

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Pembuatan Sistem Monitoring dan Pendinginan Driver Motor

Sistem monitoring dan pendinginan driver motor telah direalisasikan dan dipasang pada kendaraan listrik. Sistem mengintegrasikan Arduino Nano, sensor suhu DS18B20, satu kanal Hall bawaan motor BLDC, LCD 20×4 , driver L298N, serta dua kipas pendingin. Sistem membaca temperatur pada permukaan *driver* dan kecepatan kendaraan, kemudian menggunakan kedua data tersebut sebagai masukan *fuzzy logic* Mamdani untuk menentukan nilai PWM kipas. Hasil pemasangan sistem pada kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Pemasangan Sistem Monitoring Dan Pendinginan Driver

Pada implementasinya, *driver* motor ditempatkan di dalam *box* sistem elektrik. Dua kipas dipasang dengan arah aliran udara menuju *driver* sehingga pendinginan difokuskan pada area tersebut. Sensor DS18B20 dipasang pada permukaan *heatsink driver* sebagai titik pengukuran temperatur. Oleh karena itu, temperatur yang diperoleh merupakan temperatur permukaan pada lokasi pemasangan sensor dan tidak menunjukkan temperatur internal komponen semikonduktor.

Komponen elektrik sistem dirangkai pada PCB untuk menghubungkan Arduino Nano, sensor, LCD, L298N, kipas, serta rangkaian catu daya. Sinyal Hall bawaan motor digunakan sebagai sumber data kecepatan kendaraan, sedangkan proses komutasi motor tetap dilakukan oleh kontroler motor. Susunan komponen elektrik yang telah dipasang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Susunan Komponen Elektrikal

Arduino Nano menerima data temperatur dan kecepatan, kemudian memproses kedua masukan menggunakan *fuzzy logic* Mamdani. Hasil pengolahan berupa nilai PWM yang diteruskan ke L298N untuk mengatur tingkat pengoperasian dua kipas. Kedua kipas menerima nilai PWM yang sama karena digunakan untuk mendinginkan objek termal yang sama, yaitu *driver* motor.

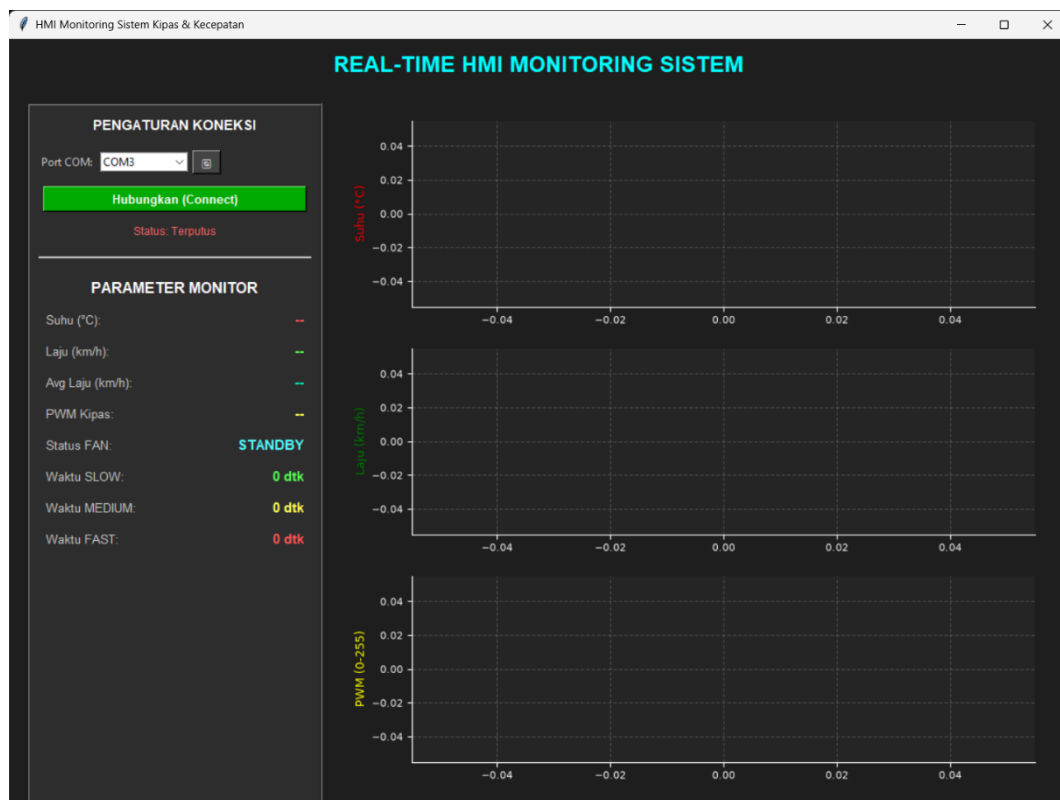
Selain digunakan untuk mengendalikan kipas, hasil pembacaan dan pengolahan sistem ditampilkan melalui LCD 20×4 . Informasi yang ditampilkan terdiri atas temperatur *driver*, kecepatan kendaraan, nilai PWM, dan status pengoperasian. Tampilan LCD yang dihasilkan setelah sistem diimplementasikan ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Tampilan Informasi Sistem Pada LCD 20×4

Status SLOW, MEDIUM, FAST pada LCD mengikuti rentang nilai PWM yang ditetapkan pada program. Status SLOW digunakan pada PWM di bawah 70, MEDIUM pada PWM 70 sampai kurang dari 160, sedangkan FAST digunakan pada PWM mulai dari 160.

Pada saat pengujian, sistem juga dilengkapi HMI berbasis Python sebagai perangkat bantu pencatatan data. Arduino mengirimkan data temperatur, kecepatan, PWM, dan status melalui komunikasi serial. Data tersebut ditampilkan secara *real-time* dan disimpan dalam format CSV untuk digunakan pada proses analisis. HMI tidak digunakan sebagai pengendali utama karena proses pembacaan sensor, pengolahan fuzzy, dan pengaturan kipas tetap dilakukan oleh Arduino Nano. Tampilan awal HMI ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Contoh Tampilan pada HMI

Hasil pembuatan sistem ini menjadi dasar pelaksanaan pengujian komponen, pengujian keluaran fuzzy, pengukuran arus dan daya, serta pengujian pendinginan pada kendaraan.

4.2 Pengujian Komponen Sistem

Pengujian komponen dilakukan untuk memastikan setiap komponen pada sistem monitoring dan pendinginan dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang sebelum digunakan pada pengujian kendaraan. Pengujian meliputi catu daya, sensor suhu DS18B20, pembacaan kecepatan dari sinyal Hall bawaan motor BLDC, serta respons putaran kipas terhadap perubahan nilai PWM melalui L298N.

4.2.1 Pengujian Catu Daya Sistem

Pengujian catu daya dilakukan untuk mengetahui kesesuaian tegangan pada jalur suplai sistem dengan tegangan yang direncanakan. Pengukuran dilakukan pada keluaran *buck converter* 12 V, keluaran *buck converter* 5 V, dan jalur suplai L298N menggunakan multimeter. Dokumentasi pengukuran ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Pengukuran Tegangan

Hasil pengukuran kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan referensi. Selisih absolut dan persentase selisih dihitung menggunakan persamaan yang telah dijelaskan pada persamaan 2.12 dan 2.13. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengukuran tegangan catu daya sistem

No.	Titik pengukuran	Tegangan	Tegangan	Selisih	Persentase
		Referensi	Terukur (V)	Absolut (V)	Selisih (%)
1	Keluaran Buck Converter 12 V	12,00 V	11,95V	0,05V	0,42
2	Keluaran Buck Converter 5 V	5,00 V	4,98V	0,02V	0,40
3	Driver L298N	12,00V	11,87V	0,13V	1,08

Berdasarkan Tabel 4.1, seluruh titik pengukuran menghasilkan tegangan yang mendekati nilai referensi. Selisih terbesar terdapat pada suplai L298N, yaitu 0,13 V atau 1,08%, sedangkan selisih terkecil terdapat pada jalur 5 V sebesar 0,02 V atau 0,40%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa jalur catu daya dapat menyediakan tegangan yang sesuai untuk pengujian sistem.

4.2.2 Pengujian Sensor Suhu DS18B20

Pengujian DS18B20 dilakukan untuk mengetahui kesesuaian pembacaan temperatur pada konfigurasi pemasangan sensor yang digunakan. Nilai temperatur DS18B20 dibandingkan dengan hasil pembacaan *thermogun* pada titik pengujian yang sama. Dokumentasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.6.

**Gambar 4.6** Pengujian Pembacaan Sensor DS18B20 Dan *Thermogun*

Hasil pembacaan kedua alat dicatat secara berpasangan pada setiap kondisi pengukuran. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui besar selisih

pembacaan serta kecenderungan DS18B20 menunjukkan nilai lebih tinggi atau lebih rendah daripada *thermogun*.

Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan Pembacaan DS18B20 Dan *Thermogun*

Pengukuran ke-	<i>Thermogun</i> (°C)	DS18B20 (°C)	Selisih Absolut (°C)	Persentase Selisih (%)
1	27,8	27,6	0,2	0,719
2	32,6	32,4	0,2	0,613
3	30,7	30,9	0,2	0,651

Berdasarkan Tabel 4.2, ketiga pengukuran menghasilkan selisih absolut sebesar 0,2 °C, dengan rata-rata persentase selisih sekitar 0,661%. Pada dua pengukuran pertama, nilai DS18B20 lebih rendah 0,2 °C daripada *thermogun*, sedangkan pada pengukuran ketiga nilainya lebih tinggi 0,2 °C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan DS18B20 berada dekat dengan alat pembanding pada titik pengujian yang dilakukan.

Perbedaan pembacaan dapat dipengaruhi oleh posisi dan kontak probe terhadap permukaan *heatsink*, serta perbedaan karakteristik pengukuran antara sensor kontak dan *thermogun*. Oleh karena itu, hasil ini digunakan sebagai pemeriksaan kesesuaian pembacaan pada konfigurasi sistem, bukan sebagai kalibrasi sensor secara menyeluruh.

4.2.3 Pengujian Pembacaan Kecepatan dari Sinyal Hall

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kesesuaian kecepatan yang dihitung sistem dari sinyal Hall bawaan motor BLDC terhadap hasil pengukuran *tachometer*. Karena *tachometer* menghasilkan nilai dalam RPM, hasil pengukurannya terlebih dahulu dikonversi menjadi km/jam menggunakan persamaan 2.9 hingga 2.11 yang telah dijelaskan pada BAB II. Dokumentasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Pengujian Pembacaan Kecepatan

Hasil perhitungan ketiga pasangan pengukuran disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perbandingan Konversi RPM Tachometer Dengan Kecepatan pada LCD

Pengukuran	Tachometer	Kecepatan	Kecepatan	Selisih	Persentase
Ke-	(RPM)	Hasil	LCD	Absolut	Selisih (%)
		Konversi	(Km/Jam)	(Km/Jam)	
		(Km/Jam)			
1	213,4	17,369	17,5	0,131	0,753
2	372,4	30,311	30,5	0,189	0,625
3	627,2	51,049	51,1	0,051	0,099

Berdasarkan Tabel 4.3, selisih absolut pembacaan kecepatan berada pada rentang 0,051–0,189 km/jam. Rata-rata selisih absolut sebesar 0,124 km/jam, sedangkan rata-rata persentase selisih sekitar 0,493%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan kecepatan dari sinyal Hall menghasilkan nilai yang mendekati hasil konversi *tachometer* pada ketiga titik pengujian.

