

TESIS

**PENERAPAN SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC*
PADA ALAT PENYANGRAI KOPI TIPE FLUIDISASI**

**ARIE NBB SATRIO NUGROHO S
G042181001**



**PROGRAM MAGISTER KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

**PENERAPAN SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC*
PADA ALAT PENYANGRAI KOPI TIPE FLUIDISASI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

**Program Studi
Keteknikan Pertanian**

Disusun dan diajukan oleh : ARIE NBB SATRIO NUGROHO S

Kepada

**PROGRAM MAGISTER KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

TESIS

**PENERAPAN SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC*
PADA ALAT PENYANGRAI KOPI TIPE FLUIDISASI**

Disusun dan diajukan oleh:

ARIE NBB SATRIO NUGROHO S

Nomor Pokok : G042181001

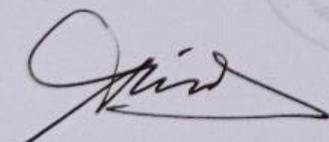
Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis
Pada tanggal 15 Agustus 2022
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui,

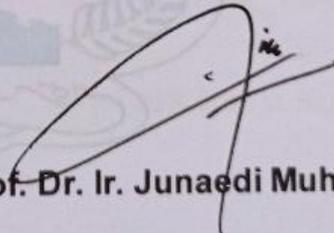
Komisi Penasehat

Ketua

Anggota

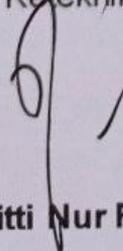


Dr. Ir. Abdul Waris, MT.



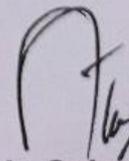
Prof. Dr. Ir. Junaedi Muhidong, M. Sc

Ketua Program Studi
Magister Keteknikan Pertanian



Dr. Ir. Sitti Nur Faridah, MP.

Dekan Fakultas Pertanian
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Ir. Salengke, M.Sc

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Arie NBB Satrio Nugroho S.
Nomor Pokok : G042181001
Program Studi : Keteknikan Pertanian
Jenjang : S-2

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Agustus 2022

Yang menyatakan



Arie NBB Satrio Nugroho S

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Arie Nugroho lahir di Bogor Jawa Barat, pada 12 Oktober 1982. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Soemartono dan Nunung. Penulis menempuh pendidikan sekolah dasar pada tahun 1989 di SDN Semplak 2. Kemudian pada tahun 1995 melanjutkan ke SMP Negeri 4 Bogor. Lalu dilanjutkan pada tahun 1998 di SMU Negeri 5 Bogor. Pada tahun 2001 menempuh kuliah di Institut Pertanian Bogor (IPB) Program Studi Teknik Pertanian dan lulus pada tahun 2005. Di tahun 2015 memulai dunia kerja sebagai Pegawai Negeri Sipil di Politeknik Pembangunan Pertanian (Polbangtan) Malang. Kemudian di tahun 2018 mendapatkan kesempatan tugas belajar di Universitas Hasanuddin Makassar Program Studi Magister Keteknikan Pertanian. Penulis mengambil judul tesis *“Penerapan Sistem Kendali Fuzzy Logic Pada Penyangrai Kopi Tipe Fluidisasi”* di bawah bimbingan Dr. Ir. Abdul Waris, MT dan Prof. Dr. Ir. Junaedi Muhidong, M. Sc.

PRAKATA

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Penerapan Sistem Kendali *Fuzzy Logic* Pada Penyangrai Kopi Tipe Fluidisasi” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister. Atas bantuan semua pihak dalam menyelesaikan studi dan tesis penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Abdul Waris, MT selaku dosen pembimbing utama atas kesabaran, ilmu dan segala arahan yang diberikan dari pemilihan judul penelitian, penyusunan proposal, penelitian hingga penyusunan tesis ini selesai.
2. Prof. Dr. Ir. Junaedi Muhidong, M. Sc selaku dosen pembimbing kedua atas kesabaran, ilmu dan segala arahan yang diberikan dari pemilihan judul penelitian, penyusunan proposal, penelitian hingga penyusunan tesis ini selesai.
3. Prof. Dr. Ir. Mursalim, Dr. Abdul Azis, S. TP, M. Si dan Dr. Sabir, S. Pt, M. Si selaku penguji yang telah memberikan arahan, kritik dan saran dalam penyusunan tesis ini.
4. Dekan beserta seluruh dosen dan tenaga kependidikan Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin.
5. Kepala Program Studi beserta seluruh dosen dan tenaga kependidikan Magister Keteknikan Pertanian Universitas Hasanuddin.
6. Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pertanian (BPPSDMP) atas kesempatan yang diberikan sehingga penulis dapat mengikuti tugas belajar magister tahun 2018.
7. Direktur beserta unsur pimpinan dan seluruh pegawai Politeknik Pembangunan Pertanian (Polbangtan) Malang atas seluruh motivasi dan dukungan kepada penulis.

8. Direktur beserta unsur pimpinan Politeknik Pembangunan Pertanian (Polbangtan) Gowa atas kesempatan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan studi.
9. Ibu, Mamah dan kakak-kakak selaku keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan moril dan doanya.
10. *My beloved wife for your never ending support and unconditional love for me, you are the one.* Kakak dan dede, putra putri penulis yang selalu menjadi sumber semangat dalam menyelesaikan studi, *big hug for you.*
11. Ibu Asriani, Bang Imam, Hartono, Sam, Mardhan, Maya, Mila, Kak Nia, Risma, Uga dan Arafah atas segala bantuannya selama penulis menyelesaikan studi dan penelitian.
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan studi.

Semoga Allah SWT, senantiasa membalas kebaikan dan bantuan yang telah diberikan dengan segala kebaikan dan pahala yang berlipat ganda.

Makassar, Agustus 2022

Hormat kami

Penulis

ABSTRAK

Arie Nugroho (G042181001). *Penerapan Sistem Kendali Fuzzy Logic Pada Penyangrai Kopi Tipe Fluidisasi* (dibimbing oleh Abdul Waris dan Junaedi Muhidong).

Penyangaian kopi beras dapat dilakukan dengan menggunakan metode konvensional dan juga dengan cara mekanis yaitu menggunakan alat penyangrai. Alat penyangrai kopi tipe fluidisasi merupakan salah satu alat penyangrai yang dirancang untuk mengatasi kelemahan pada metode penyangaian secara konvensional. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan alat penyangrai kopi tipe fluidisasi dengan sistem kendali *Fuzzy Logic*. Alat penyangrai kopi tipe fluidisasi memiliki dimensi ruang penyangrai (diameter = 65 mm, tinggi = 75 mm) kapasitas penyangaian 40 gram dengan waktu penyangaian selama 300 detik dan *heater* dengan daya sebesar 1.200 W sebagai sumber energi pemanas. Metode penelitian yang dilakukan adalah membuat program kendali, menerapkan sistem kendali pada alat penyangrai. Kemudian uji fungsional dan uji kinerja alat penyangrai dengan menggunakan kopi beras robusta untuk 3 kali penyangaian dengan suhu *setting point* 190°C, 200°C dan 210°C. Uji kinerja alat penyangrai menunjukkan respon alat baik, dengan indikator berupa nilai *error steady state* di atas nilai *setting point* sebesar 6,25°C (2,97%) selama 15 detik. Namun nilai ini masih di bawah ambang batas toleransi sebesar 5%. Uji mutu warna kopi hasil penyangaian pada penyangaian dengan suhu 190°C menghasilkan 3 kelompok warna kopi : coklat muda-kekuningan, coklat muda-*half city* dan coklat muda-*cinnamon*. Untuk suhu penyangaian 200°C menghasilkan 3 kelompok warna : coklat muda-*city*, coklat muda-*full city* dan coklat muda-*full city+*. Pada suhu penyangaian 210°C menghasilkan 2 kelompok warna : coklat tua-*Vienna*, coklat tua-*Italian*. Alat penyangrai kopi tipe fluidisasi dengan sistem kendali *fuzzy logic* sudah mampu menghasilkan kopi sangrai sesuai dengan target profil penyangaian menurut *National Coffee Association* (2002) yaitu : *light*, *medium* dan *dark*.

Kata Kunci: Alat penyangrai kopi, fluidisasi, *fuzzy logic*.

ABSTRACT

Arie Nugroho. *Application of Fuzzy Logic Control System In Fluidized Coffee Roaster*. (Supervised by Abdul Waris and Junaedi Muhidong).

