

**OPTIMASI DISTRIBUSI AIR PADA SISTEM IRIGASI TETES
BERBASIS ACO (*ANT COLONY OPTIMIZATION*)
DAN KONTROL PID (*PROPORTIONAL
INTEGRAL DERIVATIVE*)**

SKRIPSI

**Oleh :
ANDI KUSTIAWAN
NIM. 19650021**



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**OPTIMASI DISTRIBUSI AIR PADA SISTEM IRIGASI TETES
BERBASIS ACO (*ANT COLONY OPTIMIZATION*)
DAN KONTROL PID (*PROPORTIONAL
INTEGRAL DERIVATIVE*)**

SKRIPSI

Diajukan kepada:
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)

Oleh :
ANDI KUSTIAWAN
NIM. 19650021

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

OPTIMASI DISTRIBUSI AIR PADA SISTEM IRIGASI TETES BERBASIS ACO (ANT COLONY OPTIMIZATION) DAN KONTROL PID (PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE)

SKRIPSI

Oleh:
ANDI KUSTIAWAN
NIM. 19650021

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Tanggal: 12 Juni 2026

Pembimbing I,



Shoffin Nahwa Utama, M.T
NIP. 19860703 202012 1 003

Pembimbing II,



Prof. Dr. Muhammad Faisal, M.T
NIP. 19740510 200501 1 007

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Supriyono, M. Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

HALAMAN PENGESAHAN

OPTIMASI DISTRIBUSI AIR PADA SISTEM IRIGASI TETES BERBASIS ACO (ANT COLONY OPTIMIZATION) DAN KONTROL PID (PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE)

SKRIPSI

Oleh :
ANDI KUSTIAWAN
NIM. 19650021

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal: 17 Juni 2026

Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji	: <u>Ajib Hanani, M.T</u> NIP. 19840731 202321 1 013
Anggota Penguji I	: <u>Ahmad Fahmi Karami, M.Kom</u> NIP. 19870909 202012 1 001
Anggota Penguji II	: <u>Shoffin Nahwa Utama, M.T</u> NIP. 19860703 202012 1 003
Anggota Penguji III	: <u>Prof. Dr. Muhammad Faisal, M.T</u> NIP. 19740510 200501 1 007

()
()
()
()

Mengetahui dan Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang


Supriyono, M. Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andi Kustiawan
NIM : 19650021
Fakultas / Program Studi : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika
Judul Skripsi : Optimasi Distribusi Air Pada Sistem Irigasi Tetes Berbasis ACO (*Ant Colony Optimization*) Dan Kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*)

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini merupakan hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 17 Juni 2026
Yang membuat pernyataan,



Andi Kustiawan
NIM.19650021

MOTTO

"Rencana besar tidak membutuhkan banyak suara, tetapi membutuhkan banyak usaha."

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah Rabbil ‘Alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas rahmat, nikmat, dan kemudahan yang diberikan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada

Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan seluruh umatnya.

Dengan penuh rasa syukur, karya sederhana ini penulis persembahkan kepada:

Kedua orang tua tercinta Bapak Samiran dan Ibu Sunarsih, terima kasih atas segala doa, kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang tidak pernah putus. Doa terbaik semoga senantiasa diberikan kesehatan, keberkahan, dan kebahagiaan kepada Ayah dan Ibu.

Bapak dan Ibu Dosen Teknik Informatika, khususnya Dosen Pembimbing, terima kasih atas ilmu, arahan, dan bimbingan yang telah diberikan selama proses perkuliahan dan penyusunan skripsi ini.

Teman-teman seperjuangan Teknik Informatika, terima kasih atas kebersamaan, dukungan, dan motivasi yang telah diberikan selama masa studi.

Terakhir, untuk diri saya sendiri, terima kasih telah bertahan, terus berusaha, dan tidak menyerah dalam setiap proses hingga dapat menyelesaikan perjalanan ini dengan baik.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala* atas limpahan rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya sehingga penyusunan skripsi yang berjudul “*Optimasi Distribusi Air pada Sistem Irigasi Tetes Berbasis ACO (Ant Colony Optimization) dan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative)*” dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh pengikut beliau hingga akhir zaman.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh banyak bantuan, arahan, motivasi, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nurdiana, S.Ag., M.Si., selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. H. Agus Mulyono, S.Pd., M.Kes., selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Supriyono, M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
4. Bapak Shoffin Nahwa Utama, M.T., selaku dosen pembimbing I yang dengan penuh kesabaran dan perhatiannya telah membimbing peneliti dalam mengerjakan dan menyelesaikan skripsi ini dengan pendekatan yang

sangat luar biasa. Peneliti sangat berterimakasih pada arahan, masukan, dan saran yang diberikan selama mengerjakan skripsi ini.

5. Prof. Dr. Ir. Muhammad Faisal, M.T., selaku dosen pembimbing dua yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan arahan yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Ajib Hanani, M.T., dan Bapak Ahmad Fahmi Karami, M.Kom., selaku dosen Penguji I dan dosen Penguji II yang telah menguji serta memberikan banyak saran untuk menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
7. Juniardi Nur Fadila, M.T., selaku dosen dan mentor bagi penulis yang telah banyak menularkan ilmu, pengalaman, serta inspirasi. Terima kasih atas segala arahan, dukungan, dan waktu yang selalu diberikan untuk membantu penulis berkembang, baik dalam aspek akademik maupun keterampilan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lebih baik.
8. Mbak Nia Faricha, S.Si., selaku Admin Program Studi Teknik Informatika, yang telah memberikan bantuan serta dukungan kepada penulis selama pelaksanaan seminar dan proses penyusunan skripsi ini.
9. Seluruh sivitas akademika Program Studi Teknik Informatika, terutama para dosen dan staf Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, yang selama masa studi telah memberikan wawasan, pengalaman, serta bimbingan yang sangat bermanfaat. Berbagai ilmu dan pembelajaran yang diberikan menjadi bekal penting dalam pengembangan kompetensi akademik maupun profesional penulis.

10. Ucapan terima kasih yang tulus penulis persembahkan kepada ayah dan ibu tercinta atas doa yang tidak pernah terputus, perhatian yang penuh kasih, serta dukungan yang selalu diberikan. Pengorbanan dan dorongan yang diberikan selama ini menjadi motivasi utama yang mengantarkan penulis menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi ini.
11. Teman-teman seperjuangan Angkatan 2019 Jurusan Teknik Informatika, kakak-kakak senior yang selalu memberikan semangat serta berbagi ilmu dan pengalamannya kepada penulis.
12. Muhammad Haikal Akbar Attaufieqy dan Moh. Alfin, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pemikirannya untuk membantu penulis dalam proses perancangan sistem dan pembuatan rangkaian. Terima kasih atas bantuan, saran, dan kerja sama yang diberikan sehingga proses penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan lebih cepat dan baik.
13. Aqshal Radanta, Achmad Nur Aqmali, dan Fuaidil Ikhrom, yang senantiasa hadir memberikan dukungan dan pengingat kepada penulis selama proses penyusunan skripsi. Kehadiran dan perhatian yang diberikan menjadi salah satu penyemangat bagi penulis untuk tetap fokus, konsisten, dan menyelesaikan penelitian ini hingga akhir.
14. Sahabat-sahabat dalam Grup “Ahlussunnah Wal Jamaah”, yang telah memberikan banyak cerita, pengalaman, dukungan, doa, serta bantuan dalam berbagai bentuk selama masa perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan dan persaudaraan yang telah terjalin hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

15. Teman-teman Komunitas ONTAKI, yang selalu hadir memberikan dukungan dan semangat kepada penulis dalam setiap proses pengembangan diri. Terima kasih atas kebersamaan, inspirasi, dan pengalaman berharga yang telah diberikan selama ini sehingga penulis dapat terus belajar, bertumbuh, dan menjadi pribadi yang lebih baik.

16. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, masukan, serta dukungan selama proses penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat keterbatasan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh sebab itu, penulis membuka diri terhadap segala bentuk kritik dan saran yang membangun guna perbaikan dan pengembangan penelitian selanjutnya. Semoga skripsi ini dapat memberikan kontribusi positif serta menjadi sumber informasi yang bermanfaat bagi pembaca dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bidang terkait.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Malang, 17 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	II
HALAMAN PERSETUJUAN	III
HALAMAN PENGESAHAN	IV
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	V
MOTTO	VI
HALAMAN PERSEMBAHAN	VII
KATA PENGANTAR.....	VIII
DAFTAR ISI.....	XII
DAFTAR GAMBAR.....	XV
DAFTAR TABEL	XVI
ABSTRAK	XVII
ABSTRACT	XVIII
البحث مستخلص.....	XIX
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Pernyataan Masalah	8
1.3 Tujuan Penelitian	9
1.4 Batasan Masalah	9
1.5 Manfaat Penelitian	10
BAB II KAJIAN TEORI	11
2.1 Penelitian Terkait	11
2.2 Landasan Teori.....	14
2.2.1 Sistem Irigasi Tetes	14
2.2.2 <i>Internet of Things</i> (IoT)	22
2.2.3 Tanaman Tomat	23
2.2.4 <i>Ant Colony Optimization</i> (ACO)	25
2.2.5 Kontrol PID.....	29
2.2.6 Mikrokontroler	33
2.2.7 Sensor <i>Waterflow</i>	35
2.2.8 Sensor Kelembaban tanah.....	36
2.2.9 <i>Duty Cycle</i>	38
2.2.10 <i>Coefficient of Variation</i> (CV)	38
2.2.11 <i>Coefficient of Uniformity</i> (CU)	39
BAB III METODELOGI PENELITIAN.....	41
3.1 Alur Penelitian	41
3.2 Analisis dan Perancangan Sistem	42
3.2.1 Desain Sistem.....	42
3.2.2 Perancangan Sistem Irigasi Tetes	46
3.2.2.1 Kebutuhan <i>Hardware</i>	46
3.2.2.2 Kebutuhan <i>Software</i>	50
3.2.2.3 Alur Komunikasi Data.....	53
3.2.2.4 Desain Irigasi Tetes	55

3.2.3 Perancangan <i>Ant Colony Optimization</i>	55
3.2.3.1 Parameter ACO	56
3.2.3.2 Implementasi Algoritma ACO	59
3.2.3.3 <i>Pseudocode</i> ACO	62
3.2.4 Perancangan Kontrol PID	64
3.2.4.1 Implementasi Kontrol PID	65
3.2.4.2 <i>Pseudocode</i> PID	68
3.2.5 Integrasi Algoritma ACO dan PID.....	69
3.2.5.1 Mekanisme Integrasi	70
3.2.5.2 <i>Pseudocode</i> Integrasi ACO dan PID	72
3.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian.....	73
3.3.1 Pengambilan Data	73
3.3.1.1 Data Input Metode ACO	74
3.3.1.2 Data Input Metode PID	74
3.3.2 Rencana Pengujian.....	75
3.3.2.1 Rencana Kalibrasi Sensor Kelembaban Tanah.....	75
3.3.2.2 Rencana Pengujian ACO	77
3.3.2.3 Rencana Pengujian PID	78
3.3.2.4 Pengujian Integrasi Metode ACO dan PID	79
3.3.2.5 Pengujian Kinerja Pompa	79
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	81
4.1 Hasil Pengujian	81
4.1.1 Kalibrasi Sensor Kelembaban Tanah.....	81
4.1.1.1 Hasil Uji Sensor Sebelum Dikalibrasi.....	81
4.1.1.2 Hasil Uji Sensor Setelah Dikalibrasi	82
4.1.2 Pengujian ACO (<i>Ant Colony Optimization</i>)	83
4.1.2.1 Pengujian Parameter ACO (<i>Ant Colony Optimization</i>).....	83
4.1.2.2 Pengujian ACO Berdasarkan Jumlah Iterasi	86
4.1.2.3 Uji Ketepatan Algoritma ACO dalam Menentukan Jalur Irigasi ..	89
4.1.3 Pengujian PID (<i>Proportional Integral Derivative</i>).....	90
4.1.3.1 Hasil Penentuan <i>Setpoint</i>	91
4.1.3.2 Hasil Tuning kontroler P (<i>Proportional</i>).....	91
4.1.3.3 Hasil Tuning kontroler PI (<i>Proportional-Integral</i>)	92
4.1.3.4 Hasil Tuning Kontroler PD (<i>Proportional-Derivative</i>).....	93
4.1.3.5 Hasil Tuning Kontroler PID (<i>Proportional-Integral-Derivative</i>) .	94
4.1.4 Pengujian Kinerja Sistem Irigasi Tetes.....	96
4.1.4.1 Pengujian Stabilitas Distribusi Air	96
4.1.4.2 Pengujian Efisiensi Penggunaan Air	99
4.1.4.3 Pengujian Efisiensi Kinerja Pompa	103
4.2 Pembahasan.....	108
4.2.1 Sistem Irigasi Tetes.....	108
4.2.2 Sistem <i>Hardware</i>	110
4.2.3 Sistem <i>Software</i>	111
4.3 Analisa Hasil	114
4.4 Integrasi Islam.....	117

4.4.1 <i>Muamalah Ma'a Allah</i>	118
4.4.2 <i>Muamalah Ma'a Annas</i>	119
4.4.3 <i>Muamalah Ma'a Al-Alam</i>	120
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	122
5.1 Kesimpulan	122
5.2 Saran	123
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Emitter	18
Gambar 2.2 Brushed Motor.....	20
Gambar 2.3 Brushless Motor	21
Gambar 2.4 Impeller Pompa	22
Gambar 2.5 Tanaman Tomat.....	24
Gambar 2.6 Pembangunan Jejak Pheromone.....	25
Gambar 2.7 Perubahan Konsentrasi Pheromone.....	26
Gambar 2.8 Diagram Alir <i>Ant Colony Optimization</i>	27
Gambar 2.9 Diagram Kontrol PID	31
Gambar 2.10 Mikrokotroller Arduino.....	34
Gambar 2.11 Mikrokontroller ESP32	34
Gambar 2.12 Sensor <i>Waterflow</i>	36
Gambar 2.13 Sensor Kelembaban Tanah.....	37
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	41
Gambar 3.2 Desain Sistem.....	43
Gambar 3.3 Diagram Alur Program.....	45
Gambar 3.4 Desain <i>Hardware</i>	46
Gambar 3.5 Dashboard Interface	50
Gambar 3.6 MQTT Controller Interface.....	51
Gambar 3.7 Rekap Data Interface	52
Gambar 3.8 Desain Alur Komunikasi Data	53
Gambar 3.9 Desain Irigasi Tetes.....	55
Gambar 3.10 Skenario Algoritma ACO.....	59
Gambar 3.11 Implementasi Kontrol PID	65
Gambar 3.12 Alur Mekanisme Integrasi ACO dan PID	70
Gambar 3.13 Alat Ukur Kelembaban Tanah.....	76
Gambar 4.1 Grafik Hasil Uji Parameter ACO	84
Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Iterasi ACO	87
Gambar 4.3 Grafik Hasil Tuning PID Kp-150, Ki-6, Kd 12-15-16.....	94
Gambar 4.4 Grafik Hasil Tuning PID Kp-150, Ki-7, Kd 12-15-16.....	95
Gambar 4.5 Grafik Hasil Tuning PID Kp-150, Ki-8, Kd 12-15-16.....	95
Gambar 4.6 Diagram Perbandingan Uji Kestabilan Distribusi Air.....	99
Gambar 4.7 Diagram Perbandingan Uji Penggunaan Air.....	103
Gambar 4.8 Perbandingan Uji Kinerja Pompa.....	107
Gambar 4.9 Hasil Implementasi Irigasi Tetes.....	108
Gambar 4.10 <i>Hardware Control System</i>	110
Gambar 4.11 Dashboard Website	111
Gambar 4.12 Menu Rekap Data.....	112
Gambar 4.13 Menu Congfig MQTT	113

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kriteria Penilaian <i>Coefficient of Variation</i> (CV)	39
Tabel 2.2 Kriteria Penilaian <i>Coefficient of Uniformity</i> (CU).....	40
Tabel 3.1 Parameter ACO	56
Tabel 3.2 Skala Kategori Tanah dan Pheromone.....	61
Tabel 3.3 Jarak dan Inverse Jarak	62
Tabel 3.4 Pheromone Setiap Sensor.....	74
Tabel 3.5 Rencana Kalibrasi Sensor	76
Tabel 4.1 Perbandingan Nilai Sensor Sebelum Dikalibrasi	81
Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Sensor Setelah Kalibrasi	82
Tabel 4.3 Pengujian Parameter ACO	83
Tabel 4.4 Hasil Pengujian ACO Berdasarkan Jumlah Iterasi	86
Tabel 4.5 Uji Ketepatan Pemilihan Jalur Algoritma ACO	89
Tabel 4.6 Penentuan Nilai Setpoint PID	91
Tabel 4.7 Hasil <i>Tuning</i> Kontroler P (<i>Proportional</i>)	91
Tabel 4.8 Hasil <i>Tuning</i> Menggunakan Kontroler PI (<i>ProportionL-Integral</i>)	92
Tabel 4.9 Hasil <i>Tuning</i> Menggunakan Kontroler PD (<i>Proportional-Derivative</i>).	93
Tabel 4.10 Hasil <i>Tuning</i> Menggunakan Kontroler PID	94
Tabel 4.11 Hasil Uji Stabilitas Menggunakan Algoritma ACO dan PID	97
Tabel 4.12 Hasil Uji Stabilitas Tanpa Algoritma ACO dan PID	98
Tabel 4.13 Hasil Perbandingan Uji Stabilitas Distribusi Air	98
Tabel 4.14 Hasil Uji Efisiensi Penggunaan Air Dengan ACO dan PID	100
Tabel 4.15 Hasil Uji Efisiensi Penggunaan Air Tanpa ACO dan PID	101
Tabel 4.16 Hasil Uji Perbandingan Efisiensi Penggunaan Air	102
Tabel 4.17 Hasil Uji Kinerja Pompa dengan ACO dan PID.....	104
Tabel 4.18 Hasil Uji Kinerja Pompa Tanpa ACO dan PID	105
Tabel 4.19 Hasil Uji Perbandingan Kinerja Pompa	106

ABSTRAK

Kustiawan, Andi. 2026. **Optimasi Distribusi Air Pada Sistem Irigasi Tetes Berbasis Aco (*Ant Colony Optimization*) Dan Kontrol Pid (*Proportional Integral Derivative*)**. Skripsi. Program Studi Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Shoffin Nahwa Utama, M.T (II) Prof. Dr. Muhammad Faisal, M.T.

Kata Kunci: *Ant Colony Optimization*, *Internet of Things*, Irigasi Tetes, Kontrol PID.

Pertanian merupakan sektor penting yang sangat bergantung pada ketersediaan air untuk mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Keterbatasan sumber daya air pada lahan kering menuntut adanya sistem irigasi yang mampu mendistribusikan air secara efisien dan tepat sasaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan distribusi air pada sistem irigasi tetes berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) untuk menentukan prioritas jalur distribusi air dan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk mengatur kestabilan debit aliran air. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses kalibrasi sensor berhasil menurunkan rata-rata error pembacaan dari kondisi awal menjadi 2,41%. Pengujian algoritma ACO menghasilkan konfigurasi parameter terbaik dengan *error* 0%, sedangkan pada evaluasi 30 data pengujian diperoleh tingkat *error* MAPE sebesar 16,67%. Pengujian kontrol PID menunjukkan bahwa parameter terbaik diperoleh pada $K_p = 150$, $K_i = 7$ atau 8, dan $K_d = 15$, yang mampu mencapai setpoint dengan *error* 0,00%. Implementasi algoritma juga meningkatkan keseragaman distribusi air dengan menurunkan nilai *Coefficient of Variation* (CV) dari 13,43% menjadi 1,48% serta meningkatkan *Christiansen Uniformity* (CU) dari 76,68% menjadi 95,47%. Selain itu, sistem mampu menghemat penggunaan air hingga 39% dibandingkan metode konvensional serta menurunkan konsumsi energi pompa yang ditunjukkan oleh penurunan *duty cycle* dari 100% menjadi 47,8% dan arus rata-rata dari 1,86 A menjadi 0,91 A. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi algoritma ACO dan kontrol PID mampu meningkatkan efisiensi distribusi air, menjaga kestabilan debit aliran, serta mendukung penggunaan air dan energi yang lebih optimal pada sistem irigasi tetes.

ABSTRACT

Kustiawan, Andi. 2026. **Optimization of Water Distribution in a Drip Irrigation System Using Ant Colony Optimization (ACO) and Proportional-Integral-Derivative (PID) Control.** Undergraduate Thesis. Department of Informatics Engineering, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Advisors: (I) Shoffin Nahwa Utama, M.T (II) Prof. Dr. Muhammad Faisal, M.T

Keywords: Ant Colony Optimization, Drip Irrigation, Internet of Things, PID Control

Agriculture is a vital sector that heavily depends on water availability to support plant growth and productivity. Limited water resources in dryland areas necessitate the development of irrigation systems capable of distributing water efficiently and accurately according to plant requirements. This study aims to optimize water distribution in a drip irrigation system based on the *Internet of Things* (IoT) by employing the *Ant Colony Optimization* (ACO) algorithm to determine irrigation priority paths and the *Proportional-Integral-Derivative* (PID) controller to maintain stable water flow rates. The experimental results indicate that the sensor calibration process successfully reduced the average measurement error to 2.41%. The ACO algorithm achieved its best parameter configuration with a 0% error rate, while evaluation using 30 test datasets resulted in an error MAPE rate of 16.67%. The PID controller evaluation showed that the optimal parameters were obtained at $K_i = 7$, $K_p = 150$, $K_i = 7$ atau 8, dan $K_d = 15$, enabling the system to reach the desired setpoint with 0,00% error. The implementation of the proposed algorithms also improved water distribution uniformity, as indicated by a reduction in the Coefficient of Variation (CV) from 13.43% to 1.48% and an increase in the Christiansen Uniformity (CU) coefficient from 76.68% to 95.47%. Furthermore, the system reduced water consumption by 39% compared to conventional irrigation methods. It also improved pump energy efficiency, as demonstrated by a reduction in the duty cycle from 100% to 47.8% and a decrease in the average current consumption from 1.86 A to 0.91 A. These findings demonstrate that the integration of the ACO algorithm and PID control can effectively improve water distribution efficiency, maintain stable flow rates, and support more efficient utilization of both water and energy resources in drip irrigation systems.

البحث مستخلص

كوستياوان، أندي. 2026م. تحسين توزيع المياه في نظام الريّ بالتنقيط القائم على خوارزمية تحسين مستعمرة النمل (*Ant Colony Optimization*) والتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (*Proportional Integral Derivative*). البحث الجامعي. قسم الهندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: صفيان نحو أوتاما، الماجستير؛ المشرف الثاني: أ. د. محمد فيصل، الماجستير.

الكلمات الرئيسية: إنترنت الأشياء، تحكم، خوارزمية تحسين مستعمرة نمل، ريّ بالتنقيط.

يُعدّ القطاع الزراعي من القطاعات الحيوية التي تعتمد اعتماداً كبيراً على توافر المياه لدعم نمو النباتات وزيادة إنتاجيتها. وتفرض محدودية الموارد المائية في الأراضي الجافة الحاجة إلى أنظمة ريّ قادرة على توزيع المياه بكفاءة ودقة وفق الاحتياجات الفعلية للنباتات. وهدف هذا البحث إلى تحسين توزيع المياه في نظام الريّ بالتنقيط القائم على تقنية إنترنت الأشياء (*IoT*)، من خلال استخدام خوارزمية تحسين مستعمرة النمل (*ACO*) لتحديد أولويات مسارات توزيع المياه، وتطبيق نظام التحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (*PID*) لضبط استقرار معدل تدفق المياه. أظهرت نتائج الاختبارات أن عملية معايرة المستشعرات نجحت في خفض متوسط خطأ القياس إلى نسبة بلغت (2.41%) مقارنة بالحالة الأولية. كما أسفرت اختبارات خوارزمية تحسين مستعمرة النمل عن أفضل إعدادات للمعاملات بنسبة خطأ بلغت (0%)، في حين أظهرت عملية التقييم باستخدام ثلاثين مجموعة من بيانات الاختبار نسبة خطأ بلغت (16.67%). وأوضحت اختبارات نظام التحكم *PID* أن أفضل قيم للمعاملات كانت عند $K_f = 150$ ، $K_i = 7$ أو 8 ، و $K_d = 15$ ، حيث تمكن النظام من الوصول إلى القيمة المرجعية المطلوبة (*Setpoint*) بنسبة خطأ بلغت (0.00%). كما أسهم تطبيق الخوارزمية في تحسين تحانس توزيع المياه من خلال خفض قيمة معامل التباين (*Coefficient of Variation*) من (13.43%) إلى (1.48%)، ورفع معامل انتظام كريستيانسن (*Christiansen Uniformity*) من (76.68%) إلى (95.47%). إضافة إلى ذلك، استطاع النظام تحقيق وفر في استهلاك المياه بنسبة وصلت إلى (39%) مقارنةً بالأساليب التقليدية، فضلاً عن تقليل استهلاك الطاقة الكهربائية للمضخة، وهو ما ظهر من خلال انخفاض نسبة دورة التشغيل (*Duty Cycle*) من (100%) إلى (47.8%)، وانخفاض متوسط شدة التيار الكهربائي من (1.86 أمبير) إلى (0.91 أمبير). وأشارت نتائج البحث إلى أن الدمج بين خوارزمية تحسين مستعمرة النمل (*ACO*) ونظام التحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (*PID*) يسهم بفاعلية في رفع كفاءة توزيع المياه، والمحافظة على استقرار معدل التدفق، ودعم الاستخدام الأمثل للمياه والطاقة في أنظمة الريّ بالتنقيط.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertanian mempunyai peranan signifikan dalam bidang ekonomi global dan memegang peran krusial dalam memenuhi kebutuhan pangan secara global (Wibowo, 2020). Dalam mengembangkan sektor pertanian, terdapat faktor-faktor keberhasilan yang memiliki dampak signifikan pada pertumbuhan tanaman. Salah satu faktor ini adalah perubahan cuaca yang dapat sangat mempengaruhi proses pertumbuhan tanaman. Perubahan cuaca yang tiba-tiba dan ekstrem, serta ketidakteraturan pola curah hujan, memiliki dampak besar pada aktivitas pertanian dan juga dapat menyebabkan kondisi rawan pangan. Pola cuaca yang ekstrem ini juga berkontribusi pada terjadinya suatu bencana alam seperti banjir, tanah longsor, dan kekeringan (Taek et al., 2022). Potensi terjadi kekeringan lahan di Indonesia sangat luas, yaitu mencapai 76 juta hektar dan tersebar mulai dari dataran rendah sampai dataran tinggi, dengan iklim yang bervariasi antara basah dan kering. Dari total luas lahan kering di Indonesia sekitar 144,47 juta hektar, sekitar 99,65 juta hektar atau sekitar 68,98% di antaranya memiliki potensi untuk digunakan dalam kegiatan pertanian. Sementara itu, sisanya sekitar 44,82 juta hektar tidak cocok untuk pertanian, dan sebagian besar dari lahan ini terletak di wilayah hutan (Heryani & Rejekiningrum, 2020). Kejadian tersebut dapat menimbulkan tantangan serius bagi wilayah yang terkena dampak kekeringan, terutama terkait ketersediaan sumber daya air yang diperlukan.

Ketidakefisienan dalam penggunaan air menjadi hambatan bagi petani yang terdampak oleh lahan kering. Air memiliki peranan krusial dalam sektor pertanian, dan ketersediaan yang cukup akan membantu petani mencapai hasil yang optimal dalam usahanya. Namun, keterbatasan pasokan air di berbagai wilayah lahan kering mendorong perlunya tindakan untuk mengoptimalkan pemanfaatan air secara efisien dan efektif (J. Negara et al., 2021). Di sektor pertanian, air memiliki peran fundamental dalam mendukung pertumbuhan tanaman pangan. Ketersediaan air menjadi faktor krusial yang dapat menentukan kesuksesan usaha pertanian. Wilayah dengan lahan kering menghadirkan tantangan serius bagi petani, karena kekurangan air dapat mengakibatkan kelangkaan yang berdampak pada keberhasilan tanaman. Salah satu yang mempengaruhi hasil panen adalah air dan produktivitas dalam usaha budi daya tanaman (Awwaliyah et al., 2020).

Dalam konteks sektor pertanian, air memiliki peranan krusial sebagai kebutuhan primer untuk mendukung pertumbuhan tanaman pangan. Ketersediaan air memiliki peran penting dalam menentukan kesuksesan tanaman dalam aktivitas pertanian. Ketika terjadi kondisi lahan kering, hal ini menjadi masalah serius bagi petani karena kekurangan air yang mengakibatkan ketidakcukupan pasokan air. Karena air merupakan salah satu faktor penentu utama dalam mencapai keberhasilan dalam budidaya tanaman (Muhardiono et al., 2020). Usaha yang dapat dilakukan untuk mengolah kebutuhan air secara efisien adalah dengan sistem irigasi. Irigasi merujuk pada proses pengaliran air dari sumbernya ke area pertanaman. Sistem irigasi merupakan salah satu yang paling umum dipakai yaitu irigasi dengan curah permukaan tanah. Meskipun sistem ini membutuhkan jumlah

air yang besar, namun efisiensi penggunaan airnya cenderung rendah. Dalam menghadapi tantangan ketersediaan air, pilihan yang tepat adalah penggunaan irigasi tetes. Metode ini bisa meningkatkan efisiensi pemakaian air dengan cara menyalurkan air secara langsung ke dalam akar tanaman, sehingga bisa mengurangi pemborosan dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air (Steven Witman, 2021). Sama halnya dengan bumi ini, salah satu sumber daya alam yaitu air memiliki peran vital dalam menunjang kehidupan seluruh makhluk hidup. Banyaknya ayat dalam Al-Qur'an yang membahas tentang air menunjukkan bahwa keberadaannya memiliki nilai dan manfaat yang sangat besar bagi kehidupan manusia. Hal tersebut juga mengisyaratkan pentingnya memahami serta mengkaji air secara lebih mendalam guna mengetahui hakikat dan urgensinya. Selain itu, bumi berperan sebagai tempat penyimpanan dan pengelolaan cadangan air yang mendukung keberlangsungan siklus hidrologi. Adapun ayat Al-Qur'an yang memaparkan penjelasan mengenai siklus air serta fungsi bumi sebagai tempat penyimpanan air telah difirmankan oleh Allah *Subhanahu wa Ta'ala* sebagai berikut.

وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَّاهُ فِي الْأَرْضِ ۖ وَإِنَّا عَلَىٰ ذَهَابٍ بِهِ لَقَادِرُونَ

“Dan Kami turunkan air dari langit menurut suatu ukuran, lalu Kami jadikan air itu menetap di bumi, dan sesungguhnya Kami benar-benar berkuasa menghilangkannya.” (Q.S. Al-Mu'minun: 18).

Berdasarkan ayat tersebut, Allah *Subhanahu wa Ta'ala* menjelaskan berbagai nikmat yang telah dianugerahkan kepada hamba-Nya, yang jumlahnya tidak terhitung. Salah satu nikmat tersebut adalah diturunkannya air dari langit

dalam kadar yang telah ditetapkan. Frasa *biqadarin* (menurut suatu ukuran) menunjukkan bahwa Allah menurunkan air sesuai dengan kebutuhan makhluk-Nya, tidak berlebihan hingga menimbulkan kerusakan dan banjir, serta tidak terlalu sedikit sehingga menyebabkan kekeringan dan menghambat pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, jumlah air yang diturunkan senantiasa berada dalam takaran yang tepat untuk mendukung keberlangsungan kehidupan. (Resky, 2020).

Ibnu Katsir menjelaskan bahwa Allah menurunkan air hujan dari langit dengan ukuran yang tepat, tidak berlebihan sehingga menyebabkan kerusakan, dan tidak pula kurang sehingga tidak mencukupi kebutuhan. Air tersebut kemudian disimpan di bumi, baik di permukaan maupun di dalam tanah, sehingga manusia dapat memanfaatkannya. Allah juga berkuasa untuk menghilangkan air tersebut, baik dengan cara tidak menurunkannya, menyerapnya ke dalam tanah, atau menguapkannya, sehingga manusia dan hewan ternak mereka akan mati kehausan. Ayat ini mengingatkan manusia akan nikmat air yang diberikan oleh Allah dan kekuasaan-Nya untuk mengatur segala sesuatu, sehingga manusia diharapkan bersyukur dan tidak menyia-nyiakan nikmat tersebut (Katsir, 2015).

