

BAB IV

PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengujian dan analisis terhadap sistem smart drip irrigation yang telah dirancang dan diimplementasikan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja setiap bagian sistem serta memastikan metode pengendalian dapat bekerja sesuai dengan rancangan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Pengujian meliputi sensor soil moisture sebagai parameter kelembapan tanah dan sensor NPK sebagai parameter kandungan unsur hara, khususnya nitrogen yang digunakan sebagai masukan pada sistem fuzzy logic control. Pengujian metode fuzzy dilakukan berdasarkan nilai error dan delta error untuk menghasilkan keluaran berupa durasi pemberian nutrisi, sedangkan pengendalian pemberian air dilakukan menggunakan metode threshold berdasarkan nilai kelembapan tanah. Selain pengujian pada masing-masing bagian, dilakukan pengujian sistem secara terintegrasi untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan proses pemberian air dan nutrisi secara otomatis berdasarkan kondisi aktual tanah. Data yang diperoleh dari setiap pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui karakteristik, respons, dan kinerja sistem secara keseluruhan.

4.1 Pengujian Catu Daya

Pengujian catu daya dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian sumber dan penurun tegangan pada sistem mampu menghasilkan tegangan sesuai dengan kebutuhan masing-masing komponen. Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan menggunakan multimeter pada bagian input dan output setiap rangkaian. Sumber utama sistem berasal dari tegangan PLN 220 VAC yang kemudian dikonversi oleh *power supply* menjadi 24 VDC. Tegangan 24 VDC tersebut selanjutnya digunakan sebagai sumber bagi rangkaian *buck converter* untuk menghasilkan tegangan 12 VDC dan 5 VDC, sedangkan tegangan 12 VDC dari *buck converter* 12 V digunakan sebagai masukan untuk *buck converter* 3,3 V. Dokumentasi pengukuran pada setiap bagian catu daya ditunjukkan pada Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.4.



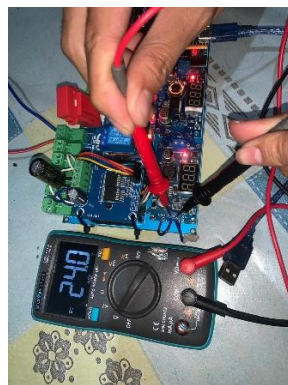
(a)



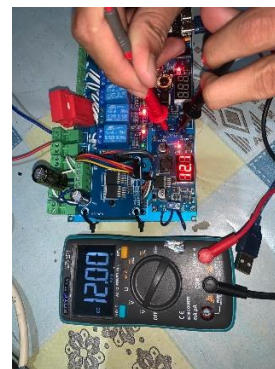
(b)

Gambar 4. 1 (a) Input power supply (b) Output power supply

Berdasarkan hasil pengukuran pada Gambar 4.1, tegangan masukan *power supply* yang berasal dari PLN terukur sebesar 220 VAC, sedangkan tegangan keluarannya terukur sebesar 24,0 VDC. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *power supply* mampu mengubah sumber tegangan AC menjadi tegangan DC sesuai dengan kebutuhan sumber utama sistem. Tegangan 24 VDC tersebut kemudian digunakan untuk menyuplai rangkaian *buck converter* dan komponen lain yang membutuhkan tegangan tersebut.



(a)

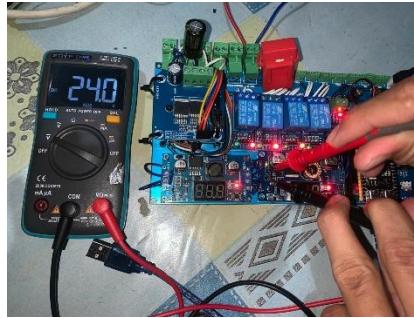


(b)

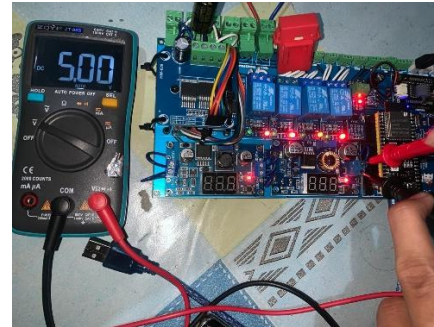
Gambar 4. 2 (a) Input Buck 12v (b) Output Buck 12v

Pengujian berikutnya dilakukan pada *buck converter* 12 V seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Tegangan masukan yang berasal dari keluaran *power supply* terukur sebesar 24,0 VDC, kemudian setelah melalui proses penurunan tegangan diperoleh tegangan keluaran sebesar 12,0 VDC. Hasil pengukuran

menunjukkan bahwa *buck converter* 12 V mampu menurunkan tegangan 24 VDC menjadi 12 VDC sesuai dengan tegangan yang dirancang. Tegangan keluaran 12 VDC ini juga digunakan sebagai sumber masukan untuk *buck converter* 3,3 V.



(a)



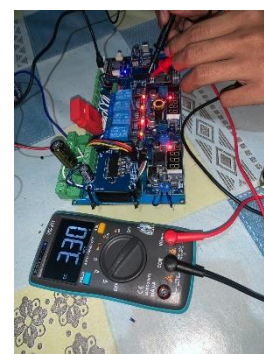
(b)

Gambar 4. 3(a) Input Buck 5v (b) Output Buck 5v

Selanjutnya dilakukan pengujian pada *buck converter* 5 V yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Berdasarkan hasil pengukuran, tegangan masukan *buck converter* sebesar 24,0 VDC, sedangkan tegangan keluarannya sebesar 5,00 VDC. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rangkaian mampu menurunkan tegangan 24 VDC menjadi 5 VDC sesuai dengan kebutuhan tegangan pada bagian sistem yang menggunakan sumber 5 V. Tegangan keluaran yang diperoleh juga menunjukkan bahwa proses penurunan tegangan dapat menghasilkan nilai yang sesuai dengan tegangan target yang telah ditentukan.



(a)



(b)

Gambar 4. 4 (a) Input Buck 3,3v (b) Output Buck 3,3v

Pengujian terakhir dilakukan pada *buck converter* 3,3 V seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Berbeda dengan *buck converter* 5 V yang memperoleh masukan dari 24 VDC, *buck converter* 3,3 V memperoleh masukan dari keluaran *buck*

converter 12 V. Berdasarkan hasil pengukuran, tegangan masukan rangkaian sebesar 12,0 VDC, sedangkan tegangan keluarannya terukur sebesar 3,30 VDC. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tegangan 12 VDC berhasil diturunkan menjadi 3,3 VDC sesuai dengan kebutuhan rangkaian yang menggunakan tegangan tersebut.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian catu daya mampu menyediakan beberapa tingkat tegangan yang dibutuhkan oleh sistem, yaitu 24 VDC, 12 VDC, 5 VDC, dan 3,3 VDC. Tegangan 24 VDC diperoleh dari *power supply* dengan masukan 220 VAC, kemudian tegangan tersebut diturunkan menjadi 12 VDC dan 5 VDC melalui *buck converter*. Selanjutnya, tegangan 12 VDC digunakan sebagai masukan *buck converter* berikutnya untuk menghasilkan 3,3 VDC. Dengan demikian, hasil pengukuran pada setiap tahapan menunjukkan bahwa distribusi dan penurunan tegangan pada rangkaian catu daya telah menghasilkan nilai keluaran sesuai dengan kebutuhan perancangan sistem.

4.2 Pengujian *soil moisture sensor*

Pengujian sensor *soil moisture* dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembacaan sensor terhadap perubahan kadar air dalam tanah sebelum digunakan sebagai parameter pada sistem pengendalian penyiraman. Sistem menggunakan lima sensor *soil moisture* yang ditempatkan pada titik pengukuran yang berbeda. Oleh karena itu, pengujian dilakukan pada masing-masing sensor untuk memperoleh karakteristik pembacaan dan parameter kalibrasi yang sesuai.

Proses pengujian dilakukan dengan menggunakan metode *Gravimetric Water Content* (GWC) sebagai nilai acuan kadar air tanah. Pengujian dilakukan pada rentang GWC 0% hingga 40% dengan interval 10%, kemudian nilai ADC yang dihasilkan oleh masing-masing sensor dicatat sebagai data kalibrasi. Data tersebut selanjutnya digunakan dalam proses kalibrasi menggunakan metode *piecewise interpolation* untuk mengonversi nilai ADC menjadi nilai kadar air tanah. Hasil konversi pada rentang GWC 0-40% kemudian dinormalisasi menjadi skala kelembapan 0-100% yang digunakan pada sistem pengendalian penyiraman berbasis *threshold*. Tahapan pengujian meliputi analisis karakteristik pembacaan

sensor, proses kalibrasi menggunakan *piecewise interpolation*, serta pengujian hasil kalibrasi untuk mengetahui kesesuaian pembacaan masing-masing sensor.

4.2.1 Pengujian respons sensor *soil moisture*

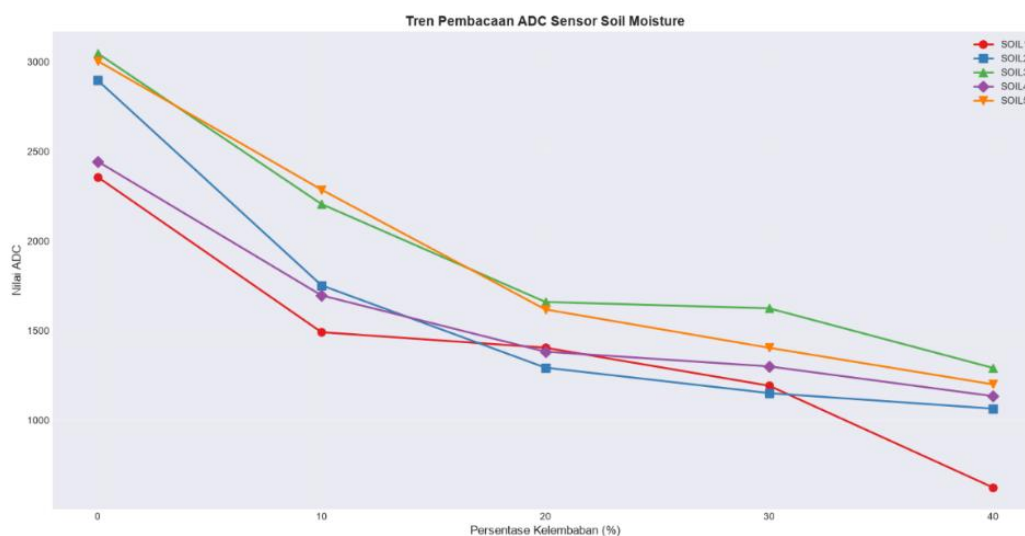
Pengujian karakteristik sensor *soil moisture* dilakukan untuk mengetahui respons keluaran sensor terhadap perubahan kadar air tanah. Pengujian ini melibatkan lima unit sensor, yaitu *SOIL1*, *SOIL2*, *SOIL3*, *SOIL4*, dan *SOIL5*, dengan menggunakan kadar air gravimetrik atau *Gravimetric Water Content* (GWC) sebagai nilai acuan. Kondisi pengujian ditetapkan pada variasi GWC sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%. Pada setiap kondisi tersebut, dilakukan pengambilan data pembacaan nilai *Analog-to-Digital Converter* (ADC) untuk memperoleh nilai yang dapat merepresentasikan karakteristik masing-masing sensor. Hasil pengujian karakteristik sensor *soil moisture* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor Soil Moisture