The fluidized coffee roaster is one of roasters which designed to overcome the weaknesses of the conventional roasting method. The purpose of this research is to develop a fluidization type roaster with a Fuzzy Logic control system. The specification of the roaster are roasting chamber dimensions of 65 mm (diameter) and 75 mm (height), a roasting capacity of 40 grams with a roasting time of 300 seconds. A heater with a power of 1,200 W was used as the source of heating energy. The research method was carried out by first, developed a control program and applied to the roaster. Then, a test of functionality and performance was conducted by using Robusta coffee for a temperature set point of 190°C, 200°C, and 210°C. The performance test of control responses resulted in 6.25°C (2,97%) error steady state for 15 seconds. However, this value remains below the tolerance threshold of 5%. The test of the color quality of coffee roasted at 190°C produced 3 groups of coffee colors, namely light brown-yellow, light brown-half-city and light brown-cinnamon. In the case of roasting temperature of 200° C, it produced 3 color groups, i.e. light brown-city, light brown-full city, and light brown-full city+. For a roasting temperature of 210° C, there were two types of colors, namely dark brown-Vienna and dark brown-Italian. It can be concluded that a fluidized coffee roaster with a fuzzy logic control system was able to produce roast coffee compatible to the target roast profile according to the National Coffee Association (2002), namely light, medium, and dark.

Keywords: coffee roaster, fluidized, fuzzy logic.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	v
PRAKATA	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1. Kopi.....	3
2.2. Pengolahan Kopi.....	3
2.3. Syarat Mutu Biji Kopi	12
2.4. Alat Penyangrai Kopi	12
2.5. Sistem Kendali	16
2.6. Sistem <i>Fuzzy Logic</i>	21
BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.2. Alat dan Bahan	26
3.3. Rancangan Penelitian	26
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1. Deskripsi Alat Penyangrai	36
4.2. Uji Gain	39
4.3. Program Kontrol	40

4.4. Uji Fungsional	40
4.5. Uji Kinerja	42
BAB V PENUTUP	52
5.1. Kesimpulan	52
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Penampang Buah Kopi	3
Gambar 2. Proses Pengolahan Kering	5
Gambar 3. Proses Pengolahan Sekunder	7
Gambar 4. Penyangrai Kopi Tipe Fluidisasi	13
Gambar 5. Sistem Kendali Loop Tertutup	16
Gambar 6. Bentuk <i>Duty Cycle</i> PWM	21
Gambar 7. Bagian-Bagian Sistem <i>Fuzzy</i>	21
Gambar 8. Fungsi keanggotaan <i>Fuzzy Logic</i>	22
Gambar 9. Diagram Blok Sistem Inferensi <i>Fuzzy</i>	23
Gambar 10. Prinsip Kerja Inferensi <i>Fuzzy</i> Sugeno	24
Gambar 11. Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 12. Sistem Kendali Pada Perangkat Keras	28
Gambar 13. Diagram Alir Perancangan <i>Software</i>	29
Gambar 14. Fungsi Keanggotaan Input (Segitiga)	31
Gambar 15. Fungsi Keanggotaan Output PWM (Singleton)	31
Gambar 16. Matriks Kendali <i>Fuzzy</i>	32
Gambar 17. Alat penyangrai tipe fluidisasi	36
Gambar 18. Ruang pemanas	37
Gambar 19. <i>Heater</i>	37
Gambar 20. <i>Axial Fan</i>	38
Gambar 21. <i>Impeller</i>	38
Gambar 22. Kotak kontrol alat penyangrai	39
Gambar 23. Uji Gain	39
Gambar 24. Respon dinamik kontrol pada setting point 190°C	40
Gambar 25. Respon dinamik kontrol pada setting point 200°C	41
Gambar 26. Respon dinamik kontrol pada setting point 210°C	41
Gambar 27. Suhu Udara Penyangrai dan Perubahan Daya Listrik (Sp 190°C)	44

Gambar 28. Suhu Udara Penyangrai dan Perubahan Daya Listrik (Sp 200°C)	45
Gambar 29. Suhu Udara Penyangrai dan Perubahan Daya Listrik (Sp 210°C)	46
Gambar 30. Kadar air kopi hasil penyangraian	47
Gambar 31. Penggunaan energi listrik	48
Gambar 32. Warna kopi hasil penyangraian	49

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Profil Kopi Sangrai	9
Tabel 2. Profil Sangrai Berdasarkan Indeks Warna L*	10
Tabel 3. Syarat Umum Biji Kopi	12
Tabel 4. Sifat-Sifat Udara Pada Tekanan Atmosfer	15
Tabel 5. Spesifikasi Ruang Penyangrai	37
Tabel 6. Spesifikasi Ruang Pemanas	37
Tabel 7. Spesifikasi axial fan	38
Tabel 8. Uji Pendahuluan Kapasitas Ruang Penyangrai	42
Tabel 9. Uji Pendahuluan Waktu Penyangraian	43
Tabel 10. Nilai *L Kopi Sangrai	50

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Desain alat penyangrai kopi tipe fluidisasi	56
Lampiran 2. Spesifikasi alat	57
Lampiran 3. Suhu uji gain	58
Lampiran 4. Respons dinamik tanpa bahan	59
Lampiran 5. Suhu penyangraian	63
Lampiran 6. Kadar air kopi sangrai	69
Lampiran 7. Pengukuran nilai *L kopi sangrai	71
Lampiran 8. Perhitungan kecepatan fluidisasi minimum	72
Lampiran 9. Perhitungan kecepatan massa udara	74
Lampiran 10. Dokumentasi penelitian	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penyangraian kopi di tingkat petani selama ini masih dilakukan secara tradisional dengan metode penyangraian terbuka menggunakan penyangrai dari wajan tanah liat atau alumunium. Hal ini menyebabkan produk olahannya tidak kompetitif dan hanya bisa terjual untuk pasar lapisan bawah (Sri Mulato, 2002).

Selain menggunakan metode konvensional dilakukan juga penyangraian dengan cara mekanis yaitu menggunakan alat penyangrai. Umumnya alat penyangrai yang digunakan adalah tipe silinder berputar dan tipe fluidisasi.

Beberapa penelitian terdahulu mengenai alat penyangrai tipe fluidisasi dengan sistem kendali diantaranya, pengujian kinerja alat penyangrai tipe fluidisasi dan uji kualitas kopi sangrai (Widodo et al., 2015). Kemudian Safitri meneliti pengaruh suhu dan waktu sangrai terhadap hasil bubuk biji rambutan serupa kopi (Safitri & Amin, 2015). Penelitian ini menggunakan sistem kendali *on-off* pada elemen pemanasnya. Juni melakukan perancangan alat penyangrai otomatis untuk rumah tinggal dengan sistem kendali PID (Juni et al., 2014). Pada penelitian ini digunakan metode sistem kendali PID pada elemen pemanas dan kecepatan putaran kipas.

Untuk sistem kendali *Fuzzy Logic* pada alat penyangrai kopi tipe fluidisasi belum dilakukan. Dari permasalahan di atas maka dalam penelitian ini akan dirancang sistem kendali *Fuzzy Logic* pada alat penyangrai kopi tipe fluidisasi.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Belum diketahui bentuk sistem kendali dengan *Fuzzy Logic* pada alat penyangrai kopi tipe fluidisasi.
2. Bagaimana kaidah-kaidah *Fuzzy Logic* dalam mengendalikan alat penyangrai kopi.
3. Bagaimana kinerja alat penyangrai kopi tipe fluidisasi dengan sistem kendali *Fuzzy Logic*.
4. Belum diketahui mutu hasil penyangraian (kadar air dan warna) kopi dari alat penyangrai kopi tipe fluidisasi dengan sistem kendali *Fuzzy Logic*.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Kapasitas alat penyangrai biji kopi sebesar 40 gr.
2. Kopi beras disangrai sampai kadar air seragam maksimal 2,5 - 3% bb (SNI 7465:2008).
3. Inferensi *Fuzzy Logic* yang digunakan adalah Sugeno.

1.4. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan alat penyangrai kopi tipe fluidisasi dengan sistem kendali *Fuzzy Logic*.

