

Implementasi Kontrol *Fuzzy* Pada Pengaturan Suhu Untuk Alat Pencetakan Daur Ulang *Filament* (*3D Printing*)

Adityo Dwi Prayogo, Bambang Priyadi, Hariyadi Singgih

Abstrak - Informasi tentang hasil dari proses pembuatan *filament* (*3D printing*) di Indonesia masih minim seperti, berapakah suhu optimal titik didih dan titik beku yang diperlukan untuk proses peleburan *filament* dengan metode kontrol *fuzzy* menggunakan *arduino mega*. Pada alat pencetakan *filament* membutuhkan cara yang tepat, agar dapat menghasilkan *filament* yang sempurna. Salah satunya dengan menggunakan metode kontrol *fuzzy* pada pengaturan suhu untuk alat pencetakan *filament* (*3D Printing*), yaitu agar keluaran cetakan *filament* tidak terlalu leleh dan juga tidak terlalu padat. Pengaturan suhu ini dirancang dengan menggunakan beberapa komponen yang terdiri dari: *heater* dengan drivernya, sensor *thermocouple*, dan sistem pengendalian menggunakan *arduino mega* dan kontrol *fuzzy*. Sistem ini berfungsi untuk mengontrol kestabilan suhu yang sesuai dengan titik leleh pada biji plastik. Hal itu dilakukan agar apabila biji plastik dipanaskan dengan suhu diatas *setpoint* akan terjadi hangus dan jika dipanaskan dengan suhu dibawah *setpoint* maka biji plastik tidak akan leleh dengan sempurna. Sistem ini menggunakan sensor *thermocouple* yang akan memberikan informasi ke *arduino mega*, agar menjalankan *heater* untuk mencapai titik leleh yang sesuai. Pengujian dilakukan pada saat proses *molding* berlangsung, *heater* bekerja pada range 180°C – 200°C. Hasil pengujian kontrol logika *fuzzy* mampu menstabilkan suhu yang mencapai *set point* 190°C.

Kata kunci – *heater*, kontrol *fuzzy*, *filament*, *3D printing*

I. PENDAHULUAN

3D printing kini merupakan salah satu teknologi yang berkembang sebagai mesin pembuat produk yang bisa dilakukan dengan mudah, cepat dan mendetail.

Terkait dengan definisinya sendiri, *3D Printing* merupakan sebuah printer dengan kecanggihannya khusus, yaitu mampu mencetak benda yang diinginkan, yang sama persis dengan gambar soft file-nya, dalam bentuk 3D (tidak lagi sebatas mencetak gambar di atas kertas saja). Dikarenakan hasil cetakan bukan berupa gambar atau tulisan di atas kertas, maka printer 3D pun tidak memiliki tinta melainkan, menggunakan *filament*. *Filament* merupakan bahan lain yang menjadi bahan dasar pembuatan produk.

Bahan-bahan yang digunakan adalah tipe plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) yang dicetak dengan cara dilelehkan menggunakan *heater band* sehingga membentuk sebuah *filament*.

Dengan mempertimbangkan kesetabilan suhu dalam peleburan biji plastik menjadi *filament*, maka proses peleburan bisa dikontrol secara otomatis dengan kontrol *fuzzy* untuk mencapai titik lebur yang diharapkan pada proses pencetakan *filament*, yaitu dengan mengatur suhu *heater*.

Dalam perencanaan pembuatan alat pencetakan *filament* (*3D Printing*) khususnya pada proses peleburan maka diperlukan penelitian dan pengembangan tentang pengaturan suhu yang stabil agar lebih efisien. Alat yang dibuat ini menggunakan *heater band* sebagai pemanas dan diatur suhunya. Untuk menjaga kesetabilan produksi sehingga perlu dibuatkan kontrol suhu menggunakan metode *Fuzzy* pada alat pencetakan *filament* (*3D Printing*).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sensor Termokopel Tipe K

Sebuah termokopel terdiri dari dua buah kawat yang kedua ujungnya disambung sehingga menghasilkan suatu *open-circuit voltage* sebagai fungsi dari suhu, diketahui sebagai tegangan termolistrik atau disebut dengan *seebeck voltage*. Hubungan antara tegangan dan pengaruhnya terhadap suhu masing-masing titik pertemuan dua buah kawat adalah linear. sensor termokopel tipe K, dan dapat mengukur temperature dalam jangkauan suhu yang cukup antara -200°C sampai 1800°C dengan batas kesalahan pengukuran kurang dari 1°C. Termokopel tipe K terdiri dari nikel dan kromium pada sisi positif (*thermocouple grade*) sedangkan pada sisi negatif (*extension grade*) terdiri dari nikel dan aluminium.

2.2 Zero Crossing Detector

Zero crossing detector adalah metode yang paling umum dilakukan untuk mengukur frekuensi atau periode sinyal periodik. Saat mengukur frekuensi dari suatu sinyal, biasanya jumlah siklus sinyal referensi diukur selama satu atau lebih periode waktu dari sinyal yang diukur. Mengukur beberapa periode membantu mengurangi kesalahan yang disebabkan oleh *noise* dari suatu gelombang fasa. Dengan membuat *interrupt* pada sebrangan nol dari gelombang fasa.

