

Implementasi Metode *Fuzzy Logic* Pada Kendali Pompa Pendingin Mesin CNC Untuk Meningkatkan Efisiensi Daya

Implementation of the Fuzzy Logic Method in CNC Machine Cooling Pump Control to Increase Power Efficiency

Bagas Setia Aje Sutikno^{1*}, Dickyansyah Ramadhan², Putra wisnu agung sucipto³, Novi Laura Indrayani⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam “45” Bekasi, Jl Cut Meutia No.83
Bekasi Timur, Kota Bekasi, 17113

bagasajie55@gmail.com^{1*}, dickyansyahramadhan12@gmail.com², wisnu@unismabekasi.ac.id³,
novi_laura@unismabekasi.ac.id⁴

Abstrak – Mesin CNC merupakan alat bantu pekerjaan untuk membuat suatu benda kerja dengan tingkat presisi yang cukup tinggi. Selain dari akurasi gerakannya, kestabilan suhu benda kerja juga mempengaruhi kualitas hasil pekerjaan dan umur dari alat potong yang digunakan. Kecepatan aliran pada coolant berpengaruh pada kemampuan hantar panas yang diterima dari benda kerja pada proses permesinan. Efisiensi daya yang dihasilkan dari metode pendalihan motor nyala-mati tidak cukup baik karena ketidakefektifan metode pengaturan kecepatan aliran. Metode penelitian yang digunakan adalah kuantitatif dan ekperimental, meliputi perangkaian sebuah mikrokontroler berbasis logika fuzzy yang mampu mengatur keluaran frekuensi dari perangkat variable frequency drive yang terhubung dengan motor pompa pendingin pada mesin cnc. Data konsumsi energi listrik dari pengujian dicatat serta hasilnya dibandingkan antara sebelum dan setelah diterapkannya alat yang dibuat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode logika fuzzy berhasil menurunkan konsumsi energi listrik mesin CNC, menghasilkan penurunan rata-rata sebesar 0,0697 KWh pada setiap uji coba. Dalam skala yang lebih luas, penggunaan alat ini pada sebuah cnc dapat mengurangi biaya energi listrik perusahaan untuk mesin cnc hingga 23,3%, setara dengan penghematan sebesar Rp. 5.534.130 dalam waktu satu tahun. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa metode logika fuzzy dalam kendali pompa pendingin mesin cnc dapat memberikan kontribusi penting dalam efisiensi energi dan penghematan biaya operasional mesin cnc.

Kata Kunci: Mesin CNC, Pompa Pendingin, Coolant, Suhu, Kecepatan, Efisiensi Daya, Energi Listrik

Abstract – CNC machines are tools used to create workpieces with a high level of precision. In addition to its motion accuracy, the stability of the workpiece temperature also affects the quality of the work and the lifespan of the cutting tools. The flow rate of the coolant plays a significant role in heat dissipation during the machining process. The on-off control method for the motor lacks efficiency in controlling the flow rate effectively. The research methodology employed in this study is quantitative and experimental, by assembling a microcontroller based on fuzzy logic that could regulate the output frequency of the variable frequency drive connected to the cooling pump motor of the CNC machine. Electrical energy consumption data dari the experiments were recorded and compared before and after the implementation of the device. The research findings demonstrated that the application of fuzzy logic method successfully reduced the electrical energy consumption of the CNC machine, resulting in an average decrease of 0.0697 kWh per trial. On a larger scale, the use of this device on a CNC machines could reduce the company's electricity costs for cnc machine by 23,3%, equivalent to savings of Rp. 5.534.130 per year. The results of this research indicate that the fuzzy logic method in controlling the coolant pump of CNC machines can provide significant contributions to energy efficiency and cost savings in CNC machine operations.

Keywords: CNC Machine, Cooling Pump, Coolant, Temperature, Speed, Power Efficiency, Electrical Energy



1. Pendahuluan

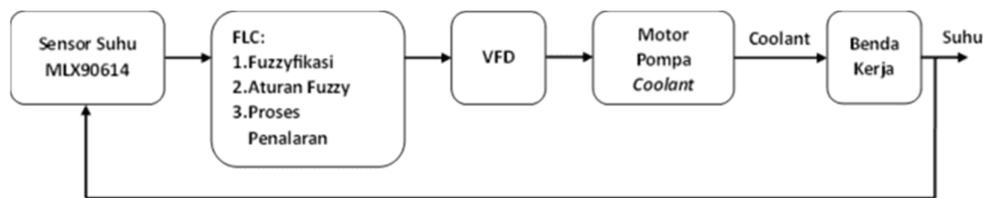
Mesin *CNC* merupakan alat bantu pekerjaan untuk membuat suatu benda kerja dengan tingkat presisi yang cukup tinggi. Penggunaan kendali komputasi mendukung sistem pengukuran dan perhitungan dimensi kerja menjadi lebih akurat [1]. Tidak hanya akurasi gerak saja, kestabilan suhu pada sebuah proses pekerjaan mesin *cnc* juga mempengaruhi kualitas hasil pekerjaan dan umur dari alat potong yang digunakan. Dengan begitu, penggunaan *coolant* pada proses pekerjaan mesin *cnc* sangatlah penting [2] [3].

