

Sistem Kontrol dan Monitoring Pemupukan NPK Tanaman dengan Mikrokontroler ESP32

Jalu Veda, Muhammad Rivai, dan Suwito

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: muhammad_rivai@ee.its.ac.id

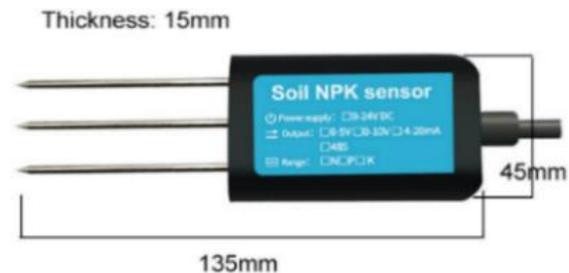
Abstrak—Maksimalnya hasil produksi dari agrikultur utamanya bergantung pada nutrisi makronutrien, berupa Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Pemberian pupuk NPK yang berlebihan atau kurang menyebabkan produksi menjadi berkurang yang berdampak hasil produk agrikultur dengan kualitas yang relatif rendah. Dampak-dampak ini bisa diantisipasi dengan pemberian pupuk yang cukup dalam jumlah yang sesuai dan tepat sasaran pada tanaman yang dimaksud. Untuk itu dalam penelitian ini telah dikembangkan sebuah sistem yang dapat melakukan pemupukan secara otomatis pada tanaman. Sistem ini terdiri dari mikrokontroler ESP32, sensor NPK JXCT, dan aktuator berupa pompa peristaltik. Mikrokontroler digunakan untuk mengontrol, membaca dan mengirimkan data kadar NPK menuju Blynk. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan sensor untuk membaca kadar pupuk dalam tanah dan pompa peristaltik untuk memberikan pupuk NPK cair pada tanah. Metode kontrol PID digunakan agar dapat memberikan kadar pupuk seakurat mungkin. Monitoring dilakukan melalui *smartphone* menggunakan aplikasi Blynk. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem kontrol ini mampu menjaga kadar pupuk sesuai *setpoint* dalam rentang error pupuk N ± 2 mg/kg; pupuk P ± 2 mg/kg; dan pupuk K ± 3 mg/kg. Sistem monitoring dapat memberikan informasi kadar pupuk NPK yang ditampilkan pada aplikasi Blynk dan memberi notifikasi kepada pengguna apabila kadar pupuk kurang atau melebihi *setpoint*.

Kata Kunci—Blynk, Kontrol PID, Mikrokontroler ESP32, Pemupukan NPK.

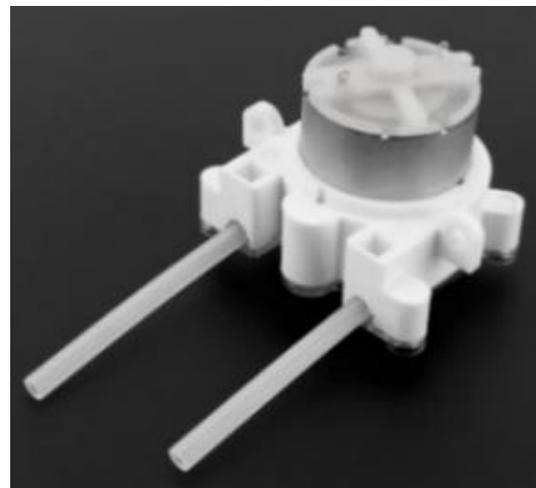
I. PENDAHULUAN

AGRIKULTUR merupakan sektor yang sangat penting di Indonesia. Populasi telah berubah secara drastis pada beberapa tahun terakhir. Menurut FAO, populasi dunia diprediksi akan bertambah 10 milyar pada tahun 2050. Hal ini beriringan dengan faktor lain seperti perubahan iklim di mana agrikultur bertanggung jawab terhadap 13,5% emisi global, membuat dibutuhkannya metode yang efisien pada ranah agrikultur [1]. Nutrisi yang tepat sangat penting untuk pertumbuhan dan produksi dari tanaman. Kemaksimalan hasil produk dari agrikultur utamanya bergantung pada makronutrien tanah berupa Nitrogen (N), Fosfor (P), dan Kalium (K). Pemberian pupuk yang berlebihan atau kurang menyebabkan berkurangnya produksi dan menghasilkan produk agrikultur dengan kualitas yang relatif rendah [2]. Manajemen pemberian pupuk yang kurang efisien memberikan kendala yang besar pada lingkungan dan kesehatan manusia [3]. Penggunaan pupuk nitrogen dan fosfor yang berlebihan akan menyebabkan polusi air dalam tanah, sehingga petani harus memberikan perhatian dengan baik terkait proses pengairan dan pemberian nutrisi pada tanaman [4].