Penggunaan rangkaian *zero crossing detector* adalah supaya sistem bisa mendeteksi *zero point* sekaligus mengubah suatu sinyal sinusoidal menjadi sinyal kotak. Sinyal keluaran rangkaian *zerocross detector* ini akan dimasukkan ke

Adityo Dwi Prayogo adalah Mahasiswa D4 Teknik Elektronika Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang, e-mail: adityodwiprayogo@gmail.com.
Bambang Priyadi adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang, e-mail: priyadi_bebeng@yahoo.co.id.
Hariyadi Singgih adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang, e-mail: hariyadi_singgih@yahoo.com.

mikrokontroler, oleh karena itu dibutuhkan juga komponen yang mampu memisahkan tegangan 5V dan 220V.

2.3 Pengkondisi Sinyal MAX 6675

Fungsi termokopel adalah untuk merasakan perbedaan suhu antara dua ujung kabel termokopel. Sambungan panas termokopel dapat dibaca dari 0°C hingga $+1023,75^{\circ}\text{C}$. Ujung dingin (suhu sekitar papan tempat MAX6675 dipasang) hanya dapat berkisar dari -20°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$. Sementara suhu di ujung dingin berfluktuasi, MAX6675 terus secara akurat merasakan perbedaan suhu di ujung yang berlawanan. Pengkondisi sinyal ini digunakan untuk melakukan kompensasi *cold junction* dan mendigitalkan sinyal dari termokopel tipe-K. Data dihasilkan dalam resolusi 12-bit, kompatibel dengan SPI™, format hanya baca. Konverter ini menyelesaikan suhu hingga $0,25^{\circ}\text{C}$, memungkinkan pembacaan setinggi $\pm 1024^{\circ}\text{C}$, dan menunjukkan akurasi termokopel 8 LSB untuk suhu mulai dari 0°C hingga $\pm 700^{\circ}\text{C}$. MAX6675 tersedia dalam paket SO 8-pin yang kecil.

2.4 Heater Band

Heater Band / Heater Nozzle Jenis *heater* tabung yang banyak digunakan di mesin plastik dan sejenisnya. *Band heater* berbentuk seperti tabung dengan fungsi memanaskan silinder dengan dimensi tertentu. Ukuran bisa menyesuaikan dengan silinder yang akan dipanaskan. Elemen pemanas listrik banyak dipakai untuk kehidupan sehari-hari, baik di dalam rumah tangga ataupun peralatan dan mesin industri. Bentuk dan jenis dari electrical elemen pemanas bermacam-macam disesuaikan dengan fungsi-fungsi, tempat pemasangan dan media yang dipanaskan, kemudian menghasilkan pemanas elemen listrik bersumber dari kawat atau pun pita bertahanan listrik tinggi (resistance kawat) biasanya bahan yang digunakan adalah niklin yang dialiri arus listrik pada kedua ujungnya dan dilapisi diposkan isolator listrik yang mampu meneruskan panas dengan baik hingga aman jika digunakan. Pemanas induksi merupakan alat yang mampu menghasilkan panas dan memanaskan benda dengan sistem induksi. Benda yang dipanaskan yaitu biji plastik mendapatkan sumber panas dari induksi medan magnet yang sangat cepat, panas bukan berasal dari sebuah elemen pemanas yang akan panas ketika diberikan sumber tegangan.



Gambar 1 Heater Band

2.5 Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Pada papan arduino mega 2560 ini memiliki pin yang cukup banyak, sejumlah 54 buah digital I/O pin (15 pin diantaranya adalah PWM), 16 pin analog input, 4 pin UART (serial port hardware). arduino mega 2560 memiliki sebuah oscillator 16 Mhz, sebuah port USB, power jack DC, ICSP header, dan tombol reset. Board ini sudah sangat lengkap, sudah memiliki segala sesuatu yang dibutuhkan untuk sebuah mikrokontroler.



Gambar 2 Arduino Mega 2560

2.6 Logika Fuzzy

2.6.1 Pengertian

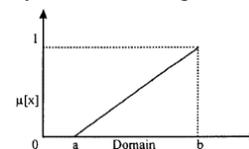
Logika *fuzzy* merupakan salah satu pembentuk *soft computing*. Dasar logika *fuzzy* adalah teori himpunan *fuzzy*. Pada teori himpunan *fuzzy*, peranan derajat keanggotaan sebagai penentu keberadaan elemen dalam suatu himpunan. Logika *fuzzy* memberikan solusi praktis dan ekonomis untuk mengendalikan sistem yang kompleks. Logika *fuzzy* memberikan rangka kerja yang kuat dalam memecahkan banyak masalah pengontrolan. Logika *fuzzy* tidak membutuhkan model matematis yang kompleks untuk mengoperasikannya, yang dibutuhkan adalah pemahaman praktis dan teoritis dari perilaku sistem secara keseluruhan. Untuk menghitung derajat yang tak terbatas jumlahnya antara benar dan salah, maka dikembangkan ide penggolongan himpunan *fuzzy*. Logika *fuzzy* memiliki beberapa karakteristik yaitu himpunan *fuzzy* dan fungsi keanggotaan.

