Perancangan Sistem Pendingin Kontroler Motor pada Mobil Listrik dengan Metode Logika Fuzzy

Muhammad Zulfi Huda Al-haq, Lutfir Rahman Aliffianto, dan Joko Priambodo
Departemen Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e-mail: hudaa.alhaq@gmail.com

***Abstrak*—Dalam perkembangan teknologi otomotif mobil listrik, kontroler motor menjadi salah satu komponen utama yang berfungsi mengatur daya menuju motor penggerak, sehingga banyak mengkonsumsi energi dan menghasilkan panas. Sistem pendingin konvensional memiliki kelemahan dalam konsumsi energi yang tinggi dan kurang optimal dalam mengatur kecepatan pompa pendingin. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pendingin berbasis pengendali logika fuzzy untuk menigkatkan efisiensi energi sekaligus menjaga suhu kontroler motor tetap ideal. Sistem fuzzy yang dirancang berhasil menjawab tujuan penelitian dengan menyesuaikan kecepatan pompa secara otomatis berdasarkan suhu yang terdeteksi, sehingga mampu menghemat konsumsi daya tanpa mengorbankan performa pendinginan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem fuzzy mampu menjaga suhu kontroler motor stabil pada kisaran 44–45 °C dengan konsumsi daya rata-rata hanya 9,15 W, lebih hemat hingga 25% dibandingkan sistem konvensional yaitu sebesar 12,25 W. Evaluasi performa menggunakan nilai *Overall Cooling Performance Index* (OCPI) rata-rata menunjukkan bahwa sistem konvesional memiliki OCPI sebesar 0,85, sistem ON-OFF sebesar 0,60, dan sistem fuzzy logic mencapai nilai tertinggi sebesar 0,87. Hal ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy tidak hanya lebih hemat energi, tetapi juga mampu memberikan performa pendinginan yang optimal.**

Kata Kunci*— *Efisiensi Energi, Kontroler Motor, Logika Fuzzy, Sistem Pendingin.

I. PENDAHULUAN

Dalam era perkembangan teknologi otomotif, mobil listrik menjadi salah satu inovasi yang menawarkan solusi untuk mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil dan menekan emisi karbon dioksida. Salah satu komponen utama dalam mobil listrik adalah kontroler motor. Kontroler motor merupakan komponen yang berfungsi mengatur daya yang dikirimkan tegangan menuju motor, sehingga banyak mengonsumsi energi dan menghasilkan panas. Kenaikan suhu pada kontroler motor yang tidak terkendali dapat menyebabkan penurunan efisiensi, kerusakan komponen, bahkan gangguan pada sistem kendaraan secara keseluruhan [1].

Sistem pendingin pada kontroler motor di mobil listrik menggunakan sistem pendingin konvensional, dengan media cair yang digerakan oleh pompa dan kipas elektrik sebagai pendingin radiator. Pada umumnya pengendalian kipas elektrik masih menggunakan masukan dari *switch*, yang masih mempunyai beberapa kelemahan seperti tidak dilengkapi dengan alarm untuk peringatan bagi pengemudi jika mesin *overheat*, putaran kipas masih bersifat tetap walaupun suhu air radiator *overheat*. Sistem pendingin konvensional cenderung memiliki konsumsi energi yang cukup besar, yang dapat mengurangi efisiensi keseluruhan dari kendaraan listrik. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, konsumsi daya tercatat cukup tinggi, dengan nilai rata-rata sebesar 12,25 Watt. Tingginya konsumsi daya ini disebabkan oleh pompa yang menyala terus-menerus tanpa henti selama proses pengujian berlangsung. Karena aktuator tidak pernah dimatikan, maka beban listrik yang ditarik oleh sistem berlangsung secara konstan.

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan efisiensi sistem pendingin adalah dengan menerapkan metode pengendali *fuzzy logic*. Dengan adanya kontrol *fuzzy logic*, sistem pendingin dapat bekerja secara otomatis dalam merespons perubahan suhu pada kontroler motor, sehingga menjaga suhu tetap stabil di rentang yang aman. Selain meningkatkan efisiensi sistem kendali, penerapan kendali *fuzzy logic* juga menghasilkan penghematan energi listrik[2]. Algoritma pengendali fuzzy banyak digunakan karena perencanaan sistem kendali fuzzy tidak memerlukan persamaan matematika yang rumit, hanya memerlukan aturan (*rule*) dalam bentuk tabel keputusan[3].

