

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem instrumentasi dan kendali pada sektor pertanian modern khususnya dalam pengelolaan nutrisi hidroponik, terus mengalami evolusi untuk mencapai tingkat efisiensi dan presisi yang optimal. Transisi dari metode perawatan konvensional menuju sistem otomatisasi telah menjadi fokus utama dalam rekayasa teknologi terapan. Pada sistem dosing nutrisi, keakuratan dalam mencapai setpoint kepekatan larutan menjadi tantangan teknis tersendiri. Hal ini dikarenakan dinamika fluida, viskositas pekatan, dan waktu tunda pelarutan sering kali memicu ketidakstabilan respon aktuator pompa yang berujung pada *overshoot* atau fluktuasi nilai nutrisi.

Untuk mengatasi kompleksitas dinamika tersebut, penerapan kendali konvensional dirasa tidak lagi memadai. Penggabungan antara mikrokontroler berkinerja tinggi, algoritma kendali tertutup seperti *Proportional-Integral-Derivative* (PID), dan pemanfaatan teknologi *Internet of Things* menjadi sebuah standar baru dalam merancang sistem yang cerdas. Berangkat dari urgensi pengembangan teknologi instrumentasi tersebut, penelitian mengenai otomasi pencampuran nutrisi dan sistem kendali telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Studi literatur ini diuraikan untuk membandingkan penelitian terdahulu dengan rancang bangun yang akan dilaksanakan, sehingga posisi, penyempurnaan, dan kebaruan dari Tugas Akhir ini dapat terlihat dengan jelas.

Penelitian pertama dilakukan oleh Fuad dan Zuhrie (2019) yang merancang sistem pengontrolan pH dan nutrisi hidroponik menggunakan pengendali PID [3]. Penelitian tersebut berhasil membuktikan bahwa metode PID mampu meminimalisir overshoot dan menjaga kestabilan larutan. Akan tetapi, perangkat keras utama yang digunakan adalah mikrokontroler Arduino Uno. Penggunaan mikrokontroler ini memiliki keterbatasan dalam hal konektivitas nirkabel, karena

Arduino Uno tidak dibekali dengan modul Wi-Fi internal. Hal ini membuat proses pemantauan jarak jauh menjadi kurang praktis karena membutuhkan tambahan modul eksternal yang memperumit perancangan perangkat keras.

Penelitian kedua dilakukan oleh Ferdiansyah, dkk. (2025) yang berfokus pada sistem monitoring dan kontrol tanaman hidroponik berbasis *Internet of Things* menggunakan mikrokontroler ESP32 [2]. Sistem ini unggul dalam kemudahan akses data secara real-time melalui ponsel pintar berkat fitur Wi-Fi bawaan pada ESP32. Namun, algoritma kontrol aktuator yang diterapkan masih bersifat On/Off konvensional. Kelemahan dari sistem kontrol On/Off pada pencampuran cairan adalah aktuator pompa bekerja dengan kecepatan penuh dan berhenti secara mendadak, yang sering kali menyebabkan nilai kepekatan nutrisi melebihi target (*overshoot*) akibat sisa larutan yang masih menetes.

Penelitian ketiga yang lebih relevan dilakukan oleh Veda, dkk. (2022) yang mengimplementasikan sistem kontrol dan monitoring menggunakan ESP32, metode kendali PID, dan platform IoT Blynk [5]. Meskipun secara teknologi sangat mirip, sistem tersebut dirancang untuk pemupukan NPK padat/cair pada media tanam tanah. Karakteristik penyebaran atau dinamika pencampuran pupuk di dalam tanah tentu sangat berbeda dengan sistem sirkulasi air pada tandon nutrisi hidroponik. Sistem pencampuran nutrisi air menuntut respon aktuator yang lebih dinamis untuk menyeimbangkan debit air dan waktu pelarutan pekatan.

Berdasarkan studi literatur dari ketiga penelitian terdahulu, masih terdapat celah penelitian yang perlu disempurnakan. Oleh karena itu, Tugas Akhir ini diusulkan untuk menutupi kelemahan-kelemahan tersebut. Penelitian ini menawarkan kebaruan rancang bangun terapan dengan memadukan keunggulan dari penelitian-penelitian sebelumnya: memanfaatkan ESP32 sebagai pusat kendali ringkas yang terintegrasi langsung dengan platform IoT Blynk, serta menerapkan metode PID untuk mengatur putaran aktuator motor DC secara halus pada tandon air. Integrasi ini diharapkan mampu menciptakan sistem dosing nutrisi larutan yang presisi, stabil, tanpa overshoot yang berlebih, dan dapat dipantau dari mana saja.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Nutrisi Hidroponik dan Parameter *Part Per Million* (PPM)

Hidroponik merupakan metode budidaya pertanian yang tidak menggunakan media tanah, sehingga seluruh kebutuhan nutrisi tanaman disuplai sepenuhnya melalui aliran air [1]. Dalam sistem ini, larutan nutrisi berfungsi sebagai substitusi unsur hara alami tanah yang sangat vital bagi kelangsungan hidup tanaman. Larutan tersebut secara umum mengandung komponen hara esensial yang diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu makronutrien (seperti Nitrogen, Fosfor, dan Kalium) yang dibutuhkan dalam jumlah besar, serta mikronutrien (seperti Besi, Mangan, dan Seng) yang dibutuhkan dalam jumlah kecil namun krusial untuk proses enzimatik fisiologis tanaman [7]. Di lapangan, nutrisi ini umumnya tersedia dalam bentuk pekatan terpisah (seperti larutan AB Mix) yang harus dilarutkan ke dalam tandon air baku dengan takaran yang sangat spesifik.

Untuk mengukur dan merepresentasikan tingkat konsentrasi atau kepekatan larutan nutrisi tersebut, standar satuan yang paling umum digunakan dalam instrumentasi pertanian adalah *Part Per Million* (PPM). Secara definisi, PPM menunjukkan rasio bagian per juta; yang mana ekuivalen dengan 1 miligram padatan mineral yang terlarut di dalam 1 liter pelarut atau air (mg/L). Dalam tinjauan rekayasa elektronik dan instrumentasi, nilai PPM tidak diukur secara langsung berdasarkan massa, melainkan dideduksi dari nilai konduktivitas listrik atau *Electrical Conductivity* (EC) larutan. Mineral nutrisi yang dilarutkan akan terurai menjadi ion-ion bermuatan. Semakin banyak ion nutrisi yang terkandung dalam air, maka semakin tinggi pula daya hantar listrik cairan tersebut, yang secara proporsional akan dikonversi menjadi angka pembacaan PPM oleh sensor [2].