Selain itu, di Indonesia, produksi NPK PT Pupuk Indonesia (Persero) diproyeksi turun seiring naiknya harga bahan baku. Mahalnya harga bahan baku dapat menggerus produksi NPK



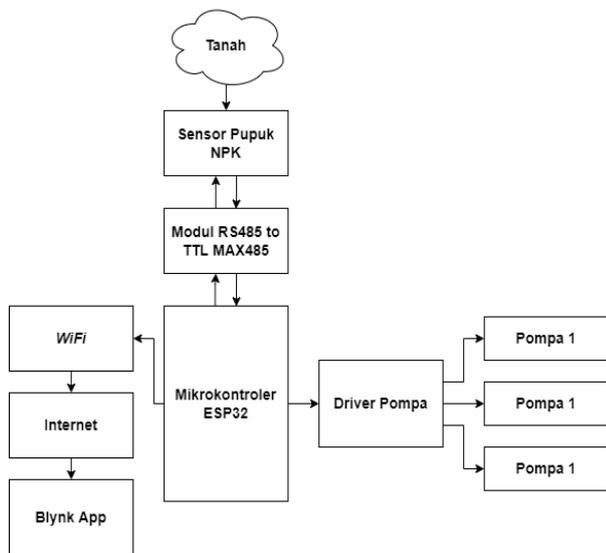
Gambar 1. Modul sensor NPK JXCT.



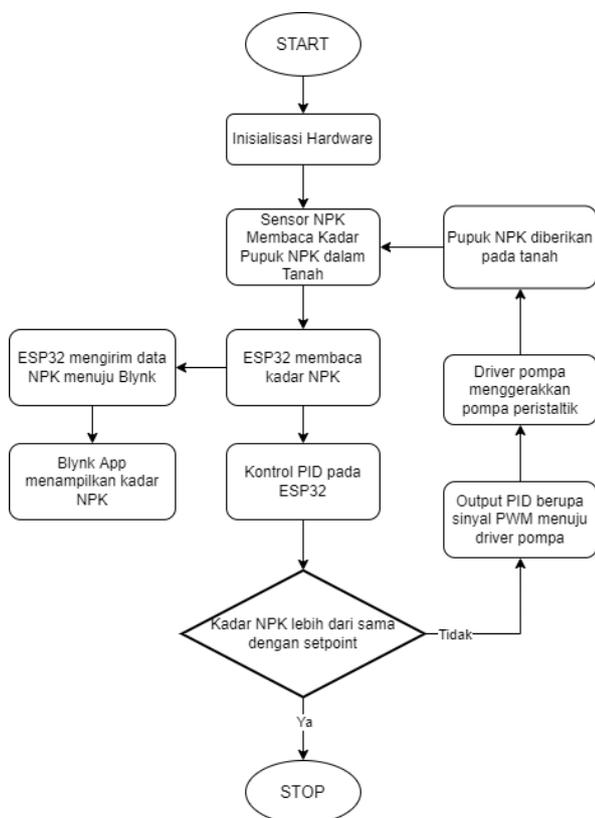
Gambar 2. Modul pompa peristaltik.

menjadi 2,4 juta ton hingga 2,6 juta ton per tahun. Tak hanya menggerus produksi, lonjakan harga pupuk dan bahan baku pupuk di dunia juga ikut mengerek harga pupuk non subsidi di dalam negeri. Di kabupaten Timika, Papua, petani-petani sayur dan buah melaporkan harga pupuk meningkat drastis dengan harga pupuk non-subsidi yang sebelumnya Rp.570.000 per karung sekarang mencapai Rp.800.000 per karung. Sehingga untuk menghemat biaya akibat penggunaan pupuk maka diperlukan suatu cara agar penggunaan pupuk seefisien mungkin.