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi prototype sistem pendingin untuk kontroler motor pada kendaraan listrik. Prototype ini terdiri dari rangkaian sensor suhu (DS18B20), sensor arus (INA219), mikrokontroler ESP32, serta aktuator berupa fan radiator dan pompa air. Sistem ini menggunakan metode fuzzy logic sebagai pengendali untuk mengatur kecepatan pompa dan kipas berdasarkan nilai suhu yang terdeteksi, sehingga sistem dapat merespons secara adaptif terhadap perubahan suhu kontroler motor. Sistem ini dirancang khusus untuk kebutuhan pendinginan kontroler motor, dengan tujuan meningkatkan efisiensi energi tanpa mengorbankan kinerja dan keandalan operasional.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Pendingin

Sistem pendingin merupakan suatu sistem yang berfungsi menjaga temperatur mesin pada suhu tertentu sesuai dengan desain yang ditentukan agar dapat beroprasi secara

berkelanjutan, dan mencegah terjadinya panas yang berlebihan [4]. Sistem pendingin membantu membuang panas berlebih dari mesin dan menjaga suhu operasi tetap ideal sehingga mesin dapat terus beroperasi secara optimal. Ada berbagai bentuk sistem pendingin mulai dari hembusan udara, media perpindahan (heatsink), aliran air, dan pendingin dengan gabungan dari semua sistem tersebut. Sistem pendingin air pada umumnya terdiri dari beberapa komponen utama yaitu radiator, kipas radiator, dan pompa air.

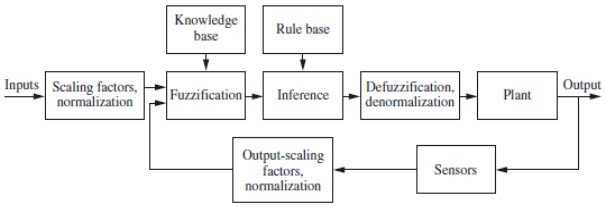
B. Sensor Suhu (DS18B20)

Sensor suhu yang akan digunakan adalah sensor suhu DS18B20, merupakan sensor suhu yang memiliki keluaran digital. DS18B20 memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, yaitu 0,5°C pada rentang suhu -10°C sampai +85°C. Sensor suhu pada umumnya membutuhkan ADC dan beberapa *pin port* pada mikrokontroler, namun sensor ini tidak membutuhkan ADC agar dapat berkomunikasi dengan mikrokontroler dan hanya membutuhkan 1 *wire* saja[5]. Sensor ini merupakan sensor digital dengan 12-bit ADC internal sehingga memiliki kepresisian yang cukup tinggi.

C. Sensor Arus (INA219)

Sensor Arus digunakan untuk mendeteksi arus yang dikonsumsi oleh sistem pendingin secara menyeluruh, jenis sensor arus yang digunakan adalah INA219. INA219 merupakan sensor dapat mengukur arus serta tegangan DC pada rangkaian listrik, sensor ini menggunakan *interface* I2C dan SMBUS-COMPATIBLE yang dapat disambungkan dengan mikrokontroler yang mampu memonitoring suplai tegangan dan *shunt* melalui konversi program *times* dan *filtering* [6].

D. Fuzzy Logic Controler



Gambar 1 Diagram Blok System Fuzzy Logic Controller

Pengendali logika fuzzy (*Fuzzy Logic Controller*) merupakan sistem kendali berbasis aturan logika fuzzy yang digunakan untuk mengontrol sistem tanpa memerlukan model matematis yang mendetail. Pengendali logika fuzzy bekerja dengan menghubungkan fungsi keanggotaan masukan ke fungsi keanggotaan keluaran yang menggambarkan aksi kontrol yang dilakukan. Pengendali logika fuzzy memanfaatkan aturan linguistik berbentuk pernyataan *If-Then* untuk menggambarkan hubungan antara kondisi masukan dan aksi keluaran. Pengendali logika fuzzy memungkinkan pengendalian yang lebih fleksibel dan lebih adaptif terhadap fluktuasi yang tidak terduga dibandingkan dengan pengendalian tradisional, terutama pada sistem *non-linier* atau sistem *multi-input multi-output* (MIMO)[7].

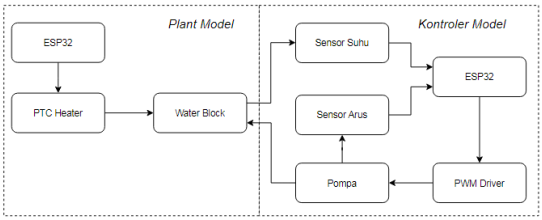
E. Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse width modulation (PWM) secara umum adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda [8]. Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitude dan frekuensi dasar tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitude sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0%-100%. *Duty cycle* merupakan perbandingan antara pulsa *high* dan pulsa *low* pada satu gelombang.