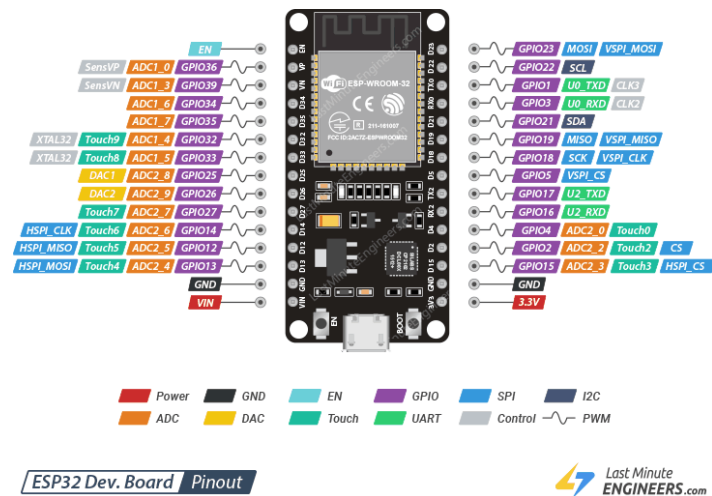
Pengendalian nilai PPM memegang peranan yang sangat fundamental karena setiap jenis tanaman memiliki ambang batas toleransi dan kebutuhan konsentrasi nutrisi yang berbeda-beda pada setiap fase pertumbuhannya (fase vegetatif maupun generatif) [1]. Jika nilai PPM dibiarkan berfluktuasi tanpa pengendalian, proses osmosis pada membran sel akar tanaman akan terganggu. Hal ini menegaskan urgensi perlunya sebuah sistem kontrol otomatis yang mampu

membaca nilai PPM aktual dan secara presisi mengatur penambahan pekatan nutrisi hingga mencapai setpoint yang direkomendasikan secara agronomis.

2.2.2 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler ESP32 merupakan *System on a Chip* (SoC) berbiaya rendah dan hemat daya yang dikembangkan secara komersial oleh Espressif Systems. Perangkat ini diotaki oleh mikroprosesor arsitektur Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 yang mampu beroperasi pada frekuensi clock hingga 240 MHz [8]. Tingginya kecepatan komputasi ini menjadikan ESP32 sangat andal dalam mengeksekusi algoritma matematis yang membutuhkan komputasi cepat dan kontinu, seperti iterasi perhitungan parameter Proportional-Integral-Derivative (PID), tanpa mengalami waktu tunda pemrosesan yang signifikan.

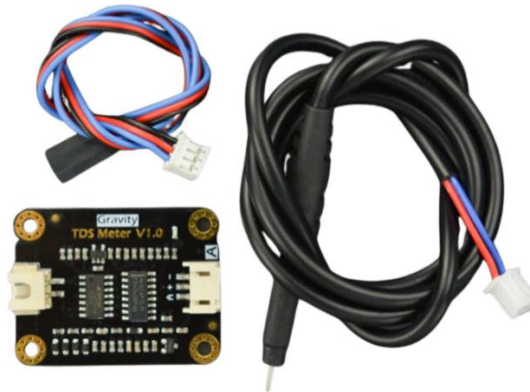
Salah satu keunggulan fundamental ESP32 dibandingkan mikrokontroler generasi sebelumnya adalah keberadaan sistem pemrosesan *dual-core*. Dalam implementasi sistem instrumentasi berbasis *Internet of Things*, arsitektur *dual-core* ini memungkinkan pembagian beban tugas tingkat keras yang sangat efisien. Dalam praktiknya, satu inti prosesor dapat didedikasikan secara eksklusif untuk menangani interupsi dan tugas-tugas kritis perangkat keras seperti membaca sinyal sensor dan memperbarui nilai *Pulse Width Modulation* (PWM) ke driver motor aktuator secara *real-time* sementara inti prosesor lainnya beroperasi secara independen untuk menjaga stabilitas protokol komunikasi Wi-Fi dan sinkronisasi data dengan server IoT [8]. Pemisahan beban kerja ini mencegah terhentinya proses pengendalian aktuator saat mikrokontroler sedang mencari atau mengirimkan data ke jaringan internet.



Gambar 2. 1 Pin ESP32

Selain kapabilitas komputasi tingkat lanjut, ESP32 telah dilengkapi secara on-board dengan modul komunikasi Wi-Fi (standar 802.11 b/g/n) dan Bluetooth. Integrasi komponen nirkabel di dalam satu cip yang sama mengeliminasi kebutuhan akan modul jaringan eksternal, sehingga mengoptimalkan ruang pada perancangan papan sirkuit cetak (PCB). Kelengkapan periferal input/output ESP32 juga sangat menunjang perancangan otomasi industri, meliputi ketersediaan puluhan pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) yang mendukung fitur komunikasi serial (I2C, SPI, UART), *Analog-to-Digital Converter* (ADC), dan pembangkitan sinyal PWM pada hampir seluruh pin digitalnya [8]. Berbagai integrasi teknologi inilah yang menjadikan ESP32 sebagai standar modern dalam perancangan sistem kendali terdistribusi dan jaringan sensor nirkabel.

2.2.3 Sensor *Total Dissolved Solids* (TDS)



Gambar 2. 2 Sensor TDS

Sensor *Total Dissolved Solids* (TDS) merupakan instrumen pengukuran yang berfungsi untuk mendeteksi total konsentrasi partikel padatan terlarut dalam suatu cairan. Secara prinsip fisis, sensor TDS tidak menghitung massa partikel secara langsung, melainkan mengukur konduktivitas listrik atau *Electrical Conductivity* (EC) dari larutan. Ketika sepasang elektroda pada probe sensor dicelupkan ke dalam air tandon nutrisi, tegangan eksitasi diberikan di antara kedua elektroda tersebut. Keberadaan ion-ion mineral dari nutrisi hidroponik yang terlarut akan memfasilitasi aliran arus listrik. Semakin tinggi konsentrasi ion dalam air, semakin besar tingkat konduktivitasnya. Nilai EC ini kemudian dikonversi menjadi estimasi nilai TDS dalam satuan *Part Per Million* (PPM) secara linier [9]. Sinyal keluaran dari modul sensor TDS umumnya berupa sinyal tegangan analog yang berbanding lurus dengan tingkat kepekatan larutan.