Maka dari itu sebagai hamba-Nya perlu untuk mensyukuri dan mengelola sumber daya air yang telah diberikan. Sistem irigasi tetes adalah salah-satu cara untuk mensyukuri nikmat Allah *Subhanahu wa ta'ala* yang telah menurunkan air dari langit dengan ukuran tertentu, lalu menempatkan air itu di bumi, dan menumbuhkan dengan air itu tanaman di bumi ini. Dengan menggunakan irigasi tetes, petani dapat mengelola sumber daya air dengan bijak, seperti dengan

memberikan air secara langsung ke akar tanaman, mengurangi pemborosan dan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya air.

Irigasi tetes merupakan bentuk irigasi yang menyediakan air dalam jumlah rendah dengan frekuensi yang tinggi (hampir kontinu) di sekitar akar tanaman. Metode ini cocok untuk daerah-daerah dengan ketersediaan air yang sangat terbatas, tanah dengan tekstur pasir, batu, atau kesulitan dalam penyerapan air, serta tanaman bernilai ekonomis tinggi. Kelebihan irigasi tetes meliputi peningkatan efisiensi penggunaan air, peningkatan pertumbuhan dan hasil tanaman, efisiensi dan efektivitas penyiraman yang lebih baik, pengendalian risiko akumulasi garam tanah, pengendalian pertumbuhan gulma, dan penghematan tenaga kerja. Dengan demikian, irigasi tetes merupakan solusi yang efektif dalam menghadapi tantangan irigasi dalam kondisi lingkungan yang penuh keterbatasan (Beo et al., 2021). Sistem irigasi tetes memiliki beberapa komponen utama yang penting, termasuk *reservoir* atau tandon penyimpanan air, pompa untuk mengalirkan air, kran kontrol untuk mengatur aliran, dan *emitter* yang merupakan titik-titik pemberi tetesan air pada tanaman. Komponen tersebut mempunyai peranan yang penting dalam sistem irigasi tetes sehingga air dapat di distribusi ketanaman.

Distribusi air merupakan bagian penting dalam sistem irigasi, baik itu irigasi kanal maupun irigasi yang konvensional. Pengembangan sistem irigasi otomatis bertujuan untuk meningkatkan penggunaan air sesuai kebutuhan tanaman. Optimalisasi ini dilakukan melalui pengaturan jaringan irigasi, meminimalan panjang pipa, serta penyesuaian distribusi air berdasarkan kondisi tanah. Dengan demikian, sistem irigasi yang optimal dapat membantu mengatasi kelangkaan air,

meningkatkan efisiensi penggunaan air, dan mendukung pemerataan distribusi air pada irigasi tetes. (Haris et al., 2021). Pemanfaatan teknologi juga bisa digunakan dalam proses ini dengan cara melakukan optimalisasi pada distribusi air irigasi salah-satunya menggunakan *Internet of Things (IoT)*.

Kemajuan teknologi informasi telah mendorong pemanfaatan *Artificial Intelligence (AI)* dan *Internet of Things (IoT)* dalam berbagai macam bidang kehidupan. Implementasi kedua teknologi ini telah berkembang pesat dan digunakan pada berbagai sektor, termasuk sektor pertanian. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa AI dan IoT memiliki potensi yang besar dalam meningkatkan efisiensi sistem pertanian, khususnya pada pengelolaan dan pengendalian irigasi. (Haris et al., 2021). Pemanfaatan teknologi *Internet of Things (IoT)* dapat digunakan sebagai proses pengambilan data dari sensor secara *realtime* yang kemudian akan direkap dalam sebuah *database* yang dikirimkan menggunakan koneksi *internet*. Namun, untuk mempermudah pengambilan keputusan dalam proses pemberian air ke tanaman seraca akurat berdasarkan kondisi tanah yang ada, diperlukan sebuah algoritma salah-satunya yaitu algoritma *Ant Colony Optimization (ACO)*.

Algoritma Ant Colony Optimization (ACO) digunakan sebagai metode pengendalian untuk mengoptimalkan jalur distribusi air sesuai dengan kebutuhan lahan dan tanaman. Penentuan jalur distribusi didasarkan pada beberapa parameter, yaitu tingkat kekeringan tanah, luas area yang membutuhkan air, serta panjang pipa yang menghubungkan sumber air dengan lahan tujuan. Tingkat kelembapan tanah digunakan sebagai nilai *pheromone* yang merepresentasikan kondisi kekeringan

dan berperan sebagai parameter *alpha* (α). Sementara itu, panjang pipa digunakan sebagai parameter *beta* (β) yang menunjukkan jarak tempuh aliran air menuju lokasi irigasi. Kedua parameter tersebut digunakan untuk menentukan prioritas penyaluran air pada setiap sektor irigasi. Dalam penerapannya, sistem membagi area irigasi ke dalam beberapa sektor yang dilengkapi sensor *soil moisture*. Data kelembapan dari setiap sensor kemudian dianalisis untuk menentukan sektor yang paling membutuhkan air. Sektor dengan tingkat kekeringan tertinggi akan memperoleh prioritas distribusi air, sedangkan sektor yang memiliki kelembapan lebih tinggi akan dialiri belakangan atau tidak dialiri sama sekali sesuai kebutuhan (Haris, 2020).

Setelah proses pengambilan keputusan distribusi air teratasi oleh algoritma ACO berdasarkan kondisi tanah atau berdasarkan panjang pipa. Maka, proses selanjutnya adalah pemberian air pada sektor irigasi tetes yang akan dialiri air sehingga air yang didistribusikan sesuai dengan kebutuhan tanaman. Untuk mengatasi hal ini dapat diterapkan algoritma control *Proportional Integral Derivative* (PID). Algoritma PID digunakan untuk mengontrol pompa air sehingga menghasilkan debit aliran air yang sesuai dengan kebutuhan tanah. Tujuannya adalah agar debit yang diberikan tidak kurang sehingga terjadi *under irrigation* atau lebih *over irrigation* pada tanaman.

Berdasarkan permasalahan yang telah dipaparkan diatas, Penulis menyimpulkan bahwa dengan mengoptimalkan Distribusi air pada sistem irigasi tetes akan berpengaruh pada tingkat kestabilan pemberian air sesuai dengan kebutuhan. Dengan memanfaatkan algoritma ACO maka dapat dilakukan *tracking*

dan mengidentifikasi sektor irigasi yang menjadi prioritas penyiraman berdasarkan tingkat kekeringan tanah dari sumber ke masing-masing sektor irigasi. Kemudian dengan mengontrol kecepatan pompa menggunakan algoritma PID untuk mengatur debit yang konsisten sehingga menghasilkan distribusi yang stabil, merata, dan efisien pada sistem irigasi tetes. Untuk mencapai keberhasilan distribusi air perlu adanya parameter konfigurasi yang dilakukan. Dalam kasus ini, parameter yang dapat diambil adalah nilai dari debit dan keseragaman tetesan air yang diambil dari sensor kelembaban tanah. Untuk mengambil nilai dari parameter tersebut, maka diperlukan sebuah teknologi untuk memudahkan dalam pengambilan nilai secara otomatis dan *realtime*. Teknologi yang dapat diterapkan adalah *Internet of Things (IoT)*. Dengan IoT nilai dapat diambil secara otomatis dan *realtime* dengan cara memanfaatkan sensor sebagai perangkat *input* untuk memperoleh data dari lingkungan, sedangkan mikrokontroler berfungsi sebagai unit pemrosesan yang mengolah data tersebut.

1.2 Pernyataan Masalah

Bagaimana menerapkan algoritma *Ant Colony Optimization (ACO)* yang dapat menentukan urutan jalur distribusi air berdasarkan kondisi kelembaban tanah, sehingga proses penyiraman dapat dilakukan dengan tepat sasaran. Serta mengimplementasikan algoritma kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) untuk mengatur debit aliran air agar tetap stabil selama proses penyiraman berlangsung?

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan-batasan masalah dalam penelitian ini diantaranya :

1. Lingkup pengujian dilakukan pada skala prototipe/laboratorium, sehingga belum mencakup implementasi pada lahan pertanian skala besar.
2. Sistem irigasi yang dikaji merupakan irigasi tetes dengan jumlah sektor yang digunakan terbatas 3 sektor irigasi.
3. Parameter kondisi tanah yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan hanya kelembaban tanah dan aliran air atau debit, tanpa mempertimbangkan faktor lain seperti, tekanan air atau pipa, pH tanah, jenis tanaman, atau suhu lingkungan.
4. Penelitian ini tidak berfokus pada proses pertumbuhan tanaman dan hanya berfokus pada penggunaan air dan kondisi tanah. Namun, tanaman yang digunakan hanya sebagai acuan dalam proses menjalankan metode optimasi distribusi air.
5. Menggunakan *website* untuk memantau dan mengontrol sistem secara *real-time*.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkonfigurasi dan menerapkan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dalam menentukan jalur distribusi air serta kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) dalam mengatur kestabilan debit aliran air, guna mengevaluasi kinerja sistem sehingga mampu menghasilkan distribusi air

yang merata, tepat sasaran berdasarkan kondisi tanah, serta efisien dalam penggunaan air dan sumber daya energi pompa.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dalam pengembangan sistem irigasi tetes yang lebih cerdas dan efisien melalui penerapan metode *Ant Colony Optimization* (ACO) dan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID). Dengan adanya optimasi jalur distribusi air berdasarkan kondisi kelembaban tanah, sistem mampu melakukan penyiraman secara lebih tepat sasaran sehingga tanaman yang membutuhkan air dapat diprioritaskan. Selain itu, penggunaan kontrol PID memungkinkan debit aliran air tetap stabil, sehingga distribusi air menjadi lebih merata pada setiap sektor. Secara keseluruhan, penelitian ini dapat meningkatkan efisiensi pada penggunaan air, mengurangi pemborosan, serta mendukung pengelolaan sumber daya air yang lebih optimal. Hasil dari penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem irigasi otomatis berbasis teknologi pada skala yang lebih luas.

BAB II

KAJIAN TEORI

2.1 Penelitian Terkait

Menurut Haris et al (2022), penelitian yang dilakukan berfokus pada pengendalian solenoid valve dengan kondisi buka dan tutup menggunakan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO). Algoritma tersebut tidak hanya mengatur kerja katup, tetapi juga menentukan lokasi lahan yang menjadi prioritas dalam proses irigasi. Pendekatan ini bersifat adaptif sehingga mampu menyesuaikan keputusan berdasarkan kondisi lahan yang dipantau secara *real-time*. Pengujian sistem dilakukan menggunakan tiga sensor yang mewakili tiga kondisi lahan, yaitu basah, normal, dan kering. Penggunaan ketiga kondisi tersebut bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan model dalam merespons variasi tingkat kelembapan lahan. Berdasarkan hasil pengujian selama 10 hari, model menghasilkan tingkat kesalahan sebesar 26% dan tingkat akurasi sebesar 74%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan dapat diterapkan dengan baik pada sistem irigasi tetes berskala kecil yang bersifat dinamis.

Meskipun penelitian tersebut berhasil menerapkan algoritma ACO untuk menentukan prioritas distribusi air dan melakukan monitoring secara *realtime*, sistem yang dikembangkan masih berfokus pada pengendalian buka-tutup katup (*open/close solenoid valve*). Penelitian tersebut belum mempertimbangkan pengaturan debit aliran air yang diberikan pada masing-masing sektor sehingga kestabilan distribusi air belum menjadi fokus utama penelitian.

Haris et al (2021), Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem distribusi air yang lebih optimal pada lahan pertanian tadah hujan. Permasalahan yang sering ditemukan pada sistem irigasi konvensional adalah proses penyaluran air yang masih sulit dikendalikan serta belum dapat dipantau secara otomatis dan real-time, sehingga efisiensi distribusi air menjadi kurang maksimal. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini menerapkan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) sebagai metode penentuan lokasi atau node yang akan memperoleh distribusi air. Pemilihan node dilakukan berdasarkan nilai pheromone yang merepresentasikan tingkat kekeringan tanah, dengan mempertimbangkan kriteria kondisi lahan sebagai dasar perhitungan probabilitas. Melalui pendekatan ini, sistem dapat menentukan prioritas penyaluran air sesuai dengan kebutuhan setiap node. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan informasi berupa tingkat kekeringan pada setiap node, volume air dalam *reservoir*, serta debit aliran air yang didistribusikan. Pengujian metode ACO menghasilkan urutan node yang menjadi prioritas distribusi air setelah proses optimasi. Berdasarkan perhitungan menggunakan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), diperoleh nilai *error* sebesar 43%, sehingga tingkat akurasi sistem mencapai 57%.

Selain itu, penelitian tersebut hanya berfokus pada penentuan urutan distribusi air menggunakan algoritma ACO. Sistem belum dilengkapi mekanisme kontrol yang mampu menjaga kestabilan debit aliran air selama proses distribusi berlangsung sehingga potensi terjadinya ketidaksesuaian volume air pada setiap sektor masih dapat terjadi.

Rivai et al (2019), Sistem irigasi tetes sangat efisien dalam mengairi sayuran dan tanaman. Sistem irigasi tetes konvensional menyediakan air kepada tanaman berdasarkan dosis dan jadwal yang telah ditentukan tanpa mempertimbangkan kondisi lahan. Pengendalian irigasi tetes yang mengabaikan kondisi tanah dapat mengakibatkan penyediaan air yang terlalu sedikit atau terlalu banyak, yang menyesuaikan pasokan air sesuai dengan kondisi tanah membuat irigasi tetes konvensional masih belum optimal. Kondisi ini dapat dioptimalkan dengan. Dalam penelitian ini, irigasi tetes dikendalikan oleh sistem kendali *Proportional-Integral* (PI) dengan menggunakan informasi dari sensor kelembaban tanah sebagai sinyal umpan balik. Sistem ini menggunakan generator air bertekanan dari pompa air langsung yang digerakkan oleh motor *brushless* DC (BLDC). Kombinasi kontrol PI, sensor kelembaban tanah, dan pompa yang digerakkan oleh motor BLDC membuat sistem ini lebih efisien dalam penggunaan air dan listrik dibandingkan dengan sistem irigasi tetes konvensional. Di masa depan, sistem irigasi tetes ini akan digabungkan.

Penelitian tersebut berhasil meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui penerapan kontrol PI berdasarkan kondisi kelembaban tanah. Namun, sistem belum memiliki mekanisme optimasi distribusi air untuk menentukan sektor prioritas penyiraman. Akibatnya, pengambilan keputusan distribusi air masih terbatas pada pengendalian debit tanpa mempertimbangkan kondisi beberapa sektor lahan secara bersamaan.

Sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada optimasi distribusi air atau pengendalian debit air secara terpisah. Padahal, kedua aspek

tersebut saling berkaitan dalam menghasilkan sistem irigasi yang efisien. Distribusi air yang tepat sasaran perlu didukung oleh debit aliran yang stabil agar kebutuhan air tanaman dapat terpenuhi secara optimal. Oleh karena itu, masih terdapat peluang penelitian untuk mengintegrasikan metode optimasi distribusi air dan metode pengendalian debit air dalam satu sistem yang terintegrasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) dalam satu sistem irigasi tetes berbasis *Internet of Things* (IoT). Algoritma ACO digunakan untuk menentukan prioritas jalur distribusi air berdasarkan tingkat kelembaban tanah pada setiap sektor, sedangkan kontrol PID digunakan untuk menjaga kestabilan debit aliran air yang didistribusikan. Dengan pendekatan tersebut, sistem tidak hanya mampu menentukan lokasi penyiraman yang tepat, tetapi juga mampu mengontrol jumlah air yang diberikan secara lebih stabil dan efisien.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori merupakan dasar ilmiah yang terdiri atas teori, konsep, dan hasil penelitian terdahulu yang relevan, yang digunakan untuk mendukung serta memperkuat pemahaman terhadap topik penelitian ini.

2.2.1 Sistem Irigasi Tetes

Irigasi tetes (*Drip Irrigation*) merupakan salah satu metode irigasi modern yang telah banyak diterapkan di berbagai negara. Teknologi ini pertama kali dikembangkan di Israel dan selanjutnya diadopsi secara luas di berbagai wilayah dunia. Penerapan irigasi tetes sangat sesuai untuk lahan dengan tekstur berpasir,

daerah yang memiliki ketersediaan air terbatas, kondisi iklim kering, serta budidaya tanaman yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Dengan sistem ini, air dapat disalurkan secara lebih efisien langsung ke area perakaran tanaman sehingga kebutuhan air dapat terpenuhi secara optimal. (Witman, 2021).

Sistem irigasi tetes bekerja dengan mengalirkan air secara perlahan-lahan dalam bentuk tetesan secara langsung ke area perakaran tanaman, baik itu melalui permukaan tanah ataupun langsung ke zona akar. Penyaluran air dilakukan menggunakan komponen seperti katup, pipa, dan *emitter* sebagai alat penetes. Penerapan irigasi tetes memiliki berbagai keunggulan, antara lain menghemat penggunaan air, mengurangi kehilangan air akibat limpasan dan penguapan, menekan pertumbuhan gulma, serta dapat diterapkan pada berbagai jenis dan kondisi lahan. (Fakhrah et al., 2022).

1. Sumber Air

Ketersediaan air yang bersih merupakan faktor utama dalam keberhasilan sistem irigasi tetes. Kualitas air perlu diperhatikan karena adanya partikel fisik maupun kontaminan kimia dapat menyebabkan penyumbatan pada komponen sistem irigasi.

2. Filter Air

Filter air berfungsi sebagai penyaring yang menghilangkan pasir, lumpur, serta partikel organik yang terbawa oleh aliran air. Penggunaan filter bertujuan untuk mencegah terjadinya penyumbatan pada jaringan irigasi tetes sehingga distribusi air dapat berlangsung dengan baik.

3. Jaringan Pipa

Jaringan pipa merupakan komponen utama dalam sistem irigasi tetes yang berfungsi menyalurkan air dari sumber menuju tanaman. Sistem ini umumnya terdiri atas pipa utama, pipa sekunder, dan pipa lateral. Penempatan serta ukuran pipa disesuaikan dengan luas lahan, bentuk area, dan kondisi topografi. Pada sistem irigasi tetes, air dialirkan melalui jaringan pipa bercabang yang umumnya terbuat dari bahan plastik dengan diameter sekitar 12–25 mm, kemudian didistribusikan ke tanaman melalui *emitter*.

a. Pipa utama

Pipa utama berperan sebagai saluran utama yang mengalirkan air dari sumber menuju jaringan distribusi. Komponen yang terhubung pada pipa utama meliputi pompa, tangki injeksi, filter utama, alat pengukur tekanan, alat pengukur debit, dan katup pengendali. Pipa ini biasanya dibuat dari bahan *Polyvinyl Chloride* (PVC), *galvanized steel*, atau besi cor dengan diameter berkisar antara 7,5–25 cm.

b. Pipa sekunder

Pipa sekunder berfungsi mendistribusikan air dari pipa utama ke jaringan pipa yang lebih kecil. Komponen yang umumnya terpasang pada pipa sekunder meliputi katup *solenoid*, regulator tekanan, alat pengukur tekanan, katup pembuangan, serta filter tambahan. Pipa sekunder biasanya menggunakan bahan PVC atau *High Density Polyethylene* (HDPE) yang dilengkapi dengan sistem penyaringan lanjutan untuk menjaga kualitas aliran air..

c. Pipa lateral

Pipa lateral merupakan saluran distribusi yang berfungsi mengalirkan air dari pipa sekunder menuju area perakaran tanaman. Pipa ini umumnya terbuat dari bahan PVC fleksibel atau *polyethylene* dengan diameter berkisar antara 12 mm hingga 32 mm. Pada pipa lateral dipasang emitter dengan jarak tertentu yang disesuaikan dengan jenis tanaman, pola tanam, serta karakteristik tanah. Pengaturan jarak *emitter* yang tepat bertujuan untuk memastikan distribusi air berlangsung merata dan sesuai dengan kebutuhan tanaman.

4. *Emitter*

Emitter merupakan salah satu komponen utama dalam sistem irigasi tetes yang berfungsi menyalurkan air secara langsung ke area sekitar perakaran tanaman dalam bentuk tetesan. Untuk meminimalkan risiko penyumbatan, saluran pada *emitter* dirancang memiliki ukuran penampang yang cukup lebar. Selain itu, *emitter* sebaiknya dipasang sedekat mungkin dengan permukaan tanah agar distribusi air lebih efektif dan area tanah yang terbasahi menjadi lebih luas, sehingga kebutuhan air tanaman dapat terpenuhi secara optimal.



Gambar 2.1 Emitter
(Sumber : <https://id.yby-irrigation.com/drip-irrigation-system>)

5. Pompa Air

Pompa air merupakan perangkat mekanis yang digunakan untuk mengalirkan atau memindahkan air dari sumber menuju lokasi yang diinginkan. Sebagai salah satu komponen mesin, pompa air memerlukan pengoperasian yang tepat serta perawatan secara berkala agar dapat bekerja secara optimal, memiliki umur pakai yang lebih panjang, dan mengurangi biaya operasional maupun perawatan. (Tampubolon et al., 2021). Pada dasarnya pompa air terdiri dari dua komponen yaitu:

a. Mesin Penggerak

Pompa air digerakkan oleh sebuah motor listrik (*elektromotor*) yang berfungsi sebagai sumber tenaga utama. Motor listrik tersebut tersusun atas dua instrumen

utama, antara lain rotor dan stator, yang bekerja melalui prinsip elektromagnetik. Ketika terhubung dengan sumber listrik, rotor akan berputar dan menghasilkan energi mekanik yang kemudian digunakan untuk menggerakkan *impeller*, sehingga air dapat dipompa dan dialirkan menuju lokasi yang diinginkan. (Masafkar23, 2019). Berikut adalah dua jenis dinamo menurut (Syalendra, 2021), yaitu :

➤ *Brushed Motor*

Motor brushed bekerja menggunakan kumparan kawat yang berfungsi sebagai elektromagnet. Perubahan arah arus listrik pada kumparan diatur oleh komutator, yang membalik polaritas arus dua kali dalam setiap siklus putaran. Mekanisme ini menyebabkan kutub elektromagnet secara bergantian menarik dan menolak magnet permanen, sehingga menghasilkan gerakan rotasi pada motor. Ketika posisi kutub elektromagnet melewati kutub magnet permanen, komutator kembali membalik polaritas untuk menjaga putaran tetap berlangsung. Pada motor brushed, kumparan (*coil*) terletak pada bagian rotor sehingga bagian inilah yang berputar selama motor beroperasi. Selain itu, motor jenis ini umumnya hanya menggunakan dua terminal atau kabel, yaitu terminal positif (+) dan negatif (-), yang biasanya dihubungkan langsung ke rangkaian pengendali atau papan utama sistem.



Gambar 2.2 Brushed Motor
(Sumber : <https://kumacart.com/brushed-vs-brushless-motor>)

➤ *Motor Brushless DC (BLDC)*

Motor Brushless DC (BLDC) menggunakan magnet permanen sebagai rotor, sedangkan kumparan ditempatkan pada bagian stator. Motor ini dilengkapi dengan sensor posisi rotor yang berfungsi mendeteksi letak rotor secara terus-menerus. Informasi dari sensor kemudian dikirimkan ke pengontrol (*controller*) untuk mengatur aktivasi kumparan secara berurutan pada setiap fase. Berbeda dengan motor *brushed*, motor BLDC umumnya memiliki tiga kumparan yang masing-masing terhubung ke *Electronic Speed Controller (ESC)* melalui tiga kabel. Pada motor ini, bagian yang berputar adalah rotor yang berisi magnet permanen, sedangkan kumparan tetap berada pada stator dan tidak ikut berputar. Konfigurasi

tersebut memungkinkan motor BLDC bekerja dengan efisiensi yang lebih tinggi serta memiliki tingkat keausan yang lebih rendah karena tidak menggunakan sikat (*brush*) dan komutator.



Gambar 2.3 Brushless Motor
(Sumber : <https://kumacart.com/brushed-vs-brushless-motor>)

b. *Impeller*

Impeller merupakan salah satu komponen utama pada pompa air yang berbentuk roda bersudu atau baling-baling. Komponen ini berfungsi menghasilkan gaya hisap dan tekanan yang diperlukan untuk mengalirkan air. Saat *impeller* berputar, energi mekanik diubah menjadi energi kinetik dan tekanan fluida, sehingga proses pemompaan air dari sumber menuju titik tujuan dapat berlangsung secara kontinu. (Masafkar23, 2019).



Gambar 2.4 Impeller Pompa
(Sumber : <https://m.indotrading.com/>)

2.2.2 *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things (IoT) merupakan sistem terintegrasi yang bertujuan untuk memperluas pemanfaatan konektivitas internet yang tetap terhubung. Tujuannya adalah memungkinkan perangkat tertanam untuk berkomunikasi secara terus-menerus (Susanto et al., 2022). Fungsinya mencakup pemantauan, pengendalian, dan otomatisasi berbagai hal. Seperti yang dinyatakan namanya, IoT bergantung pada koneksi internet sebagai jembatan antara perangkat dan sensor yang berinteraksi melalui platform cloud. Daya tarik IoT berasal dari gagasan yang dikemukakan oleh Kevin Aston, direktur eksekutif Auto ID Centre, MIT pada tahun 1999. Aston menemukan konsep mesin berbasis *Radio Frequency Identification*

(*RFID*). Dengan adopsi IoT, berbagai tugas dapat diselesaikan dengan lebih cepat dan efisiensi yang lebih tinggi.

2.2.3 Tanaman Tomat

Tomat (*Solanum lycopersicum L.*) termasuk tanaman *hortikultura* yang siklus hidupnya berlangsung dalam satu musim tanam dan tergolong ke dalam keluarga Solanaceae. Komoditas ini memiliki prospek ekonomi yang baik karena pemanfaatannya mencakup berbagai sektor, mulai dari industri pangan, kesehatan, hingga kosmetik. Dalam bidang makanan, tomat sering digunakan sebagai bahan olahan maupun pelengkap berbagai hidangan. Selain nilai ekonominya, tomat juga dikenal memiliki manfaat kesehatan karena kandungan zat gizinya yang dapat membantu menjaga kestabilan tekanan darah, terutama pada individu yang mengalami hipertensi (Kartika & Kurniasih, 2021).

Keberhasilan budidaya tomat dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, di antaranya suhu dan ketersediaan air. Tanaman ini umumnya tumbuh optimal pada temperatur 25°C–28°C. Pemenuhan kebutuhan air harus dilakukan secara tepat karena berhubungan langsung dengan pertumbuhan tanaman. Selain itu, kelembapan tanah perlu dijaga dalam rentang 60% hingga 80% agar kondisi perakaran tetap ideal. Kelembapan yang terlalu rendah dapat menyebabkan kekeringan, sedangkan kelembapan yang berlebihan berpotensi mengganggu pertumbuhan tanaman (Zulhijayanto & Fadlil, 2022).

Penyiraman idealnya sebaiknya dilakukan pada waktu pagi atau sore hari untuk memastikan pertumbuhan optimal tanaman tomat. Disarankan untuk menghindari langsung menyiram air ke daun tanaman, terutama saat teriknya sinar

matahari, karena hal ini dapat menyebabkan daun terbakar. Lebih baik menyiramkan air di sekitar pangkal tanaman agar air dapat meresap ke dalam tanah dengan lebih baik. Penting juga untuk menggunakan teknik penyiraman yang tepat dengan menghindari semburan air keras yang dapat merusak tanaman. Penggunaan selang atau alat penyiraman dengan mode siram yang dapat disesuaikan membantu menjaga tekanan air yang lembut dan merata.



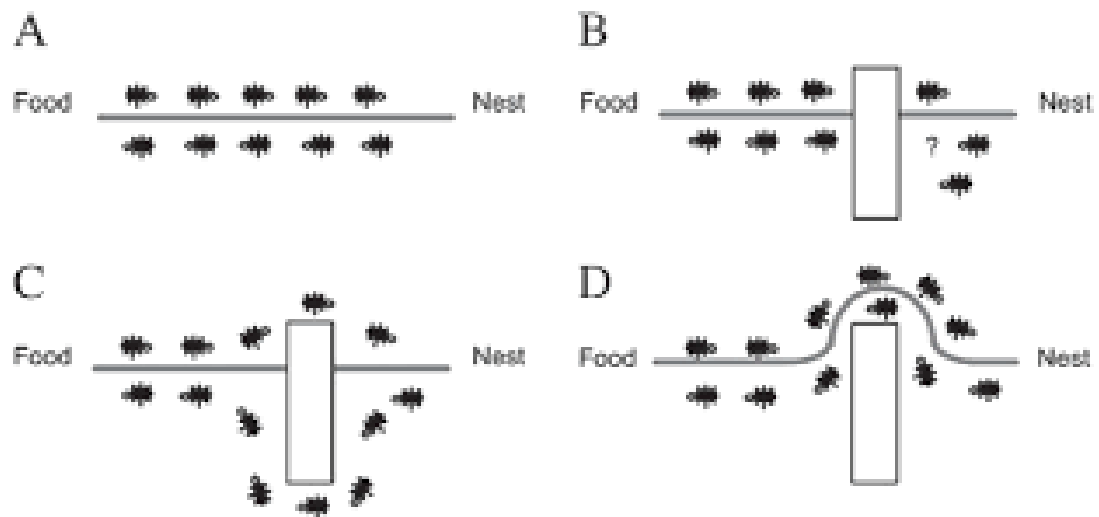
Gambar 2.5 Tanaman Tomat
(Sumber : <https://dpkp.brebeskab.go.id/477/budidaya-tomat/>)

Jika memiliki banyak tanaman tomat, pertimbangkan untuk menggunakan sistem irigasi tetes atau irigasi drip yang dapat menyediakan air secara merata langsung ke akar tanaman, mengurangi risiko penyakit, dan menghemat air. Dengan memberikan perhatian yang baik pada penyiraman, kita dapat membantu tanaman tomat tumbuh sehat dan menghasilkan buah berkualitas. Penting untuk selalu memonitor kondisi tanaman dan menyesuaikan perawatan sesuai dengan kebutuhan

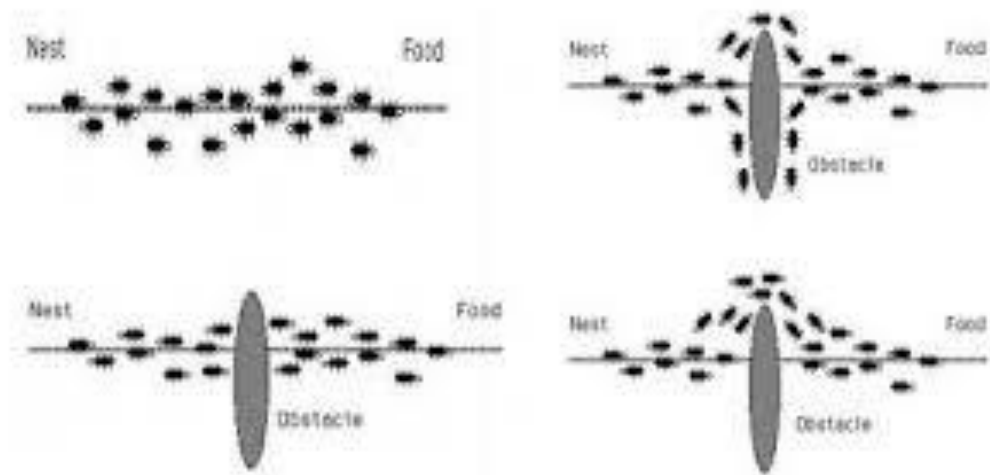
mereka agar dapat menikmati panen tomat yang melimpah setiap musimnya (Jayanti, 2023).

2.2.4 *Ant Colony Optimization (ACO)*

Metode *Ant Colony Optimization* (ACO) merupakan algoritma pencarian solusi yang terinspirasi dari perilaku kolektif semut saat melakukan pencarian makanan. Pengembangan metode ini diawali oleh penelitian Moyson dan Manderick, kemudian dilanjutkan oleh Marco Dorigo hingga menjadi salah satu teknik optimasi yang banyak digunakan.