Presentase	SOIL1	SOIL2	SOIL3	SOIL4	SOIL5
0%	2357.00	2897.00	3047.33	2444.00	3005.00
10%	1490.67	1752.33	2206.00	1696.33	2286.33
20%	1404.33	1293.00	1659.67	1382.33	1618.00
30%	1192.00	1150.67	1624.00	1299.67	1403.67
40%	624.00	1064.33	1291.33	1134.00	1199.67

Berdasarkan Tabel 4.1, seluruh sensor menunjukkan kecenderungan yang konsisten, yaitu adanya hubungan berbanding terbalik antara kadar air gravimetrik tanah dengan nilai ADC yang dihasilkan. Pada kondisi GWC 0%, nilai ADC masing-masing sensor berada pada kondisi tertinggi, sedangkan pada GWC 40% diperoleh nilai ADC terendah. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja sensor *soil moisture* tipe resistif, di mana peningkatan kadar air dalam tanah menyebabkan konduktivitas listrik meningkat, sehingga tegangan keluaran sensor menurun dan menghasilkan nilai ADC yang lebih kecil. Secara spesifik, pada GWC 0%, *SOIL1*, *SOIL2*, *SOIL3*, *SOIL4*, dan *SOIL5* masing-masing menghasilkan nilai ADC sebesar 2357,00; 2897,00; 3047,33; 2444,00; dan 3005,00. Ketika kadar air

ditingkatkan hingga GWC 40%, nilai ADC seluruh sensor menurun secara signifikan menjadi 624,00; 1064,33; 1291,33; 1134,00; dan 1199,67. Meskipun memiliki kecenderungan respons yang sama, nilai ADC yang dihasilkan masing-masing sensor berbeda pada kondisi GWC yang sama, yang menunjukkan bahwa setiap unit sensor memiliki karakteristik keluaran yang unik. Perbedaan ini juga terlihat dari rentang total perubahan nilai ADC antara kondisi GWC 0% dan 40%. SOIL1 mengalami perubahan sebesar 1733,00 ADC, SOIL2 sebesar 1832,67 ADC, SOIL3 sebesar 1756,00 ADC, SOIL4 sebesar 1310,00 ADC, dan SOIL5 sebesar 1805,33 ADC. SOIL2 memiliki rentang perubahan ADC terbesar, sedangkan SOIL4 memiliki rentang perubahan terkecil. Variasi ini mengindikasikan bahwa faktor fisik dan kimia tanah, seperti tekstur, porositas, dan kandungan mineral, turut mempengaruhi respons setiap unit sensor. Untuk memperjelas karakteristik perubahan nilai ADC terhadap peningkatan kadar air gravimetrik, data hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Grafik Pembacaan nilai ADC sensor soil moisture

Berdasarkan Gambar 4.5, kelima sensor memperlihatkan pola penurunan nilai ADC dari kondisi GWC 0% hingga 40%, tetapi dengan bentuk dan laju perubahan yang berbeda pada setiap intervalnya. Perubahan nilai ADC pada setiap kenaikan GWC sebesar 10% tidak menunjukkan besar yang seragam (tidak sepenuhnya linear). Sebagai contoh, pada SOIL3 terjadi penurunan tajam sebesar 841,33 ADC dari

GWC 0% menuju 10%, sedangkan pada rentang GWC 20% menuju 30% penurunannya hanya sebesar 35,67 ADC. Pola serupa terlihat pada sensor lainnya, di mana penurunan paling signifikan umumnya terjadi pada rentang 0%–10% dan 30%–40%, sementara pada rentang 10%–30% penurunannya cenderung lebih landai. Hal ini menunjukkan bahwa sensitivitas sensor berbeda pada setiap rentang kadar air.

Meskipun terdapat variasi karakteristik dan respons non-linear antar sensor, seluruh sensor menunjukkan pola penurunan yang konsisten tanpa adanya lonjakan data yang anomali, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor bekerja dengan stabil dalam rentang uji yang dilakukan. Dengan demikian, sensor soil moisture ini layak digunakan sebagai alat *monitoring* kelembaban tanah di lapangan. Namun, karena setiap unit sensor memiliki karakteristik dan sensitivitas yang berbeda pada setiap interval kadar air, penggunaan satu parameter kalibrasi umum tidak dapat merepresentasikan kondisi yang sebenarnya. Oleh karena itu, kalibrasi dilakukan secara individual pada masing-masing sensor dengan memanfaatkan titik ADC pada GWC 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%. Data karakteristik tersebut selanjutnya digunakan sebagai titik acuan pada metode *piecewise interpolation*, sehingga proses konversi nilai ADC ke kelembaban aktual dapat menyesuaikan karakteristik masing-masing sensor secara akurat pada setiap interval kadar air.

4.2.2 Kalibrasi Sensor Menggunakan *Piecewise Interpolation*

Kalibrasi sensor *soil moisture* dilakukan untuk mengonversi nilai ADC hasil pembacaan sensor menjadi nilai kadar air tanah yang dapat digunakan oleh sistem. Berdasarkan hasil pengujian pada subbab sebelumnya, SOIL1, SOIL2, SOIL3, SOIL4, dan SOIL5 memiliki nilai keluaran ADC yang berbeda meskipun berada pada kondisi kadar air gravimetrik yang sama. Oleh karena itu, kalibrasi dilakukan secara individual pada masing-masing sensor agar proses konversi dapat menyesuaikan karakteristik pembacaannya. Proses kalibrasi menggunakan lima titik acuan *Gravimetric Water Content* (GWC), yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%. Nilai ADC pada masing-masing titik GWC diperoleh dari hasil pengujian sebelumnya dan digunakan sebagai titik acuan dalam proses *piecewise*

interpolation. Data titik kalibrasi masing-masing sensor seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Dengan perubahan nilai ADC terhadap peningkatan GWC tidak menunjukkan besar perubahan yang seragam pada setiap interval pengukuran. Hal tersebut dapat diamati pada SOIL3, dimana nilai ADC mengalami penurunan sebesar 841,33 pada interval GWC 0-10%, sebesar 546,33 pada interval 10-20%, sebesar 35,67 pada interval 20-30%, dan sebesar 332,67 pada interval 30-40%. Pola serupa juga terlihat pada sensor lainnya dengan besar perubahan ADC yang berbeda pada setiap interval. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa respons sensor pada setiap rentang kadar air memiliki kemiringan perubahan yang berbeda. Berdasarkan karakteristik tersebut, metode *piecewise interpolation* digunakan sebagai metode kalibrasi dibandingkan menggunakan satu regresi linear untuk keseluruhan rentang pengukuran. Regresi linear tunggal merepresentasikan hubungan nilai ADC dan kadar air menggunakan satu kecenderungan perubahan pada seluruh rentang, sedangkan hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan ADC pada setiap interval GWC tidak seragam. Penggunaan regresi linear tunggal dengan demikian berpotensi menghasilkan penyimpangan terhadap beberapa titik hasil kalibrasi. Sementara itu, *piecewise interpolation* memungkinkan proses konversi dilakukan berdasarkan dua titik kalibrasi yang berdekatan sehingga perubahan karakteristik sensor pada masing-masing rentang kadar air dapat direpresentasikan secara terpisah.

Lima titik kalibrasi yang digunakan membentuk empat segmen pengukuran, yaitu GWC 0-10%, 10-20%, 20-30%, dan 30-40%. Pada saat sensor menghasilkan nilai ADC, sistem menentukan terlebih dahulu posisi nilai tersebut berdasarkan dua titik kalibrasi yang mengapitnya. Proses tersebut dilakukan secara individual pada SOIL1 hingga SOIL5 menggunakan titik ADC kalibrasi masing-masing sensor. Dengan demikian, perbedaan karakteristik keluaran antarunit sensor tetap dapat dipertahankan dalam proses konversi.

Nilai yang diperoleh dari proses *piecewise interpolation* masih berada pada rentang GWC 0-40%. Dalam implementasi sistem, rentang tersebut kemudian dinormalisasi menjadi skala kelembapan 0-100%. Normalisasi dilakukan agar hasil

pembacaan sensor dapat direpresentasikan dalam skala yang digunakan pada sistem pengendalian penyiraman. Pemetaan nilai GWC terhadap skala kelembapan sistem ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 pemetaan GWC berdasarkan kelembapan sistem

<i>Gravimetric Water Content (%)</i>	<i>Kelembapan (%)</i>
0	0
10	25
20	50
30	75
40	100

Berdasarkan Tabel 4.2, GWC 0% digunakan sebagai batas bawah kalibrasi dan direpresentasikan sebagai kelembapan sistem sebesar 0%, sedangkan GWC 40% digunakan sebagai batas atas kalibrasi dan direpresentasikan sebagai kelembapan sistem sebesar 100%. Dengan demikian, setiap kenaikan GWC sebesar 10% pada titik kalibrasi setara dengan kenaikan sebesar 25% pada skala kelembapan sistem. Perlu diperhatikan bahwa nilai kelembapan 100% pada sistem merupakan representasi dari batas atas kalibrasi GWC sebesar 40%, bukan menunjukkan nilai GWC sebesar 100%.

Selain proses interpolasi dan normalisasi, hasil pembacaan dibatasi sesuai dengan rentang kalibrasi yang telah ditentukan. Nilai ADC yang merepresentasikan kondisi lebih kering dari batas GWC 0% ditetapkan sebagai kelembapan minimum sebesar 0%, sedangkan nilai ADC yang merepresentasikan kondisi lebih basah dari batas GWC 40% ditetapkan sebagai kelembapan maksimum sebesar 100%. Pembatasan tersebut dilakukan agar nilai hasil konversi tetap berada dalam rentang kalibrasi yang telah ditentukan dan tidak menghasilkan nilai kelembapan di bawah 0% maupun di atas 100%. Berdasarkan proses kalibrasi tersebut, nilai ADC dari masing-masing sensor dapat dikonversi menjadi nilai kelembapan dengan mempertimbangkan karakteristik setiap sensor dan perubahan respons pada masing-masing interval kadar air. Hasil kalibrasi berupa nilai kelembapan pada

skala 0–100% selanjutnya digunakan sebagai masukan pada sistem pengendalian penyiraman berbasis *threshold*.