Kecepatan aliran pada *coolant* berpengaruh pada kemampuan hantar panas yang diterima dari benda kerja pada proses permesinan. Semakin cepat aliran *coolant*, semakin rendah suhu benda kerja dan mata pisau pemotong [3]. Selain kecepatan aliran, jenis *coolant* yang digunakan juga berpengaruh pada kemampuan hantar panasnya. Pada benda kerja dengan material seperti aluminium, baiknya digunakan *coolant* berbentuk cairan dengan campuran air dan oli. Untuk menghindari menempelnya sisa geram pada benda kerja karena melelehnya material akibat suhu panas, *coolant* campuran air dan oli akan sangat membantu proses pekerjaan [4].

Coolant berbentuk cairan, disalurkan melalui pipa atau selang menuju ruang kerja mesin *cnc* dan diarahkan langsung pada ujung mata pisau pemotong yang akan menjadi titik pertemuan dengan benda kerja [2]. Aliran *coolant* digerakkan oleh motor pompa elektrik. Pada mesin *cnc* umumnya, pengaturan kecepatan aliran hanya dikendalikan dengan menutup dan membuka keran untuk mengatur lebar saluran cairan *coolant* agar kecepatan aliran dapat diatur [3]. Cara lain yang digunakan yakni menggabungkan dua buah pompa yang diatur nyala hidupnya untuk menambah tekanan dan aliran cairan *coolant* [5]. Efisiensi daya dengan cara tersebut tidak cukup baik akibat ketidakefektifan metode pengaturan kecepatan aliran [6]. Metode kendali *fuzzy logic* dengan model pengambilan keputusan dalam bentuk aturan jika-maka, adalah pilihan yang cukup tepat untuk diterapkan pada sistem kendali kecepatan aliran *coolant* berdasarkan suhu [7] [8] [9]. Oleh karena itu, penulis mengambil materi tentang pengendalian kecepatan motor pompa *coolant* menggunakan metode kendali *fuzzy logic* [10] [11] [12].

2. Metode Penelitian

2.1. Perancangan Alat



Gambar 1. Diagram Blok Kerja Alat

Berikut adalah penjelasan dari diagram blok prinsip kerja alat pada Gambar 1. :

1. Nilai masukan suhu yang diterima oleh sensor suhu MLX90614, digunakan sebagai variabel *input* perhitungan logika *fuzzy*.
2. Algoritma *Fuzzy Logic Controller* melakukan proses fuzifikasi, menentukan kondisi sesuai dengan aturan *fuzzy* yang telah dibuat, pemilihan keputusan dengan proses penalaran, lalu merubah hasil keputusan menjadi bentuk output digital untuk diterima oleh perangkat *VFD*.
3. Perangkat *VFD* menerima perintah dari mikrokontroler dan mengendalikan tegangan, arus, dan frekuensi keluaran kepada motor pompa *coolant* sesuai dengan perintah yang diterima.

- Motor pompa berputar dengan kecepatan yang telah ditentukan untuk mendorong cairan *coolant* melalui selang menuju keran pada mesin *CNC* yang diarahkan langsung pada benda kerja dan ujung mata pisau.

Dengan aliran cairan *coolant*, suhu benda kerja akan berubah, lalu perubahan suhu akan dideteksi oleh sensor suhu *MLX90614* dan dialihkan ke mikrokontroler sebagai nilai umpan balik suhu untuk menghitung nilai error kembali.

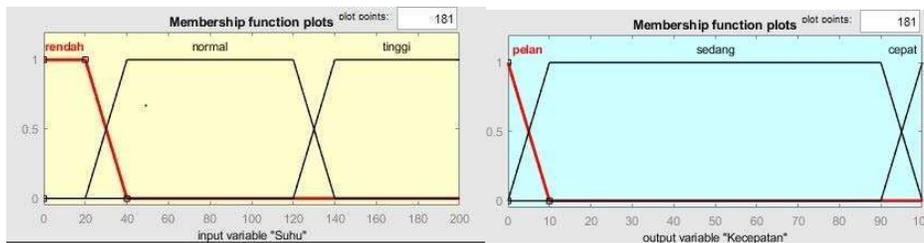
2.2. Perancangan Logika Fuzzy

Proses pengolahan data dimulai dengan menentukan variabel dan semesta pembicaraan, lalu dilanjutkan dengan pembentukan himpunan *fuzzy*. Variabel dan semesta pembicaraan ditampilkan pada tabel 1. berikut.

Tabel 1. Variabel dan Semesta Pembicaraan Input Output

Fungsi	Nama Variabel	Semesta Pembicaraan	Keterangan
Input	Suhu	[0 – 200]	Suhu Titik Pemotongan Benda Kerja (Derajat <i>Celcius</i>)
Output	Motor Pompa	[0 - 100]	Kecepatan Putar Motor Pompa (Persentase)

Sinyal masukan suhu merupakan nilai tegas (*crisp*) 0 hingga 200. Nilai tersebut diperoleh dari pembacaan suhu objek oleh sensor suhu *MLX90614*. Nilai tegas tersebut diubah menjadi himpunan *fuzzy* rendah, normal dan tinggi seperti ditampilkan pada Gambar 2. (Input suhu). Sinyal keluaran kecepatan merupakan nilai tegas (*crisp*) 0 hingga 100. Nilai tersebut merepresentasikan perintah kecepatan dalam bentuk persentase yang akan diterima oleh perangkat *VFD* untuk menggerakkan motor pompa. Nilai tegas tersebut diubah menjadi himpunan-himpunan *output fuzzy* pelan, sedang dan cepat yang ditampilkan pada Gambar 2. (output kecepatan).



