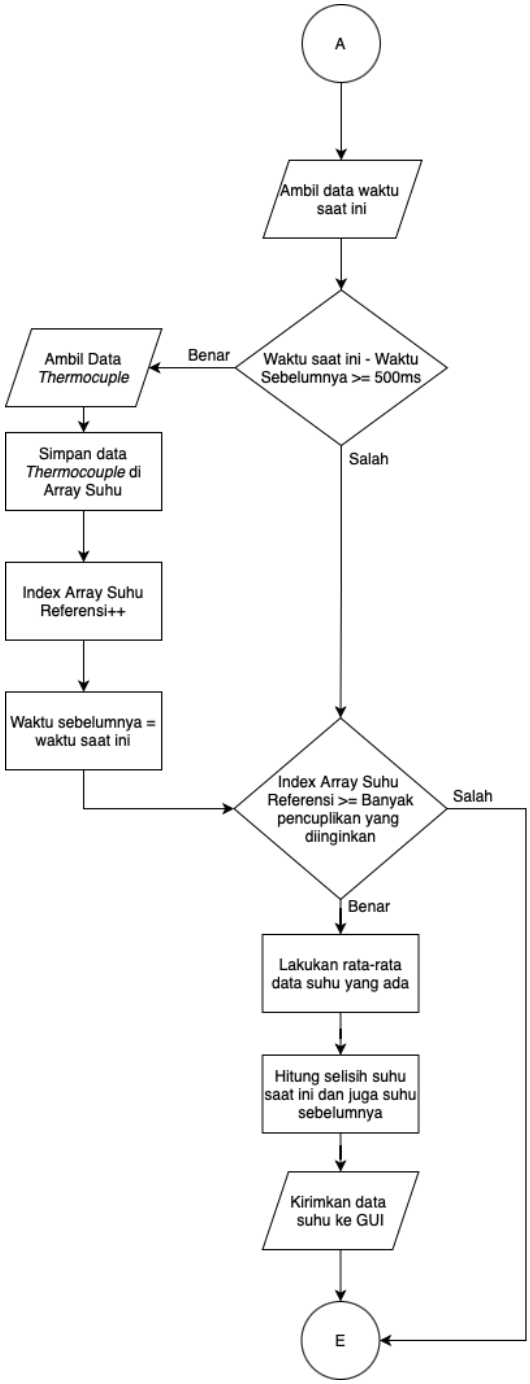
UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

LAMPIRAN



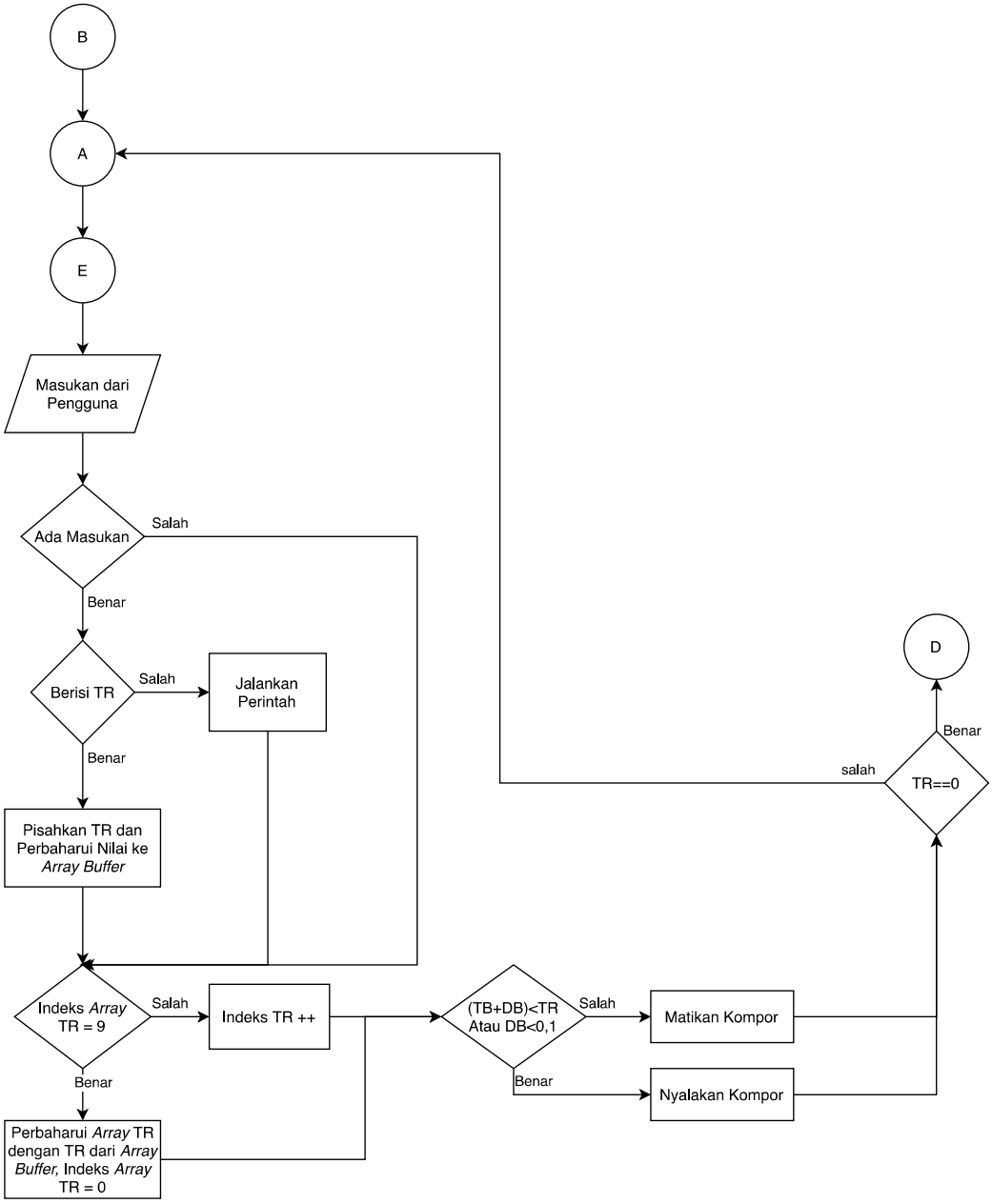
Gambar 27 Program pada Perangkat Arduino