Sistem pemupukan otomatis akan mengurangi penggunaan pupuk yang berlebihan. Sistem pemupukan yang otomatis akan menghemat waktu dan sumber daya karena nutrisi berupa pupuk dan air diberikan ketika benar-benar dibutuhkan dan dengan jumlah yang tepat. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini disusun untuk perancangan sistem kontrol dan monitoring pemupukan NPK tanaman menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan sensor NPK untuk membaca kadar NPK dalam tanah dan pompa motor DC untuk memberikan pupuk NPK cair pada tanah. Mikrokontroler ESP32 digunakan untuk mengontrol, membaca dan mengirimkan data kadar NPK menuju *cloud* sehingga pengguna dapat memonitor kadar NPK dari mana saja secara *real time* menggunakan *smartphone*.



Gambar 3. Diagram blok sistem kontrol.

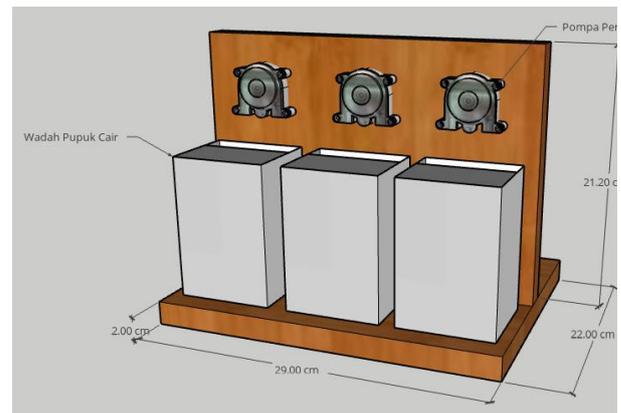


Gambar 4. Flowchart sistem kontrol.

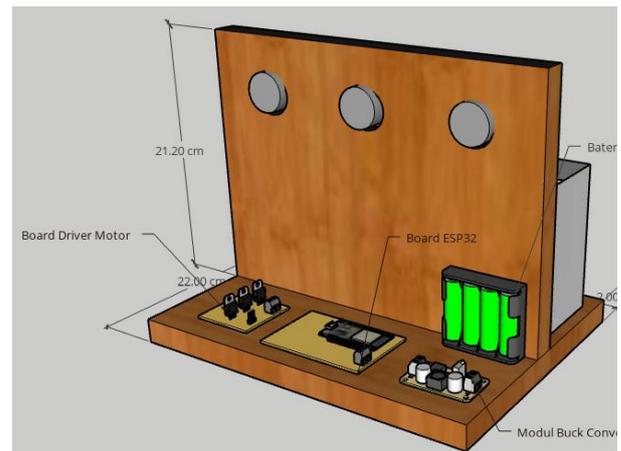
II. TEORI

A. Pupuk NPK

Makronutrien merupakan elemen penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Pada sistem alami, ketersediaan makronutrien bukan pembatas pertumbuhan tanaman dikarenakan adanya mekanisme daur ulang alami. Namun, ketersediaan makronutrien merupakan masalah pada agrikultur modern karena tanah yang digunakan secara terus-menerus. Dari perspektif manajemen tanaman pangan, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) merupakan tiga makronutrien utama dan oleh sebab itu sering digunakan sebagai pupuk [5].



Gambar 5. Desain 3D alat tampak depan.

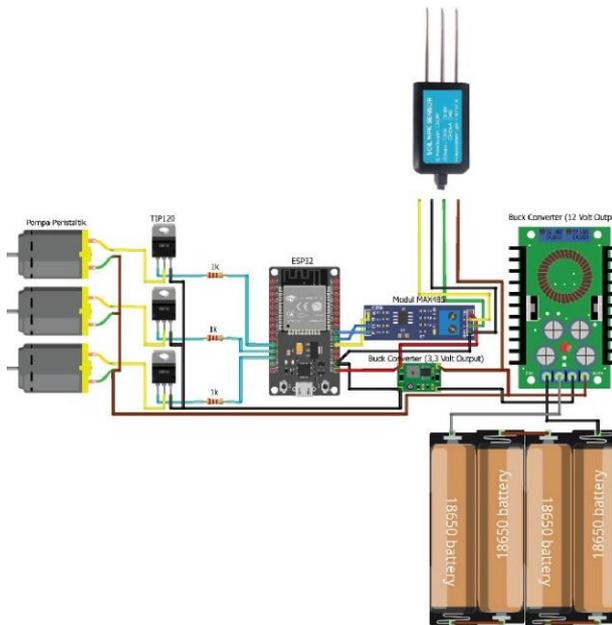


Gambar 6. Desain 3D alat tampak belakang.