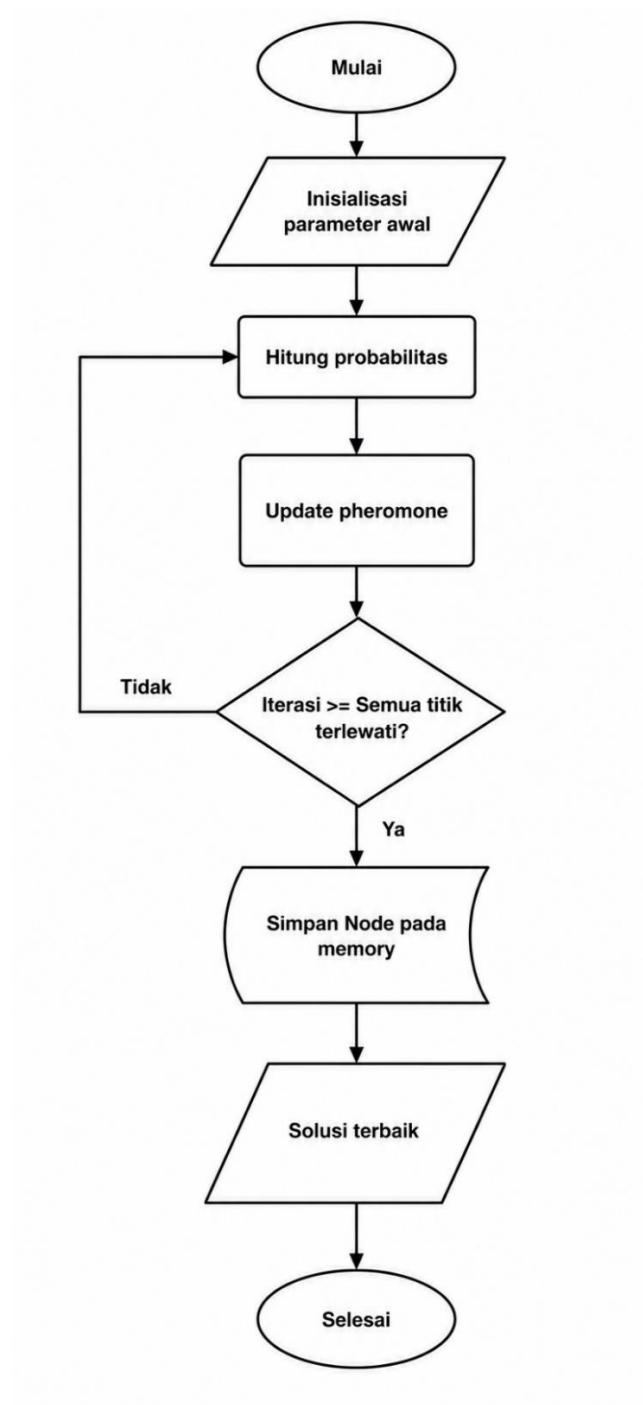
Gambar 2.6 Pembangunan Jejak Pheromone
(Sumber : <https://aengel.medium.com>)



Gambar 2.7 Perubahan Konsentrasi Pheromone
(Sumber : Seminar Nasional Official Statistics)

Sebagai bagian dari pendekatan bio-inspired metaheuristic, ACO memanfaatkan prinsip interaksi antarsemut dalam menentukan rute yang paling efektif. Mekanisme tersebut kemudian diadaptasi ke dalam proses komputasi untuk menyelesaikan berbagai permasalahan optimasi. Dalam proses pencarian tersebut, setiap semut meninggalkan jejak kimia yang disebut *pheromone* di sepanjang lintasan yang dilaluinya. Jejak *pheromone* ini dapat dideteksi oleh semut lain dan digunakan sebagai acuan dalam memilih jalur yang akan ditempuh. Semakin tinggi konsentrasi *pheromone* pada suatu lintasan, semakin besar kemungkinan jalur tersebut dipilih oleh semut lainnya, sehingga secara bertahap akan terbentuk jalur yang paling optimal. (Haris et al., 2021). Contoh proses pembentukan jejak *pheromone* dalam pencarian rute terpendek ditunjukkan pada Gambar 2.6, sedangkan ilustrasi perubahan tingkat konsentrasi pheromone selama proses optimasi dapat dilihat pada Gambar 2.7.

Adapun skenario dari ACO akan melalui beberapa tahapan proses yang dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Alir *Ant Colony Optimization*

Proses diawali dengan memasukkan data yang dibutuhkan ke dalam sistem. Data tersebut kemudian diberikan tingkat pheromone tertentu dan diproses menggunakan metode ACO. Sebelum proses optimasi dilakukan, algoritma terlebih dahulu menginisialisasi parameter-parameter yang diperlukan, seperti nilai *alpha*, *beta*, dan jumlah iterasi yang akan digunakan selama proses pencarian solusi (Haris et al., 2022). Setelah proses inisialisasi parameter dilaksanakan maka proses akan berlanjut pada pencarian nilai probabilitas menggunakan rumus:

$$P_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)}{\sum (\tau_{i,j}^\alpha)(\eta_{i,j}^\beta)} \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $P_{i,j}$: Probabilitas semut memilih dari jalur i ke j .
- $\tau_{i,j}^\alpha$: Jejak pheromone dari jalur i ke j .
- $\eta_{i,j}^\beta$: Visibilitas jalur dari jalur i ke j .
- α : Pengaruh *Pheromone*.
- β : Pengaruh jarak.

Nilai-nilai yang diperoleh akan dikonversi menjadi tingkat *pheromone* tertentu untuk setiap node, yang selanjutnya digunakan sebagai masukan dalam proses optimasi menggunakan metode *Ant Colony Optimization* (ACO). Sebelum proses pencarian solusi dilakukan, algoritma ACO terlebih dahulu menginisialisasi berbagai parameter yang diperlukan, seperti nilai *alpha* (α), *beta* (β), jumlah iterasi, serta parameter pendukung lainnya yang berperan dalam menentukan proses optimasi. Rumus yang digunakan adalah:

$$\tau_{i,j} = (1 - p)\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j} \quad (2.2)$$

Dimana :

$$\Delta\tau_{i,j} = \frac{Q}{\Sigma\tau(i,j)} \quad (2.3)$$

Keterangan:

- $\Delta\tau_{i,j}$: jumlah pheromone baru yang ditambahkan pada jalur i ke j oleh semut yang melewati jalur tersebut.
 p : tingkat *evaporasi pheromone*
 1 : merepresentasikan 100% jumlah *pheromone* awal yang ada pada jalur sebelum mengalami pengurangan.
 Q : jumlah *pheromone* yang dibawa oleh semut.

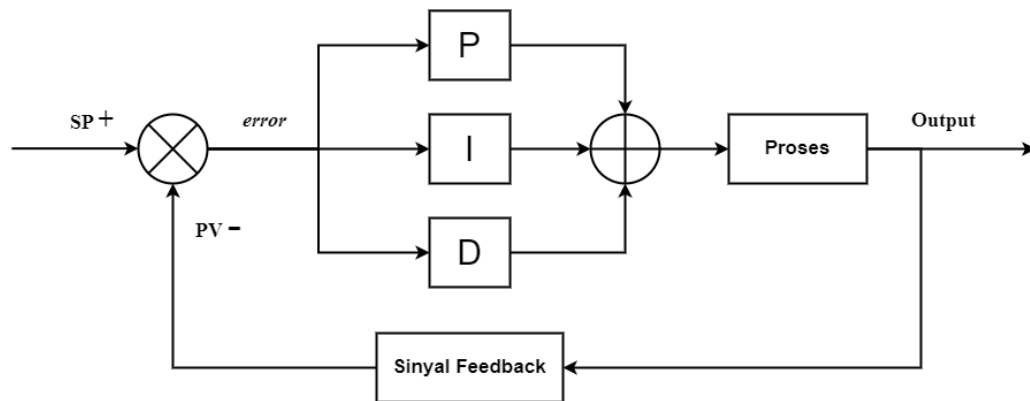
Tahap berikutnya adalah melakukan proses perhitungan secara berulang berdasarkan jumlah iterasi yang telah ditentukan. Proses optimasi akan terus berlangsung hingga mencapai batas iterasi yang ditetapkan. Setelah seluruh iterasi selesai dijalankan, algoritma akan menghentikan proses pencarian dan menghasilkan keluaran berupa solusi atau target terbaik yang diperoleh selama proses optimasi.

2.2.5 Kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*)

Perkembangan sistem kontrol modern tidak terlepas dari kontribusi para ilmuwan pada abad ke-18 hingga abad ke-20. Salah satu tokoh yang berperan penting adalah James Watt, yang melakukan penelitian mengenai penggunaan *centrifugal governor* untuk mengatur kecepatan mesin uap. Selanjutnya, pengembangan teori dan aplikasi sistem kontrol juga didukung oleh kontribusi Minorsky, Hazen, dan Nyquist. Pada tahun 1922, Minorsky meneliti sistem kemudi kapal dan menunjukkan bahwa kestabilan sistem dapat dianalisis menggunakan persamaan diferensial yang merepresentasikan perilaku sistem. Kemudian, pada

tahun 1932, Nyquist memperkenalkan metode untuk mengevaluasi kestabilan sistem kalang tertutup berdasarkan respons sistem terhadap sinyal masukan sinusoidal. Memasuki dekade 1940-an, para insinyur mulai banyak menerapkan dan merancang sistem kalang tertutup guna meningkatkan kualitas serta kinerja berbagai sistem kendali. (Dhamaddam, 2016).

Menurut Irhas et al (2020), *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu metode pengendalian yang banyak diterapkan pada berbagai sistem kontrol. Metode ini tersusun atas tiga komponen utama, yaitu *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D), yang masing-masing memiliki fungsi dan parameter tertentu dalam menentukan performa sistem. PID bekerja berdasarkan prinsip umpan balik (*feedback*), yaitu membandingkan nilai keluaran sistem dengan nilai yang diinginkan, kemudian melakukan koreksi terhadap selisih yang terjadi. Pengendali PID dapat digunakan secara terpadu maupun dengan mengaktifkan komponen tertentu sesuai kebutuhan sistem. Secara umum, komponen proporsional berperan dalam mempercepat respons sistem, komponen integral membantu mengurangi kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*), sedangkan komponen derivatif berfungsi meningkatkan kestabilan sistem dengan menekan terjadinya overshoot maupun undershoot.



Gambar 2.9 Diagram Kontrol PID

Kontrol PID yang digunakan dalam sistem otomatis digunakan untuk mengatur variabel *output* agar mencapai nilai yang diinginkan sehingga kinerja sistem pengendalian menjadi optimal (Sujono et al., 2023). Berikut adalah rumus persamaan yang digunakan didalam control PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \left(\frac{d}{dt} \right) e(t) \quad (2.4)$$

Pada dasarnya rumus 2.4 diatas terdiri dari tiga bagian yaitu penentuan nilai K_p , K_i , dan K_d . Berikut adalah penjelasan tentang setiap bagian rumus PID menurut (Wahid et al., 2021):

1. *Proportional* (P)

Komponen *proportional* menghasilkan respons yang sebanding dengan selisih antara nilai *setpoint* (nilai yang diinginkan) dan nilai saat ini dari variabel pengendalian. Semakin besar selisihnya, semakin besar *respons proportional* yang dihasilkan. Ini membantu sistem merespon dengan cepat terhadap perubahan dan mengurangi *overshoot* (melebihi nilai *setpoint*).

$$P(t) = K_p e(t) \quad (2.5)$$

Keterangan:

P : Proportional
 K_p : Konstanta proportional
 $e(t)$: Nilai error (selalu akan berubah)

2. Integral (I)

Komponen integral berfungsi untuk menangani kesalahan sistem dalam jangka waktu yang lebih lama. Ini menghitung akumulasi kesalahan dari waktu ke waktu dan menghasilkan respons yang bertujuan untuk menghilangkan kesalahan sistem yang terus-menerus. Komponen integral membantu mengatasi *offset* (perbedaan antara nilai setpoint dan nilai stabil yang seharusnya).

$$K(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.6)$$

Keterangan:

I : Integral
 K_i : Konstanta integral
 $e(t)$: Nilai error (selalu akan berubah)
 dt : Nilai perubahan waktu perdetik

3. Derivative (D)

Komponen *derivative* merespons tingkat perubahan kesalahan. Dengan memonitor seberapa cepat sistem bergerak menuju nilai setpoint, komponen derivatif membantu meredakan respons jika sistem mendekati nilai *setpoint* terlalu cepat, mencegah *overshoot* atau osilasi yang berlebihan.

$$D(t) = K_d \left(\frac{d}{dt} \right) e(t) \quad (2.7)$$

Keterangan:

D : Derivative

Kd : Konstanta derivative

de(t) : Nilai perubahan dari error

dt : Nilai perubahan waktu (perdetik)

Dalam prakteknya, parameter PID (K_p , K_i , dan K_d) disesuaikan untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Nilai-nilai parameter ini ditentukan melalui percobaan dan simulasi tergantung pada karakteristik sistem yang dikendalikan. Proses tuning PID bertujuan untuk mencapai waktu respon yang cepat, *overshoot* yang minimal, dan osilasi yang terkendali.

2.2.6 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah suatu sistem komputer kecil yang terintegrasi dalam satu chip (IC) yang di dalamnya sudah terdapat prosesor (CPU), memori, serta input/output (I/O) yang digunakan untuk mengendalikan suatu sistem elektronik secara otomatis. Mikrokontroler dapat di sebut sebagai “otak” dari sebuah sistem kendali, di mana perangkat ini menerima data dari sensor, memproses data tersebut berdasarkan program yang telah ditanamkan, kemudian menghasilkan keluaran berupa aksi pada aktuator. Mikrokontroler banyak digunakan dalam sistem embedded (*embedded system*), seperti otomasi industri, *Internet of Things* (IoT), dan perangkat elektronik pintar, karena kemampuannya dalam melakukan pengolahan data secara *real-time* dan efisien (Ardi et al., 2021).



Gambar 2.10 Mikrokontroler Arduino
(Sumber : <https://www.arduinoindonesia.id/>)



Gambar 2.11 Mikrokontroler ESP32
(Sumber : <https://www.aranacorp.com/>)

Contoh mikrokontroler yang sering digunakan adalah Arduino pada gambar 2.10 dan ESP32 pada gambar 2.11. Arduino merupakan platform mikrokontroler yang populer karena kemudahan penggunaannya. dengan dukungan banyak *library*

dan lingkungan pemrograman yang sederhana. Arduino biasanya digunakan untuk sistem kontrol sederhana hingga menengah seperti monitoring sensor dan kontrol perangkat elektronik. Sementara itu, ESP32 merupakan mikrokontroler yang lebih canggih dengan keunggulan memiliki fitur komunikasi nirkabel seperti *WiFi* dan *Bluetooth*, sehingga sangat cocok untuk aplikasi berbasis IoT. Selain itu, ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan data yang lebih tinggi dan dapat digunakan untuk sistem monitoring serta kontrol jarak jauh secara *real-time*.

Dalam penelitian ini, mikrokontroler berfungsi sebagai pusat kendali utama yang mengintegrasikan seluruh komponen sistem irigasi tetes, mulai dari pembacaan sensor hingga pengendalian aktuator. Mikrokontroler menerima data kelembaban tanah dari sensor, kemudian memprosesnya menggunakan metode *Ant Colony Optimization (ACO)* untuk menentukan urutan jalur distribusi air berdasarkan prioritas kondisi tanah dan mengendalikan kran selenoid valve untuk mengatur laju aliran air ke setiap sektor irigasi. Selain itu, mikrokontroler juga menjalankan algoritma kontrol PID untuk mengatur kestabilan debit air melalui sinyal PWM. Dengan demikian, mikrokontroler berperan sebagai pengambil keputusan sekaligus pengendali sistem secara keseluruhan agar proses penyiraman berjalan optimal, terstruktur, dan otomatis.

2.2.7 Sensor *Waterflow*

Sensor *waterflow* digunakan untuk mengukur debit aliran air. Sensor ini umumnya bekerja berdasarkan prinsip turbin atau *hall effect*, di mana putaran baling-baling menghasilkan pulsa listrik yang sebanding dengan laju aliran air (Wirama et al., 2025).



Gambar 2.12 Sensor Waterflow
(Simber : <https://www.arduinoindonesia.id/>)

Sensor *waterflow* dalam penelitian ini digunakan untuk mengukur debit aliran air yang mengalir pada sistem irigasi tetes. Data debit ini sangat penting sebagai umpan balik (*feedback*) dalam sistem kontrol PID untuk memastikan bahwa aliran air tetap stabil berdasarkan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Data dari sensor ini juga digunakan untuk menghitung total volume air yang digunakan selama proses penyiraman, sehingga dapat dianalisis tingkat efisiensi penggunaan air. Dengan adanya sensor water flow, sistem dapat memantau dan mengontrol distribusi air secara lebih akurat dan terukur.

2.2.8 Sensor Kelembaban tanah

Pengukuran kadar air dalam tanah dapat dilakukan menggunakan sensor kelembapan tanah, yaitu alat elektronik yang memanfaatkan perubahan sifat

kelistrikan tanah sebagai indikator tingkat kelembapan. Sensor ini bekerja dengan mengamati nilai resistansi atau kapasitansi yang berubah sesuai dengan kondisi tanah. Tanah yang mengandung lebih banyak air umumnya memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi, sedangkan tanah yang lebih kering menunjukkan nilai resistansi yang lebih besar. Berdasarkan karakteristik tersebut, sensor dapat mengestimasi tingkat kelembapan tanah secara efektif (Ode et al., n.d.).



Gambar 2.13 Sensor Kelembaban Tanah
(Sumber : <https://www.arduinoindonesia.id/>)

Dalam penelitian ini, data kelembaban tanah menjadi parameter utama dalam menentukan prioritas penyiraman dan penentuan jalur distribusi menggunakan metode ACO. Sektor dengan tingkat kelembaban paling rendah akan diprioritaskan untuk disiram terlebih dahulu. Dengan demikian, sensor ini berperan

penting dalam mewujudkan penyiraman yang tepat sasaran, karena keputusan distribusi air didasarkan pada kondisi nyata di lapangan, bukan asumsi atau urutan tetap.

2.2.9 *Duty Cycle*

Duty cycle merupakan persentase waktu sinyal berada pada kondisi aktif atau *HIGH* dalam satu periode sinyal PWM. Dalam sistem irigasi, *duty cycle* digunakan untuk mengetahui tingkat kinerja kecepatan dari putaran pompa sehingga mempengaruhi debit air (Fitriani, 2025). Secara matematis, *duty cycle* dinyatakan sebagai:

$$Duty Cycle = \frac{PWM}{255} \times 100\% \quad (2.8)$$

Dengan mengetahui *duty cycle*, dapat terlihat presentase kinerja yang dilakukan oleh pompa dalam menjaga aliran air menjadi stabil. Hal ini sangat penting untuk menjaga pemerataan distribusi air pada setiap sektor dan menghindari fluktuasi debit yang dapat mempengaruhi kualitas penyiraman.

2.2.10 *Coefficient of Variation (CV)*

Coefficient of Variation (CV) dalam penelitian ini digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi tingkat pemerataan distribusi air pada sistem irigasi tetes. Nilai CV dihitung berdasarkan variasi debit air yang diterima oleh setiap sektor irigasi. Semakin kecil nilai CV, maka distribusi air semakin merata seperti kriteria penilaian yang telah tertera pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kriteria Penilaian *Coefficient of Variation* (CV)

Nilai CV (%)	Kategori
< 10%	Sangat Baik
10% – 20%	Baik
> 20%	Buruk

Dengan menggunakan CV, peneliti dapat mengukur apakah sistem yang dirancang telah memenuhi aspek pemerataan distribusi air (Setyaningrum et al., 2014). Rumus CV yang digunakan adalah:

Koefisien Variasi :

$$CV = \frac{s}{\bar{Q}} \times 100\% \quad (2.9)$$

Rata-rata debit :

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q}{n} \quad (2.10)$$

Standar Deviasi :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{n}} \quad (2.11)$$

di mana:

s = standar deviasi sampel

Q = rata-rata debit

CV = koefisien variasi

2.2.11 *Coefficient of Uniformity* (CU)

Coefficient of Uniformity (CU) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi keseragaman distribusi air secara keseluruhan dalam sistem irigasi tetes. CU mempertimbangkan seluruh data debit sehingga memberikan gambaran umum performa sistem (Handayani et al., 2025). Rumus CU adalah sebagai berikut:

$$CU = 100\% \left(1 - \frac{\sum |Q_i - \bar{Q}|}{n - \bar{Q}} \right) \quad (2.12)$$

Di mana Q_i adalah debit masing-masing sektor, $\bar{Q}$ adalah rata-rata debit, dan n adalah jumlah sektor. Dalam sistem yang di rancang, CU digunakan untuk mengevaluasi hasil akhir distribusi air setelah sistem kontrol bekerja, sehingga dapat diketahui tingkat keseragaman distribusi air. Nilai CU yang tinggi menunjukkan bahwa sistem irigasi mampu mendistribusikan air secara merata pada seluruh sektor seperti yang telah tertera pada tabel 2.2.

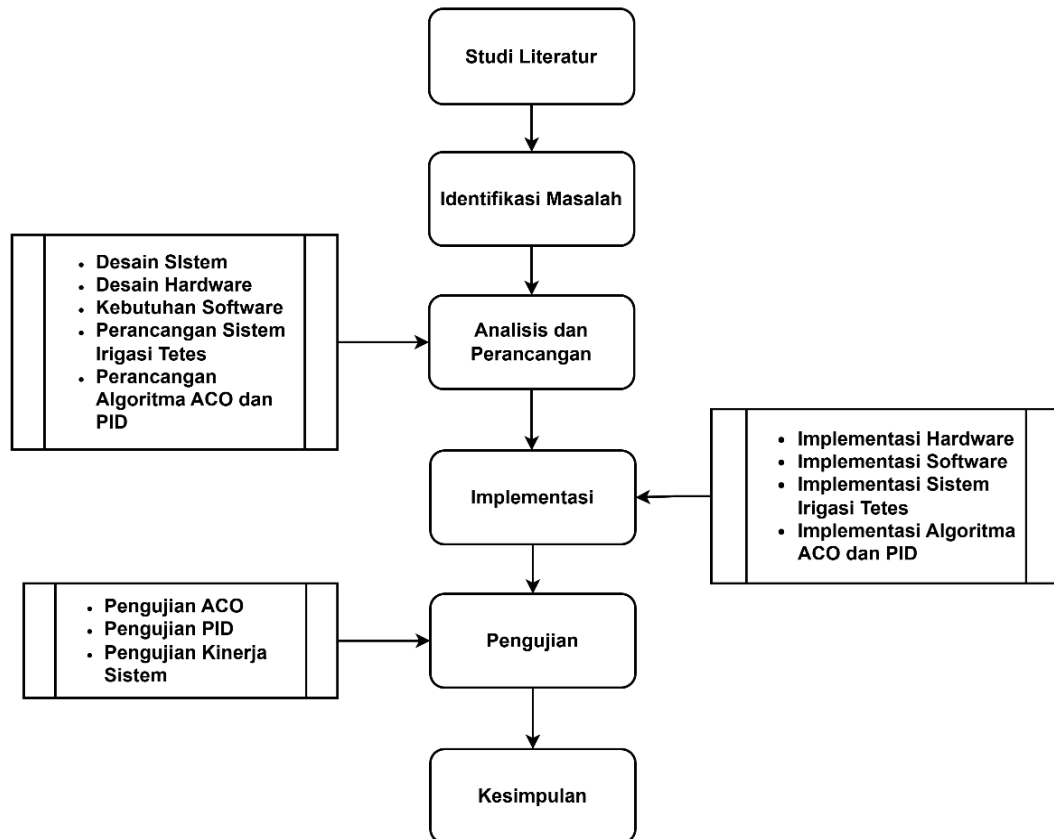
Tabel 2.2 Kriteria Penilaian *Coefficient of Uniformity* (CU)

Nilai CU (%)	Kategori	Interpretasi
> 90%	Sangat Baik	Distribusi air sangat seragam
80% – 90%	Baik	Distribusi cukup merata
70% – 80%	Cukup	Ada variasi distribusi
< 70%	Buruk	Distribusi tidak seragam

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

Proses penelitian dilakukan melalui beberapa langkah yang saling berurutan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Langkah-langkah tersebut mencakup pengumpulan referensi, perumusan permasalahan, perancangan sistem, implementasi, evaluasi, dan penarikan kesimpulan. Pada tahap awal, berbagai sumber literatur yang relevan dipelajari untuk memperoleh landasan teoritis yang mendukung penelitian. Selanjutnya, permasalahan penelitian diidentifikasi dan dirumuskan secara jelas. Berdasarkan hasil identifikasi tersebut, dilakukan analisis

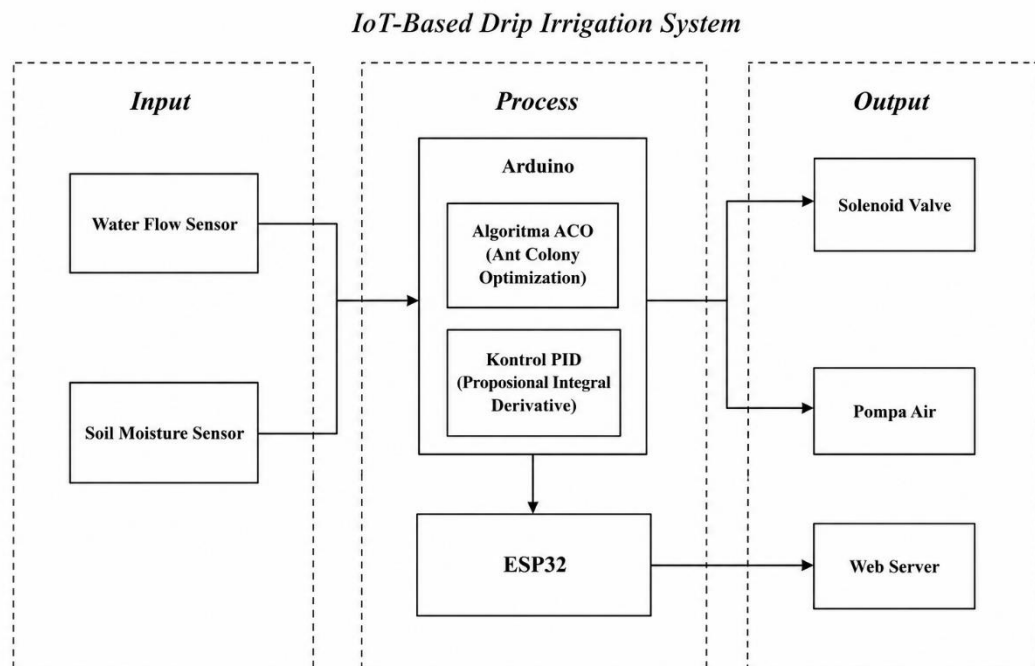
kebutuhan serta penyusunan rancangan sistem yang akan digunakan sebagai pedoman pada tahap implementasi dan pengujian. Termasuk perancangan *metode Ant Colony Optimization* (ACO) dan *Proportional Integral Derivative* (PID) yang akan diterapkan.. Tahap Implementasi, melakukan implementasi sistem, *hardware*, *software*, metode ACO, dan kontrol PID. Tahap Pengujian, melakukan pengujian sensor yang digunakan sehingga dapat diketahui akurasi dari sensor tersebut, pengujian metode ACO untuk melihat seberapa akurat metode ini dalam menangani masalah optimasi distribusi air, dan kontrol PID terhadap hasil umpan balik yang muncul pada sensor. Tahap Terakhir, membuat kesimpulan dari penelitian yang sudah dilakukan.

3.2 Analisis dan Perancangan Sistem

Pada bagian ini dijelaskan beberapa hal terkait konsep yang digunakan untuk merencanakan perancangan irigasi tetes, mulai dari desain sistem, desain *hardware*, kebutuhan *software*, hingga perancangan metode ACO dan kontrol PID.

3.2.1 Desain Sistem

Diagram sistem merupakan gambaran dasar mengenai sistem yang akan dirancang serta alur dari terjadinya sistem yaitu dari *input*, *process* hingga *output* yang diharapkan yaitu proses distribusi air yang baik. Berikut adalah blok diagram sistem pada sistem irigasi tetes berbasis IoT.



Gambar 3.2 Desain Sistem

Adapun desain sistem yang tertera pada gambar 3.2 memiliki 3 bagian utama yaitu *input*, *process*, dan *output*.

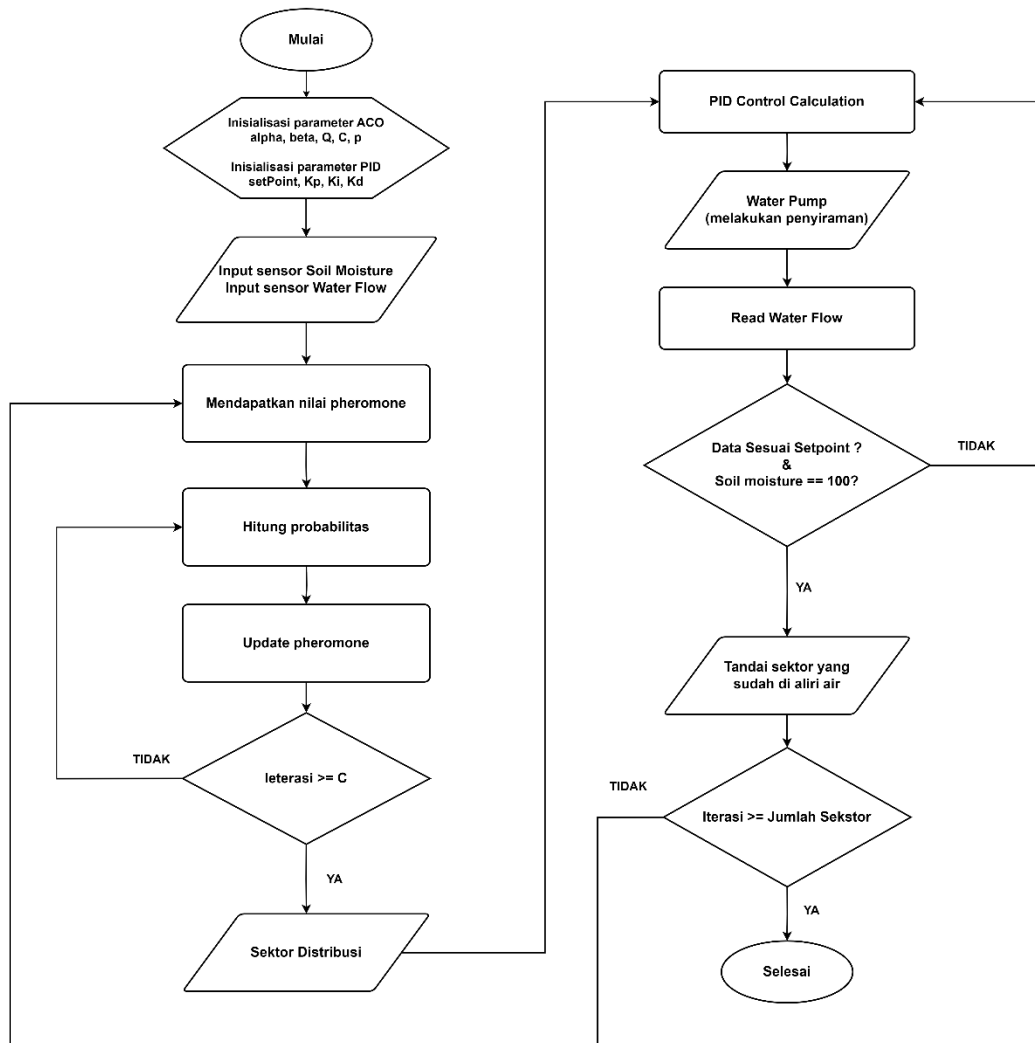
1. *Input*

Pada bagian ini terdapat blok input berupa data sensor yang berfungsi sebagai parameter untuk mendukung proses dijalanannya sistem. Sensor tersebut terdiri dari sensor *water flow* dan sensor *soil moisture*. Dimana sensor *water flow* berisi data tentang aliran air pada sistem irigasi tetes dan sensor *soil moisture* berisi data tentang kelembaban tanah pada masing-masing tetesan.

2. *Process*

Pada bagian proses terdapat dua mikrokontroller yaitu Arduino dan ESP32 sebagai alat untuk memproses data *input* yang telah diberikan. Didalam mikrokontroller Arduino akan terjadi proses komputasi dari algoritma ACO dan

kontrol PID. ACO berfungsi untuk mencari solusi yang optimal dalam menangani distribusi air pada sistem irigasi tetes. Algoritma ini akan mencari sektor irigasi mana yang harus diprioritaskan dalam penyiraman berdasarkan parameter *input* sensor *soil moisture* dan proses perhitungannya. Kemudian setelah algoritma ACO dijalankan dan menemukan solusi terbaik dalam menentukan urutan prioritas distribusi air pada sistem irigasi tetes. Maka, proses selanjutnya adalah menjalankan algoritma kontrol PID untuk mengontrol aliran air yang diberikan pada saat proses distribusi air ke tanaman. Setelah perhitungan algoritma dilakukan maka proses selanjutnya adalah mengirim data yang dihasilkan kedalam sebuah mikrokontroller esp32 agar data dapat direkap dan ditampilkan. Agar lebih jelas dapat dilihat pada gambar 3.3 yang menampilkan alur proses yang telah dijelaskan.