III. METODOLOGI

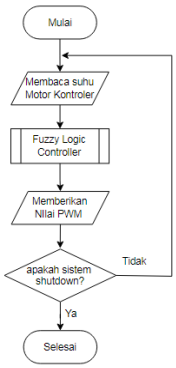
A. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem pada pada *prototype* ini dirancang untuk merepresentasikan sistem pendingin kontroler motor berbasis pendekatan model termal dan logika fuzzy, yang terdiri dari dua bagian, yaitu plant model dan kontroler model. Gambar 3 menunjukan alur interaksi dari sistem pendingin kontroler motor yang dibangun, yaitu *plant model* yang mempersentasikan sebagai kontroler motor, sensor membaca suhu kontroler motor dan mengirimkan pembacaan tersebut menuju kontroler model dan mengatur daya pada aktuator, yaitu berupa *water pump* dan *fan radiator*.



Gambar 2 Diagram Alur Interaksi Arsitektur Sistem

B. Flowchart sistem



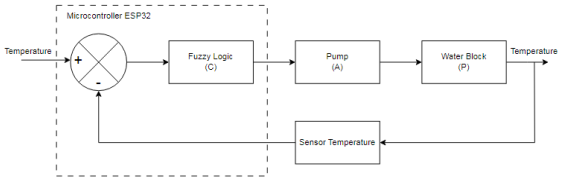
Gambar 3 Flowchart Sistem Pendingin Kontroler Motor

Proses dimulai dengan inisialisasi sistem, dilanjutkan dengan pembacaan suhu pada kontroler motor. Nilai suhu yang terbaca diproses melalui logika fuzzy untuk menetukan tingkat kecepatan pada pompa pendingin. Berdasarkan suhu yang terukur, sistem akan menentukan nilai *output* PWM (*Pulse Width Modulation*) yang mengatur kecepatan pompa. Jika suhu kontroler kurang dari 40°C, maka pompa akan bekerja dengan *output* PWM *low* (0–75). Jika suhu berada pada rentang 30–70°C, maka output PWM berada pada level *mid* (50–150). Bila suhu meningkat ke kisaran 80–90°C, maka output PWM berada pada level *high* (120-220). Apabila suhu melebihi rentang-rentang tersebut, sistem akan memberikan

output PWM maksimal (205–255). Output PWM ini kemudian digunakan untuk mengatur kecepatan pompa, yang akan mengalirkan *coolant* menuju kontroler motor sebagai media pendingin kontroler motor.

C. *Diagram Blok Sistem*

Diagram blok sistem merupakan representasi visual dari keseluruhan alur kerja dan hubungan antar komponen pada sistem pendingin kontroler motor yang dirancang. Gambar 4 adalah proses sistem pendingin kontroler motor pada kendaraan listrik dengan logika fuzzy. *Input* suhu pada *water block* dikirim ke mikrokontroler sebagai *setpoint* untuk dilakukan proses logika fuzzy yang menghasilkan keputusan bedasarkan aturan yang sudah dirancang untuk menentukan tingkat kerja pompa. Pompa berfungsi untuk mengalirkan air atau *coolent* menuju *water block* sebagai media menurunkan suhu pada *water block*. Aliran air pada pompa menuju *water block* akan dikontrol berdasarkan keluaran dari logika fuzzy. Sensor suhu mengukur suhu aktual pada *water block* dan mengirimkan umpan balik (*feedback*) ke mikrokontroler apakah nilai suhu sudah sesuai dengan *setpoint* yang ditentukan.



Gambar 4 Diagram Blok Sistem Pendingin

D. *Implementasi Algoritma Fuzzy*

Penelitian ini menggunakan kontrol logika fuzzy untuk mengatur arus pada sistem pendingin kontroler motor berdasarkan analisis perubahan suhu. Proses dimulai dengan inisialisasi port pada mikrokontroler ESP32 yang menerima data dari dua sensor suhu DS18B20, yaitu suhu water block kontroler motor dan suhu radiator. Data suhu yang diterima dimasukkan ke dalam variabel untuk kemudian diproses menggunakan metode fuzzy logic berdasarkan aturan (rule) yang telah ditentukan. Pada tahap fuzzifikasi, nilai-nilai suhu dikonversi ke dalam derajat keanggotaan untuk mengevaluasi aturan logika fuzzy yang dibangun dari kombinasi linguistik *If-Then*. Evaluasi ini menentukan tingkat suhu berdasarkan pembacaan sensor dan menghasilkan keluaran berupa nilai keanggotaan dari masing-masing kondisi suhu. Selanjutnya, pada tahap defuzzifikasi, sistem mengambil nilai maksimum dari derajat keanggotaan suhu sebagai acuan untuk menentukan aksi pengendalian, yaitu mengatur pengaktifan pompa pendingin secara adaptif sesuai kondisi suhu aktual.

