

SKRIPSI

**PENERAPAN SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC* METODE
SUGENO PADA REAKTOR *OHMIC***

Disusun dan diajukan oleh

Krisharyadi Paotonan

G411 16 301



**DEPARTEMEN TEKNOLOGI PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

**PENERAPAN SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC* METODE
SUGENO PADA REAKTOR *OHMIC***

**Krisharyadi Paotonan
G411 16 301**



Skripsi Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana
Teknologi Pertanian
Pada
Departemen Teknologi Pertanian
Fakultas Pertanian
Universitas Hasanuddin

**DEPARTEMEN TEKNOLOGI PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PENERAPAN SISTEM KENDALI *FUZZY LOGIC* METODE SUGENO PADA REAKTOR *OHMIC*

Disusun dan diajukan oleh

KRISHARYADI PAOTONAN
G411 16 301

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Keteknikan Pertanian Fakultas
Pertanian Universitas Hasanuddin
pada tanggal 3 Maret 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Abdul Waris, MT
Nip. 19601101 198903 1 002

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Salemgke, M.Sc
Nip. 19631231 198811 1 005

Ketua Program Studi,



Dr. Ir. Iqbal, S.TP., M.Si
Nip. 19781225 200212 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Krisharyadi Paotonan
NIM : G411 16 301
Program Studi : Keteknikan Pertanian
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa Skripsi dengan judul **Penerapan Sistem Kendali Fuzzy Logic Metode Sugeno pada Reaktor Ohmic** adalah karya saya sendiri dan tidak melanggar hak cipta pihak lain. Apabila dikemudian hari Skripsi karya saya ini terbukti bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain yang saya pergunakan dengan cara melanggar hak cipta pihak lain, maka saya bersedia menerima sanksi.

Makassar, Maret 2021

Menyatakan

Krisharyadi Paotonan

ABSTRAK

KRISHARYADI PAOTONAN (G411 16 301). Penerapan Sistem Kendali *Fuzzy Logic* Metode Sugeno pada Reaktor *Ohmic* di bawah bimbingan: ABDUL WARIS dan SALENGKE.

Latar Belakang Salah satu teknologi yang dapat diaplikasikan dalam pengolahan hasil pertanian saat ini adalah pemanasan *ohmic*. Pemanasan *ohmic* saat ini, umumnya menerapkan sistem kontrol *on-off* yang masih memiliki nilai *overshoot* suhu relatif besar serta kurang stabil selama proses pemanasan. Untuk mengatasi hal tersebut maka perlu diteliti penerapan sistem kontrol modern seperti sistem kontrol *fuzzy logic* metode sugeno. **Tujuan** Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem kontrol *fuzzy logic* yang diterapkan pada reaktor *ohmic* sehingga proses pemanasan menjadi stabil, *settling time* pendek, *overshoot* suhu serta *error steady state* yang kecil. **Metode** Pada penelitian ini adalah rancang bangun sistem akuisisi data reaktor *ohmic*. Untuk menunjukkan keberhasilan perancangan dilakukan analisa respon dinamis dan statis suhu dan dibandingkan dengan kriteria kontrol sistem secara umum, kemudian dibandingkan dengan kontrol *on-off* dan kontrol *fuzzy expert*. Parameter yang diamati dalam penelitian ini yaitu *overshoot* suhu, *settling time*, *error steady state* dan kestabilan proses pemanasan. **Hasil** Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem kendali *fuzzy logic* metode sugeno memiliki kinerja yang sangat baik dalam mengontrol reaktor *ohmic*, baik dengan menggunakan konsentrasi larutan NaCl rendah maupun konsentrasi larutan NaCl yang tinggi. Hal ini ditunjukkan dari *overshoot* suhu yang kecil, *settling time* singkat, suhu pemanasan yang stabil serta nilai *error steady state* yang masih berada dalam batasan toleransi. Penerapan sistem kontrol *fuzzy sugeno* memiliki konsumsi energi yang lebih kecil dibandingkan dengan kontrol *fuzzy expert*. Selisih konsumsi energi dari sistem kontrol *fuzzy sugeno* dengan kontrol *fuzzy expert* pada konsentrasi larutan NaCl 1%, 2%, 3% dan 4% masing-masing sebesar 10%, 2%, 12% dan 9%.

Kata kunci : *Fuzzy Logic*, Pemanasan *Ohmic* dan Suhu

ABSTRACT

KRISHARYADI PAOTONAN (G411 16 301). Application of Fuzzy Logic Control System Sugeno Method in Ohmic Reactor. Supervised by: ABDUL WARIS and SALENGKE

Background One of technologies that can be applied in the processing agricultural products today is ohmic heating. Currently, the ohmic heating generally implementing the on-off control system that still has a relatively large temperature overshoot value, as well as less stable during the heating process. To overcome about this, it is necessary to research the application of modern control systems such as fuzzy logic control system sugeno method. **Aims** of this research is expected to produce a fuzzy logic control system applied to ohmic reactor, so that the heating process becomes stable, shorter settling time, temperature overshoot and steady state error are small. **The method** in this research is a design of ohmic reactor data acquisition system. To demonstrate the success of the design is carry out dynamic response analysis, static temperature and compared with the criteria of system control in general, then compared with an on-off control and fuzzy expert control. Parameter that observed in this study are temperature overshoot, settling time, steady state error and stability of heating process. **The result** of this study showed that the control system of fuzzy logic sugeno method had excellent performance in controlling ohmic reactors, both by using low concentrations of NaCl solution and high concentrations of NaCl solution. This is shown from a small temperature overshoot, shorter settling time, stable heating temperature and steady state error value which is still within the tolerance limit. The application of fuzzy sugeno control system had a smaller energy consumption compared to fuzzy expert pulleys. The difference in energy consumption from fuzzy sugeno control system with fuzzy expert control at nacl solution concentrations of 1%, 2%, 3% and 4% respectively by 10%, 2%, 12% and 9%.