Gambar 3.3 Diagram Alur Program

3. Output

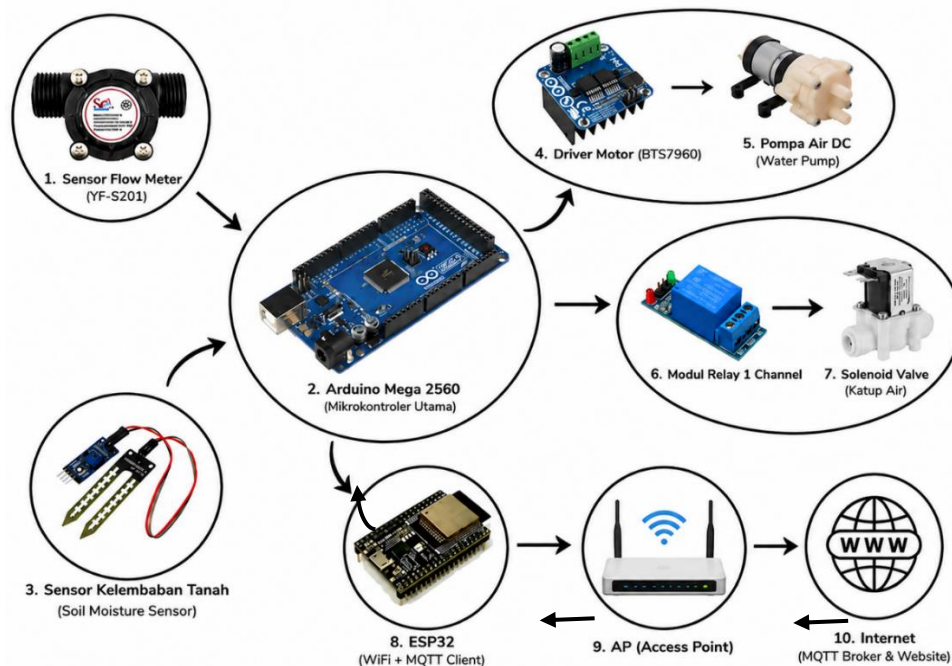
Bagian yang terakhir adalah *output*, pada bagan ini terdapat *web server* yang berisi data yang telah dikirimkan melalui internet oleh *esp32* sehingga nanti dapat dilihat pada tampilan *interface* berupa *website* untuk mengetahui perkembangannya. Selanjutnya, terdapat solenoid yang merupakan hasil *output* dari algoritma ACO, yang mana solenoid bertugas untuk mengatur jalur sesuai distribusi ke dalam sektor irigasi berdasarkan prioritas penyiraman. Kemudian

pompa air, pompa air berfungsi untuk memberikan debit aliran air ke setiap distribusi tetesan. Hasil dari pompa tersebut akan diukur kembali menggunakan *water flow sensor* guna untuk mengetahui perkembangan dari konsistensi debit air sehingga dapat dijadikan data *input* dan evaluasi pada algoritma kontrol PID.

3.2.2 Perancangan Sistem Irigasi Tetes

Perancangan sistem irigasi tetes merupakan tahapan yang dilakukan untuk menganalisis kebutuhan dari sistem yang akan dibuat. Kebutuhan ini meliputi kebutuhan *hardware* berisi desain dari perangkat elektronika untuk mendukung teknologi yang akan diterapkan, kebutuhan *software* berisi desain interface berupa *website* untuk memantau dan merekap hasil yang telah diperoleh dari sistem, dan yang terakhir adalah desain irigasi tetes yang akan dibuat.

3.2.2.1 Kebutuhan Hardware



Gambar 3.4 Desain *Hardware*

Pada gambar 3.4 merupakan komponen-komponen utama yang digunakan pada desain rangkaian hardware sistem irigasi tetes, antara lain :

1. Sensor *Flow Meter* (YF-S201)

Sensor *Flow Meter YF-S201* berperan dalam memperoleh informasi mengenai jumlah air yang mengalir pada jaringan irigasi. Pengukuran dilakukan dengan menghitung pulsa yang terbentuk saat air melewati sensor. Informasi ini digunakan untuk menghitung debit air dan menilai efektivitas distribusi air dalam sistem.

2. *Arduino Mega 2560* (Mikrokontroler Utama)

Arduino Mega 2560 bertindak sebagai pusat kontrol yang mengintegrasikan seluruh komponen perangkat keras. Data yang diterima dari berbagai sensor diproses untuk menghasilkan keputusan terkait distribusi dan pengaturan aliran air. Implementasi algoritma ACO dan PID juga dijalankan pada mikrokontroler ini guna mendukung kinerja sistem secara optimal.

3. Sensor Kelembaban Tanah (*Soil Moisture Sensor*)

Soil Moisture Sensor berfungsi untuk mengukur tingkat kelembapan tanah pada area tanam. Hasil pengukuran digunakan sebagai indikator kebutuhan air tanaman sehingga proses irigasi dapat dilakukan secara lebih tepat. Data yang diperoleh selanjutnya dikirim ke mikrokontroler untuk diproses sebagai dasar pengendalian sistem.

4. Driver Motor (BTS7960)

Driver motor BTS7960 berfungsi sebagai penguat daya yang memungkinkan Arduino mengendalikan pompa air dengan kebutuhan arus yang

lebih besar. Modul ini menerima sinyal kontrol dari Arduino, khususnya hasil keluaran pengendali PID, kemudian mengatur daya yang diberikan kepada pompa. Dengan adanya driver motor, pengoperasian pompa dapat dilakukan secara lebih stabil dan sesuai kebutuhan sistem.

5. Pompa Air DC (*Water Pump*)

Pompa air DC merupakan aktuator yang bertugas mendistribusikan air dari sumber menuju area irigasi. Operasi pompa dikendalikan oleh Arduino melalui driver motor BTS7960. Besarnya debit air yang dihasilkan dapat disesuaikan berdasarkan kebutuhan penyiraman yang telah dihitung oleh sistem, sehingga proses irigasi dapat berlangsung secara lebih efisien.

6. Modul Relay 1 Channel

Modul relay berfungsi sebagai sakelar elektronik yang memungkinkan Arduino mengontrol perangkat dengan tegangan atau arus yang lebih tinggi. Relay digunakan untuk menghubungkan atau memutus aliran listrik menuju aktuator tertentu. Selain itu, relay juga memberikan isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya sehingga meningkatkan keamanan sistem.

7. *Solenoid Valve* (Katup Air)

Solenoid valve berfungsi sebagai katup otomatis yang mengatur buka dan tutupnya aliran air pada sistem irigasi. Katup ini dikendalikan melalui modul relay berdasarkan keputusan yang dihasilkan oleh sistem kontrol. Dengan adanya solenoid valve, distribusi air dapat diarahkan secara otomatis ke sektor yang membutuhkan irigasi tanpa memerlukan intervensi manual.

8. ESP32 (Wi-Fi dan *MQTT Client*)

ESP32 berfungsi sebagai gateway komunikasi IoT yang menghubungkan sistem dengan jaringan internet. Modul ini menerima data hasil pengolahan dari Arduino melalui komunikasi serial UART, kemudian melakukan koneksi ke jaringan Wi-Fi. Selanjutnya, ESP32 mengirimkan data tersebut ke *MQTT Broker* menggunakan protokol MQTT sehingga informasi sistem dapat diakses secara real-time melalui aplikasi monitoring.

9. *Access Point*

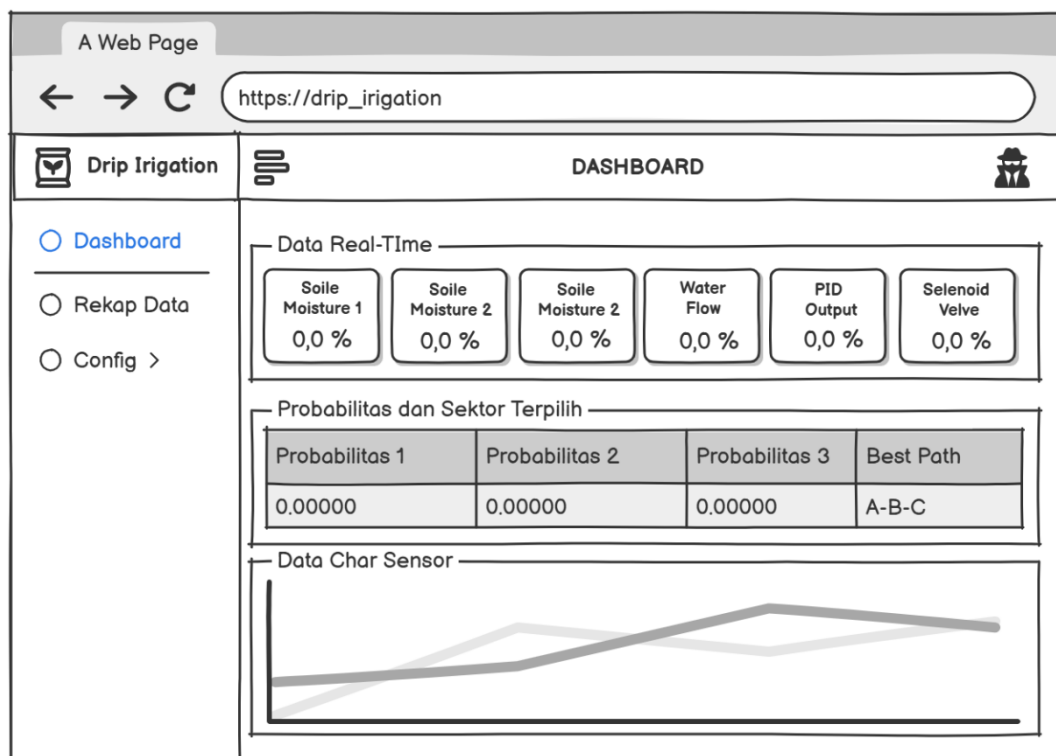
Access Point berfungsi sebagai penghubung jaringan nirkabel antara ESP32 dan internet. ESP32 mengirimkan data sensor serta menerima data monitoring melalui koneksi WiFi yang disediakan oleh *Access Point*. Dengan adanya *Access Point*, data dari sistem irigasi dapat diteruskan ke MQTT Broker dan website untuk keperluan monitoring dan pengendalian jarak jauh.

10. Internet, *MQTT Broker*, dan *Website*

MQTT Broker berperan sebagai perantara komunikasi antara ESP32 dan website monitoring menggunakan mekanisme publish-subscribe. Data yang dikirimkan oleh ESP32 akan diteruskan oleh broker kepada website yang berlangganan pada topik yang sama. Website kemudian menampilkan data tersebut secara real-time pada dashboard monitoring dan menyimpannya ke dalam database sebagai data historis. Dengan mekanisme ini, pengguna dapat memantau kondisi sistem irigasi dari mana saja melalui jaringan internet.

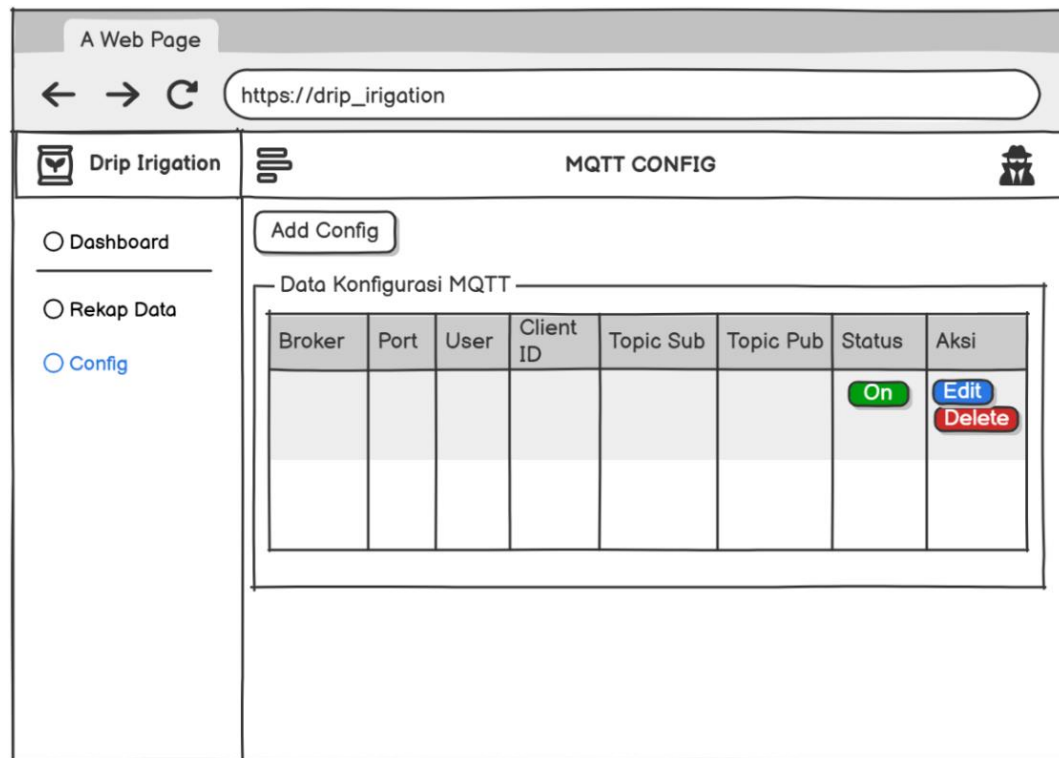
3.2.2.2 Kebutuhan Software

Perancangan desain *interface* dilakukan untuk memonitoring hasil penegolaan dan pembacaan data. Sebelum tahap implementasi maka akan dibuat sebuah desain *mockup* aplikasi dalam bentuk *website* dengan tampilan yang dibutuhkan. Tampilan terdiri dari *dashboard*, rekap data, dan *controller*.



Gambar 3.5 Dashboard Interface

Pada gambar 3.5 merupakan dashboard utama pada *website*, dashboard tersebut berisi *card* yang berfungsi untuk menampilkan data secara *realtime*. Kemudian dibawahnya terdapat grafik yang menunjukkan data sensor yang diterima melalui *database sistem*.



Gambar 3.6 MQTT Controller Interface

Pada gambar 3.6 merupakan tampilan yang berisi *input* Mqtt, konfigurasi ini berfungsi sebagai penghubung antara website ke mikrokontroller sehingga data dapat terbaca sesuai yang dikirimkan oleh mikrokontroller berdasarkan nilai atau kondisi yang telah di monitoring oleh sistem *hardware*.

A Web Page

←

→

↺

https://drip_irigation

Drip Irrigation

REKAP DATA

Dashboard

Rekap Data

Config

Rekap Data

Prob 1	Prob 2	Prob 3	Best Path	PiD Output	Status Kran	Waktu
0.00000	0.00000	0.00000	A-B-C	156	Kran Sektor 2 ON	Minggu, 15 April 2025

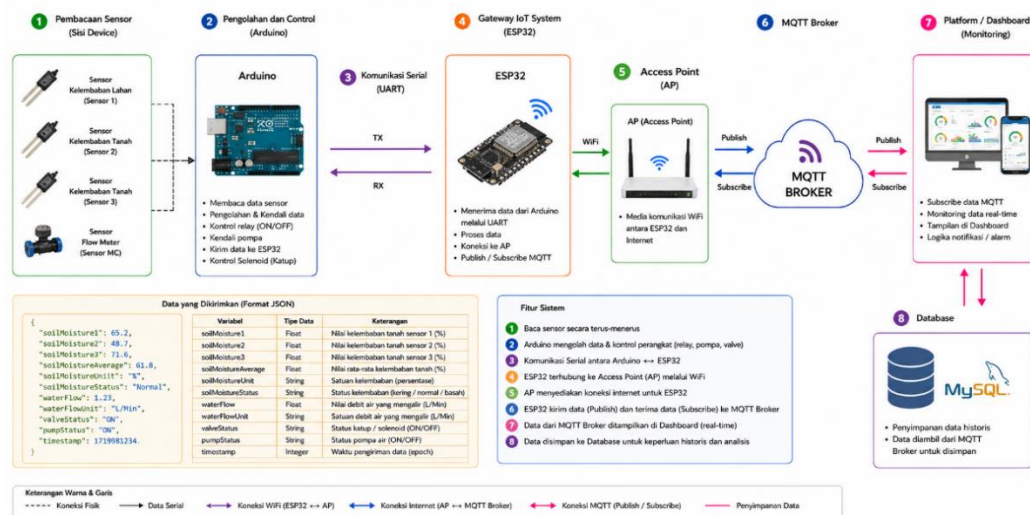
Rata-Rata

Avg SM 1	Avg SM 2	Avg SM3	Avg Water FLOW
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Gambar 3.7 Rekap Data Interface

Pada gambar 3.7 merupakan tampilan dari data rekap yang telah tersimpan pada *database*. Tampilan berupa sebuah tabel yang berisi kolom dari data sensor dan waktu sesuai dengan apa yang dikirim dari sistem irigasi tetes.

3.2.2.3 Alur Komunikasi Data



Gambar 3.8 Desain Alur Komunikasi Data

Pada gambar 3.8 terlihat bahwa sistem monitoring dan pengendalian irigasi yang dikembangkan menerapkan komunikasi data berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan memanfaatkan protokol MQTT sebagai media pertukaran data antara perangkat lapangan dan aplikasi monitoring. Alur komunikasi dimulai dari proses pembacaan sensor pada Arduino, pengiriman data ke ESP32 melalui komunikasi serial, publikasi data ke *MQTT Broker*, hingga visualisasi dan penyimpanan data pada website. Arduino berfungsi sebagai pengendali utama yang bertugas membaca dan mengolah data dari berbagai sensor yang terpasang pada sistem. Data yang diperoleh meliputi nilai kelembaban tanah pada tiga sektor, debit aliran air, hasil perhitungan probabilitas untuk masing-masing sektor, jalur optimal hasil algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO), keluaran pengendali PID, serta status aktuatur kran.

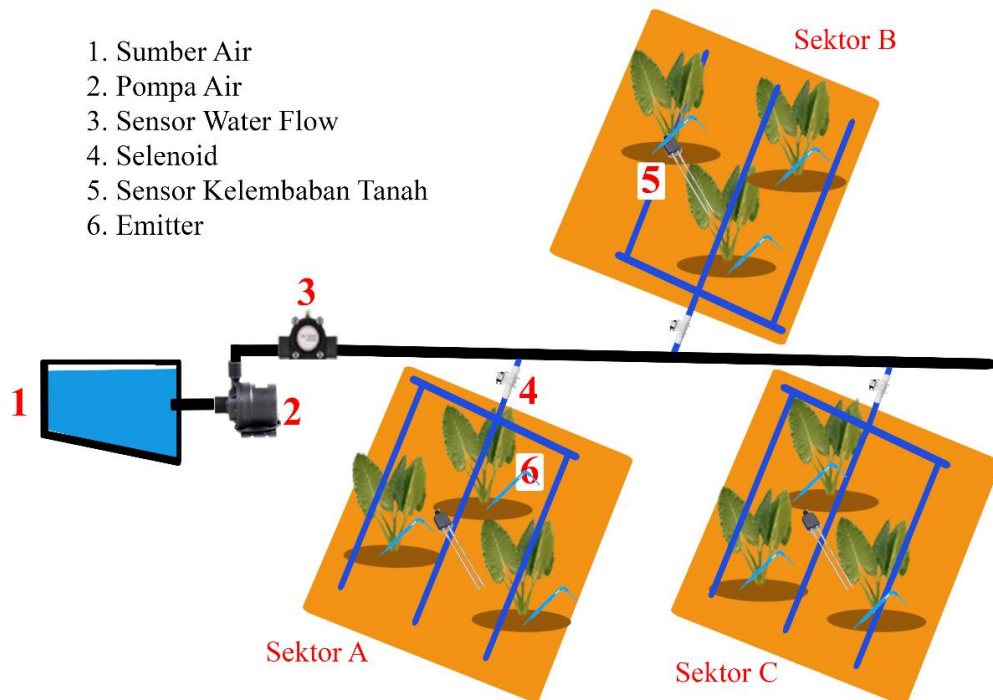
Data yang telah diproses kemudian dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi serial UART. Pada komunikasi ini Arduino bertindak sebagai

transmitter, sedangkan ESP32 berperan sebagai *receiver*. Pengiriman data serial dilakukan secara periodik dengan format tertentu sehingga ESP32 dapat memisahkan dan mengidentifikasi setiap parameter yang diterima. Setelah menerima data dari Arduino, ESP32 melakukan parsing data dan menghubungkannya ke jaringan internet melalui modul Wi-Fi yang terintegrasi. ESP32 kemudian bertindak sebagai MQTT Client yang bertugas mempublikasikan data ke *MQTT Broker*.

Protokol MQTT dipilih karena memiliki karakteristik ringan (*lightweight*), penggunaan *bandwidth* yang rendah, serta mendukung komunikasi *real-time* pada perangkat IoT. Pada mekanisme ini digunakan model komunikasi Publish-Subscribe, dimana ESP32 bertindak sebagai *Publisher* dan MQTT Broker bertindak sebagai perantara distribusi data. Data sensor dan parameter sistem dikemas dalam format JSON sebelum dikirim ke broker.

Website monitoring berfungsi sebagai MQTT Subscriber yang secara terus-menerus berlangganan pada topik data yang diterbitkan oleh ESP32. Ketika broker menerima data baru dari ESP32, broker akan langsung meneruskan data tersebut ke *website* tanpa perlu menunggu permintaan dari pengguna. Mekanisme ini memungkinkan *dashboard* menampilkan data secara *real-time* dengan latensi yang rendah. Setiap perubahan nilai sensor atau status sistem dapat langsung terlihat pada antarmuka pengguna.

3.2.2.4 Desain Irigasi Tetes



Gambar 3.9 Desain Irigasi Tetes

Gambar 3.9 merupakan gambaran dari rancangan sistem irigasi tetes yang dipakai dalam penelitian. Sistem irigasi tetes ini dibuat dalam bentuk rancangan prototipe dalam skala laboratorium. Adapun komponen yang digunakan adalah *reservoir* sebagai bak penampung air, pompa air, sensor *water flow*, sensor *soil moisture*, pipa utama, pipa lateral, dan filter air.

3.2.3 Perancangan *Ant Colony Optimization*

Pada penelitian ini, algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) diterapkan untuk menentukan prioritas distribusi air berdasarkan kondisi kelembaban tanah pada setiap sektor irigasi. Meskipun sistem yang dikembangkan hanya terdiri dari tiga sektor irigasi, penggunaan ACO tetap dilakukan sebagai tahap implementasi awal (*proof of concept*) untuk memvalidasi mekanisme optimasi yang diusulkan.

Jumlah sektor yang terbatas memang memungkinkan penentuan prioritas dilakukan menggunakan metode yang lebih sederhana. Namun, penelitian ini dirancang dengan mempertimbangkan kemungkinan pengembangan sistem pada skala yang lebih besar dengan jumlah sektor yang lebih banyak dan kondisi distribusi yang lebih kompleks. Pada kondisi tersebut, proses penentuan prioritas distribusi air akan melibatkan lebih banyak kombinasi jalur sehingga diperlukan metode optimasi yang mampu mencari solusi secara adaptif dan efisien.

Oleh karena itu, penggunaan algoritma ACO pada penelitian ini tidak hanya ditujukan untuk menyelesaikan permasalahan pada tiga sektor yang diuji, tetapi juga sebagai dasar pengembangan sistem irigasi cerdas yang dapat diterapkan pada jaringan distribusi air dengan jumlah sektor yang lebih besar di masa mendatang.

3.2.3.1 Parameter ACO

Tabel 3.1 Parameter ACO

Parameter	Fungsi	Pengaruh
α (alpha)	Mengontrol pengaruh pheromone (τ)	Semakin besar, sistem cenderung mengikuti pengalaman (eksploitasi)
β (beta)	Mengontrol pengaruh visibilitas (η / jarak)	Semakin besar, sistem lebih memilih jalur terdekat
ρ (rho)	Tingkat evaporasi/penguapan pheromone	Semakin besar, memori cepat hilang (eksplorasi meningkat)
Q	Intensitas penambahan pheromone	Semakin besar, penguatan jalur lebih cepat

Algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) memiliki beberapa parameter seperti yang terlihat pada tabel 3.1, parameter tersebut yang berperan penting dalam menentukan kualitas solusi yang dihasilkan. Pada penelitian ini, parameter yang

digunakan meliputi α (*alpha*), β (*beta*), ρ (*rho*), dan Q . Pemilihan parameter tersebut didasarkan pada konsep dasar ACO yang memanfaatkan jejak *pheromone* dan informasi heuristik untuk menentukan jalur distribusi air yang paling optimal. Nilai dari setiap parameter akan mempengaruhi keseimbangan antara proses eksplorasi dan eksploitasi selama pencarian solusi, sehingga perlu dilakukan pengujian untuk memperoleh konfigurasi yang menghasilkan performa terbaik.

Parameter α (*alpha*) digunakan untuk mengontrol pengaruh nilai *pheromone* dalam proses pemilihan jalur. Semakin besar nilai α , maka keputusan algoritma akan semakin dipengaruhi oleh pengalaman sebelumnya yang tersimpan dalam bentuk *pheromone*. Pada sistem distribusi air, parameter ini membantu memperkuat kecenderungan algoritma untuk memilih jalur yang sebelumnya sering menghasilkan solusi terbaik. Namun, apabila nilai α terlalu besar, algoritma dapat mengalami eksploitasi berlebihan, yaitu terlalu fokus pada satu jalur tertentu sehingga kemampuan untuk mencari alternatif solusi lain menjadi berkurang. Sebaliknya, nilai α yang terlalu kecil akan mengurangi pengaruh *pheromone* sehingga proses pencarian menjadi kurang terarah.

Parameter β (*beta*) digunakan untuk mengontrol pengaruh informasi heuristik (*visibility*) dalam pemilihan jalur. Pada penelitian ini, informasi heuristik direpresentasikan oleh tingkat kekeringan tanah dan panjang jalur distribusi air menuju sektor irigasi. Semakin besar nilai β , maka algoritma akan semakin mempertimbangkan kondisi aktual dari setiap sektor dalam proses pengambilan keputusan. Nilai β yang terlalu besar dapat menyebabkan algoritma hanya berfokus pada informasi heuristik dan mengabaikan pengalaman yang tersimpan pada

pheromone, sedangkan nilai β yang terlalu kecil dapat menyebabkan proses pencarian menjadi kurang responsif terhadap perubahan kondisi lahan.

Parameter ρ (*rho*) berfungsi sebagai faktor evaporasi atau penguapan *pheromone*. Parameter ini digunakan untuk mengurangi akumulasi *pheromone* pada setiap iterasi sehingga algoritma tetap memiliki kemampuan untuk mengeksplorasi jalur-jalur lain yang mungkin lebih optimal. Semakin besar nilai ρ , maka *pheromone* akan semakin cepat menguap sehingga proses eksplorasi meningkat. Sebaliknya, nilai ρ yang terlalu kecil menyebabkan *pheromone* bertahan lebih lama dan algoritma cenderung melakukan eksploitasi terhadap jalur yang telah ditemukan sebelumnya. Oleh karena itu, pemilihan nilai ρ yang tepat diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi.

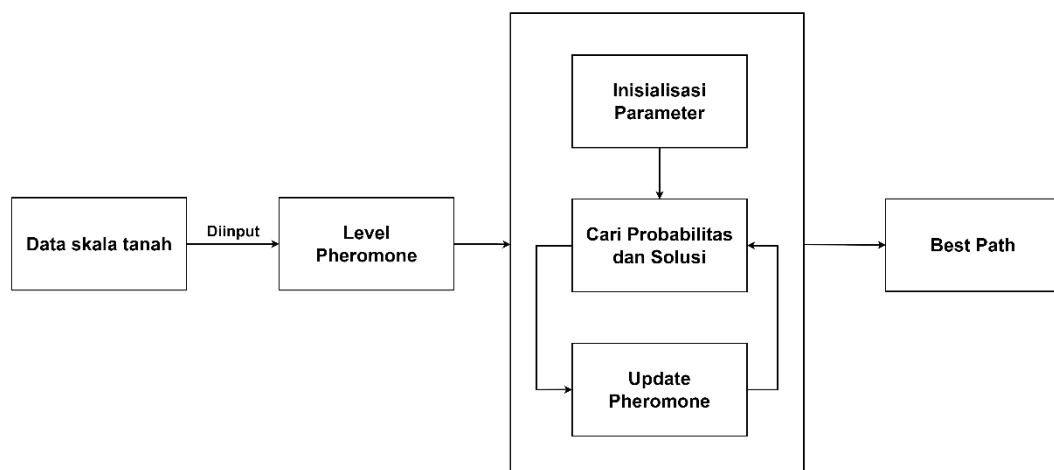
Parameter Q merupakan konstanta yang digunakan dalam proses pembaruan *pheromone*. Nilai Q menentukan jumlah *pheromone* yang ditambahkan pada jalur yang dipilih setelah proses evaluasi dilakukan. Semakin besar nilai Q , maka penguatan terhadap jalur yang dianggap baik akan semakin besar sehingga konvergensi algoritma dapat berlangsung lebih cepat. Namun, nilai Q yang terlalu besar dapat menyebabkan dominasi pada jalur tertentu dan mengurangi kemampuan algoritma dalam menemukan solusi alternatif. Sebaliknya, nilai Q yang terlalu kecil dapat memperlambat proses pembentukan pola *pheromone* sehingga algoritma membutuhkan iterasi yang lebih banyak untuk mencapai solusi optimal.

Berdasarkan karakteristik masing-masing parameter tersebut, penelitian ini melakukan pengujian beberapa kombinasi nilai α , β , ρ , dan Q untuk memperoleh konfigurasi yang menghasilkan tingkat akurasi terbaik dalam menentukan prioritas

distribusi air. Konfigurasi parameter yang memberikan nilai *error* paling kecil dipilih sebagai parameter terbaik dan digunakan pada seluruh pengujian sistem. Dengan demikian, hasil optimasi yang diperoleh tidak hanya bergantung pada kondisi kelembaban tanah, tetapi juga dipengaruhi oleh konfigurasi parameter ACO yang digunakan dalam proses pencarian solusi.

3.2.3.2 Implementasi Algoritma ACO

Berikut adalah proses skenario pemilihan jalur terbaik pada sistem irigasi tetes menggunakan model algoritma ACO dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Skenario Algoritma ACO

Proses yang terjadi didalam diagram tersebut adalah nilai dari *pheromone* diambil dari skala tanah pada setiap sektor sistem irigasi tetes. Dapat dilihat pada gambar 3.9 jumlah sektor yang diterapkan berjumlah 3 sektor yang masing-masing memiliki 9 tanaman. Nilai *pheromone* akan diambil dari rata-rata nilai skala tanah pada setiap sektor. Kemudian nilai visibilitas akan diambil dari jarak antara

reservoir atau pompa menuju kran solenoid pada masing-masing sektor. Dari kedua nilai parameter ini akan diproses didalam model yang akan diterapkan.

Kemudian untuk menentukan rangkaian sistem menjadi cerdas, maka digunakan *Ant Colony Optimization (ACO)* untuk menentukan arah distribusi air. Berikut adalah proses algoritma ACO beserta dungs alih dari rumus ke program yang akan diterapkan untuk keperluan optimasi distribusi air pada sistem irigasi tetes.

$$Pobabilitas\ Sumber\ Air(i,j) = \frac{(kondisi\ tanah_{i,j}^{\alpha})(jarak_{i,j}^{\beta})}{\sum(kondisi\ tanah_{i,j}^{\alpha})(jarak_{i,j}^{\beta})} \quad (3.1)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai Probabilitas Sumber Air (i,j) menunjukkan peluang aliran air dari sumber air ke lokasi j , yaitu titik lahan yang dilengkapi sensor. Komponen $(kondisi\ tanah_{i,j}^{\alpha})$ digunakan untuk merepresentasikan kecenderungan distribusi air berdasarkan data yang diperoleh dari sensor kelembapan tanah. Besarnya pengaruh parameter ini ditentukan oleh nilai α (alpha) yang berperan sebagai representasi pheromone dalam algoritma ACO. Sementara itu, komponen $(jarak_{i,j}^{\beta})$ menggambarkan pengaruh jarak terhadap proses distribusi air. Parameter β (*beta*) merepresentasikan panjang jalur atau pipa yang harus dilalui air menuju lokasi tujuan. Dengan demikian, keputusan distribusi air dipengaruhi oleh kondisi tanah dan jarak distribusi yang telah ditentukan. Selanjutnya, proses pembaruan (*update*) pada algoritma ACO dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$kondisi\ tanah_{i,j} = (1 - p)kondisi\ tanah_{i,j} + \Delta kondisi\ tanah_{i,j} \quad (3.2)$$

Dimana :

$$\Delta kondisi\ tanah_{i,j} = \frac{Q}{\Sigma kondisi\ tanah_{i,j}} \quad (3.3)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk melakukan proses pembaruan (*update*) nilai *pheromone* pada algoritma ACO. Nilai panjang pipa yang dilalui oleh aliran air tidak mengalami perubahan karena bersifat tetap atau konstan. Sebaliknya, nilai *pheromone* akan berubah secara dinamis mengikuti kondisi yang diamati pada setiap iterasi. Perubahan nilai tersebut memengaruhi tingkat prioritas suatu jalur, sehingga jalur dengan nilai *pheromone* yang lebih tinggi memiliki peluang lebih besar untuk dipilih dalam proses distribusi air berikutnya..