Tabel 1 Membership Function Input Suhu

Membersip Function	**Range Nilai**
Safe	[0-40]
Normal	[30-70]
Panas	[60-90]
Kritis	[85-100]

Tabel 2 Membership Function Output Kontrol

Membersip Function	**Range Nilai**
Low	[0-75]
Mid	[50-150]
High	[120-220]
Full	[205-255]

Tabel 3 Rule Base

No	**Rule Base**
1	Jika suhu *Safe*, maka output kontrol adalah *Low*
2	Jika suhu Normal, maka output kontrol adalah *Mid*
3	Jika suhu Panas, maka output kontrol adalah *High*
4	Jika suhu Kritis, maka output kontrol adalah *Full*

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Pengujian Sensor*

1) *Pengujian Sensor Arus*

Sensor arus yang digunakan ialah modul sensor INA219 yang digunakan unutk mengukur konsumsi arus pada sistem pendingin kontroler motor. Pengujian sensor arus dilakukan dengan cara membandingkan pengukuran nilai arus dari sensor INA219 dengan pengukuran nilai arus dari alat ukur yaitu multimeter

Tabel 4 Tabel Hasil Pengujian Sensor Arus

Percobaan ke-	Hasil Pengukuran (A)		Error (%)
	Multimeter	Sensor INA219	
1	0.19	0.19	0.00
2	0.33	0.33	0.00
3	0.52	0.52	0.00
4	0.80	0.81	1.25
5	0.86	0.86	0.00
6	1.05	1.06	0.95
7	1.21	1.21	0.00
8	1.41	1.40	0.71
9	1.86	1.90	2.15
10	2.34	2.39	2.14
Rata-rata Error			0.58

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 4 Dapat diketahui bahwa persentase rata-rata error dari perbandingan pengukuran nilai arus menggunakan sensor INA219 dan multimeter berada pada angka 0.58%. Nilai tersebut menunjukkan deviasi yang sangat kecil terhadap hasil pengukuran referensi, terutama jika dibandingkan dengan akurasi tipikal sensor INA219 yang tercantum dalam datasheet, yaitu **±1%** dari pembacaan arus.

2) *Pengujian Sensor Suhu*

Sensor suhu yang digunakan ialah sensor DS18B20 yang digunakan untuk mengukur suhu water block pada kontroler. Pengujian sensor suhu dilakukan dengan cara membandingkan pengukuran nilai suhu dari sensor DS18B20 dengan pengukuran nilai suhu dari alat ukur yaitu termometer digital.

Tabel 5 Tabel Hasil Pengujian Sensor Suhu

Percobaan ke-	Hasil Pengukuran (˚C)		Error (˚C)
	Thermometer	Sensor DS18B20	
1	43.00	42.81	0.19
2	49.90	51.00	1.1
3	56.90	57.00	0.1
4	75.40	74.50	0.9
5	87.60	88.50	0.9
Rata-rata Error			0.64

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 5 Dapat diketahui

bahwa rata-rata error dari perbandingan pengukuran nilai suhu menggunakan sensor DS18B20 dan termometer berada pada angka 0,64˚C. Nilai ini masih berada dalam batas toleransi akurasi sensor yang tercantum dalam datasheet, yaitu ±0,5 °C untuk rentang suhu antara -10 °C hingga +85 °C. Meskipun nilai rata-rata error sedikit melebihi angka tersebut, perbedaan sebesar 0,14 °C dari batas akurasi tipikal masih dapat dianggap wajar, mengingat adanya kemungkinan variasi toleransi pada termometer referensi, kalibrasi sensor, serta fluktuasi suhu.

B. Pengujian Rangkaian Driver PWM

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara nilai PWM *duty cycle* terhadap tegangan keluaran yang terukur (V_{RMS}) pada rangkaian driver, serta melihat seberapa besar tegangan yang dapat dihantarkan ke beban saat dikendalikan oleh sinyal PWM. Rangkaian driver ini terdiri dari optocoupler PC817 dan transistor TIP122 sebagai penguat sinyal untuk menggerakkan beban arus tinggi.

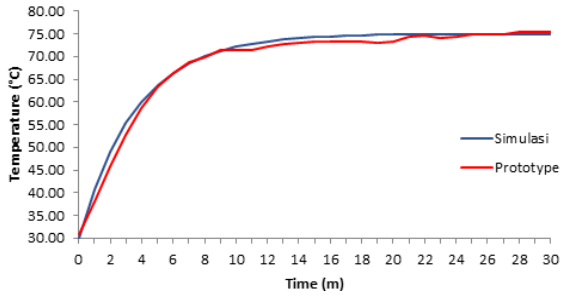
Tabel 6 Tabel Hasil Pengujian Rangkaian PWM Driver

PWM (%)	Vcc (V)	V_{RMS} (V)
10	12	3.38
20	12	4.52
30	12	5.69
40	12	6.82
50	12	7.97
60	12	9.06
70	12	10.13
80	12	10.99
90	12	11.49
100	12	11.46

Berdasarkan hasil data pengujian rangkaian *PWM Driver* yang telah dilakukan, bisa dilihat pada tabel 6, dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai *duty cycle* PWM berbanding lurus dengan peningkatan tegangan keluaran (V_{RMS}) hingga rentang 80%. Tegangan keluaran berasal dari supplai Vcc yang dikendalikan melalui kombinasi optocoupler PC817 dan transistor TIP122.