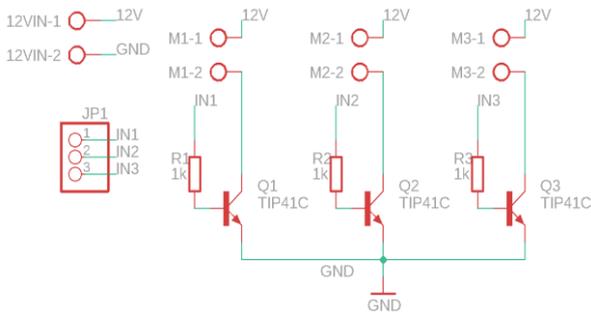
Pemupukan yang berlebihan atau kurangnya air dapat menyebabkan fenomena *fertilizer burn*, yaitu kerusakan atau bahkan kematian pada tanaman. Meskipun pupuk digunakan untuk membantu pertumbuhan tanaman, namun pupuk yang berlebihan menghasilkan garam, nitrogen, atau amonia yang berlebihan. Nutrisi-nutrisi ini jika berlebihan akan mengganggu kemampuan tanaman untuk berfotosintesis dan respirasi seluler, menyebabkan bekas “kebakaran” pada daun tanaman. Pemupukan yang berlebihan juga menyebabkan pencemaran air dalam tanah. Hanya Sebagian dari pupuk berbasis nitrogen yang diserap oleh tanaman. Sisanya terkumpul pada tanah. Level nitrat di atas 10 mg/L pada air dalam tanah dapat menyebabkan sindrom *blue baby*, yakni penyakit yang mempengaruhi transportasi oksigen dalam darah yang menyebabkan perubahan kulit bayi menjadi biru [6].

B. Sensor NPK JXCT

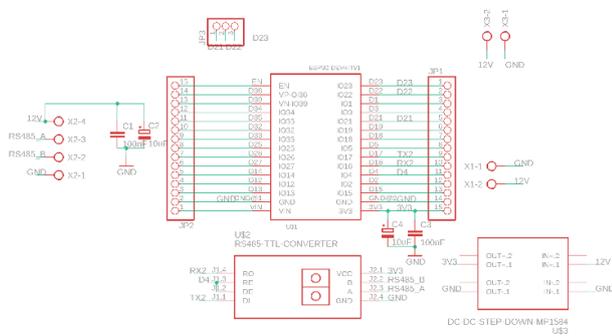
Sensor NPK JXCT merupakan sensor yang dapat mengukur makronutrien dalam tanah berupa Nitrogen, Fosfor, dan Kalium (NPK) dan perubahannya secara *real-time*, ditunjukkan pada Gambar 1. Sensor ini dapat melakukan pengukuran dalam durasi yang sangat lama, tahan terhadap korosi, dan tahan terhadap air. Sensor ini memiliki dua metode pengukuran, yakni metode permukaan dan metode penguburan. Pada metode permukaan, sensor ini ditancapkan pada permukaan tanah dalam posisi tegak vertikal dan harus dipastikan bahwa sensor tidak mudah goyang. Metode ini dapat mengukur dalam area yang terbatas. Dalam metode penguburan, harus digali lubang terlebih dahulu dengan diameter lebih 20 cm. Sensor



Gambar 7. Rangkaian elektronik sistem kontrol pemupukan.



Gambar 8. Rangkaian driver pompa.

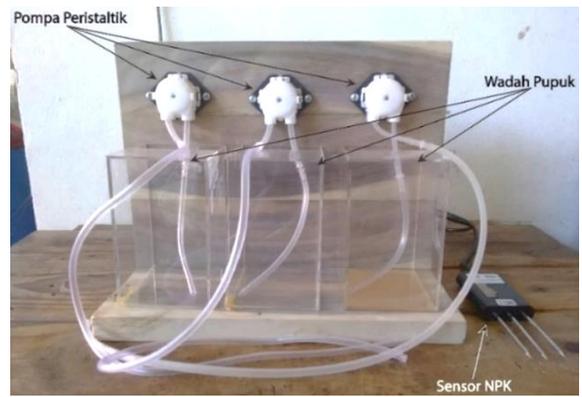


Gambar 9. Rangkaian board utama.