Manfaat penelitian ini antara lain :

1. Sebagai informasi bagi prosesor kopi untuk menghasilkan kopi sangrai dengan derajat penyangraian *light, medium* dan *dark*.
2. Dapat menjadi model bagi perancang alat penyangrai kopi tipe fluidisasi.
3. Alat dapat digunakan di laboratorium sebagai bahan ajar dan alat praktikum pengolahan kopi bagi mahasiswa.

BAB II

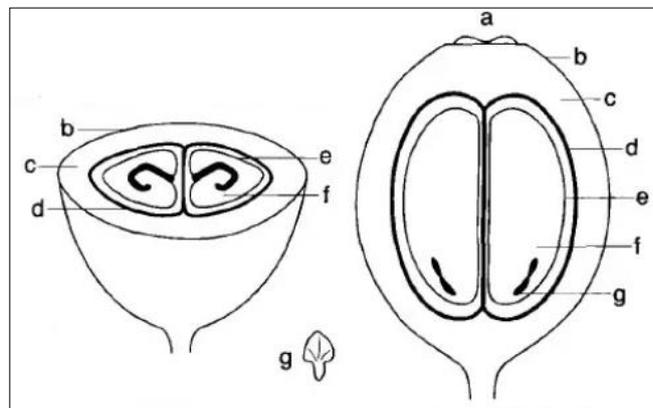
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kopi

Kopi (*Coffea* sp.) merupakan salah satu tanaman perkebunan yang banyak dibudidayakan di Indonesia. Pada tahun 2017 luas areal perkebunan di Indonesia adalah 1.252.200 hektar, dengan total produksi sebesar 667.000 ton (Badan Pusat Statistik, 2017).

Kopi yang ditanam oleh petani di Indonesia ada tiga jenis, yaitu Robusta, Arabika, dan Liberika. Untuk Robusta umumnya ditanam di tanah mineral dengan ketinggian 100 – 600 meter di atas permukaan laut, Arabika ketinggian > 1.000 meter di atas permukaan laut, sedangkan Liberika banyak ditanam pada lahan pasang surut bergambut dan tanah mineral dekat permukaan laut sampai ketinggian 900 m di atas permukaan laut (Ferry et al., 2015).

- a. Kelopak
- b. Kulit buah
- c. Daging buah
- d. Kulit tanduk
- e. Kulit ari
- f. Biji kopi
- g. Embrio



Gambar 1. Penampang buah kopi (Wintgens, 2004)

2.2. Pengolahan Kopi

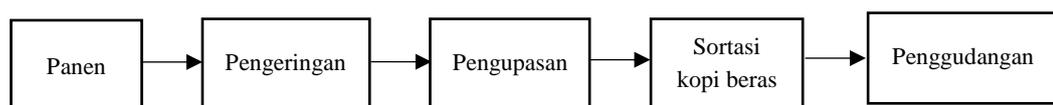
Untuk dapat mengonsumsi kopi dalam bentuk minuman maka buah kopi harus melalui serangkaian proses pasca panen. Pengolahan kopi terbagi menjadi dua, 1. Pengolahan primer, yaitu pengolahan buah

kopi menjadi kopi beras, 2. Pengolahan sekunder, yaitu pengolahan kopi beras menjadi kopi bubuk.

2.2.1. Pengolahan Primer

Setelah dilakukan panen buah kopi maka dilakukan pengolahan kopi primer dengan tujuan menghasilkan produk akhir biji kopi beras. Pengolahan primer terbagi menjadi 2 yaitu pengolahan basah atau WP (*wet process*) dan pengolahan kering atau DP (*dry process*). Pengolahan basah dilakukan terhadap buah kopi superior (berwarna merah, masak, bernas dan seragam). Sedangkan pengolahan kering dilakukan terhadap buah kopi inferior (Asni & Meilin, 2015).

Selain 2 pengolahan di atas terdapat juga kombinasi dari keduanya yang dikenal dengan istilah pengolahan semi basah. Pengolahan dengan cara ini membutuhkan biaya yang relatif lebih rendah dibanding pengolahan basah. Menurut Prastowo, pada basis usaha kopi rakyat yang umumnya terdiri atas kebun – kebun kecil dengan luas areal rata – rata per petani <2 hektar, maka sebaiknya pengolahan hasil panen dilakukan secara berkelompok dengan menggunakan pengolahan semi basah (Prastowo et al., 2012).



Gambar 2. Pengolahan kering (Sulistyorini et al., 2018)

a. Panen

Kopi dipanen dengan cara memetik buah kopi yang telah masak dari tangkainya. Buah kopi yang bermutu tinggi yang akan dipanen harus sudah berada dalam kondisi masak penuh. Kriteria buah kopi yang telah masak penuh adalah telah mengalami perubahan warna menjadi merah dan daging buahnya telah lunak (Sulistyorini et al., 2018).

Beberapa cara pemanenan kopi di Indonesia : a. pemanenan selektif, dilakukan pada buah yang masak saja, b. pemanenan setengah selektif, dilakukan terhadap dompokan atau tandan buah yang masak, c. lelesan, dilakukan terhadap buah kopi yang jatuh ke tanah karena terlambat pemetikan atau buah yang dimakan bubuk, d. Racutan atau rampasan, pemetikan terhadap semua buah kopi (baik yang muda, yang tua maupun yang ada di atas tanah) (Asni & Meilin, 2015).

b. Sortasi buah

Sortasi atau pemilihan buah kopi dimaksudkan untuk memisahkan buah kopi yang masak dan bernas serta seragam dari buah yang cacat atau pecah, kurang seragam dan terserang hama serta penyakit (Prastowo et al., 2012). Sortasi di Indonesia dilakukan dengan dua cara : a. manual, di mana buah kopi direndam dalam air, b. semi mekanis, teknik ini menggunakan tangki air yang dapat memindahkan buah kopi yang mengambang sedangkan buah kopi yang tenggelam akan langsung dialirkan ke *pulper* (Asni & Meilin, 2015).

c. Pengupasan kulit buah (*pulping*)

Pulping bertujuan untuk memisahkan biji kopi dari kulit terluar dan mesocarp (bagian daging). *Pulping* akan mengubah buah kopi menjadi kopi tanduk (HS). Mesin *pulper* terbagi dua menjadi : *vis pulper* berfungsi hanya sebagai pengupas kulit sehingga hasilnya harus difermentasi dan dicuci lagi, sementara *raung pulper* berfungsi juga sebagai pencuci sehingga tidak perlu difermentasi dan dicuci lagi, tetapi langsung masuk ke tahap pengeringan (Asni & Meilin, 2015).

d. Fermentasi

Proses fermentasi bertujuan untuk melepaskan daging buah berlendir (*mucilage*) yang masih melekat pada kulit tanduk. Proses fermentasi terbagi menjadi : a. fermentasi kering, biji kopi setelah pencucian pendahuluan lalu digundukan dalam bentuk gunung kecil (*kerucut*) yang ditutup karung goni, b. fermentasi basah, setelah biji kopi melewati proses pencucian pendahuluan segera ditimbun dan direndam

dalam bak fermentasi (Ridwansyah, 2003). Fermentasi membutuhkan waktu 12 – 36 jam sampai dengan prosesnya selesai. Fermentasi dapat dinyatakan selesai apabila lendir pada kulit tanduk telah meluruh. Waktu proses fermentasi sendiri tidak seragam karena tergantung dari jenis kopi, suhu, kelembaban lingkungan dan jumlah kopi yang difermentasi. Pengaruh fermentasi pada cita rasa kopi antara lain, mengurangi rasa pahit serta memunculkan cita rasa *mild* pada seduhan kopi (Tri Suci, 2019).

e. Pencucian (*washing*)

Proses pencucian bertujuan untuk menghilangkan sisa – sisa lendir hasil fermentasi yang masih menempel pada kulit tanduk. Untuk skala kecil pencucian dilakukan secara manual dengan menggunakan wadah air (bak atau ember) sedangkan mesin digunakan untuk melakukan pencucian kopi dalam jumlah banyak (Asni & Meilin, 2015).

f. Pengeringan

Pengeringan biji kopi dilakukan dengan suhu antara 45 – 50°C sampai tercapai kadar air biji maksimal sekitar 12,5%. Suhu pengeringan yang terlalu tinggi dapat merusak citarasa, terutama pada kopi arabika. Pengeringan kopi robusta bisa diawali suhu yang agak tinggi (sekitar 90°C) dalam waktu singkat (sekitar 20-24 jam). Pengeringan dapat juga dilakukan dua tahap, dengan pengeringan awal melalui penjemuran sampai kadar air sekitar 20% dan selanjutnya dilakukan pengeringan mekanis sampai kadar air 12,5 %.