C. Pengujian Prototype Respon Suhu Kontroler Motor

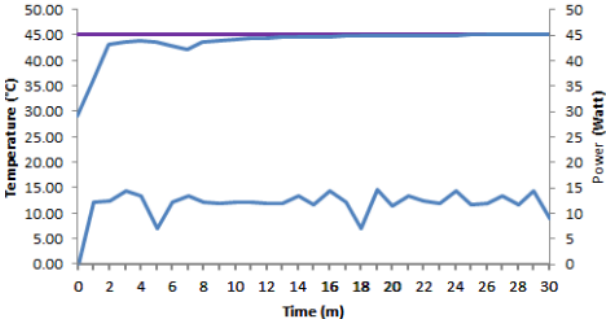
Hasil pengujian menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan dinamika suhu aktual dengan tingkat akurasi yang tinggi. Hal ini ditunjukkan dari kemiripan bentuk kurva yang dapat dilihat pada gambar 5, yaitu temperatur antara pengujian *prototype* dan hasil simulasi, baik pada fase awal pemanasan (*ramp-up*) maupun pada fase *steady-state*. Pada fase awal pemanasan, terlihat kemiripan pola *ramp-up* antara simulasi dan *prototype*. Meskipun terdapat deviasi suhu yaitu tertinggi pada menit ke-2 sebesar 3,27 °C, hal ini dapat dijelaskan oleh faktor-faktor seperti inersia termal komponen fisik, serta kondisi lingkungan yang tidak sepenuhnya ideal. Waktu yang dibutuhkan kedua kurva baik simulasi maupun *prototype* untuk mencapai kondisi *steady-state* ialah sekitar menit ke-13. Selama proses pemanasan tidak terjadi overshot dan fluktuasi secara signifikan yang melebihi batas suhu secara ekstrim. Namun, terjadi fluktuasi cenderung kecil pada hasil prototype yaitu pada menit ke-20 hingga menit ke-27.



Gambar 5 Grafik Perbandingan Respon Suhu Prototype dengan Simulasi

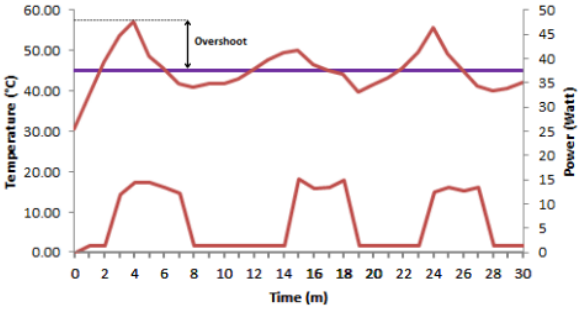
D. Pengujian Beban pada Sistem Pendingin Kontroler Motor

1) Pengujian Sistem Tanpa Gangguan



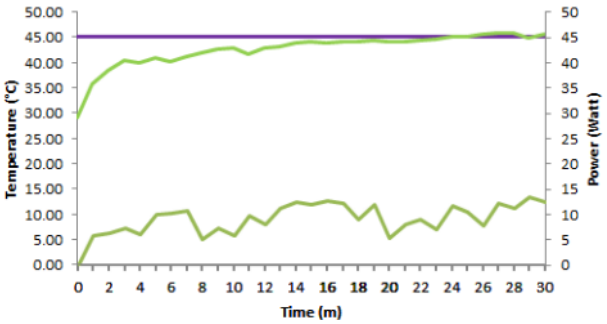
Gambar 6 Grafik Respon Suhu Tanpa Gangguan Sistem Pendingin tanpa Pengaturan

Hasilnya menunjukkan bahwa sistem ini mampu menjaga suhu tetap stabil pada kisaran 44°C hingga 45°C setelah sekitar 10 menit yang dapat dilihat pada gambar 6. Konsumsi daya tercatat cukup tinggi, yaitu rata-rata sebesar 12,25 Watt**.** Hal ini disebabkan oleh pompa yang menyala terus-menerus tanpa henti selama proses pengujian berlangsung. Karena aktuator tidak pernah dimatikan, maka beban listrik yang ditarik oleh sistem berlangsung secara konstan.