4.2.4 Pengujian Kipas dan Driver L298N terhadap PWM

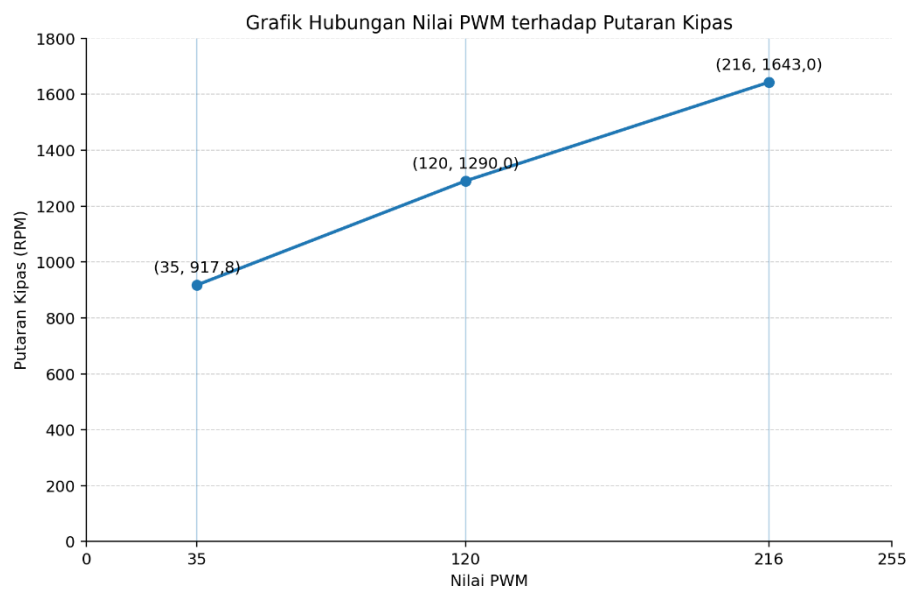
Pengujian dilakukan untuk mengetahui respons putaran kipas terhadap perubahan nilai PWM yang diberikan melalui L298N. Putaran kipas diukur menggunakan *tachometer* pada tiga nilai PWM yang mewakili tingkat pengoperasian Low, Medium, dan Fast. Dokumentasi pengukuran ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Pengukuran Putaran Kipas Menggunakan Tachometer
Hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran putaran kipas terhadap nilai PWM

Nilai PWM	Duty cycle nominal (%)	Tegangan Keluaran Terbaca, Sekitar (V)	Putaran Kipas (RPM)
35	13,73	5,6	917,8
120	47,06	7,5	1.290
216	84,71	9,5	1.643



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan PWM terhadap Putaran Kipas

Berdasarkan data pada Tabel 4.4 dan Grafik pada Gambar 4.9, peningkatan nilai PWM diikuti oleh peningkatan tegangan keluaran yang terbaca pada alat ukur dan peningkatan putaran kipas. Pada PWM 35, tegangan keluaran terbaca sekitar 5,6 V dengan putaran kipas sebesar 917,8 RPM. Pada PWM 120, tegangan meningkat menjadi sekitar 7,5 V dengan putaran sebesar 1.290 RPM. Selanjutnya, pada PWM 216, tegangan terbaca sekitar 9,5 V dengan putaran sebesar 1.643 RPM. Tegangan keluaran yang terbaca belum mencapai catu nominal 12 V. Kondisi ini perlu ditinjau dengan mempertimbangkan bahwa PWM tertinggi yang diuji adalah 216, serta adanya jatuh tegangan pada driver L298N.

Hubungan tersebut tidak langsung menunjukkan kegagalan pengendalian. Nilai PWM merupakan perintah listrik kepada rangkaian penggerak, sedangkan RPM merupakan respons mekanis kipas. Kipas dua kabel menerima pencacahan pada jalur dayanya, sedangkan kipas empat kabel mempunyai masukan PWM tersendiri. Respons elektronik internal kipas ikut berperan ketika catu dayanya dicacah.

4.3 Pengujian Logika Fuzzy Mamdani

Pengujian logika fuzzy Mamdani dilakukan untuk melihat kesesuaian respons program terhadap kombinasi suhu dan kecepatan yang terbaca selama pengujian. Sistem menggunakan tiga himpunan pada masing-masing masukan, yaitu *Ideal*, *Caution*, dan *Danger*, serta tiga himpunan keluaran PWM berupa *Low*, *Medium*, dan *Fast*. Susunan *rule base* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Rule Base Pengendalian Kipas

Himpunan suhu	Kecepatan Ideal	Kecepatan Caution	Kecepatan Danger
Ideal	Slow — R1	Medium — R2	Fast — R5
Caution	Medium — R3	Medium — R4	Fast — R7
Danger	Fast — R6	Fast — R8	Fast — R9

Pada sistem ini, kombinasi suhu dan kecepatan menentukan aturan yang aktif. Kondisi *Ideal–Ideal* menghasilkan keluaran *Slow*, kombinasi yang melibatkan *Caution* dapat menghasilkan *Medium*, sedangkan kombinasi tertentu yang melibatkan *Danger* menghasilkan *Fast*. Kekuatan aktivasi setiap aturan ditentukan menggunakan operator AND dengan metode MIN sesuai rancangan pada BAB II dan BAB III.

Untuk melihat respons fuzzy pada kondisi nyata, dipilih tujuh sampel dari data pengujian jalan landai dengan kipas. Sampel tersebut mencakup kondisi keanggotaan tunggal maupun daerah tumpang tindih antarfungsi keanggotaan. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.6

Tabel 4.6 Sampel keluaran fuzzy berdasarkan data pengujian

Sampel Data ke-	Suhu (°C)	Kecepatan (km/jam)	Aturan Aktif	Aktivasi Keluaran	PWM	Status FAN
1 (Uji 1)	27,7	0,0	R1	Low = 1,00	35	SLOW
12 (Uji 1)	27,7	19,1	R2	Medium = 0,91	120	MEDIUM
55 (Uji 2)	35,1	0,0	R3	Medium = 0,51	120	MEDIUM
16 (Uji 2)	35,1	24,4	R4	Medium = 0,51	120	MEDIUM
20 (Uji 1)	27,7	40,1	R5	Fast = 1,00	216	FAST
1 (Uji 3)	50,5	0,0	R6	Fast = 1,00	216	FAST
28 (Uji 2)	35,2	39,7	R7	Fast = 0,52	212	FAST
22 (Uji 3)	50,1	19,5	R8	Fast = 0,95	216	FAST
25 (Uji 3)	50,0	44,3	R9	Fast = 1,00	216	FAST

Berdasarkan Tabel 4.6, perubahan kombinasi suhu dan kecepatan menghasilkan keluaran PWM yang berbeda. Sampel dipilih untuk memperlihatkan respons pada kondisi keanggotaan tunggal serta daerah tumpang tindih antarfungsi keanggotaan.

4.3.1 Pengujian Rule Base dan Keluaran PWM

Berdasarkan Tabel 4.6, perubahan nilai suhu dan kecepatan menghasilkan aktivasi aturan fuzzy serta keluaran PWM yang berbeda. Pada kondisi suhu 27,7 °C dan kecepatan 0 km/jam, sistem mengaktifkan R1 dengan keluaran Low = 1,00, sehingga menghasilkan PWM sebesar 35 dengan status kipas SLOW. Ketika kecepatan meningkat menjadi 19,1 km/jam pada suhu yang sama, aturan yang aktif berubah menjadi R2 dengan keluaran Medium = 0,91 dan PWM meningkat menjadi 120, sehingga status kipas menjadi MEDIUM. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan kendaraan dapat meningkatkan kebutuhan pendinginan meskipun suhu masih relatif sama.

Pengaruh suhu juga terlihat pada sampel dengan suhu 35,1 °C. Pada kecepatan 0 km/jam, R3 aktif dengan keluaran Medium = 0,51 dan PWM sebesar 120. Pada kecepatan 24,4 km/jam dengan suhu yang sama, R4 aktif dan tetap menghasilkan keluaran Medium = 0,51 dengan PWM 120. Selanjutnya, pada suhu 27,7 °C dan kecepatan 40,1 km/jam, sistem mengaktifkan R5 dengan keluaran Fast = 1,00 dan menghasilkan PWM sebesar 216. Kondisi ini menunjukkan bahwa kecepatan yang tinggi dapat menyebabkan sistem memberikan pendinginan maksimum meskipun suhu masih berada pada nilai yang relatif rendah.

Pada kondisi suhu yang lebih tinggi, yaitu 50,5 °C dengan kecepatan 0 km/jam, R6 menghasilkan keluaran Fast = 1,00 dengan PWM 216. Hal tersebut menunjukkan bahwa suhu tinggi saja sudah cukup untuk menyebabkan kipas bekerja pada status FAST, meskipun kendaraan dalam keadaan berhenti. Sementara itu, pada suhu 35,2 °C dan kecepatan 39,7 km/jam, R7 menghasilkan keluaran Fast = 0,52 dengan PWM 212. Nilai tersebut sedikit lebih rendah dibandingkan PWM maksimum karena kondisi input masih berada pada daerah transisi fungsi keanggotaan.

Pada suhu 50,1 °C dengan kecepatan 19,5 km/jam, R8 menghasilkan keluaran Fast = 0,95 dan PWM 216. Demikian pula pada suhu 50,0 °C dan kecepatan 44,3 km/jam, R9 menghasilkan keluaran Fast = 1,00 dengan PWM 216. Secara keseluruhan, hasil pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa sistem fuzzy mampu menyesuaikan keluaran PWM berdasarkan kombinasi suhu dan kecepatan kendaraan. Semakin tinggi suhu dan/atau kecepatan kendaraan, keluaran sistem cenderung bergeser dari Low, menuju Medium, hingga Fast, sehingga kecepatan kipas pendingin meningkat sesuai kondisi kerja sistem.

4.3.2 Pengujian Defuzzifikasi dan Perbandingan Keluaran PWM

Pengujian defuzzifikasi dilakukan untuk membandingkan keluaran PWM hasil perhitungan manual dengan nilai PWM yang tercatat pada sistem. Perhitungan menggunakan parameter fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy sesuai program Arduino. Sampel diambil dari data pengujian jalan landai dengan kipas. Defuzzifikasi menggunakan metode centroid.

Tujuh sampel yang digunakan berasal dari data pengujian jalan landai dengan kipas dan dipilih untuk mewakili kondisi keluaran *Low*, *Medium*, *Fast*, serta

daerah transisi antarfungsi keanggotaan. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Sampel Rekaman Data

Sampel	Aktivasi	Aktivasi	Aktivasi	Centroid	PWM	Selisih	Persentase
	Low	Medium	Fast	manual	tercatat	absolut	selisih (%)
1	1,00	0	0	35,2381	35	0,2381	0,676
2	0	0,91	0	120,0000	120	0,0000	0,000
3	0	0,51	0	120,0000	120	0,0000	0,000
4	0	0,51	0	120,0000	120	0,0000	0,000
5	0	0	1,00	216,6111	216	0,6111	0,282
6	0	0	1,00	216,6111	216	0,6111	0,282
7	0	0	0,52	212,4869	212	0,4869	0,229
8	0	0	0,95	216,2083	216	0,2083	0,096
9	0	0	1,00	216,6111	216	0,6111	0,282
Rata-rata	—	—	—	—	—	0,3074	0,205

Berdasarkan Tabel 4.7, sembilan sampel pengujian menghasilkan keluaran PWM yang mendekati hasil defuzzifikasi manual. Rata-rata selisih absolut sebesar 0,3074 satuan PWM, sedangkan rata-rata persentase selisih sebesar 0,205%. Selisih terbesar sebesar 0,6111 PWM ditemukan pada sampel 5, 6, dan 9.

Sampel 2, 3, dan 4 menghasilkan centroid sebesar 120 meskipun derajat aktivasinya berbeda. Hal ini terjadi karena fungsi keanggotaan Medium berbentuk segitiga simetris dengan titik tengah pada PWM 120. Pemotongan fungsi keanggotaan pada ketinggian yang berbeda tetap mempertahankan posisi titik beratnya.

Pada keluaran Fast, perubahan derajat aktivasi menghasilkan centroid yang berbeda. Aktivasi sebesar 0,52 menghasilkan centroid 212,4869, aktivasi sebesar 0,95 menghasilkan centroid 216,2083, sedangkan aktivasi penuh menghasilkan centroid 216,6111. Dengan demikian, hasil keluaran dipengaruhi oleh bentuk fungsi keanggotaan dan tingkat aktivasinya.

Kesembilan sampel menunjukkan kesesuaian keluaran pada kondisi yang mewakili masing-masing aturan R1–R9. Namun, setiap sampel tersebut hanya mengaktifkan satu aturan. Pengujian ini belum mencakup seluruh kemungkinan kombinasi masukan, khususnya kondisi tumpang tindih yang mengaktifkan beberapa aturan secara bersamaan.

4.4 Pengujian Konsumsi Daya Sistem Monitoring dan Pendingin

Pengujian konsumsi daya dilakukan untuk mengetahui perubahan kebutuhan daya sistem monitoring dan pendinginan pada beberapa tingkat PWM. Pengukuran arus dilakukan pada kabel masukan PCB sehingga nilai yang diperoleh mencakup kebutuhan rangkaian monitoring, L298N, dua kipas, serta rugi-rugi komponen setelah titik pengukuran. Dokumentasi pengukuran arus ditunjukkan pada Gambar 4.10



Gambar 4.10 Pengukuran arus masukan PCB pada nilai PWM 120

Pengujian dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai PWM dengan arus dan daya masukan rangkaian. Pada program, kedua kipas menerima perintah PWM yang sama melalui driver L298N. Perubahan nilai PWM digunakan untuk mengatur tingkat pengoperasian kedua kipas.

Tegangan masukan PCB pada pengujian sebesar 12,83 V dan digunakan sebagai dasar perhitungan daya pada seluruh kondisi karena pengukuran arus dilakukan pada titik masukan yang sama. Daya masukan dihitung menggunakan Persamaan (2.16), sedangkan *duty cycle* PWM mengacu pada Persamaan (2.14).