2.6.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Fungsi Keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan pada titik input data ke dalam nilai keanggotaan yang memiliki nilai interval antara 0 dan 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. (Widhiastiwi, 2007). Berikut fungsi dan representasi yang bisa digunakan yaitu :

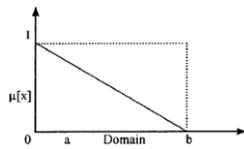
a. Fungsi Keanggotaan Linier

Salah satu representasi fungsi keanggotaan dalam himpunan *fuzzy* adalah representasi linier. Pada representasi linear, pemetaan input ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai suatu garis lurus. Ada dua keadaan himpunan *fuzzy* yang linear. Pertama, kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol [0] bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi. Gambar grafik fungsi keanggotaannya adalah sebagai berikut.



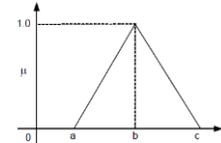
Gambar 3 Representasi Nilai Naik

Keadaan kedua adalah representasi linier turun, kebalikan dari keadaan yang pertama, yaitu garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah.



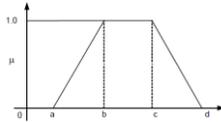
Gambar 4 Representasi Nilai Turun

b. Fungsi Keanggotaan Segitiga



Gambar 5 Representasi Segitiga

c. Fungsi Keanggotaan Trapesium



Gambar 6 Representasi Trapesium

2.6.3 Struktur Dasar Logika Fuzzy

Sistem Fuzzy memiliki 4 bagian dasar yaitu:

a. Fuzzifikasi

Proses yang dilakukan untuk mengubah variabel nyata menjadi variabel fuzzy, ini ditujukan agar masukan *controller fuzzy* bisa dipetakan menuju jenis yang sesuai dengan himpunan fuzzy.

b. Fuzzy Rule Base

Merupakan kaidah dasar yang berisi aturan-aturan secara linguistic yang menunjukkan kepakaran terhadap plant. Banyak cara menunjukkan suatu “pakar” ke dalam rule. Format yang paling umum adalah menggunakan format aturan IF-THEN (If Premise Then Conclusion) Premise berupa fakta dan Conclusion berupa keputusan yang akan diambil. Apabila pernyataannya lebih dari satu maka dapat menggunakan logika “AND” atau “OR”.

c. Inferensi

Sebuah proses formulasi pemetaan masukan terhadap keluaran dengan menggunakan logika fuzzy. Proses dari inferensi fuzzy melibatkan fungsi keanggotaan operator logika fuzzy, dan aturan IF-THEN. Terdapat dua metode inferensi yang paling dikenal yaitu metode Mamdani dan metode Sugeno.

d. Defuzzifikasi

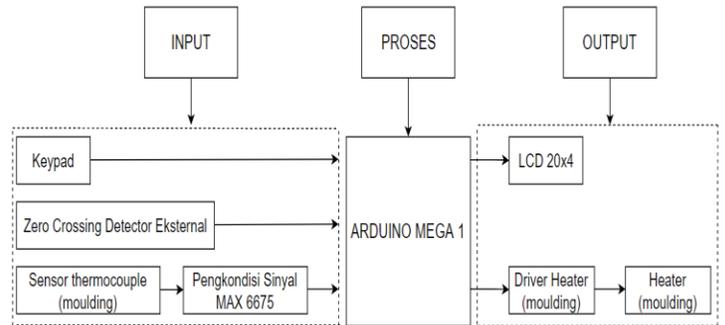
Sebuah cara untuk mendapatkan nilai tegas dari nilai fuzzy secara representative. Secara mendasar defuzzifikasi merupakan pemetaan dari ruang kendali fuzzy yang didefinisikan dalam semesta pembicaraan keluaran ke dalam ruang kendali nyata. Proses ini berfungsi untuk menentukan nilai output crisp. Suatu nilai fuzzy output yang berasal dari evaluasi rule diambil kemudian dimasukkan ke dalam suatu fungsi keanggotaan keluaran (membership function), selanjutnya keluaran dari defuzzifikasi tersebut akan digunakan sebagai keluaran control logika fuzzy.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Prinsip kerja Alat

Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan memasukkan set point melalui keypad kemudian sistem akan berjalan. Heater akan aktif dan mulai memanaskan biji plastik dalam pipa besi. Sebelum filament keluar dari nozzle atau masih berada di dalam pipa besi, sensor termokopel akan mendeteksi suhu biji plastik, hasil pembacaan akan di olah oleh arduino mega dan di tampilkan pada LCD.