Gambar 7 Grafik Respon Suhu Tanpa Gangguan Sistem Pendingin metode ON-OFF

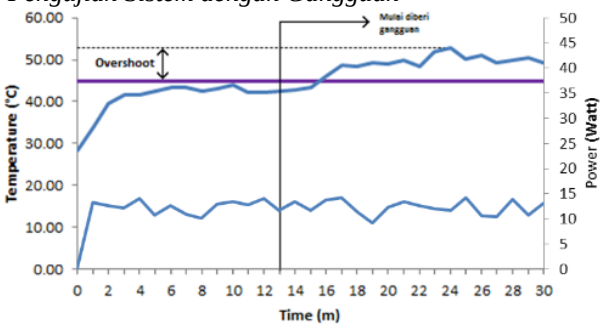
Hasil pengujian sistem pendingin dengan metode ON-OFF menunjukkan bahwa pompa aktif saat suhu mencapai 50 °C dan mati saat turun ke 40 °C. Sistem ini menghasilkan respons suhu yang tidak stabil dengan pola fluktuasi berulang, seperti terlihat pada Gambar 7. Pada menit awal, suhu naik cepat dan mencapai puncak 57 °C pada menit ke-4 sebelum pompa aktif. Setelah suhu turun di bawah 40 °C, pompa mati dan suhu kembali meningkat. Konsumsi daya rata-rata hanya 6,46 W, lebih hemat dibanding sistem tanpa pengaturan karena pompa hanya bekerja saat dibutuhkan. Namun, fluktuasi suhu cukup besar, dengan overshoot tertinggi 12 °C pada menit ke-4, dan tidak tercapai kestabilan suhu dalam rentang ±1 °C, sehingga sistem tidak memiliki settling time yang jelas.



Gambar 8 Grafik Respon Suhu Tanpa Gangguan Sistem Pendingin metode Fuzzy

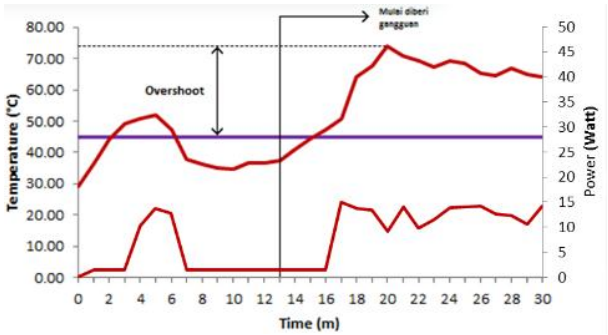
Gambar 8 merupakan hasil pengujian sistem pendingin dengan metode fuzzy, yaitu konsumsi arus pada pompa akan dikontrol sesuai dengan suhu yang terbaca oleh mikrokontroler. Data menunjukkan bahwa suhu awal sistem berada pada 29,19 °C dan secara bertahap meningkat hingga mencapai 45,56 °C pada menit ke-30. Suhu tertinggi tercatat pada menit ke-28 sebesar 45,81 °C. Bentuk grafik respon kenaikan suhu pada sistem pendingin dengan metode fuzzy memiliki kemiripan pada grafik respon kenaikan suhu pada sistem pendingin kovensional, yaitu mampu menjaga suhu tetap stabil pada kisaran 44°C hingga 45°C. Daya yang dikonsumsi pada sistem mengalami kenaikan fluktuatif seiring dengan penigkatan suhu. Nilai Daya tertinggi dicapai pada menit ke-29 sebesar 13,44 Watt dan terendah sebesar 5,16 Watt yaitu pada menit ke-8, sedangkan nilai Daya rata-rata selama pengujian adalah 9,15 Watt, lebih hemat dibanding sistem tanpa pengaturan dan tidak lebih hemat dibanding sistem dengan metode ON-OFF**.**

2) Pengujian Sistem dengan Gangguan



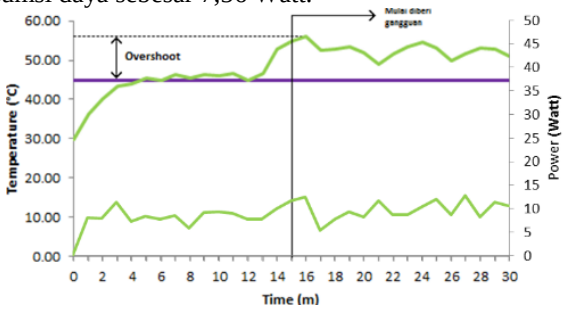
Gambar 9 Grafik Respon Suhu Sistem Pendingin tanpa Pengaturan dengan Gangguan

Hasil pengujian sistem pendingin tanpa pengaturan saat diberikan gangguan berupa peningkatan suhu. Pada menit awal suhu tercatat sebesar 28,31°C, kemudian meningkat secara bertahap dan mencapai 43,88°C pada menit ke-10, dan terjadi penurunan hingga menit ke-12 hingga 42,13 °C. Setelah gangguan diberikan, suhu naik melebihi set point hingga 52,88°C pada menit ke-24, terjadi *overshoot* yaitu sebesar 7,88 °C, lalu turun dan berfluktuasi di kisaran 49–51°C hingga akhir pengujian. Meskipun pompa beroperasi secara terus-menerus, sistem ini masih mengalami sedikit peningkatan suhu akibat gangguan, namun tetap mampu menjaga suhu dalam batas aman tanpa fluktuasi yang cukup besar. Konsumsi Daya rata-rata tetap tinggi, yakni sebesar 12,35 Watt**,** karena pompa selalu aktif sepanjang pengujian.