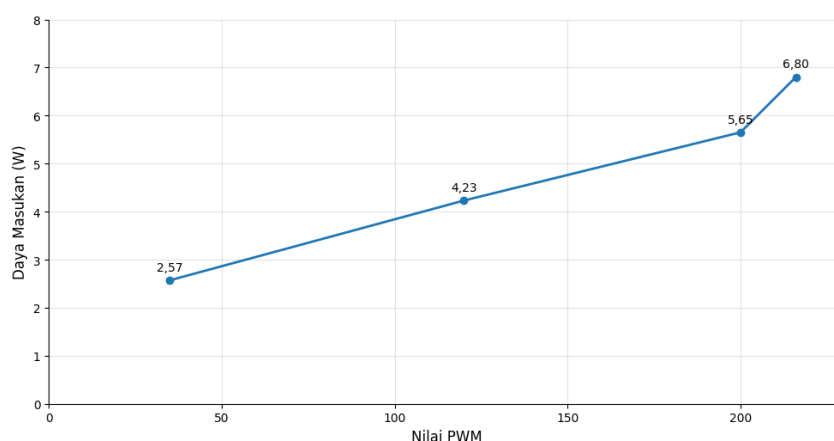
Hasil pengukuran arus, perhitungan *duty cycle*, dan daya masukan ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Pengukuran Arus Masukan PCB Pada Beberapa Nilai PWM

PWM Duty Cycle	Arus Masukan PCB	Daya Masukan
(%)	(A)	(W)
35	0,20	2,57
120	0,33	4,23
200	0,44	5,65
216	0,53	6,80

Berdasarkan Tabel 4.8, peningkatan PWM diikuti oleh peningkatan arus dan daya masukan sistem. Pada PWM 35, arus yang terukur sebesar 0,20 A dengan daya 2,57 W. Nilai tersebut meningkat menjadi 0,33 A dan 4,23 W pada PWM 120, kemudian 0,44 A dan 5,65 W pada PWM 200, serta mencapai 0,53 A dan 6,80 W pada PWM 216.

Hubungan PWM terhadap daya masukan ditunjukkan pada Gambar 4.11.

**Gambar 4.11** Grafik Hubungan Nilai PWM terhadap Daya Masukan Sistem

Berdasarkan Gambar 4.11, daya masukan meningkat ketika perintah PWM dinaikkan. Namun, kenaikannya tidak bersifat linier terhadap perubahan PWM. Hal ini sejalan dengan pengujian putaran kipas, di mana peningkatan PWM juga menghasilkan perubahan RPM yang tidak proporsional. Dengan demikian, PWM digunakan sebagai perintah tingkat pengoperasian kipas, sedangkan arus, daya, dan RPM merupakan respons aktual sistem..

4.4.1 Perbandingan Kebutuhan Daya

Untuk melihat perbedaan kebutuhan daya pada beberapa tingkat pengoperasian, PWM 216 digunakan sebagai kondisi pembanding karena

merupakan nilai PWM tertinggi yang muncul pada titik pengujian yang digunakan. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perbandingan daya masukan terhadap kondisi PWM 216

PWM	Daya Masukan (W)	Pengurangan Daya (W)	Pengurangan Daya (%)
35	2,57	4,23	62,26
120	4,23	2,57	37,74
200	5,65	1,15	16,98
216	6,80	0,00	0,00

Berdasarkan Tabel 4.9, pengoperasian pada PWM 35 membutuhkan daya 62,26% lebih rendah dibandingkan PWM 216. Pada PWM 120 dan 200, kebutuhan daya masing-masing lebih rendah sebesar 37,74% dan 16,98% dibandingkan kondisi PWM 216.

Hasil tersebut menunjukkan keuntungan pengaturan kipas secara bertingkat. Sistem fuzzy tidak selalu memberikan perintah pengoperasian tinggi, tetapi dapat menghasilkan PWM rendah atau menengah ketika kondisi suhu dan kecepatan belum membutuhkan pendinginan yang lebih besar. Dengan demikian, kebutuhan daya sistem pendinginan dapat disesuaikan dengan kondisi operasi, dibandingkan apabila kipas dioperasikan terus-menerus pada tingkat tinggi.

Nilai pengurangan tersebut merupakan perbandingan daya masukan sistem monitoring dan pendinginan, bukan penghematan energi total kendaraan. Besarnya energi yang digunakan selama perjalanan tetap dipengaruhi oleh lama pengoperasian pada masing-masing tingkat PWM.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengaturan PWM tidak hanya mengubah tingkat putaran kipas, tetapi juga memengaruhi kebutuhan daya sistem monitoring dan pendinginan. Ketika kondisi operasi menghasilkan keluaran PWM rendah, sistem dapat mempertahankan pendinginan dengan kebutuhan daya yang lebih kecil. Sebaliknya, ketika kondisi suhu dan kecepatan membutuhkan respons pendinginan lebih tinggi, keluaran fuzzy meningkatkan PWM dan daya yang digunakan ikut meningkat. Karakteristik ini menunjukkan fungsi fuzzy sebagai pengatur intensitas pendinginan sekaligus penggunaan daya sesuai kondisi operasi.

4.5 Pengujian Kinerja Pendinginan Driver Motor

Pengujian kinerja pendinginan dilakukan untuk mengetahui perubahan suhu driver motor selama kendaraan menempuh rute pengujian. Pengujian mencakup kondisi jalan landai dengan jarak sekitar 2,3 km dan jalan menanjak dengan jarak sekitar 1,5 km. Pada masing-masing rute, pengujian dilakukan dalam kondisi tanpa kipas dan dengan kipas yang dikendalikan menggunakan logika fuzzy Mamdani.

Sensor DS18B20 dipasang pada permukaan heatsink driver motor untuk memantau suhu pada titik pemasangan sensor. Kecepatan kendaraan diperoleh dari pengolahan pulsa sensor Hall motor BLDC. Data suhu dan kecepatan digunakan untuk menjelaskan kondisi pengoperasian kendaraan selama pengujian, sedangkan data PWM digunakan untuk mengamati keluaran pengendalian kipas. Data suhu, kecepatan, PWM, dan status dicatat melalui HMI dalam format CSV selama kendaraan menempuh rute pengujian. HMI digunakan khusus sebagai perangkat bantu pengujian. Pada penggunaan kendaraan sehari-hari, pembacaan sensor dan pengendalian kipas tetap dijalankan oleh Arduino Nano, sedangkan informasi pengoperasian ditampilkan melalui LCD 20×4 .

Pada pengujian tanpa kipas, kedua kipas tidak dioperasikan, sedangkan pembacaan sensor dan pencatatan data tetap dilakukan. Nilai PWM yang tercatat pada kondisi ini hanya menunjukkan respons algoritma fuzzy dan tidak diteruskan menjadi pengoperasian kipas. Sebaliknya, pada kondisi dengan kipas, nilai PWM digunakan sebagai perintah pengoperasian kedua kipas melalui L298N. Rincian kondisi pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Kondisi Pengujian Kinerja Pendinginan Driver Motor

No.	Jenis rute	Jarak rute	Kondisi pengoperasian kipas
1	Jalan landai	Sekitar 2,3 km	Tanpa pengoperasian kipas
2	Jalan landai	Sekitar 2,3 km	Kedua kipas dikendalikan menggunakan fuzzy Mamdani
3	Jalan menanjak	Sekitar 1,5 km	Tanpa pengoperasian kipas
4	Jalan menanjak	Sekitar 1,5 km	Kedua kipas dikendalikan menggunakan fuzzy Mamdani

Dokumentasi pelaksanaan pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Pelaksanaan Pengujian Kendaraan Dengan HMI

Analisis termal dilakukan berdasarkan perubahan temperatur dari kondisi awal pada masing-masing pengujian. Hasil tersebut tetap dibaca bersama pola kecepatan kendaraan karena kondisi operasi selama setiap perjalanan tidak sepenuhnya sama.

4.5.1 Pengujian Jalan Landai Tanpa Kipas

Pengujian jalan landai tanpa kipas dilakukan pada rute sekitar 2,3 km dengan kedua kipas pendingin tidak dioperasikan. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui perubahan temperatur permukaan *driver* tanpa bantuan *forced-air cooling* dan menjadi kondisi pembandingan terhadap pengujian jalan landai dengan kipas.

Selama pengujian diperoleh 334 rekaman data yang berisi temperatur, kecepatan kendaraan, keluaran PWM, dan status sistem. Meskipun kipas tidak dioperasikan, nilai PWM tetap dihitung dan dicatat oleh program. Oleh karena itu, data PWM pada pengujian ini hanya menunjukkan respons algoritma fuzzy dan tidak merepresentasikan pengoperasian kipas secara fisik.

a. Hasil Pengukuran

Ringkasan hasil pengujian jalan landai tanpa kipas ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Ringkasan Hasil Pengujian Jalan Landai Tanpa Kipas

No	Parameter	Hasil
1	Jarak rute pengujian	Sekitar 2,3 km
2	Jumlah seluruh rekaman	334
3	Suhu awal	28,0 °C
4	Suhu akhir	34,7 °C
5	Suhu minimum	27,9 °C
6	Suhu maksimum	34,7 °C
7	Kenaikan suhu awal hingga akhir	6,7 °C
8	Rata-rata kecepatan	27,13 km/jam
9	Kecepatan maksimum tercatat	44,6 km/jam

Berdasarkan Tabel 4.11, temperatur pada awal pengujian sebesar 28,0 °C dan meningkat menjadi 34,7 °C pada akhir perjalanan. Temperatur maksimum juga sebesar 34,7 °C, sedangkan temperatur minimum sebesar 27,9 °C. Dengan demikian, kenaikan temperatur dari awal hingga akhir pengujian sebesar 6,7 °C.

Untuk memperlihatkan perubahan kondisi selama perjalanan, beberapa data dipilih dari bagian awal, tengah, dan akhir rekaman. Sampel tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Sampel data pengujian jalan landai tanpa kipas

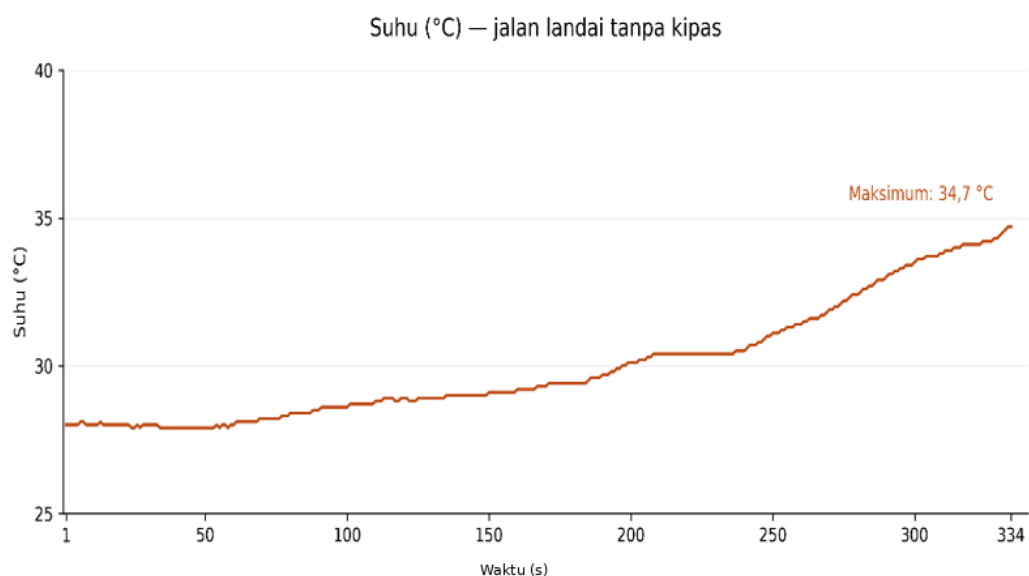
Sampel	Rekaman CSV	Suhu (°C)	ΔT dari Suhu Awal (°C)	Kecepatan (km/jam)	PWM Tercatat
1	1	28,0	0,0	0,0	35
2	56	28,0	0,0	15,5	120
3	112	28,8	0,8	38,3	215
4	167	29,3	1,3	30,7	138
5	223	30,4	2,4	32,6	174
6	279	32,4	4,4	18,7	120
7	334	34,7	6,7	0,0	112

Dari sampel tersebut terlihat bahwa peningkatan temperatur tidak selalu terjadi bersamaan dengan peningkatan kecepatan. Pada rekaman ke-112, kecepatan kendaraan mencapai 38,3 km/jam dengan temperatur 28,8 °C. Namun, pada rekaman ke-279, ketika kecepatan telah menurun menjadi 18,7 km/jam, temperatur justru meningkat menjadi 32,4 °C. Pada akhir pencatatan, kendaraan telah berhenti tetapi temperatur mencapai 34,7 °C.

b. Grafik dan Analisa Hasil Pengujian

Perubahan suhu, kecepatan kendaraan, dan PWM disajikan dalam tiga grafik terpisah agar setiap parameter dapat diamati dengan jelas. Seluruh grafik menggunakan nomor rekaman CSV sebagai sumbu horizontal.

Perubahan suhu selama pengujian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik Suhu Pada Pengujian Jalan Landai Tanpa Kipas

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa temperatur berada di sekitar 28 °C pada awal pengujian dan secara umum meningkat menuju bagian akhir perjalanan. Meskipun terdapat beberapa bagian grafik yang relatif stabil, kecenderungan keseluruhan menunjukkan peningkatan hingga mencapai 34,7 °C. Hal ini menghasilkan kenaikan temperatur sebesar 6,7 °C dari kondisi awal.

Perubahan kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.14.