Data temperature dari hasil pembacaan sensor yang di olah arduino mega akan dibandingkan dengan set point suhu yang telah di tentukan melalui program arduino mega. Apabila suhu hasil pembacaan sensor kurang dari set point maka arduino mega akan memerintahkan heater untuk menambah suhu tekanan dalam pipa dapat naik dan sesuai dengan set point. Namun apabila suhu hasil pembacaan sensor lebih tinggi di banding dengan set point yang telah ditentukan, maka arduino mega akan memerintahkan heater untuk dapat mengurangi suhu sesuai dengan set point. Dan apabila suhu hasil pembacaan sensor telah sesuai dengan set point maka arduino akan memerintahkan heater agar tetap pada kondisi tersebut. Sistem akan berhenti ketika nilai suhu sudah mencapai nilai yang telah ditentukan pada setpoint. Dalam pengontrolan ini menggunakan metode Fuzzy yang tertanam di dalam arduino mega yang berfungsi untuk menstabilkan atau memepertahankan nilai suhu agar sesuai dengan set point.



Gambar 7 Diagram Blok Sistem Molding

3.2 Perencanaan dan Pembuatan Mekanik

Perencanaan dan pembuatan mekanik pada extruder plastic.



Gambar 8 Perencanaan Mekanik

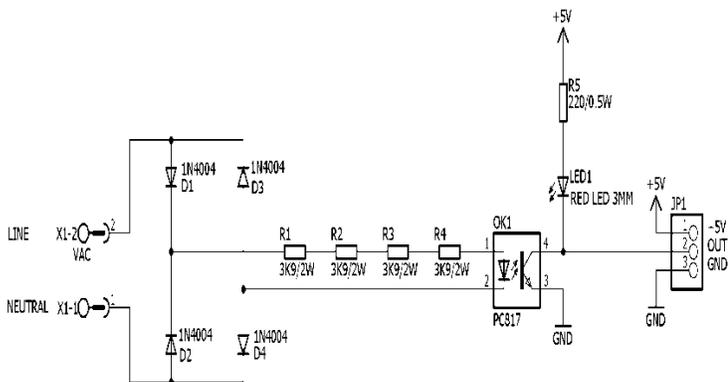
Pada perencanaan alat yang akan di buat ini memiliki beberapa spesifikasi, diantaranya adalah:

1. A. Dimensi Alat
 - Panjang : 150 cm
 - Lebar : 50 cm
 - Tinggi : 70 cm
- B. Dimensi Box Control
 - Panjang : 25 cm
 - Lebar : 35 cm
 - Tinggi : 12 cm
2. Bahan
 - Plastik, Filament : HDPE
 - Rangka Alat : Besi
3. Processor : Arduino Mega 2560
4. Sensor : Termokopel Type K
 - Range suhu : -200°C s/d 1200°C
 - Range suhu yang digunakan: 0°C s/d 190°C (Proses molding)
5. Actuator : Heater band
 - Daya heater band : 250 Watt
6. Display : LCD 20 x 4
7. Tegangan Kerja : 220 VAC

3.3 Perencanaan dan Pembuatan Elektronik

3.3.1 Rangkaian Zero Crossing Detector

Zero crossing detector digunakan untuk mendeteksi persilangan nol yang ada pada tegangan jala-jala. Rangkaian Zero crossing detector pada gambar dibawah ini akan memberikan output pulsa pada saat terjadi persilangan nol pada tegangan AC yang dideteksi.



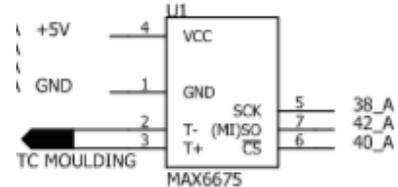
Gambar 9 Rangkaian Zero Crossing Detector

Komponen D1-D4 menggunakan dioda 1N4004. Alasan penggunaan dioda 1N4004 karena tegangan jala-jala PLN sebesar 220Vac, dan frekuensi 50Hz maka spesifikasi diode yang digunakan harus diatas tegangan jala- jala tersebut. Rangkaian Zero Crossing detector ini menggunakan R1-R4 yang diseri 3900Ω, pada rangkaian diatas menggunakan spesifikasi optocoupler PC817 yang bekerja pada arus 20 mA, $V_F=1,4\text{V}$.

3.4. Rangkaian Sensor Suhu MAX6675

Sensor termokopel tipe k sebagai sensor suhu yang akan menerima panas dari heater setiap perubahan suhu pada suatu bidang. Pada sistem ini, termokopel sebagai sensor akan mengubah energi panas ke energi listrik yang selanjutnya akan diolah oleh arduino mega. Komunikasi antara max6675

dengan arduino menggunakan SPI (Serial Peripheral Interface) sebagai masukan sensor feedback dari sistem yang nantinya akan dibandingkan dengan nilai setpoint. Termokopel tipe k terbuat dari bahan logam nikel dan kromium pada sisi positif, sedangkan pada sisi negatif terbuat dari bahan logam nikel dan aluminium. Range suhu termokopel tipe k berkisar -200°C sampai dengan 1250°C . Sedangkan range suhu pada alat ini adalah 0°C sampai 190°C .