Metode pengeringan kopi terbagi menjadi tiga yaitu : a. Penjemuran dengan sinar matahari, b. Pengeringan mekanis dengan menggunakan mesin, c. Pengeringan kombinasi, penjemuran yang dilanjutkan dengan pengeringan mekanis (Prastowo et al., 2012).

g. Pengupasan kulit tanduk (*hulling*)

Proses ini bertujuan untuk menghilangkan kulit tanduk atau *head skin* (HS) pada biji kopi. Selanjutnya biji kopi yang telah dikupas kulit tanduknya akan disebut kopi beras. Proses *hulling* dapat dilakukan secara

manual maupun dengan menggunakan mesin *huller* (Sulistiyorini et al., 2018).

h. Sortasi kopi beras

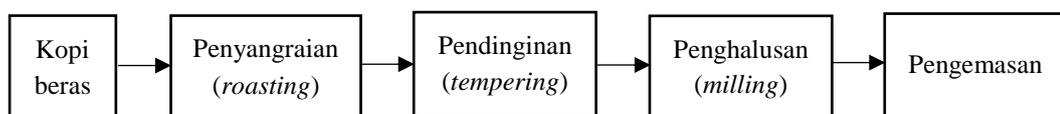
Proses sortasi kopi beras berguna untuk memisahkan kotoran (kerikil, pasir, daun atau potongan dahan) yang mungkin terbawa dari proses sebelumnya serta memisahkan biji cacat dengan tujuan untuk memenuhi syarat umum mutu kopi SNI 01-2907-2008.

i. Penggudangan

Kopi beras dengan kadar air 11-12% disimpan dalam karung dalam gudang dengan RH maksimal 74%, suhu optimum 20-25°C, serta harus memiliki jarak antara karung dengan lantai sejauh 10 cm dengan dialasi papan atau kayu, gudang harus mempunyai ventilasi yang cukup, dan harus bersih, bebas dari hama penyakit serta bau asing. (Ridwansyah, 2003).

2.2.2. Pengolahan Sekunder

Pengolahan sekunder bertujuan untuk memberi nilai tambah serta merubah kopi beras hasil pengolahan primer menjadi kopi bubuk yang siap untuk dikonsumsi. Pengolahan sekunder memiliki peran cukup signifikan dalam pembentukan cita rasa kopi yaitu sebesar 30% pada proses penyangraian (Purnamayanti et al., 2017).



Gambar 4. Proses pengolahan sekunder (Sutarsi & Taruna, 2014)

a. Penyangraian (*Roasting*)

Penyangraian merupakan proses yang dipengaruhi oleh suhu dan waktu, di mana terjadi perubahan kimiawi pada kopi beras selain itu juga terlihat perubahan struktur fisik pada kopi beras (Clarke & Macrae, 1989).

Selama proses penyangraian ada tiga tahapan reaksi fisik dan kimiawi yang berjalan secara berurutan, yaitu penguapan air dari dalam biji, penguapan senyawa-senyawa volatil (senyawa yang mudah menguap) antara lain aldehid, furfural, keton, alkohol, dan ester serta proses pirolisis atau pencoklatan biji (S Mulato et al., 2006).

Pada tahap awal proses, energi panas yang tersedia di dalam ruang sangrai digunakan untuk menguapkan air. Kadar air kopi beras yang semula 12% turun secara cepat menjadi 4% pada saat pemanasan berlangsung 14 menit. Setelah itu, penurunan kadar air berlangsung relatif lambat dan mencapai 2,8% pada selang waktu pemanasan 22 menit. Fenomena ini berkaitan dengan kecepatan rambat air (difusi) di dalam jaringan sel biji kopi. Makin rendah kandungan air dalam biji kopi, kecepatan penguapan air menjadi menurun karena posisi molekul air terletak makin jauh dari permukaan biji bersamaan dengan penguapan air (Sivetz & Desrosier, 1979).

Pirolisis pada dasarnya merupakan reaksi dekomposisi senyawa hidrokarbon antara lain karbohidrat, hemiselulosa dan selulosa yang ada di dalam biji kopi sebagai akibat dari pemanasan. Reaksi ini umumnya terjadi setelah suhu sangrai di atas 180°C. Secara kimiawi, proses ini ditandai dengan evolusi gas CO₂ dalam jumlah banyak dari ruang sangrai. Sedang secara fisik, pirolisis ditandai dengan perubahan warna biji kopi yang semula kehijauan menjadi kecoklatan (Sutarsi & Taruna, 2014).

Kisaran suhu sangrai yang umum adalah sebagai berikut : 1. Suhu 190 – 195°C untuk tingkat sangrai ringan (*light roast*) dengan warna kopi hasil penyangraian coklat muda, 2. Suhu 200 – 205°C untuk tingkat sangrai medium (*medium roast*) dengan warna kopi sangrai coklat agak gelap, 3. Suhu diatas 205°C untuk tingkat sangrai gelap (*dark roast*) dengan warna kopi sangrai warna coklat tua agak hitam (Asni & Meilin, 2015).

Menurut *National Coffee Association* dalam Yunita (2018), proses sangrai dapat dibagi menjadi beberapa tingkat kematangan (profil sangrai), yaitu sebagai berikut:

- a. Tingkat *Light*, pada tingkat ini kopi sangrai berwarna coklat muda, karakternya ringan dari sisi biji, tidak ada lapisan minyak dipermukaan, level *acidity*-nya lebih tinggi. Tingkat sangrai light ini mengandung kafein lebih tinggi dibandingkan dengan kopi yang disangrai dark.
- b. Tingkat *Medium*, pada tingkat ini kandungan gula alami sudah mulai sedikit berkaramel, dan keasaman juga mulai menurun. Kualitas kopi (*specialty coffee*) sangat ideal untuk disangrai pada level ini, karena tahap ini lebih seimbang dan menonjolkan sisi rasa, aroma, dan acidity setiap origin biji kopi.
- c. Tingkat *Medium-Dark*, pada tingkat ini lebih kaya rasa, warnanya lebih gelap dan lapisan minyak mulai sedikit muncul dipermukaan. Rasa dan aroma menjadi lebih teridentifikasi, rasa kopi juga terkadang menjadi terasa lebih spicy.
- d. Tingkat *Dark*, pada tingkat ini memiliki warna gelap seperti coklat dan kadang nyaris hitam. Lapisan minyak pekat di permukaan, dan dapat terlihat pada permukaan cangkir ketika kopi sudah diseduh. Rasa pahit menjadi lebih menonjol, aroma *smoky*, karakter rasa (*flavor*) berkurang.

Tabel 1. Profil kopi sangrai

Style of Roast	Roasted Bean Colour	Bean Surface	Approx. Temp of bean at end of roasting	Acidity	Aroma	Sweetness	Body	Cracks during roasting
Half City		Dry	195C	Very High	Medium	Low	Thin	Just before 1 st Crack
Cinnamon		Dry	200C	High	Strong	Low	Thin to Full	Start of 1 st Crack
City		Dry	210C	Medium	Very Strong	Medium to Strong	Full	Middle of 1 st Crack
Full City		Dry	225C	Medium	Very Strong	Medium to Strong	Very Full	End of 1 st Crack
Full City +		Dry to tiny patches of oil	230C	Medium to Low	Strong	Medium to Strong	Very Full	Between 1 st and 2 nd Crack
Vienna or Full City ++		Shiny Surface	235C	Low	Medium to Strong	Medium to Strong	Full	Start of 2 nd Crack
Italian		Shiny Surface	240C	Very Low	Weak	Low	Thin	2 nd Crack
French		Shiny Surface	245C	Very Low	Weak to Almost Burnt Aroma	Very Low to None	Very Thin	End of 2 nd Crack
Nearly Black		Totally Shiny	250C	Very Very Low	Burnt Aroma	None	Extremely Thin	2 nd Crack has totally ended, risk of fire

Sumber : National Coffee Association

Sedangkan dalam penelitiannya (Fikry et al., 2019) menyatakan profil sangrai juga dapat ditentukan dengan menggunakan standar berdasarkan nilai indeks warna L*. Untuk nilai indeks warna L* di dapatkan dari hasil pengukuran warna kopi sangrai menggunakan alat *colorimeter*. Untuk menentukan nilai derajat penyangraian digunakan nilai indeks warna L* karena menunjukkan tingkat kecerahan yakni antara warna putih (100) sampai dengan hitam (0).