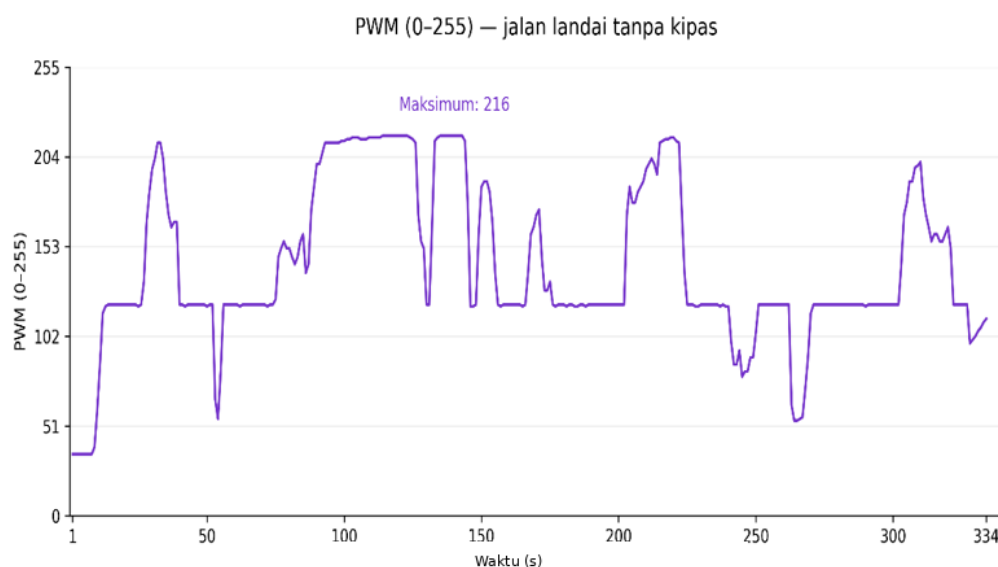


Gambar 4.14 Grafik Kecepatan Pada Pengujian Jalan Landai Tanpa Kipas

Kecepatan berubah sepanjang perjalanan dan mencapai nilai maksimum sebesar 44,6 km/jam pada rekaman ke-140. Dari 334 rekaman yang diperoleh, sebanyak 326 rekaman memiliki nilai kecepatan lebih dari 0 km/jam. Rata-rata pembacaan kecepatan pada rekaman tersebut sebesar 27,13 km/jam.

Nilai tersebut digunakan sebagai rata-rata kecepatan saat kendaraan terdeteksi bergerak dan bukan sebagai kecepatan rata-rata perjalanan berdasarkan jarak dibagi waktu.

Keluaran PWM yang dihasilkan sistem selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Grafik PWM Pada Pengujian Jalan Landai Tanpa Kipas

Keluaran PWM berubah pada rentang sekitar 35–216 sesuai kombinasi temperatur dan kecepatan yang terbaca. Pada awal pengujian, suhu 28,0 °C dan kecepatan 0 km/jam menghasilkan PWM 35. Pada akhir pengujian, kecepatan kembali menjadi 0 km/jam, tetapi temperatur telah meningkat menjadi 34,7 °C sehingga PWM yang tercatat sebesar 112. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa keluaran fuzzy tidak hanya dipengaruhi oleh kecepatan, tetapi juga oleh perubahan temperatur.

Karena kedua kipas tidak dioperasikan pada pengujian ini, perubahan PWM hanya digunakan untuk melihat respons program dan tidak memberikan efek pendinginan terhadap *driver*.

Secara keseluruhan, pengujian jalan landai tanpa kipas menghasilkan kenaikan temperatur sebesar 6,7 °C, dari 28,0 °C menjadi 34,7 °C. Kecepatan maksimum dan temperatur maksimum tidak terjadi pada bagian perjalanan yang sama. Dari pola tersebut terlihat bahwa suhu driver tidak langsung mengikuti perubahan kecepatan kendaraan. Panas yang terbentuk selama perjalanan masih tersimpan pada driver dan heatsink, sehingga suhu tetap dapat meningkat meskipun kecepatan sudah menurun. Hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai pembandingan terhadap kondisi jalan landai dengan kipas.

4.5.2 Pengujian Jalan Landai dengan Kipas

Pengujian jalan landai dengan kipas dilakukan pada rute sekitar 2,3 km dengan kedua kipas pendingin dioperasikan selama perjalanan. Nilai PWM ditentukan oleh Arduino Nano berdasarkan hasil pengolahan *fuzzy logic* Mamdani dari masukan suhu dan kecepatan kendaraan. Kedua kipas menerima nilai PWM yang sama melalui L298N dan mengarahkan aliran udara menuju *driver* motor.

Selama pengujian diperoleh 300 rekaman data yang berisi suhu, kecepatan kendaraan, PWM, dan status sistem. Pada kondisi ini, nilai PWM yang dihasilkan program digunakan secara langsung sebagai perintah pengoperasian kedua kipas.

a. Hasil Pengukuran

Ringkasan hasil pengujian jalan landai dengan kipas ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Ringkasan Hasil Pengujian Jalan Landai Dengan Kipas

No.	Parameter	Hasil
1	Jarak rute pengujian	Sekitar 2,3 km
2	Jumlah seluruh rekaman	300
3	Suhu awal	27,9 °C
4	Suhu akhir	32,6 °C
5	Suhu minimum	27,9 °C
6	Suhu maksimum	33,2 °C
7	Kenaikan suhu awal hingga akhir	4,7 °C
8	Rata-rata kecepatan	29,58 km/jam
9	Kecepatan maksimum tercatat	45,8 km/jam

Berdasarkan Tabel 4.13, suhu pada awal pengujian sebesar 27,9 °C dan meningkat menjadi 32,6 °C pada akhir perjalanan. Suhu maksimum yang tercatat sebesar 33,2 °C, sehingga suhu akhir berada 0,6 °C di bawah nilai maksimum. Secara keseluruhan, kenaikan suhu dari awal hingga akhir pengujian sebesar 4,7 °C.

Untuk melihat perubahan kondisi selama perjalanan, beberapa rekaman dipilih dari bagian awal, tengah, dan akhir pengujian. Data sampel ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Sampel Data Pengujian Jalan Landai Dengan Kipas

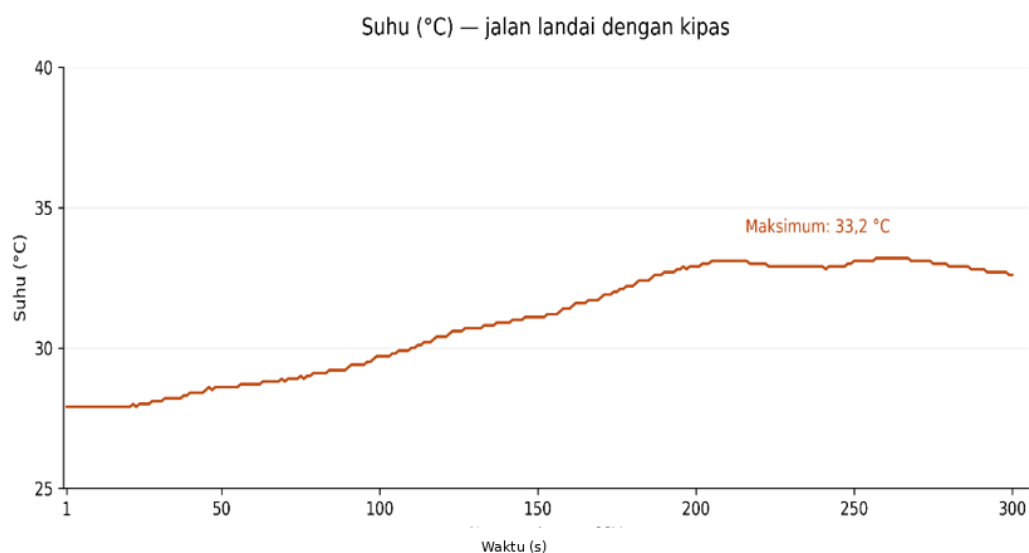
Sampel	Rekaman CSV	Suhu (°C)	ΔT dari Suhu Awal (°C)	Kecepatan (km/jam)	PWM Tercatat
1	1	27,9	0,0	0,0	35
2	51	28,6	0,7	41,1	216
3	101	29,7	1,8	17,3	120
4	151	31,1	3,2	25,0	120
5	201	32,9	5,0	38,1	211
6	251	33,1	5,2	25,0	120
7	300	32,6	4,7	0,0	69

Dari sampel tersebut terlihat bahwa suhu secara umum meningkat sepanjang perjalanan, tetapi tidak selalu mengikuti perubahan kecepatan secara langsung. Pada rekaman ke-51, kecepatan mencapai 41,1 km/jam ketika suhu masih 28,6 °C. Sebaliknya, pada rekaman ke-251 kecepatan telah turun menjadi 25 km/jam, tetapi suhu meningkat menjadi 33,1 °C. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi termal *driver* juga dipengaruhi oleh panas yang terbentuk dan tersimpan selama pengoperasian.

b. Grafik dan Analisa Hasil Pengujian

Perubahan suhu, kecepatan kendaraan, dan PWM disajikan dalam tiga grafik terpisah agar setiap parameter dapat diamati dengan jelas. Seluruh grafik menggunakan nomor rekaman CSV sebagai sumbu horizontal.

Grafik perubahan suhu ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik Suhu Pada Pengujian Jalan Landai Dengan Kipas

Grafik menunjukkan bahwa suhu meningkat secara bertahap dari 27,9 °C hingga mencapai nilai maksimum 33,2 °C pada sekitar rekaman ke-257 sampai ke-267. Setelah mencapai temperatur maksimum 33,2 °C, temperatur menurun sebesar 0,6 °C hingga menjadi 32,6 °C pada akhir pengujian. Penurunan tersebut terjadi ketika kipas masih beroperasi, tetapi bersamaan dengan perubahan kondisi kendaraan sehingga tidak digunakan untuk menilai pengaruh kipas secara terpisah.

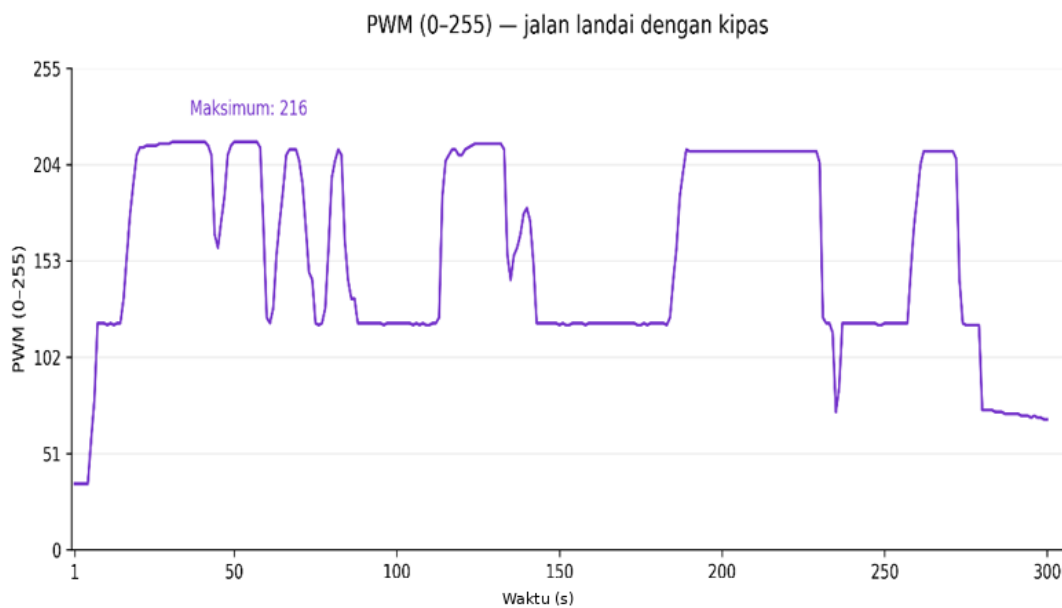
Perubahan kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Grafik Kecepatan Pada Pengujian Jalan Landai Dengan Kipas

Dari gambar 4.17 kecepatan kendaraan berubah sepanjang perjalanan dan mencapai nilai maksimum sebesar 45,8 km/jam pada rekaman ke-128. Dari 300 rekaman, sebanyak 293 rekaman memiliki kecepatan lebih dari 0 km/jam. Rata-rata pembacaan kecepatan saat kendaraan bergerak sebesar 29,58 km/jam. Nilai tersebut digunakan untuk menggambarkan kondisi kecepatan selama kendaraan bergerak dan bukan kecepatan rata-rata berdasarkan jarak dibagi waktu perjalanan.

Perubahan keluaran PWM ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Grafik Keluaran PWM Pada Pengujian Jalan Landai Dengan Kipas

Nilai PWM berubah pada rentang **35–216** sesuai kombinasi suhu dan kecepatan yang terbaca. Sebagai contoh, pada rekaman ke-51 suhu 28,6 °C dan kecepatan 41,1 km/jam menghasilkan PWM 216. Sementara itu, pada rekaman ke-251 suhu lebih tinggi, yaitu 33,1 °C, tetapi kecepatan turun menjadi 25 km/jam sehingga PWM yang tercatat sebesar 120. Data tersebut memperlihatkan bahwa perintah pendinginan ditentukan oleh kombinasi kedua masukan fuzzy, bukan oleh suhu atau kecepatan secara terpisah.