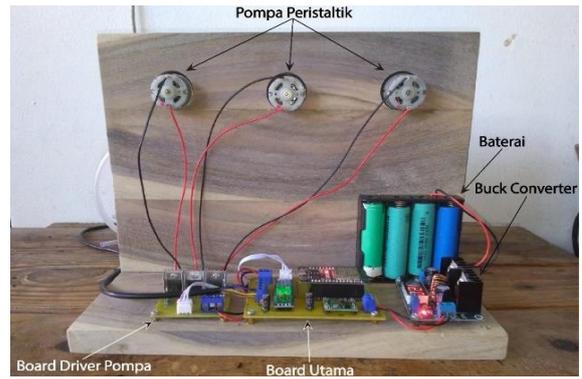
kemudian ditancapkan pada dinding lubang secara horizontal. Sensor ini bekerja dengan cara mengukur elektrokonduktivitas tanah terlebih dahulu, kemudian mengestimasi kadar NPK berdasarkan elektrokonduktivitas yang terukur.

C. Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang memiliki banyak fitur dengan Wi-Fi terintegrasi dan konektivitas Bluetooth untuk aplikasi yang luas. ESP32 merupakan mikrokontroler *open source* berbasis *board* input/output. ESP32 memiliki 36 General Purpose Input/Output (GPIO), di antaranya, sejumlah 14 terhubung dengan *Analog to Digital Converter* (ADC) sehingga memungkinkan untuk menghubungkan suatu sensor analog. Ketika tegangan 3,3 volt dihubungkan ke salah satu pin ADC ini, nilai yang terbaca adalah 4095. Tegangan suplai yang dibutuhkan ESP32 adalah 2,2 volt



Gambar 10. Realisasi alat tampak depan.



Gambar 11. Realisasi alat tampak belakang.

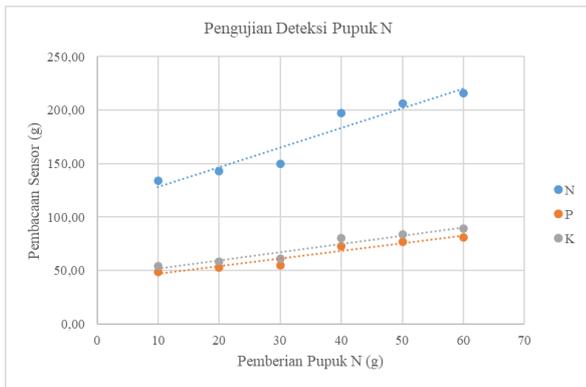


Gambar 12. Implementasi alat pada media tanam.

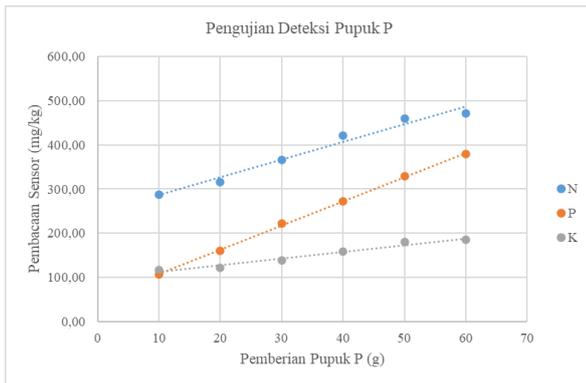
sampai dengan 3,6 volt. ESP32 memiliki ADC dengan resolusi 12-bit dan DAC dengan resolusi 8-bit. ESP32 memiliki pin untuk melakukan komunikasi I2C, SPI, dan serial (Rx/Tx). Semua pin pada ESP32 kecuali pin yang dapat menerima input saja (GPIO 34, GPIO 35, GPIO 36, dan GPIO 39) dapat mengeluarkan output PWM [7].