Table 2- 1 Spesifikasi Sensor TDS

Input Voltage	3.3 ~ 5.5V
Output Voltage	0 ~ 2.3V
Working Current	3 ~ 6mA
TDS Measurement Range	0 ~ 1000ppm
TDS Measurement Accuracy	10% F.S. (25 °C)

Untuk dapat diproses oleh mikrokontroler digital, sinyal analog dari sensor TDS harus melalui tahapan kuantisasi menggunakan Analog-to-Digital Converter (ADC). Meskipun mikrokontroler ESP32 telah dilengkapi dengan modul ADC internal beresolusi 12-bit, karakteristik pembacaan ADC bawaan tersebut memiliki kelemahan fundamental, yaitu redaman *non-linier* pada rentang tegangan ekstrem (mendekati 0V dan mendekati 3,3V) [8]. Dalam sistem kendali Proportional-Integral-Derivative (PID), presisi nilai umpan balik adalah hal mutlak. Ketidaklinieran atau fluktuasi pembacaan analog sekecil apa pun akan menyebabkan kalkulasi error menjadi tidak akurat, yang berdampak langsung pada respon aktuator pompa yang menjadi tidak stabil.

Guna memastikan keandalan data pembacaan sensor, diperlukan pengkondisian sinyal menggunakan modul ADC eksternal berpresisi tinggi, seperti ADS1115. Modul ADS1115 merupakan konverter analog-ke-digital dengan resolusi 16-bit yang mengonversi sinyal tegangan menjadi data digital untuk dikirimkan ke ESP32 melalui antarmuka komunikasi I2C (*Inter-Integrated Circuit*) [10]. Dengan resolusi 16-bit, modul ini mampu mendeteksi perubahan tegangan mikro yang dihasilkan oleh sensor TDS dengan tingkat presisi dan kelinieran yang jauh lebih baik dibandingkan ADC internal mikrokontroler. Modul ini juga terintegrasi dengan *Programmable Gain Amplifier* (PGA) untuk memperkuat sinyal analog beramplitudo rendah, sehingga meminimalisir gangguan sinyal kelistrikan dan memastikan kalkulasi PID berjalan dengan akurasi maksimal.

2.2.4 Aktuator Pompa Peristaltik Motor DC dan *Driver* Motor L298N

Dalam perancangan sistem dosing cairan kimia atau nutrisi pertanian, pemilihan aktuator pompa yang tepat sangat menentukan keandalan sistem. Aktuator yang digunakan dalam penelitian ini adalah pompa peristaltik. Pompa peristaltik merupakan jenis pompa pemindahan positif (*positive displacement pump*) yang bekerja dengan mekanisme memeras selang fleksibel menggunakan sejumlah roller atau rotor yang berputar [11]. Keunggulan utama dari desain mekanis ini adalah fluida atau pekatan nutrisi (seperti pupuk AB Mix yang bersifat

korosif) hanya bersentuhan dengan dinding bagian dalam selang, dan tidak pernah menyentuh komponen mekanis maupun elektronik dari pompa itu sendiri. Hal ini tidak hanya mencegah kontaminasi pada larutan nutrisi, tetapi juga melindungi komponen motor dari risiko karat dan kerusakan akibat paparan zat kimia.



Gambar 2. 3 Pompa Peristaltik

Aktuasi putaran mekanis pada pompa peristaltik ini digerakkan oleh motor *Direct Current* (DC). Dalam sistem kendali dosing nutrisi, laju aliran penambahan larutan harus dapat diatur secara dinamis untuk mencegah terjadinya *overshoot* pada nilai PPM. Pengaturan laju aliran ini dilakukan dengan mengontrol kecepatan putaran motor DC menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM adalah metode manipulasi lebar pulsa sinyal digital untuk menghasilkan tegangan rata-rata (*average voltage*) analog sintesis. Sinyal digital bersilasi secara cepat antara keadaan logika tinggi (*High*) dan rendah (*Low*). Persentase waktu ketika sinyal berada dalam keadaan *High* dalam satu periode disebut sebagai *Duty Cycle* [12].

Secara matematis, tegangan keluaran rata-rata yang menggerakkan motor DC dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V_{avg} = D \times V_s \quad (2.1)$$

Keterangan:

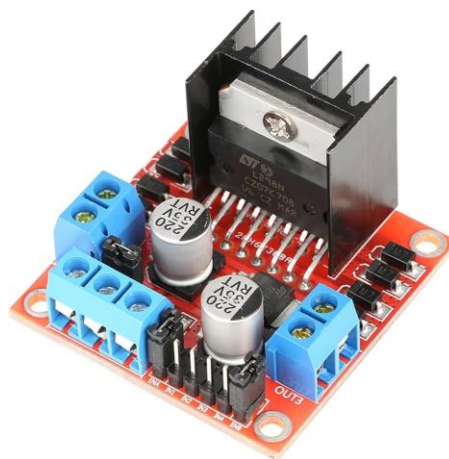
V_{avg} : Tegangan rata-rata keluaran menuju motor (Volt)

D : *Duty Cycle* dalam bentuk desimal (0 hingga 1, atau 0% hingga 100%)

V_s : Tegangan suplai maksimal (Volt)

Nilai *Duty Cycle* ini diperoleh secara dinamis dari hasil kalkulasi algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) di dalam mikrokontroler ESP32. Jika nilai error PPM masih besar, PID akan menghasilkan persentase *Duty Cycle* yang besar sehingga motor berputar cepat. Sebaliknya, saat nilai PPM mendekati setpoint, nilai *Duty Cycle* akan mengecil dan memperlambat putaran motor.