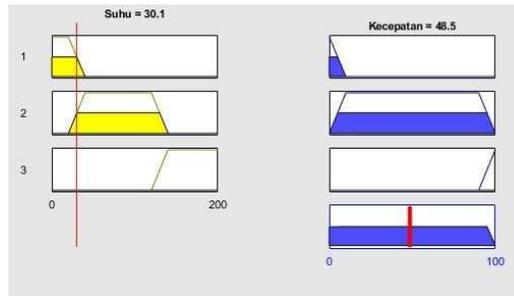
Gambar 2. Fuzzyfikasi *Input* Suhu dan *Output* Kecepatan

Menyusun dasar aturan yang berkaitan dengan himpunan masukan dan keluaran *fuzzy* yang telah dibuat berupa implikasi-implikasi *fuzzy*. Metode *fuzzy* yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Mamdani dan fungsi implikasi yang digunakan adalah min dengan bentuk sebagai berikut.:

- [R1] IF Suhu RENDAH THEN Kecepatan PELAN
- [R2] IF Suhu NORMAL THEN Kecepatan SEDANG
- [R3] IF Suhu TINGGI THEN Kecepatan CEPAT

Pada sistem yang terdiri dari beberapa aturan, interferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Metode pengumpulan yang digunakan dalam sistem *fuzzy* yang digunakan yaitu metode Max (maksimum). Solusi himpunan *fuzzy* yang didapatkan dengan mengambil maksimum pada aturan, dan menggunakan nilai tersebut untuk memodifikasi daerah *fuzzy* dan menerapkannya pada keluaran.

Keluaran yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan sebelumnya digunakan sebagai nilai masukan pada proses penegasan, dan hasil dari proses penegasan merupakan suatu bilangan yang tegas (*crisp*). Sehingga jika diberikan suatu himpunan *fuzzy* dalam rentang tertentu, maka diperoleh nilai tegas tertentu sebagai keluaran kecepatan motor pompa. Proses defuzifikasi yang digunakan adalah metode *Centeroid*. Solusi tegas yang diperoleh dengan metode *Centeroid* mengambil titik pusat daerah *fuzzy*. Contoh diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Proses Defuzifikasi

Data-data yang akan diperoleh berupa suhu umpan balik yang diterima dari sensor suhu, di hitung untuk memperoleh nilai persentase kecepatan motor pompa dan diubah rentang nilainya (0 – 100) menjadi rentang nilai yang sesuai dengan rentang tingkatan *PWM* 8-bit dari mikrokontroler *Arduino* (0 – 255).

$$Output = \frac{S}{S_{max}} \times Ref \quad \dots(1.)$$

Keterangan :

- S = Kecepatan motor keluaran fuzzy (%)
- S_{max} = Kecepatan maksimum motor (%)
- Ref = Nilai referensi *PWM* 8-bit (255)

Nilai *output* didapatkan, mikrokontroler mengirimkan sinyal kecepatan dalam bentuk variasi lebar dari sinyal *PWM* dan difilter untuk merubahnya menjadi tegangan analog sebagai kendali frekuensi kerja *vfd* :

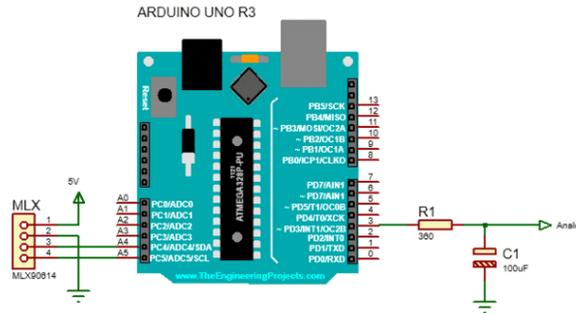
$$V_{analog} = \frac{Duty\ Cycle}{100} \times V_s \quad \dots(2.)$$

Keterangan :

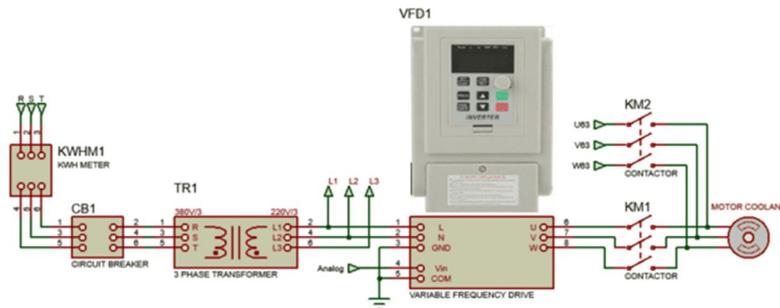
- V_{analog} = Tegangan analog (V)
- V_s = Tegangan Sumber (V)
- Duty Cycle = Lebar pulsa sinyal *PWM* (%)

2.3. Perakitan Komponen Sistem Kendali

Perangkat sensor suhu *MLX90614* menggunakan jenis komunikasi *I2C* dengan menghubungkan pada pin A4 dan A5 pada *Arduino Uno R3*. Sinyal *PWM* 8-bit keluaran dari mikrokontroler tidak bisa langsung digunakan oleh perangkat *vfd*. RC Filter diperlukan untuk merubah sinyal *PWM* menjadi tegangan analog. Rangkaian skematik mikrokontroler dapat dilihat pada gambar 4. Mikrokontroler *Arduino* diprogram untuk memproses suhu yang diterima dari sensor menggunakan persamaan fuzzy untuk menghasilkan nilai output persentase kecepatan. Nilai kecepatan lalu diubah menjadi nilai *PWM* 8-bit menggunakan persamaan 1. sebagai keluaran besar lebar pulsa (*duty cycle*).