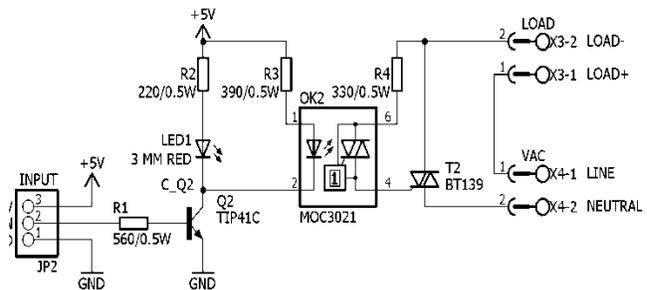


Gambar 10 Rangkaian Penguat Modul MAX 6675

3.5. Rangkaian Driver Heater

Heater merupakan sebuah aktuator yang digunakan untuk memanaskan biji plastik. Heater yang digunakan adalah jenis band heater atau heater induksi 220VAC/250W. Pengontrolan suhu digunakan agar nilai suhu dapat sesuai dengan nilai set point yang ditentukan. Ketika suhu melebihi nilai set point, maka kontrol suhu akan menurunkan daya heater dengan mengatur keluaran angle. Kontrol ini diatur melalui pin output zero crossing detector pada Arduino mega berupa tegangan antara 0 – 5 volt yang nanti akan mengatur penyalaan heater. Agar arduino mega tetap aman, maka dibagian aktuator diberi optotriac MOC 3021. Optotriac terhubung dengan pin pada arduino mega agar dapat diatur penyalaannya dengan cara mengatur penyalaan triac yang langsung terhubung ke beban yang berupa heater. Saat port masukan mendapatkan keluaran angel 10 maka heater akan menyala dengan maksimal. Jika port masukan mendapatkan keluaran angel 360, maka heater akan mati. Proses pengaturan daya dilakukan dengan mengatur tegangan masukan driver 1 – 5 volt untuk memproses pengendali 0 – 100%.

Dalam merancang rangkaian driver heater harus memperhatikan beban yang akan digunakan. Optocoupler pada rangkaian diatas berfungsi untuk mengisolasi antara jaringan kerja listrik AC (triac dan beban heater) dengan arduino mega dan juga sebagai pendeteksi titik nol dari jala-jala AC. Pada skripsi ini digunakan Optocoupler jenis MOC3021. Berdasarkan datasheet, syarat agar MOC ON adalah $V_F > 1.2\text{V}$ dengan $I_F = 20\text{mA}$. selain itu V_{OH} mikro = 5V dan $I_{VO} = 20\text{mA}$. Maka dapat dihitung nilai R1, R2, R3, R4, dan P1, P2, P3. Rangkaian heater ini menggunakan R1 560Ω, R2 220Ω, R3 390Ω dan R4 330Ω.

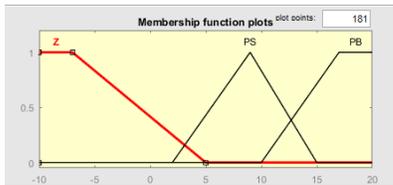


Gambar 11 Rangkaian Driver Heater

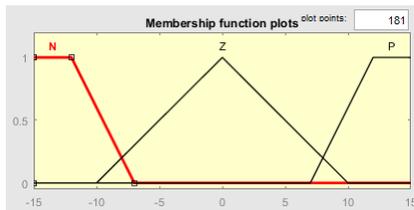
3.6 Perencanaan Kontrol Logika Fuzzy

3.6.1 Fungsi Keanggotaan Masukan

Pada sistem ini menggunakan tiga variabel fungsi keanggotaan yaitu *Zero (Z)*, *Positive Small (PS)*, dan *Positive Big (PB)*. Output yang berupa heater memiliki 3 kondisi yaitu *Low Hot (LW)*, *Hot (H)*, *Very Hot (VH)*. Mengacu pada teori diatas bahwa variable masukan yang digunakan adalah *Error* dan $\Delta Error$. Dimana nilai *Error* diperoleh dari nilai suhu setpoint dikurangi suhu sebenarnya, sedangkan $\Delta Error$ diperoleh dari *Error* nilai suhu sekarang dikurangi dengan *Error* nilai suhu sebelumnya. Input dari fungsi keanggotaan ini berupa nilai suhu yang dibaca oleh sensor suhu *thermocouple* tipe k. Dan dibawah ini adalah fungsi keanggotaan untuk *Error* dan $\Delta Error$.



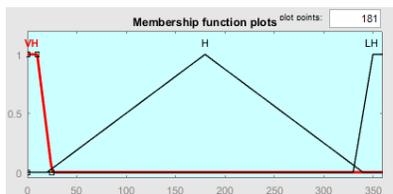
Gambar 12 Fungsi Keanggotaan Error



Gambar 13 Fungsi Keanggotaan ΔError

3.6.2 Fungsi Keanggotaan Keluaran

Pada fungsi keanggotaan keluaran, output yang diharapkan adalah panas yang dikeluarkan oleh *heater* yang digunakan untuk memanaskan biji plastik. Untuk mengatur besarnya panas pada *heater* tersebut terdapat tiga variabel keanggotaan keluaran yaitu *Low Hot (LW)*, *Hot (H)*, *Very Hot (VH)*. Besarnya panas tersebut bergantung dari besarnya *angle* yang dikeluarkan oleh arduino mega yang dihasilkan dari perhitungan metode defuzzyfikasi *Centroid (Composite Moment)*.