Gambar 10 Grafik Respon Suhu Sistem Pendingin metode ON-OFF dengan Gangguan

Hasil pengujian sistem pendingin dengan metode On-Off saat diberi gangguan kenaikan suhu menunjukkan respon suhu yang tidak stabil dengan pola osilasi besar, seperti ditampilkan pada Gambar 10. Pada menit awal hingga ke-5, suhu meningkat hingga 52°C karena sistem pendingin belum aktif. Pompa mulai aktif pada menit ke-3, ditandai dengan peningkatan konsumsi daya, namun respon sistem belum cukup cepat untuk menahan lonjakan suhu awal. Suhu menurun drastis menjadi 47,25°C di menit ke-6 dan terus turun hingga 37,31°C pada menit ke-13. Gangguan pemanasan yang diberikan pada menit ke-13 menyebabkan suhu meningkat tajam hingga 74,12°C pada menit ke-20, menghasilkan overshoot tertinggi sebesar 29,12°C. Selanjutnya suhu berfluktuasi di kisaran 64°C hingga 69°C, menunjukkan sistem kurang responsif terhadap gangguan. Konsumsi daya sistem bervariasi antara 1,44 Watt hingga 15 Watt, dengan rata-rata konsumsi daya sebesar 7,56 Watt.



Gambar 11 Grafik Respon Suhu Sistem Pendingin metode Fuzzy dengan Gangguan

Hasil pengujian sistem pendingin dengan metode fuzzy saat diberikan gangguan berupa peningkatan suhu secara tiba-tiba. Pada menit awal, suhu kontroler tercatat sebesar 29,94 °C. Seiring waktu, suhu naik secara bertahap dan mencapai 55,94 °C pada menit ke-16 akibat adanya gangguan panas. Nilai *overshoot* tertinggi pada pengujian ini yaitu sebesar 10,94 °C. Respon sistem fuzzy logic menunjukkan kemampuan adaptif dalam mengatasi gangguan tersebut, ditunjukkan dengan penurunan suhu secara perlahan hingga mencapai 51,06 °C pada menit ke-30. Konsumsi Daya pada sistem ini bervariasi dengan nilai terendah 5,4 Watt yaitu pada menit ke-17 dan tertinggi pada menit ke-27 sebesar 12,84 Watt, sehingga rata-rata konsumi Daya pada sistem pendingin dengan metode fuzzy berada pada angka 9,22 Watt.

E. Analisa Pengujian Beban pada Sistem Pendingin Kontroler Motor

Tabel 7 Tabel Perbandingan Sistem Pendingin tanpa Gangguan

Parameter	Tanpa Pengaturan	Kendali ON-OFF	Metode Fuzzy
Efektivitas Pendinginan	24.62 °C	23.37 °C	25.64 °C
Overshoot	0.03 °C	12.00 °C	0.81 °C
Rata-rata Daya	12.25 Watt	6.46 Watt	9.15 Watt
Konsumsi Energi	6.13 Wh	3.23 Wh	4.58 Wh
Efisiensi Energi	4.02 °C/Wh	7.24 °C/Wh	5.60 °C/Wh
OCPI	0.84	0.64	0.90

Tabel 7 membandingkan kinerja sistem pendingin tanpa gangguan eksternal. Sistem tanpa pengaturan memiliki OCPI 0,84 dan suhu stabil dengan overshoot hanya 0,03 °C, namun efisiensi energi terendah (4,02 °C/Wh) akibat konsumsi daya tinggi (12,25 W), karena pompa bekerja terus-menerus. Kendali ON-OFF**,** yang mengaktifkan pompa di atas 50 °C dan mematikannya di bawah 40 °C, memiliki konsumsi daya terendah (6,46 W) dan efisiensi tertinggi (7,24 °C/Wh), menghemat energi hingga 47,30%. Namun, kestabilan suhu buruk dengan overshoot 12,00 °C dan OCPI terendah (0,64). Sementara itu, *fuzzy logic* menunjukkan kinerja terbaik dengan OCPI tertinggi (0,90), overshoot kecil (0,81 °C), konsumsi daya sedang (9,15 W), dan efisiensi 5,60 °C/Wh, serta mampu menghemat energi 25,31% dibanding sistem tanpa pengaturan, sambil menjaga kestabilan suhu secara adaptif.