Meskipun ESP32 mampu menghasilkan sinyal PWM yang presisi, mikrokontroler ini tidak dapat digunakan untuk menggerakkan motor DC secara langsung. Pin *General Purpose Input/Output* (GPIO) pada ESP32 hanya mampu mensuplai tegangan 3,3V dengan arus maksimal di kisaran 40 mA, sementara aktuator motor DC umumnya membutuhkan tegangan 12V dan arus yang jauh lebih besar [8]. Oleh karena itu, diperlukan sebuah komponen driver motor L298N. Driver motor ini berfungsi sebagai sakelar daya elektronik yang menerima sinyal kontrol PWM berarus lemah dari ESP32, lalu mengalirkan suplai tegangan dan arus yang besar dari sumber daya eksternal (adaptor) menuju motor DC dengan frekuensi pemutusan yang sesuai dengan sinyal PWM tersebut [12].



Gambar 2. 4 Driver Motor L298N

2.2.5 Sistem Kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID)

Sistem kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan salah satu bentuk sistem kontrol umpan balik (*closed-loop feedback*) yang paling banyak digunakan dalam aplikasi instrumentasi dan otomasi industri. Tujuan utama dari sistem kontrol tertutup adalah meminimalisir nilai kesalahan dengan cara terus-menerus membandingkan nilai keluaran aktual dengan nilai rujukan atau target yang diinginkan [6].

Kontroler PID bekerja dengan menghitung nilai error $e(t)$ yang merupakan selisih antara setpoint dan *Process Variable* secara *real-time*. Nilai error ini kemudian diproses melalui tiga parameter kontrol yang berbeda, yaitu aksi Proporsional K_p , aksi Integral K_i , dan aksi Derivatif K_d . Secara matematis, sinyal control $u(t)$ yang dihasilkan oleh kontroler PID dalam domain waktu dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$u(t)$: Sinyal kontrol yang dikirim ke aktuator

K_p : Konstanta Proporsional

K_i : Konstanta Integral

K_d : Konstanta Derivatif

$e(t)$: Nilai error pada waktu t

t : Waktu sesaat

τ : Variabel integrasi dari waktu 0 hingga t

Setiap parameter konstanta dalam algoritma PID memiliki karakteristik dan pengaruh yang spesifik terhadap respon sistem kendali [6]:

1. Aksi Kontrol Proporsional (K_p)

Aksi proporsional memberikan respon yang berbanding lurus dengan nilai error saat ini. Semakin besar nilai error, semakin besar pula sinyal kontrol yang diberikan oleh kontroler. Penambahan nilai K_p akan mempercepat waktu naik (*rise time*) sehingga aktuator bekerja lebih cepat menuju setpoint. Namun, jika nilai K_p terlalu besar, sistem akan mengalami osilasi dan lonjakan respons yang melampaui batas (*overshoot*). Kendali proporsional murni umumnya masih menyisakan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*).

2. Aksi Kontrol Integral (K_i)

Aksi integral berfungsi untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) yang tidak dapat diselesaikan oleh aksi proporsional. Parameter ini bekerja dengan cara mengakumulasi nilai error dari waktu ke waktu. Jika masih terdapat selisih sekecil apa pun antara nilai aktual dan setpoint, aksi integral akan terus menambah keluaran sinyal kontrol hingga nilai error mencapai angka nol. Meskipun efektif dalam mencapai akurasi absolut, nilai K_i yang terlalu besar dapat menyebabkan respon sistem menjadi lambat dan memperburuk kondisi *overshoot* (fenomena integral windup).

3. Aksi Kontrol Derivatif (K_d)

Aksi derivatif bekerja berdasarkan laju perubahan error. Parameter ini berfungsi sebagai peredam yang memprediksi perilaku sistem di masa depan. Ketika pembacaan nilai sudah mendekati setpoint dengan cepat, aksi derivatif akan memberikan efek pengereman dengan mengurangi sinyal keluaran, sehingga fenomena *overshoot* dapat diminimalisir dan stabilitas sistem meningkat. Akan tetapi, kontrol derivatif sangat sensitif terhadap gangguan sinyal frekuensi tinggi pada sensor.

Pada rancang bangun sistem dosing nutrisi ini, sinyal $u(t)$ hasil perhitungan PID akan dikonversi menjadi nilai *Pulse Width Modulation*. Nilai PWM ini yang bertugas mengatur kecepatan putar motor DC pada pompa peristaltik. Dengan

penalaan (*tuning*) nilai K_p , K_i , dan K_d yang tepat, motor akan berputar cepat saat nilai PPM jauh dari target, dan kecepatannya akan melambat secara proporsional saat mendekati target hingga akhirnya berhenti tepat pada nilai setpoint tanpa kelebihan pekatan nutrisi.

2.2.6 Parameter Performansi Sistem Kendali

Untuk mengevaluasi kualitas respon suatu sistem kendali closed-loop terhadap perubahan setpoint, diperlukan sejumlah parameter kuantitatif yang dapat diukur secara objektif dari kurva respon sistem terhadap waktu [6]. Parameter-parameter ini menjadi acuan utama dalam menilai apakah suatu kontroler—baik PID konvensional maupun PID adaptif—telah bekerja secara optimal. Empat parameter performansi yang umum digunakan dalam analisis sistem kendali transien adalah waktu naik (*rise time*), lonjakan maksimum (*maximum overshoot*), dan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) [6].

a. Waktu Naik (*Rise Time*)

Rise time didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk pertama kali mencapai nilai target yang telah ditetapkan, dihitung sejak sinyal kendali pertama kali diberikan kepada aktuator [6]. Semakin kecil nilai *rise time*, semakin cepat sistem merespon perubahan setpoint. Namun, *rise time* yang terlalu singkat pada umumnya berbanding lurus dengan risiko munculnya *overshoot* yang lebih besar, sehingga kedua parameter ini seringkali bersifat *trade-off*.

b. Lonjakan Maksimum (*Maximum Overshoot*)

Overshoot merupakan persentase penyimpangan puncak nilai keluaran sistem terhadap nilai setpoint setelah sistem melewati titik target untuk pertama kalinya [6]. Secara matematis, persentase overshoot dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$M_p = \frac{C_{peak} - C_{setpoint}}{C_{setpoint}} \times 100 \quad (2.3)$$

Keterangan:

M_p : Persentase *overshoot* (%)