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



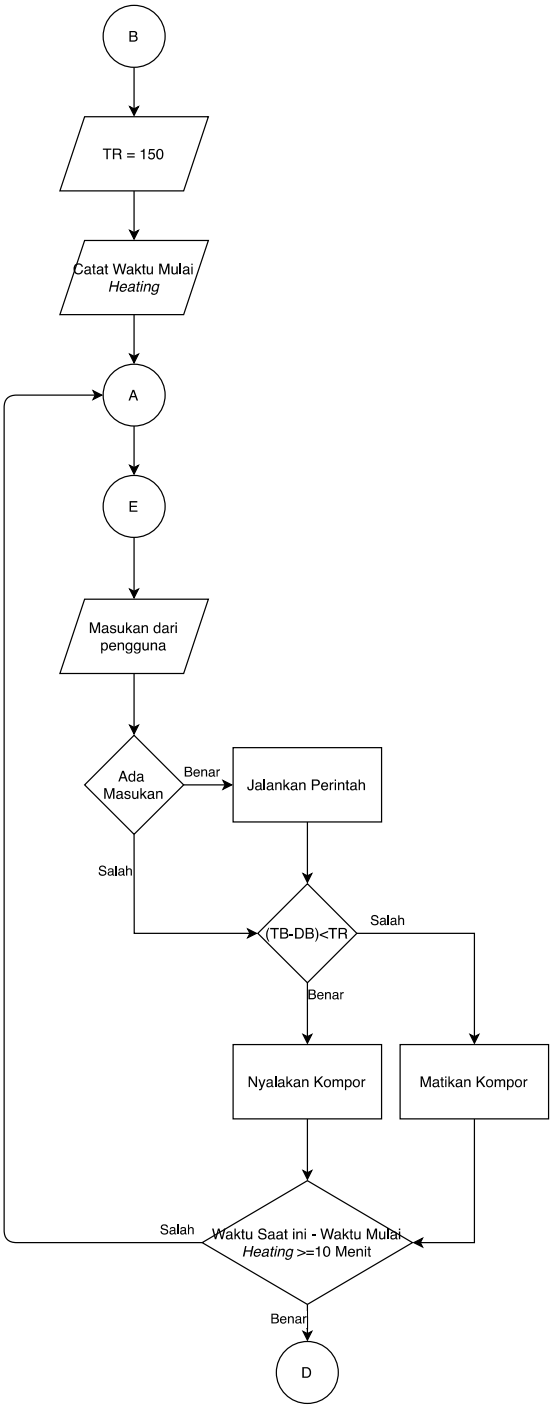
Gambar 28 Program Pengambilan Data Suhu dari Termokopel

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 29 *Automatic Mode*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KENDALI BANG-BANG UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA MESIN PENYANGRAI KOPI OTOMATIS
IRFAN NAUFAL ARDILA, Enas Dhuhri Kusuma, S.T., M.Eng. ; Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2021 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/



Gambar 30 *Heating Mode*