4.2.3 Pengujian Hasil Kalibrasi Sensor *Soil Moisture*

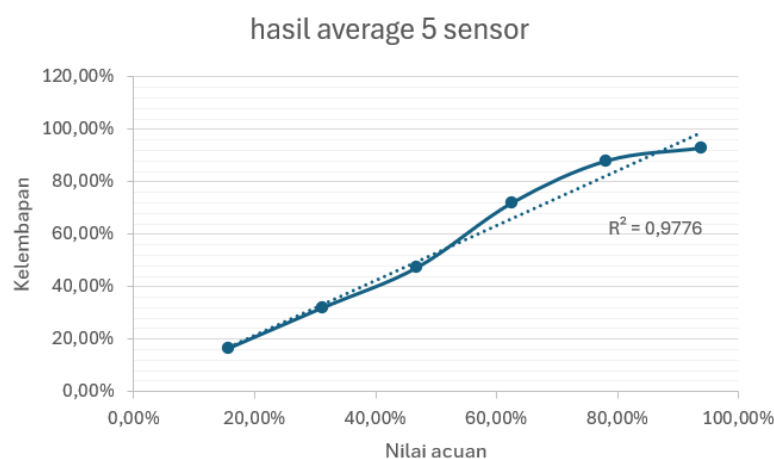
Pengujian hasil kalibrasi sensor *soil moisture* dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian nilai hasil pembacaan sensor setelah metode *piecewise interpolation* diterapkan. Pengujian dilakukan menggunakan tanah kering dengan massa awal 400 gram. Air ditambahkan secara bertahap sebanyak 25 ml pada setiap sampel sehingga diperoleh kondisi GWC aktual yang berbeda. Berbeda dengan titik yang digunakan dalam proses kalibrasi, yaitu GWC 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%, beberapa titik pada pengujian ini berada di antara titik-titik kalibrasi tersebut. Dengan demikian, pengujian dapat digunakan untuk mengevaluasi hasil interpolasi pada nilai yang tidak secara langsung digunakan sebagai titik pembentuk kalibrasi. Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi GWC dengan penambahan air secara bertahap. Nilai GWC kemudian diubah ke skala 0-100% sesuai dengan skala pembacaan kelembapan yang digunakan pada sistem. Hasil pengujian masing-masing sensor ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 hasil pengujian kalibrasi sensor *soil moisture*

Sampel	GWC Aktual (%)	Acuan Sistem (%)	SOIL1 (%)	SOIL2 (%)	SOIL3 (%)	SOIL4 (%)	SOIL5 (%)	<i>Average</i> (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	6,25	15,63	13,45	10,02	22,36	18,96	17,81	16,52
3	12,50	31,25	19,13	31,60	36,60	29,17	43,68	32,04
4	18,75	46,88	22,18	47,28	48,90	69,46	49,00	47,36
5	25,00	62,50	58,52	55,36	80,11	90,79	74,61	71,88
6	31,25	78,13	88,42	77,37	91,31	96,16	85,87	87,83
7	37,50	93,75	89,36	93,38	95,37	98,04	90,28	92,69

Berdasarkan Tabel 4.3, seluruh sensor menunjukkan pola pembacaan yang meningkat seiring dengan meningkatnya acuan sistem. Pada acuan 15,63%, rata-rata pembacaan kelima sensor sebesar 16,52%. Pembacaan tersebut relatif dekat dengan acuan, dengan perbedaan kurang dari 1%. Kondisi serupa juga terlihat pada

acuan 31,25% dan 46,88%, dengan rata-rata pembacaan masing-masing sebesar 32,04% dan 47,36%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada rentang awal hingga menengah, hasil kalibrasi mampu menghasilkan pembacaan rata-rata yang relatif mengikuti acuan sistem. Namun, pada acuan 62,5%, rata-rata pembacaan meningkat menjadi 71,88%. Penyimpangan yang lebih besar juga terlihat pada acuan 78,13%, ketika rata-rata pembacaan mencapai 87,83%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pembacaan sensor pada rentang tersebut lebih besar dibandingkan peningkatan nilai acuannya. Jika dilihat dari masing-masing sensor, penyimpangan pada kedua titik tersebut juga tidak terjadi secara seragam. Pada acuan 62,50%, pembacaan berada pada rentang 55,36% hingga 90,79%, sedangkan pada acuan 78,13% pembacaan berada pada rentang 77,37% hingga 96,16%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa masing-masing sensor masih memiliki karakteristik pembacaan yang berbeda meskipun telah menggunakan proses kalibrasi yang sama secara metode. Pada titik pengujian terakhir dengan acuan 93,75%, rata-rata pembacaan sebesar 92,69% kembali mendekati nilai acuan. Nilai pembacaan masing-masing sensor juga berada pada rentang yang relatif berdekatan, yaitu 89,36% hingga 98,04%. Kondisi ini menunjukkan bahwa penyimpangan yang muncul pada titik 62,50% dan 78,13% tidak terus meningkat hingga titik pengujian terakhir.



Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Nilai Acuan Sistem dan Rata-Rata Nilai Sensor
Soil Moisture

Berdasarkan Gambar 4.6, rata-rata pembacaan kelima sensor menunjukkan kecenderungan meningkat mengikuti kenaikan nilai acuan sistem. Pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan kelembapan pada media dapat diikuti oleh perubahan keluaran sensor setelah proses kalibrasi. Nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,9776$ menunjukkan adanya hubungan yang sangat kuat antara nilai acuan sistem dengan rata-rata hasil pembacaan sensor. Dengan demikian, perubahan nilai acuan dapat dijelaskan dengan baik melalui perubahan rata-rata pembacaan lima sensor pada rentang pengujian yang dilakukan.

Meskipun memiliki hubungan yang kuat, grafik juga menunjukkan bahwa tidak seluruh titik pembacaan berada tepat pada kecenderungan garis regresi. Penyimpangan paling terlihat pada rentang acuan 62,50-78,13%, ketika rata-rata pembacaan berada di atas nilai acuannya. Hal ini juga terlihat pada data masing-masing sensor, khususnya SOIL4 yang menghasilkan pembacaan 90,79% pada acuan 62,50%. Sebaliknya, pada acuan 93,75%, rata-rata pembacaan sebesar 92,69% berada sedikit di bawah acuan. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara acuan sistem dan keluaran sensor tidak sepenuhnya membentuk garis lurus pada seluruh titik pengujian, meskipun secara keseluruhan memiliki kecenderungan yang kuat.

Jika diperhatikan berdasarkan lima sensor, SOIL1 dan SOIL2 cenderung memberikan pembacaan yang lebih rendah atau mendekati acuan pada beberapa titik, sedangkan SOIL3 dan terutama SOIL4 menunjukkan pembacaan yang lebih tinggi pada rentang kelembapan tertentu. SOIL5 berada di antara karakteristik tersebut. Perbedaan respons antar sensor menunjukkan bahwa penggunaan rata-rata lima sensor memberikan gambaran kondisi kelembapan secara keseluruhan dibandingkan hanya menggunakan satu sensor.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah proses *piecewise interpolation* dan *scaling* ke skala 0–100%, kelima sensor mampu memberikan keluaran yang mengikuti perubahan acuan sistem. Walaupun masih terdapat penyimpangan pada beberapa titik, terutama pada rentang 62,50-78,13%, kecenderungan rata-rata pembacaan tetap mengikuti peningkatan nilai acuan dan menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9776.

4.3 Pengujian Sensor NPK

Pengujian sensor NPK dilakukan untuk mengetahui respons pembacaan sensor terhadap perubahan kandungan nutrisi pada media tanah. Pengujian mencakup pembacaan unsur nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), sedangkan proses kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan hasil pembacaan sensor terhadap nilai pembanding.

4.3.1 Pengujian Awal Sensor NPK

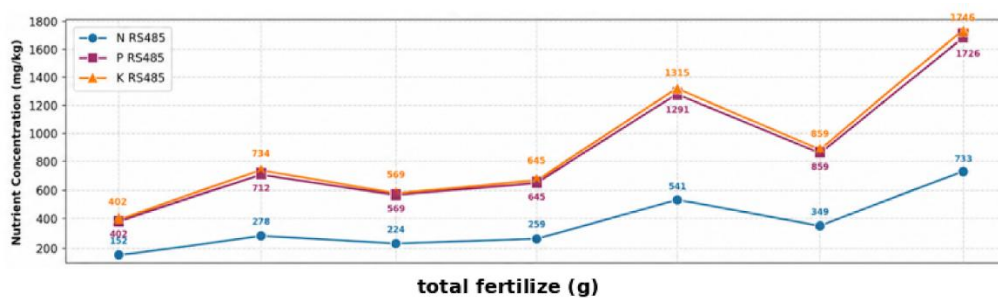
Pengujian awal dilakukan untuk mengetahui respons pembacaan sensor terhadap perubahan kandungan nutrisi pada media tanah sebelum dilakukan proses kalibrasi. Pengujian dilakukan menggunakan tujuh sampel dengan pemberian pupuk NPK secara bertahap untuk menghasilkan variasi kondisi nutrisi pada media tanah. Sampel 1 hingga Sampel 7 merepresentasikan penambahan pupuk sebesar 0 hingga 6 gram. Pada setiap sampel dilakukan pembacaan menggunakan sensor NPK dengan komunikasi RS485 dan sensor NPK dengan antarmuka USB Type-C sebagai sensor pembanding. Hasil pengujian awal ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 pembacaan mentah NPK dengan sensor pembanding

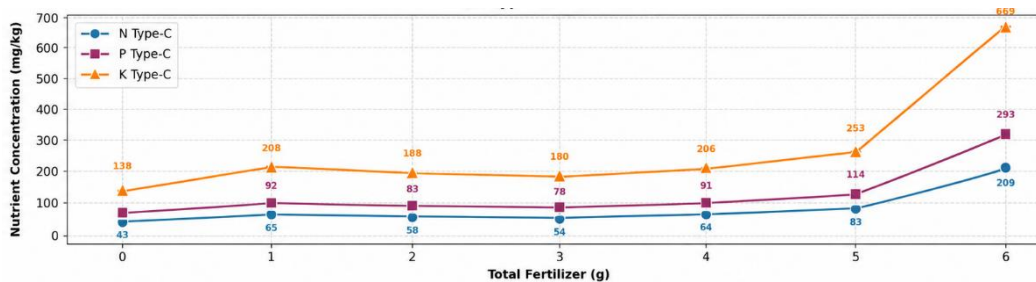
Sample	N RS485	P RS485	K RS485	N Type-C	P Type-C	K Type-C
1	152	402	400	43	60	140
2	278	712	734	65	91	208
3	224	567	569	59	83	190
5	259	645	643	56	80	183
4	541	1291	1315	64	90	206
6	349	857	860	83	112	256
7	733	1746	1757	209	295	675

Berdasarkan Tabel 4.4, kedua sensor menunjukkan perubahan nilai N, P, dan K pada setiap kondisi pengujian. Secara umum, peningkatan pemberian pupuk diikuti oleh kecenderungan peningkatan hasil pembacaan sensor, meskipun nilai yang diperoleh tidak meningkat secara berurutan pada seluruh sampel. Pada pembacaan nitrogen sensor RS485, misalnya, nilai awal sebesar 152 mg/kg berubah menjadi 278 mg/kg pada Sampel 2, kemudian mengalami penurunan menjadi 224 mg/kg pada Sampel 3. Pembacaan selanjutnya kembali meningkat hingga mencapai

541 mg/kg pada Sampel 5, mengalami penurunan menjadi 349 mg/kg pada Sampel 6, dan mencapai 733 mg/kg pada Sampel 7. Pola perubahan yang serupa juga terlihat pada parameter fosfor dan kalium. Selain itu, terdapat perbedaan rentang hasil pembacaan antara sensor RS485 dan Type-C. Sensor RS485 secara umum menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan sensor Type-C pada kondisi pengujian yang sama. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kedua sensor memiliki karakteristik pembacaan yang berbeda, sehingga hasil pengujian awal perlu dianalisis lebih lanjut sebelum sensor RS485 digunakan pada sistem. Untuk memperjelas kecenderungan perubahan hasil pembacaan pada setiap sampel, data pengujian kemudian disajikan dalam bentuk grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3.