C_{peak} : Nilai puncak (maksimum) yang dicapai oleh sistem

$C_{setpoint}$: Nilai setpoint yang ditargetkan

Nilai *overshoot* yang besar mengindikasikan bahwa sistem cenderung agresif dan berisiko melampaui batas toleransi yang diperbolehkan, yang pada sistem dosing nutrisi dapat berakibat pada kondisi overdosing larutan.

c. Kesalahan Keadaan Tunak (*Steady-State Error*)

Steady-state error merupakan selisih absolut antara nilai setpoint dengan nilai rata-rata keluaran sistem setelah kondisi tunak tercapai [6]. Parameter ini dirumuskan sebagai:

$$e_{ss} = |C_{setpoint} - C_{ss}| \quad (2.4)$$

Keterangan:

e_{ss} : Kesalahan keadaan tunak

C_{ss} : Nilai rata-rata keluaran sistem pada kondisi tunak

Ketiga parameter di atas digunakan secara konsisten pada BAB V untuk membandingkan kinerja antara skema PID manual dan PID adaptif yang dikembangkan pada penelitian ini.

2.2.7 Kendali Adaptif dan Penjadwalan Gain (*Gain Scheduling*)

Kontroler PID konvensional bekerja dengan nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d yang bersifat tetap (statis) sepanjang waktu operasi [6]. Pendekatan ini memiliki

kelemahan mendasar ketika diterapkan pada plant dengan dinamika non-linear atau kondisi operasi yang berubah-ubah, seperti pada sistem dosing nutrisi hidroponik. Nilai konstanta yang optimal untuk merespon error besar belum tentu optimal untuk meredam osilasi ketika nilai PPM sudah mendekati setpoint. Akibatnya, penalaan (*tuning*) manual seringkali menghasilkan kompromi antara kecepatan respon (*rise time*) dan kestabilan (*overshoot*), sebagaimana ditunjukkan pada hasil pengujian PID manual.

Kendali adaptif (*adaptive control*) merupakan kelas metode kontrol yang mampu menyesuaikan parameter kontrolernya secara otomatis berdasarkan kondisi atau perilaku sistem yang sedang diamati, alih-alih menggunakan nilai konstan yang ditetapkan di awal [17]. Salah satu bentuk kendali adaptif yang paling sederhana untuk diimplementasikan pada mikrokontroler dengan sumber daya komputasi terbatas adalah *gain scheduling*. Metode ini bekerja dengan memetakan nilai gain kontroler terhadap suatu variabel acuan tertentu (*scheduling variable*) dalam penelitian ini adalah besaran error dan laju perubahan error menggunakan aturan atau fungsi pemetaan yang telah ditentukan terlebih dahulu (*heuristik*), tanpa memerlukan pemodelan matematis plant yang kompleks [18].

Penerapan gain scheduling pada sistem kendali proses telah terbukti efektif dalam berbagai riset terdahulu. Mukhaitir, dkk. (2010) menerapkan skema gain scheduling pada sistem pengendalian suhu cairan dan membuktikan bahwa metode ini menghasilkan indeks performansi ITAE (*Integral of Time Absolute Error*) yang lebih rendah dibandingkan kontroler PID tunggal, terutama pada kondisi terjadinya gangguan beban secara mendadak [16]. Temuan ini memperkuat justifikasi penggunaan pendekatan serupa pada penelitian ini, di mana sistem dosing nutrisi juga harus merespons gangguan eksternal (seperti penambahan air murni pada tandon) secara cepat dan stabil.

Pada sistem yang dikembangkan, logika heuristik gain scheduling diterapkan dengan prinsip sebagai berikut:

1. Ketika nilai error besar (kondisi PPM masih jauh dari setpoint), konstanta Proporsional (K_p) dan Derivatif (K_d) diperbesar secara dinamis agar sistem merespon dengan cepat.
2. Ketika nilai error mengecil dan mendekati kondisi tunak, konstanta Integral (K_i) diperbesar untuk melakukan koreksi halus (*fine-trimming*) terhadap sisa kesalahan, sementara K_p dan K_d diperkecil untuk mencegah osilasi berlebih.

Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk memperoleh keunggulan gabungan dari dua kondisi yang secara tradisional saling bertentangan pada PID statis: respon yang cepat pada fase transien dan pendaratan yang halus pada fase mendekati steady-state.

2.2.8 *Internet of Things (IoT), Platform Blynk, dan Google Spreadsheet*

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi informasi yang memungkinkan instrumen fisik atau perangkat keras tertanam (*embedded system*) untuk saling terhubung, berkomunikasi, dan bertukar data melalui infrastruktur jaringan internet tanpa memerlukan intervensi manusia secara langsung [13]. Dalam arsitektur sistem kendali dan instrumentasi modern, IoT memfasilitasi integrasi antara lapisan persepsi (sensor dan mikrokontroler) dengan lapisan aplikasi. Integrasi ini memberikan keuntungan signifikan berupa eliminasi batasan jarak geografis, sehingga proses pemantauan parameter lapangan dan pengendalian aktuator dapat dilakukan dari mana saja.

Untuk menjembatani komunikasi data *real-time* antara perangkat keras ESP32 dan pengguna akhir, penelitian ini memanfaatkan ekosistem Blynk. Blynk adalah platform IoT berwujud *Platform as a Service (PaaS)* yang dirancang secara khusus untuk menyederhanakan perancangan antarmuka sistem mikrokontroler ke aplikasi bergerak [14]. Arsitektur jaringan Blynk secara fundamental ditopang oleh tiga komponen utama: aplikasi pengguna (*Blynk App*) sebagai antarmuka visual (*dashboard*), peladen cloud (*Blynk Server*) sebagai pemroses lalu lintas data, serta

pustaka perangkat keras (*Blynk Library*). Melalui peladen ini, mikrokontroler ESP32 mengirimkan variabel data secara kontinu, sekaligus menerima perintah kendali balik (*closed-loop*), seperti perubahan parameter setpoint PID yang diinputkan pengguna langsung melalui antarmuka aplikasi di ponsel pintar.