Keywords : Fuzzy Logic, Ohmic Heating and Temperature

PERSANTUNAN

Puji syukur kepada Yesus Kristus atas segala berkat, kasih dan penyertaan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **Penerapan Sistem Kendali Fuzzy Logic Metode Sugeno pada Reaktor Ohmic**. Selama penelitian maupun penulisan dan penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, baik dalam bentuk dukungan moril, materi, bantuan maupun bimbingan. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. **Dr. Ir. Abdul Waris, MT** dan **Prof. Dr. Ir. Salengke, M.Sc** sebagai dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, saran, kritikan, petunjuk, motivasi dan segala arahan yang telah diberikan dari penyusunan proposal, pelaksanaan penelitian hingga penyusunan skripsi ini selesai.
2. Ayahanda **Lallo**, Ibunda **Ludiana**, dan Kakak terkasih **Nikson Sejuklin Imbran** yang senantiasa mendukung dalam doa, memberikan bantuan dana dan motivasi.
3. **Ayla Ainayyah M** dan **Suleha** yang telah banyak memberi masukan dan bantuan dalam proses pelaksanaan penelitian dan pembuatan skripsi ini.
4. **Alan Fernanda G., Christaldo W., Burhan, Suryadi, Andi Aenul Y., Muh. Asyraf M., Muh. Ra'yamsyah, Liviana R.** dan **Sitti Aisyah** yang telah banyak membantu selama penelitian ini berlangsung.

Semoga bantuan yang telah diberikan oleh semua pihak kepada penulis mendapatkan balasan dari Tuhan Yesus dan semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat untuk semuanya. Amin.

Makassar, Maret 2021

Krisharyadi Paotonan

RIWAYAT HIDUP



Krisharyadi Paotonan, lahir di Mamasa pada tanggal 15 November 1998 merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan bapak Lallo dan ibu Ludiana. Jenjang pendidikan formal yang pernah dilalui adalah:

1. Menempuh pendidikan formal pertama pada jenjang sekolah dasar di SDN 005 Tondok Salu pada tahun 2004-2010.
2. Melanjutkan pendidikan pada jenjang sekolah menengah pertama di SMPS Katolik Messawa pada tahun 2010-2013.
3. Melanjutkan pendidikan pada jenjang sekolah menengah atas di SMA Negeri 3 Polewali pada tahun 2013-2016.
4. Melanjutkan pendidikan di Universitas Hasanuddin, Fakultas Pertanian, Departemen Teknologi Pertanian, Program Studi Keteknikan Pertanian pada tahun 2016-2021.

Selama menjalani perkuliahan penulis aktif dalam bidang akademik ditunjukkan dengan mengikuti berbagai seminar dan menjadi asisten laboratorium pada mata kuliah Teknik Instrumentasi, Ilmu Ukur Wilayah dan Tenaga Pertanian di bawah naungan *Agricultural Engineering Study Club* (AESC). Selain itu penulis juga tergabung dalam organisasi kampus sebagai anggota di Himpunan Mahasiswa Teknologi Pertanian Universitas Hasanuddin (HIMATEPA UH) dan menjadi pengurus di Persekutuan Mahasiswa Kristen Fakultas Pertanian Dan Fakultas Kehutanan Universitas Hasanuddin (PMK Fapertahut Unhas) selama 2 periode yaitu periode 2018/2019 dan periode 2019/2020.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iv
PERSANTUNAN	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan dan Kegunaan	2
1.4 Batasan Masalah	2
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Pemanasan <i>Ohmic</i>	3
2.2 Pengolahan Bahan Pangan dengan Sistem <i>Ohmic</i>	5
2.3 Konduktivitas Listrik.....	5
2.4 Sistem Kontrol	6
2.5 Komponen Sistem Kontrol.....	7
2.6 Sistem Kontrol <i>Fuzzy Logic</i>	12
3. METODE PENELITIAN	15
3.1 Waktu dan Tempat.....	15
3.2 Alat dan Bahan.....	15
3.3 Prosedur Penelitian	15
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	21
4.1 <i>Gain</i> Sistem.....	21
4.2 Respon <i>Transient</i> Suhu Larutan.....	22
4.3 Respon <i>Steady State</i> Suhu Larutan	24
4.4 Penggunaan Energi	26
5. PENUTUP.....	30

5.1 Kesimpulan	30
DAFTAR PUSTAKA	31
LAMPIRAN	33

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1	Matriks <i>error</i> dan <i>delta error</i>	18
Tabel 4-1	Energi yang Digunakan Selama Proses Pemansan <i>Ohmic</i>	25

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Sistem Kontrol Lup Tertutup (<i>Close Loop</i>).....	7
Gambar 2-2	<i>Op-Amp</i> Sebagai Komparator.....	7
Gambar 2-3	Skema Mikrokontroler Atmega 32.....	8
Gambar 2-4	Konfigurasi Pin Arduino Uno	9
Gambar 2-5	<i>Solid State Relay</i> dan Simbol Rangkaiannya.....	10
Gambar 2-6	Sistem Kendali <i>Fuzzy Logic</i>	12
Gambar 2-7	Fuzzifikasi <i>Error</i>	13
Gambar 3-1	Bagan Alir Penelitian	15
Gambar 3-2	Gambaran Umum Sistem	16
Gambar 3-3	Tahapan Perancangan <i>Software</i>	17
Gambar 3-4	Matriks <i>Error</i> dan <i>Delta Error</i>	18
Gambar 4-1	<i>Gain</i> Sistem untuk Setiap Konsentrasi Larutan NaCl.....	21
Gambar 4-2	Respon <i>transient</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 1%.....	22
Gambar 4-3	Respon <i>transient</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 2%.....	22
Gambar 4-4	Respon <i>transient</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 3%.....	22
Gambar 4-5	Respon <i>transient</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 4%.....	23
Gambar 4-6	Respon <i>steady state</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 1%	24
Gambar 4-7	Respon <i>steady state</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 2%	24
Gambar 4-8	Respon <i>steady state</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 3%	25
Gambar 4-9	Respon <i>steady state</i> suhu larutan NaCl pada konsentrasi 4%	25
Gambar 4-10	Hubungan suhu dan daya terhadap waktu pada konsentrasi NaCl 1%	27
Gambar 4-11	Hubungan suhu dan daya terhadap waktu pada konsentrasi NaCl 2%	27
Gambar 4-12	Hubungan suhu dan daya terhadap waktu pada konsentrasi NaCl 3%	28
Gambar 4-13	Hubungan suhu dan daya terhadap waktu pada konsentrasi NaCl 4%	28