D. Internet of Things (IoT)

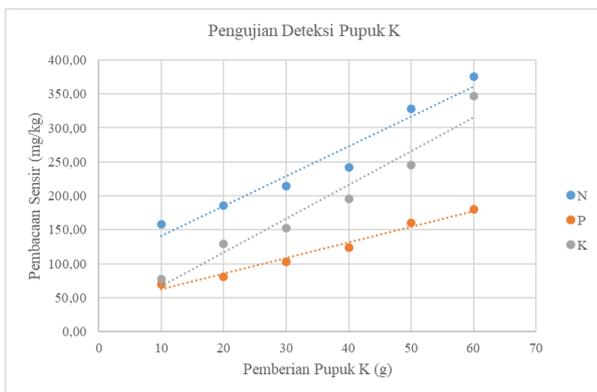
Secara umum Internet of Things (IoT) adalah suatu konsep menghubungkan perangkat pintar dengan perangkat pintar yang lain baik digunakan untuk bertukar data maupun untuk keperluan pengendalian melalui internet [8]. Dunia IoT mampu memberikan kemampuan untuk berbagi informasi dan melakukan aksi secara otonom terhadap dunia nyata/fisik dan mampu memicu proses-proses serta dapat membuat layanan dengan atau tanpa campur tangan manusia [9]. Umumnya, arsitektur IoT terdiri dari lima buah *layer*, yaitu, *perception layer*, *network layer*, *middleware layer*, *application layer*, dan *business layer*.



Gambar 13. Hasil pengujian deteksi pupuk N.



Gambar 14. Hasil pengujian deteksi pupuk P.



Gambar 15. Hasil pengujian deteksi pupuk K.

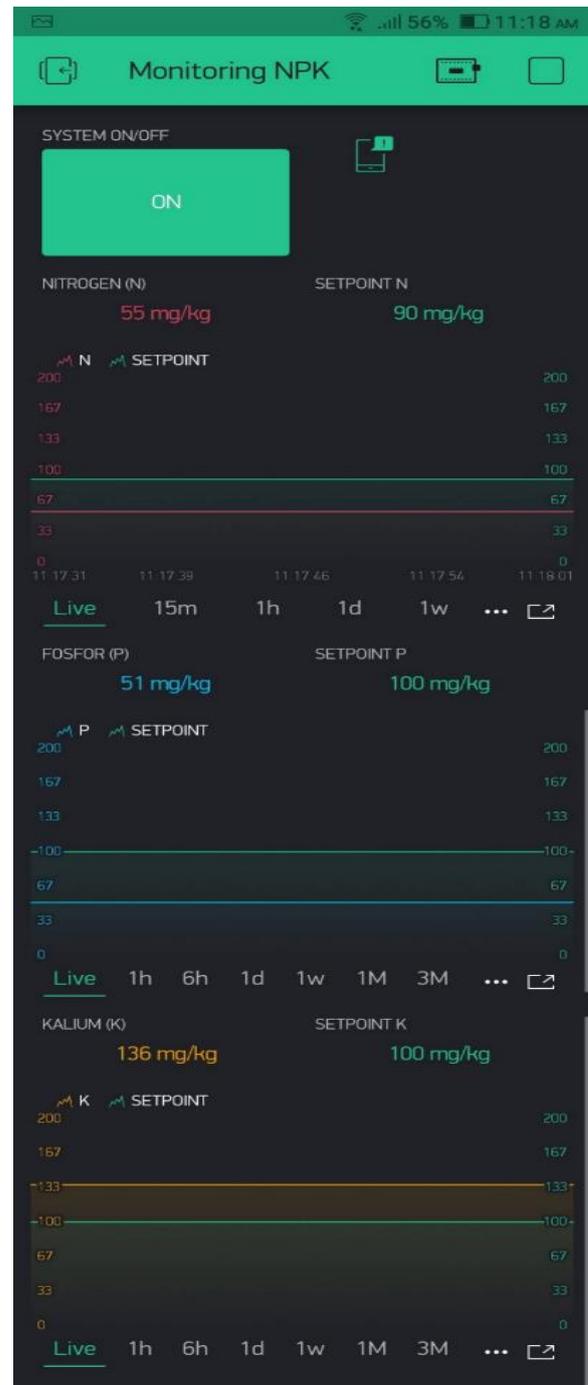
E. Kontrol PID

Kontrol PID merupakan mekanisme kontrol loop yang banyak digunakan dalam permasalahan teknik. Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya, masing-masing cara dapat bekerja sendiri maupun gabungan diantaranya kontrol P, PI, dan PID [10]. Persamaan 1 menunjukkan sinyal kontrol dalam domain waktu, sedangkan Persamaan 2 menunjukkan fungsi transfer kontroler PID dalam domain Laplace.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