Di samping pemantauan *real-time* yang difasilitasi oleh Blynk, sistem instrumentasi industri juga membutuhkan sistem perekaman data historis (data logging) untuk keperluan evaluasi dan analisis kinerja jangka panjang. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, sistem ini diintegrasikan dengan layanan komputasi awan Google Spreadsheet. Google Spreadsheet bertindak sebagai basis data tak terstruktur yang menyimpan riwayat operasional sistem, seperti stempel waktu (*timestamp*), nilai PPM dari sensor, dan nilai aktuasi PWM motor [15]. Secara teknis, ESP32 diprogram untuk mengirimkan paket data secara berkala menggunakan protokol komunikasi HTTP POST menuju *Google Apps Script* (GAS) berupa Web App URL. Skrip penerima pada server Google tersebut kemudian akan mengekstrak data JSON yang dikirimkan oleh mikrokontroler dan menyisipkannya ke dalam baris-baris sel pada dokumen spreadsheet secara otomatis. Kombinasi antara Blynk untuk kontrol taktis dan Google Spreadsheet untuk penyimpanan historis menghasilkan arsitektur sistem pemantauan otomasi yang sangat tangguh.

2.2.9 Dosing Nutrisi

Dosing nutrisi adalah proses penambahan larutan nutrisi pekat (stok) ke dalam tandon air baku dengan takaran yang terukur dan terkendali, sehingga konsentrasi larutan akhir sesuai dengan kebutuhan tanaman [7]. Pada sistem hidroponik, konsentrasi larutan dinyatakan dalam satuan PPM atau EC sebagaimana dijelaskan pada subbab 2.2.1. Dengan demikian, tujuan dosing bukan sekadar menambahkan nutrisi, melainkan mengatur jumlah nutrisi yang masuk agar nilai PPM larutan berada pada setpoint yang ditentukan. Karena konsentrasi di dalam tandon terus berubah akibat penyerapan oleh tanaman, penguapan, dan penambahan air, dosing perlu dilakukan berulang kali selama masa budidaya.

Pekatan nutrisi yang umum digunakan berupa AB Mix, yaitu dua larutan stok terpisah (stok A dan stok B). Pemisahan ini dilakukan karena beberapa senyawa, misalnya garam kalsium pada stok A dan garam fosfat atau sulfat pada stok B, dapat bereaksi dan membentuk endapan apabila dicampur pada konsentrasi pekat [7]. Kedua stok baru bercampur setelah masing-masing diencerkan di dalam tandon, sehingga pompa dosing stok A dan stok B dioperasikan bersamaan dengan takaran yang sama. Apabila konsentrasi larutan melampaui target, penurunan konsentrasi hanya dapat dilakukan dengan menambahkan air baku (pengenceran), karena nutrisi yang sudah terlarut tidak dapat diambil kembali. Oleh karena itu, sistem dosing perlu mampu bekerja dua arah, yaitu menaikkan konsentrasi melalui pompa stok dan menurunkannya melalui pompa air baku.

a. Metode dosing

Berdasarkan cara pengambilan keputusannya, metode dosing dapat dikelompokkan seperti pada Tabel 2. 2. Sistem yang dirancang pada Tugas Akhir ini termasuk kelompok terakhir, yaitu dosing otomatis *closed-loop* proporsional yang memanfaatkan kendali PID dan PWM.

Table 2- 2 Perbandingan Metode Dosing Nutrisi

Metode	Prinsip kerja	Kelebihan	Keterbatasan
Manual	Operator mengukur PPM/EC dengan alat portabel, lalu menakar dan menuang stok nutrisi	Sederhana, tanpa perangkat tambahan	Bergantung pada operator, tidak kontinu, rentan <i>human error</i>
Otomatis <i>open-loop</i> (waktu atau volume tetap)	Pompa aktif selama waktu tertentu tanpa membaca kondisi larutan	Mudah diimplementasikan	Tidak menyesuaikan kondisi tandon (penguapan, serapan tanaman)
Otomatis <i>closed-loop</i> On/Off	Pompa menyala penuh saat PPM di bawah setpoint dan mati saat target tercapai	Memiliki umpan balik dari sensor	Aksi kasar; sisa cairan di selang dan tunda pencampuran memicu <i>overshoot</i>
Otomatis <i>closed-loop</i> proporsional (PID dan PWM)	Kecepatan pompa diatur sebanding dengan error PPM	Dosis halus, <i>overshoot</i> kecil, presisi tinggi	Membutuhkan sensor, aktuator yang dapat diatur kecepatannya, dan algoritma kendali

b. Perhitungan takaran dosing

Secara prinsip, takaran stok yang diperlukan dapat diperkirakan melalui kesetimbangan massa zat terlarut. Misalkan larutan di dalam tandon bervolume V dengan konsentrasi awal C_0 , kemudian ditambahkan stok bervolume V_d yang berkonsentrasi C_s sehingga dicapai konsentrasi target C_t . Kesetimbangan massa $C_t(V + V_d) = C_0V + C_sV_d$ menghasilkan volume stok yang diperlukan:

$$V_d = V \times \frac{C_t - C_0}{C_s - C_t} \quad (2.5)$$

Untuk menurunkan konsentrasi menggunakan air baku (konsentrasi mendekati nol), volume air yang diperlukan adalah:

$$V_a = V \times \frac{C_0 - C_t}{C_t} \quad (2.6)$$

Keterangan:

V_d, V_a	: Volume stok nutrisi dan volume air baku yang ditambahkan (L)
V	: Volume larutan di dalam tandon (L)
C_0, C_t	: Konsentrasi awal dan konsentrasi target larutan (ppm)
C_s	: Konsentrasi efektif stok nutrisi, gabungan stok A dan B (ppm)

Kedua persamaan tersebut berlaku dengan asumsi larutan tercampur homogen, konsentrasi bersifat aditif, dan volume yang ditambahkan jauh lebih kecil daripada volume tandon. Sebagai ilustrasi, pada tandon 5 liter dengan $C_0 = 400$ ppm, $C_t = 600$ ppm, dan stok hipotetis $C_s = 20.000$ ppm, dibutuhkan $V_d = 5 \times (600 - 400)/(20.000 - 600) \approx 0,0515$ L atau sekitar 51,5 mL. Sebaliknya, untuk menurunkan larutan dari 700 ppm menjadi 600 ppm pada tandon yang sama diperlukan $V_a = 5 \times (700 - 600)/600 \approx 0,833$ L air baku. Nilai C_s pada contoh ini hanya ilustrasi karena bergantung pada merek dan tingkat pengenceran pekatan.