Gambar 14 Fungsi Keanggotaan Output

3.6.3 Perencanaan Rule Base

Fuzzy Rule Base berisi pernyataan – pernyataan logika fuzzy. *Fuzzy Rule Base* berbentuk pernyataan IF-Then yang menyatakan pernyataan kondisi. Penyusunan *Rule Base* ini sangat berpengaruh pada tahap pengambilan keputusan yang dilakukan oleh *plant*. Berdasarkan pada basis aturan fuzzy pada proses perancangan judul ini aturan fuzzy dibuat dengan menggunakan metode *Centroid (Composite Moment)*, metode ini didasarkan pada pengetahuan terhadap tingkah laku sistem. *Rule fuzzy* dibentuk dengan menggunakan format tabular.

Tabel 1 Aturan Fuzzy

E\ΔE	N	Z	P
Z	Low Hot	Low Hot	Hot
PS	Low Hot	Hot	Very Hot
PB	Hot	Very Hot	Very Hot

Dari tabel 3.4 Aturan Fuzzy dapat dijabarkan seperti berikut :

1. Jika Error Zero dan ΔError Negatif, maka output Low Hot.
2. Jika Error Zero dan ΔError Zero, maka output Low Hot.
3. Jika Error Zero dan ΔError Positif, maka output Hot.
4. Jika Error Positif small dan ΔError Negatif, maka output Low Hot.
5. Jika Error Positif small dan ΔError Zero, maka output Hot.
6. Jika Error Positif small dan ΔError Positif, maka output Very Hot.
7. Jika Error Positif big dan ΔError Negatif, maka output Hot.
8. Jika Error Positif big dan ΔError Zero, maka output Very Hot.
9. Jika Error Positif big dan ΔError Positif, maka output Very Hot.

3.6.4 Defuzzyfikasi

Defuzzyfikasi yaitu sebuah proses untuk merubah fuzzy output menjadi *crisp output*. Hasil dari *defuzzyfikasi* ini yang akan menentukan ON dan OFF-nya pemanas dari proses *molding* untuk peleburan biji plastik. Metode *defuzzyfikasi* yang digunakan dalam metode mamdani pada skripsi ini adalah *defuzzyfikasi Centroid*. Yaitu dengan solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah fuzzy.

IV. HASIL DAN ANALISA

4.1 Pengujian dan Analisa Rangkaian Pengkondisi Sinyal Sensor Suhu PT100

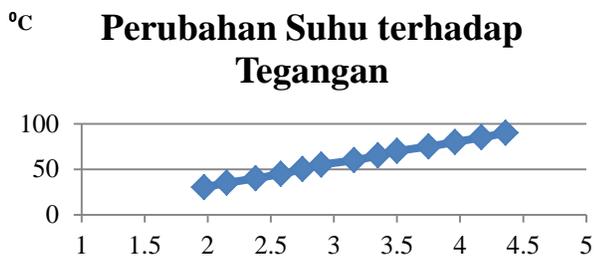
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan keluaran dari pengkondisi sinyal PT100 sesuai dengan suhu yang dideteksi oleh sensor P100 yang berupa resistansi. Jika pengujian telah dilakukan dan telah sesuai, maka *output* dari pengkondisi sinyal dapat dimasukkan ke dalam *analog input* pada DCS yang menggunakan *range* tegangan 1 – 5 V. Dengan begitu, berarti 1 V akan mewakili suhu 30°C dan 5V akan mewakili suhu 90°C. Berikut data hasil dari pengujian rangkaian pengkondisi sinyal sensor suhu PT100:

Tabel 6 Hasil Pengujian Rangkaian Sensor Suhu PT100

Thermo meter (°C)	Vout Pengkondisi	Pembacaan pada DCS	Suhu DCS (°C)	Error (%)
30°C	2,06 V	W#16#0048	30,25°C	0,83%
35°C	2,28 V	W#16#0917	35,28°C	0,8 %
40°C	2,47 V	W#16#1204	40,20°C	0,5 %
45°C	2,66 V	W#16#1B0F	45,24°C	0,53 %
50°C	2,85 V	W#16#2407	50,22°C	0,44 %

55°C	3,04 V	W#16#2D1F	55,28°C	0,50 %
60°C	3,24 V	W#16#360F	60,24°C	0,4 %
65°C	3,44 V	W#16#3F02	65,30°C	0,46 %
70°C	3,65 V	W#16#481B	70,27°C	0,38 %
75°C	3,83 V	W#16#5134	75,28°C	0,37 %
80°C	4,02 V	W#16#5A33	80,31°C	0,38 %
85°C	4,23 V	W#16#630F	85,30°C	0,35 %
90°C	4,42 V	W#16#6BEE	90,32°C	0,35 %

Dari data-data yang disajikan pada tabel 4.1 di atas, dapat dibuat grafik hubungan antara perubahan suhu dengan perubahan tegangan keluaran yang dihasilkan untuk mengetahui karakteristik dari sensor PT100. Berikut grafik hubungan antara perubahan suhu dengan perubahan tegangan pada pengkondisi sinyal:



Gambar 24 Grafik Hubungan Perubahan Suhu terhadap Tegangan Keluaran

Dari grafik di atas dapat dianalisa bahwa berdasarkan data yang didapat, karakteristik dari sensor suhu PT100 cukup baik untuk dapat memenuhi kebutuhan *analog input* pada DCS. Perubahan suhu dan perubahan tegangan keluaran memiliki hubungan yang cukup linier.