dimana $u(t)$ dan $e(t)$ secara berturut-turut merupakan sinyal kontrol dan sinyal error. Dalam domain Laplace, fungsi transfer keseluruhan digambarkan dengan persamaan:

$$TF_{PID} = C(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (2)$$

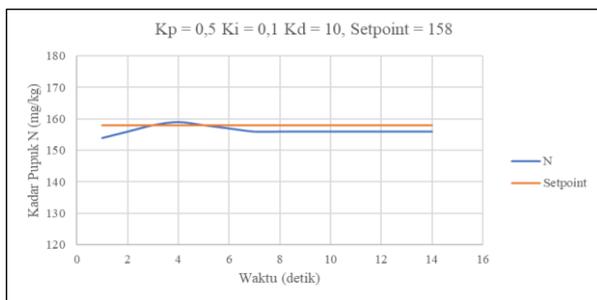


Gambar 16. Tampilan aplikasi Blynk.

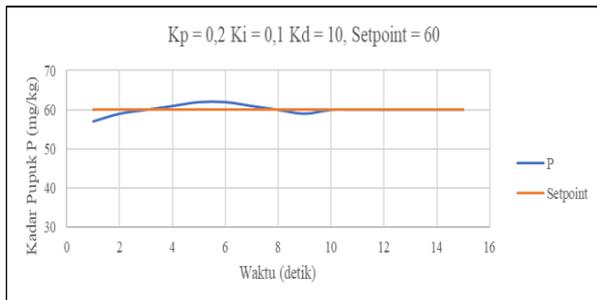
Respons sistem dioptimasi dengan melakukan tuning tiga buah parameter PID, yakni K_p , K_i , dan K_d . Karakteristik sistem yang biasa dilakukan optimasi adalah *settling time*, *rise time*, *steady state error*, dan *overshoot* [11].

F. Pompa Peristaltik

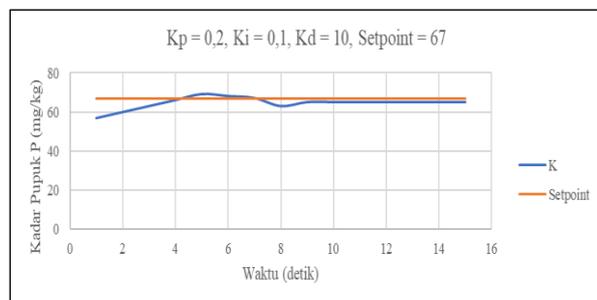
Pompa air bekerja berdasarkan prinsip fisika yang berbeda-beda, seperti menggunakan piston, diafragma, sentrifugal, dan gigi pompa. Pompa peristaltik, seperti yang terlihat pada Gambar 2, merupakan jenis yang unik. Nama peristaltik berasal dari ilmu pengobatan dimana peristalsis merupakan penyusutan otot-otot organ pencernaan secara gradual sehingga terjadi perpindahan konten yang akan dicerna. Pompa peristaltik menciptakan pergerakan aliran zat cair dalam selang fleksibel dengan melakukan kontraksi pada dinding yang menyelimuti selang. Pompa peristaltik bekerja



Gambar 17. Grafik respons sistem kontrol pupuk N dengan $K_p = 0,5$, $K_i = 0,1$, $K_d = 10$ dan $setpoint = 158$.



Gambar 18. Grafik respons sistem kontrol pupuk P dengan $K_p = 0,2$, $K_i = 0,1$, $K_d = 10$ dan $setpoint = 60$.



Gambar 19. Grafik respons sistem kontrol pupuk N dengan $K_p = 0,2$, $K_i = 0,1$, $K_d = 10$ dan $setpoint = 67$.

dengan cara menggerakkan suatu rotor yang mengandung rol berjumlah dua atau lebih. Rol-rol ini menekan selang, sehingga terciptanya tekanan pada selang. Karakteristik utama dari pompa peristaltik adalah debitnya sangat bergantung pada bagian selang yang sudah terisi cairan dan menggerakkan cairan lebih dalam pada selang [12]. Tidak seperti pompa konvensional pada umumnya, pada pompa peristaltik ini cairan yang dipompa tidak terkena bagian logam dari pompa sehingga cairan tidak terkontaminasi [13].