Perhitungan di atas hanya memberikan perkiraan besaran dosis. Pada praktiknya dosis tidak diberikan sekali jalan (*open-loop*) karena asumsi ideal tidak terpenuhi, misalnya akibat tunda pencampuran, ketidaktepatan sensor, dan perubahan konsentrasi oleh tanaman. Oleh sebab itu, sistem memberikan dosis secara bertahap dengan umpan balik dari sensor TDS hingga target tercapai.

c. Laju dosing dan pengaturan pompa

Pompa peristaltik merupakan pompa pemindahan positif sehingga debit yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan putar rotor [11], sedangkan kecepatan motor DC berbanding lurus dengan tegangan rata-rata yang diberikan melalui PWM (Persamaan 2.1). Dengan demikian, debit dosing dapat dinyatakan secara pendekatan sebagai berikut, dan volume yang dipompa selama m siklus kendali adalah jumlah debit setiap siklus dikalikan periode kendali:

$$Q \approx k_p \times D \quad (2.7)$$

$$V_d \approx \sum_{k=1}^m Q_k \times \Delta t \quad (2.8)$$

Keterangan:

Q	: Debit pompa (mL/detik)
k_p	: Konstanta pompa, diperoleh dari kalibrasi debit (mL/detik)
D	: Duty cycle PWM dalam bentuk desimal (0 hingga 1)
Δt	: Periode kendali (detik)

Pada duty cycle yang sangat kecil, motor DC tidak berputar karena tegangan rata-rata belum mampu mengatasi gesekan statis (zona mati). Akibatnya hubungan antara debit dan duty cycle tidak linier pada daerah tersebut, sehingga kalibrasi debit pada beberapa nilai duty cycle diperlukan untuk memperoleh takaran yang akurat.

d. Karakteristik dinamis dan tantangan dosing

Beberapa faktor membuat dosing nutrisi sulit dikendalikan secara presisi:

- Waktu tunda (dead time). Larutan perlu waktu untuk mengalir melalui selang dan tercampur di dalam tandon sebelum sensor merasakan perubahan konsentrasi. Jika pompa tetap menyala penuh selama waktu tunda tersebut, konsentrasi akan melampaui target [19].
- Pengaruh suhu. Konduktivitas larutan bergantung pada suhu, sehingga pembacaan PPM perlu dikompensasi suhu sebagaimana diterapkan pada program pembacaan sensor (subbab 4.3.3).
- Noise pengukuran. Probe TDS menghasilkan pembacaan yang berfluktuasi sehingga perlu difilter, misalnya dengan *median filter*.
- Gangguan proses. Penguapan, penyerapan nutrisi oleh tanaman, dan penambahan air mengubah konsentrasi di luar kendali sistem.
- Nonlinearitas aktuator. Zona mati motor DC dan perubahan kondisi selang memengaruhi debit pompa.

Tantangan tersebut menjadi alasan penggunaan kendali PID berbasis PWM dengan zona toleransi (*deadband*) pada sistem ini. Pompa diperlambat secara bertahap ketika PPM mendekati target, dan berhenti ketika PPM berada di dalam

zona toleransi sehingga pompa tidak terus-menerus hidup dan mati (*chattering*) akibat noise pengukuran.

e. Penerapan dosing pada sistem

Penerapan konsep dosing pada alat yang dibuat dirangkum pada Tabel 2. 3.

Table 2- 3 Penerapan Konsep Dosing pada Sistem

Aspek dosing	Implementasi pada sistem
Besaran yang dikendalikan	Nilai PPM (TDS) larutan nutrisi, dibaca sensor TDS dengan kompensasi suhu dari sensor DS18B20
Target	Setpoint PPM yang dimasukkan pengguna melalui web lokal atau aplikasi Blynk
Penambah konsentrasi	Pompa A (stok A) dan pompa B (stok B), aktif bersamaan dengan PWM yang sama saat error melebihi deadband
Penurun konsentrasi	Pompa C (air baku), aktif saat PPM melampaui setpoint dan error di bawah $-$ deadband
Pengaturan laju dosing	Duty cycle PWM (1 kHz, 8 bit) yang berasal dari keluaran PID adaptif
Zona toleransi	<i>Deadband</i> : seluruh pompa berhenti apabila selisih PPM dengan setpoint berada di dalam zona toleransi
Periode kendali	Sensor dibaca dan PID dihitung setiap 2 detik

2.2.10 Sinyal Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) adalah teknik pengendalian daya dengan memodulasi lebar pulsa pada sinyal digital berbentuk gelombang persegi yang berfrekuensi tetap [12]. Sinyal PWM hanya memiliki dua keadaan, yaitu logika tinggi (*HIGH*) dan logika rendah (*LOW*). Dalam satu periode T , sinyal berada pada keadaan *HIGH* selama T_{on} dan *LOW* selama T_{off} , sehingga $T = T_{on} + T_{off}$. Periode dan frekuensi sinyal dihubungkan oleh persamaan berikut, sedangkan perbandingan antara lama keadaan *HIGH* dan periode disebut *duty cycle*:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.9)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T} \times 100\% \quad (2.10)$$

Keterangan:

T : Periode sinyal PWM (detik)

f : Frekuensi sinyal PWM (Hz)

T_{on} : Lama sinyal berada pada keadaan HIGH dalam satu periode (detik)

D : Duty cycle (%)

Pada beban induktif seperti motor DC, arus motor tidak berubah seketika mengikuti setiap pulsa karena adanya induktansi belitan dan inersia mekanis rotor. Motor merespons nilai rata-rata tegangan, yaitu $V_{avg} = D \times V_s$ sebagaimana Persamaan (2.1). Semakin besar duty cycle, semakin besar tegangan rata-rata dan kecepatan putar motor. Pada duty cycle 100% sinyal selalu HIGH sehingga motor menerima tegangan penuh, sedangkan pada duty cycle 0% sinyal selalu LOW sehingga motor berhenti. Keunggulan PWM dibandingkan pengaturan tegangan secara linier adalah rugi daya yang kecil, karena komponen pensaklaran hanya bekerja pada keadaan jenuh (*on*) atau putus (*off*) [12].