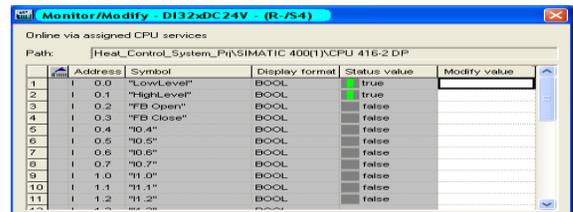
4.2 Pengujian dan Analisa Sensor Level

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sensor level dapat memberikan logika sesuai dengan yang diinginkan. Sensor level yang digunakan memiliki 2 kondisi, yaitu *high* dan *low*. Saat sensor memberikan logika 0, maka posisi sensor berada pada posisi *high* dan saat sensor memberikan logika 1, maka sensor berada pada posisi *low*. Berikut data hasil pengujian sensor level:

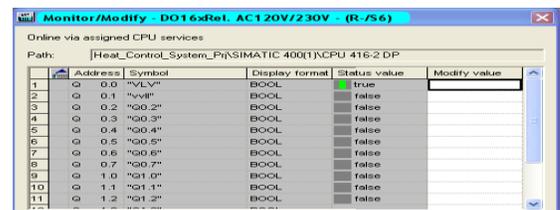
Tabel 7 Tabel Kebenaran Sensor Level

High Level	Low Level	State	Output
1	1	0	1
1	0	0	1
1	0	1	0
0	0	1	0

Dari data-data yang disajikan pada tabel di atas, dapat diketahui bahwa sensor level dapat bekerja sesuai dengan kondisi yang seharusnya. Untuk mengetahui keluaran pada DCS, berikut hasil pengujian pada DCS:



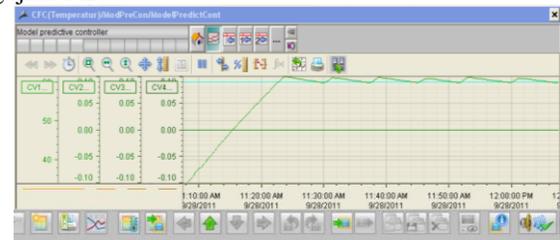
Gambar 25 Digital Input Sensor Level



Gambar 26 Digital Output Sensor Level

4.3 Implementasi DCS pada *Water Heat Control System* dengan Metode Kontrol MPC

Pengujian kontrol MPC (*Model Predictive Control*) pada perangkat DCS (*Distributed Control System*) dilakukan untuk mengetahui performa kontroler MPC dalam merespon *water heat control system*. Pengujian kontrol MPC ini dilakukan dengan mengambil sebuah sampel data, yaitu terhadap *set point* 60°C. Berikut hasil respon dari sistem pada pengujian MPC:



Gambar 27 Respon MPC pada *set point* 60°C pada HMI

Dari hasil data berupa grafik seperti di atas, respon sistem menunjukkan bahwa implementasi kontroler MPC yang terdapat pada DCS telah berhasil dilakukan. Dengan menggunakan kontroler MPC, sistem *water heat control* dapat stabil meskipun terdapat *maximum overshoot* sebesar 2,1 % dari nilai *steady state* yang diinginkan. Hal ini dikarenakan dalam beberapa kasus, model proses yang didapat tidak selalu sesuai dengan kondisi proses sesungguhnya. Akibatnya, optimalisasi dari pengontrol MPC sangat bergantung dari kualitas model proses yang didapat. Sehingga perlu dilakukan identifikasi proses secara berulang untuk dapat memastikan akurasi model proses yang dihasilkan. Walaupun demikian, akurasi model proses tidak akan pernah mencapai kesempurnaan dikarenakan teknik linierisasi suatu elemen proses yang tidak sepenuhnya linier. Sehingga, respon yang diberikan kontroler MPC pun tidak sepenuhnya sempurna. Namun demikian, *maximum overshoot* yang dihasilkan oleh sistem tidak lebih dari 5 %, sehingga sistem masih dapat dikatakan bekerja dengan baik.

Untuk lebih mengetahui performa kontroler MPC dalam merespon sistem *water heat control*, pengujian respon sistem dilakukan dengan mengambil lima sampel data, yaitu pada nilai *set point* 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, dan 90 °C. Berikut data hasil pegujia

Tabel 8 Respon Sistem

No	Set Point	Grafik Respon Sistem	Overshoot
1	50 °C		2,6 %
2	60 °C		2,1 %
3	70 °C		2 %
4	80 °C		1,6 %
5	90 °C		1,3 %

Berdasarkan data hasil pengujian respon sistem pada beberapa *set point* seperti pada tabel 8 di atas, dapat diketahui bahwa pada setiap *set point* yang diberikan, sistem selalu berusaha memberikan respon yang terbaik, meskipun terdapat *overshoot* terhadap nilai *steady state*.