Tabel 2. Profil sangrai berdasarkan indeks warna L*

No	Profil Sangrai	Nilai L*
1	<i>Very light</i>	≥ 57
2	<i>Medium light</i>	42 – 56,99
3	<i>Medium</i>	37 – 41,99
4	<i>Medium dark</i>	29 – 36,99
5	<i>Dark</i>	20,1 – 28,99
6	<i>Very dark</i>	≤ 20

Sumber : (Fikry et al., 2019)

Untuk nilai indeks warna L* di dapatkan dari hasil pengukuran warna kopi sangrai menggunakan alat *colorimeter*. Untuk menentukan nilai derajat penyangraian digunakan nilai indeks warna L* karena menunjukkan tingkat kecerahan yakni antara warna putih (100) sampai dengan hitam (0).

Keseragaman warna kopi hasil penyangraian dapat dihitung dengan menggunakan nilai ΔL (Sutarsi et al., 2017) dengan persamaan berikut :

$$\Delta L = L - L_t \dots \dots \dots (1)$$

keterangan :

L = nilai *L bahan

L_t = nilai *L target

Pada proses penyangraian akan terjadi penurunan kadar air dari kopi beras. Kadar air adalah jumlah air yang dikandung oleh bahan, baik

berupa air bebas maupun terikat. Kadar air suatu bahan dapat dinyatakan dalam dua cara, yaitu kadar air basis basah (m) dan kadar air basis kering (M). Kadar air basis basah memiliki batas maksimum teoritis 100%, sedangkan kadar air basis kering bisa lebih dari 100%. Untuk menghitung kadar air digunakan persamaan berikut :

$$m = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

m = Kadar air basis basah (%) Wm = Berat air dalam bahan (g)

M = Kadar air basis kering (%) Wd = Berat padatan bahan (g)

b. Pendinginan (*tempering*)

Biji kopi sangrai segera didinginkan setelah proses penyangraian selesai. Hal ini bertujuan agar tidak terjadi *over roasting* pada biji kopi sangrai. Pendinginan dapat dilakukan dengan menghamparkan biji kopi sangrai pada wadah yang memiliki alas permukaan berpori yang berguna untuk mengalirkan udara dingin (Asni & Meilin, 2015).

c. Penghalusan (*milling*)

Tujuan dari proses penghalusan kopi beras adalah untuk memudahkan air melarutkan senyawa cita rasa dan penyegar yang terkandung di dalam biji kopi. Proses penghalusan atau penggilingan kopi sangrai dengan menggunakan alat *grinder* (Asni & Meilin, 2015).

Tingkat hasil penghalusan kopi dapat dibagi menjadi : *coarse* (bubuk kasar), *medium* (bubuk sedang), *fine* (bubuk halus), *very fine* (bubuk amat halus) (Ridwansyah, 2003).

d. Pengemasan

Plastik transparan dan alumunium foil merupakan bahan pengemas kopi bubuk yang paling umum digunakan. Kopi bubuk dapat disimpan lebih lama dengan mengurangi oksigen di dalam kemasan ke

tingkat yang paling rendah (<1%) atau jika mungkin 0% dengan pengemas vakum (Asni & Meilin, 2015).

2.3. Syarat Mutu Biji Kopi

Syarat mutu biji kopi diatur dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 01-2907-2008. Syarat mutu dibagi menjadi dua yaitu syarat umum dan syarat khusus.

1. Syarat umum adalah persyaratan bagi setiap biji kopi yang dinilai dari tingkat mutunya. Biji kopi yang tidak memenuhi syarat umum tidak dapat dinilai tingkat mutu kopinya.
2. Sementara syarat khusus dibagi lagi berdasarkan ukuran biji, jumlah keping biji dan sistem nilai cacat (Badan Standardisasi Nasional, 2008).

Tabel 3. Syarat mutu umum biji kopi

No	Kriteria	Satuan	Persyaratan
1	Serangga hidup	-	Tidak ada
2	Biji berbau busuk atau berbau kapang	-	Tidak ada
3	Kadar air	%fraksi massa	Maks 12,5
4	Kadar kotoran	%fraksi massa	Maks 0,5

Sumber : SNI 01-2907-2008

2.4. Alat Penyangrai Kopi

Alat penyangrai kopi berfungsi menurunkan kadar air kopi beras dari 12,5% menjadi < 2,5%. Pada umumnya alat penyangrai kopi terbagi menjadi dua jenis, yaitu: 1. Tipe silinder (drum rotari), 2. Tipe fluidisasi (fluidisasi udara panas) (Rao, 2014).

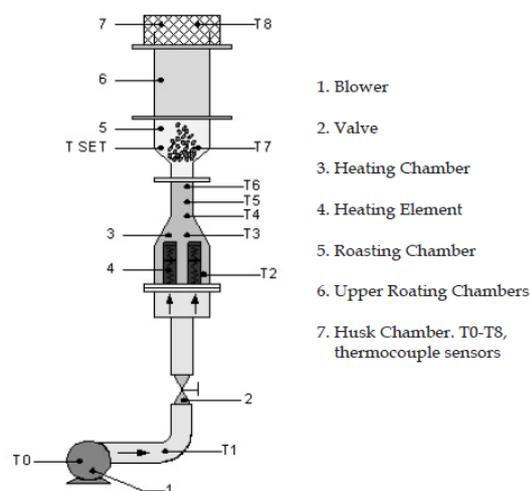
2.4.1. Penyangrai kopi tipe silinder

Penyangrai jenis ini dioperasikan dengan cara mengaduk kopi dalam drum yang dipanasi api gas, kayu atau *heater*. Alat ini memiliki 5 komponen utama yaitu ruang sangrai, penggerak, sumber panas, unit *tempering* (pendingin) dan rangka. Keunggulan dari alat ini adalah menggunakan sistem *direct heating* sehingga pemanasan lebih cepat dan hemat energi (Sutarsi et al., 2016).

2.4.2. Penyangrai Kopi Tipe Fluidisasi

Pada tipe silinder perpindahan panas yang terjadi didominasi oleh proses konduksi sedangkan untuk tipe fluidisasi didominasi oleh proses konveksi. Penyangrai tipe silinder memiliki kelemahan kulit ari kopi beras yang disangrai akan tertinggal dan membentuk kerak di dinding silinder serta menghasilkan aroma asap pada proses penyangraian berikutnya. Hal ini disebabkan karena pada tipe silinder sulit untuk mengontrol suhu penyangraian (Widodo et al., 2015).

Pada penyangrai tipe fluidisasi memiliki kelemahan bila aliran udara terlalu besar akan menyebabkan kerusakan pada rasa kopi sangrai serta mengurangi efisiensi bahan bakar (Rao, 2014). Di dalam penggunaan alat pengering ini perlu diperhatikan pengaturan suhu, kecepatan aliran udara pengering, dan tebal tumpukan bahan yang dikeringkan sehingga hasil kering yang diharapkan dapat tercapai (Tanggasari, 2014).



Gambar 4. Penyangrai kopi tipe fluidisasi (Widodo et al., 2015)

Bagian – bagian alat penyangrai kopi tipe fluidisasi adalah : *blower*, berfungsi untuk mengisap udara dari luar untuk kemudian didorong ke dalam ruang penyangraian, *valve* merupakan katup yang berfungsi untuk mengatur debit udara yang masuk ke ruang

penyangraian. Debit udara yang masuk ke *roasting chamber* harus cukup kuat agar mampu mengangkat dan mengaduk kopi beras sehingga tidak terjadi kontak yang terlalu lama dengan dinding ruangan yang akan mengakibatkan *over roasting* (gosong).

Heating chamber (ruang pemanas), ruangan yang berfungsi untuk memanaskan udara yang akan dialirkan masuk ke dalam ruang penyangraian. *Heating element*, elemen pemanas pada ruang pemanas yang berfungsi untuk memanaskan udara. Elemen pemanas pada umumnya lebih mudah dikendalikan dayanya sehingga akan menyebabkan suhu penyangraian cukup presisi dan tidak menyebabkan terjadinya *over roasting*.