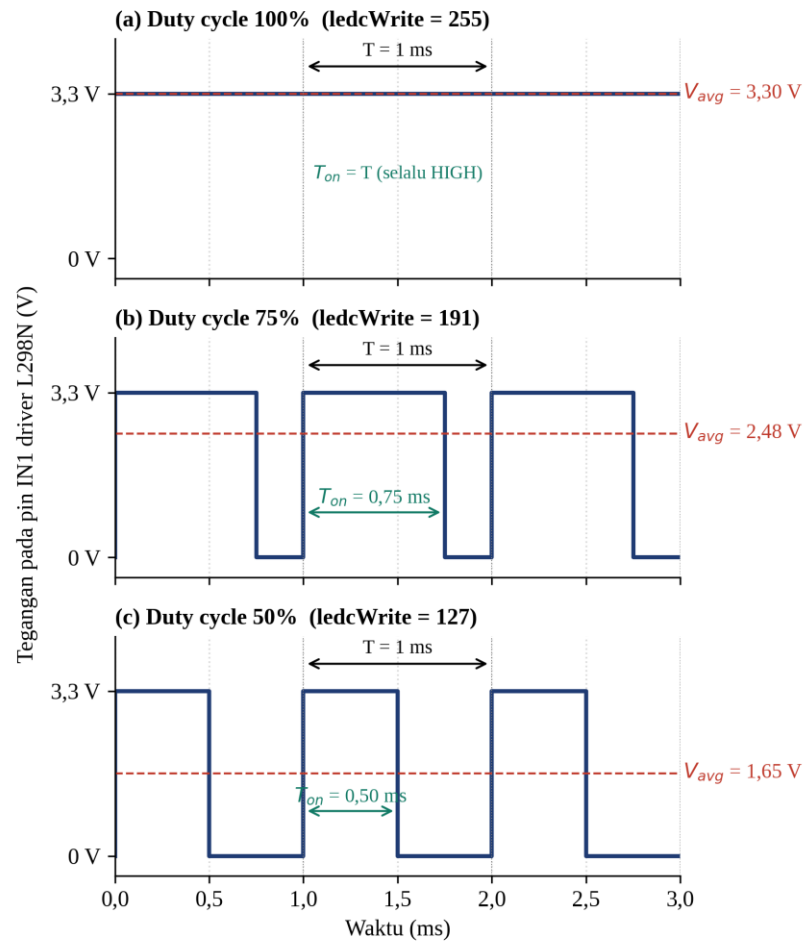
ESP32 membangkitkan sinyal PWM melalui periferal LEDC (*LED Control*) yang memiliki 16 kanal independen dengan resolusi duty cycle hingga 16 bit [8]. Setiap kanal dikonfigurasi dengan frekuensi dan resolusi, kemudian dihubungkan ke pin GPIO keluaran. Jika resolusi yang digunakan adalah N bit, duty cycle diatur melalui bilangan bulat $n = 0, 1, \dots, 2^N - 1$ dan dapat didekati dengan persamaan:

$$D \approx \frac{n}{2^N - 1} \times 100\% \quad (2.11)$$

Pada sistem ini digunakan frekuensi $f = 1$ kHz ($T = 1$ ms) dan resolusi $N = 8$ bit, sehingga duty cycle dapat diatur pada 256 tingkat ($n = 0$ hingga 255) dengan ukuran langkah sekitar 0,39% atau sekitar 3,9 μ s dalam domain waktu. Nilai $n = 255$ menghasilkan sinyal HIGH kontinu (duty cycle 100%), sedangkan $n = 0$ menghasilkan sinyal LOW kontinu (duty cycle 0%). Frekuensi 1 kHz berada pada

rentang yang umum dipakai untuk pengaturan kecepatan motor DC berdaya kecil. Frekuensi yang terlalu rendah membuat putaran motor bergetar, sedangkan frekuensi yang terlalu tinggi menambah rugi pensaklaran dan interferensi elektromagnetik. Switching arus motor tetap dapat menimbulkan noise yang merambat ke jalur lain, misalnya jalur I2C LCD, sebagaimana ditangani pada subbab 4.3.6.

Pada rangkaian alat, pin *enable* modul L298N dijumpa tetap ke 5 V sehingga driver selalu aktif. Sinyal PWM diberikan ke pin masukan IN1 (pompa A dan C) serta IN3 (pompa B), sedangkan pin IN2 dan IN4 dikunci pada logika LOW. Dengan konfigurasi ini keluaran driver mengikuti bentuk sinyal PWM pada pin masukan, sehingga tegangan rata-rata pada motor sebanding dengan duty cycle. Gambar 2. 5 memperlihatkan bentuk sinyal PWM pada pin masukan driver untuk duty cycle pompa 100%, 75%, dan 50%.



Gambar 2. 5 Sinyal PWM pada Pin Masukan Driver untuk Duty Cycle (a) 100%, (b) 75%, dan (c) 50%

Pada duty cycle 100% ($n = 255$), sinyal bernilai HIGH (3,3 V) secara kontinu sehingga motor menerima tegangan penuh. Pada duty cycle 75% ($n = 191$), sinyal HIGH selama 0,75 ms dan LOW selama 0,25 ms dalam setiap periode 1 ms, dengan tegangan rata-rata pada pin sebesar 2,48 V. Pada duty cycle 50% ($n = 127$), sinyal HIGH dan LOW masing-masing selama 0,5 ms dengan tegangan rata-rata 1,65 V. Bentuk gelombang pada Gambar 2. 5 digambarkan berdasarkan parameter PWM yang diprogram pada ESP32, yaitu frekuensi 1 kHz dan resolusi 8 bit. Parameter setiap kondisi dirangkum pada Tabel 2. 4.

Table 2- 4 Parameter Sinyal PWM pada Duty Cycle 100%, 75%, dan 50%

Duty cycle	Nilai n (ledcWrite)	T_{on} (ms)	T_{off} (ms)	V_{avg} pada pin IN1 (V)	V_{avg} ideal pada motor, V_s = 12 V (V)
100%	255	1,00	0,00	3,30	12,0
75%	191	0,75	0,25	2,48	9,0
50%	127	0,50	0,50	1,65	6,0

Nilai n pada Tabel 2. 4 diperoleh dari keluaran kontroler PID adaptif yang dikonversi menjadi bilangan 0 hingga 255, sebagaimana diuraikan pada subbab 3.4.6.