Nilai *pheromone* diambil dari nilai skala tanah pada masing-masing sektor sistem irigasi tetes. Nilai *real* yang diambil dari sensor *soil moisture* yang sudah dipasang perlu dilakukan proses labeling berdasarkan kategori terlebih dahulu seperti yang tersaji pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.2 Skala Kategori Tanah dan Pheromone

Kategori	Skala (%)	Pheromone (τ)
Basah	0-19	0.1
Sedang	20-54	0.2
Kering	55-73	0,3
Ekstrim	74-100	0,4

Tabel 3.2 digunakan sebagai acuan untuk menentukan rentang nilai pada setiap kategori sehingga sistem dapat memutuskan *solenoid valve* yang perlu diaktifkan. Selain mempertimbangkan kategori yang diperoleh dari data sensor, sistem juga menggunakan parameter jarak dalam proses pengambilan keputusan.

Apabila seluruh data sensor berada pada kategori yang sama, maka distribusi air akan diprioritaskan ke lokasi yang memiliki jarak paling jauh terlebih dahulu sebelum dialirkan ke lokasi lainnya.

Setelah penentuan skala kategori tanah dan *pheromone* selanjutnya adalah penentuan nilai dari invers jarak pada tabel 3.3. Tujuan dari invers jarak adalah untuk memberikan preferensi yang lebih tinggi pada jalur yang lebih pendek untuk mendorong semut memilih jalur yang lebih efisien. Ketika nilai dari skala tanah sama semua sektor sama. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\eta = \frac{1}{Jarak} \quad (3.4)$$

Nilai invers jarak memberikan bobot yang lebih besar pada jalur yang lebih pendek. Jalur yang lebih pendek memiliki nilai η yang lebih tinggi, sehingga peluang semut memilih jalur tersebut meningkat. Sebaliknya, jalur yang lebih panjang memiliki nilai η yang lebih kecil, sehingga kurang menarik bagi semut.

Tabel 3.3 Jarak dan Inverse Jarak

Sektor	Jarak (Cm)	Invers Jarak (η)
A	120	0.008
B	160	0.006
C	200	0.005

3.2.3.3 Pseudocode ACO

Pseudocode Algoritma ACO digunakan untuk menggambarkan proses penentuan prioritas distribusi air berdasarkan kondisi kelembaban tanah pada setiap sektor irigasi. Algoritma diawali dengan membaca data kelembaban tanah, kemudian menghitung nilai heuristik dan probabilitas pada setiap sektor

berdasarkan parameter ACO yang telah ditentukan. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk memilih jalur terbaik (*best path*) yang akan menjadi prioritas penyiraman. Berikut adalah *pseudocode*-nya:

//ALGORITMA PENENTUAN PRIORITAS IRIGASI MENGGUNAKAN
ANT COLONY OPTIMIZATION (ACO)

Mulai

Baca nilai kelembaban tanah sektor 1, sektor 2, dan sektor 3

Inisialisasi parameter ACO:

- Alpha (α)
- Beta (β)
- Rho (ρ)
- Q
- Jumlah iterasi
- Nilai epsilon

Hitung nilai pheromone awal setiap sektor

Hitung nilai heuristik setiap sektor

Untuk setiap iterasi lakukan

Hitung nilai probabilitas setiap sektor

$$P(i) = ((\tau_i)^\alpha (\eta_i)^\beta) /$$

$$\sum ((\tau_j)^\alpha (\eta_j)^\beta)$$

Pilih sektor menggunakan metode

Epsilon-Greedy

Simpan sektor terpilih

Tentukan jalur terbaik sementara

(best path)

Hitung reward pheromone

$$\Delta\tau = Q / \Sigma\tau$$

Lakukan evaporasi pheromone

$$\tau_i = (1 - \rho) \tau_i$$

Perbarui pheromone pada sektor

terbaik dan sektor terpilih

$$\tau_i = \tau_i + \Delta\tau$$

Selesai

Tentukan sektor optimal berdasarkan nilai pheromone akhir

Urutkan sektor berdasarkan probabilitas akhir

Simpan urutan sektor sebagai jalur terbaik (best route)

Kirim jalur terbaik ke sistem irigasi

Selesai

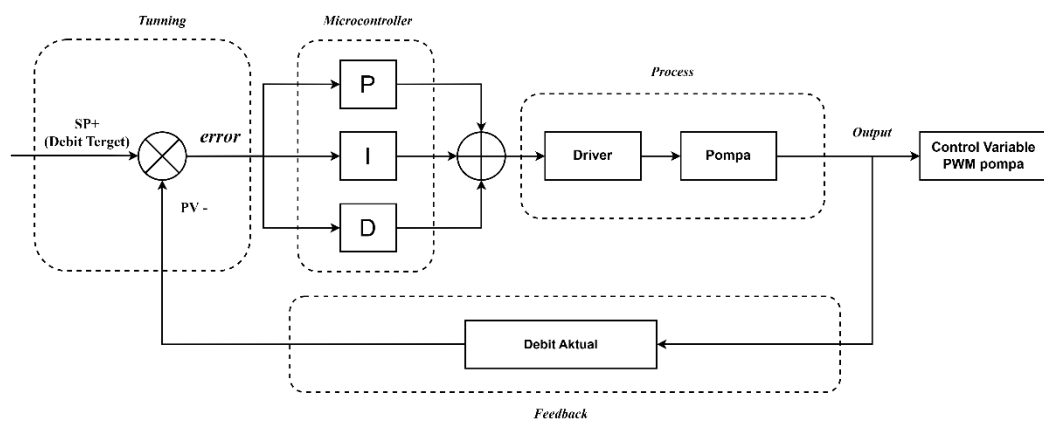
3.2.4 Perancangan Kontrol PID

Perancangan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) dilakukan untuk mengatur debit aliran air agar tetap stabil sesuai dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Sistem menggunakan sensor *water flow* sebagai umpan balik (*feedback*) untuk membaca debit aktual yang mengalir pada pipa irigasi. Nilai debit aktual kemudian dibandingkan dengan nilai *setpoint* sehingga diperoleh nilai *error*. Error tersebut diproses oleh kontrol PID menggunakan parameter *Proportional*

(K_p), *Integral* (K_i), dan *Derivative* (K_d) untuk menghasilkan sinyal kendali berupa nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) yang diberikan kepada pompa air.

3.2.4.1 Implementasi Kontrol PID

Kontrol PID berfungsi sebagai kontrol debit air yang diberikan kepada tanaman yang dituju pada setiap sektor irigasi tetes.



Gambar 3.11 Implementasi Kontrol PID

Gambar 3.11 dijelaskan bahwa kontroler PID digunakan untuk mengontrol kebutuhan air dan mencegah terjadinya fluktuasi (kelebihan atau kekurangan) pada proses distribusi air, berdasarkan nilai dari debit aliran air yang dibutuhkan. Penentuan *setpoint* (SP) akan dilakukan berdasarkan kebutuhan air liter/menit atau mili liter/menit dari setiap sektor irigasi tetes, nilai ini dapat dilihat dari spesifikasi dari *emitter* yang digunakan.

Setelah dilakukan penentuan nilai *setpoint* maka selanjutnya adalah menentukan nilai *error*. Namun, sebelum menentukan nilai *error*, akan dikirimkan nilai berupa sinyal PWM pada *driver*. Sehingga *driver* akan menggerakkan pompa air dan menghasilkan nilai debit aliran air. Kemudian

akan didapatkan *feedback*, kemudian kontroler PID akan menghitung nilai *error* dari hasil pembacaan sensor *process value (PV)* dengan *setpoint*. Setelah mendapatkan nilai *error*, maka akan diproses kembali oleh algoritma kontrol PID.

Metode PID menentukan besarnya nilai (*error*) dengan membandingkan nilai target (*setpoint*) terhadap nilai proses (*process value*). Nilai target dikirimkan melalui halaman web sebagai masukan sistem, sedangkan nilai proses diperoleh dari data sensor yang dibaca pada sisi keluaran. Algoritma PID kemudian diimplementasikan dalam bentuk kode program untuk mengendalikan parameter *proporsional* (K_p), *integral* (K_i), dan *derivatif* (K_d). Perhitungan parameter tersebut memanfaatkan informasi galat terkini serta riwayat galat sebelumnya. Untuk mengimplementasikan algoritma PID ke dalam program, diperlukan beberapa tahapan sebagai berikut:

a. Nilai *Error*

Rumus 3.5 merupakan pencarian nilai *error* dari nilai aktual yang muncul berdasarkan *setpoint* yang telah ditentukan, dalam hal ini adalah debit. Variabel *error* memberikan informasi tentang seberapa besar perbedaan antara nilai yang diinginkan (*setpoint*) dan kondisi aktual sistem pada saat itu. Kemudian, komponen "P" (*proporsional*) dari kontrol PID akan menghitung dengan mengalikan *error* dengan konstanta *proporsional*

$$error = debit\ target - debit\ aktual \quad (3.5)$$

b. Parameter *Proportional*

Rumus 3.6 merupakan perhitungan rumus alih program untuk membuat sistem bergerak menuju *setpoint* ketika *error* terjadi. sistem akan bergerak lebih cepat menuju *setpoint* jika *error* memiliki nilai yang besar.

$$proporsional = Kp \times error \quad (3.6)$$

Kemudian untuk aksi atau *plant system* yang akan dilakukan oleh pompa berdasarkan nilai *error* yang telah didapat pada rumus 3.7 adalah sebagai berikut:

$$Effort = effort_{sebelum} + Propotional \quad (3.7)$$

c. Parameter *Integral*

Rumus 3.8 merupakan perhitungan dari parameter integral, yaitu dengan cara mengakumulasikan nilai *error* perwaktu. Komponen *integral* akan mengukur dan mengkoreksi *error* yang berkelanjutan atau bias dalam sistem. Komponen Ini akan membantu menghilangkan offset atau kesalahan tetap dalam sistem.

$$Integral = integral + Ki \times error) \quad (3.8)$$

Kemudian untuk aksi atau *plant system* yang akan dilakukan oleh pompa berdasarkan nilai *integral* yang telah didapat pada rumus 3.9 adalah sebagai berikut.

$$Effort = effort_{sebelum} + Propotional + Integral \quad (3.9)$$

d. Parameter *Derivative*

Pada Rumus 3.10 merupakan perhitungan dari parameter *derivative* dari PID, yaitu variabel dinput hasil dari *error* saat ini dikurangi dengan *previous error*.

$$Derivatif = K_d \times (error - previous_{error}) \quad (3.10)$$

Kemudian untuk aksi atau *plant system* yang akan dilakukan oleh pompa berdasarkan nilai komponen *derivative* yang telah didapat pada rumus 3.11 adalah sebagai berikut.

$$Effort = effort_{sebelum} + Proportional + Integral + Derivative \quad (3.11)$$

3.2.4.2 Pseudocode PID

Diagram *pseudocode* PID menunjukkan tahapan pengendalian debit air berdasarkan nilai acuan yang telah ditetapkan. Pembacaan debit dilakukan melalui flow sensor, kemudian hasil pengukuran dibandingkan dengan nilai acuan untuk menentukan selisih atau galat sistem. Nilai *error* tersebut menjadi masukan bagi perhitungan PID yang menghasilkan sinyal PWM. Sinyal ini berfungsi mengendalikan putaran pompa sehingga debit air dapat dipertahankan pada kondisi yang stabil dan mendekati nilai yang diinginkan.

Mulai

Baca nilai debit aktual dari sensor water flow

Hitung error:

$$Error = Setpoint - Debit Aktual$$

Hitung nilai integral

Hitung nilai turunan (derivative)

Hitung keluaran PID:

Output PID =

$(K_p \times \text{Error})$

+ $(K_i \times \text{Integral})$

+ $(K_d \times \text{Derivative})$

Konversi output PID menjadi nilai PWM

Kirim PWM ke pompa

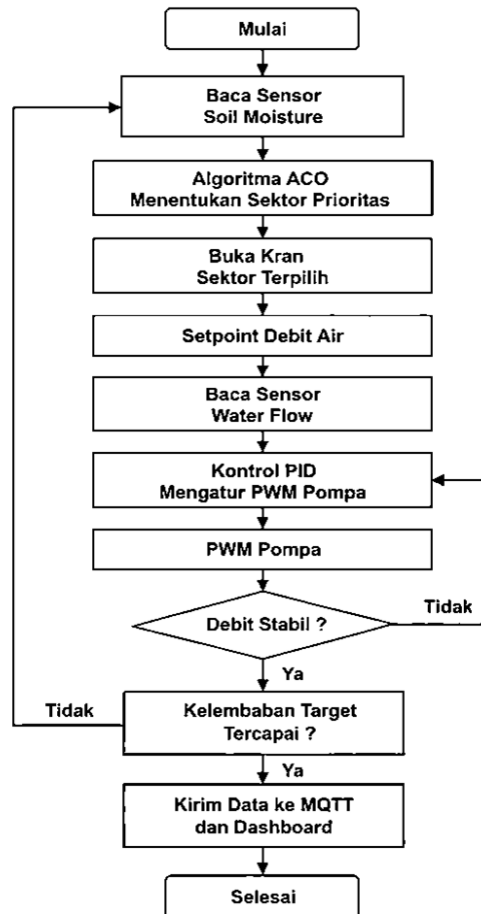
Ulangi selama proses penyiraman berlangsung

Selesai

3.2.5 Integrasi Algoritma ACO dan PID

Integrasi algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dan *Proportional Integral Derivative* (PID) dilakukan untuk menghasilkan sistem irigasi tetes yang mampu menentukan prioritas distribusi air sekaligus menjaga kestabilan debit aliran air. Algoritma ACO digunakan untuk memilih sektor irigasi yang menjadi prioritas penyiraman berdasarkan kondisi kelembaban tanah, sedangkan algoritma PID digunakan untuk mengatur kecepatan pompa agar debit air yang diberikan sesuai dengan nilai setpoint yang telah ditentukan. Dengan menggabungkan kedua algoritma tersebut, sistem diharapkan mampu mendistribusikan air secara lebih tepat sasaran, merata, dan efisien sesuai kebutuhan tanaman.

3.2.5.1 Mekanisme Integrasi



Gambar 3.12 Alur Mekanisme Integrasi ACO dan PID

Alur integrasi ACO dan PID berjalan seperti pada gambar 3.12 yang manap roses diawali dengan pembacaan data kelembaban tanah dari sensor soil moisture yang ditempatkan pada setiap sektor irigasi. Data kelembaban tersebut kemudian digunakan sebagai masukan bagi algoritma ACO untuk menentukan sektor yang menjadi prioritas penyiraman. Dalam proses ini, sektor dengan tingkat kelembaban yang lebih rendah akan memiliki nilai probabilitas yang lebih tinggi untuk dipilih sebagai jalur distribusi air. Hasil perhitungan ACO berupa urutan prioritas

penyiraman (*best path*) yang menunjukkan sektor mana yang harus mendapatkan suplai air terlebih dahulu.

Setelah sektor prioritas berhasil ditentukan, sistem akan membuka kran pada sektor yang terpilih dan mengaktifkan pompa air. Pada tahap ini, algoritma PID mulai bekerja untuk mengendalikan debit aliran air yang didistribusikan. Sensor *water flow* digunakan untuk membaca nilai debit aktual yang mengalir pada sistem. Nilai debit aktual tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai setpoint yang telah ditentukan sebelumnya. Selisih antara debit aktual dan setpoint menghasilkan nilai error yang akan diproses oleh kontrol PID menggunakan parameter *Proportional* (K_p), *Integral* (K_i), dan *Derivative* (K_d). Hasil perhitungan PID digunakan untuk mengatur nilai PWM (*Pulse Width Modulation*) pada pompa sehingga debit air yang dihasilkan dapat mendekati nilai setpoint dan tetap stabil selama proses penyiraman berlangsung.

Selama proses distribusi air, sistem secara terus-menerus melakukan pembacaan ulang terhadap sensor *water flow* dan sensor kelembaban tanah. Kontrol PID akan terus melakukan koreksi terhadap kecepatan pompa apabila terjadi perubahan debit akibat faktor tekanan air, panjang pipa, maupun kondisi sistem lainnya. Sementara itu, data kelembaban tanah digunakan untuk memantau perubahan kondisi lahan setelah proses penyiraman dilakukan. Ketika nilai kelembaban tanah pada sektor yang sedang disiram telah mencapai batas yang ditentukan, sistem akan menghentikan proses penyiraman pada sektor tersebut dengan menutup kran dan mematikan pompa.

3.2.5.2 *Pseudocode* Integrasi ACO dan PID

Pseudocode integrasi ACO dan PID menjelaskan alur kerja sistem secara keseluruhan. Proses dimulai dengan pembacaan data kelembaban tanah yang kemudian digunakan oleh algoritma ACO untuk menentukan sektor prioritas penyiraman. Setelah sektor terpilih, kontrol PID digunakan untuk mengatur debit aliran air sesuai kebutuhan. Selama proses penyiraman berlangsung, sistem melakukan pemantauan secara *realtime* dan mengirimkan data ke *dashboard* IoT hingga kondisi kelembaban tanah mencapai nilai target yang ditentukan.

Mulai

Baca data kelembaban tanah dari seluruh sektor

Jalankan algoritma ACO

Tentukan sektor prioritas penyiraman

Buka kran pada sektor terpilih

Tentukan nilai setpoint debit air

Selama proses penyiraman:

Baca nilai debit aktual

Jalankan kontrol PID

Atur kecepatan pompa sesuai output PID

Kirim data ke dashboard IoT

Jika kelembaban tanah telah mencapai target:

Tutup kran

Hentikan pompa

Selesai

Simpan data ke database

Selesai

3.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian, dilakukan beberapa tahapan untuk memastikan seluruh proses berjalan secara sistematis dan mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Tahapan tersebut meliputi proses pengumpulan data serta pengujian sistem. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem yang telah dirancang dan memastikan bahwa sistem dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan kebutuhan dan tujuan penelitian.

3.3.1 Pengambilan Data

Pengambilan data dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh parameter yang dibutuhkan dalam proses optimasi jalur distribusi air menggunakan metode *Ant Colony Optimization* (ACO) serta pengendalian debit air menggunakan metode *Proportional Integral Derivative* (PID). Data yang dikumpulkan terdiri dari dua jenis utama, yaitu data kondisi kelembaban tanah sebagai input untuk algoritma ACO, serta data debit air yang digunakan sebagai acuan *setpoint* dan *feedback* dalam sistem kontrol PID. Seluruh data diambil secara langsung dari sistem irigasi yang dirancang dengan memanfaatkan sensor dan pengukuran manual guna memastikan keakuratan dan kesesuaian dengan kondisi nyata di lapangan.

3.3.1.1 Data Input Metode ACO

Pengambilan data digunakan dalam penelitian untuk diolah lebih lanjut yaitu berupa data kelembapan tanah dari sensor *soil moisture*, data sensor tersebut merupakan variabel yang digunakan sebagai input pada metode ACO. Berikut adalah tabel yang digunakan untuk mencatat data dari setiap sektor dan menentukan nilai *pheromone* pada masing-masing sektor yang ada pada sistem irigasi tetes yang akan di gunakan.

Tabel 3.4 Pheromone Setiap Sensor

No	Sektor	Nilai Sensor (%)	τ	α	β	η
	A					
	B					
	C					
	A					
	B					
	C					

3.3.1.2 Data Input Metode PID

Data input untuk metode PID terdiri dari dua komponen utama, yaitu nilai *setpoint* dan data *feedback*. Nilai *setpoint* diperoleh melalui pengukuran manual debit air menggunakan gelas ukur, yang bertujuan untuk menentukan kebutuhan debit air ideal pada setiap *emitter*. Pengukuran dilakukan dengan cara menampung aliran air dari setiap *emitter* dalam interval waktu 1 menit, di mana setiap sektor memiliki tiga *emitter*. Nilai *setpoint* ditetapkan berdasarkan rata-rata debit yang diharapkan agar distribusi air pada setiap *emitter* dalam satu sektor dapat berlangsung secara seragam. Dengan pendekatan ini, pengendali PID dapat bekerja untuk meminimalkan selisih antara debit aktual dan debit yang diinginkan, sehingga sistem mampu menjaga kestabilan aliran air serta meningkatkan keseragaman distribusi pada seluruh sektor irigasi.

3.3.2 Rencana Pengujian

Tujuan dari rencana pengujian untuk sistem irigasi tetes menggunakan metode *ACO (Ant Colony Optimization)* dan kontrol *PID (Proportional-Integral-Derivative)* adalah untuk memastikan bahwa algoritma ACO dapat mengoptimalkan jalur aliran air dengan efisien, sistem kontrol PID dapat mengatur aliran air dengan akurat dan responsif terhadap perubahan kondisi, serta memastikan kinerja keseluruhan sistem dalam memberikan irigasi yang optimal.

3.3.2.1 Rencana Kalibrasi Sensor Kelembaban Tanah

Kalibrasi sensor digunakan memastikan sistem irigasi berfungsi dengan efisien melalui pengoptimalan jalur aliran dan pengaturan aliran air yang akurat, serta memastikan sensor memberikan pembacaan yang tepat untuk mendukung pengambilan keputusan yang optimal. Pengujian sensor kelembaban tanah dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor pada sistem dengan alat ukur yang umum digunakan dalam bidang pertanian. Alat pembanding yang digunakan adalah *TA290 Hygrometer*, yaitu instrumen yang berfungsi untuk mengukur tingkat kelembapan tanah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.13. Alat ini memiliki rentang pengukuran antara 10% hingga 98% dengan tingkat akurasi sekitar $\pm 5\%$. (Ramadan, 2021).



Gambar 3.13 Alat Ukur Kelembaban Tanah

Kemudian data yang diperoleh akan di masukan kedalam tabel 3.5 untuk membandingkan nilai akurasi dan error sensor *soile moisture* dibandingkan dengan nilai referensi dari sensor *TA290 hygrometer*.

Tabel 3.5 Rencana Kalibrasi Sensor

No	Nilai Sensor (%)	Nilai Referensi <i>hygrometer</i> (%)	Error (%)
Rata-Rata Error %			

Penjelasan:

- Pengukuran (Nilai) : Nilai yang diukur oleh sensor.
- Nilai Referensi: Nilai standar atau referensi yang dianggap benar untuk perbandingan yaitu nilai dari sensor *TA290 hygrometer*.

- Error (%): Selisih antara nilai yang diukur menggunakan sensor kelembaban tanah dengan nilai referensi sensor *TA290 hygrometer* dalam persen (Ramadan, 2021). Dihitung dengan rumus:

$$Error = \left| \frac{\text{Nilai Sensor} - \text{TA290 hygrometer}}{\text{TA290 hygrometer}} \right| \times 100\% \quad (3.12)$$

3.3.2.2 Rencana Pengujian ACO

Pengujian algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dilakukan untuk mengetahui kemampuan algoritma dalam menentukan prioritas distribusi air berdasarkan kondisi kelembaban tanah pada setiap sektor irigasi. Tahap pertama pengujian dilakukan terhadap parameter ACO yang meliputi nilai α (*alpha*), β (*beta*), ρ (*rho*), dan Q. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh kombinasi parameter yang menghasilkan tingkat akurasi terbaik dalam menentukan jalur distribusi air. Setiap kombinasi parameter diuji menggunakan data kelembaban tanah yang sama, kemudian hasil prioritas yang dihasilkan dibandingkan dengan kondisi aktual untuk menghitung tingkat kesalahan (*error*).

Setelah diperoleh kombinasi parameter terbaik, tahap selanjutnya adalah pengujian jumlah iterasi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi jumlah iterasi untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa algoritma. Semakin banyak iterasi yang digunakan, maka peluang algoritma untuk menemukan solusi yang lebih optimal akan semakin besar. Namun demikian, peningkatan jumlah iterasi juga dapat menambah waktu komputasi, sehingga perlu dicari jumlah iterasi yang mampu memberikan hasil optimal dengan waktu proses yang efisien.

Tahap terakhir adalah evaluasi hasil algoritma ACO menggunakan sejumlah data pengujian yang merepresentasikan berbagai kondisi kelembaban tanah pada setiap sektor irigasi. Hasil prioritas distribusi air yang diperoleh dari algoritma kemudian dibandingkan dengan prioritas yang ditentukan berdasarkan kondisi aktual tanah.

Untuk mengetahui tingkat error dari hasil algoritma dibutuhkan perhitungan menggunakan rumus *MAPE* (*Mean Absolute Percentage Error*). Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih antara data aktual dari nilai sensor kelembaban tanah (X_i) dengan data peramalan hasil dari algoritma ACO (F_i) kemudian diubah menjadi nilai absolut (Haris et al., 2021), seperti pada rumus (3.13).

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \times \sum \left| \frac{X_t - F_t}{X_t} \right| \quad (3.13)$$

n : Jumlah data

X_i : Nilai data aktual

F_i : Nilai data peramalan

Nilai *error* diperoleh dari hasil analisis menggunakan *MAPE* pada tahap sebelumnya. Nilai tersebut kemudian digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi performa sistem dalam mengoptimalkan penyaluran air pada irigasi tetes berbasis algoritma *Ant Colony Optimization*. Dengan pengujian ini, efektivitas pengaturan sistem dapat diukur secara lebih akurat.

3.3.2.3 Rencana Pengujian PID

Pengujian metode *Proportional Integral Derivative* (PID) bertujuan untuk mengkonfigurasi parameter kontrol K_p , K_i , dan K_d agar sistem mampu menjaga

kestabilan debit air sesuai dengan nilai setpoint yang telah ditentukan. Nilai *setpoint* diperoleh berdasarkan kebutuhan debit air pada masing-masing emitter yang telah diukur sebelumnya.

Hasil dari pengujian ini diharapkan mampu menunjukkan konfigurasi parameter PID yang paling optimal untuk menyesuaikan kecepatan pompa dalam menjaga kestabilan aliran air, sehingga distribusi air dapat berlangsung secara konsisten sesuai kebutuhan tanpa fluktuasi yang signifikan.

3.3.2.4 Pengujian Integrasi Metode ACO dan PID

Tahap ini merupakan pengujian gabungan antara metode ACO dan PID untuk mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan. Jalur distribusi air yang telah dioptimasi menggunakan ACO akan dikombinasikan dengan pengaturan debit air yang dikontrol oleh PID. Pengujian dilakukan dalam kondisi nyata dengan mempertimbangkan variasi kebutuhan air berdasarkan kelembaban tanah di setiap sektor.

Evaluasi kinerja sistem dilakukan menggunakan parameter keseragaman dan efisiensi distribusi air, yaitu *Coefficient of Variation (CV)*, *Christiansen Uniformity (CU)*. Nilai CV digunakan untuk mengukur tingkat variasi distribusi debit air, sedangkan CU digunakan untuk menilai tingkat keseragaman distribusi air pada seluruh emitter. Semakin kecil nilai CV dan semakin besar nilai CU, maka sistem dinilai semakin baik dalam mendistribusikan air secara merata dan efisien.

3.3.2.5 Pengujian Kinerja Pompa

Pengujian kinerja pompa dilakukan untuk menganalisis efisiensi operasional pompa dalam mendukung sistem irigasi yang telah dirancang.

Parameter yang diuji meliputi *duty cycle* dan arus listrik yang digunakan oleh pompa selama proses distribusi air. *Duty cycle* merepresentasikan persentase waktu aktif pompa dalam satu siklus kerja berdasarkan nilai dari PWM atau kecepatan pompa, yang berkaitan langsung dengan kontrol yang diberikan oleh sistem (khususnya oleh PID).

Pengukuran arus dilakukan untuk mengetahui konsumsi energi pompa pada berbagai kondisi operasi, terutama saat terjadi perubahan debit akibat respon kontrol PID. Analisis dilakukan dengan melihat hubungan antara *duty cycle*, arus yang mengalir, dan debit air yang dihasilkan. Dengan pengujian ini, dapat diketahui apakah pompa bekerja secara efisien dan stabil dalam memenuhi kebutuhan sistem. Hasil yang diharapkan adalah kinerja pompa yang optimal, ditandai dengan konsumsi arus yang proporsional terhadap beban kerja serta kemampuan menjaga debit sesuai kebutuhan tanpa pemborosan energi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Hasil dari penelitian ini adalah implemementasi dan mengoptimalkan sistem distribusi air pada irigasi tetes yang lebih efisien dengan memanfaatkan metode *Ant Colony Optimization (ACO)* untuk menentukan jalur distribusi air yang optimal. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*) dalam mengatur aliran atau air agar tetap stabil dan sesuai dengan kebutuhan.

4.1.1 Kalibrasi Sensor Kelembaban Tanah

Kalibrasi sensor bertujuan untuk meningkatkan akurasi dari hasil pengukuran dengan cara menyesuaikan nilai keluaran sensor agar mendekati atau sama dengan nilai referensi yang dianggap benar.

4.1.1.1 Hasil Uji Sensor Sebelum Dikalibrasi

Tabel 4.1 Perbandingan Nilai Sensor Sebelum Dikalibrasi

Sensor	Nilai Sensor (%)	Nilai Referensi (%)	Error (%)
S1	65	60	8.33
S2	70	60	16.67
S3	55	60	8.33
S4	80	60	33.33
S5	60	60	0.00
S6	50	60	16.67
S7	75	60	25.00
S8	58	60	3.33
S9	68	60	13.33
Total Error (%)			125.00

$$MAPE = \frac{125}{9} \times 100\% = 13.89\%$$

Hasil perhitungan menggunakan metode *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) menunjukkan nilai rata-rata *error* sebesar 13.89%, yang mengindikasikan tingkat kesalahan yang cukup tinggi sehingga diperlukan proses kalibrasi.

4.1.1.2 Hasil Uji Sensor Setelah Dikalibrasi

Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Sensor Setelah Kalibrasi

Sensor	Nilai Sensor (%)	Nilai Referensi (%)	Error (%)
S1	61	60	1.67
S2	62	60	3.33
S3	59	60	1.67
S4	63	60	5.00
S5	60	60	0.00
S6	58	60	3.33
S7	61	60	1.67
S8	59	60	1.67
S9	62	60	3.33
Total Error (%)			21.67

$$MAPE = \frac{21.67}{9} \times 100\% = 2.41\%$$

Berdasarkan perhitungan MAPE, rata-rata *error* turun menjadi 2.41%, yang menunjukkan bahwa proses kalibrasi berhasil memperbaiki kinerja sensor secara signifikan. Dengan demikian, sensor dapat dikatakan lebih andal dalam merepresentasikan kondisi kelembaban tanah yang sebenarnya.

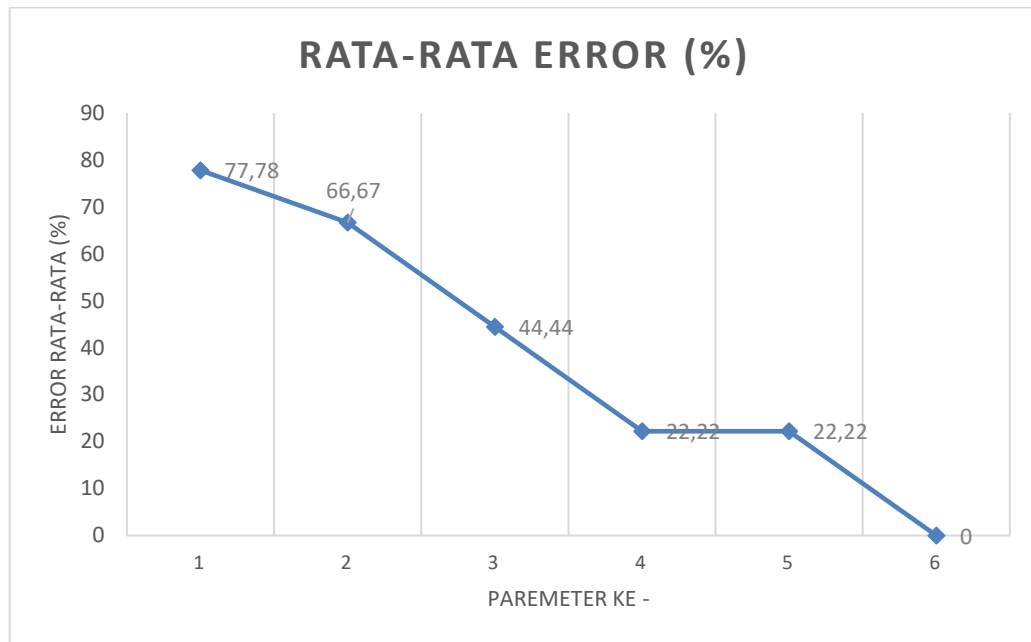
4.1.2 Pengujian ACO (*Ant Colony Optimization*)

Pengujian metode *Ant Colony Optimization* (ACO) pada penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan algoritma dalam mengoptimalkan distribusi air pada sistem irigasi tetes. Pengujian dilakukan berdasarkan beberapa parameter yang digunakan sebagai dasar dalam proses pencarian jalur distribusi air yang paling efisien oleh algoritma ACO.