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Penelitian.....	33
Lampiran 2	Daya Listrik yang Digunakan Pada Setiap Sistem Kendali	37
Lampiran 3	Rangkaian Sistem	42
Lampiran 4	Dokumentasi.....	42

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai negara agraris, tentu saja Indonesia mengandalkan sektor pertanian sebagai bidang yang berperan dalam menopang keberlangsungan negara. Sektor pertanian memiliki peran penting bagi perekonomian nasional serta menjadi sumber penting bagi bidang-bidang lainnya. Berkaitan dengan potensi tersebut, kita diperhadapkan pada peran penting untuk melakukan pengolahan pangan yang efektif sehingga hasil pertanian yang dimiliki dapat dimanfaatkan dengan optimal. Optimalisasi pengelolaan hasil pertanian tentu membicarakan tahapan pasca panen yang dilakukan. Tahapan ini menentukan langkah selanjutnya untuk pemanfaatan suatu produk hasil pertanian. Dalam hal ini, produk pertanian perlu untuk diproses lebih lanjut sehingga dapat dimanfaatkan, baik untuk dikonsumsi secara langsung ataupun sebagai bahan untuk proses selanjutnya.

Salah satu teknologi yang dapat diaplikasikan dalam pengolahan bahan pangan hasil pertanian adalah *ohmic heating*. Teknologi ini pada dasarnya merupakan salah satu teknik dalam memanaskan bahan pangan. Bahan pangan tersebut dipanaskan dengan memanfaatkan arus listrik bolak-balik (AC) yang dialirkan pada bahan pangan yang berfungsi sebagai hambatan listrik sehingga menimbulkan panas dalam bahan pangan. Panas yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan peningkatan kualitas dari bahan yang dimaksudkan (Wahyuni dkk., 2018).

Saat ini, penerapan *ohmic heating* untuk melakukan pemanasan terkontrol pada bahan pangan masih menggunakan teknologi pengontrol *on-off* atau PID. Selama proses pemanasan (untuk ekstraksi ataupun fermentasi) dengan *ohmic* diharapkan nilai *overshoot* suhu yang kecil serta suhu pemanasan yang stabil. Namun pengontrol *on-off* yang ada saat ini menunjukkan hasil dengan *overshoot* suhu yang besar serta kurang stabil selama proses pemanasan. Untuk mengatasi kekurangan tersebut maka dirancang sistem kontrol berbasis *fuzzy logic*. Penerapan sistem kendali *fuzzy logic* juga diharapkan dapat bekerja dengan baik pada bahan dengan konduktivitas listrik rendah maupun konduktivitas listrik tinggi.

Fuzzy logic merupakan metode yang dapat menyelesaikan suatu masalah nonlinier, memformulasikan masalah dengan mudah dengan tingkat presisi yang tinggi untuk memberikan solusi yang akurat. Dalam penelitian ini, sistem kontrol yang diterapkan adalah *fuzzy logic* metode sugeno. Dari sistem yang dibangun

diharapkan mampu menjaga kestabilan proses pemanasan *ohmic* dengan mencegah terjadinya *overshoot* suhu lebih dari 5% dan mampu mempertahankan suhu pemanasan pada nilai *setting* yang diberikan (Sudarno dkk., 2020).

Berdasarkan penjelasan di atas, maka dilakukan penelitian mengenai penerapan *fuzzy logic* metode sugeno pada *ohmic heater* untuk memperoleh proses pemanasan yang efektif.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana penerapan sistem kendali *fuzzy logic* pada *ohmic heater*?
2. Bagaimana kaidah yang digunakan untuk mengendalikan reaktor *ohmic*?
3. Bagaimana kinerja dari *ohmic heater* yang terkontrol *fuzzy logic*?

1.3 Tujuan dan Kegunaan

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan sistem kontrol *fuzzy logic* metode Sugeno pada reaktor *ohmic*. Pengontrolan berbasis *fuzzy logic* diharapkan dapat memberikan kinerja sistem yang stabil, *settling time* pendek, *overshoot* suhu serta *error steady state* yang kecil.

Kegunaan dari penelitian ini adalah sebagai alternatif pilihan dalam proses pemanasan dengan *ohmic heater* terkontrol. Penelitian ini juga dapat dijadikan sebagai model dalam penerapan sistem *fuzzy logic* alat pengolahan hasil pertanian.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Menggunakan larutan NaCl dengan konsentrasi 1%, 2%, 3% dan 4% sebagai sampel bahan.
2. Menggunakan model inferensi sugeno dengan 5 *member function*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pemanasan *Ohmic*

Pemanasan *ohmic* pada prinsipnya adalah proses perubahan energi listrik menjadi energi panas, perubahan ini berlangsung pada suatu konduktor listrik. Pemanasan yang terjadi didasarkan pada aliran arus listrik bolak-balik (AC) yang dialirkan melalui bahan pangan, sehingga bahan akan bertindak sebagai hambatan listrik yang nantinya akan mengalami perubahan suhu atau mengalami pemanasan. Peningkatan suhu yang terjadi pada bahan saat pemanasan *ohmic* berlangsung akan terjadi secara merata dan berjalan relatif cepat dikarenakan bahan tersebutlah yang menjadi tahanan listriknya (Kumar, 2018).

Setiap bahan pangan akan selalu mengandung muatan elektron dan proton dalam komposisi yang seimbang atau dikenal sebagai sifat elektro-kimia bahan pangan. Aliran listrik akan melalui bahan tersebut bila terjadi beda potensial dalam bahan. Untuk mengoptimalkan pemanasan *ohmic* yang terjadi maka sangat penting untuk memahami karakteristik elektro-kimia yang dimiliki oleh setiap bahan hasil pertanian yang akan diolah (Kumar, 2018).