Gambar 4. Rangkaian Mikrokontroler



Gambar 5. Rangkaian *Variable Frequency Drive*

Sensor suhu *MLX90614* dipasang tepat pada pengecam mata pisau dan diarahkan tepat pada ujung mata pisau seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Letak Pemasangan Sensor Suhu Pada Mesin

2.4. Pengujian Keluaran Logika Fuzzy

Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai perhitungan dan pengukuran tegangan analog dari mikrokontroler. Nilai tegangan analog sebagai keluaran pin *PWM* mikrokontroler *Arduino Uno R3* menjadi nilai referensi untuk menentukan frekuensi kendali motor. Masukan tegangan analog yang berubah-ubah akan merubah tampilan nilai frekuensi pada *vfd*. Hubungan antara input suhu, dan kecepatan motor dapat dilihat dalam bentuk grafik.

2.5. Pengujian Performansi Alat

Pengujian dilakukan dengan mengukur dan mencatat kecepatan motor dalam waktu tertentu saat sistem kendali kecepatan motor diaktifkan. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisa melalui *software Matlab* untuk mendapatkan grafik respon sistem. Pengujian dilakukan sebanyak dua kali yaitu saat sebelum dan sesudah diterapkannya metode kendali kecepatan motor menggunakan logika *fuzzy* dengan titik acuan kecepatan maksimum. Kedua data perhitungan yang diperoleh dibandingkan sebagai acuan performa sistem kendali yang dibuat. Respon sistem kendali motor pompa *coolant* ditampilkan akan ditampilkan dalam bentuk grafik dan parameter performansi dalam satuan waktu milidetik.

2.6. Analisa Performansi Alat

Analisa Performansi Alat dicari dengan cara menghitung konsumsi energi dengan menggunakan rumus (3.), Besar konsumsi daya komponen mesin lainnya (selain motor pompa *coolant*) dapat dihitung dengan menggunakan rumus (4.), Besar konsumsi energi yang dibutuhkan motor pompa setelah diaplikasikannya sistem kendali menggunakan metode logika *fuzzy* dihitung dengan menggunakan rumus (5.), dan besar penurunan konsumsi energi dihitung dengan menggunakan rumus (6.).

Pengujian dilakukan dengan proses pemotongan linier sepanjang benda kerja untuk mendapatkan data suhu yang stabil berdasarkan jarak sensor yang konsisten terhadap benda kerja dan mata pisau. Kecepatan *spindle* dan kecepatan pemotongan juga diatur konstan agar gerakan pemotongan menjadi stabil. Stabilitas proses pemotongan diperlukan demi mendapatkan suhu yang identik antara kedua pengujian. Tabel 2. menampilkan spesifikasi mesin yang digunakan pada proses pengujian.

Tabel 2. Spesifikasi Mesin Yang Digunakan

Nama Mesin	Mori Seiki CL2000 / Fanuc 0i-TD
Tipe Mesin	CNC Bubut 2 Axis
Tegangan Sumber Terukur	373 Volt Line-to Line
Tegangan Mesin Terukur	216 Volt Line-to-Line
<i>Power Factor</i>	0,90
Ukuran Benda Kerja	Silinder Pejal / Diameter 48 x 150 mm
Kecepatan Putar <i>Spindle</i>	700 Rpm
Kecepatan Potong	0,15 mm/rev
Pemotongan	0,3 mm per siklus / Sepanjang 100 mm

Jumlah energi yang diperlukan motor pompa *coolant* dapat dihitung menggunakan persamaan 3.

$$E_{pompa} = \frac{P \times t}{1000} \tag{3}$$

Keterangan :

- E_{pompa} = Energi yang digunakan motor pompa (KWh)
- P = Daya motor pompa (Watt)
- t = Waktu (Jam)

Pengumpulan data energi dilakukan setiap pemotongan benda kerja sedalam 5 mm hingga diameter benda kerja tersisa 10 mm. Dua buah material diperlukan untuk mendapatkan sepuluh data untuk dikumpulkan. Jumlah pemotongan dan jumlah energi yang dibutuhkan setiap proses pemotongan akan ditampilkan dalam bentuk tabel.

$$E_{mesin} = E_{tf} - E_{pompa} \quad (4)$$

$$E_{pf} = E_{mf} - E_{mesin} \quad (5)$$

$$\Delta E = E_{tf} - E_{mf} \quad (6)$$

dimana

E_{mesin} = Energi yang digunakan komponen mesin lainnya (KWh)

E_{tf} = Energi yang digunakan mesin saat menggunakan sistem kendali bawaan mesin (KWh)

E_{mf} = Energi yang digunakan mesin saat menggunakan sistem kendali logika *fuzzy* (KWh)

E_{pompa} = Energi yang digunakan motor pompa sebelum diterapkannya sistem kendali menggunakan metode logika *fuzzy* (KWh)

E_{pf} = Energi yang digunakan motor pompa setelah diterapkannya sistem kendali menggunakan metode logika *fuzzy* (KWh)

ΔE = Selisih energi dari kedua pengujian (KWh)

Pengumpulan data suhu dilakukan setiap 106 mili detik untuk meningkatkan respon perubahan kecepatan motor pompa. Sebanyak 5300 data suhu setiap pengujian dan dilakukan sebanyak 10 kali uji coba akan ditampilkan dalam bentuk grafik.