Roasting chamber (ruangan penyangraian), tempat di mana biji kopi beras disangrai oleh udara panas dari ruang pemanas dengan menggunakan metode konveksi. Udara panas akan mengalir melalui celah di antara biji kopi. Setelah memanaskan kopi udara panas akan bergerak ke atas dan akhirnya keluar dari ruang penyangrai. *Upper roasting chamber*, saluran udara panas dari ruang penyangrai yang akan membawa sisa kulit ari. *Husk chamber*, tempat untuk memerangkap sisa kulit ari yang terbawa udara panas dari ruang penyangrai.

Parameter perhitungan pada penyangrai kopi tipe fluidisasi diantaranya adalah (Putra et al., 2019) :

Luas alas ruang penyangrai (A) :

$$A = \pi r^2 \dots\dots\dots (4)$$

keterangan : $\pi = 3,14$

r = jari-jari alas ruang penyangrai (m)

Debit aliran udara (Q) :

$$Q = v \cdot A \dots\dots\dots (5)$$

keterangan : v = kecepatan udara (m/det)

A = luas alas ruang penyangrai (m²)

Kecepatan massa udara (\dot{m}) :

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \dots\dots\dots (6)$$

keterangan : ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

Kecepatan minimum fluidisasi (U_{mf}) :

$$U_{mf} = \frac{\mu \{((28,7)^2 + (0,049 \cdot Ar)^{0,5}) - 28,7\}}{dp \cdot \rho g} \dots\dots\dots (7)$$

Bilangan Archimedes :

$$Ar = \frac{g (dp)^3 (\rho g) (\rho p - \rho g)}{\mu^2} \dots\dots\dots (8)$$

keterangan :

g = percepatan gravitasi (m/det^2)

dp = diameter kopi beras (m)

ρg = massa jenis udara (kg/m^3)

ρp = massa jenis kopi beras (kg/m^3)

μ = viskositas udara (kg/m.s)

Kebutuhan total energi penyangraian :

$$Q = m \cdot Cp \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots (9)$$

keterangan :

Q = energi untuk melakukan penyangraian (J)

m = berat bahan (kg)

Cp = panas spesifik udara ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

T_2 = suhu udara ruang penyangrai ($^\circ\text{C}$)

T_1 = suhu udara lingkungan ($^\circ\text{C}$)

Tabel 4. Sifat-Sifat Udara Pada Tekanan Atmosfer

No	T (K)	ρ (kg/m^3)	Cp ($\text{kg/kJ} \cdot ^\circ\text{C}$)	μ (kg/m.det)
1	300	1,1774	1,0057	1,8462
2	350	0,9980	1,0090	2,075
3	400	0,8826	1,0140	2,286
4	450	0,7833	1,0207	2,484

National Bureau Standart (1965)

2.5. Sistem Kendali

Teknologi sistem kendali sering digunakan di industri untuk mengendalikan urutan proses, pada awalnya proses mengubah bahan material dasar menjadi sebuah produk akhir yang diinginkan – oleh karena itu sering disebut dengan sistem kendali proses (*process control*).

2.5.1. Jenis sistem kendali

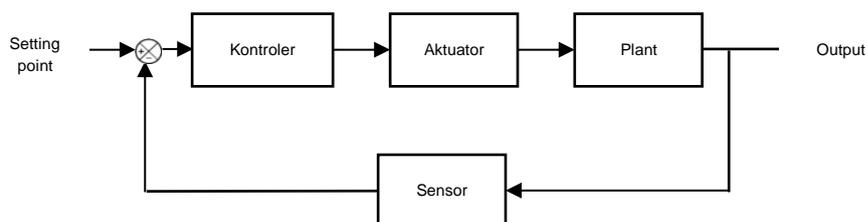
Sistem kendali dapat dibedakan menjadi dua kelompok yaitu: 1. sistem kendali loop terbuka (*open loop system*) dan 2. sistem kendali loop tertutup (*close loop system*) (Ogata, 1995).

a. Sistem kendali *loop* terbuka (*open loop control system*)

Sistem kendali ini tidak dapat memperbaiki *error* dari respon keluaran *plant* karena tidak adanya umpan balik, sehingga respon *error* tidak dapat diperbaiki secara otomatis (Siswojo, 2017).

b. Sistem kendali *loop* tertutup (*close loop control system*)

Sistem kendali *loop* tertutup merupakan sistem kendali yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Kendali loop tertutup termasuk dalam sistem kendali berumpan balik dimana sinyal kesalahan penggerak merupakan selisih antara sinyal masukan dan sinyal umpan-balik (Ogata, 1995).



Gambar 5. Sistem kendali *loop* tertutup (Siswojo, 2017)

Sistem kendali ini dikonfigurasi sebagai umpan balik *loop* tertutup sehingga dapat memperbaiki respon keluarannya ketika terjadi *error* kemudian akan memiliki perbedaan terhadap *set point* yang diberikan operator. Sehingga dapat bekerja otomatis untuk memperbaiki *error* akibat adanya gangguan. Oleh karena itu untuk mendapatkan *error*

antara keluaran dan *set point* diperlukan sistem umpan balik negatif (Siswojo, 2017).

2.5.2. Klasifikasi sistem kendali

Klasifikasi sistem kendali berdasarkan pada banyaknya masukan dan keluaran sistem (Yudaningtyas, 2017): *Single input single output* (SISO), SISO adalah sistem yang hanya mempunyai satu masukan dan satu keluaran, *Multi input single output* (MISO), sistem kendali MISO adalah sistem yang mempunyai lebih dari satu masukan dan memiliki satu keluaran.

2.5.3. Komponen dalam sistem kendali

Menurut Yudaningtyas (2017), sesuai dengan fungsi pengontrolan secara menyeluruh maka komponen yang ada pada sistem kendali dapat dibagi menjadi :

a. Sensor

Sensor merupakan elemen yang langsung berhubungan dengan objek yang diukur. *Transduser* berfungsi untuk mengubah besaran fisis yang diukur menjadi besaran fisis lainnya. Pada umumnya mengubah besaran tekanan, temperatur, aliran, posisi dan sebagainya.

Sensor suhu dibagi menjadi : a) *Thermostat*, jenis sensor suhu kontak (*contact temperature sensor*) yang menggunakan prinsip *electro-mechanical*, b) *Thermistor*, komponen elektronika yang nilai resistansinya dipengaruhi oleh suhu, c) *Resistive Temperature Detector* (RTD), memiliki fungsi yang sama dengan *Thermistor* jenis PTC yaitu dapat mengubah energi listrik menjadi hambatan listrik yang sebanding dengan perubahan suhu, c) *Thermocouple*, pada dasarnya adalah sensor suhu *Thermo-Electric* yang terdiri dari dua persimpangan (junction) logam yang berbeda.

b. Kontroler

Kontroler merupakan salah satu komponen sistem pengaturan yang berfungsi mengolah sinyal umpan balik dan sinyal masukan acuan

(*setpoint*) atau sinyal *error* mejadi sinyal kendali. Sinyal *error* disini adalah selisih antara sinyal umpan balik yang dapat berupa sinyal keluaran *plant* sebenarnya atau sinyal keluaran terukur dengan sinyal masukan acuan (*setpoint*).

Mikrokontroler adalah sebuah komputer kecil (*special purpose computers*) di dalam satu IC yang berisi CPU, memori, *timer*, saluran komunikasi serial dan paralel, *port input/output*, *ADC*. Mikrokontroler digunakan untuk suatu tugas dan menjalankan suatu program.

Tujuan menanamkan program pada Mikrokontroler adalah agar rangkaian elektronik dapat membaca input, memproses input tersebut dan kemudian menghasilkan output sesuai yang diinginkan. Jadi Mikrokontroler bertugas sebagai otak yang mengendalikan proses input, dan output sebuah rangkaian elektronik.