Berbeda dengan pengujian tanpa kipas, pada kondisi ini nilai PWM digunakan langsung untuk mengatur kedua kipas. Namun, PWM tetap merupakan nilai perintah pengendalian, bukan putaran kipas yang terukur selama perjalanan.

Secara keseluruhan, pengujian jalan landai dengan kipas menghasilkan kenaikan suhu sebesar 4,7 °C, dari 27,9 °C menjadi 32,6 °C, dengan suhu maksimum 33,2 °C. Pola suhu, kecepatan, dan PWM selama perjalanan menunjukkan bahwa sistem menyesuaikan tingkat pengoperasian kipas mengikuti kondisi yang terbaca. Hasil pengujian ini selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengujian jalan landai tanpa kipas.

4.5.3 Perbandingan Jalan Landai dengan dan Tanpa Kipas

Perbandingan pengujian jalan landai dilakukan untuk melihat perbedaan kondisi termal *driver* pada rute yang sama, yaitu sekitar 2,3 km, dalam kondisi tanpa kipas dan dengan kipas. Pada pengujian tanpa kipas, nilai PWM tetap dihitung dan dicatat oleh sistem tetapi tidak digunakan untuk mengoperasikan kipas. Sementara itu, pada pengujian dengan kipas, nilai PWM digunakan secara langsung untuk mengatur kedua kipas melalui L298N. Perbandingan dilakukan berdasarkan suhu awal, suhu akhir, suhu maksimum, kenaikan suhu, serta kondisi kecepatan kendaraan selama pengujian.

a. Perbandingan Hasil Pengukuran

Ringkasan hasil pengujian jalan landai dengan dan tanpa kipas ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Perbandingan Hasil Pengujian Jalan Landai Dengan Dan Tanpa Kipas

No.	Parameter	Tanpa kipas	Dengan kipas	Selisih
1	Jarak rute pengujian	±2,3 km	±2,3 km	–
2	Jumlah seluruh rekaman	334	300	34 rekaman
3	Suhu awal	28,0 °C	27,9 °C	0,1 °C
4	Suhu akhir	34,7 °C	32,6 °C	2,1 °C
5	Suhu minimum	27,9 °C	27,9 °C	0 °C
6	Suhu maksimum	34,7 °C	33,2 °C	1,5 °C
7	Kenaikan suhu awal hingga akhir	6,7 °C	4,7 °C	2,0 °C
8	Rata-rata kecepatan	27,13 km/jam	29,58 km/jam	2,45 km/jam
9	Kecepatan maksimum tercatat	44,6 km/jam	45,8 km/jam	1,2 km/jam

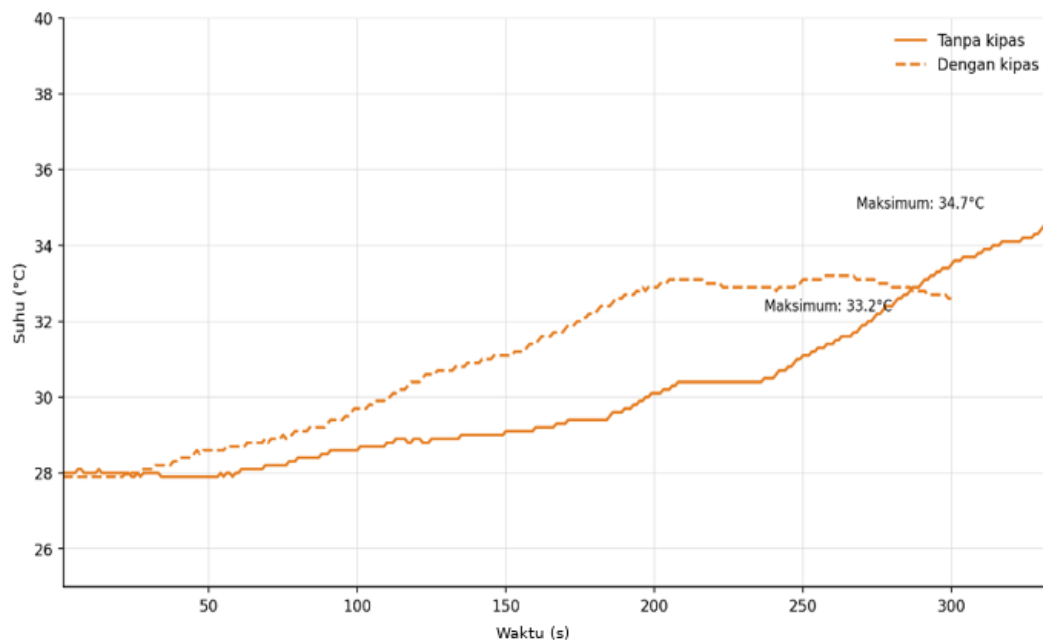
Berdasarkan Tabel 4.15, kedua pengujian dimulai pada suhu yang hampir sama. Suhu awal tanpa kipas sebesar 28,0 °C, sedangkan pada kondisi dengan kipas sebesar 27,9 °C, sehingga selisih awal hanya 0,1 °C. Pada akhir perjalanan, suhu tanpa kipas mencapai 34,7 °C, sedangkan dengan kipas sebesar 32,6 °C. Dengan demikian, suhu akhir pada kondisi dengan kipas lebih rendah 2,1 °C.

Perbedaan juga terlihat pada suhu maksimum. Pada kondisi tanpa kipas, suhu maksimum mencapai 34,7 °C, sedangkan pada kondisi dengan kipas sebesar 33,2 °C atau lebih rendah 1,5 °C. Kenaikan suhu dari awal hingga akhir juga berkurang dari 6,7 °C menjadi 4,7 °C, sehingga terdapat selisih kenaikan sebesar 2,0 °C. Data tersebut sesuai dengan hasil pengujian yang tercatat pada kedua kondisi.

Jika dibandingkan terhadap kenaikan suhu tanpa kipas, kenaikan suhu pada kondisi dengan kipas 29,85% lebih rendah. Nilai ini digunakan untuk menunjukkan perbedaan relatif kenaikan temperatur antara kedua kondisi pengujian dan bukan sebagai nilai efisiensi termal kipas.

b. Grafik Perbandingan Hasil Pengujian

Perbandingan perubahan suhu antara pengujian jalan landai tanpa kipas dan dengan kipas ditunjukkan pada Gambar 4.19.



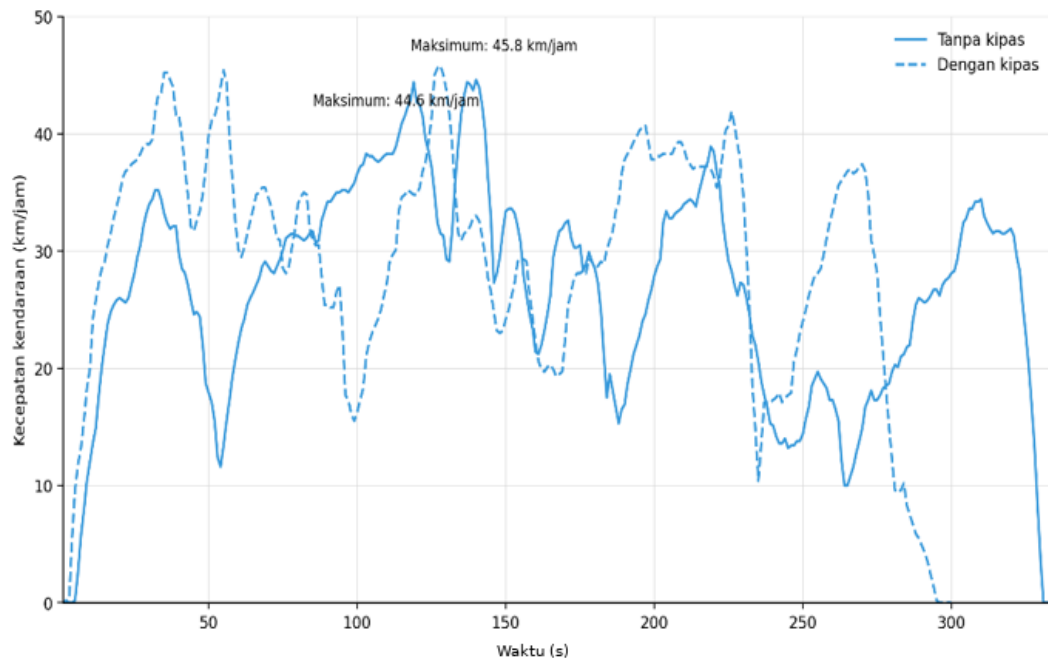
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Suhu Pada Pengujian Jalan Landai Dengan dan Tanpa Kipas

Gambar 4.19 menunjukkan bahwa kedua kondisi memiliki suhu awal yang hampir sama dan sama-sama mengalami peningkatan selama perjalanan. Pada kondisi tanpa kipas, suhu cenderung terus meningkat hingga mencapai 34,7 °C pada akhir pencatatan. Pada kondisi dengan kipas, suhu meningkat hingga maksimum 33,2 °C, kemudian menurun menjadi 32,6 °C pada akhir pengujian.

Perbedaan pola tersebut mulai terlihat lebih jelas pada bagian akhir pencatatan. Pada pengujian tanpa kipas, suhu masih meningkat hingga perjalanan selesai. Sementara itu, pada kondisi dengan kipas, suhu tidak terus meningkat setelah mencapai nilai maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa pada data pengujian yang diperoleh, kondisi dengan kipas menghasilkan kenaikan temperatur yang lebih rendah.

Meskipun demikian, nomor rekaman pada kedua grafik tidak menunjukkan waktu maupun posisi kendaraan yang sama. Jumlah rekaman tanpa kipas sebanyak 334, sedangkan dengan kipas sebanyak 300. Oleh karena itu, grafik digunakan untuk membandingkan kecenderungan perubahan suhu selama perjalanan, bukan membandingkan setiap titik rekaman secara langsung.

Perbandingan kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada Pengujian Jalan Landai Dengan dan Tanpa Kipas

Pada kondisi tanpa kipas, rata-rata kecepatan saat kendaraan bergerak sebesar 27,13 km/jam dengan kecepatan maksimum 44,6 km/jam. Pada kondisi dengan kipas, rata-rata kecepatan sebesar 29,58 km/jam dan kecepatan maksimum 45,8 km/jam. Dengan demikian, pengujian dengan kipas memiliki rata-rata kecepatan 2,45 km/jam lebih tinggi dan kecepatan maksimum 1,2 km/jam lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa kipas.

Perbedaan pola kecepatan menunjukkan bahwa kondisi perjalanan pada kedua pengujian tidak sepenuhnya identik meskipun rute dan jaraknya sama. Karena itu, hasil temperatur tidak dinilai hanya dari satu titik kecepatan, tetapi dilihat dari kecenderungan suhu sepanjang perjalanan serta parameter suhu awal, akhir, maksimum, dan kenaikan suhu.

c. Perbandingan Kenaikan Suhu

Pada jalan landai tanpa kipas, suhu meningkat dari 28,0 °C menjadi 34,7 °C dengan kenaikan sebesar 6,7 °C. Pada kondisi dengan kipas, suhu meningkat dari 27,9 °C menjadi 32,6 °C dengan kenaikan sebesar 4,7 °C. Dengan demikian, kenaikan suhu pada kondisi dengan kipas lebih rendah sebesar 2,0 °C atau 29,85% dibandingkan kondisi tanpa kipas.

Menariknya, rata-rata kecepatan pada pengujian dengan kipas justru sedikit lebih tinggi, yaitu 29,58 km/jam dibandingkan 27,13 km/jam tanpa kipas. Walaupun kondisi perjalanan tidak benar-benar sama, suhu akhir dan suhu maksimum pada pengujian dengan kipas tetap lebih rendah. Hasil tersebut konsisten dengan fungsi *forced-air cooling*, yaitu membantu pelepasan panas dari permukaan *driver* melalui aliran udara yang diberikan oleh kedua kipas.

Dalam sistem yang dibuat, proses pendinginan secara fisik dilakukan oleh kedua kipas, sedangkan *fuzzy logic* Mamdani berfungsi mengatur tingkat pengoperasiannya melalui nilai PWM berdasarkan kombinasi suhu dan kecepatan kendaraan. Oleh karena itu, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa pada rute jalan landai yang diuji, pengoperasian sistem pendinginan membantu membatasi kenaikan temperatur permukaan *driver*.

4.5.4 Pengujian Jalan Menanjak Tanpa Kipas

Pengujian jalan menanjak tanpa kipas dilakukan pada rute sekitar 1,5 km dengan kedua kipas pendingin tidak dioperasikan. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui perubahan temperatur permukaan *driver* ketika kendaraan menempuh kondisi jalan menanjak tanpa bantuan *forced-air cooling*. Hasil pengujian selanjutnya digunakan sebagai pembanding terhadap kondisi jalan menanjak dengan kipas.