Respon sistem yang dihasilkan oleh setiap pengujian sistem pada beberapa nilai *set point* di atas juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah faktor suhu sekitar. Dari data hasil pengujian yang didapat, nilai rata-rata *maximum overshoot* dari sistem *water heat control* adalah 1,92 %.

V. PENUTUP

1) 5.1 Kesimpulan

Dari hasil perencanaan dan pengujian yang dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa alat untuk mengendalikan suhu pada proses peleburan dalam pembuatan *filament* (3D Printing) telah berhasil dibuat dan bekerja dengan baik. Dan berikut ini merupakan kesimpulan lain yang didapatkan :

1. Penggunaan kontrol logika *fuzzy* sebagai pengendali suhu dengan menggunakan 2 buah label *membership function* untuk masukan *Error* dan *delta Error*, metode *Mamdani*, dan metode *defuzzifikasi Centroid* mampu membuat sistem tetap stabil dan sesuai dengan *set point*.
2. Pembacaan nilai suhu dengan sensor suhu *Thermocouple* tipe k pada LCD dibandingkan dengan menggunakan termometer dapat dikatakan baik karena masih memiliki rata – rata *error* -0.57% yang masih dalam batas toleransi yakni $\pm 2\%$. *Error* yang dihasilkan menunjukkan bahwa sensor suhu yang digunakan sudah cukup akurat dan presisi sehingga mampu menampilkan kinerja yang baik pada sistem.
3. Alat pembuatan *filament* ini dapat menghasilkan suhu terkontrol 190° C dengan kontrol logika *fuzzy*, menggunakan Arduino mega sebagai pemroses dari input *setpoint* suhu yang dimasukkan untuk mengontrol *driver heater* dimana *angel* sebagai pemucuan tegangan keluaran pada *heater* sehingga suhu dapat stabil.

2) 5.2 Saran

Alat untuk mengendalikan suhu pada proses peleburan dalam pembuatan *filament* (3D Printing) masih perlu adanya perbaikan dan penyempurnaan agar alat ini dapat bekerja secara efektif dan efisien. Ada beberapa hal yang dapat disarankan untuk melakukan perbaikan dan penyempurnaan yaitu:

1. Dari segi *software*, perlu adanya metode kontrol lain sebagai perbandingan apakah metode baru yang digunakan lebih baik atau kurang baik dibandingkan menggunakan kontrol logika *fuzzy* yang digunakan saat ini.
2. Untuk menghasilkan hasil *filament* yang lebih lebih baik pada proses pendinginan, harus menggunakan sistem *cooling water circulation*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Anike, Purbawati. & Katherin, Indriawati. (2012). *Perancangan Sistem Pengendalian Tekanan Keluaran Steam Separator Berbasis (Model Predictive Control) di PT. Pertamina Geothermal Energy Kamojang, Jawa Barat*. Jurnal Teknik POMITS Vol. 1, No. 1, (2012) 1-6.

[2] Evira, D.P. Rushdianto, Effendie. dan Josaphat, Pramudijanto. (2015). *Desain Pengaturan Level pada Coupled Tank Process dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control*. Jurnal TEKNIK ITS Vol.6, No.1, (2015).

[3] Hermanto, Ang. (2008). *Perancangan dan Implementasi Pengendali Model Predictive Control dengan Constraint untuk Pengaturan Temperature pada Level/ Flow and Temperature Process RIG 38-003*. Jurnal Teknik Elektro, FTUI, 2008.

Puspitarini, Evira. Effendie, Rushdianto. & Pramudijanto, Josaphat (2015). *Desain Pengaturan Level pada Coupled Tank Process dengan*

- Menggunakan Metode Model Predictive Control*. Jurnal Teknik ITS Vol. 6, No. 1, (2015).
- [4] Hossain, Mohammad, Arif. (2013). *A Dual-Rate Model Predictive Controller For Fieldbus Based Distributed Control Systems*. A thesis submitted in partial fulfillment, Department of Electrical & Computer Engineering, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada (2013).
- [5] Jesse, Melvin. (2008). *Perancangan dan Implementasi Pengendali Model Predictive Control dengan Constraint untuk Pengaturan Level pada Coupled Tank Basic Process RIG 38-100*. Jurnal Teknik Elektro, FTUI, (2008).
- [6] Lin, Xin. (2013). *Incremental Model Predictive Control System Design and Implementation Using Matlab/Simulink*. A Thesis Presented, University Of Florida In Partial Fulfillment, (2013)
- [7] Ramadhan, Khairul. (2014). *Sistem Kontrol Multivariabel Suhu dan Level dengan Yokogawa DCS Centum VP*. Jurnal Jurusan Teknik Elektro. Fakultas Teknik Elektro. Universitas Brawijaya.
- [8] Risdhayanti, Anindya, D. (2013). *Monitoring dan Pengendalian Continuous Flow Mixing Menggunakan SIMATIC PCS 7 dengan Metode Model Predictive Control*. Jurnal TEUB Vol.1, No.1, 2013.
- [9] Wang, Liuping. (2008). *Model Predictive Control System Design and Implementation Using Matlab/Simulink*. School of Electrical and Computer Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia (2008).