AtMega328P merupakan Mikrokontroler yang terdapat di dalam board *Arduino Uno*. Mikrokontroler ini memiliki kelebihan konsumsi daya yang rendah dengan start-up cepat. Lebih mudah digunakan, dengan Mikrokontroler 8 bit yang tidak sekompleks versi 32/64 bit. *Atmega328P* memiliki arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computing*) produksi Atmel. *Atmega328P* juga memiliki beberapa periferal seperti *ADC (Analog to Digital Converter)* 10 bit, komunikasi *SPI (Serial Peripheral Interface)*, dan berbagai periferal lainnya (Pramudita et al., 2013). *Atmega328P* memiliki 256 KB memori flash untuk menyimpan kode, 8 KB *SRAM* dan 4 KB *EEPROM*. Masing-masing dari 54 pin digital pada *Arduino Uno* dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan fungsi *pinMode ()*, *digitalWrite ()*, dan *digitalRead ()* (Fezari et al., 2015).

c. Aktuator

Aktuator secara umum merupakan seperangkat mekanik untuk menggerakkan atau mengendalikan suatu mekanisme dalam sistem. Pengertian aktuator dapat berbeda bergantung pada bidang yang bersangkutan, dalam dunia elektronika aktuator dapat berarti pembagian

transduser atau suatu perangkat yang memiliki kemampuan mengubah sinyal masukan menjadi suatu gerak (Ismoyo & Harianto, 2009).

Alat ini berfungsi untuk mengontrol aliran energi menuju sistem yang akan dikendali. Alat ini sering disebut sebagai elemen pengontrol akhir (*final control element*). Elemen keluarannya harus memiliki kemampuan untuk menggerakkan *plant* ke suatu harga yang dikehendaki.

Beberapa jenis aktuator yang umum dipakai : *relay*, *solid state relay*, *solenoid*, motor. *Solid state relay* (SSR) adalah sebuah saklar elektronik yang tidak memiliki bagian yang bergerak. SSR juga mampu menghidupkan dan mematikan dengan waktu yang jauh lebih cepat bila dibandingkan dengan relay elektromekanik.

d. *Plant* (proses)

Plant merupakan objek fisik yang dikendali dalam sistem kendali. Proses pengontrolan *plant* sendiri meliputi proses mekanik, elektrik, hidrolis, maupun gabungan dari berbagai proses. Pada penelitian ini *plant* yang akan dikendali adalah *heater*.

e. Penguat (*amplifier*)

Penguat merupakan unit yang dibutuhkan karena daya dari *error detector* tidak cukup besar untuk menggerakkan elemen keluaran. Karena fungsi pengontrolan adalah untuk mengontrol keluaran agar kesalahan mendekati nol, maka diperlukan penguat daya (*power amplifier*). Penguat tegangan (*voltage amplifier*), dalam bentuk fisiknya penguatan ini banyak dilakukan oleh *operational amplifier* (*op amp*).

f. *Heater*

Heater adalah komponen elektrik yang mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui proses *Joule Heating*. Panas pada *heater* dihasilkan oleh kawat berbahan niklin ataupun pita bertahanan listrik tinggi (*resistance wire*).

Dua macam jenis utama *heater* yaitu :

- *Heater* bentuk dasar, yaitu dimana *resistance wire* hanya dilapisi oleh isolator listrik. Yang termasuk jenis ini adalah : *ceramic heater, silica dan quartz heater, bank channel heater, black body ceramik heater.*
- *Heater* bentuk lanjut, merupakan *heater* dari bentuk dasar yang dilapisi oleh pipa atau lembaran plat logam sebagai penyesuain terhadap penggunaan dari elemen pemanas tersebut.

Daya pada *heater* dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$P = V \times I \dots \dots (10)$$

keterangan :

P = daya (Watt)

V = tegangan (Volt)

I = arus (ampere)

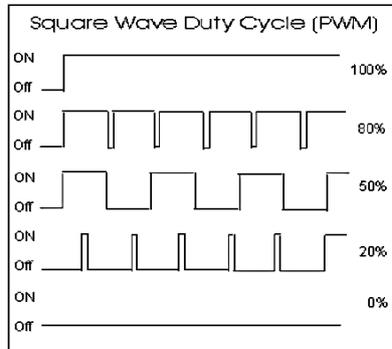
g. *Pulse Width Modulation (PWM)*

Pulse Width Modulation (PWM) adalah salah satu teknik modulasi dengan mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap. Sebuah PWM biasanya merupakan gabungan antara rangkaian pembangkit sinyal segitiga dengan nilai tegangan referensi yang dapat diatur.

Aplikasi penggunaan PWM biasanya ditemui untuk pengaturan kecepatan motor DC, pengaturan cerah atau redup LED, dan pengendalian sudut pada motor servo. Semakin besar nilai *duty cycle* yang diberikan maka kecepatan motor DC akan semakin cepat dan semakin kecil nilai *duty cycle* maka kecepatan motor DC akan semakin lambat (Suhaeb et al., 2017).

Duty cycle merupakan representasi dari kondisi logika high dalam suatu periode sinyal dan dinyatakan dalam bentuk (%) dengan range 0% sampai 100%, sebagai contoh jika sinyal berada dalam kondisi high terus menerus artinya memiliki *duty cycle* sebesar 100%. Jika waktu sinyal

keadaan high sama dengan keadaan low maka sinyal mempunyai *duty cycle* sebesar 50%.

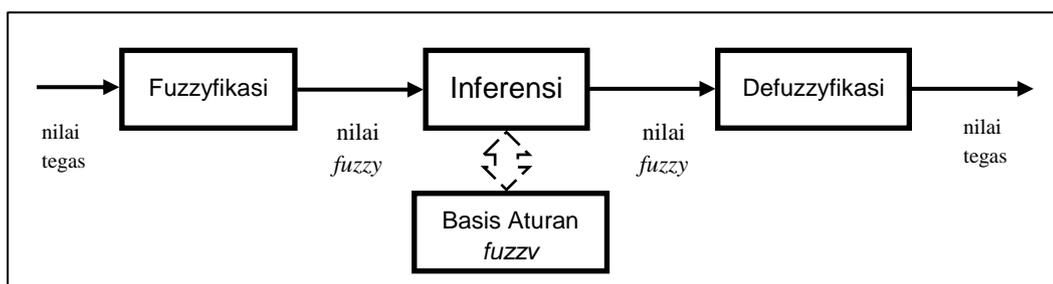


Gambar 6. Bentuk *duty cycle* PWM (Suhaeb et al., 2017)

2.6. Sistem Fuzzy Logic

Fuzzy Logic adalah sebuah metodologi berhitung dengan variabel kata-kata (*linguistic variable*) sebagai pengganti berhitung dengan bilangan. Variabel kata-kata yang digunakan tidak sepresisi dengan bilangan, namun pemakaian kata-kata jauh lebih dekat dengan intuisi manusia di mana manusia bisa langsung merasakan nilai dari variabel kata-kata yang sudah dipakai sehari-hari (Naba, 2009).

Fuzzy Logic cocok untuk diimplementasikan pada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, *embedded system*, jaringan PC, *multi channel* atau workstation berbasis akuisisi data, dan sistem kendali.



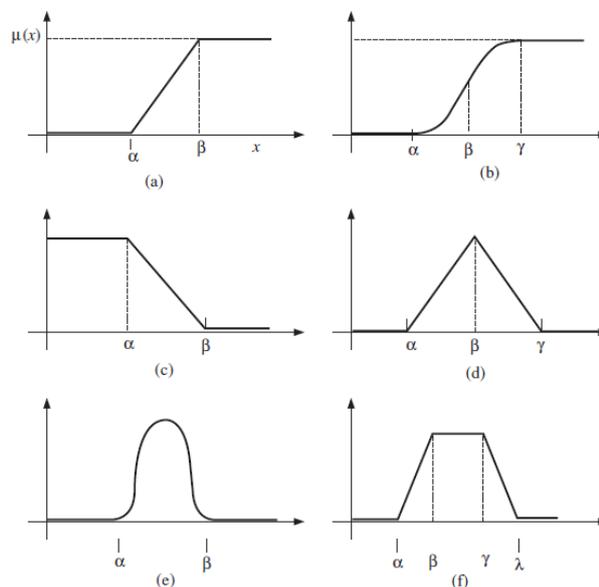
Gambar 7. Bagian-bagian sistem *fuzzy* (Wati, 2011)

2.6.1. Fuzzyfikasi

Fuzzyfikasi merupakan proses mengubah nilai variabel numerik ke nilai variabel linguistik. Dengan kata lain, *fuzzyfikasi* merupakan pemetaan

dari ruang input ke himpunan *fuzzy* yang didefinisikan pada semesta pembicaraan variabel input.