Menurut Darvishi *et al.* (2012), bahwa konsep dasar dari proses pemanasan *ohmic* yang terjadi menggunakan hukum Ohm, yang menyatakan bahwa besar dari arus listrik yang mengalir melalui sebuah penghantar atau konduktor akan berbanding lurus dengan beda potensial atau tegangan yang diterapkan kepadanya dan berbanding terbalik dengan hambatannya. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V = R.I \quad (1)$$

Keterangan:

V = tegangan (Volt),

R = tahanan (Ohm) dan

I = arus (Ampere).

Dalam pengaplikasian pemanasan *ohmic*, tegangan AC akan diterapkan pada elektroda pada kedua ujung badan produk. Laju pemanasan *ohmic* tergantung pada gradien tegangan yang diaplikasikan serta besarnya konduktivitas listrik dari bahan itu sendiri. Apabila gradien tegangan ditingkatkan, maka panas yang diperoleh juga akan meningkat per satuan waktu, hal ini secara langsung akan berdampak pada lama

pemanasan untuk mencapai suhu *set point* menjadi lebih singkat. Untuk memperoleh pemanasan yang proporsional dapat dilakukan dengan membuat variasi besaran kuat medan listrik (dengan mengatur jarak antara setiap elektroda) dan jumlah kuat arus yang diberikan (Wongsa-Ngasri, 2004).

Penerapan pemanasan *ohmic* digambarkan dengan mengalirkan arus listrik melalui bahan secara simultan sehingga akan terjadi pembangkitan panas dalam bahan karena dipengaruhi adanya tahanan listrik yang dimiliki oleh produk tersebut. Jumlah panas yang dapat dibangkitkan dalam produk sangat bergantung pada kerapatan arus yang timbul sebagai pengaruh dari besarnya konduktivitas listrik dengan medan listrik yang diperoleh pada bahan yang sedang dipanasi dengan menggunakan metode *ohmic* (Sofi'i dan Sumardi., 2017).

Sistem pemanasan yang dibangun melalui pemanasan *ohmic* memiliki keunggulan dibandingkan dengan sistem pemanasan lain. Dengan metode pemanasan *ohmic* panas internal yang dibangkitkan pada bahan lebih merata dan seragam dalam waktu yang relatif singkat. Terlebih bahwa metode ini dapat diaplikasikan pada berbagai bentuk bahan, seperti bahan berbentuk cair, semi padat maupun bahan berbentuk padatan. Hal ini akan berbeda dengan pemanasan yang dilakukan dengan cara konvensional yang memerlukan waktu lama untuk terjadinya penetrasi panas ke bagian pusat bahan (Evrendilek *et al.*, 2011).

Salah satu karakteristik yang dapat diamati dari proses pemanasan *ohmic* adalah dengan penggunaan arus yang sangat besar. Arus yang masuk sesuai dengan besarnya tahanan beban yang digunakan dalam hal ini adalah bahan pangan yang menjadi tahanan listrik. Sehingga dalam pengaplikasian sistem kontrol tidak digunakan PWM 255 untuk menghindari penyerapan arus yang terlalu besar. Berdasarkan Sudarno dkk. (2020), bahwa PWM digunakan untuk melakukan manipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dalam suatu perioda untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda, dalam mengendalikan motor (atau perangkat elektronik lainnya yang membutuhkan arus besar) yang menggunakan prinsip *cut-off*. PWM bekerja sebagai *switching power supply* untuk mengontrol *on* dan *off*. PWM digunakan untuk mereduksi daya yang melewati motor sehingga mencegah konsumsi daya yang berlebih.

2.2 Pengolahan Bahan Pangan dengan Sistem *Ohmic*

Menurut Varghese *et al.* (2014), bahwa pengolahan bahan pangan dengan sistem *ohmic* memiliki 3 tujuan utama, yakni membunuh bakteri patogen melalui proses pasteurisasi, menjaga kualitas produk tanpa kehilangan atau penurunan nyata pada *flavor*, bentuk, kandungan fisik dan nutrisi dan mengendalikan secara selektif pertumbuhan organisme yang menghasilkan produk yang tidak dikehendaki. Penerapan sistem *ohmic* pada pengolahan pangan, memiliki kelebihan karena memanfaatkan kemampuan internal bahan untuk membangkitkan energi internal. Sehingga sistem ini menjadi proses yang tepat untuk pengolahan pangan yang padat ataupun pasta dengan memberikan pemanasan yang merata pada bahan.

Energi internal yang dapat dibangkitkan dalam suatu bahan sangat tergantung pada komposisi penyusun bahan itu sendiri, seperti kandungan air, struktur mikro, kandungan komponen ionik dan elektrolitik. Komposisi ini akan berbeda untuk setiap bahan pangan sehingga setiap bahan pangan akan memiliki konduktivitas listrik yang bervariasi. Keberadaan komponen ionik seperti asam dan garam akan meningkatkan nilai konduktivitas, sedangkan keberadaan komponen non-polar seperti lemak dapat menurunkan nilai konduktivitas (Varghese *et al.*, 2014).

Dalam pengolahan bahan pangan dengan sistem *ohmic* dibutuhkan kemampuan bahan untuk menghantarkan listrik, baik yang diperoleh secara alami dari kandungan bahan maupun melalui penambahan garam pada saat pengolahan. Seperti yang diterapkan oleh Yongsawatdigul *et al.* (1996), Wu *et al.* (1998) dan Park *et al.* (2017) dalam penelitiannya. Mereka menambahkan NaCl pada bahan dengan konsentrasi yang bervariasi (1%, 2%, 3% dan 4%). Hal ini sesuai dengan Marcotte *and* Trigui (2000), yang menyatakan bahwa penambahan garam dengan konsentrasi yang bervariasi pada saat pemanasan *ohmic* dilakukan untuk menambah konduktivitas listrik bahan sehingga dapat diperoleh formula pengolahan yang efektif.