Selama pengujian diperoleh 335 rekaman data yang berisi suhu, kecepatan kendaraan, PWM, dan status sistem. Meskipun kipas tidak dioperasikan, nilai PWM tetap dihitung dan dicatat oleh program. Oleh karena itu, PWM pada pengujian ini hanya menunjukkan respons algoritma fuzzy dan tidak menghasilkan pengoperasian kipas secara fisik.

a. Hasil Pengukuran

Ringkasan hasil pengujian jalan menanjak tanpa kipas ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Ringkasan Hasil Pengujian Jalan Menanjak Tanpa Kipas

No	Parameter	Hasil
1	Jarak rute pengujian	Sekitar 1,5 km
2	Jumlah seluruh rekaman	335
3	Suhu awal	26,8 °C
4	Suhu akhir	38,1 °C
5	Suhu minimum	26,8 °C
6	Suhu maksimum	38,1 °C
7	Kenaikan suhu awal hingga akhir	11,3 °C
8	Rata-rata kecepatan	18,15 km/jam
9	Kecepatan maksimum tercatat	42,3 km/jam

Berdasarkan Tabel 4.16, temperatur meningkat dari 26,8 °C pada awal pengujian menjadi 38,1 °C pada akhir perjalanan dan temperatur maksimum yang tercatat. Dengan demikian, kenaikan temperatur dari awal hingga akhir pengujian sebesar 11,3 °C. Data tersebut berasal dari pengujian jalan menanjak tanpa pengoperasian kedua kipas.

Untuk melihat perubahan kondisi selama pengujian, beberapa rekaman dipilih dari bagian awal, tengah, dan akhir pengujian. Data sampel ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Sampel Data Pengujian Jalan Menanjak Tanpa Kipas

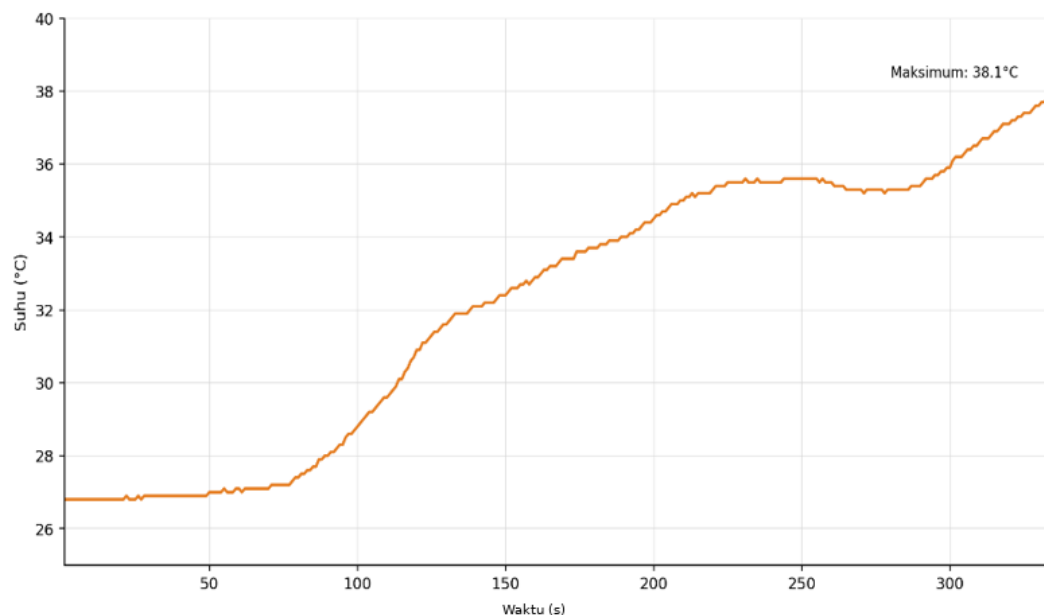
Sampel	Rekaman CSV	Suhu (°C)	ΔT dari Suhu Awal (°C)	Kecepatan (km/jam)	PWM Tercatat
1	1	26,8	0,0	0,0	35
2	57	27,0	0,2	16,7	120
3	113	29,9	3,1	12,2	63
4	168	33,3	6,5	22,0	120
5	224	35,4	8,6	16,5	120
6	280	35,3	8,5	19,7	120
7	335	38,1	11,3	0,0	120

Dari Tabel 4.17 terlihat bahwa temperatur secara umum meningkat sepanjang perjalanan, meskipun kecepatan kendaraan berubah-ubah. Pada rekaman ke-57, temperatur masih sebesar 27,0 °C dengan kecepatan 16,7 km/jam. Temperatur kemudian meningkat menjadi 33,3 °C pada rekaman ke-168 dan mencapai 35,4 °C pada rekaman ke-224. Pada akhir pengujian, kendaraan telah berhenti tetapi temperatur mencapai nilai tertinggi sebesar 38,1 °C.

b. Grafik dan Analisa Hasil Pengujian

Perubahan suhu, kecepatan kendaraan, dan PWM disajikan dalam tiga grafik terpisah agar perubahan masing-masing parameter dapat diamati dengan lebih jelas. Nomor rekaman CSV digunakan sebagai sumbu horizontal.

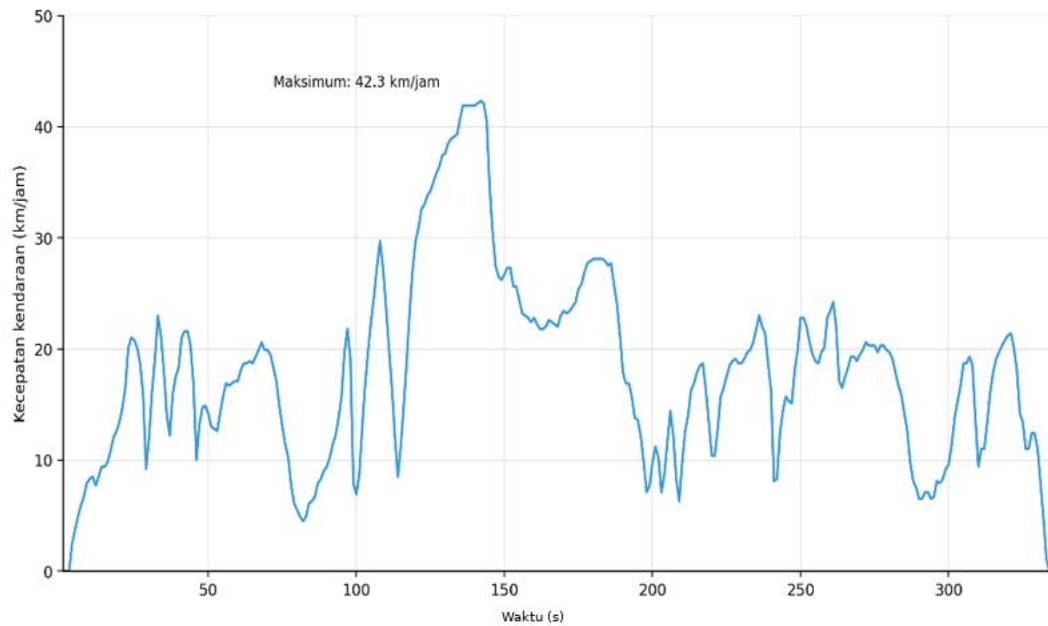
Perubahan temperatur selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Grafik Suhu Pada Pengujian Jalan Menanjak Tanpa Kipas

Gambar 4.21 menunjukkan bahwa temperatur berada di sekitar 26,8 °C pada awal pencatatan dan secara umum terus meningkat menuju bagian akhir perjalanan. Pada beberapa bagian, perubahan temperatur terlihat relatif kecil, tetapi kecenderungan keseluruhannya tetap naik hingga mencapai 38,1 °C. Dari awal hingga akhir pengujian terjadi kenaikan temperatur sebesar 11,3 °C. Draft Tugas Akhir Revisi 2

Perubahan kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.22.

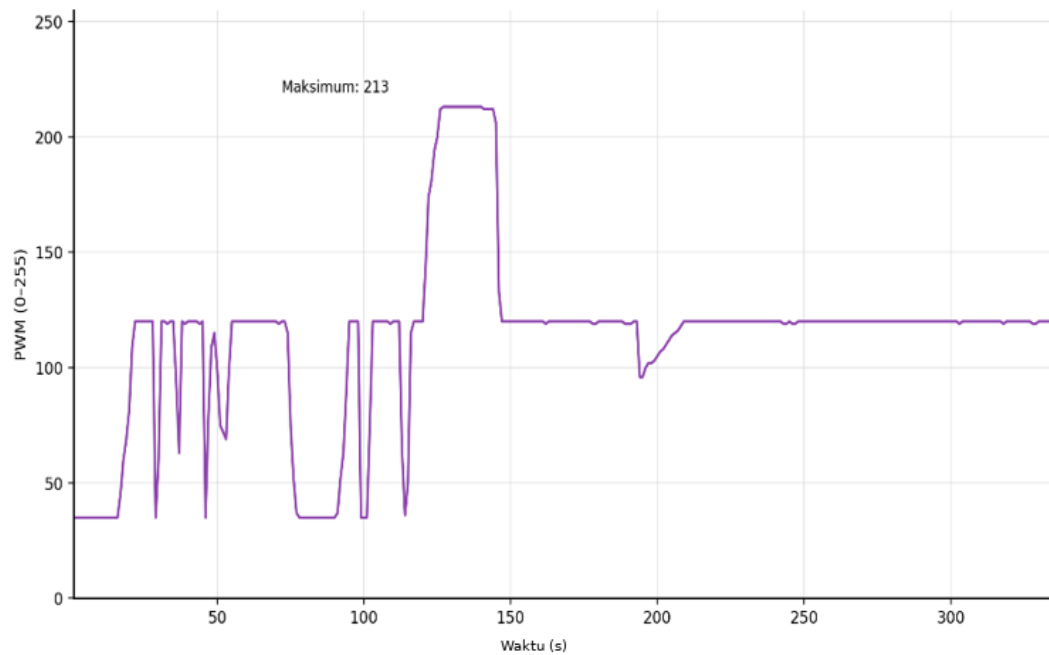


Gambar 4.22 Grafik Kecepatan Pada Pengujian Jalan Menanjak Tanpa Kipas

Kecepatan berubah selama kendaraan menempuh rute menanjak dan mencapai nilai maksimum sebesar 42,3 km/jam pada rekaman ke-142. Dari 335 rekaman yang diperoleh, sebanyak 330 rekaman mempunyai kecepatan lebih dari 0 km/jam. Rata-rata pembacaan kecepatan pada rekaman tersebut sebesar 18,15 km/jam. Nilai ini digunakan sebagai rata-rata kecepatan saat kendaraan terdeteksi bergerak dan bukan sebagai kecepatan rata-rata perjalanan berdasarkan jarak dibagi waktu.

Kecepatan maksimum tidak terjadi bersamaan dengan temperatur maksimum. Pada rekaman ke-142, kecepatan mencapai 42,3 km/jam ketika temperatur sebesar 32,1 °C. Setelah itu, kecepatan mengalami penurunan, tetapi temperatur masih dapat meningkat. Sebagai contoh, pada rekaman ke-224 kecepatan telah turun menjadi 16,5 km/jam sementara temperatur mencapai 35,4 °C. Pola tersebut menunjukkan bahwa temperatur *driver* tidak mengikuti perubahan kecepatan secara langsung karena panas yang terbentuk selama pengoperasian masih dapat tersimpan pada *driver* dan *heatsink*.

Keluaran PWM selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik PWM Pada Pengujian Jalan Menanjak Tanpa Kipas

Nilai PWM berubah pada rentang 35–213 sesuai kombinasi suhu dan kecepatan yang terbaca. Pada awal pencatatan, suhu 26,8 °C dan kecepatan 0 km/jam menghasilkan PWM 35. Pada rekaman ke-142, kecepatan mencapai 42,3 km/jam dengan suhu 32,1 °C dan menghasilkan PWM 212. Sementara itu, pada akhir pencatatan kecepatan telah kembali menjadi 0 km/jam, tetapi suhu meningkat menjadi 38,1 °C sehingga PWM yang tercatat sebesar 120. Draft Tugas Akhir Revisi 2

Perbedaan keluaran tersebut memperlihatkan bahwa nilai PWM tidak ditentukan oleh salah satu masukan saja, tetapi oleh kombinasi suhu dan kecepatan dalam sistem fuzzy. Karena kedua kipas tidak dioperasikan pada pengujian ini, nilai PWM hanya menunjukkan perintah yang dihasilkan program dan tidak menghasilkan aliran udara pendinginan menuju *driver*.

Secara keseluruhan, pengujian jalan menanjak tanpa kipas menghasilkan kenaikan temperatur sebesar 11,3 °C, dari 26,8 °C menjadi 38,1 °C. Temperatur masih meningkat meskipun kecepatan kendaraan beberapa kali mengalami penurunan. Pada kondisi ini tidak terdapat aliran udara dari kedua kipas, sehingga hasil pengujian digunakan sebagai kondisi pembanding terhadap pengujian jalan menanjak dengan kipas.