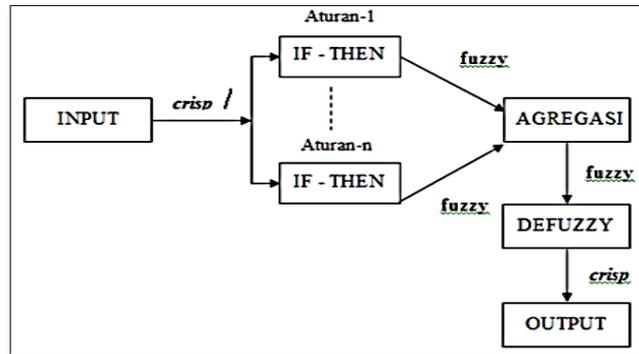
Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui nilai pendekatan fungsi. Beberapa fungsi yang umum digunakan, yaitu segitiga, trapesium, *Gaussian*, *bell* (Wati, 2011).



Gambar 8. Fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic*

2.6.2. Sistem inferensi *fuzzy*

Sistem inferensi *fuzzy* merupakan suatu kerangka komputansi yang didasarkan pada teori himpunan *fuzzy*, aturan *fuzzy* berbentuk IF – THEN dan penalaran *fuzzy*. Sistem inferensi *fuzzy* menerima input *crisp*. Input ini kemudian dikirim ke basis pengetahuan yang berisi n aturan fuzzy dalam bentuk If – Then. *Fire strength* akan dicari pada setiap aturan. Apabila jumlah aturan lebih dari satu, maka akan dilakukan agregasi dari semua aturan.



Gambar 9. Diagram blok sistem inferensi *fuzzy*
(Kusumadewi & Hartati, 2010)

Selanjutnya pada hasil agregasi akan dilakukan *defuzzyfikasi* untuk mendapatkan nilai *crisp* sebagai *output* sistem (Kusumadewi & Hartati, 2010).

Terdapat tiga model aturan *fuzzy* yang digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi, yaitu :

a. Metode Tsukamoto

Sistem inferensi *fuzzy* didasarkan pada konsep penalaran monoton. Pada metode penalaran secara monoton, nilai *crisp* pada daerah konsekuen dapat diperoleh secara langsung berdasarkan *fire strength* pada antesedennya. Salah satu syarat yang harus dipenuhi pada metode penalaran ini adalah himpunan fuzzy pada konsekuennya harus bersifat monoton (baik monoton naik maupun turun).

Pada dasarnya metode Tsukamoto mengaplikasikan penalaran monoton pada setiap aturannya. Kalau pada penalaran monoton sistem hanya memiliki satu aturan, pada metode Tsukamoto, sistem terdiri atas beberapa aturan. Karena menggunakan konsep dasar penalaran monoton, pada metode Tsukamoto, setiap konsekuen pada aturan yang berbentuk If-Then harus direpresentasikan dengan suatu himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan yang monoton (Kusumadewi & Hartati, 2010).

Jika ada 2 variabel *input*, yaitu x dan y dan 1 variabel *output* z. Variabel x terbagi atas 2 himpunan, yaitu A1 dan A2. Variabel y terbagi

atas 2 himpunan juga, yaitu B1 dan B2, variabel output C1 dan C2. Tentu saja himpunan C1 dan C2 harus merupakan himpunan yang bersifat monoton. Diberikan 2 aturan sebagai berikut:

IF x is A1 **and** y is B2 **THEN** z is C1

IF x is A2 **and** y is B1 **THEN** z is C2

b. Metode Sugeno (TSK)

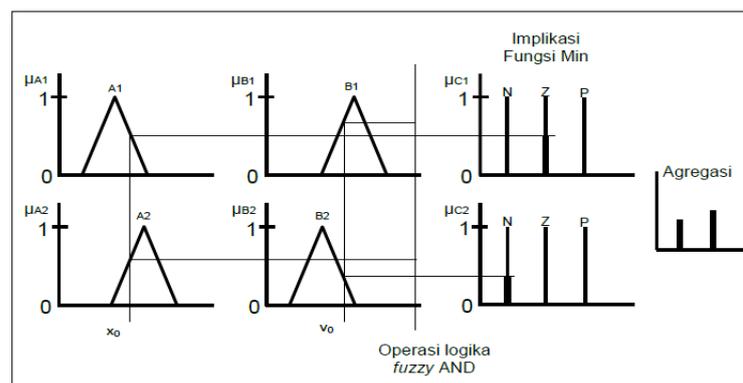
Sistem inferensi *fuzzy* menggunakan metode Sugeno memiliki karakteristik yaitu konsekuen tidak merupakan himpunan *fuzzy*, namun merupakan suatu persamaan linear dengan variabel-variabel sesuai dengan variabel inputnya (Kusumadewi & Hartati, 2010). Bentuk model *fuzzy* Sugeno orde-0:

If (x₁ is A₁) ° (x₂ is A₂) ° ... ° (x_n is A_n) THEN z = k,

Sedangkan bentuk model orde 1:

If (x₁ is A₁) ° ... ° (x_n is A_n) THEN z = p₁*x₁+...+p_n*x_n+q,

Dengan A_i adalah himpunan fuzzy ke i sebagai antaseden (alasan), ° adalah operator fuzzy (AND atau OR) dan k merupakan konstanta tegas sebagai konsekuen (kesimpulan), p_i adalah suatu konstanta (tegas) ke-i dan q juga merupakan konstanta dalam konsekuen.



Gambar 10. Prinsip kerja inferensi *fuzzy* Sugeno

Pada gambar di atas merupakan operasi penyatuan semua singleton, sehingga output dari kaidah fuzzy yaitu konstan dan memperoleh output *crisp* sebagai sinyal keluaran. Oleh karena itu metode Sugeno sangat efektif secara komputasi, berfungsi dengan baik melalui

teknik optimasi dan adaptif yang sangat menarik dalam masalah kendali, terutama untuk sistem nonlinier yang dinamis.

c. Metode Mamdani

Disebut juga metode Max-Min. Untuk mendapatkan output melalui 4 tahapan sebagai berikut:

- a. Pembentukan himpunan *fuzzy*
- b. Aplikasi fungsi implikasi (aturan) Mamdani menggunakan fungsi implikasi Min.
- c. Komposisi aturan Mamdani dapat menggunakan 3 komposisi aturan yaitu: max, additive, or.
- d. Penegasan (*defuzzy*), hasil dari himpunan komposisi, perlu diterjemahkan menjadi nilai *crisp* sebagai hasil akhir. Terdapat beberapa metode defuzzyfikasi (metode *centroid*, metode *bisektor*, metode *mean of maximum*, metode *largest of maximum*, metode *smallest of maximum*).

2.6.3. Defuzzyfikasi

Defuzzyfikasi merupakan pemetaan dari ruang aksi kendali *fuzzy* yang didefinisikan pada semesta pembicaraan keluaran ke ruang aksi kendali *nonfuzzy* (numerik). Proses ini penting karena pada aplikasi praktis, aksi kendali numerik diperlukan untuk melakukan pengendalian (Wati, 2011). Proses agregasi dan defuzzy untuk mendapatkan nilai tegas sebagai output untuk aturan *fuzzy* juga dilakukan dengan menggunakan rata-rata terbobot yaitu (Cox, 1994):

$$y^* = \frac{\sum_i \mu(x_i)x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

- y* = sinyal kontrol bernilai crisp.
- N = jumlah kaidah.
- xi = posisi ke-i dalam semesta pembicaraan.
- μ(xi) = derajat keanggotaan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari – Mei 2022 di Laboratorium Instrumentasi dan Sistem Kontrol dan Laboratorium Pengolahan Pangan, Program Studi Keteknikan Pertanian, Universitas Hasanuddin, Makassar.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, alat penyangrai kopi tipe fluidisasi, oven, *colorimeter* tipe CS-10, timbangan digital *US Solid* (tingkat akurasi 0,001 gram), kamera, laptop, kWh meter, mikrokontroler Arduino Uno, *thermocouple type K*, LCD, kabel listrik, *solid state relay*, program Arduino IDE dan Matlab.

Bahan uji yang digunakan untuk penelitian ini adalah kopi beras robusta asal kabupaten Gowa yang diproses melalui pengolahan kering (*dry* atau *natural*).

3.3. Rancangan Penelitian

Beberapa tahapan dalam rancangan penelitian ini diantaranya mulai dari: perancangan fungsional sistem kendali, perancangan struktural sistem kendali, perakitan *hardware*, perakitan alat penyangrai dengan sistem kendali, uji fungsional dan uji kinerja serta analisis data dari alat penyangrai kopi dengan sistem kendali *Fuzzy Logic*.