2.7. Analisa Efisiensi Daya

Analisa Efisiensi Daya dicari dengan cara menghitung biaya konsumsi energi listrik untuk dibayarkan oleh perusahaan yang digunakan untuk sebuah mesin *cnc* dalam satu tahun. Konsumsi energi listrik mesin *cnc* dapat bervariasi jumlahnya, sesuai dengan besar output dari setiap motor yang bergerak. Perbedaan kecepatan spindle, serta besar torsi yang dikeluarkan oleh motor servo dapat meningkatkan konsumsi energi dari setiap mesin. Penulis menghitung konsumsi energi listrik mesin dengan mengasumsikan bahwa sepuluh mesin lain dengan jenis mesin serupa, mengerjakan proses pekerjaan *cnc* yang sama meliputi program pemotongan, kecepatan spindle, kecepatan potong dan kedalaman potong. Waktu yang dibutuhkan dalam satu kali proses pengujian yang dilakukan adalah 9 menit 22 detik, maka jumlah rata-rata hasil produksi dari sebuah mesin *cnc* dalam satu hari adalah 150 buah. Jumlah hasil produksi tersebut dapat dihitung untuk mendapatkan konsumsi energi satu mesin *cnc* dalam waktu 24 jam. Jumlah hasil produksi sebuah mesin dalam 24 jam adalah 150 buah. Nilai tersebut digunakan untuk menghitung biaya konsumsi energi listrik untuk dibayarkan oleh perusahaan yang digunakan untuk sebuah mesin *cnc* dalam satu tahun dapat dihitung dengan persamaan (7), (8) dan (9).

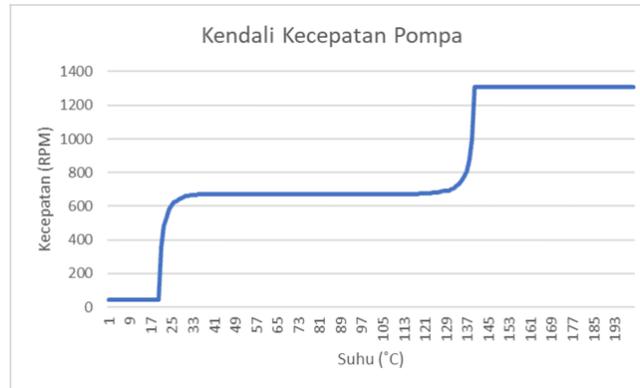
$$E_{per\ tahun} = E_{per\ hari} \times 365 \quad (7)$$

$$Biaya\ Listrik\ (mesin\ CNC) = E_{per\ tahun} \times Biaya\ per\ KWh \quad (8)$$

$$Penghematan = Biaya\ Sebelum - Biaya\ sesudah \quad (9)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perubahan Kecepatan Pompa Coolant

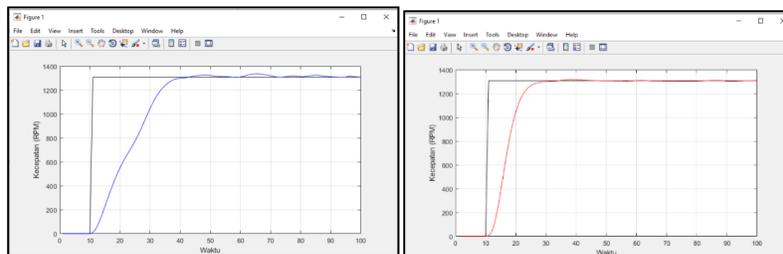


Gambar 7. Hubungan Antara Input Suhu Benda Kerja Dan Kecepatan Motor Pompa

Hasil defuzzifikasi sistem kendali logika *fuzzy* merepresentasikan hubungan antara input suhu benda kerja, dengan kecepatan motor pompa dapat dilihat pada gambar 7. Hasil hubungan antara suhu benda kerja terhadap kecepatan motor pompa yang diperoleh dari algoritma *fuzzy* yang didesain menunjukkan grafik yang tidak linear. Suhu benda kerja 0 °C hingga 20 °C, kendali kecepatan motor pompa adalah 43 Rpm. Suhu benda kerja 21 °C hingga 34 °C, kecepatan motor pompa meningkat perlahan hingga 667 Rpm. Suhu 35 °C hingga 118 °C, kendali kecepatan motor pompa stabil pada 673 Rpm. Suhu 119 °C hingga 139 °C, kecepatan motor pompa meningkat perlahan hingga 997 Rpm. Suhu 140 °C hingga lebih dari 200 °C, kendali kecepatan motor pompa adalah 1308 rpm.