4.1.2.1 Pengujian Parameter ACO (*Ant Colony Optimization*)

Tabel 4.3 Pengujian Parameter ACO

NO	Parameter				Nilai Sensor (%)			Probabilitas ACO			Best Path ACO	Error (%)
	α	β	ρ	Q	A	B	C	P (A)	P (B)	P (C)		
1	0.1	0.1	0.1	0.1	70	30	85	0.354	0.312	0.333	A-C-B	66.67
					90	56	19	0.224	0.207	0.550	C-A-B	100.0
					31	80	63	0.327	0.359	0.315	B-A-C	66.67
2	0.5	0.2	0.5	0.5	70	30	85	0.024	0.048	0.927	C-B-A	66.67
					90	56	19	0.145	0.844	0.012	B-A-C	66.67
					31	80	63	0.985	0.002	0.013	A-C-B	66.67
3	1.0	0.5	0.6	1.0	70	30	85	0.001	0.032	0.965	C-B-A	66.67
					90	56	19	0.942	0.001	0.056	A-C-B	66.67
					31	80	63	0.019	0.956	0.024	B-C-A	0.00
4	1.5	1.0	0.7	1.5	70	30	85	0.002	0.001	0.996	C-A-B	0.00
					90	56	19	0.996	0.002	0.000	A-B-C	0.00
					31	80	63	0.012	0.987	0.000	B-A-C	66.67
5	1.0	0.5	0.1	1.0	70	30	85	0.027	0.007	0.967	C-A-B	0.00
					90	56	19	0.989	0.008	0.003	A-B-C	0.00
					31	80	63	0.075	0.917	0.008	B-A-C	66.67
6	0.5	0.1	0.1	0.5	70	30	85	0.226	0.069	0.703	C-A-B	0.00
					90	56	19	0.703	0.249	0.047	A-B-C	0.00
					31	80	63	0.126	0.609	0.263	B-C-A	0.00



Gambar 4.1 Grafik Hasil Uji Parameter ACO

Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa perubahan kombinasi parameter ACO memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan algoritma dalam menentukan prioritas distribusi air. Pada parameter ke-1 hingga ke-3, nilai error masih relatif tinggi, yaitu berkisar antara 66,67% hingga 100%. Kondisi ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara pengaruh *pheromone* (α), informasi heuristik (β), laju evaporasi *pheromone* (ρ), dan intensitas pembaruan *pheromone* (Q) belum terbentuk secara optimal. Akibatnya, probabilitas yang dihasilkan belum mampu merepresentasikan kondisi kelembaban tanah secara tepat sehingga jalur distribusi yang dipilih masih berbeda dengan kondisi aktual.

Pada kombinasi parameter pertama $\alpha=0,1$; $\beta=0,1$; $\rho=0,1$; $Q=0,1$. nilai α dan β yang sangat kecil menyebabkan pengaruh *pheromone* dan informasi heuristik terhadap proses pengambilan keputusan menjadi lemah. Hal ini mengakibatkan perbedaan probabilitas antar sektor tidak terlalu signifikan sehingga algoritma

kesulitan menentukan sektor yang benar-benar menjadi prioritas penyiraman. Kondisi tersebut menyebabkan rata-rata error masih tinggi.

Pada kombinasi parameter kedua dan ketiga, peningkatan nilai α , β , ρ , dan Q mulai memperbaiki proses pencarian solusi, namun error masih cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun informasi heuristik sudah mulai berpengaruh, distribusi *pheromone* yang terbentuk belum cukup stabil untuk mengarahkan semut menuju jalur optimal secara konsisten. Selain itu, nilai evaporasi yang relatif tinggi menyebabkan jejak *pheromone* cepat berkurang sehingga proses pembelajaran algoritma belum maksimal.

Penurunan *error* mulai terlihat pada kombinasi parameter keempat dan kelima. Pada kondisi ini, nilai α dan β sudah mampu memberikan keseimbangan antara pengalaman pencarian sebelumnya (*pheromone*) dan informasi kondisi aktual tanah (*visibility*). Akibatnya, probabilitas yang dihasilkan mulai mengarah pada sektor dengan tingkat kekeringan yang lebih tinggi sehingga jalur distribusi yang dipilih semakin mendekati kondisi sebenarnya. Namun demikian, masih terdapat beberapa data yang menghasilkan kesalahan akibat distribusi probabilitas yang belum sepenuhnya konvergen.

Hasil terbaik diperoleh pada kombinasi parameter keenam dengan nilai $\alpha=0,5$, $\beta=0,1$, $\rho=0,1$, dan $Q=0,5$ yang menghasilkan error 0% pada seluruh data pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa parameter tersebut mampu menghasilkan keseimbangan yang baik antara eksplorasi dan eksploitasi. Nilai α yang lebih besar dibanding β membuat algoritma lebih memanfaatkan pengalaman yang tersimpan pada *pheromone*, sementara nilai β yang kecil tetap memberikan

pengaruh terhadap kondisi kelembaban tanah tanpa mendominasi proses pencarian. Di sisi lain, nilai p yang rendah menjaga jejak *pheromone* tidak cepat menguap sehingga informasi jalur terbaik dapat dipertahankan selama proses iterasi. Nilai Q sebesar 0,5 juga menghasilkan penguatan *pheromone* yang cukup untuk mempercepat konvergensi tanpa menyebabkan dominasi berlebihan pada jalur tertentu.

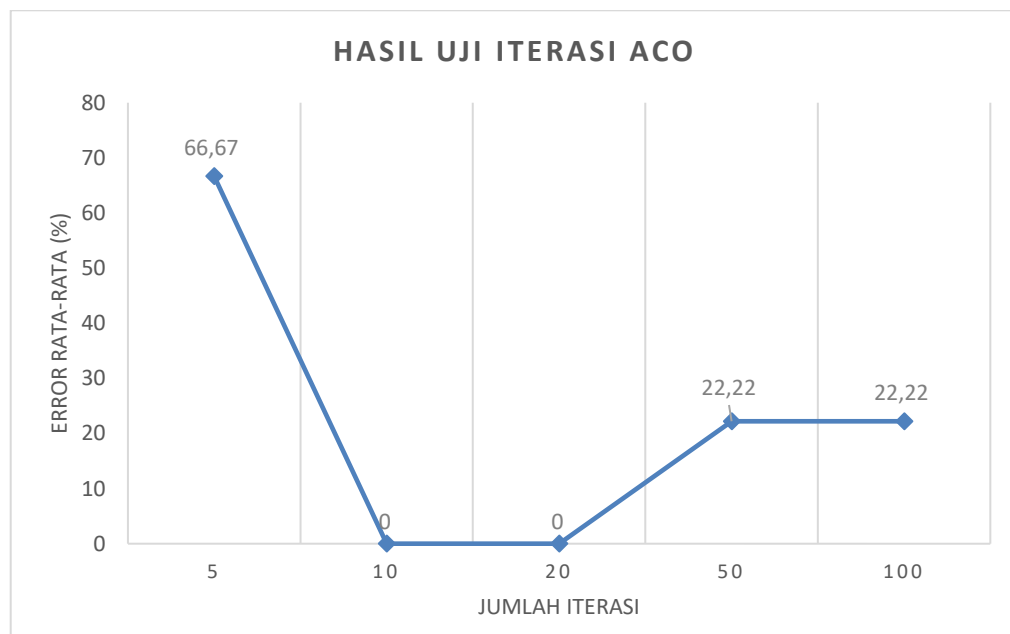
Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa keberhasilan algoritma ACO sangat dipengaruhi oleh konfigurasi parameter yang digunakan. Parameter yang terlalu kecil menyebabkan proses pencarian menjadi kurang terarah, sedangkan parameter yang terlalu besar dapat mengurangi kemampuan eksplorasi algoritma. Kombinasi parameter terbaik yang diperoleh mampu menghasilkan distribusi probabilitas yang sesuai dengan tingkat kelembaban tanah sehingga algoritma dapat menentukan prioritas distribusi air secara akurat dengan tingkat error 0%. Hasil ini menunjukkan bahwa proses optimasi parameter merupakan tahapan penting dalam meningkatkan performa ACO pada sistem irigasi tetes yang dikembangkan.

4.1.2.2 Pengujian ACO Berdasarkan Jumlah Iterasi

Tabel 4.4 Hasil Pengujian ACO Berdasarkan Jumlah Iterasi

No	Jumlah Iterasi	Nilai Sensor (%)			Probabilitas (P)			Best Path	Error (%)
		A	B	C	P (A)	P (B)	P (C)		
1	5	70	30	85	0.184	0.234	0.581	C-B-A	66.67
		90	56	19	0.474	0.167	0.358	A-C-B	66.67
		31	80	63	0.374	0.460	0.165	B-A-C	66.67
2	10	70	30	85	0.316	0.107	0.575	C-A-B	0.00
		90	56	19	0.613	0.305	0.080	A-B-C	0.00
		31	80	63	0.168	0.543	0.287	B-C-A	0.00

No	Jumlah Iterasi	Nilai Sensor (%)			Probabilitas (P)			Best Path	Error (%)
		A	B	C	P (A)	P (B)	P (C)		
3	20	70	30	85	0.146	0.074	0.778	C-A-B	0.00
		90	56	19	0.687	0.182	0.129	A-B-C	0.00
		31	80	63	0.160	0.660	0.179	B-C-A	0.00
4	50	70	30	85	0.103	0.027	0.869	C-A-B	0.00
		90	56	19	0.799	0.018	0.181	A-C-B	66.67
		31	80	63	0.068	0.850	0.081	B-C-A	0.00
5	100	70	30	85	0.001	0.010	0.987	C-B-A	66.67
		90	56	19	0.973	0.018	0.007	A-B-C	0.00
		31	80	63	0.001	0.938	0.060	B-C-A	0.00



Gambar 4.2 Grafik Hasil Uji Iterasi ACO

Berdasarkan Tabel 4.4, terlihat bahwa penambahan jumlah iterasi tidak selalu menghasilkan error yang lebih kecil. Misalnya pada data kelembaban 70-30-85, iterasi 10, 20, dan 50 menghasilkan *best path* yang sesuai dengan kondisi aktual sehingga error bernilai 0%. Namun pada iterasi 5 dan 100, jalur yang dihasilkan tidak sesuai sehingga error meningkat menjadi 66,67%. Kondisi ini menunjukkan

bahwa performa algoritma ACO tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah iterasi, tetapi juga oleh distribusi nilai *pheromone* yang terbentuk selama proses pencarian solusi.

Pada iterasi yang terlalu sedikit, seperti 5 iterasi, proses pencarian solusi belum berlangsung secara optimal karena jumlah pembaruan *pheromone* masih terbatas. Akibatnya, algoritma belum memiliki informasi yang cukup untuk membedakan jalur yang benar-benar optimal sehingga masih memungkinkan terpilihnya jalur yang kurang sesuai dengan kondisi aktual. Hal ini menyebabkan tingkat kesalahan yang relatif tinggi pada beberapa data pengujian.

Sebaliknya, ketika jumlah iterasi ditingkatkan hingga 100 iterasi, algoritma justru menunjukkan peningkatan error pada beberapa kondisi. Fenomena ini dapat terjadi karena stagnasi *pheromone*, yaitu kondisi ketika akumulasi *pheromone* pada suatu jalur menjadi terlalu dominan sehingga semut cenderung terus memilih jalur yang sama. Akibatnya kemampuan eksplorasi terhadap jalur alternatif berkurang dan algoritma terjebak pada solusi lokal (*local optimum*). Kondisi tersebut menyebabkan hasil optimasi tidak selalu sesuai dengan kondisi aktual meskipun jumlah iterasi yang digunakan lebih besar.

Berdasarkan hasil pengujian, jumlah iterasi 10 hingga 20 memberikan performa yang paling stabil dengan nilai error 0% pada seluruh data uji. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang iterasi tersebut telah terjadi keseimbangan antara proses eksplorasi dan eksploitasi sehingga algoritma mampu menentukan prioritas distribusi air secara lebih akurat tanpa mengalami stagnasi *pheromone*. Oleh karena itu, jumlah iterasi tersebut dipilih sebagai konfigurasi yang paling optimal untuk diterapkan pada sistem irigasi tetes yang dikembangkan.

Pada tabel 4.5 terdapat Nilai X_t yang dibuat tetap 1 sebagai acuan bahwa setiap data memiliki satu keputusan aktual yang harus dicapai. Sedangkan nilai F_t merupakan hasil prediksi dari algoritma ACO, dimana nilai 1 diberikan apabila jalur hasil ACO sesuai dengan jalur aktual, dan nilai 0 diberikan apabila keputusan jalur tidak sesuai. Dengan demikian, sistem evaluasi menjadi lebih sederhana untuk mengukur benar atau salahnya keputusan algoritma pada setiap data uji. Berdasarkan tabel pengujian sebanyak 30 data, terdapat 5 data salah ($F_t = 0$) dan 25 data benar ($F_t = 1$). Sehingga total error:

$$MAPE = \frac{5}{30} \times 100\% = 16,67\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai kesalahan rata-rata algoritma ACO dalam menentukan jalur irigasi sebesar 16,67%, Dengan demikian, algoritma ACO dapat dikatakan mampu menentukan jalur irigasi dengan tingkat *error* yang cukup baik berdasarkan kondisi sensor yang digunakan.

4.1.3 Pengujian PID (*Proportional Integral Derivative*)

Pengujian PID (*Proportional Integral Derivative*) dilakukan untuk menjaga kestabilan RPM atau putaran pada pompa dan mengetahui seberapa cepat sistem dalam merespon fluktuasi atau ketidakstabilan dalam mendistribusikan air berdasarkan aliran debit air yang di tentukan (*setpoint*). Pengujian dilakukan dengan tiga tahapan yaitu mengatur parameter P (*Proportional*), PI (*Proportional-Integral*), PD (*Proportional-Derivative*), dan PID (*Proportional Integral Derivative*)

4.1.3.1 Hasil Penentuan *Setpoint*

Pengukuran dilakukan menggunakan gelas ukur selama 60 detik untuk mengetahui *volume* air yang keluar dari masing-masing *emitter*. Nilai debit dihitung dengan membagi *volume* terhadap waktu. *Setpoint* sistem kemudian ditentukan berdasarkan hasil rata-rata debit seluruh *emitter* pada setiap sektor seperti yang sudah tertera pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Penentuan Nilai *Setpoint* PID

Sektor	Emitter	Waktu Pengukuran (menit)	Debit Air (L/m)	Total Debit (L/m)
1	E1	1	0.13	0.40
	E2		0.14	
	E3		0.13	
2	E1	1	0.12	0.38
	E2		0.13	
	E3		0.13	
3	E1	1	0.13	0.38
	E2		0.12	
	E3		0.13	
Rata-Rata Debit Air (L/m)				0.38

4.1.3.2 Hasil Tuning kontroler P (*Proportional*)

Tabel 4.7 Hasil *Tuning* Kontroller P (*Proportional*)

No	Setpoint (L/m)	Kp	Hasil Uji (L/m)	Error (%)
1	0.38	10	0.10	0.28
2	0.38	20	0.13	0.25
3	0.38	50	0.17	0.21
4	0.38	80	0.20	0.18
5	0.38	100	0.23	0.15
6	0.38	120	0.29	0.09
7	0.38	140	0.34	0.04
8	0.38	150	0.36	0.02

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.7, peningkatan nilai konstanta proporsional (K_p) berpengaruh signifikan terhadap kemampuan sistem mencapai setpoint 0,38 L/menit. Pada nilai K_p rendah (10-50), debit yang dihasilkan masih rendah yaitu 0,10–0,17 L/menit dengan *error* besar 0,28-0,21, sehingga respon sistem masih lemah. Ketika K_p dinaikkan menjadi 80-120, debit meningkat hingga 0,29 L/menit dan *error* menurun menjadi 0,18-0,09, menandakan sistem mulai merespon lebih baik. Hasil terbaik terlihat pada K_p tinggi (140-150), dimana debit mencapai 0,34-0,36 L/menit dengan *error* sangat kecil 0,04-0,02, sehingga sistem mampu bekerja lebih akurat dan mendekati *setpoint*.

4.1.3.3 Hasil Tuning kontroler PI (*Proportional-Integral*)

Tabel 4.8 Hasil *Tuning* Menggunakan Kontroler PI (*ProportionL-Integral*)

No	Setpoint (L/m)	K_p	K_i	Hasil Uji (L/m)	Error (%)
1	0.38	150	1	0.36	0.02
2	0.38		2	0.35	0.03
3	0.38		4	0.36	0.02
4	0.38		6	0.36	0.01
5	0.38		7	0.37	0.01
6	0.38		8	0.37	0.01
7	0.38		10	0.41	-0.03

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.8, nilai konstanta integral (K_i) berpengaruh terhadap kemampuan sistem mencapai setpoint 0,38 L/menit. Pada K_i rendah (1–4), debit masih berada di sekitar 0,36 L/menit dengan *error* 0,02, sehingga koreksi *error* belum maksimal. Saat K_i ditingkatkan menjadi 6–8, debit mendekati setpoint yaitu 0,36–0,37 L/menit dengan *error* menurun hingga 0,01, yang menunjukkan komponen integral bekerja efektif menghilangkan steady-state *error*. Namun pada K_i terlalu tinggi (10), sistem mengalami *overshoot* dengan debit

0,41 L/menit dan error -0,03. Oleh karena itu, nilai K_i yang paling optimal berada pada kisaran 6–8 karena mampu mencapai setpoint dengan error sangat kecil dan respon tetap stabil.

4.1.3.4 Hasil Tuning Kontroler PD (*Proportional-Derivative*)

Tabel 4.9 Hasil *Tuning* Menggunakan Kontroler PD (*Proportional-Derivative*)

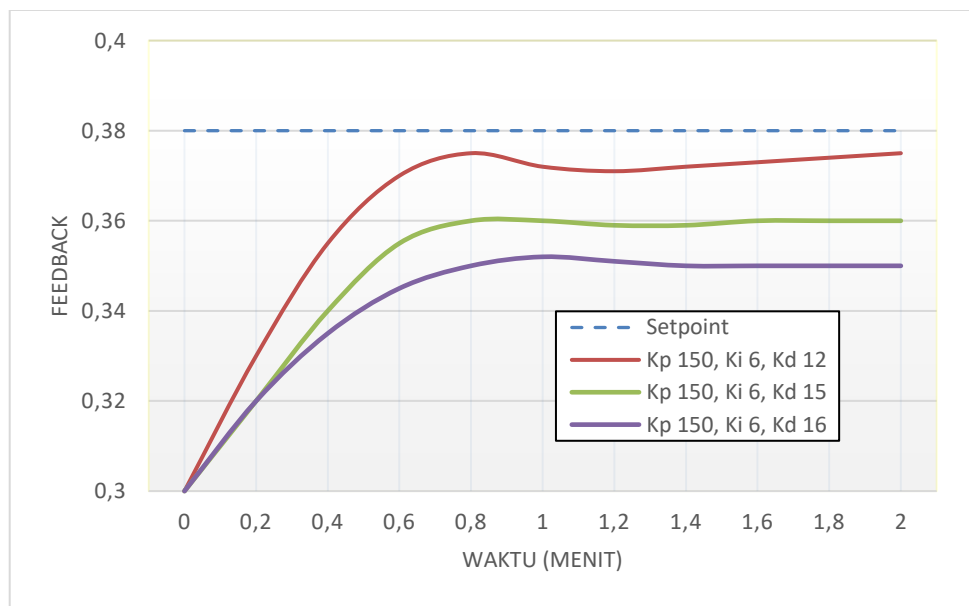
No	Setpoint	Kp	Kd	Hasil Uji	Error
1	0.38	150	2	0.36	0.02
2	0.38		7	0.36	0.02
3	0.38		8	0.37	0.01
4	0.38		10	0.37	0.01
5	0.38		12	0.37	0.01
6	0.38		15	0.38	0.00
7	0.38		16	0.38	0.00

Pada tabel 4.9 hasil *Tuning* menunjukkan bahwa pada K_d rendah (2–7), sistem belum mampu mencapai *setpoint* secara optimal, ditunjukkan oleh hasil uji sebesar 0,36 dengan error 0,02. Ketika K_d dinaikkan ke 8–12, terjadi peningkatan performa dengan hasil uji mendekati setpoint (0,37) dan *error* menurun menjadi 0,01. Kondisi terbaik dicapai pada K_d 15 dan 16, di mana hasil uji sudah sama dengan *setpoint* (0,38) sehingga *error* menjadi 0,00. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai K_d berpengaruh dalam meredam kesalahan dan mempercepat sistem mencapai kondisi stabil, sehingga kombinasi $K_p = 150$ dan $K_d \geq 15$ dapat dianggap sebagai parameter yang paling optimal dalam pengujian ini.

4.1.3.5 Hasil Tuning Kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

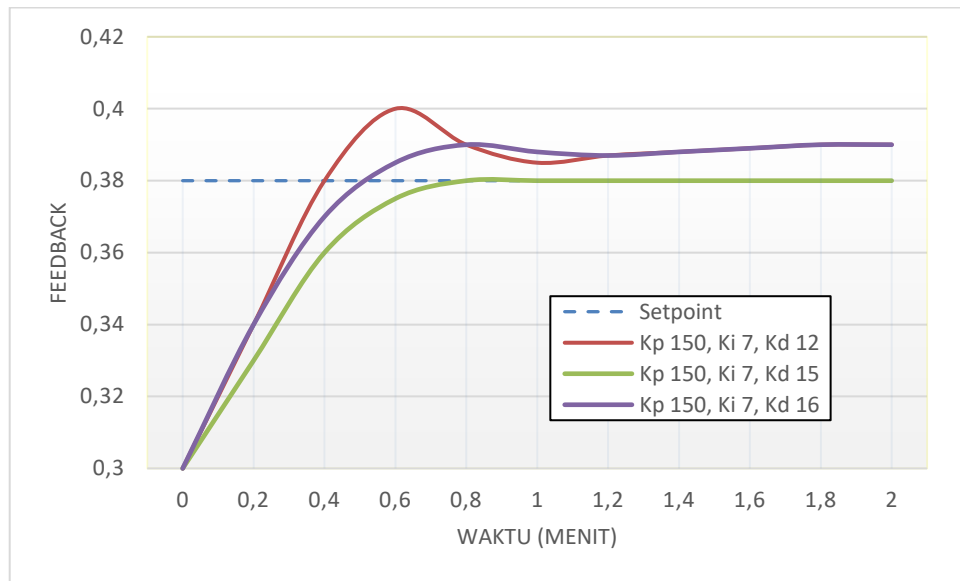
Tabel 4.10 Hasil *Tuning* Menggunakan Kontroller PID

No	Setpoint	Kp	Ki	Kd	Hasil Uji	Error
1	0.38	150	6	12	0.37	0.01
2	0.38			15	0.36	0.02
3	0.38			16	0.35	0.03
4	0.38		7	12	0.40	-0.02
5	0.38			15	0.38	0.00
6	0.38			16	0.39	-0.01
7	0.38		8	12	0.41	-0.03
8	0.38			15	0.38	0.00
9	0.38			16	0.37	0.01



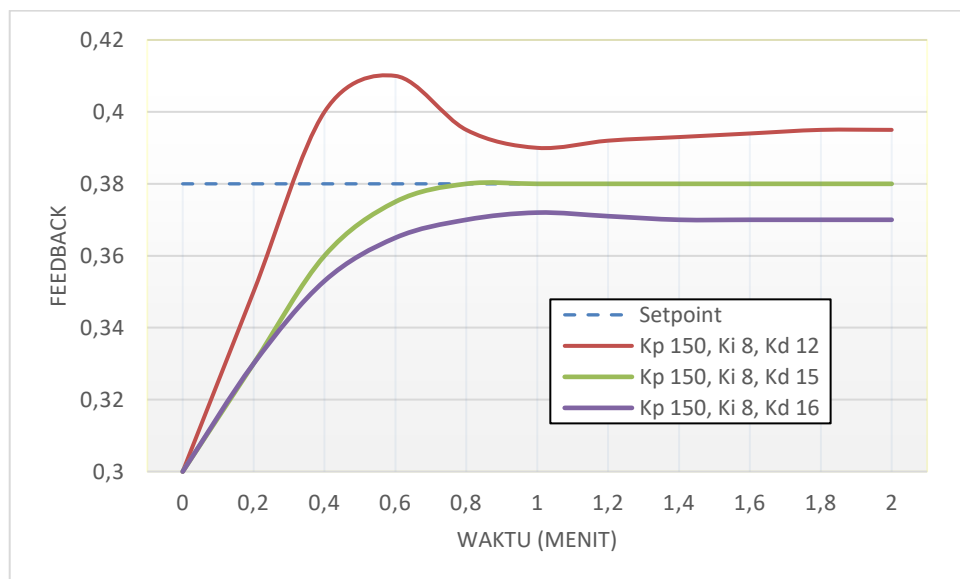
Gambar 4.3 Grafik Hasil Tuning PID Kp-150, Ki-6, Kd 12-15-16

Berdasarkan Gambar 4.3, parameter $K_p = 150$, $K_i = 6$, dan $K_d = 12$ menghasilkan respons terbaik karena mampu mencapai nilai *setpoint* lebih cepat dibandingkan variasi lainnya. Sedangkan $K_d = 15$ dan $K_d = 16$ memberikan respons yang lebih lambat dan belum mencapai *setpoint* secara optimal.



Gambar 4.4 Grafik Hasil Tuning PID Kp-150, Ki-7, Kd 12-15-16

Berdasarkan Gambar 4.4, Parameter $K_p = 150$, $K_i = 7$, dan $K_d = 15$ menghasilkan respons paling cepat mencapai *setpoint*, namun mengalami sedikit *overshoot* sebelum stabil. Sementara itu, $K_d = 12$ dan $K_d = 16$ memberikan respons lebih lambat dengan *overshoot* yang lebih kecil. kombinasi $K_p = 150$, $K_i = 7$, dan $K_d = 15$ mampu mencapai *setpoint* lebih cepat dengan kestabilan yang tetap terjaga.



Gambar 4.5 Grafik Hasil Tuning PID Kp-150, Ki-8, Kd 12-15-16

Berdasarkan Gambar 4.5, parameter $K_p = 150$, $K_i = 8$, dan $K_d = 12$ menghasilkan respons terbaik karena mampu mencapai *setpoint* lebih cepat dan tetap stabil setelah terjadi sedikit *overshoot*. Sementara itu, nilai $K_d = 15$ dan $K_d = 16$ menghasilkan respons yang lebih lambat dan belum mencapai *setpoint* secara optimal. Oleh karena itu, kombinasi $K_p = 150$, $K_i = 8$, dan $K_d = 12$ dipilih sebagai parameter PID yang paling sesuai.

4.1.4 Pengujian Kinerja Sistem Irigasi Tetes

Pada tahap pengujian kinerja sistem irigasi tetes, pengujian dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu kestabilan distribusi air, efisiensi penggunaan air, dan efisiensi kinerja pompa. Pengujian kestabilan distribusi air dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menyalurkan air secara merata ke setiap sektor irigasi sesuai jalur yang dipilih. Pengujian efisiensi penggunaan air bertujuan mengukur seberapa optimal air digunakan selama proses penyiraman sehingga tidak terjadi pemborosan. Sementara itu, pengujian efisiensi kinerja pompa dilakukan untuk menganalisis penggunaan PWM, dan arus kerja pompa saat sistem beroperasi. pengujian tersebut dilakukan untuk memastikan sistem irigasi tetes dapat bekerja secara efektif, hemat energi, dan sesuai kebutuhan tanaman.

4.1.4.1 Pengujian Stabilitas Distribusi Air

Pengujian stabilitas distribusi air menggunakan parameter *Coefficient of Variation* (CV) dan *Christiansen Uniformity* (CU). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mendistribusikan air secara stabil, merata, dan sesuai dengan kebutuhan tanaman pada setiap sektor. Nilai CV digunakan untuk mengukur tingkat variasi debit yang diterima oleh masing-masing sektor,

dimana semakin kecil nilai CV menunjukkan distribusi air yang semakin seragam. Sementara itu, nilai CU digunakan untuk mengukur tingkat keseragaman penyebaran air pada seluruh sektor irigasi, dimana semakin tinggi nilai CU menunjukkan kualitas distribusi air yang semakin baik. Melalui pengujian ini dapat diketahui efektivitas integrasi algoritma ACO dan kontrol PID dalam meningkatkan kestabilan aliran air, mengurangi perbedaan distribusi antar sektor, serta memastikan bahwa air yang diberikan dapat tersebar secara lebih merata.

4.1.4.1.1 Uji Stabilitas dengan ACO dan PID

Tabel 4.11 Hasil Uji Stabilitas Menggunakan Algoritma ACO dan PID

No	S (A)	S (B)	S (C)	CV (%)	CU (%)	Keterangan
1	0.38	0.38	0.37	1.50	95.2	Sangat Baik
2	0.39	0.38	0.38	1.30	96.0	Sangat Baik
3	0.37	0.38	0.38	1.40	95.5	Sangat Baik
4	0.38	0.39	0.37	1.80	94.8	Baik
5	0.38	0.38	0.38	0.00	100.0	Sangat Baik
6	0.37	0.38	0.39	2.00	94.0	Baik
7	0.38	0.37	0.38	1.60	95.0	Sangat Baik
8	0.39	0.38	0.37	2.10	93.7	Baik
9	0.38	0.38	0.39	1.70	94.9	Sangat Baik
10	0.37	0.38	0.38	1.40	95.6	Sangat Baik

Tabel 4.11 menunjukkan bahwa sistem dengan penerapan ACO dan PID mampu menjaga kestabilan distribusi debit dengan baik, yang ditunjukkan oleh nilai CV yang rendah (0.00-2.10%) dan CU yang tinggi (94.0-100%). Nilai CV yang kecil mengindikasikan variasi debit antar sektor sangat rendah, sedangkan nilai CU yang tinggi menunjukkan tingkat keseragaman distribusi yang baik.

4.1.4.1.2 Uji Stabilitas Tanpa Algoritma ACO dan PID

Tabel 4.12 Hasil Uji Stabilitas Tanpa Algoritma ACO dan PID

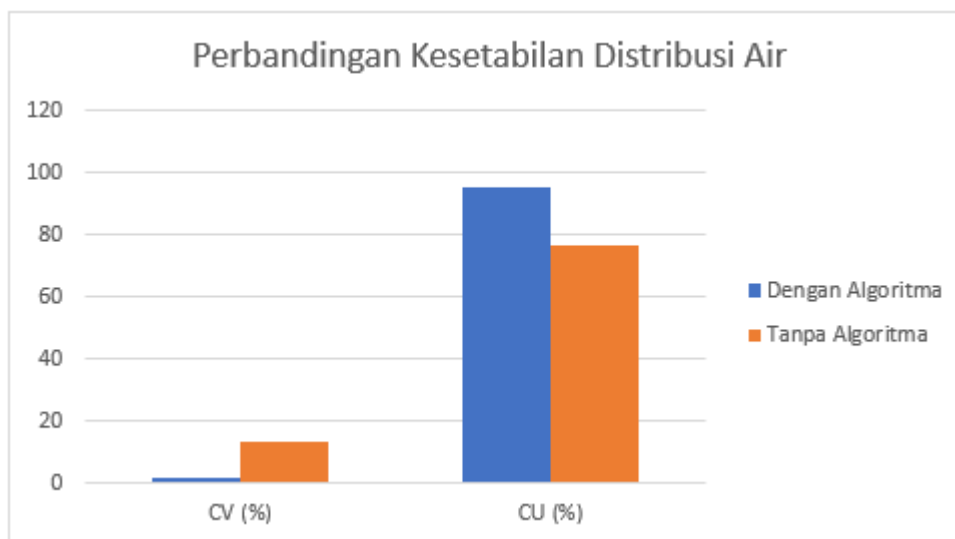
No	S (A)	S (B)	S (C)	CV (%)	CU (%)	Keterangan
1	0.42	0.35	0.30	14.20	75.3	Buruk
2	0.40	0.33	0.36	10.80	79.4	Kurang
3	0.45	0.32	0.34	16.50	72.8	Buruk
4	0.38	0.30	0.41	13.70	76.5	Kurang
5	0.36	0.42	0.33	12.90	77.6	Kurang
6	0.44	0.31	0.35	15.80	74.2	Buruk
7	0.39	0.34	0.37	8.90	82.0	Cukup
8	0.41	0.29	0.36	17.20	70.9	Buruk
9	0.37	0.35	0.32	7.80	83.1	Cukup
10	0.43	0.30	0.38	14.50	75.0	Buruk

Berdasarkan tabel 4.12 tanpa optimasi dari algoritma ACO dan PID, nilai CV terlihat cukup besar sekitar 7.8-17.2 yang menandakan fluktuasi aliran pada sistem irigasi tetes masih tinggi dan kurang stabil. Sementara itu, nilai CU berada pada kisaran 70.9-83.1, yang menunjukkan tingkat keseragaman distribusi air masih tergolong rendah hingga sedang.