2.3 Konduktivitas Listrik

Konduktivitas listrik merupakan indikator dari kemampuan suatu bahan untuk mengantarkan arus listrik. Konduktivitas listrik dinyatakan dalam satuan Siemens per meter (S/m). Aktivitas elektron yang terkandung dalam suatu bahan yang membangkitkan arus listrik, yang disebut sebagai konduksi listrik. Dalam hal ini dengan pemanfaatan medan listrik, maka gaya yang diberikan pada gerak partikel bermuatan akan menghasilkan arus listrik (Sastry, 2009).

Komposisi kimia suatu bahan akan sangat mempengaruhi nilai konduktivitas dari bahan tersebut. Dalam tinjauan proses pemanasan *ohmic*, konduktivitas listrik merupakan ukuran dari isi ion yang dimiliki. Karena hal tersebut, maka konduktivitas listrik sangat tergantung pada konsentrasi ion pada bahan. Inilah yang menjadi acuan apabila dikehendaki perubahan konduktivitas dengan melakukan penambahan garam pada sampel (Sofi'i dan Sumardi., 2017).

Selain dari pada konsentrasi ion suatu bahan, konduktivitas listrik juga sangat dipengaruhi oleh suhu pada saat dilakukan pengolahan. Selama proses pemanasan berlangsung, suhu dalam bahan juga akan meningkat. Seiring dengan peningkatan suhu tersebut, maka konduktivitas listrik juga akan meningkat. Untuk mencapai pemanasan yang efektif maka sangat perlu untuk melakukan menjaga suhu saat pemanasan berlangsung (Darvishi *et al.*, 2013).

Menurut Darvishi *et al.* (2013), konduktivitas listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$\sigma = \frac{I L}{V A} \quad (2)$$

Keterangan:

σ = konduktivitas listrik (S/m),

I = kuat arus listrik (Ampere),

V = tegangan listrik (Volt),

L = jarak unit (m) dan

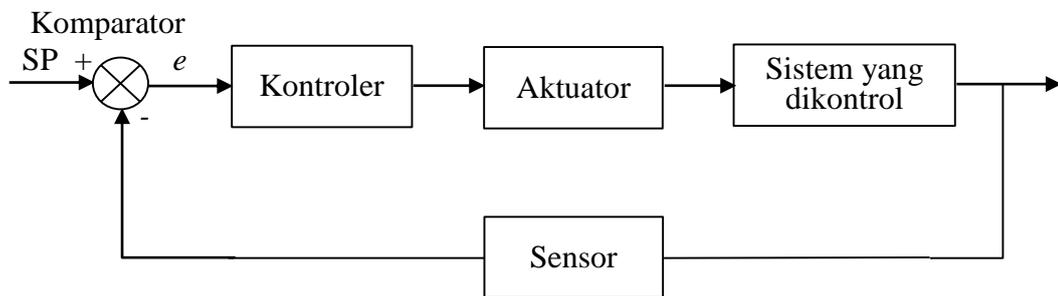
A = luas penampang (m²).

2.4 Sistem Kontrol

Sistem kontrol adalah suatu sistem yang keluaran sistemnya dikendalikan pada suatu nilai tertentu atau untuk mengubah beberapa ketentuan yang telah ditetapkan oleh masukan ke sistem. Dalam aplikasinya, suatu sistem kontrol harus memiliki sasaran tertentu. Sasaran yang dimaksud adalah pengaturan keluaran dalam suatu kondisi yang ditetapkan pada masukan dari elemen sistem kontrol (Laksono dkk., 2011).

Secara umum sistem kendali dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu sistem kendali terbuka (*open loop*) dan sistem kendali tertutup (*close loop*). Sistem kendali tertutup merupakan sebuah sistem dengan nilai keluarannya memberi pengaruh langsung terhadap aksi pengendalian yang dilakukan. Pada rangkaian *loop* tertutup sinyal *error* yang merupakan selisih antara sinyal masukan dengan sinyal umpan balik, lalu diumpankan pada komponen pengendali. Umpan balik ini dilakukan untuk

memperbaiki nilai *output* sistem agar nilai yang diperoleh semakin mendekati nilai yang diinginkan (Laksono dkk., 2011).

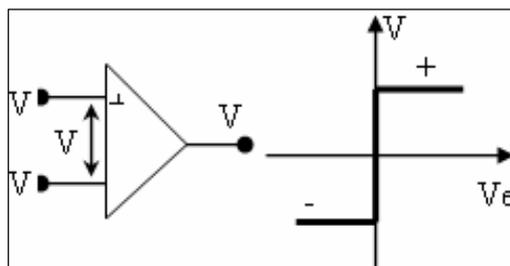


Gambar 2-1. Sistem kontrol lup tertutup (*close loop*).

2.5 Komponen Sistem Kontrol

a. Komparator

Komparator adalah rangkaian yang berfungsi membandingkan tegangan masukan dengan tegangan referensi dengan besarnya *output* tergantung dari selisih dari masukan. Kesalahan sedikit (perbedaan kedua masukan) yang terjadi akan menimbulkan ayunan *output* yang maksimal akibat penguatan dari *op-amp*. Jika tegangan masukan lebih besar dari tegangan referensi maka tegangan *output* menuju harga positif maksimum. Jika sebaliknya, tegangan masukan lebih kecil dari tegangan referensi, maka tegangan *output* berayun menuju ke harga negatif maksimum (Jaya, 2016).



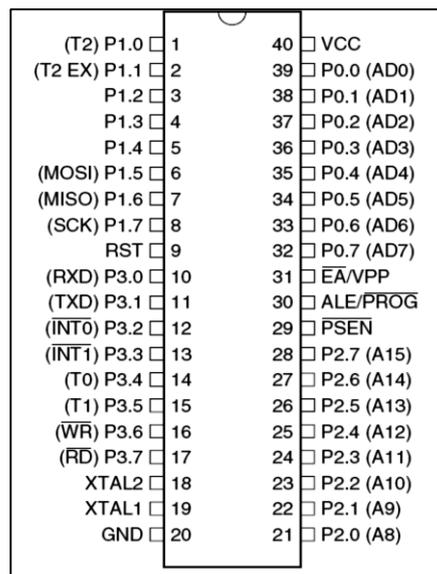
Gambar 2-2. *Op-amp* sebagai komparator.

b. Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah sistem komputer yang seluruh atau sebagian besar elemennya dikemas dalam satu chip IC, sehingga sering disebut *single chip microcomputer*. Mikrokontroler merupakan sistem komputer yang mempunyai satu atau beberapa tugas yang sangat spesifik (Fatoni dkk., 2015).