3.2. Pengujian Kinerja Sistem Kendali Fuzzy

Grafik respon sistem kendali motor pompa *coolant* ditampilkan pada gambar 8.



Gambar 8. Grafik Respon Sistem Kendali Original Mesin dan Logika *Fuzzy*

Data perhitungan yang diperoleh dalam satuan milidetik adalah sebagai berikut:

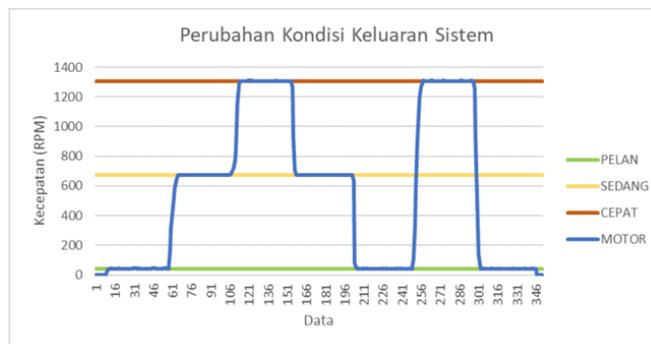
Tabel 3. Data Perhitungan Kinerja Sistem Kendali

Jenis	Kendali Bawaan Mesin	Kendali Logika <i>Fuzzy</i>
Waktu Naik (T_r)	1930 md	884 md
Waktu Tunak (T_s 2%)	6642 md	2620 md

Jenis	Kendali Bawaan Mesin	Kendali Logika Fuzzy
Waktu Puncak (T_p)	6500 md	3800 md
Overshoot (%Os)	2.14 %	0.68 %
Puncak ($Peak$)	1336 Rpm	1317 Rpm
Tunak Minimum (S_{min})	1181 Rpm	1178 Rpm
Kesalahan Kondisi Stabil (SSE)	0 Rpm	0 Rpm

Hasil perhitungan diatas menunjukkan waktu naik sistem (T_r) menurun sebanyak 1046 milidetik atau lebih dari satu detik, *overshoot* (%os) yang terjadi menurun hingga 1,46 persen dan besar fluktuasi kecepatan ($Peak-S_{min}$) menurun dari 155 Rpm menjadi 139 Rpm. Peningkatan tersebut juga terlihat dari menurunnya waktu tunak (T_s) yaitu waktu sistem untuk memasuki respon 2% dari *steady state*, dimana sistem kendali bawaan mesin membutuhkan waktu 6642 milidetik sedangkan sistem kendali menggunakan logika *fuzzy* hanya membutuhkan 2620 milidetik. Selisih waktu tunak dari kedua sistem tersebut adalah 4022 milidetik. Kesalahan kondisi stabil (*Error Steady-State*) dari sistem ini adalah 0 rpm dengan membutuhkan waktu 10 detik 600 milidetik untuk memasuki respon stabil maksimum.

Performa sistem kendali juga ditinjau berdasarkan kemampuan respon sistem terhadap perubahan kondisi (*state*) keluaran (*output*) terhadap perubahan nilai masukan (*input*) yang signifikan. Pengujian dilakukan dengan menyimulasikan nilai masukan dan mencatat setiap perubahan nilai dari setiap keluaran sistem selama lima detik sehingga kondisi keluaran *fuzzy* (PELAN, SEDANG, dan CEPAT) dapat berubah-ubah. Data yang diperoleh dalam satuan waktu (milidetik) ditampilkan pada gambar 9. dan tabel 4.



Gambar 9. Grafik Waktu Perubahan Kondisi Keluaran Sistem

Tabel 4. Waktu Perubahan Kondisi Keluaran Sistem

Perubahan Kondisi			Waktu (md)
PELAN	–	SEDANG	742
PELAN	–	CEPAT	848
SEDANG	–	PELAN	318
SEDANG	–	CEPAT	742
CEPAT	–	PELAN	530
CEPAT	–	SEDANG	318

3.3. Pengujian Pada Proses Pemotongan

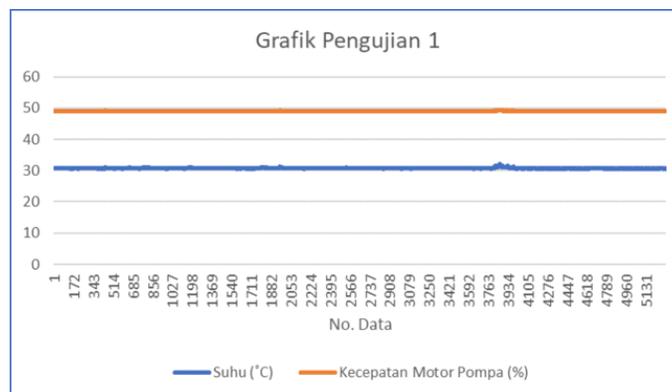
Tabel 5. menampilkan jumlah pemotongan dan jumlah energi yang dibutuhkan pada setiap proses pemotongan.