(a)



(b)

Gambar 4. 7 Grafik pembacaan data mentah sensor (a) RS485 NPK (b) Type-c sensor NPK

Berdasarkan Gambar 4.7, hasil pembacaan N, P, dan K menunjukkan kecenderungan meningkat dari Sampel 1 hingga Sampel 7, tetapi masih terdapat fluktuasi pada beberapa titik pengujian. Fluktuasi tersebut terlihat dari adanya

penurunan hasil pembacaan pada sampel tertentu meskipun pemberian pupuk dilakukan secara bertahap. Dengan demikian, hubungan antara peningkatan pemberian pupuk dan hasil pembacaan sensor belum menunjukkan pola peningkatan yang sepenuhnya konsisten. Selain pola perubahan antar sampel, grafik juga memperlihatkan adanya perbedaan hasil pembacaan yang cukup besar antara sensor RS485 dan Type-C. Perbedaan tersebut menjadi salah satu dasar dilakukannya proses kalibrasi untuk menyesuaikan pembacaan sensor RS485 terhadap sensor yang digunakan sebagai pembanding.

4.3.2 Kalibrasi Sensor NPK

Berdasarkan hasil pengujian awal, terdapat perbedaan nilai pembacaan antara sensor NPK RS485 dan sensor Type-C. Oleh karena itu, dilakukan proses kalibrasi untuk memperoleh parameter *factor* dan *offset* sebagai koreksi terhadap pembacaan sensor NPK RS485. Proses kalibrasi dilakukan dalam dua tahap, di mana hasil kalibrasi tahap pertama diterapkan terlebih dahulu pada sensor sebelum dilakukan pengambilan data kembali untuk memperoleh parameter kalibrasi tahap kedua.

Pada tahap pertama, data pembacaan awal sensor NPK RS485 dibandingkan dengan hasil pembacaan sensor Type-C pada parameter nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Hubungan antara kedua hasil pembacaan tersebut dianalisis menggunakan regresi untuk memperoleh *factor* dan *offset* awal. Hasil regresi tahap pertama ditunjukkan pada Gambar 4.4. Regresi tahap pertama menghasilkan *factor* sebesar 0,2368 untuk nitrogen, 0,1461 untuk fosfor, dan 0,3270 untuk kalium. Sementara itu, *offset* yang diperoleh masing-masing sebesar -3,0669, -13,9958, dan -27,8089. Nilai R^2 yang diperoleh berada pada rentang 0,7173–0,7299, sedangkan nilai RMSE berbeda pada setiap parameter. Hasil regresi tahap pertama secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 hasil regresi tahap pertama

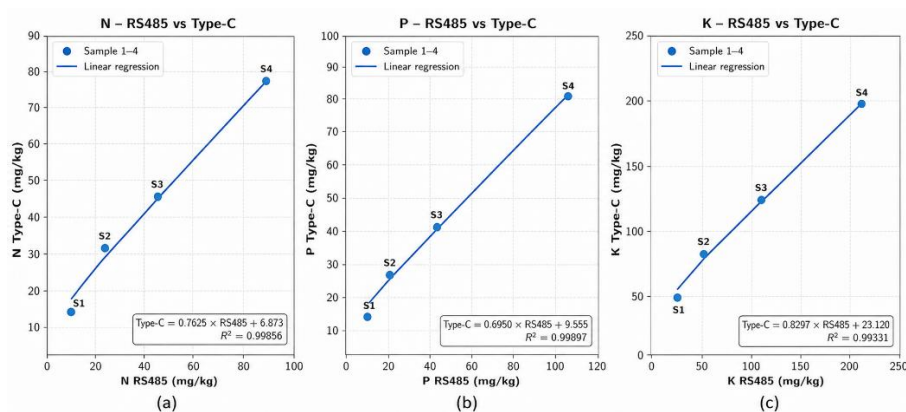
Parameter	<i>Factor I</i>	<i>Offset I</i>
Nitrogen (N)	0,2368	-3,0669
Fosfor (P)	0,1461	-13,9958
Kalium (K)	0,3270	-27,8089

Parameter yang diperoleh pada tahap pertama kemudian diterapkan sebagai koreksi awal pada pembacaan sensor NPK RS485. Setelah parameter tersebut diterapkan, dilakukan pengambilan data kembali menggunakan kondisi pengujian yang telah ditentukan. Pengambilan data ulang ini bertujuan untuk melihat hasil pembacaan sensor setelah koreksi tahap pertama sekaligus memperoleh data yang digunakan pada proses kalibrasi tahap kedua.

Tabel 4. 6 hasil pembacaan regresi 1

Sample	N RS485	P RS485	K RS485	N Type-C	P Type-C	K Type-C
1	60,5	84,3	190,1	68,8	95,6	221
2	12,5	16,2	36,6	34	47,9	110
3	125,2	176,7	398,4	116,1	163,3	377
4	82,4	115,5	260,6	85,5	118,9	272,8

Berdasarkan data pembacaan setelah penerapan kalibrasi tahap pertama, masih terdapat selisih antara hasil pembacaan sensor NPK RS485 dan sensor Type-C. Oleh karena itu, data tersebut kembali dianalisis menggunakan regresi untuk memperoleh parameter koreksi tahap kedua. Hasil regresi tahap kedua ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 grafik regresi tahap kedua sensor NPK (a) Nitrogen, (b) Fosfor, (c) Kalium

Berdasarkan hasil regresi tahap kedua, diperoleh *factor* sebesar 0,7298 untuk nitrogen, 0,7198 untuk fosfor, dan 0,7376 untuk kalium. Nilai *offset* yang diperoleh masing-masing sebesar 24,904, 35,759, dan 81,881. Parameter hasil regresi tahap kedua ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 hasil regresi tahap kedua

Parameter	<i>Factor II</i>	<i>Offset II</i>
Nitrogen (N)	0,7298	24,904
Fosfor (P)	0,7198	35,759
Kalium (K)	0,7376	81,881

Parameter yang diperoleh dari regresi tahap pertama dan tahap kedua selanjutnya digabungkan untuk menghasilkan satu nilai *factor* dan *offset* akhir pada setiap parameter. Penggabungan dilakukan agar koreksi dari kedua tahap kalibrasi dapat diterapkan sebagai satu parameter pada hasil pembacaan sensor NPK RS485. Hasil penggabungan parameter kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 parameter hasil akhir kalibrasi

Parameter	<i>Factor I</i>	<i>Offset I</i>	<i>Factor II</i>	<i>Offset II</i>	<i>Factor Akhir</i>	<i>Offset Akhir</i>
Nitrogen (N)	0,2368	-3,0669	0,7298	24,904	0,1728	22,666
Fosfor (P)	0,1461	-13,9958	0,7198	35,759	0,1052	25,685
Kalium (K)	0,3270	-27,8089	0,7376	81,881	0,2412	61,368

Berdasarkan Tabel 4.8, diperoleh parameter kalibrasi akhir yang berbeda untuk setiap unsur, yaitu *factor* 0,1728 dan *offset* 22,666 untuk nitrogen, *factor* 0,1052 dan *offset* 25,685 untuk fosfor, serta *factor* 0,2412 dan *offset* 61,368 untuk kalium. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa koreksi pembacaan dilakukan secara terpisah pada masing-masing parameter N, P, dan K. Parameter akhir tersebut selanjutnya diterapkan pada pembacaan sensor NPK RS485.

4.3.3 Hasil Kalibrasi Sensor NPK

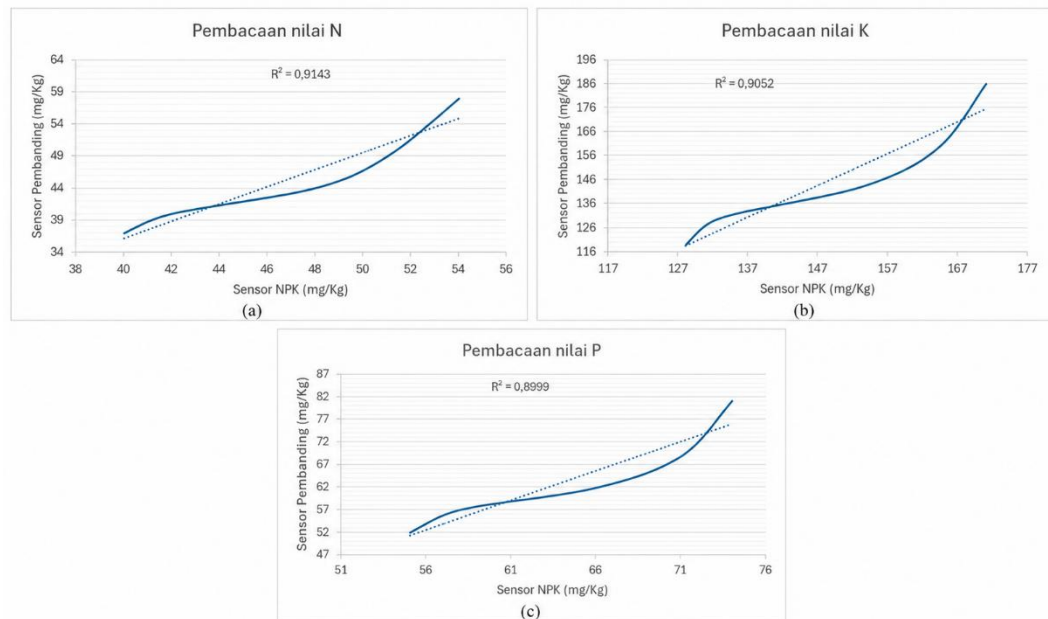
Setelah proses kalibrasi dilakukan pada tahap sebelumnya, pengujian dilanjutkan untuk mengetahui hasil pembacaan sensor NPK RS485 setelah parameter kalibrasi diterapkan. Pengujian dilakukan pada lima titik pengukuran dengan

membandingkan hasil pembacaan sensor NPK RS485 terhadap pembacaan sensor pembanding sebagai nilai pembanding. Parameter yang diamati meliputi kandungan nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Hasil pembacaan pada masing-masing titik pengujian ditampilkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil pengujian sensor NPK

Titik	N RS485 (mg/kg)	N Sensor Pembanding (mg/kg)	P RS485 (mg/kg)	P Sensor Pembanding (mg/kg)	K RS485 (mg/kg)	K Sensor Pembanding (mg/kg)
1	40	37	55	52	128	119
2	42	40	58	57	133	130
3	48	44	66	62	153	143
4	51	49	71	69	164	159
5	54	58	74	81	171	186

Berdasarkan Tabel 4.9, hasil pembacaan sensor NPK RS485 menunjukkan pola perubahan yang searah dengan sensor pembanding pada kelima titik pengujian. Pada parameter nitrogen, pembacaan RS485 meningkat dari 40 mg/kg pada titik pertama menjadi 54 mg/kg pada titik kelima, sedangkan sensor pembanding meningkat dari 37 mg/kg menjadi 58 mg/kg. Pada parameter fosfor, nilai RS485 meningkat dari 55 mg/kg menjadi 74 mg/kg, sementara sensor pembanding meningkat dari 52 mg/kg menjadi 81 mg/kg. Pada parameter kalium, pembacaan RS485 meningkat dari 128 mg/kg menjadi 171 mg/kg, sedangkan sensor pembanding meningkat dari 119 mg/kg menjadi 186 mg/kg. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan nilai yang terbaca pada sensor RS485 diikuti oleh peningkatan nilai pada sensor pembanding, meskipun masih terdapat perbedaan nilai pembacaan pada masing-masing titik.