Elemen mikrokontroler tersebut diantaranya adalah prosesor, memori serta *input* dan *output*. Pada prinsipnya *microcontroller* ini memiliki beberapa *chip*

yang digabungkan dalam satu papan rangkaian. Perangkat ini sangat ideal untuk mengerjakan sesuatu yang bersifat khusus, sehingga aplikasi yang diisikan ke dalam komputer ini adalah aplikasi yang bersifat spesifik. Keuntungan tersendiri dari penggunaan mikrokontroler yaitu mempunyai ruang alamat tersendiri yang disebut memori. Memori dalam mikrokontroler terdiri atas memori program dan memori data dimana keduanya terpisah, yang dapat mengakses data memori dan pengalamatan 8 bit, sehingga dapat langsung disimpan dan dimanipulasi oleh mikrokontroler dengan kapasitas akses 8 bit (Fatoni dkk., 2015).



Gambar 2-3. Skema mikrokontroler Atmega 32.

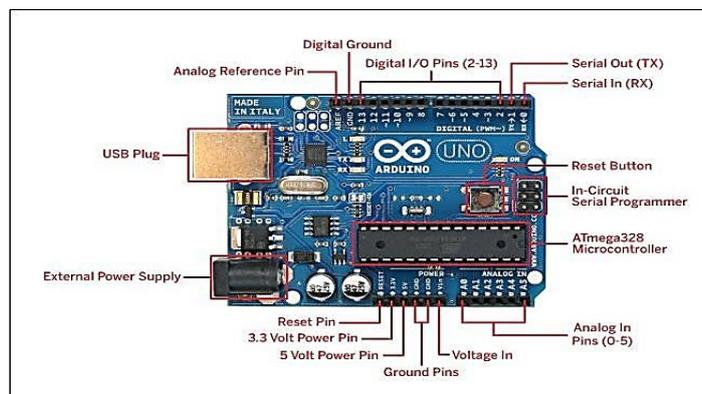
Menurut Fatoni dkk., (2015), bahwa secara umum mikrokontroler memiliki pin dengan fungsi sebagai berikut:

1. Pin yang berfungsi sebagai masukan catu daya (VCC).
2. Pin Ground (GND).
3. Port A, B, C dan D
 - a. Port A berfungsi khusus sebagai masukan ADC (*Analog Digital Converter*).
 - b. Port B berfungsi khusus sebagai *timer* atau *counter*, komparator analog dan SPI (*Serial Peripheral Interface*). Timer dibutuhkan sebagai pewaktu pada saat program tersebut dijalankan. Sedangkan SPI berfungsi dalam pengiriman data dari termokopel nantinya.
 - c. Port C berfungsi khusus sebagai komparator analog dan *timer oscillator*.

d. *Port D* berfungsi khusus sebagai komparator analog, *interrupt external* serta komunikasi serial. Biasanya juga *port D* (OC1A dan OC1B) dilengkapi dengan keluaran PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk mendapatkan sebuah tegangan keluaran yang bervariasi sebagai nilai rata-rata dari gelombang tersebut.

4. Pin yang digunakan untuk melakukan *reset* mikrokontroler (RESET).
5. Pin masukan *clock eksternal* (XTAL1 dan XTAL2).
6. Pin masukan tegangan untuk ADC (AVCC) dan
7. Pin masukan tegangan referensi ADC (AREFF).

Salah satu jenis mikrokontroler yang umum digunakan dalam sistem pengontrolan adalah Arduino Uno R3. Arduino ini merupakan papan sirkuit mikrokontroler yang berbasis chip ATmega328P. Disebut juga sebagai *development board* karena papan ini berfungsi sebagai arena *prototyping* sirkuit mikrokontroler. Dengan menggunakan *board* arduino, akan memudahkan untuk membuat rangkaian elektronika berbasis mikrokontroler dibandingkan jika merakit ATmega328 dari awal. Arduino uno terdiri atas 14 pin *input* dan *output*, 6 pin diantaranya dapat digunakan sebagai *output* PWM, 6 pin *input* analog, menggunakan crystal 16 MHz, koneksi USB, jack listrik, header ICSP dan tombol reset. Fasilitas tersebut merupakan hal yang diperlukan untuk mendukung sebuah rangkaian mikrokontroler. Arduino juga dilengkapi dengan *software* Arduino IDE, sebagai *software* yang membantu untuk memasukkan (*upload*) program ke *chip* ATmega328 dengan mudah (Ramdhoni dkk., 2018).



Gambar 2-4. Konfigurasi pin arduino uno.

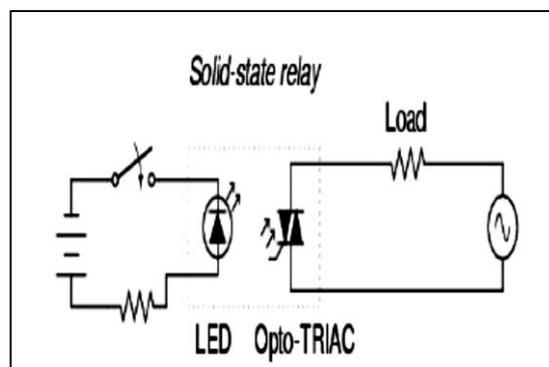
c. Aktuator

Aktuator adalah suatu peralatan atau kumpulan komponen yang berfungsi untuk menggerakkan *plant*, sehingga sering juga disebut sebagai penggerak. Jaya (2016), menjelaskan bahwa dalam konsep kelistrikan aktuator dapat dimaknai sebagai setiap alat yang dapat mengubah sinyal listrik menjadi sebuah gerakan mekanis.