Tabel 8 Tabel Perbandingan Sistem Pendingin dengan Gangguan

Parameter	Tanpa Pengaturan	Kendali ON-OFF	Metode Fuzzy
Efektivitas pendinginan	22.98 °C	15.86 °C	19.77 °C
Overshoot	7.88 °C	29.12 °C	10.94 °C
Rata-rata Daya	12,35 Watt	7,56 Watt	9,22 Watt
Konsumsi Energi	6,18 Wh	3,78 Wh	4,61 Wh
Efisiensi Energi	3.72 °C/Wh	4.20 °C/Wh	4.29 °C/Wh
OCPI	0.87	0.56	0.83

Tabel 8 menunjukkan perbandingan performa sistem pendingin saat mengalami gangguan suhu. Sistem tanpa pengaturan mencatat OCPI tertinggi (0,87), overshoot terendah (7,88 °C), dan efektivitas pendinginan tertinggi (22,98 °C), meskipun konsumsi dayanya paling tinggi (12,35 W). Kendali ON-OFF menunjukkan performa terburuk dengan OCPI terendah (0,56) akibat lonjakan suhu hingga 74,12 °C dan overshoot tertinggi (29,12 °C), menandakan kurang responsif terhadap perubahan suhu cepat. Meski demikian, metode ini memiliki efisiensi energi 4,20 °C/Wh dan konsumsi daya rata-rata 7,56 W, menghemat energi hingga 38,80%. Metode *fuzzy logic* mencatat OCPI 0,83 dengan overshoot 10,94 °C pada suhu puncak 55,94 °C. Efisiensinya sebesar 4,29 °C/Wh dengan konsumsi daya 9,22 W, mampu menghemat energi 25,36% dibanding sistem tanpa pengaturan.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian dengan menggunakan tiga metode kontrol (tanpa pengaturan, ON-OFF, dan logika fuzzy), maka diperoleh kesimpulan yaitu sistem pendingin berbasis logika fuzzy menunjukkan performa yang optimal dalam menjaga kestabilan suhu kontroler motor, dengan rata-rata OCPI sebesar 0,87. Pada kondisi tanpa gangguan, suhu dijaga stabil di kisaran 44–45 °C dengan konsumsi daya rata-rata sebesar 9,15 Watt dan efisiensi energi sebesar 5,60 °C/Wh. Sementara pada kondisi gangguan, suhu maksimum tercatat sebesar 54,69 °C dan berhasil diturunkan kembali ke suhu aman dengan konsumsi daya rata-rata sebesar 9,25 Watt dan efisiensi energi sebesar 4,29 °C/Wh. Sistem pendingin berbasis logika fuzzy mampu menghemat energi hingga 25% dibandingkan dengan sistem pendingin tanpa pengaturan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Leo Arinando and Fatkhur Rohman, "Desain dan Analisis Pengaruh Variasi Nilai Beban dan Kecepatan Laju Kendaraan Terhadap Suhu Kontroler Motor BLDC pada Purwarupa Kendaraan Listrik," *TORBO : Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro* , vol. 9, no. 2, pp. 183-187, 2020.

[2] Bagas Setia Ajie Sutikno, Dickyansyah Ramadhan, Putra Wisnu Agung Sucipto, and Novi Laura Indrayani, "Implementasi Metode Fuzzy Logic Pada Kendali Pompa Pendingin Mesin CNC Untuk Meningkatkan Efisiensi Daya," *SENTER 2023: Seminar Nasional Teknik Elektro 2023*, vol. 8, pp. 77-86, 2023.

[3] Henry Nasution, "Performansi Pemakaian Energi pada Sistem Pendingin Bangunan Menggunakan Kendali Termostat, ON/OFF Digital dan Logika Fuzzy," *Jurnal Penelitian Saintek*, vol. 16, no. 2, pp. 133-144, 2011.

[4] Boby Wisely Ziliwu and Mula Tumpu, "Perawatan Dan Perbaikan Sistem Pendingin Mesin Induk Pada Kapal Perikanan," *Jurnal Sains Terapan dan Teknologi*, vol. 1, no. 2, p. 12, Oktober 2020.

[5] Ellia Nurazizah, Achmad Rizal, and Mohamad Ramdhani, "Rancang Bangun Termometer Digital Berbasis Sensor DS18B20," *E-Proceeding of Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 3294-3301, 2017.

[6] Mochamad Aji Prasetyo and Humaidillah Kurniadi Wardana, "Rancang Bangun Monitoring Solar Tracking System Menggunakan Arduino Dan Nodemcu Esp 8266 Berbasis IoT," *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, vol. 4, no. 2, pp. 163-168, 2021.

[7] Timothy J. Ross, *Fuzzy Logic With Engineering Aplications*, 3rd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010.

[8] Leo Arinando and Fatkhur Rohman, "Desain dan Analisis Pengaruh Variasi Nilai Beban dan Kecepatan Laju Kendaraan Terhadap Suhu Kontroler Motor BLDC pada Purwarupa Kendaraan Listrik," *TORBO : Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro* , vol. 9, no. 2, pp. 183-187, 2020.