Gambar 4. 9 Hasil pengujian pembacaan sensor NPK setelah kalibrasi (a) nitrogen, (b) phosphor (c) kalium

Berdasarkan grafik hasil pengujian pada gambar 4.9, hubungan pembacaan sensor RS485 terhadap sensor pembanding menunjukkan kecenderungan meningkat pada ketiga parameter. Pada parameter nitrogen, diperoleh nilai R^2 sebesar 0,9143, yang menunjukkan hubungan yang kuat antara perubahan pembacaan RS485 dan sensor pembanding. Pada parameter fosfor, nilai R^2 sebesar 0,8999 menunjukkan hubungan yang juga kuat, meskipun nilainya sedikit lebih rendah dibandingkan nitrogen. Sementara itu, parameter kalium menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,9052, yang menunjukkan bahwa perubahan pembacaan RS485 memiliki hubungan yang kuat dengan perubahan pembacaan sensor pembanding. Dengan demikian, hasil pengujian setelah kalibrasi menunjukkan bahwa ketiga parameter N, P, dan K pada sensor RS485 memiliki pola pembacaan yang searah dengan sensor pembanding pada seluruh titik pengujian. Meskipun masih terdapat perbedaan nilai antara kedua hasil pembacaan, hasil tersebut menunjukkan bahwa parameter kalibrasi yang diterapkan menghasilkan pembacaan RS485 yang mampu mengikuti perubahan nilai sensor pembanding pada rentang pengujian yang digunakan.

4.4 Pengujian *Finite State Machine*

Pengujian *Finite State Machine* (FSM) dilakukan untuk mengetahui kesesuaian perpindahan *state* pada sistem *smart fertigation* terhadap urutan kerja yang telah dirancang. Pengujian difokuskan pada perubahan dari suatu *state* menuju *state* berikutnya berdasarkan kondisi pemicu yang terjadi selama sistem beroperasi. Setiap kondisi pemicu diuji untuk memastikan bahwa sistem dapat menjalankan *state* tujuan sesuai dengan logika yang telah diimplementasikan pada program. Pada pengujian ini, pembahasan difokuskan pada keberhasilan transisi antar *state*.

Pengujian dimulai ketika sistem berada pada *state START*. Setelah sistem dijalankan, FSM berpindah menuju *state INITIALIZATION* untuk menjalankan proses inisialisasi sistem. Setelah proses inisialisasi selesai, sistem berpindah menuju *READ SENSOR* untuk melakukan pembacaan sensor. Hasil pembacaan tersebut kemudian digunakan pada *NPK CONDITION* untuk menentukan proses berikutnya. Apabila kondisi NPK bernilai *TRUE*, sistem berpindah menuju *FUZZYFICATION (CALCULATE ERROR)*. Sebaliknya, apabila kondisi NPK bernilai *FALSE*, sistem menuju *ERROR* dan selanjutnya kembali melakukan pembacaan melalui *READ SENSOR*. Pengujian terhadap kedua kondisi tersebut diperlukan untuk memastikan bahwa jalur normal maupun jalur penanganan kesalahan dapat menghasilkan transisi yang sesuai.

Setelah kondisi NPK memenuhi persyaratan, sistem menjalankan rangkaian proses kendali nutrisi secara berurutan melalui *FUZZYFICATION (CALCULATE ERROR)*, *INFERENCE*, *DEFUZZIFICATION (FERTILIZE PUMP)*, dan *WAIT DIFFUSION*. Setelah waktu *wait diffusion* selesai, sistem melakukan evaluasi terhadap kondisi $NITROGEN \leq SETPOINT$. Apabila kondisi tersebut bernilai *TRUE*, sistem kembali menuju *FUZZYFICATION (CALCULATE ERROR)* sehingga proses kendali nutrisi dijalankan kembali. Apabila kondisi bernilai *FALSE*, sistem melanjutkan proses menuju *READ SOIL MOISTURE SENSOR*. Pada bagian ini, pengujian hanya digunakan untuk memastikan bahwa hasil evaluasi kondisi nitrogen dapat mengarahkan sistem menuju *state* berikutnya sesuai rancangan, tanpa mengevaluasi performa metode fuzzy dalam mencapai setpoint.

Pada tahap berikutnya, *READ SOIL MOISTURE SENSOR* digunakan untuk memperoleh kondisi kelembapan tanah yang kemudian dievaluasi berdasarkan kondisi *MOIST < 60%*. Ketika kondisi tersebut bernilai *TRUE*, sistem berpindah menuju *WATER PUMP ON* untuk menjalankan proses pemberian air. Setelah itu, sistem kembali menuju *READ SOIL MOISTURE SENSOR* sehingga kondisi kelembapan dapat diperiksa kembali. Sebaliknya, apabila kondisi *MOIST < 60%* bernilai *FALSE*, sistem berpindah menuju *STOP*. Transisi tersebut menunjukkan adanya pengulangan pada proses pemberian air selama kondisi kelembapan masih berada di bawah *threshold* yang ditentukan.

Hasil pengujian setiap transisi FSM ditampilkan pada Tabel 4.10. Status *TRUE* menunjukkan bahwa *state* berikutnya yang dijalankan sistem telah sesuai dengan kondisi pemicu dan transisi yang dirancang. Dengan demikian, status *TRUE* pada tabel merupakan status keberhasilan pengujian transisi dan tidak selalu menunjukkan nilai logika dari kondisi pemicu.

Tabel 4. 10 Pengujian Finite State Machine

No.	State	Kondisi Pemicu	State Berikutnya	Status
1	<i>Initialization</i>	Inisialisasi sistem selesai	<i>Read Sensor</i>	TRUE
2	<i>Read Sensor</i>	Kondisi NPK valid	<i>Fuzzyfication</i>	TRUE
3	<i>Read Sensor</i>	Kondisi NPK tidak valid	<i>Error</i>	TRUE
4	<i>Fuzzyfication</i>	Proses fuzzy selesai	<i>Wait Diffusion</i>	TRUE
5	<i>Wait Diffusion</i>	Waktu meresap pupuk dalam tanah dan $N < setpoint$	<i>Fuzzyfication</i>	TRUE
6	<i>Wait Diffusion</i>	Kondisi nitrogen mengarah ke tahap pengairan	<i>Read Soil Moisture</i>	TRUE
7	<i>Read Soil Moisture</i>	$Moisture < 60\%$	<i>Water Pump On</i>	TRUE
8	<i>Water Pump On</i>	Pembacaan kelembapan diulang	<i>Read Soil Moisture</i>	TRUE
9	<i>Read Soil Moisture</i>	$Moisture \geq 60\%$	<i>Stop</i>	TRUE

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.10, seluruh transisi memperoleh status *TRUE*, yang menunjukkan bahwa perpindahan *state* aktual telah sesuai dengan kondisi pemicu dan *state* tujuan yang dirancang. Pada bagian pembacaan NPK, sistem dapat membedakan kondisi yang mengarahkan proses menuju kendali

fuzzy dan kondisi yang mengarahkan sistem menuju *ERROR*. Jalur *ERROR* juga dapat mengembalikan sistem menuju *READ SENSOR*, sehingga proses pembacaan dapat dilakukan kembali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa percabangan pada tahap awal sistem dapat dijalankan sesuai dengan urutan transisi yang ditentukan.

Pada rangkaian kendali nutrisi, perpindahan dari *FUZZYFICATION (CALCULATE ERROR)* menuju *INFERENCE, DEFUZZIFICATION (FERTILIZE PUMP)*, hingga *WAIT DIFFUSION* juga memperoleh status *TRUE*. Setelah *wait diffusion* selesai, pengujian pada kondisi $NITROGEN \leq SETPOINT$ menunjukkan bahwa kedua jalur transisi dapat dijalankan sesuai kondisi pemicunya, yaitu kembali menuju proses fuzzifikasi atau melanjutkan proses menuju pembacaan *soil moisture*. Hasil ini hanya menunjukkan keberhasilan logika perpindahan *state* dan belum digunakan untuk menilai kemampuan fuzzy dalam mengendalikan nilai nitrogen.

Pengujian pada bagian pengendalian air juga menunjukkan kesesuaian transisi. Kondisi $MOIST < 60\%$ dapat mengarahkan sistem menuju *WATER PUMP ON*, kemudian sistem kembali melakukan pembacaan melalui *READ SOIL MOISTURE SENSOR*. Ketika kondisi $MOIST < 60\%$ bernilai *FALSE*, sistem dapat keluar dari proses tersebut dan berpindah menuju *STOP*. Dengan demikian, jalur pengulangan maupun jalur keluar pada proses pengendalian kelembapan dapat dijalankan sesuai dengan logika FSM.

4.5 Pengujian Fuzzy Logic

Pengujian kendali *fuzzy logic* dilakukan untuk mengetahui kinerja algoritma dalam menentukan durasi pemberian nutrisi berdasarkan kondisi nitrogen pada media. Kendali fuzzy menggunakan nilai nitrogen hasil pembacaan sensor sebagai dasar untuk menentukan kondisi *error* dan *delta error*, kemudian menghasilkan keluaran berupa durasi pemberian nutrisi. Nilai keluaran tersebut digunakan untuk mengatur lama aktivasi pompa dan *valve* nutrisi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan setpoint nitrogen sebesar 120 mg/kg dan hasil pengujian diamati melalui perubahan nilai nitrogen setelah proses pemberian nutrisi dan *wait*

diffusion. Pembahasan pengujian fuzzy selanjutnya meliputi pengujian keluaran fuzzy dan respons kendali terhadap setpoint nitrogen.