Tabel 5. Data Jumlah Energi Pada Setiap Pengujian

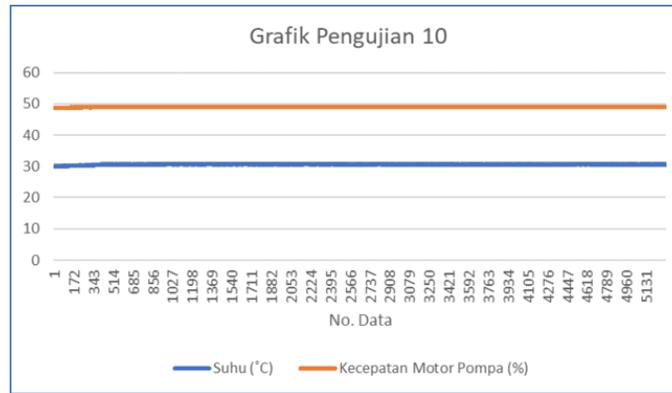
No. Uji Coba	Benda Kerja	Diameter (mm)		Total Energi (KWh)	
		Awal (D ₀)	Akhir (D ₁)	Tanpa <i>fuzzy</i> (E _f)	Dengan <i>fuzzy</i> (E _{mf})
1	Pertama	35	30	0,29	0,23
2		30	25	0,30	0,23
3		25	20	0,30	0,23
4		20	15	0,30	0,23
5		15	10	0,30	0,23
6	Kedua	35	30	0,30	0,23
7		30	25	0,30	0,23
8		25	20	0,30	0,22
9		20	15	0,29	0,23
10		15	10	0,30	0,23
		Rata-Rata (Kwh)		0,30	0,23

Besar rata-rata dari energi listrik yang digunakan dalam satu kali proses pemotongan selama 9 menit 22 detik adalah 0,30 KWh menggunakan sistem kendali bawaan mesin, dan 0,23 KWh menggunakan sistem kendali logika *fuzzy*. Energi motor pompa pada kecepatan penuh selama siklus proses pemotongan 9 menit 22 detik adalah 0,1401 KWh (persamaan 3.). Jumlah energi yang dibutuhkan oleh komponen mesin lainnya selama proses pemotongan dihitung dari nilai tersebut adalah 0,1596 KWh (persamaan 4.) dan jumlah energi motor pompa *coolant* setelah diaplikasikannya sistem kendali metode logika *fuzzy* dapat dihitung menggunakan rumus sebelumnya (persamaan 5.), dan didapatkan hasil 0,0704 KWh. Besar penurunan energi yang terjadi jika dihitung menggunakan persamaan 6. adalah 69,7 Wh.

Data suhu per detik sebagai bukti diperolehnya nilai penurunan energi listrik pompa coolant dalam salah satu proses uji coba dapat dilihat pada lampiran diakhir laporan. Gambar 10. sampai gambar 11. menampilkan grafik hubungan antara suhu benda kerja dengan kecepatan motor pompa.



Gambar 10. Grafik Pengujian 1



Gambar 11. Grafik Pengujian 10

3.4. Pengukuran Kehalusan Hasil Akhir Benda Kerja

Tabel 6. memuat hasil pengukuran ketinggian permukaan tertinggi dan terendah hasil benda kerja dari kedua pengujian yang dilakukan.

Tabel 6. Pengukuran Kehalusan Benda Kerja

Pengujian	Gambar		Pembacaan Alat Ukur (mm)		Selisih (mm)
	Terendah	Tertinggi	Terendah	Tertinggi	
Tanpa Kendali Fuzzy			0,000	0,003	0,003
Dengan Kendali Fuzzy			0,000	0,003	0,003

Hasil pengukuran kehalusan benda kerja menunjukkan bahwa kehalusan benda kerja dari pengujian pertama dan pengujian kedua memiliki selisih 0,000 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penurunan kecepatan aliran cairan *coolant* hingga kurang lebih 50 persen tidak mempengaruhi kualitas dari benda kerja secara signifikan.

3.5. Biaya Konsumsi Listrik Perusahaan

Tabel 11. Biaya Konsumsi Listrik Perusahaan

	Konsumsi Energi Per Tahun (KWh)	Biaya Konsumsi Energi Listrik Per Tahun
Sebelum Diterapkan	16.425	Rp. 23.717.700
Setelah Diterapkan	12.592,5	Rp. 18.183.570
Penghematan	3.832,5	Rp. 5.534.130

Konsumsi energi listrik dibayarkan oleh perusahaan yang digunakan untuk sebuah mesin *cnc* bubut dalam satu tahun dapat dihitung (persamaan 7.) dan didapatkan hasil 16.425 KWh saat menggunakan metode kendali bawaan mesin dan 12.592,5 KWh saat setelah diterapkannya metode kendali menggunakan logika *fuzzy*. Penghematan energi listrik yang didapatkan adalah 3.832,5 KWh.

Sesuai dengan penyesuaian tarif tenaga listrik oleh PLN bulan April – Juni 2023 (PT. PLN (Persero), 2023), biaya listrik perusahaan yang memiliki golongan B-2/TR adalah Rp.1.444,70 per KWh. Dapat dihitung besar tarif listrik perusahaan dalam satu tahun (untuk mesin *cnc*)(persamaan 8.) adalah Rp. 23.717.700 saat sebelum diterapkan dan Rp. 18.183.570 saat setelah diterapkannya sistem kendali motor pompa *coolant* menggunakan metode logika *fuzzy*. Penurunan biaya listrik perusahaan (persamaan 9.) jika diterapkannya sistem *fuzzy* pada setiap mesin sebanyak Rp.5.534.130 atau sebesar 23,3%.

4. Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode kendali logika *fuzzy* pada sistem kendali kecepatan motor pompa *coolant* mesin CNC bubut menghasilkan peningkatan yang signifikan. Peningkatan tersebut mencakup berbagai aspek, seperti penurunan waktu naik (Tr) sebanyak 1046 milidetik, pengurangan overshoot (%os) sebesar 1,46%, dan penurunan waktu tunak (Ts) untuk mencapai kondisi stabil sistem sebanyak 4022 milidetik.

Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sistem kendali *fuzzy* memiliki respons yang efisien terhadap perubahan nilai masukan yang signifikan. Dalam mengadaptasi perubahan, waktu yang dibutuhkan oleh sistem kendali *fuzzy* adalah sebagai berikut: 742 milidetik untuk perubahan dari kecepatan pelan ke sedang, 848 milidetik untuk perubahan dari kecepatan pelan ke cepat, 318 milidetik untuk perubahan dari kecepatan sedang ke pelan, 742 milidetik untuk perubahan dari kecepatan sedang ke cepat, 530 milidetik untuk perubahan dari kecepatan cepat ke pelan, dan 318 milidetik untuk perubahan dari kecepatan cepat ke sedang.

Selain meningkatkan efisiensi sistem kendali, penerapan metode kendali logika *fuzzy* juga menghasilkan penghematan energi listrik yang signifikan. Konsumsi energi listrik per mesin CNC turun sebesar 0,0697 KWh, dari 0,30 KWh menjadi 0,23 KWh selama proses pekerjaan berlangsung selama 9 menit 22 detik. Hal ini juga berdampak positif pada biaya listrik perusahaan, dengan penurunan sebesar 23,3% dalam satu tahun, yang setara dengan penghematan sejumlah Rp. 5.534.130. Secara keseluruhan, penerapan metode kendali logika *fuzzy* pada sistem kendali motor pompa *coolant* mesin CNC bubut telah membawa manfaat yang nyata dalam hal peningkatan efisiensi dan penghematan biaya operasional.

Referensi

- [1] Hwacheon.co, LTD. (2021, Juni 10). *Panduan Penting Mesin Milling (Frais) CNC*. Diakses pada 17 Juni 2020, dari Hwacheon: <https://hwacheonasia.com/id/CNC-milling-machines>
- [2] PT. Emindo Tri Panca. (2020, November 12). *Pentingnya Coolant Pada Mesin Milling Dan Mesin Bubut*. (PT. Emindo Tri Panca). Diakses pada 17 Juni 2022, dari <https://emindotripanca.com/pentingnya-coolant-pada-mesin-milling-dan-mesin-bubut/>
- [3] Rumondor M.J., P. R. (2020). PENGARUH KECEPATAN ALIRAN PENDINGIN TERHADAP PANAS PEMOTONGAN PADA PEMBUBUTAN BENDA KERJA SILINDRIS. *Jurnal Online Poros Teknik Mesin, Vol. 9 No. 2* , Hal. 149-160.
- [4] Waykenrm. (2021, Mei 17). *Which CNC Coolant Should You Pick When Milling Aluminium*. (Wayken Rapid Manufacturing). Diakses pada 17 Juni 2022, dari <https://waykenrm.com/blogs/which-cnc-coolant-should-you-pick-when-milling-aluminum/>
- [5] Baotn Intellegent Lubrication Technology Co, Ltd. (2020, Januari 11). *MTS-B Immersion Type High Pressure Coolant Pump Vertical Multistage Centrifugal Pump*. (Baotn). Diakses pada 17 Juni 2022, dari <https://www.baotn.com/mts-b-immersion-type-high-pressure-coolant-pump-vertical-multistage-centrifugal-pump.html>
- [6] Zaelani. (2018). *PENGARUH HARMONISA DAN FAKTOR DAYA TERHADAP PENGUKURAN KWH METER SATU FASA DENGAN BEBAN INSTALASI DAYA*. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
- [7] Alhafiz, A. (2020, Agustus). Implementasi Metode Fuzzy Logic Pada Intensitas Lampu di Laboratorium Berbasis Arduino. *Jurnal SAINTIKOM, Vol.19 No.2*, Hal. 36-45.
- [8] Kusumadewi, S. (2002). *Analisis Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [9] Nadhif M., d. S. (2015, Desember). Aplikasi Fuzzy Logic untuk Pengendali Motor DC Berbasis Mikrokontroler ATMega8535 dengan Sensor Photodiode. *Jurnal Teknik Elektro, Vol. 7 No. 2*, Hal. 81-85.
- [10] Setiadji. (2009). *Himpunan & Logika Samar Serta Aplikasinya*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [11] Huda D.N., S. D. (2018). Desain Dan Implementasi Non-Contact Thermometer Menggunakan Infrared Untuk Surveillance Berbasis Board Mikrokontroler. *Jurnal Ilmiah Universitas Tanjungpura (UNTAN), Vol. 2, No. 1*.
- [12] Uddin, M. A. (2010). Design, Implementation and Performance Analysis of a Low-cost Optical Tachometer. *IIUC Studies, Vol.7*, 107.