Salah satu jenis aktuator yang dapat digunakan dalam pengontrolan suhu adalah *Solid State Relay* (SSR). Menurut Kustiawan (2018), bahwa perangkat SSR menawarkan *output device* semikonduktor modern menggunakan SCR, TRIAC, atau *output transistor* sebagai pengganti saklar kontak mekanik. SSR dibangun dengan isolator untuk memisahkan bagian input dan bagian sakelar.

Berdasarkan tujuan khusus desain SSR, maka SSR dapat dibedakan dengan input AC dan DC. Pada jenis AC ini beroperasi di sirkuit energi yang sama seperti yang digunakan untuk rangkaian beban, memicu TRIAC (atau *back-to-back* terhubung SCR's). Tipe ini juga memiliki input saklar penutup namun untuk kebanyakan aplikasi kurang efektif karena tidak memiliki isolasi antara rangkaian kontrol dan beban. SSR AC ini memiliki karakteristik *input* dengan *range* tegangan 80-250 VAC, arus 10-75A dan tegangan *output* adalah 24-380 VAC (Kustiawan, 2018).

SSR Input DC beroperasi di sirkuit yang sama energi dengan daya DC baris seperti yang digunakan untuk rangkaian beban yang mengontrol konduksi transistor. Jenis SSR DC ini memiliki dapat diidentifikasi dengan *range* tegangan *input* 4-32 VAC, arus 10-75 A dan tegangan *output* adalah 24-380 VAC (Kustiawan, 2018).



Gambar 2-5. *Solid State Relay* dan simbol rangkaiannya.

Untuk menghitung nilai SSR dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$I = \frac{P}{V} \quad (3)$$

Keterangan:

I = Arus (A),

P = Daya beban (Watt) dan

V = Tegangan kerja (V).

d. Sensor Termokopel

Sensor digunakan untuk mengukur keluaran sistem dan menyetarakannya dengan sinyal masukan sehingga bisa dilakukan suatu operasi hitung antara keluaran dan masukan. Pada penelitian ini sensor yang digunakan adalah termokopel sebagai sensor suhu. Termokopel adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur suhu melalui dua jenis logam konduktor yang berbeda materialnya kemudian ujungnya digabungkan sehingga akan menimbulkan efek termoelektrik. Efek termoelektrik terjadi apabila sebuah logam konduktor yang diberi perbedaan panas secara *gradient* akan menghasilkan tegangan listrik. Perbedaan tegangan listrik diantara dua *junction* ini dinamakan dengan efek *seebeck*. Efek *seebeck* menyatakan bahwa arus yang sangat kecil akan mengalir melalui sebuah rangkaian konduktor yang memiliki perbedaan temperatur. Hal ini disebut sebagai efek termoelektrik. *Output* tegangan akan muncul akibat adanya perbedaan temperatur antara ujung-ujung dua material yang berbeda (Firdaus dkk., 2016).

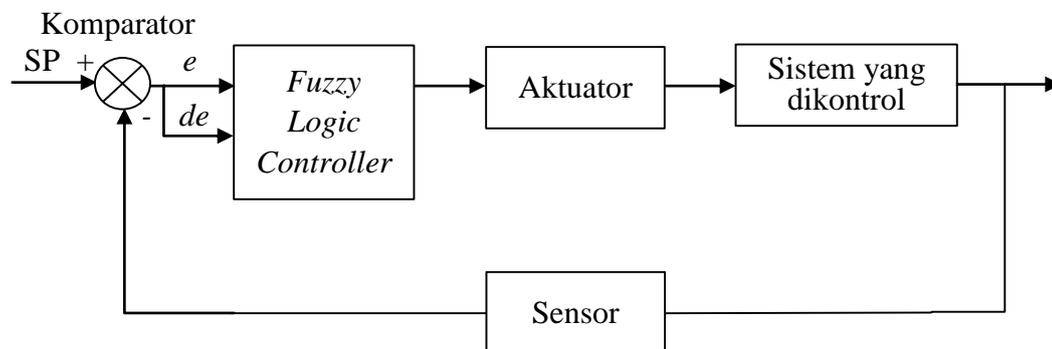
Untuk memperoleh data termokopel diperlukan pengkondisi (*converter*) tipe MAX 6675. *Converter* berfungsi sebagai pengganti *cold junction* dan pendigitalan sinyal dari *thermocouple*. Data yang diberikan adalah *output* dalam resolusi 12-bit, kompatibel dengan SPI dan hanya format *read only*. *Converter* ini mampu membaca suhu sampai 0.25°C dan memungkinkan pembacaan suhu tinggi sampai +1024°C, dengan akurasi *thermocouple* 8 LBS untuk suhu mulai dari 0°C hingga +700°C. MAX 6675 merupakan *thermocouple digital converter* canggih, dengan *built in* 12 bit *analog* ke *digital* (ADC). MAX 6675 juga merupakan *coldjunction compensation sensing, digital controller, SPI-compatible interface* dan *control logic*. MAX6675 dapat dengan mudah dikoneksikan ke mikrokontroler atau *minsys* lainnya menggunakan komunikasi SPI (Firdaus dkk., 2016).

2.6 Sistem Kontrol Fuzzy Logic

Logika *fuzzy* adalah bentuk pengembangan dari logika klasik, sehingga dengan logika tersebut juga akan diterapkan pada bentuk himpunan yang dibangun. Pada umumnya bahwa logika klasik hanya menyediakan 2 opsi nilai keputusan, yaitu benar atau salah. Tetapi pada logika *fuzzy* berlaku hal yang berbeda dengan logika klasik, nilai kebenaran yang dapat diperoleh memiliki derajat tertentu (Yanto, 2017).