4.5.1 Parameter Logika Fuzzy

Parameter logika *fuzzy* yang digunakan pada sistem terdiri atas dua variabel masukan, yaitu *Error* dan *Delta Error*, serta satu variabel keluaran berupa durasi pemberian nutrisi. Variabel *Error* digunakan untuk menunjukkan selisih nilai nitrogen terhadap *setpoint*, sedangkan *Delta Error* digunakan untuk menunjukkan perubahan nilai *error*. Kedua variabel masukan tersebut menjadi dasar dalam menentukan durasi pemberian nutrisi melalui proses inferensi *fuzzy*. Parameter dan karakteristik setiap variabel yang digunakan dalam sistem ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Parameter Logika Fuzzy

Variabel	Himpunan	Range	Karakteristik
Error	Besar	65–120 mg/kg	Selisih nitrogen terhadap <i>setpoint</i> besar
	Sedang	30–95 mg/kg	Selisih nitrogen terhadap <i>setpoint</i> sedang
	Kecil	0–55 mg/kg	Selisih nitrogen terhadap <i>setpoint</i> kecil
Delta Error	Menurun	–120–0 mg/kg	Nilai <i>error</i> mengalami penurunan
	Tetap	–15–15 mg/kg	Nilai <i>error</i> relatif tetap
	Meningkat	0–120 mg/kg	Nilai <i>error</i> mengalami peningkatan
Output	Pendek	0–4 menit	Durasi pemberian nutrisi pendek
	Sedang	3–9 menit	Durasi pemberian nutrisi sedang
	Panjang	7–13 menit	Durasi pemberian nutrisi panjang

Berdasarkan Tabel 4.11, variabel *Error* memiliki tiga himpunan *fuzzy*, yaitu Besar, Sedang, dan Kecil. Himpunan kecil memiliki rentang 0–55 mg/kg, Sedang memiliki rentang 30–95 mg/kg, dan besar memiliki rentang 65–120 mg/kg. Ketiga himpunan tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi selisih nilai nitrogen terhadap *setpoint* berdasarkan tingkat penyimpangannya. Variabel *Delta Error* terdiri atas tiga himpunan *fuzzy*, yaitu Menurun, Tetap, dan Meningkatkan. Himpunan Menurun memiliki rentang –120–0 mg/kg, Tetap memiliki rentang –15–15 mg/kg, dan Meningkatkan memiliki rentang 0–120 mg/kg. Variabel ini digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan nilai *error* dari pembacaan sebelumnya terhadap pembacaan berikutnya.

Sementara itu, variabel Output merupakan durasi pemberian nutrisi yang terdiri atas himpunan Pendek, Sedang, dan Panjang. Himpunan Pendek memiliki rentang 0–4 menit, Sedang 3–9 menit, dan Panjang 7–13 menit. Hasil dari kombinasi kondisi *Error* dan *Delta Error* tersebut kemudian digunakan dalam proses inferensi untuk menentukan durasi pemberian nutrisi yang sesuai. Dengan demikian, parameter pada Tabel 4.11 menjadi dasar pengujian untuk melihat bagaimana sistem menghasilkan keputusan durasi fertigasi berdasarkan kondisi nitrogen tanah.

4.5.2 Pengujian Output Fuzzy logic

Pengujian output *fuzzy logic* dilakukan untuk mengetahui respons algoritma dalam menentukan durasi pemberian nutrisi berdasarkan kondisi nitrogen yang terbaca. Pengujian dilakukan dengan mengamati nilai nitrogen aktual, *error*, *delta error*, *rule* yang aktif, hasil defuzzifikasi, dan durasi aktuasi yang dihasilkan pada setiap siklus fertigasi. Beberapa data yang menunjukkan perubahan keluaran fuzzy ditampilkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Output Fuzzy Logic

Siklus	Nitrogen Aktual (mg/kg)	Error (mg/kg)	Delta Error (mg/kg)	Rule Aktif	Output Fuzzy (menit)	Durasi Aktuator (menit)
1	2	118	118	1	10,0	10,0

Siklus	Nitrogen Aktual (mg/kg)	Error (mg/kg)	Delta Error (mg/kg)	Rule Aktif	Output Fuzzy (menit)	Durasi Aktuator (menit)
2	90	30	-88	0	1,0	1,0
3	82	38	0	8	6,6	6,6
4	45	75	37	4	5,0	5,0

Berdasarkan Tabel 4.12, keluaran *fuzzy logic* menunjukkan perubahan sesuai dengan kondisi *error* dan *delta error* pada setiap siklus. Pada siklus pertama, nitrogen sebesar 2 mg/kg menghasilkan *error* sebesar 118 mg/kg dan *delta error* sebesar 118 mg/kg dengan keluaran fuzzy sebesar 10 menit. Ketika nitrogen pada siklus berikutnya meningkat menjadi 90 mg/kg, *error* menurun menjadi 30 mg/kg dan *delta error* menjadi -88 mg/kg sehingga keluaran fuzzy turun menjadi 1 menit. Pada siklus ketiga, nitrogen sebesar 82 mg/kg menghasilkan *error* 38 mg/kg dan *delta error* 0 mg/kg, dengan keluaran fuzzy sebesar 6,6 menit. Selanjutnya, pada siklus keempat, nitrogen sebesar 45 mg/kg menghasilkan *error* 75 mg/kg dan *delta error* 37 mg/kg sehingga keluaran fuzzy menjadi 5 menit. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa keluaran kendali tidak ditentukan hanya berdasarkan nilai nitrogen terhadap setpoint, tetapi juga mempertimbangkan perubahan *error* yang terjadi pada setiap siklus melalui variabel *delta error*. Kondisi input yang berbeda menghasilkan *rule* aktif yang berbeda, sehingga durasi pemberian nutrisi yang dihasilkan juga berubah sesuai dengan hasil inferensi fuzzy.

Hasil defuzzifikasi pada setiap kondisi kemudian diterapkan secara langsung sebagai durasi aktuasi pompa dan *valve* nutrisi. Hal tersebut terlihat dari kesesuaian antara nilai keluaran fuzzy dengan durasi aktuasi, yaitu keluaran 10 menit menghasilkan aktuasi selama 10 menit, keluaran 1 menit mengaktifkan aktuator selama 1 menit, keluaran 6,6 menit mengaktifkan aktuator selama 6,6 menit, dan keluaran 5 menit mengaktifkan aktuator selama 5 menit. Kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa hasil proses fuzzy diteruskan ke aktuator tanpa perubahan nilai durasi pada tahapan aktuasi. Dengan demikian, pengujian menunjukkan bahwa implementasi kendali *fuzzy logic* mampu menghasilkan durasi

pemberian nutrisi yang berbeda berdasarkan kondisi *error* dan *delta error* yang terbaca pada setiap siklus pengendalian.

4.5.3 Pengujian Respons Kendali Fuzzy terhadap Setpoint Nitrogen

Pengujian respons kendali *fuzzy logic* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengendalikan nilai nitrogen terhadap setpoint sebesar 120 mg/kg pada kondisi pengujian yang berbeda. Pengujian dilakukan pada tiga titik, yaitu Titik 1, Titik 2, dan Titik 3, dengan setiap titik terdiri atas beberapa siklus fertigasi. Setelah pemberian nutrisi berdasarkan keluaran fuzzy, sistem tidak langsung melakukan pembacaan nitrogen berikutnya, tetapi diberikan waktu *wait diffusion*. Wait diffusion merupakan waktu tunggu setelah pemberian nutrisi yang digunakan untuk memberikan kesempatan bagi nutrisi yang telah diberikan untuk menyebar dan berdifusi pada media sebelum nilai nitrogen dibaca kembali. Setelah waktu tersebut terpenuhi, sensor membaca nilai nitrogen kembali dan hasil pembacaan digunakan sebagai kondisi untuk menentukan aksi kendali pada siklus berikutnya. Respons sistem diamati berdasarkan perubahan nilai nitrogen, durasi pemberian nutrisi yang dihasilkan fuzzy, serta kecenderungan nilai nitrogen terhadap setpoint pada setiap siklus pengujian.

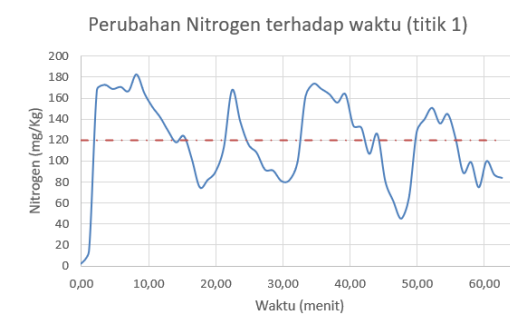
Pengujian pada Titik 1 dilakukan untuk mengamati respons kendali *fuzzy logic* terhadap perubahan nilai nitrogen pada beberapa siklus fertigasi. Pada titik ini, setiap keluaran fuzzy diterapkan sebagai durasi pemberian nutrisi, kemudian sistem diberikan waktu *wait diffusion* sebelum dilakukan pembacaan nitrogen berikutnya. Proses tersebut dilakukan secara berulang sehingga perubahan nilai nitrogen dari setiap siklus dapat diamati terhadap setpoint 120 mg/kg. Pada pengujian ini, sensor NPK ditempatkan pada media tanam dengan jarak kurang lebih 5 cm dari PCJ dripper. Hasil pengujian pada Titik 1 ditampilkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 pengujian kendali fuzzy pada titik 1

Siklus	N Awal (mg/kg)	Output Fuzzy (menit)	<i>Wait Diffusion</i> (menit)	N Maksimum (mg/kg)	N Akhir Siklus (mg/kg)
1	2	10,0	10	183	82

Siklus	N Awal (mg/kg)	Output Fuzzy (menit)	Wait Diffusion (menit)	N Maksimum (mg/kg)	N Akhir Siklus (mg/kg)
2	90	1,0	10	168	81
3	82	6,6	10	174	62
4	45	5,0	10	151	84

Berdasarkan Tabel 4.13, pengujian pada Titik 1 terdiri atas empat siklus dengan waktu *wait diffusion* yang sama, yaitu 10 menit. Pada siklus pertama, nilai nitrogen awal sebesar 2 mg/kg menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 10 menit dan meningkat hingga mencapai nilai maksimum 183 mg/kg, kemudian turun hingga 82 mg/kg pada akhir siklus. Pada siklus kedua, nilai nitrogen awal sebesar 90 mg/kg menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 1 menit dan mencapai nilai maksimum 168 mg/kg, dengan nilai akhir sebesar 81 mg/kg. Siklus ketiga dimulai pada nilai nitrogen 82 mg/kg dengan keluaran fuzzy 6,6 menit, kemudian nilai nitrogen mencapai 174 mg/kg dan berakhir pada 62 mg/kg. Pada siklus keempat, nilai nitrogen awal sebesar 45 mg/kg menghasilkan keluaran fuzzy 5 menit dan mencapai nilai maksimum 151 mg/kg, kemudian berakhir pada 84 mg/kg. Data tersebut menunjukkan bahwa durasi pemberian nutrisi yang dihasilkan fuzzy berubah pada setiap siklus sesuai dengan kondisi nitrogen yang terbaca.