4.1.4.1.3 Perbandingan Uji Stabilitas Distribusi Air

Tabel 4.13 Hasil Perbandingan Uji Stabilitas Distribusi Air

Parameter	Dengan Algoritma	Tanpa Algoritma
CV (%)	1.48	13.43
CU (%)	95.47	76.68



Gambar 4.6 Diagram Perbandingan Uji Kestabilan Distribusi Air

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa penggunaan algoritma ACO dan PID meningkatkan kestabilan sistem irigasi tetes, ditandai dengan nilai CV yang jauh lebih kecil dengan rata-rata 1.48% dibanding 13.43% sehingga fluktuasi menurun, serta nilai CU yang lebih tinggi 95.47% dibanding 76.68% yang berarti distribusi air menjadi lebih merata. Dengan demikian, sistem dengan algoritma lebih stabil dan efisien dibandingkan tanpa algoritma.

4.1.4.2 Pengujian Efisiensi Penggunaan Air

Tujuan pengujian efisiensi penggunaan air tanpa ACO dan PID serta menggunakan ACO dan PID adalah untuk membandingkan kemampuan sistem dalam mengatur pemakaian air pada proses irigasi. Pengujian tanpa metode dilakukan untuk melihat penggunaan air pada sistem konvensional tanpa optimasi kontrol, sedangkan pengujian menggunakan ACO dan PID bertujuan mengetahui seberapa efektif metode tersebut dalam menyalurkan air sesuai kebutuhan. Dari hasil perbandingan ini dapat diketahui apakah penerapan ACO dan PID mampu

mengurangi pemborosan air, meningkatkan ketepatan distribusi, dan menjadikan sistem irigasi lebih efisien.

4.1.4.2.1 Uji Efisiensi Penggunaan Air dengan ACO dan PID

Tabel 4.14 Hasil Uji Efisiensi Penggunaan Air Dengan ACO dan PID

No	Kategori Tanah			Waktu Penyiraman (m)			Debit (L/m)			Total (L)
	S (A)	S (B)	S (C)	S (A)	S (B)	S (C)	S (A)	S (B)	S (C)	
1	Ekstrim	Basah	Sedang	5	0	3	1.95	0	1.17	3.12
2	Ekstrim	Basah	Sedang	5	0	3	1.95	0	1.17	3.12
3	Kering	Sedang	Sedang	4	3	3	1.56	1.17	1.17	3.90
4	Sedang	Sedang	Kering	3	3	4	1.17	1.17	1.56	3.90
5	Sedang	Sedang	Kering	3	3	4	1.17	1.17	1.56	3.90
6	Basah	Kering	Ekstrim	0	4	5	0	1.56	1.95	3.51
7	Basah	Kering	Ekstrim	0	4	5	0	1.56	1.95	3.51
8	Sedang	Sedang	Sedang	3	3	3	1.17	1.17	1.17	3.51

Tabel 4.14 menunjukkan hasil pengujian sistem irigasi yang bekerja berdasarkan kondisi kelembaban tanah pada masing-masing sektor. Setiap sektor (A, B, dan C) memiliki nilai sensor yang berbeda, sehingga dikategorikan menjadi kondisi basah, sedang, kering, dan ekstrim. Berdasarkan kategori tersebut, sistem menentukan waktu penyiraman yang berbeda untuk setiap sektor, dengan waktu maksimum 5 menit pada kondisi ekstrim. Sektor dengan kondisi basah tidak membutuhkan penyiraman (0 menit), sedangkan sektor dengan kondisi sedang membutuhkan waktu penyiraman sekitar 3 menit, dan sektor dengan kondisi kering hingga ekstrim membutuhkan waktu penyiraman lebih lama, yaitu 4 hingga 5 menit. Hal ini menyebabkan debit air yang diberikan pada setiap sektor menjadi bervariasi, menyesuaikan kebutuhan aktual tanah.

Dengan pendekatan ini, total penggunaan air pada setiap pengujian tidak selalu sama, melainkan berkisar antara 3,12 hingga 3,90 liter tergantung kategori kondisi tanah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mengoptimalkan penggunaan air dengan menghindari penyiraman yang tidak diperlukan, sehingga lebih efisien terhadap penghematan penggunaan air.

4.1.4.2.2 Uji Efisiensi Penggunaan Air Tanpa ACO dan PID

Tabel 4.15 Hasil Uji Efisiensi Penggunaan Air Tanpa ACO dan PID

No	Waktu (m)	Debit (L)			Total (L)
		Sektor A	Sektor B	Sektor C	
1	5	1.95	1.90	2.00	5.85
2	5	1.88	1.96	1.94	5.78
3	5	2.00	1.92	1.97	5.89
4	5	1.91	1.89	1.95	5.75
5	5	1.97	1.98	1.93	5.88
6	5	1.90	1.93	1.89	5.72
7	5	1.96	1.94	2.01	5.91
8	5	1.89	1.91	1.92	5.72

Tabel 4.15 merupakan hasil uji yang diambil tanpa algoritma ACO dan PID sehingga setiap sektor selalu disiram selama 5 menit tanpa mempertimbangkan kondisi tanah dan kestabilan proses distribusi air, sehingga debit air yang digunakan relatif besar, yaitu berkisar antara 5,72 hingga 5,91 liter per pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya kontrol berbasis kondisi tanah, sistem akan terus memberikan air dalam jumlah maksimum meskipun tidak semua sektor membutuhkannya. Akibatnya, penggunaan air menjadi cenderung boros dan tidak efisien, karena tidak ada mekanisme yang membatasi penyiraman sesuai kebutuhan aktual tanaman.

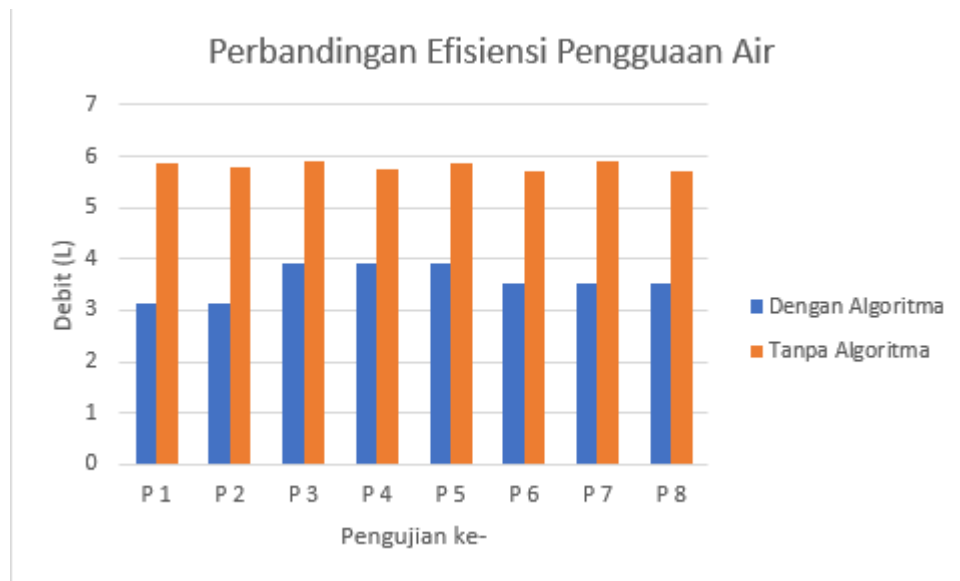
4.1.4.2.3 Perbandingan Uji Efisiensi Penggunaan Air

Tabel 4.16 Hasil Uji Perbandingan Efisiensi Penggunaan Air

No	Dengan Algoritma (L)	Tanpa Algoritma (L)	Selisih (L)	Efisiensi (%)
1	3.12	5.85	2.73	47%
2	3.12	5.78	2.66	46%
3	3.90	5.89	1.99	34%
4	3.90	5.75	1.85	32%
5	3.90	5.88	1.98	34%
6	3.51	5.72	2.21	39%
7	3.51	5.91	2.40	41%
8	3.51	5.72	2.21	39%

Tabel 4.16 menyajikan perbandingan antara sistem irigasi dengan algoritma berbasis kondisi tanah dan sistem tanpa algoritma. Dari hasil perbandingan, dapat dilihat bahwa penggunaan air pada sistem dengan algoritma selalu lebih rendah dibandingkan sistem konvensional. Penghematan air yang diperoleh berkisar antara 33% hingga 47% pada setiap pengujian. Perbedaan ini terjadi karena sistem dengan algoritma yang diterapkan sistem mampu mengatur waktu penyiraman sesuai kebutuhan masing-masing sektor, sehingga air hanya diberikan pada kondisi yang membutuhkan. Sebaliknya, irigasi tetes konvensional selalu menggunakan debit maksimum tanpa mempertimbangkan kondisi tanah, sehingga tidak efisien.

Secara keseluruhan, rata-rata penggunaan air pada sistem dengan metode adalah sekitar 3,56 liter, sedangkan sistem tanpa metode (konvensional) mencapai 5,85 liter. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air secara signifikan, yaitu sekitar 39%. Dengan demikian, penerapan metode ini terbukti efektif dalam mengoptimalkan penggunaan air pada sistem irigasi tetes.



Gambar 4.7 Diagram Perbandingan Uji Penggunaan Air

Gambar 4.7 diagram menunjukkan bahwa penggunaan air pada sistem tanpa metode cenderung konstan dan lebih tinggi pada setiap pengujian. Sebaliknya, sistem dengan metode menghasilkan penggunaan air yang lebih rendah dan bervariasi sesuai kondisi tanah, sehingga menunjukkan efisiensi yang lebih baik

4.1.4.3 Pengujian Efisiensi Kinerja Pompa

Uji kinerja pompa menggunakan parameter PWM, *Duty Cycle*, dan Arus adalah untuk mengetahui tingkat efisiensi dan performa kerja pompa pada sistem irigasi tetes. Nilai PWM digunakan untuk melihat besar kecilnya kendali kecepatan motor pompa yang diberikan oleh sistem. *Duty Cycle* bertujuan mengetahui persentase waktu aktif sinyal PWM dalam mengatur kerja pompa. Sedangkan arus digunakan untuk mengukur konsumsi daya listrik saat pompa beroperasi.

4.1.4.3.1 Uji Kinerja Pompa dengan ACO dan PID

Tabel 4.17 Hasil Uji Kinerja Pompa dengan ACO dan PID

NO	Sektor	Jarak (cm)	Waktu (detik)	PWM	Duty Cycle (%)	Arus (A)
1	A	120	60	110	43.1	0.82
2	B	160	60	123	48.2	0.95
3	C	200	60	135	52.9	1.08
4	A	120	60	110	43.1	0.81
5	B	160	60	123	48.2	0.94
6	C	200	60	135	52.9	1.07
7	A	120	60	110	43.1	0.82
8	B	160	60	123	48.2	0.95
9	C	200	60	135	52.9	1.08
10	A	120	60	110	43.1	0.83
11	B	160	60	123	48.2	0.96
12	C	200	60	135	52.9	1.09
13	A	120	60	110	43.1	0.82
14	B	160	60	123	48.2	0.95
15	C	200	60	135	52.9	1.08

Berdasarkan tabel 4.17, seluruh percobaan menggunakan uji waktu kerja pompa selama 60 detik. Penggunaan metode kontrol mampu menyesuaikan nilai PWM sesuai kebutuhan pada setiap sektor, sehingga arus yang digunakan lebih rendah dan aliran air lebih stabil. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol dapat meningkatkan efisiensi kerja pompa serta menjaga performa tetap optimal ditunjukkan bahwa rata-rata beban kerja pompa atau *duty cycle* maksimal 52.9% dan arus yang relative kecil maksimal 1.08 ampere.

4.1.4.3.2 Uji Kinerja Pompa Tanpa ACO dan PID

Tabel 4.18 Hasil Uji Kinerja Pompa Tanpa ACO dan PID

NO	Sektor	Jarak (cm)	Waktu (detik)	PWM	Duty Cycle (%)	Arus (A)
1	A	120	60	255	100	1.85
2	B	160	60	255	100	1.86
3	C	200	60	255	100	1.88
4	A	120	60	255	100	1.84
5	B	160	60	255	100	1.86
6	C	200	60	255	100	1.87
7	A	120	60	255	100	1.85
8	B	160	60	255	100	1.86
9	C	200	60	255	100	1.89
10	A	120	60	255	100	1.85
11	B	160	60	255	100	1.87
12	C	200	60	255	100	1.88
13	A	120	60	255	100	1.84
14	B	160	60	255	100	1.86
15	C	200	60	255	100	1.87

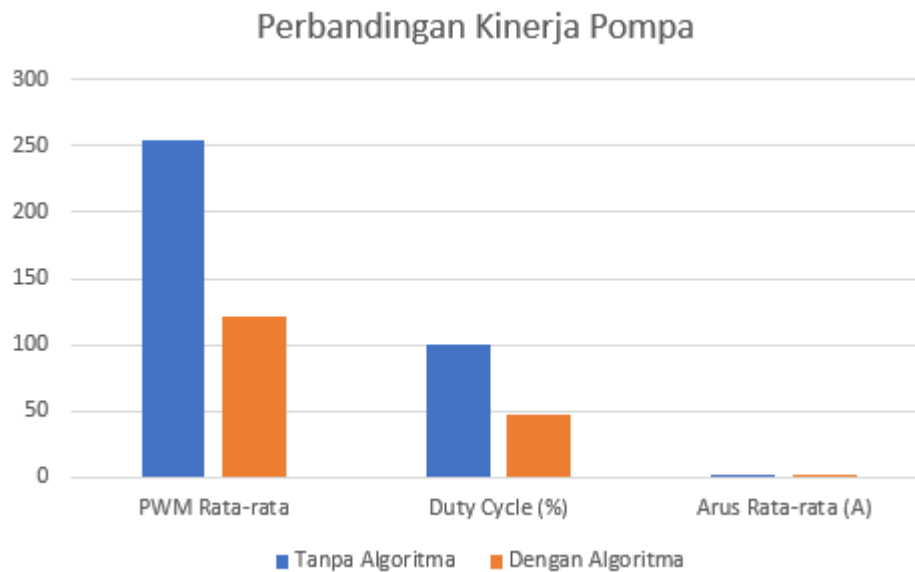
Pada tabel 4.18 pengujian dilakukan tanpa algoritma ACO dan PID, waktu pengoperasian juga ditetapkan selama 60 detik pada setiap percobaan. Namun pompa bekerja dengan PWM maksimum yaitu 255 secara terus-menerus tanpa penyesuaian sehingga berbanding *Duty cycle* yang mencapai 100%. Kondisi ini juga menyebabkan konsumsi arus lebih besar yaitu berkisar 1.84 - 1,88 A.

4.1.4.3.3 Perbandingan Uji Kinerja Pompa

Tabel 4.19 Hasil Uji Perbandingan Kinerja Pompa

No	Metode	PWM Rata-rata	Duty Cycle (%)	Rata-rata Waktu (detik)	Arus Rata-rata (A)	Stabilitas	Keterangan
1	Tanpa Algoritma	255	100	60	1.86	Rendah	Pompa bekerja maksimum tanpa kontrol
2	Dengan Algoritma	122	47.8	60	0.91	Sangat Baik	Sistem menggunakan optimasi kontrol

Berdasarkan tabel 4.19 perbandingan kinerja pompa menggunakan algoritma dan tanpa algoritma, kedua sistem memiliki waktu kerja yang sama yaitu 60 detik, tetapi hasil performanya berbeda. Sistem yang menggunakan metode memiliki nilai PWM dan arus yang lebih rendah dibanding tanpa metode, sehingga lebih hemat energi dan lebih stabil. Sementara sistem tanpa metode membutuhkan daya lebih besar karena pompa selalu bekerja pada kapasitas maksimum. Dengan demikian, penggunaan metode kontrol terbukti lebih efektif dalam meningkatkan kinerja pompa.



Gambar 4.8 Perbandingan Uji Kinerja Pompa

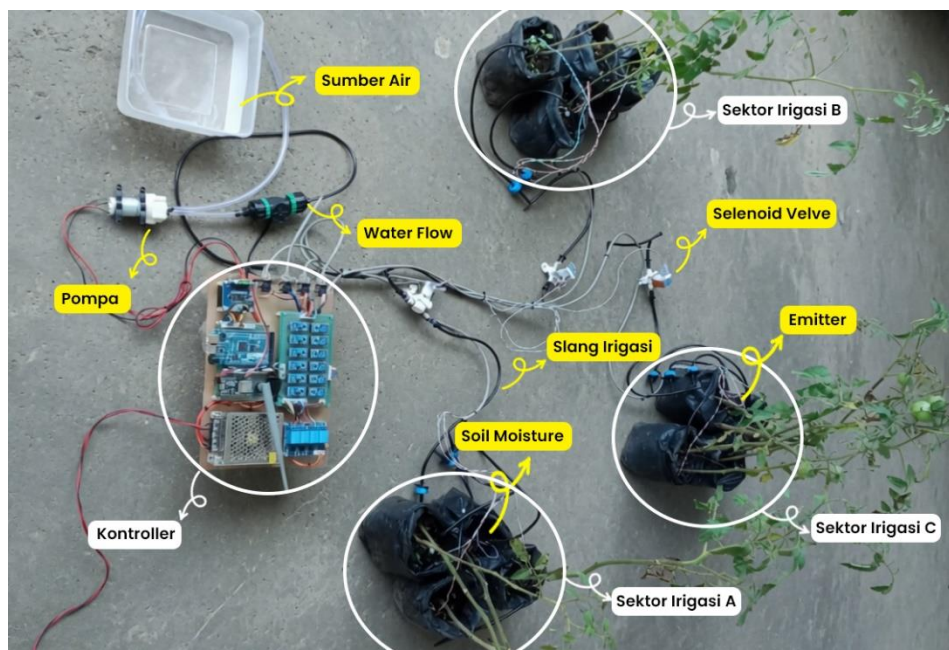
Grafik pada gambar 4.8, menunjukkan sistem tanpa algoritma memiliki nilai PWM rata-rata sebesar 255, sedangkan sistem menggunakan metode hanya 122. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan metode kontrol mampu menurunkan kecepatan kerja motor pompa sesuai kebutuhan tanpa harus bekerja pada kapasitas maksimum secara terus-menerus. Dengan demikian, sistem menjadi lebih efisien dalam penggunaan tenaga. Pada grafik *Duty Cycle*, sistem tanpa algoritma memiliki nilai 100%, sedangkan sistem menggunakan algoritma sebesar 47,8%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pompa tanpa kontrol selalu aktif penuh selama proses kerja, sementara penggunaan metode mampu mengatur waktu aktif pompa menjadi lebih rendah. Kondisi ini berdampak pada pengurangan konsumsi daya dan memperpanjang umur kerja pompa. Sementara itu, grafik arus rata-rata menunjukkan bahwa sistem tanpa metode membutuhkan arus sebesar 1,86 A, sedangkan sistem menggunakan metode hanya 0,91 A. Penurunan arus ini menandakan bahwa metode kontrol dapat menghemat energi listrik secara

signifikan. Secara keseluruhan, penggunaan metode memberikan kinerja yang lebih baik karena lebih hemat daya dan sistem bekerja lebih optimal.

4.2 Pembahasan

Pada bagian ini dijelaskan mengenai sistem yang telah berhasil dirancang dan direalisasikan. Pembahasan meliputi hasil pembuatan sistem perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*), serta desain irigasi tetes yang digunakan sebagai media implementasi dan pengujian dalam penelitian ini. Prototype tersebut dibuat untuk mensimulasikan kondisi lahan pertanian dengan beberapa jalur distribusi air dan sektor penyiraman. Selain itu, pada bagian ini juga dipaparkan proses implementasi sistem, fungsi dari setiap komponen, serta hasil pengujian awal untuk memastikan bahwa sistem dapat bekerja sesuai dengan perancangan yang telah dibuat.

4.2.1 Sistem Irigasi Tetes



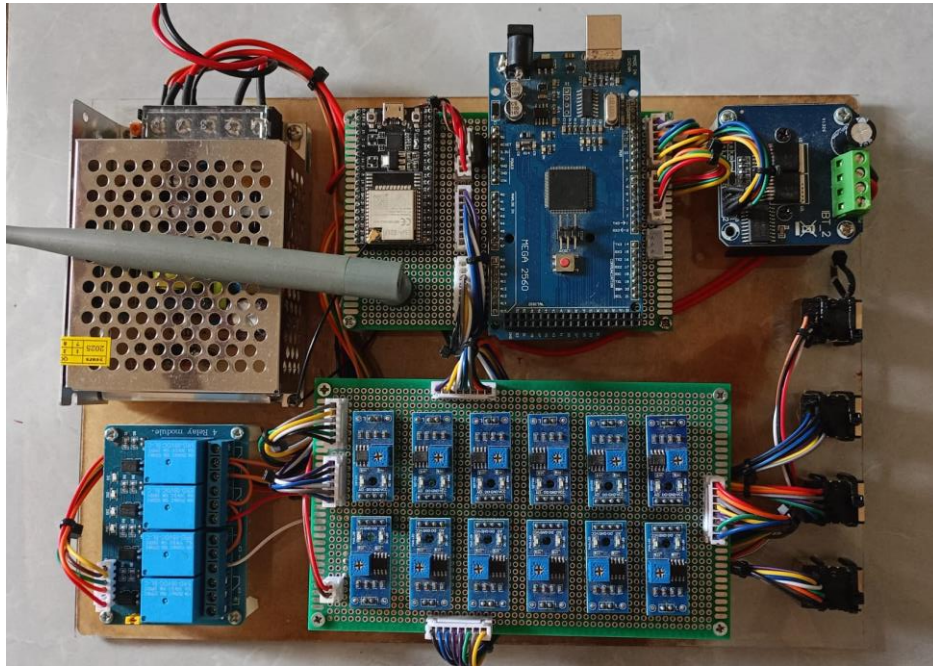
Gambar 4.9 Hasil Implementasi Irigasi Tetes

Gambar 4.9 menunjukkan hasil implementasi prototype sistem irigasi tetes yang terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu sumber air, pompa, *water flow* sensor, *controller*, *solenoid valve*, selang irigasi, *emitter*, sensor *soil moisture*, dan tiga sektor irigasi. Air dialirkan dari sumber air menuju pompa, kemudian melewati *water flow* sensor untuk mengukur debit air yang digunakan selama proses penyiraman. Selanjutnya air didistribusikan melalui selang irigasi ke masing-masing sektor tanam.

Setiap sektor irigasi dilengkapi *soil moisture* sensor yang berfungsi membaca tingkat kelembapan tanah sebagai acuan kebutuhan penyiraman. Berdasarkan data sensor tersebut, *controller* akan memproses dan menentukan sektor yang membutuhkan air, lalu mengaktifkan *solenoid valve* pada jalur terkait agar air dapat mengalir ke sektor yang dipilih. Air kemudian keluar melalui *emitter* secara perlahan langsung ke area perakaran tanaman sehingga penggunaan air menjadi lebih efisien.

Dari hasil rancangan ini, sistem mampu melakukan penyiraman secara otomatis dan terarah pada tiga sektor irigasi. Selain itu, penggunaan sensor dan kontrol otomatis menjadikan distribusi air lebih tepat sasaran, mengurangi pemborosan air, serta memudahkan proses pemantauan dan pengendalian irigasi.

4.2.2 Sistem *Hardware*



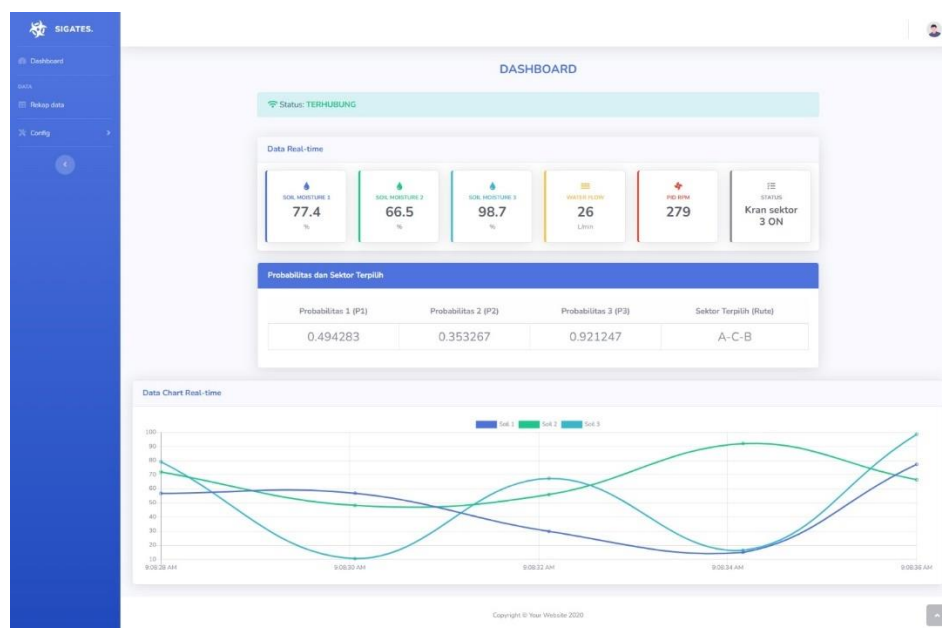
Gambar 4.10 *Hardware Control System*

Gambar 4.10 menunjukkan perangkat keras sistem irigasi otomatis yang dirancang untuk melakukan monitoring dan pengendalian distribusi air secara cerdas. Komponen utama yang digunakan adalah *Arduino Mega* sebagai pusat pengendali sistem yang memproses data sensor dan menjalankan logika kontrol. *ESP32* berfungsi sebagai modul komunikasi *WiFi* agar perangkat dapat terhubung dengan *website* untuk monitoring dan kontrol jarak jauh secara *real-time*. Sistem juga dilengkapi beberapa soil moisture sensor untuk membaca kelembapan tanah pada setiap sektor lahan sebagai dasar penentuan kebutuhan penyiraman. Sebagai sumber daya, digunakan *power supply 5V DC* untuk menyuplai tegangan ke seluruh rangkaian. Informasi kondisi sistem ditampilkan melalui LCD, seperti nilai kelembapan tanah, status pompa, dan debit air.

Proses penyaluran air dilakukan menggunakan pompa air, sedangkan jumlah air yang mengalir dipantau menggunakan *water flow sensor*. Kecepatan kerja pompa dikendalikan oleh *driver BTS7960* melalui pengaturan PWM.

Selain itu, sistem menggunakan *relay* sebagai saklar elektronik untuk mengontrol aktif atau nonaktifnya *solenoid valve*. *Solenoid valve* berfungsi membuka dan menutup jalur air menuju sektor irigasi tertentu secara otomatis. Seluruh komponen tersebut terintegrasi sehingga mampu menjalankan sistem irigasi tetes yang efisien, otomatis, dan dapat dipantau melalui *website*.

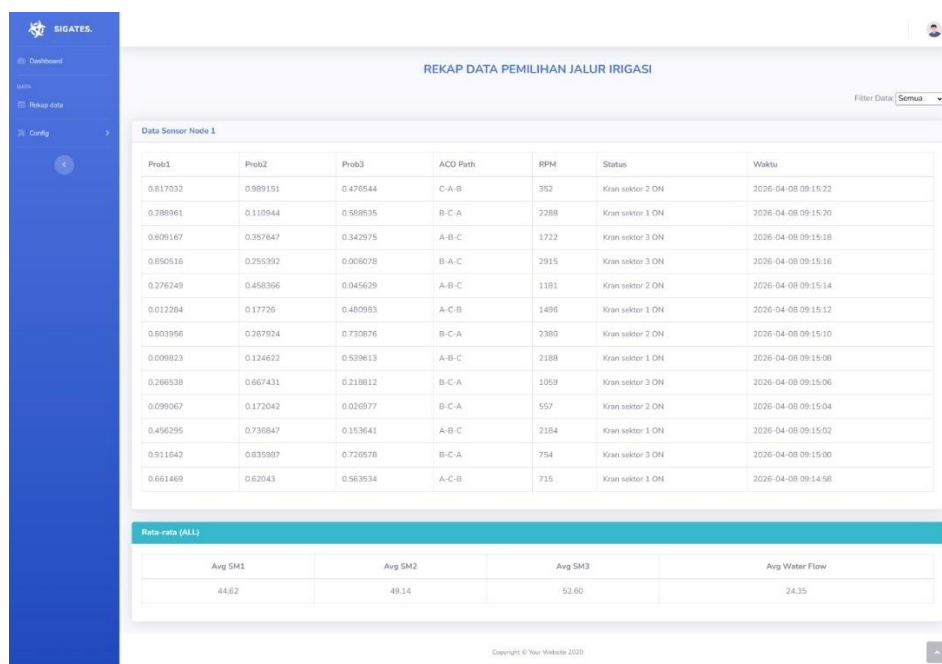
4.2.3 Sistem Software



Gambar 4.11 Dashboard Website

Gambar 4.11 merupakan tampilan *dashboard website* ini berfungsi sebagai pusat monitoring dan pengendalian sistem secara *real-time*. Pada bagian atas ditampilkan status koneksi sistem dalam kondisi terhubung, yang menandakan

perangkat dan *website* saling terkoneksi dengan baik. Selanjutnya terdapat informasi data sensor meliputi nilai kelembapan tanah pada tiga sektor, debit air, nilai PWM pompa, serta status kran yang sedang aktif. *Dashboard* juga menampilkan hasil perhitungan probabilitas dari setiap sektor dan urutan sektor terpilih sebagai dasar proses penyiraman otomatis. Pada bagian bawah, grafik *real-time* menunjukkan perubahan nilai kelembapan tanah tiap sektor dari waktu ke waktu, sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi lahan secara langsung.



REKAP DATA PEMILIHAN JALUR IRIGASI

Filter Data: Semua

Data Sensor Node 1

Prob1	Prob2	Prob3	ACO Path	BPM	Status	Waktu
0.817032	0.989151	0.476544	C-A-B	352	Kran sektor 2 ON	2026-04-08 09:15:22
0.288961	0.110944	0.588535	B-C-A	2288	Kran sektor 1 ON	2026-04-08 09:15:20
0.609167	0.357647	0.342575	A-B-C	1722	Kran sektor 3 ON	2026-04-08 09:15:18
0.850516	0.255392	0.060078	B-A-C	2915	Kran sektor 3 ON	2026-04-08 09:15:16
0.276249	0.458366	0.045629	A-B-C	1181	Kran sektor 2 ON	2026-04-08 09:15:14
0.012284	0.17726	0.480983	A-C-B	1496	Kran sektor 1 ON	2026-04-08 09:15:12
0.803956	0.267924	0.730876	B-C-A	2380	Kran sektor 2 ON	2026-04-08 09:15:10
0.009823	0.124622	0.539613	A-B-C	2188	Kran sektor 1 ON	2026-04-08 09:15:08
0.266538	0.667431	0.218812	B-C-A	1059	Kran sektor 3 ON	2026-04-08 09:15:06
0.090607	0.172042	0.026977	B-C-A	557	Kran sektor 2 ON	2026-04-08 09:15:04
0.456295	0.736847	0.153641	A-B-C	2184	Kran sektor 1 ON	2026-04-08 09:15:02
0.911642	0.835987	0.720578	B-C-A	754	Kran sektor 3 ON	2026-04-08 09:15:00
0.661469	0.62043	0.563534	A-C-B	715	Kran sektor 1 ON	2026-04-08 09:14:58

Rata-rata (ALL)

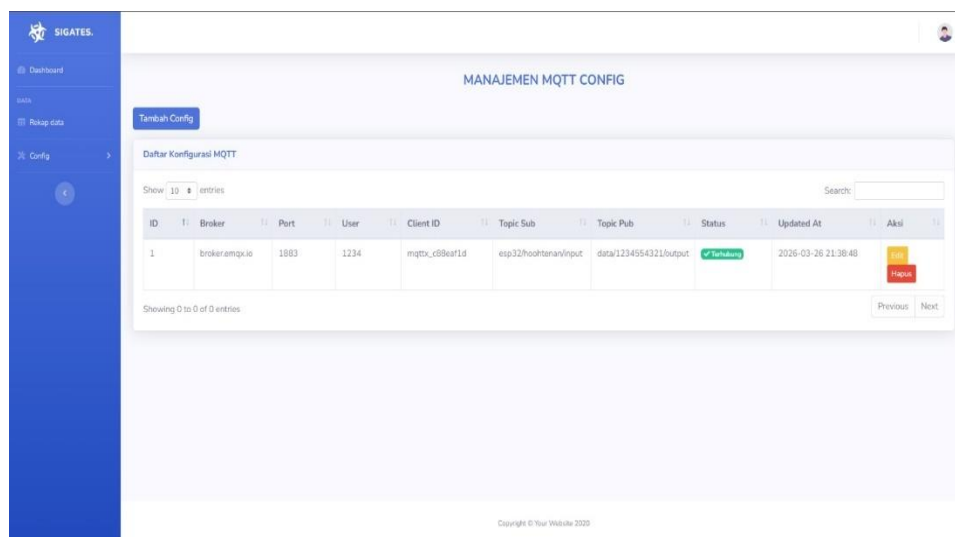
Avg SM1	Avg SM2	Avg SM3	Avg Water Flow
44.62	49.14	52.60	24.35

Copyright © Year Website 2020

Gambar 4.12 Menu Rekap Data

Gambar 4.12 merupakan tampilan menu Rekap Data Pemilihan Jalur Irigasi digunakan untuk menampilkan riwayat data hasil monitoring dan proses pemilihan jalur irigasi secara otomatis. Pada halaman ini terdapat tabel berisi nilai probabilitas setiap sektor, jalur irigasi yang dipilih oleh metode ACO, nilai PWM pompa, status

kran aktif, serta waktu pengambilan data. Pengguna juga dapat melakukan penyaringan data berdasarkan periode tertentu melalui fitur filter yang tersedia. Di bagian bawah tabel ditampilkan nilai rata-rata seluruh data, seperti rata-rata kelembapan tanah tiap sektor dan debit air, sehingga memudahkan analisis kinerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 4.13 Menu Config MQTT

Tampilan menu *Config MQTT* pada gambar 4.13 digunakan untuk mengatur parameter komunikasi antara *website* dan perangkat IoT melalui protokol MQTT. Pada halaman ini ditampilkan daftar konfigurasi yang meliputi alamat *broker*, *port*, *username*, *client ID*, *topik subscribe*, *topik publish*, serta status koneksi. Pengguna dapat menambah, mengubah, atau menghapus konfigurasi sesuai kebutuhan sistem. Dengan adanya menu ini, proses pertukaran data antara sensor, mikrokontroler, dan *website* dapat berjalan secara terhubung dan *real-time*.