Kendali logika *fuzzy* merupakan sebuah skema sistem kendali yang menggunakan konsep teori himpunan *fuzzy* dalam perancangannya. Terdapat tiga tahapan dalam kontrol *fuzzy logic*, yaitu fuzzifikasi, mekanisme inferensi dan defuzzifikasi. Fuzzifikasi merupakan tahap awal yang bekerja dengan cara mengubah nilai tegas (*crisp*) dari suatu variabel menjadi nilai *fuzzy*. Nilai yang telah berbentuk *fuzzy* ini selanjutnya digunakan sebagai masukan dari mekanisme inferensi. Pada tahap ini, akan dilakukan pengambilan keputusan dari masukan yang ada berdasarkan basis aturan logika yang dirancang. Terakhir, nilai keluaran dari mekanisme inferensi yang berbentuk *fuzzy* selanjutnya diubah kembali kedalam bentuk tegas melalui proses defuzzifikasi (Wahab dkk., 2017).

Sistem kendali *fuzzy logic* ditampilkan sebagai berikut:



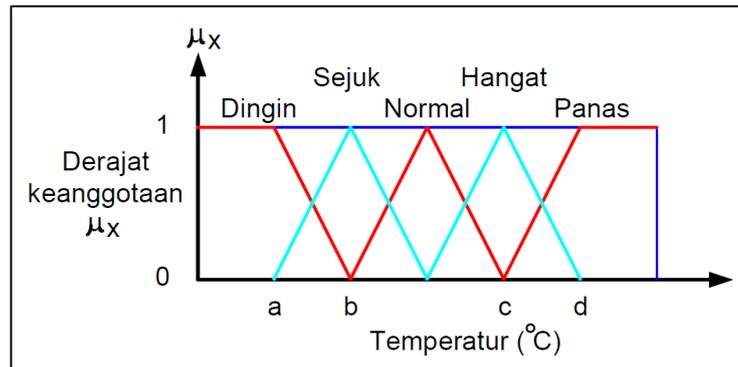
Gambar 2-6. Sistem kendali *fuzzy logic*. (Yanto, 2017).

a. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses yang digunakan untuk mengubah masukan tegas atau nyata (*crisp input*) yang bersifat bukan *fuzzy* ke dalam himpunan *fuzzy* menjadi nilai *fuzzy* dari beberapa *variabel linguistik* masukan yang telah didefinisikan, hasil pengubahan data ini dinamakan masukan *fuzzy*. Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami proses fuzzifikasi seperti label, *range* dan derajat keanggotaan. Label merupakan penjelasan *linguistik* mengenai penamaan suatu grup yang mewakili kondisi tertentu. *Range*

merupakan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy* yang dibuat. Sedangkan derajat keanggotaan menunjukkan nilai dari setiap anggota yang dimiliki oleh suatu himpunan *fuzzy* (Romadhan dkk., 2014).

Metode fuzzifikasi bertujuan untuk menentukan *member* dan membuat beberapa *member*, dalam hal ini adalah *member* segitiga yang kemudian dibuat bertumpuk sesuai dengan gambar berikut.



Gambar 2-7. Fuzzifikasi *error*. (Romadhan dkk., 2014).

b. Sistem Inferensi *Fuzzy* Sugeno

Menurut Kusumadewi (2003), bahwa metode sistem inferensi *fuzzy* sugeno adalah metode untuk aturan inferensi *fuzzy* yang direpresentasikan dalam bentuk JIKA-MAKA dimana hasil keluaran sistem tidak berbentuk himpunan *fuzzy*. Ada dua bentuk metode sugeno, yaitu:

1. Metode Sugeno Orde-Nol

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \cdot \dots \cdot (x_N \text{ is } A_N) \text{ THEN } z = k$$

Pada metode ini, sebab direpresentasikan sebagai proposisi pada himpunan *fuzzy*, sementara akibat direpresentasikan sebagai konstan.

2. Metode Sugeno Orde-Satu

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \cdot \dots \cdot (x_N \text{ is } A_N) \text{ THEN } z = p_1 * x_1 + \dots + p_N * x_N + q$$

Pertama himpunan *fuzzy* ke-*i* adalah sebab, \cdot merupakan operator (Dan atau Atau), p_1 adalah konstan ke-*i* dan q juga konstan dalam akibat. Jika aturan komposisi menggunakan sugeno, maka defuzzifikasi dilakukan dengan mencari nilai rata-ratanya.

Metode yang digunakan dalam menggunakan sistem inferensi *fuzzy* adalah metode Min (Minimum) yang merupakan sebuah solusi himpunan *fuzzy* yang diperoleh dengan mengambil nilai minimum dari aturan, dan

kemudian menggunakan nilai tersebut untuk mengubah daerah *fuzzy* dan mengaplikasikannya menjadi keluaran menggunakan operator And.

$$\mu_{sf}(xi) = \min(\mu_{sf}(xi), \mu_{kf}(xi)) \quad (4)$$

Keterangan:

$\mu_{sf}(xi)$ = solusi nilai keanggotaan fuzzy orde ke-i,

$\mu_{kf}(xi)$ = akibat aturan nilai keanggotaan fuzzy ke-i.

Metode yang digunakan dalam menyusun kaidah pengontrolan umumnya adalah *rule-based knowledge*. Pada metode ini pengetahuan akan direpresentasikan dalam suatu bentuk fakta dan aturan. Bentuk representasi ini terdiri atas *premise* atau alasan dan kesimpulan. Di dalamnya juga dapat dilakukan dengan pendekatan *heuristik* berupa informasi tentang cara untuk memperoleh fakta baru dari fakta yang sudah diketahui (Setiawan dkk., 2018).

c. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses perubahan besaran *fuzzy* yang disajikan dalam himpunan *fuzzy* ke sinyal yang bersifat bukan *fuzzy*. Strategi defuzzifikasi ditujukan untuk menghasilkan suatu aksi kontrol *non fuzzy (crisp output)* yang paling tepat dalam merepresentasikan kemungkinan distribusi aksi kontrol *fuzzy* yang telah dihitung. Untuk proses defuzzifikasi, metode sugeno menggunakan rumus *weight average* untuk mendapatkan nilainya (Laksono dkk, 2011).

$$Z = \frac{\alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_3 z_3 + \dots + \alpha_n z_n}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n} \quad (5)$$

Keterangan:

α_n = nilai predikat aturan ke-n,

z_n = indeks nilai output (konstanta) ke-n dan

n = jumlah aturan yang digunakan.