4.5.5 Pengujian Jalan Menanjak dengan Kipas

Pengujian jalan menanjak dengan kipas dilakukan pada rute sekitar 1,5 km dengan kedua kipas pendingin dioperasikan selama perjalanan. Kedua kipas mengarahkan aliran udara menuju *driver* motor dan menerima nilai PWM yang sama melalui L298N. Besarnya PWM ditentukan oleh hasil pengolahan *fuzzy logic* Mamdani berdasarkan masukan suhu dan kecepatan kendaraan.

Selama pengujian diperoleh 282 rekaman data yang berisi suhu, kecepatan kendaraan, PWM, dan status sistem. Berbeda dengan kondisi tanpa kipas, pada pengujian ini nilai PWM yang dihasilkan program digunakan secara langsung sebagai perintah pengoperasian kedua kipas

a. Hasil Pengukuran

Ringkasan hasil pengujian jalan menanjak dengan kipas ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Ringkasan Hasil Pengujian Jalan Menanjak dengan Kipas

No	Parameter	Hasil
1	Jarak rute pengujian	Sekitar 1,5 km
2	Jumlah seluruh rekaman	282
3	Suhu awal	26,8 °C
4	Suhu akhir	34,2 °C
5	Suhu minimum	26,8 °C
6	Suhu maksimum	34,2 °C
7	Kenaikan suhu awal hingga akhir	7,4 °C
8	Rata-rata kecepatan	20,23 km/jam
9	Kecepatan maksimum tercatat	40,9 km/jam

Berdasarkan Tabel 4.18, temperatur meningkat dari 26,8 °C pada awal pengujian menjadi 34,2 °C pada akhir perjalanan. Temperatur minimum sama dengan kondisi awal, sedangkan temperatur maksimum sebesar 34,2 °C terjadi pada bagian akhir pencatatan. Dengan demikian, kenaikan temperatur dari awal hingga akhir pengujian sebesar 7,4 °C.

Untuk melihat perubahan kondisi selama perjalanan, beberapa rekaman dipilih dari bagian awal, tengah, dan akhir pengujian. Data sampel ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Sampel Data Pengujian Jalan Menanjak Dengan Kipas

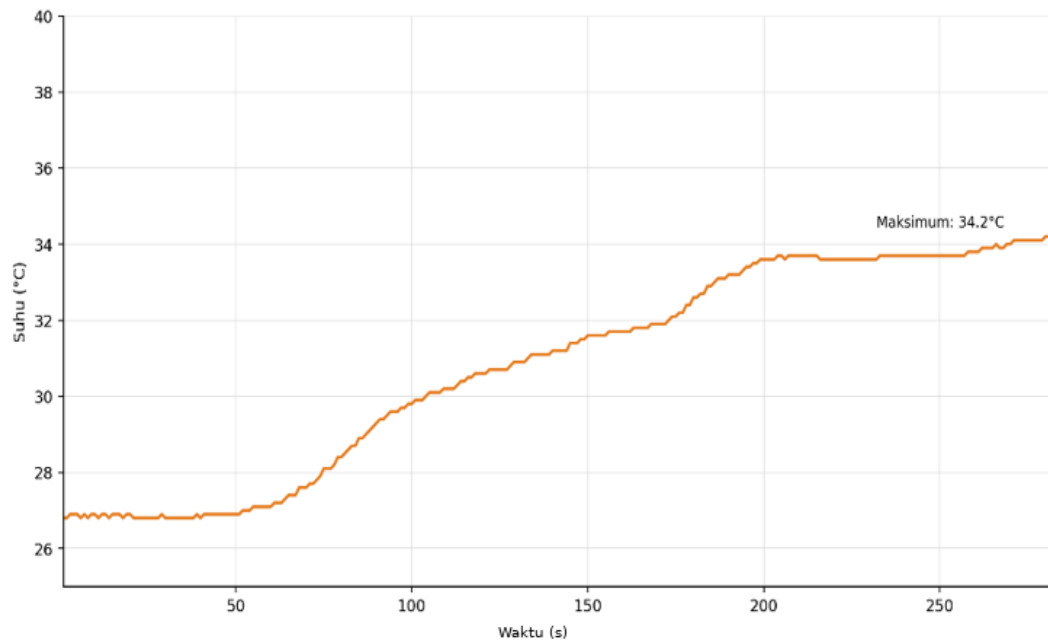
Sampel	Rekaman CSV	Suhu (°C)	ΔT dari Suhu Awal (°C)	Kecepatan (km/jam)	PWM Tercatat
1	1	26,8	0,0	0,0	35
2	48	26,9	0,1	22,0	120
3	95	29,6	2,8	30,5	133
4	142	31,2	4,4	26,0	120
5	188	33,1	6,3	19,3	120
6	235	33,7	6,9	19,3	119
7	282	34,2	7,4	0,0	99

Dari Tabel 4.19 terlihat bahwa temperatur secara umum meningkat sepanjang perjalanan. Pada rekaman ke-48, suhu masih sebesar 26,9 °C ketika kendaraan bergerak 22,0 km/jam. Suhu kemudian meningkat menjadi 29,6 °C pada rekaman ke-95, 31,2 °C pada rekaman ke-142, dan mencapai 33,7 °C pada rekaman ke-235. Pada akhir pencatatan, kendaraan telah berhenti dan temperatur mencapai 34,2 °C.

b. Grafik dan Analisa Hasil Pengujian

Perubahan suhu, kecepatan kendaraan, dan PWM ditampilkan dalam tiga grafik terpisah agar perubahan masing-masing parameter dapat diamati dengan lebih jelas. Nomor rekaman CSV digunakan sebagai sumbu horizontal.

Perubahan temperatur selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.24.

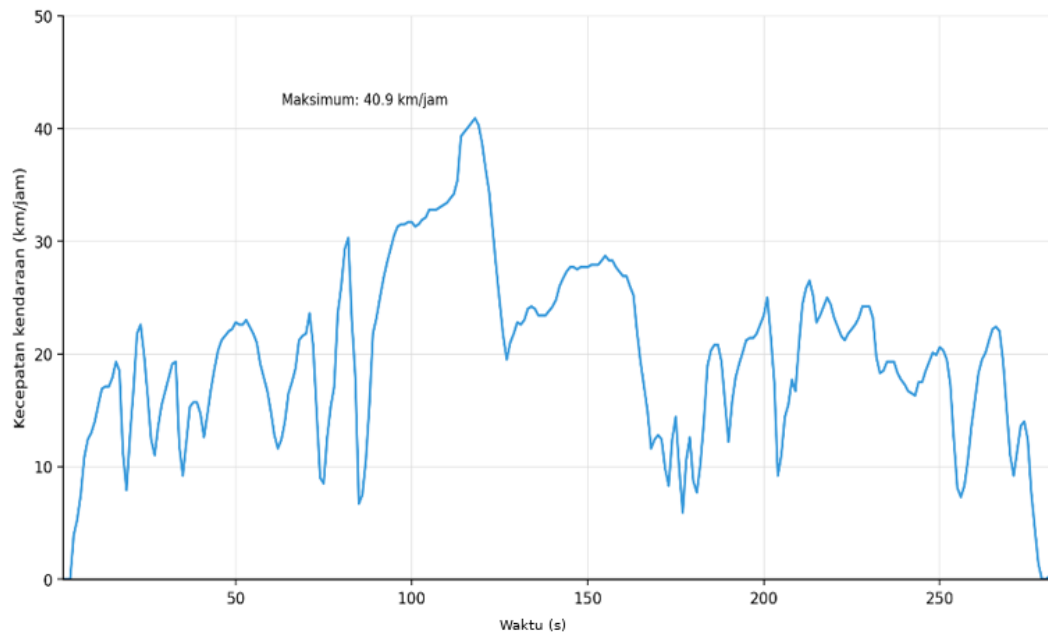


Gambar 4.24 Grafik Suhu Pada Pengujian Jalan Menanjak Dengan Kipas

Gambar 4.24 menunjukkan bahwa temperatur berada di sekitar 26,8 °C pada kondisi awal. Perubahannya masih relatif kecil pada bagian awal, kemudian meningkat lebih jelas setelah sekitar rekaman ke-50. Memasuki bagian pertengahan perjalanan, temperatur berada pada kisaran 31–32 °C dan selanjutnya meningkat menuju kisaran 33 °C. Pada akhir pengujian, temperatur mencapai nilai maksimum sebesar 34,2 °C. Secara keseluruhan, kenaikan temperatur yang tercatat sebesar 7,4 °C.

Meskipun kedua kipas dioperasikan, temperatur tetap mengalami peningkatan selama kendaraan menempuh rute menanjak. Hal ini tidak berarti sistem pendinginan tidak bekerja, karena selama pengoperasian *driver* tetap menghasilkan panas. Aliran udara dari kedua kipas berfungsi membantu pelepasan panas dari permukaan *driver*.

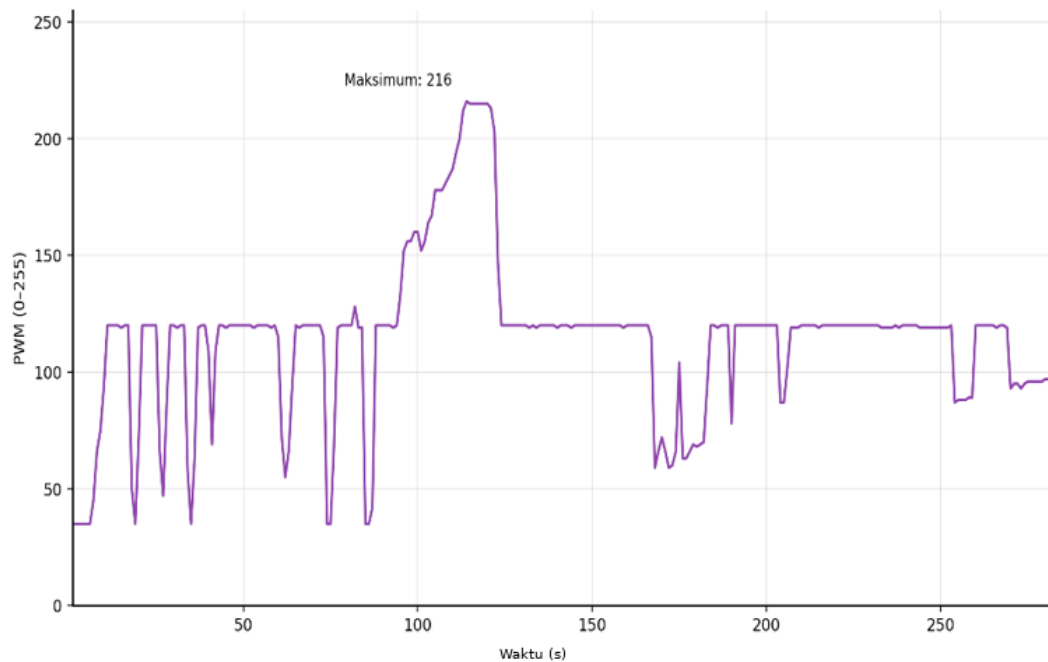
Perubahan kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25 Grafik Kecepatan Pada Pengujian Jalan Menanjak Dengan Kipas

Kecepatan kendaraan berubah selama perjalanan dan mencapai nilai maksimum sebesar 40,9 km/jam pada rekaman ke-118. Dari 282 rekaman yang diperoleh, sebanyak 276 rekaman memiliki kecepatan lebih dari 0 km/jam. Rata-rata pembacaan kecepatan pada rekaman tersebut sebesar 20,23 km/jam. Nilai ini digunakan sebagai rata-rata kecepatan saat kendaraan terdeteksi bergerak dan bukan sebagai kecepatan rata-rata perjalanan berdasarkan jarak dibagi waktu. Draft Tugas Akhir Revisi 2

Kecepatan maksimum tidak terjadi bersamaan dengan temperatur maksimum. Pada rekaman ke-118, kecepatan mencapai 40,9 km/jam ketika temperatur sebesar 30,6 °C. Sementara itu, pada rekaman ke-235 kecepatan telah menurun menjadi 19,3 km/jam, tetapi temperatur meningkat menjadi 33,7 °C. Pola tersebut menunjukkan bahwa temperatur *driver* tidak langsung mengikuti perubahan kecepatan kendaraan karena panas yang telah terbentuk selama pengoperasian masih dapat tersimpan pada *driver* dan *heatsink*.



Gambar 4.26 Grafik PWM Pada Pengujian Jalan Menanjak Dengan Kipas

Nilai PWM berubah pada rentang 35–216 sesuai kombinasi suhu dan kecepatan yang terbaca. Pada awal pencatatan, suhu 26,8 °C dan kecepatan 0 km/jam menghasilkan PWM 35. Nilai PWM maksimum sebesar 216 tercatat pada rekaman ke-114 ketika suhu sebesar 30,4 °C dan kecepatan 39,3 km/jam. Pada rekaman ke-118, ketika kecepatan mencapai nilai maksimum 40,9 km/jam dengan suhu 30,6 °C, sistem menghasilkan PWM 215.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan PWM tidak ditentukan oleh suhu atau kecepatan secara terpisah, tetapi oleh kombinasi kedua masukan pada sistem fuzzy. Pada pengujian ini, keluaran PWM digunakan untuk mengatur kedua kipas. Berdasarkan pengujian pada Subbab 4.2.4, peningkatan PWM diikuti oleh peningkatan putaran kipas. Namun, karena RPM tidak direkam selama perjalanan, nilai PWM pada grafik digunakan sebagai perintah pengoperasian kipas, bukan sebagai nilai putaran aktual saat kendaraan berjalan.