(a)



(b)

Gambar 4. 10 (a) Grafik perubahan nitrogen terhadap waktu pada titik 1; (b) Dokumentasi posisi sensor NPK pada titik 1.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.6, nilai nitrogen mengalami pola kenaikan dan penurunan secara berulang pada setiap siklus. Setelah pemberian nutrisi, nilai nitrogen mengalami peningkatan hingga melewati setpoint 120 mg/kg, kemudian mengalami penurunan sebelum sistem memasuki siklus pengendalian berikutnya. Nilai maksimum pada siklus pertama mencapai 183 mg/kg, kemudian pada siklus kedua, ketiga, dan keempat masing-masing mencapai 168 mg/kg, 174 mg/kg, dan 151 mg/kg. Dengan demikian, seluruh siklus mengalami *overshoot* terhadap setpoint, tetapi nilai maksimum pada siklus keempat lebih dekat dengan setpoint dibandingkan siklus pertama. Pada akhir pengujian, nilai nitrogen berada pada 84 mg/kg, sehingga respons pada Titik 1 masih menunjukkan fluktuasi dan belum mempertahankan nilai nitrogen secara kontinu pada setpoint 120 mg/kg.

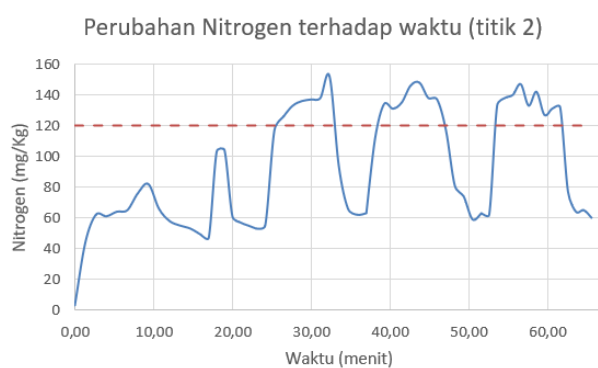
Selanjutnya pengujian pada Titik 2 dilakukan untuk mengamati respons kendali *fuzzy logic* terhadap perubahan nilai nitrogen pada beberapa siklus fertigasi. Pada titik ini, sensor NPK ditempatkan pada media tanam dengan jarak kurang lebih 4 cm dari PCJ dripper. Setiap keluaran fuzzy diterapkan sebagai durasi pemberian nutrisi, kemudian sistem diberikan waktu *wait diffusion* selama 6 menit sebelum dilakukan pembacaan nitrogen berikutnya. Proses tersebut dilakukan secara berulang untuk mengamati perubahan nilai nitrogen terhadap setpoint 120 mg/kg. Hasil pengujian pada Titik 2 ditampilkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 pengujian kendali fuzzy pada titik 2.

Siklus	N Awal (mg/kg)	Output Fuzzy (menit)	Wait Diffusion (menit)	N Maksimum (mg/kg)	N Akhir Siklus (mg/kg)
1	3	10	6	82	49
2	49	1	6	104	53
3	53	8	6	152	63
4	63	8,6	6	148	63
5	63	8	6	147	60

Berdasarkan Tabel 4.14, pada siklus pertama nilai nitrogen awal sebesar 3 mg/kg menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 10 menit. Setelah pemberian nutrisi

dan *wait diffusion* selama 6 menit, nilai nitrogen meningkat hingga 82 mg/kg, tetapi masih berada di bawah setpoint 120 mg/kg dan kemudian berakhir pada 49 mg/kg. Pada siklus kedua, nilai nitrogen awal sebesar 49 mg/kg menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 1 menit dan meningkat hingga 104 mg/kg, sebelum kembali menurun hingga 53 mg/kg. Pada siklus ketiga, nilai nitrogen awal sebesar 53 mg/kg menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 8 menit dan mengalami peningkatan hingga 152 mg/kg, kemudian turun hingga 63 mg/kg. Siklus keempat menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 8,6 menit dari nilai nitrogen awal 63 mg/kg, dengan nilai maksimum 148 mg/kg dan nilai akhir 63 mg/kg. Selanjutnya, pada siklus kelima, nilai nitrogen awal tetap sebesar 63 mg/kg, kemudian sistem memberikan keluaran fuzzy sebesar 8 menit dan menghasilkan nilai maksimum 147 mg/kg sebelum turun hingga 60 mg/kg pada akhir pengujian. Hasil tersebut menunjukkan adanya perubahan durasi pemberian nutrisi pada setiap siklus sesuai dengan kondisi nitrogen yang terbaca.



(a)



(b)

Gambar 4. 11 (a) Grafik perubahan nitrogen terhadap waktu pada titik 2; (b) Dokumentasi posisi sensor NPK pada titik 2

Berdasarkan Gambar 4.11 respons nitrogen pada Titik 2 menunjukkan perubahan yang berlangsung secara berulang. Pada dua siklus awal, nilai nitrogen maksimum masih berada di bawah setpoint, yaitu 82 mg/kg pada siklus pertama dan 104 mg/kg pada siklus kedua. Mulai siklus ketiga, nilai nitrogen telah melewati setpoint dengan nilai maksimum 152 mg/kg, kemudian pada siklus keempat dan kelima masing-masing mencapai 148 mg/kg dan 147 mg/kg. Kondisi tersebut menunjukkan terjadinya *overshoot* pada tiga siklus terakhir, dengan nilai

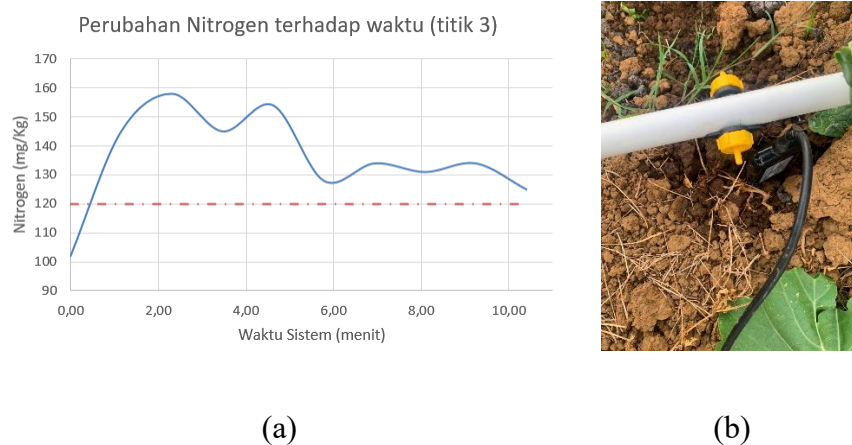
maksimum yang relatif berdekatan. Setelah mencapai nilai maksimum, nitrogen kembali mengalami penurunan hingga berada pada kisaran 60–63 mg/kg pada akhir siklus. Dengan demikian, respons pada Titik 2 menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan nitrogen dari kondisi awal yang rendah hingga melewati setpoint, tetapi nilai nitrogen masih mengalami fluktuasi dan belum dapat dipertahankan secara kontinu di sekitar 120 mg/kg.

Selanjutnya pengujian pada Titik 3 dilakukan untuk mengamati respons kendali *fuzzy logic* terhadap perubahan nilai nitrogen pada kondisi awal yang lebih dekat dengan setpoint 120 mg/kg. Pada titik ini, sensor NPK ditempatkan pada media tanam dengan jarak kurang lebih 2 cm dari PCJ dripper. Pengujian dilakukan dalam satu siklus dengan keluaran fuzzy yang diterapkan sebagai durasi pemberian nutrisi, kemudian sistem diberikan waktu *wait diffusion* selama 6 menit sebelum pembacaan nitrogen dilakukan kembali. Hasil pengujian pada Titik 3 ditampilkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 pengujian kendali fuzzy pada titik 3

Siklus	N Awal (mg/kg)	Output Fuzzy (menit)	<i>Wait Diffusion</i> (menit)	N Maksimum (mg/kg)	N Akhir Siklus (mg/kg)
1	102	4,4	6	158	125

Berdasarkan Tabel 4.15, nilai nitrogen awal pada Titik 3 sebesar 102 mg/kg, sehingga berada 18 mg/kg di bawah setpoint. Kondisi tersebut menghasilkan keluaran fuzzy sebesar 4,4 menit, yang kemudian digunakan sebagai durasi pemberian nutrisi. Setelah proses pemberian nutrisi dan *wait diffusion* selama 6 menit, nilai nitrogen meningkat hingga mencapai 158 mg/kg. Setelah mencapai nilai maksimum tersebut, nilai nitrogen mengalami penurunan dan kembali berfluktuasi pada kisaran yang lebih dekat dengan setpoint. Pada akhir pengujian, nilai nitrogen tercatat sebesar 125 mg/kg, sehingga berada 5 mg/kg di atas setpoint.



Gambar 4. 12 (a) Grafik perubahan nitrogen terhadap waktu pada titik 3; (b) Dokumentasi posisi sensor NPK pada titik 3.

Berdasarkan Gambar 4.12, terlihat bahwa nilai nitrogen meningkat dari 102 mg/kg hingga mencapai nilai maksimum sekitar 158 mg/kg setelah pemberian nutrisi. Kondisi tersebut menunjukkan adanya *overshoot* sebesar 38 mg/kg terhadap setpoint. Setelah mencapai nilai maksimum, nitrogen mengalami penurunan hingga mendekati setpoint, kemudian berfluktuasi pada kisaran 128–134 mg/kg sebelum berakhir pada 125 mg/kg. Pola tersebut menunjukkan bahwa setelah pemberian nutrisi, nilai nitrogen tidak langsung berada pada kondisi tetap, tetapi mengalami perubahan sebelum mendekati kondisi setpoint. Pada akhir pengujian, nilai nitrogen sebesar 125 mg/kg menunjukkan bahwa pembacaan telah berada cukup dekat dengan setpoint 120 mg/kg, meskipun masih terdapat selisih sebesar 5 mg/kg.

Berdasarkan hasil pengujian pada ketiga titik, dilakukan perbandingan untuk melihat karakteristik respons kendali *fuzzy logic* terhadap setpoint nitrogen 120 mg/kg. Perbandingan meliputi kondisi awal nitrogen, jumlah siklus, keluaran fuzzy awal, waktu *wait diffusion*, nilai maksimum, serta nilai akhir nitrogen pada masing-masing titik.

Tabel 4. 16 Perbandingan Hasil Pengujian Kendali Fuzzy pada Tiga Titik

Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3
Jarak sensor dengan PCJ	±5 cm	±4 cm	±2 cm
<i>Wait diffusion</i>	10 menit	6 menit	6 menit

Parameter	Titik 1	Titik 2	Titik 3
N awal (mg/kg)	2	3	102
Jumlah siklus	4	5	1
Output fuzzy awal	10 menit	10 menit	4,4 menit
N maksimum (mg/kg)	183	152	158
N akhir (mg/kg)	84	60	125
Selisih N akhir terhadap SP	-36 mg/kg	-60 mg/kg	+5 mg/kg

Berdasarkan Tabel 4.16, kendali *fuzzy logic* menunjukkan karakteristik respons yang berbeda pada ketiga titik pengujian. Perbedaan tersebut terlihat dari kondisi nitrogen awal, keluaran fuzzy, jumlah siklus pengendalian, serta perubahan nilai nitrogen selama proses fertigasi. Titik 1 dan Titik 2 memiliki kondisi nitrogen awal yang sangat rendah, yaitu masing-masing 2 mg/kg dan 3 mg/kg, sehingga keduanya memiliki jarak yang besar terhadap setpoint 120 mg/kg. Kondisi tersebut menghasilkan keluaran fuzzy awal sebesar 10 menit pada kedua titik dan membutuhkan beberapa siklus untuk melakukan peningkatan serta koreksi nilai nitrogen. Titik 1 menjalani empat siklus, sedangkan Titik 2 menjalani lima siklus. Sementara itu, Titik 3 memiliki nilai nitrogen awal sebesar 102 mg/kg, sehingga hanya berjarak 18 mg/kg dari setpoint. Kondisi tersebut menghasilkan keluaran fuzzy awal yang lebih kecil, yaitu 4,4 menit, dan pengujian hanya berlangsung dalam satu siklus. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kondisi awal nitrogen memberikan perbedaan pada respons awal sistem dan jumlah siklus yang diperlukan selama pengujian.