4.3 Analisa Hasil

Analisa hasil yang pertama adalah berdasarkan uji kalibrasi sensor, sebelum dilakukan proses penyesuaian nilai pembacaan dari 9 sensor masih menunjukkan error yang cukup besar terhadap nilai referensi 60%, dimana beberapa sensor memiliki deviasi tinggi seperti sensor ke-4 sebesar 33,33% dan sensor ke-7 sebesar 25%. Setelah dilakukan kalibrasi, nilai rata-rata error turun signifikan menjadi 2,41%, sehingga sensor menjadi lebih akurat dan layak digunakan dalam sistem.

Lalu, untuk pengujian ACO, dapat disimpulkan bahwa performa algoritma sangat dipengaruhi oleh parameter sistem dan jumlah iterasi yang digunakan. konfigurasi parameter memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan algoritma dalam menentukan prioritas distribusi air. Kombinasi parameter yang kurang tepat menghasilkan error yang tinggi karena proses pembentukan dan pembaruan *pheromone* belum mampu merepresentasikan kondisi kelembaban tanah secara optimal. Setelah dilakukan penyesuaian parameter, diperoleh kombinasi terbaik pada nilai $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,1$, $\rho = 0,1$, dan $Q = 0,5$ yang mampu menghasilkan error 0% pada seluruh data pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keseimbangan antara pengaruh *pheromone*, informasi *heuristik*, laju *evaporasi*, dan intensitas pembaruan *pheromone* sangat menentukan keberhasilan algoritma dalam menemukan jalur distribusi air yang sesuai dengan kondisi aktual lahan. pengujian jumlah iterasi menunjukkan bahwa iterasi 10 hingga 20 memberikan hasil paling optimal dengan *error* 0%, pada evaluasi 30 data pengujian diperoleh 25 data benar dan 5 data salah, sehingga menghasilkan nilai MAPE atau *error* sebesar 16,67%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma ACO mampu

menentukan prioritas jalur irigasi secara cukup akurat dan konsisten berdasarkan data kelembapan tanah, sehingga layak diterapkan pada sistem irigasi otomatis untuk meningkatkan efisiensi distribusi air.

Selanjutnya adalah pada pengujian algoritma PID terlihat bahwa parameter kontrol sangat mempengaruhi respon sistem pompa. Saat nilai $K_i = 6$, sistem masih mengalami *steady-state error* dengan output berada di bawah setpoint pada kisaran 0,35–0,37. Ketika nilai K_i dinaikkan menjadi 7, sistem mampu mencapai setpoint namun terjadi *overshoot* hingga 0,40. Adapun kombinasi terbaik diperoleh pada $K_p = 150$, $K_i = 7$ atau 8, dan $K_d = 15$, dimana sistem dapat mencapai *setpoint* dalam waktu sekitar 1 menit dengan *error* 0,00% dan kondisi stabil.

Pengujian stabilitas distribusi air menunjukkan bahwa penggunaan algoritma ACO dan PID mampu meningkatkan keseragaman aliran air secara signifikan, yang ditunjukkan oleh penurunan nilai *Coefficient of Variation* (CV) dari 13,43% menjadi 1,48%. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa variasi debit air yang diterima pada setiap titik irigasi menjadi lebih kecil sehingga distribusi air menjadi lebih seragam. Jika dihitung berdasarkan persentase perbaikan, nilai CV mengalami penurunan sebesar 88,98%, yang menunjukkan peningkatan kestabilan distribusi air yang sangat signifikan. Kondisi ini terjadi karena algoritma ACO mampu menentukan sektor prioritas penyiraman berdasarkan kondisi kelembapan tanah sehingga distribusi air menjadi lebih terarah, sedangkan kontrol PID menjaga debit aliran air tetap mendekati nilai setpoint dengan meminimalkan fluktuasi yang terjadi selama proses penyiraman.

Peningkatan kinerja sistem juga terlihat pada nilai *Christiansen Uniformity* (CU) yang meningkat dari 76,68% menjadi 95,47%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat keseragaman distribusi air meningkat sebesar 24,51% dibandingkan sistem tanpa algoritma. Menurut teori irigasi, semakin tinggi nilai CU maka semakin merata air yang diterima oleh setiap titik irigasi. Peningkatan nilai CU pada penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi ACO dan PID berhasil mengurangi perbedaan volume air yang diterima antar sektor. Algoritma ACO memastikan air didistribusikan sesuai prioritas kebutuhan tanah, sedangkan PID menjaga kestabilan debit pompa selama proses penyiraman. Dengan demikian, distribusi air yang dihasilkan menjadi lebih merata, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan tanaman dibandingkan sistem konvensional tanpa algoritma. Pada pengujian efisiensi penggunaan air diperoleh hasil bahwa sistem dengan metode selalu lebih hemat dibanding sistem konvensional. Persentase penghematan air pada setiap pengujian berkisar antara 33% hingga 47%, dengan rata-rata penggunaan air sebesar 3,56 liter pada sistem menggunakan metode dan 5,85 liter pada sistem tanpa metode, sehingga total efisiensi penggunaan air mencapai 39%. Terakhir,

Pengujian efisiensi kinerja pompa diketahui bahwa sistem tanpa algoritma bekerja pada PWM 255 dengan *duty cycle* 100%, sedangkan sistem menggunakan metode hanya memerlukan PWM 122 dan *duty cycle* 47,8%. Nilai arus rata-rata juga turun dari 1,86 A menjadi 0,91 A, yang menunjukkan bahwa penggunaan metode kontrol mampu menekan konsumsi energi secara signifikan serta meningkatkan efisiensi kerja pompa secara keseluruhan.

4.4 Integrasi Islam

Penelitian mengenai optimasi distribusi air pada sistem irigasi tetes berbasis *Ant Colony Optimization* (ACO) dan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) tidak hanya berkaitan dengan aspek teknologi dan rekayasa sistem, tetapi juga memiliki keterkaitan dengan nilai-nilai Islam yang mengatur hubungan manusia dengan *Allah Subhanahu wa ta'ala*, sesama manusia, dan lingkungan. Dalam perspektif Islam, pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi merupakan bagian dari ikhtiar manusia dalam memanfaatkan akal yang telah dianugerahkan oleh *Allah Subhanahu wa ta'ala* untuk menciptakan kemaslahatan serta menjaga keseimbangan kehidupan. Pengelolaan sumber daya air secara efektif dan efisien melalui penerapan teknologi modern merupakan salah satu bentuk implementasi tanggung jawab manusia sebagai khalifah di muka bumi.

Konsep tersebut dapat dikaji melalui tiga dimensi hubungan dalam Islam, yaitu *Muamalah Ma'a Allah* yang berkaitan dengan hubungan manusia dengan *Allah Subhanahu wa ta'ala* sebagai pemberi nikmat air dan seluruh sumber daya alam, *Muamalah Ma'a An-Nas* yang berkaitan dengan pemanfaatan teknologi untuk memberikan manfaat bagi kehidupan manusia dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat, serta *Muamalah Ma'a Al-'Alam* yang berkaitan dengan tanggung jawab manusia dalam menjaga kelestarian lingkungan dan mengelola sumber daya alam secara bijaksana. Ketiga aspek tersebut memiliki relevansi yang kuat dengan penelitian ini karena sistem yang dikembangkan bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan air, meningkatkan efisiensi irigasi, serta mendukung keberlanjutan

sektor pertanian melalui pemanfaatan teknologi berbasis *Internet of Things* (IoT), algoritma ACO, dan kontrol PID.

Berdasarkan ketiga dimensi hubungan tersebut, integrasi nilai-nilai Islam dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui beberapa *ayat Al-Qur'an* yang berkaitan dengan nikmat air, kemanfaatan ilmu pengetahuan bagi manusia, serta prinsip menjaga dan memanfaatkan sumber daya alam secara tidak berlebihan.

4.4.1 *Muamalah Ma'a Allah*

Air merupakan salah satu nikmat terbesar yang dianugerahkan Allah *Subhanahu wa ta'ala* kepada seluruh makhluk hidup. Keberadaan air menjadi faktor utama dalam mendukung kehidupan, termasuk pada sektor pertanian yang menjadi sumber pemenuhan kebutuhan pangan manusia. Dalam penelitian ini, upaya optimasi distribusi air melalui sistem irigasi tetes berbasis ACO dan kontrol PID merupakan bentuk pemanfaatan teknologi untuk mengelola sumber daya air secara lebih efektif dan efisien. Dari perspektif *Muamalah Ma'a Allah*, pengelolaan air yang baik dapat dipandang sebagai wujud rasa syukur manusia atas nikmat yang telah diberikan oleh Allah *Subhanahu wa ta'ala*. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana Al-Qur'an menjelaskan kedudukan air sebagai karunia Allah yang harus dimanfaatkan dengan penuh rasa syukur dan tanggung jawab seperti yang dijelaskan dalam *Surat Al-Waqi'ah* ayat 68-70 yang berbunyi:

أَفَرَأَيْتُمُ الْمَاءَ الَّذِي تَشْرَبُونَ (أَأَنْتُمْ أَنْزَلْتُمُوهُ مِنَ الْمُزْنِ أَمْ نَحْنُ الْمُنْزِلُونَ) لَوْ نَشَاءُ جَعَلْنَاهُ أُجَاجًا
فَلَوْلَا تَشْكُرُونَ

"Maka terangkanlah kepadaku tentang air yang kamu minum. Kamukah yang menurunkannya dari awan ataukah Kami yang menurunkannya? Sekiranya Kami

menghendaki, niscaya Kami menjadikannya asin, maka mengapa kamu tidak bersyukur?" (QS. Al-Waqi'ah: 68-70).

Menurut Tafsir Ibnu Katsir, Allah mengingatkan manusia bahwa air yang digunakan untuk kehidupan sehari-hari merupakan nikmat yang diturunkan langsung oleh Allah *Subhanahu wa ta'ala*. Manusia tidak memiliki kemampuan untuk menciptakan air atau mengatur proses turunnya hujan secara mandiri. Oleh karena itu, manusia diperintahkan untuk bersyukur dan memanfaatkan air dengan sebaik-baiknya (Learn-Quran, 2026).

Penelitian mengenai optimasi distribusi air pada sistem irigasi tetes merupakan salah satu bentuk ikhtiar manusia dalam memanfaatkan nikmat air secara efektif dan efisien. Penggunaan algoritma ACO dan kontrol PID bertujuan mengurangi pemborosan air sehingga sejalan dengan nilai syukur atas karunia Allah *Subhanahu wa ta'ala*.

4.4.2 Muamalah Ma'a Annas

Selain sebagai bentuk rasa syukur kepada Allah *Subhanahu wa ta'ala*, pengembangan teknologi juga harus memberikan manfaat bagi kehidupan manusia. Islam mengajarkan bahwa ilmu pengetahuan dan teknologi hendaknya digunakan untuk menciptakan kemaslahatan, membantu sesama, serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Penelitian mengenai optimasi distribusi air pada sistem irigasi tetes bertujuan untuk membantu petani memperoleh distribusi air yang lebih merata, mengurangi pemborosan sumber daya, dan meningkatkan produktivitas pertanian. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memiliki nilai teknis, tetapi juga nilai sosial yang berkaitan dengan hubungan antarmanusia. Dalam konsep

Muamalah Ma'a An-nas, pemanfaatan teknologi untuk memberikan manfaat kepada masyarakat merupakan salah satu bentuk implementasi nilai-nilai kebaikan yang dianjurkan dalam Islam, seperti yang telah tertera ada surat *Al-Maidah Ayat 2* yang berbunyi:

... وَتَعَاوَنُوا عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَىٰ ۖ وَلَا تَعَاوَنُوا عَلَى الْإِثْمِ وَالْعُدْوَانِ ۚ ...

"Dan tolong-menolonglah kamu dalam (mengerjakan) kebajikan dan takwa, dan jangan tolong-menolong dalam berbuat dosa dan permusuhan." (QS. *Al-Ma'idah*: 2)

Menurut Tafsir Jalalayn, QS. *Al-Ma'idah* ayat 2 mengandung perintah kepada manusia untuk saling membantu dalam melakukan perbuatan yang baik dan meningkatkan ketakwaan kepada Allah *Subhanahu wa ta'ala*. Sebaliknya, manusia dilarang bekerja sama dalam perbuatan yang mengandung dosa maupun tindakan yang melanggar ketentuan Allah *Subhanahu wa ta'ala* (Learn-Quran).

Sistem irigasi tetes yang dioptimalkan menggunakan ACO dan PID bertujuan meningkatkan efisiensi distribusi air sehingga kebutuhan tanaman dapat terpenuhi dengan baik. Teknologi ini berpotensi membantu petani meningkatkan produktivitas pertanian dan mengurangi kerugian akibat kekurangan air. Dengan demikian, penelitian ini termasuk bentuk kontribusi ilmu pengetahuan yang memberikan manfaat bagi masyarakat.

4.4.3 *Muamalah Ma'a Al-Alam*

Islam memandang manusia sebagai *khalifah* di bumi yang memiliki tanggung jawab untuk menjaga dan mengelola lingkungan secara bijaksana. Salah satu bentuk tanggung jawab tersebut adalah menggunakan sumber daya alam secara

efisien dan menghindari perilaku yang berlebihan. Air sebagai sumber daya yang sangat penting harus dimanfaatkan sesuai kebutuhan agar ketersediaannya tetap terjaga untuk generasi mendatang. Penelitian ini berfokus pada optimasi distribusi air melalui sistem irigasi tetes yang dirancang untuk mengurangi pemborosan dan meningkatkan efisiensi penggunaan air. Upaya tersebut sejalan dengan konsep *Muamalah Ma'a Al-'Alam* yang menekankan pentingnya menjaga keseimbangan lingkungan dan memanfaatkan sumber daya alam secara bertanggung jawab. Oleh karena itu, prinsip-prinsip yang diajarkan dalam Al-Qur'an surat *Al-A'raf* ayat 32 mengenai larangan berlebih-lebihan menjadi landasan yang relevan dalam penelitian ini.

...وَكُلُوا وَاشْرَبُوا وَلَا تُسْرِفُوا إِنَّهُ لَا يُحِبُّ الْمُسْرِفِينَ

"Makan dan minumlah, tetapi jangan berlebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berlebihan." (QS. Al-A'raf: 31)

Menurut Tafsir Ibnu Katsir, ayat ini mengandung prinsip keseimbangan dalam menggunakan nikmat Allah. Larangan berlebih-lebihan mencakup seluruh aspek kehidupan, termasuk penggunaan makanan, minuman, dan sumber daya alam (Learn-Quran).

Penelitian optimasi distribusi air pada sistem irigasi tetes secara langsung berkaitan dengan upaya menghindari pemborosan air. Penggunaan algoritma ACO untuk menentukan distribusi air yang optimal dan kontrol PID untuk menjaga kestabilan debit merupakan implementasi prinsip efisiensi sumber daya alam yang diajarkan dalam Islam. Dengan demikian, penelitian ini mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan dan mengurangi penggunaan air secara berlebihan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode *Ant Colony Optimization* (ACO) dan *Proportional Integral Derivative* (PID) berhasil dikonfigurasi dan diterapkan pada sistem irigasi tetes berbasis *Internet of Things* untuk menentukan jalur distribusi air dan mengendalikan kestabilan debit aliran air. Konfigurasi metode ACO terbaik diperoleh pada parameter $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,1$, $\rho = 0,1$, dan $Q = 0,5$ yang mampu menghasilkan *error MAPE* sebesar 0,00%. Dengan evaluasi 30 data didapat tingkat *error MAPE* sebesar 16,67%. Pada sisi pengendalian debit air, metode PID dengan parameter $K_p = 150$, $K_i = 7$ atau 8, dan $K_d = 15$ menunjukkan performa terbaik dengan *error* 0,00%. Selanjutnya untuk pengujian keseragaman tetesan nilai *Coefficient of Variation* (CV) berhasil diturunkan dari 13,43% menjadi 1,48% atau mengalami peningkatan kestabilan sebesar 88,98%, sedangkan nilai *Christiansen Uniformity* (CU) meningkat dari 76,68% menjadi 95,47%. Sehingga efisiensi penggunaan air juga mengalami penghematan sebesar 39%. Kemudian untuk hasil efisiensi energi pada kinerja pompa mengalami peningkatan yang ditandai oleh penurunan nilai PWM dari 255 menjadi 122, *duty cycle* dari 100% menjadi 47,8%, serta arus rata-rata dari 1,86 A menjadi 0,91 A. Dengan demikian, tujuan penelitian telah tercapai, yaitu mengkonfigurasi dan menerapkan metode ACO untuk menentukan jalur distribusi air serta metode PID untuk mengatur kestabilan debit aliran air berjalan dengan hasil sesuai yang diharapkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan melakukan pengujian pada sistem irigasi yang memiliki jumlah sektor dan jalur distribusi yang lebih banyak sehingga kemampuan algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dalam menentukan prioritas penyiraman dapat dievaluasi pada kondisi yang lebih kompleks. Selain itu, parameter ACO seperti α , β , ρ , dan Q serta parameter PID seperti K_p , K_i , dan K_d dapat dikembangkan menggunakan metode *auto tuning* sehingga sistem mampu melakukan penyesuaian parameter secara otomatis sesuai dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan tanaman. Pengembangan berikutnya juga dapat dilakukan dengan menambahkan sensor tekanan (*pressure sensor*) pada jaringan perpipaan sebagai parameter tambahan dalam sistem kontrol. Data tekanan tersebut dapat digunakan sebagai nilai referensi untuk membantu pengaturan setpoint debit air, memantau kestabilan distribusi air, serta mendeteksi adanya gangguan seperti kebocoran atau penyumbatan pada saluran irigasi. Dengan pengembangan tersebut, sistem diharapkan mampu menghasilkan distribusi air yang lebih presisi, adaptif, dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardi, I. P., Widyatmika, W., Putu, N., Widyanata, A., Wahyu, W., Prastya, A., Darminta, I. K., & Sangka, I. G. N. (2021). *Perbandingan Kinerja Arduino Uno Dan ESP32 Terhadap Pengukuran Arus Dan Tegangan*. 13(1), 37–45.
- Awwaliyah, N., Cikusin, Y., & Abidin, A. Z. (2020). Problematika Petani Dalam Meningkatkan Produktivitas Pertanian. *Jurnal Respon Publik*, 14(4), 83–88.
- Beo, E., Delvion, S., Seda Mada, G., Kristiano, N., Dethan, F., & Yulius Tefa, A. (2021). Pendampingan Penerapan Teknologi Jaringan Irigasi Tetes Pada Kelompok Tani Mutis Cemerlang Desa Noepesu Kecamatan Miomaffo Barat. In *Jurnal Pasopati* (Vol. 3, Issue 4). [Http://Ejournal2.Undip.Ac.Id/Index.Php/Pasopati](http://Ejournal2.Undip.Ac.Id/Index.Php/Pasopati)
- Dhamaddam. (2016). *Sejarah Perkembangan Metode Penalaan Ziegler Nichols*. Diambil Kembali Dari Ddamicro: [Http://Ddamicro.Blogspot.Com/2016/12/Sejarah-Perkembangan-Metode-Penalaan.Html](http://Ddamicro.Blogspot.Com/2016/12/Sejarah-Perkembangan-Metode-Penalaan.Html)
- Fakhrah, F., Unaida, R., Faradhillah, F., Usrati, K., & Wati, M. (2022). Analisis Efektivitas Penyaluran Air Melalui Penerapan Irigasi Tetes (Drip Irigation) Pada Tanaman Cabai Di Lahan Kering. *Jurnal Agrium*, 19(3), 240. <https://doi.org/10.29103/Agrium.V19i3.8749>
- Fitriani, L. (2025). *Testing Pulse Width Modulation On A Triac Using The Duty Cycle Approach On A Smart Conveyor*. 9(3), 321–329.
- Ghani, M. I. (2021, June 28). *Rumus Debit Air Dan Apa Sih Fungsinya Di Kehidupan Sehari Hari*. Diambil Kembali Dari Zenius: <https://www.zenius.net/blog/rumus-debit-air>
- Handayani, T., Irawati, T., Mustopa, T., & Utomo, P. S. (2025). *Rancang Bangun Penggunaan Venturimeter Fertigasi Pada Irigasi Tetes (Drip Irrigation)*. 25(1), 39–44.
- Haris, A. (2020). Optimasi Sistem Irigasi Lahan Tada Hujan Menggunakan Algoritma Ant Colony Optimization Berbasis Tenaga Surya. *Petir*, 14(1), 45–51. <https://doi.org/10.33322/Petir.V14i1.1064>
- Haris, A., Anggraini, N., & Sikumbang, H. (2022). Teknologi Irigasi Cerdas Pada Sistem Irigasi Drip Dengan Algoritma Ant Colony Optimization. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 9(6), 1289. <https://doi.org/10.25126/Jtiik.2022955871>
- Haris, A., Juwita, T., Aziza, R. N., Sikumbang, H., & Siregar, R. R. A. (2021).

- Implementasi Ant Colony Optimization (ACO) Pada Sistem Irigasi Lahan Tadah Hujan. *Kilat*, 10(2), 336–348. <https://doi.org/10.33322/Kilat.V10i2.1518>
- Heryani, N., & Rejekiningrum, P. (2020). Pengembangan Pertanian Lahan Kering Iklim Kering Melalui Implementasi Panca Kelola Lahan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 13(2), 63. <https://doi.org/10.21082/JsdL.V13n2.2019.63-71>
- Ibnu Katsir, I. (2015). *Tafsir Ibnu Katsir: Surah Al-Mu'minin Ayat 18*. Diakses Dari <https://www.ibnukatsironline.com/2015/07/Tafsir-Surat-Al-Muminun-Ayat-18-22.html>
- Irhas, M., Iftitah, I., & Azizah Ilham, S. A. (2020). Penggunaan Kontrol Pid Dengan Berbagai Metode Untuk Analisis Pengaturan Kecepatan Motor Dc. *JFT : Jurnal Fisika Dan Terapannya*, 7(1), 78. <https://doi.org/10.24252/Jft.V7i1.13846>
- Jayanti, N. A. (2023, July 26). *Bagaimana Cara Penyiraman Tanaman Tomat Yang Tepat? Diambil Kembali Dari Kompasiana.Com*: https://www.kompasiana.com/Nurasih2000/64c09c9d08a8b50d4b0f9872/Bagaimana-Cara-Penyiraman-Tanaman-Tomat-Yang-Tepat?Page=2&Page_Images=1
- Kartika, M. N., & Kurniasih, B. (2021). Pengaruh Irigasi Tetes Dan Mulsa Terhadap Pertumbuhan Tajuk Tanaman Tomat (*Solanum Lycopersicum* L.) Di Lahan Kering Gunungkidul. *Vegetalika*, 10(1), 31. <https://doi.org/10.22146/Veg.55590>
- Learn-Quran. (2026, Juni 19). *Tafsir Surat Al-Waqi'ah Ayat 68*. Diambil Kembali Dari Learn-Quran Tafsir: <https://tafsir.learn-quran.co/id/surat-56-al-waqi'ah/ayat-68>
- Learn-Quran. (T.Thn.). *Tafsir Surat Al-A'raf Ayat 31*. Diambil Kembali Dari Learn-Quran Tafsir: <https://tafsir.learn-quran.co/id/surat-7-al-a'raf/ayat-31>
- Learn-Quran. (T.Thn.). *Tafsir Surat Al-Ma'idah Ayat 2*. Dipetik Juni 19, 2026, Dari Learn-Quran Tafsir: <https://tafsir.learn-quran.co/id/surat-5-al-maidah/ayat-2>
- Masafkar23. (2019, Agustus). *Komponen Mesin Pompa Air Dan Fungsinya*. Diambil Kembali Dari Teknikmesin: <https://teknikmesin.com/2019/08/Komponen-Mesin-Pompa-Air-Dan-Fungsinya.html>
- Muhardiono, I., Kartiwa, B., Hamdani, A., & Heryani, N. (2020). Optimasi Jaringan Irigasi Perpipaan Berdasarkan Karakteristik Hidraulis Dan Biaya Di Pertanian Lahan Kering. *Jurnal Irigasi*, 15(2), 109–120. <https://doi.org/10.31028/Ji.V15.I2.109-120>

- Negara, J., Saidah, H., Rizal, F., Supriyadi, A., & Hanifah, L. (2021). Analisis Besar Koefisien Gesekan Dan Angka Reynolds Terhadap variasi Kemiringan Pipa Transmisi jaringan irigasi Tetes pvc Dripline. *Jurnal Ganec Swara*, 15(2), 1058–1066.
- Ode, W., Mar, D., Biabdillah, F., Wajiansyah, A., & Mulia, A. (N.D.). *Smartsoil : Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Berbasis Internet Of Things (Iot) Menggunakan Esp32 Dan Sensor Soil Moisture*. 14(1), 820–827.
- Rahman, K., Novitasari, E., Jamaluddin, & Ilham. (2024). *Evaluasi Kinerja Sistem Irigasi Tetes Berbasis Gravitasi Dengan Menggunakan Limbah Plastik*. 10, 175–184.
- Ramadan, A. R. (2021). Smart Greenhouse Dengan Metode Fuzzy Mamdani Berbasis Internet Of Things. In *Http://Etheses.Uin-Malang.Ac.Id/*. <Http://Etheses.Uin-Malang.Ac.Id/32239/1/17650004.Pdf>
- Rivai, M., Suwito, Ashari, M., & Mustaghfirin, M. A. (2019). Drip Irrigation System Using BLDC Motor-Driven Direct Pumping And Soil Moisture Sensor. *Proceedings - 2019 International Conference On Computer Science, Information Technology, And Electrical Engineering, Icomitee 2019*, 1, 221–226. <https://doi.org/10.1109/Icomitee.2019.8921024>
- Resky. (2020, Maret 26). *Surah Al-Mu'minun Ayat 18-22; Terjemahan Dan Tafsir Al-Qur'an*. Diambil Kembali Dari Peci Hitam: [https://PeciHitam.Org/Surah-Al-Muminun-Ayat-18-22-Terjemahan-Dan-Tafsir-Al-Quran/](https://pecihitam.org/surah-al-muminun-ayat-18-22-terjemahan-dan-tafsir-al-quran/)
- Syalendra, R. (2021, Maret 15). *Perbedaan Brushed Dan Brushless (Blde) Motor Pada Sepeda Listrik*. Diambil Kembali Dari Kumacart: [https://Kumacart.Com/Brushed-Vs-Brushless-Motor/](https://kumacart.com/brushed-vs-brushless-motor/)
- Setyaningrum, D. A., Tusi, A., & Triyono, S. (2014). *Aplikasi Sistem Irigasi Tetes Pada Tanaman Tomat (Lycopersicum Esculentum Mill) The Application Of Drip Irrigation System On Tomato (Lycopersicum Esculentum Mill)*. 3(2), 127–140.
- Steven Witman. (2021). Penerapan Metode Irigasi Tetes Guna Mendukung Efisiensi Penggunaan Air Di Lahan Kering. *Jurnal Triton*, 12(1), 20–28. <https://doi.org/10.47687/Jt.V12i1.152>
- Sujono, Y. R., Budi, E. S., & Nugrahanto, I. (2023). Modul Pengaturan Motor Pompa DC Metode PID Pada Sistem Kontrol Ketinggian Air Berbasis Arduino. *Jurnal Elkolind*, 10(2), 128–136. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33795/Elkolind.V10i2.3624>
- Susanto, F., Prasiani, N. K., & Darmawan, P. (2022). Implementasi Internet Of Things Dalam Kehidupan Sehari-Hari. *Jurnal Imagine*, 2(1), 35–40. <https://doi.org/10.35886/Imagine.V2i1.329>

- Taek, P. A. G., Supriadi, D., & Taek, S. M. (2022). Upaya Pemberdayaan Petani Lahan Kering Untuk Mewujudkan Pertanian Berkelanjutan Dan Ketahanan Pangan. *JISIP (Jurnal Ilmu Sosial Dan Pendidikan)*, 6(1), 2345–2359. <https://doi.org/10.58258/jisip.v6i1.2829>
- Tampubolon, K., Alinur, Elazhari, Ermawaty, A., & Manurung, R. S. (2021). Penyuluhan Tentang Mengenai Mesin Pompa Air Dan Cara Perawatannya Di Serikat Tolong Menolong Nurul Iman (STMNI) Kelurahan Timbang Deli Kecamatan Medan Amplas. *Journal Liaison Academia And Society (J-LAS)*, 1(2), 1–8. <http://j-las.lemkomindo.org/index.php/j-las/issue/view/j-las/showtoc>
- Wahid, M. R., Pangribuan, P., & Rodiana, I. M. (2021). Desain Dan Implementasi Kontrol Kecepatan Pompa Air Dengan Metode Pid Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Pelton Portable Design And Implementation Of Water Pump Speed Control With Pid Method In Portable Microhidro Pelton Power Plant. *E-Proceeding Of Engineering : Vol.8, No.6 Desember 2021 | Page 11367-11380*, 8(6), 11367–11380.
- Wibowo, E. T. (2020). Pembangunan Ekonomi Pertanian Digital Dalam Mendukung Ketahanan Pangan (Studi Di Kabupaten Sleman: Dinas Pertanian, Pangan, Dan Perikanan, Daerah Istimewa Yogyakarta). *Jurnal Ketahanan Nasional*, 26(2), 204. <https://doi.org/10.22146/jkn.57285>
- Wirama, I. M. A., Widodo, R. T., Udin, M., Al, H., & Oktavianto, H. (2025). *Data Acquisition Of Flow Sensor Based To Measure Water Flow In Underground Drainage*. 15(1), 9–20.
- Witman, S. (2021). Penerapan Metode Irigasi Tetes Guna Mendukung Efisiensi Penggunaan Air Di Lahan Kering Pendahuluan Masalah Kekurangan Air Di Beberapa Daerah Bukanlah Hal Yang Tidak Mungkin , Sedangkan Di Bidang Pertanian , Air Memiliki Peranan Penting Karena Air Merupakan. *JURNAL TRITON*, 12(1), 20–28. <https://doi.org/10.47687/jt.v12i1.152>
- Zmptb, A. C. S., Fauzan, F. N., Utami, S., Reza, M., & Pratama, B. (2024). *Monitoring Sistem Kelistrikan Tiga Fasa Berbasis Iot Dengan Sensor*. 13(April), 24–29.
- Zulhijayanto, & Fadlil, A. (2022). Desain Sistem Monitoring Dan Penyiraman Tanaman Tomat Berbasis Internet Of Things (Iot). *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, 4(2), 94–104. <https://doi.org/10.12928/Biste.V4i2.5884>