Pada akhir pencatatan, kecepatan kendaraan telah menjadi 0 km/jam dengan temperatur 34,2 °C dan PWM sebesar 99. Nilai tersebut lebih rendah daripada PWM maksimum yang muncul ketika kendaraan bergerak pada kecepatan tinggi. Hal ini kembali menunjukkan bahwa tingkat perintah pendinginan merupakan hasil pengolahan kombinasi suhu dan kecepatan.

Secara keseluruhan, pengujian jalan menanjak dengan kipas menghasilkan kenaikan temperatur sebesar 7,4 °C, dari 26,8 °C menjadi 34,2 °C, dengan rata-rata kecepatan saat bergerak sebesar 20,23 km/jam. Kedua kipas bekerja mengikuti keluaran fuzzy selama pengujian dan memberikan aliran udara menuju *driver*. Hasil ini selanjutnya dibandingkan dengan kondisi jalan menanjak tanpa kipas untuk melihat perbedaan suhu akhir, suhu maksimum, dan kenaikan temperatur pada kedua kondisi.

4.5.6 Perbandingan Jalan Menanjak dengan dan Tanpa Kipas

Perbandingan pengujian jalan menanjak dilakukan untuk melihat perbedaan kondisi termal *driver* ketika kendaraan menempuh rute sekitar 1,5 km dalam kondisi tanpa kipas dan dengan kipas. Kedua pengujian menggunakan sistem monitoring yang sama, sedangkan perbedaannya terletak pada pengoperasian sistem pendinginan. Pada kondisi tanpa kipas, nilai PWM tetap dihitung dan dicatat oleh program tetapi tidak digunakan untuk mengoperasikan kipas. Sementara itu, pada kondisi dengan kipas, keluaran PWM digunakan untuk mengatur kedua kipas melalui L298N.

Perbandingan dilakukan berdasarkan suhu awal, suhu akhir, suhu maksimum, kenaikan suhu, serta kondisi kecepatan kendaraan selama pengujian. PWM tidak digunakan sebagai parameter pembanding langsung kinerja pendinginan karena pada kondisi tanpa kipas nilai tersebut hanya berupa keluaran algoritma *fuzzy logic*.

a. Hasil perbandingan pengukuran

Ringkasan hasil pengujian jalan menanjak dengan dan tanpa kipas ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20 Perbandingan Hasil Pengujian Jalan Menanjak Dengan Dan Tanpa Kipas

No	Parameter	Tanpa Kipas	Dengan Kipas	Selisih
1	Jarak rute pengujian	Sekitar 1,5 km	Sekitar 1,5 km	–
2	Jumlah seluruh rekaman	335	282	53 rekaman
3	Suhu awal	26,8 °C	26,8 °C	0 °C
4	Suhu akhir	38,1 °C	34,2 °C	3,9 °C
5	Suhu minimum	26,8 °C	26,8 °C	0 °C
6	Suhu maksimum	38,1 °C	34,2 °C	3,9 °C
7	Kenaikan suhu awal hingga akhir	11,3 °C	7,4 °C	3,9 °C
8	Rata-rata kecepatan	18,15 km/jam	20,23 km/jam	2,08 km/jam
9	Kecepatan maksimum tercatat	42,3 km/jam	40,9 km/jam	1,4 km/jam

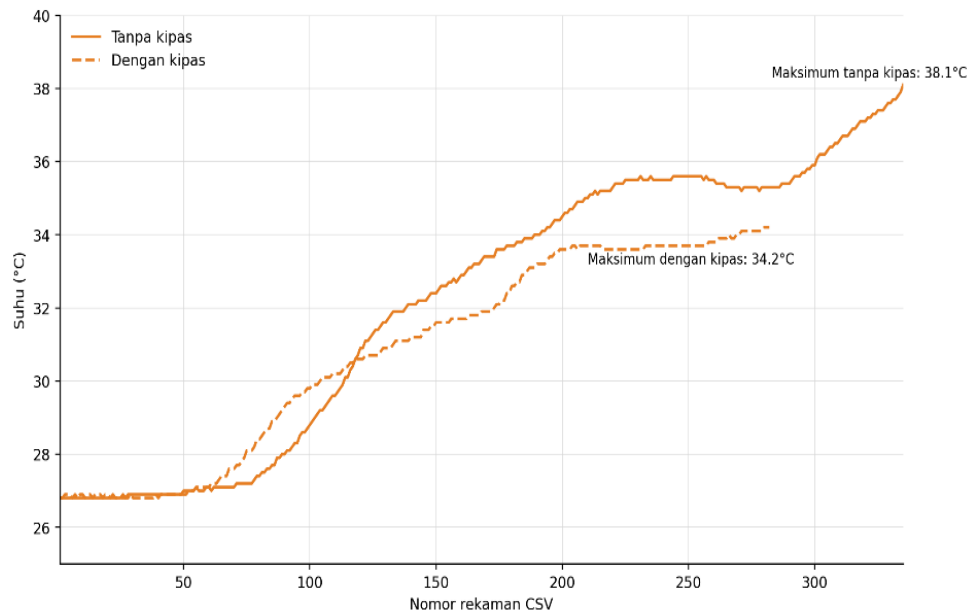
Kedua pengujian dimulai pada suhu yang sama, yaitu 26,8 °C. Pada kondisi tanpa kipas, suhu meningkat hingga 38,1 °C pada akhir pencatatan. Sementara itu, pada kondisi dengan kipas suhu akhir sebesar 34,2 °C. Dengan demikian, suhu akhir pada kondisi dengan kipas lebih rendah 3,9 °C.

Perbedaan yang sama juga terlihat pada suhu maksimum. Kondisi tanpa kipas mencapai 38,1 °C, sedangkan dengan kipas hanya mencapai 34,2 °C. Kenaikan suhu dari awal hingga akhir juga berkurang dari 11,3 °C menjadi 7,4 °C, sehingga terdapat selisih sebesar 3,9 °C.

Jika dibandingkan terhadap kenaikan suhu tanpa kipas, kenaikan suhu pada kondisi dengan kipas 34,51% lebih rendah. Nilai ini menunjukkan perbedaan relatif kenaikan temperatur pada kedua kondisi pengujian dan tidak dinyatakan sebagai efisiensi termal sistem.

b. Grafik perbandingan hasil pengujian

Perbandingan perubahan suhu pada pengujian jalan menanjak dengan dan tanpa kipas ditunjukkan pada Gambar 4.27.



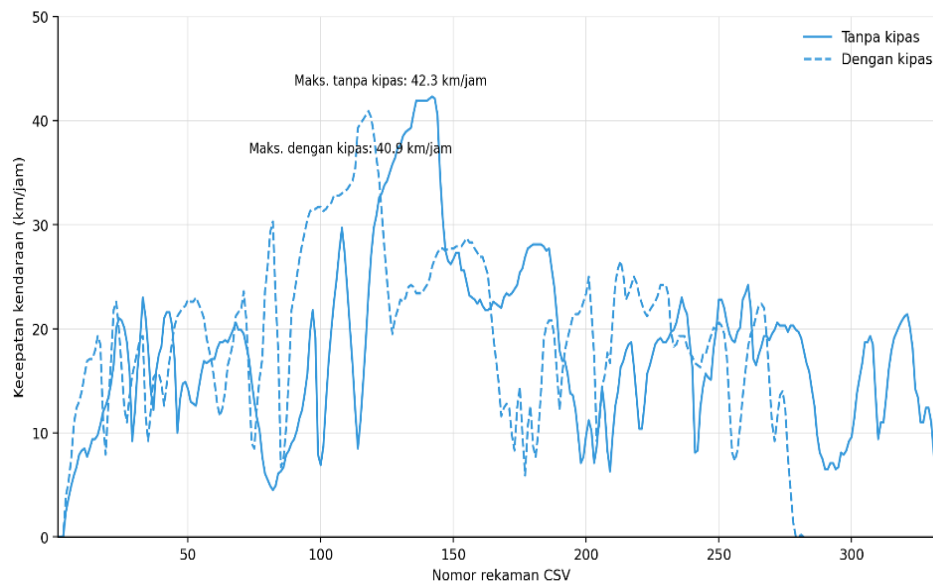
Gambar 4.27 Grafik Perbandingan Suhu Pada Pengujian Jalan Menanjak dengan dan Tanpa Kipas

Gambar 4.27 menunjukkan bahwa kedua pengujian dimulai pada temperatur yang sama dan sama-sama mengalami peningkatan selama kendaraan menempuh rute menanjak. Pada kondisi tanpa kipas, temperatur terus meningkat hingga mencapai 38,1 °C pada akhir perjalanan. Pada kondisi dengan kipas, temperatur juga meningkat, tetapi nilai akhirnya lebih rendah, yaitu 34,2 °C.

Perbedaan pola temperatur mulai terlihat lebih jelas setelah perjalanan berlangsung. Pada kondisi tanpa kipas, temperatur terus bergerak menuju nilai maksimum hingga akhir pencatatan. Sementara itu, pada kondisi dengan kipas, kenaikan temperatur menjadi lebih kecil ketika suhu telah berada pada kisaran 33 °C sebelum akhirnya mencapai 34,2 °C. Draft Tugas Akhir Revisi 2

Jumlah rekaman pada kedua pengujian berbeda, yaitu 335 rekaman tanpa kipas dan 282 rekaman dengan kipas. Oleh karena itu, grafik digunakan untuk membandingkan perubahan temperatur sepanjang perjalanan dan bukan untuk menyatakan bahwa nomor rekaman yang sama menunjukkan waktu atau posisi kendaraan yang sama.

Perbandingan kecepatan kendaraan ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Grafik Perbandingan Kecepatan Pada Pengujian Jalan Menanjak dengan dan Tanpa Kipas

Pada kondisi tanpa kipas, rata-rata kecepatan saat bergerak sebesar 18,15 km/jam dengan kecepatan maksimum 42,3 km/jam. Pada kondisi dengan kipas, rata-rata kecepatan sebesar 20,23 km/jam dengan kecepatan maksimum 40,9 km/jam. Jadi, rata-rata kecepatan pada pengujian dengan kipas 2,08 km/jam lebih tinggi, sedangkan kecepatan maksimumnya 1,4 km/jam lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa kipas.

Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kondisi perjalanan kedua pengujian tidak sepenuhnya sama meskipun menggunakan rute dan jarak yang sama. Karena itu, pembahasan kinerja pendinginan tidak didasarkan pada satu titik kecepatan tertentu, tetapi dilihat dari kecenderungan temperatur, suhu akhir, suhu maksimum, dan kenaikan suhu pada masing-masing pengujian.

c. Perhitungan perbandingan kenaikan suhu

Pada pengujian jalan menanjak tanpa kipas, temperatur meningkat dari 26,8 °C menjadi 38,1 °C atau sebesar 11,3 °C. Pada kondisi dengan kipas, temperatur meningkat dari 26,8 °C menjadi 34,2 °C atau sebesar 7,4 °C. Dengan demikian, kenaikan temperatur pada kondisi dengan kipas lebih rendah 3,9 °C atau 34,51% dibandingkan kondisi tanpa kipas.

Menariknya, rata-rata kecepatan saat bergerak pada pengujian dengan kipas justru lebih tinggi, yaitu 20,23 km/jam dibandingkan 18,15 km/jam tanpa kipas.

Meskipun kondisi perjalanan tidak benar-benar sama, suhu akhir dan suhu maksimum pada kondisi dengan kipas tetap lebih rendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada data pengujian yang diperoleh, pengoperasian sistem pendinginan membantu membatasi kenaikan temperatur permukaan *driver*.

Secara fisik, kedua kipas menghasilkan aliran udara paksa menuju *driver* untuk membantu pelepasan panas. Sementara itu, *fuzzy logic* Mamdani tidak melakukan pendinginan secara langsung, tetapi mengatur tingkat pengoperasian kipas melalui perubahan PWM berdasarkan kombinasi suhu dan kecepatan kendaraan. Pada pengujian jalan menanjak dengan kipas, PWM tertinggi sebesar 216 muncul ketika suhu 30,4 °C dan kecepatan 39,3 km/jam, yang menunjukkan bahwa sistem dapat meningkatkan perintah pendinginan ketika kombinasi kedua masukan menghasilkan kebutuhan pendinginan yang lebih tinggi. Draft Tugas Akhir Revisi 2

Secara keseluruhan, pengujian jalan menanjak menunjukkan bahwa kondisi dengan kipas menghasilkan suhu akhir, suhu maksimum, dan kenaikan temperatur yang lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa kipas. Hasil ini konsisten dengan fungsi *forced-air cooling* yang digunakan pada sistem, yaitu membantu pelepasan panas dari permukaan *driver* selama kendaraan beroperasi.