Dari sisi respons setelah pemberian nutrisi, ketiga titik menunjukkan peningkatan nitrogen hingga melewati setpoint, tetapi dengan besaran yang berbeda. Titik 1 menghasilkan nilai nitrogen maksimum sebesar 183 mg/kg, sedangkan Titik 2 dan Titik 3 masing-masing mencapai 152 mg/kg dan 158 mg/kg. Setelah mencapai nilai maksimum, Titik 1 dan Titik 2 mengalami penurunan yang cukup besar sehingga dilakukan pemberian nutrisi kembali pada siklus berikutnya. Pada Titik 1, nilai maksimum yang diperoleh pada setiap siklus berada pada rentang

151-183 mg/kg, sedangkan Titik 2 pada tiga siklus terakhir menghasilkan nilai maksimum yang relatif berdekatan, yaitu 152, 148, dan 147 mg/kg. Titik 3 memiliki pola yang berbeda karena setelah mencapai nilai maksimum 158 mg/kg, nilai nitrogen kemudian berfluktuasi pada kisaran yang lebih dekat dengan setpoint dan berakhir pada 125 mg/kg. Dengan demikian, ketiga titik sama-sama menunjukkan adanya *overshoot*, tetapi pola perubahan nitrogen setelah mencapai nilai maksimum berbeda pada masing-masing titik.

Jika ditinjau dari kondisi akhir pengujian, Titik 3 menghasilkan nilai nitrogen yang paling dekat dengan setpoint, yaitu 125 mg/kg, dengan selisih sebesar 5 mg/kg. Sementara itu, Titik 1 berakhir pada 84 mg/kg atau 36 mg/kg di bawah setpoint, sedangkan Titik 2 berakhir pada 60 mg/kg atau 60 mg/kg di bawah setpoint. Perbedaan respons tersebut perlu dipertimbangkan berdasarkan kondisi pengujian pada masing-masing titik, meliputi kondisi awal nitrogen, jumlah siklus, posisi sensor terhadap PCJ, dan waktu *wait diffusion*. Jarak sensor terhadap PCJ masing-masing sebesar ± 5 cm pada Titik 1, ± 4 cm pada Titik 2, dan ± 2 cm pada Titik 3, sedangkan *wait diffusion* yang digunakan adalah 10 menit pada Titik 1 serta 6 menit pada Titik 2 dan Titik 3. Oleh karena itu, hasil perbandingan menunjukkan karakteristik respons sistem pada tiga kondisi pengujian yang berbeda. Titik 1 dan Titik 2 menunjukkan proses koreksi melalui beberapa siklus karena kondisi awal nitrogen yang sangat rendah, sedangkan Titik 3 menunjukkan nilai akhir yang lebih dekat dengan setpoint karena kondisi awalnya sudah berada lebih dekat dengan setpoint.

4.6 Pengujian Kendali *Threshold Soil Moisture*

Pengujian kendali *threshold* soil moisture dilakukan untuk mengetahui respons sistem dalam menentukan status pompa berdasarkan nilai kelembapan tanah yang terbaca. Sistem menggunakan nilai 60% sebagai threshold, sehingga nilai kelembapan di bawah threshold akan menyebabkan pompa aktif, sedangkan nilai kelembapan di atas threshold menyebabkan pompa tetap dalam kondisi tidak aktif. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk mengamati respons sistem pada kondisi kelembapan yang berbeda.

Tabel 4. 17 hasil pengujian kendali *threshold soil moisture*

Pengujian	Soil Moisture (%)	Threshold (%)	Kondisi terhadap Threshold	Status Pompa
1	40	60	Di bawah threshold	ON
2	100	60	Di atas threshold	OFF
3	100	60	Di atas threshold	OFF

Berdasarkan Tabel 4.17, pada pengujian pertama nilai *soil moisture* sebesar 40% berada di bawah nilai *threshold* yang ditetapkan sebesar 60%, sehingga kondisi tersebut memenuhi kriteria untuk mengaktifkan pompa dan sistem memberikan status ON. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketika kelembapan tanah berada di bawah batas yang ditentukan, sistem menganggap kondisi media masih memerlukan penyiraman sehingga aktuator air diaktifkan. Sementara itu, pada pengujian kedua dan ketiga, nilai *soil moisture* masing-masing sebesar 100%, yang berada jauh di atas *threshold* 60%, sehingga sistem memberikan status pompa OFF. Pada kondisi tersebut, sistem tidak melakukan penyiraman karena nilai kelembapan yang terbaca telah berada di atas batas pengaktifan pompa. Perbedaan keputusan antara pengujian pertama dengan pengujian kedua dan ketiga menunjukkan bahwa perubahan nilai *soil moisture* terhadap *threshold* menghasilkan perubahan status aktuator sesuai dengan logika kendali yang diterapkan. Hasil pengujian juga menunjukkan konsistensi keputusan pada kondisi kelembapan yang sama, ditunjukkan oleh dua pengujian dengan nilai *soil moisture* 100% yang sama-sama menghasilkan status pompa OFF. Dengan demikian, berdasarkan tiga kondisi pengujian yang dilakukan, kendali *threshold* mampu menentukan status pompa secara diskrit berdasarkan posisi nilai *soil moisture* terhadap batas 60%, yaitu mengaktifkan pompa ketika nilai berada di bawah *threshold* dan mempertahankan pompa dalam kondisi OFF ketika nilai berada di atas *threshold*.

4.7 Pengujian Monitoring

Pengujian monitoring dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan pencatatan dan penyajian informasi hasil pembacaan sensor serta

status kerja perangkat. Komunikasi antara ESP32-S3 dan *Dashboard Fertigasi* dilakukan melalui jaringan internet dengan Google Apps Script sebagai perantara pertukaran data. Data hasil pembacaan sensor dan status sistem dikemas dalam format JSON (*JavaScript Object Nation*), kemudian dikirim dari ESP32-S3 menggunakan metode HTTP POST menuju *endpoint* Google Apps Script untuk dicatat dan diproses. Sementara itu, data atau informasi yang diperlukan oleh ESP32-S3 dari sistem monitoring diperoleh melalui metode HTTP GET. Data yang diterima dan dikirim tersebut selanjutnya digunakan untuk kebutuhan *logging* pada spreadsheet serta penyajian informasi pada *Dashboard Fertigasi* berbasis web. Parameter yang diamati meliputi nilai sensor, kondisi sistem, status proses pencampuran dan fertigasi, *mode operasi*, *Wi-Fi RSSI*, dan *uptime*. Pengujian dilakukan untuk memastikan proses pertukaran data antara ESP32-S3, Google Apps Script, spreadsheet, dan *dashboard* dapat berjalan sesuai dengan fungsi yang dirancang.

Hasil pencatatan data pada spreadsheet ditunjukkan pada Tabel 4.18. Berdasarkan data yang tercatat pada 3 Agustus 2026 pukul 15:11:25, perangkat dengan *Device ID* ESP32_FERTIGASI_01 berada dalam kondisi *System Enabled* dan *System Armed* dengan mode operasi MANUAL. Pada waktu tersebut, sistem mencatat status pencampuran (*Mix State*) sebesar 3 dan status fertigasi (*Fert State*) sebesar 0. Parameter sensor yang tercatat meliputi TDS sebesar 502,9909 ppm, level *mixing tank* sebesar 83,95864%, level tandon sebesar 64,85881%, nitrogen sebesar 120 mg/kg, fosfor sebesar 325 mg/kg, kalium sebesar 319 mg/kg, serta rata-rata kelembapan tanah sebesar 20,51037%. Selain parameter sensor, sistem juga mencatat status *refill* FALSE, kekuatan sinyal Wi-Fi sebesar -44 dBm, *uptime* sebesar 1246 s, dan pesan sistem *START:CLOUD*.

Tabel 4. 18 Hasil Logging data sistem

Parameter	Hasil
Waktu pencatatan	03/08/2026 15:11:25
Device ID	ESP32_FERTIGASI_01
System enabled	TRUE
System armed	TRUE

Parameter	Hasil
Mode operasi	MANUAL
Schedule active	FALSE
Time valid	TRUE
Status pencampuran (<i>Mix State</i>)	3
Status fertigasi (<i>Fert State</i>)	0
TDS	502,9909 ppm
Nitrogen	120 mg/kg
Phosphorus	325 mg/kg
Potassium	319 mg/kg
Rata-rata kelembapan tanah	20,51037 %
Refill	FALSE
Wi-Fi RSSI	-44 dBm
Uptime	1246 s
Message	START: CLOUD

Data pada Tabel 4.18 menunjukkan bahwa sistem mampu mencatat beberapa parameter dalam satu waktu pencatatan. Pencatatan tersebut mencakup kondisi perangkat, hasil pembacaan sensor, status proses, serta informasi konektivitas sehingga dapat digunakan sebagai data historis untuk mengetahui kondisi sistem selama pengujian.



Gambar 4. 13 Tampilan *Dashboard*

Berdasarkan tampilan pada Gambar 4.13, dashboard menampilkan nilai TDS sebesar 512,2 ppm, level *mixing tank* sebesar 83,2%, level tandon sebesar

82,6%, dan rata-rata kelembapan tanah sebesar 31,5%. Dashboard juga menampilkan informasi status perangkat dan waktu data terakhir yang diterima. Nilai yang ditampilkan pada dashboard tidak dibandingkan secara langsung dengan data pada Tabel 4.18 karena kedua data tersebut diperoleh pada waktu pencatatan yang berbeda. Tabel 4.18 digunakan sebagai hasil *logging* pada waktu tertentu, sedangkan Gambar 4.13 digunakan untuk menunjukkan kemampuan sistem dalam menampilkan data dan status perangkat melalui antarmuka web.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, sistem monitoring telah mampu menjalankan dua fungsi utama, yaitu mencatat data hasil pembacaan dan status sistem pada spreadsheet serta menampilkan informasi tersebut melalui dashboard berbasis web. Data *logging* dapat digunakan sebagai rekaman historis selama pengujian, sedangkan dashboard memberikan tampilan yang lebih mudah untuk mengamati kondisi sistem. Dengan demikian, fitur monitoring yang dirancang dapat mendukung pengamatan terhadap kondisi sensor, status proses fertigasi, dan kondisi perangkat selama sistem beroperasi.