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Diagram Blok Sistem

Keseluruhan sistem terdiri dari ESP32, sensor NPK, modul RS485 to TTL MAX485, 3 buah pompa DC, aplikasi Blynk, dan 3 buah tangki yang menampung pupuk cair N, P, dan K. Setiap pompa terhubung dengan sebuah tangki penampung pupuk cair. Sensor NPK ditancapkan pada tanah. Data NPK yang terbaca oleh mikrokontroler dikirimkan menuju server Blynk untuk ditampilkan pada *smartphone*. Apabila kadar N, P, atau K kurang dari setpoint, maka sistem kontrol akan bertindak sesuai besarnya error terhadap *setpoint* dan akan mengirimkan sinyal kontrol berupa PWM kepada aktuator berupa pompa DC agar dapat mencapai nilai yang diinginkan. Blok diagram dari sistem serta *flow chart* ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

B. Perancangan Hardware Keseluruhan

Komponen-komponen yang ditaruh di lokasi pemupukan antara lain adalah mikrokontroler ESP32, modul *buck converter*, modul MAX485, driver pompa, 3 buah pompa peristaltik, 3 buah wadah pupuk, dan baterai. Desain 3D alat ditunjukkan dalam Gambar 5 dan Gambar 6 dengan dimensi sebesar 29 cm x 22 cm x 21,2 cm.

C. Perancangan Sistem Elektronik

Perancangan ini mencakup diagram alat secara keseluruhan dan catu daya yang digunakan. Komponen elektronik yang digunakan pada penelitian ini beserta dengan rangkaiannya dapat dilihat pada Gambar 7. Catu daya yang digunakan merupakan baterai Li-ion 4S dengan tegangan nominal 14,8V. Sensor NPK dan pompa peristaltik membutuhkan daya dengan tegangan 12 volt. Sedangkan ESP32 dan modul MAX485 menggunakan daya dengan tegangan 3,3 volt. Sehingga dibutuhkan dua modul *buck converter* yang berbeda. Modul *buck converter* XL4015 menghasilkan tegangan 12 volt dan modul *buck converter* MPSJ27 menghasilkan tegangan 3,3 volt. Sensor NPK menggunakan protokol komunikasi RS485. Rangkaian PCB driver pompa dan rangkaian PCB utama dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

D. Perancangan Sistem Monitoring Menggunakan Blynk

Sistem monitoring dibuat pada aplikasi Blynk. Perancangan ini mencakup apa saja yang dimonitor, bagaimana menyajikannya, dan *widget* apa saja yang digunakan. Untuk mengetahui kadar pupuk NPK dan setpoint pupuk saat ini, maka digunakan *labeled value widget* yang dapat menampilkan kadar pupuk dan setpoint saat ini beserta satuannya (mg/kg). Untuk mengetahui bagaimana kadar pupuk terhadap waktu digunakan *superchart widget*. Sedangkan apabila performa alat tidak mencukupi, maka sistem monitoring dapat memberikan peringatan berupa notifikasi melalui *notification widget*.

E. Perancangan Kontrol PID

Perancangan program kontrol PID meliputi pembacaan sensor yang sudah dibuat sebelumnya dan pembuatan persamaan PID pada mikrokontroler ESP32. Output kontrol PID berupa sinyal PWM dengan resolusi 10 bit dan frekuensi sinyal 500 Hz yang akan diteruskan menuju driver pompa untuk menggerakkan pompa peristaltik.

IV. HASIL DAN ANALISA DATA

A. Realisasi Alat

Realisasi alat yang digunakan pada penelitian ini seperti ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Ukuran dan dimensi alat sesuai dengan tahap perancangan 3D. Contoh implementasi alat pada media tanam dapat dilihat pada Gambar 12.

B. Pengujian Sistem Deteksi Pupuk

Pengujian sistem deteksi pupuk meliputi pembacaan kadar NPK dalam air 300 ml yang ditambahkan dengan pupuk dengan kadar tertentu serta jenis pupuk lain, yakni pupuk magnesium untuk mengetahui bagaimana respons sensor terhadap pupuk selain NPK. Pupuk yang digunakan merupakan pupuk granula yang mudah larut dalam air.

Adapun pupuk nitrogen yang digunakan adalah pupuk urea dengan kandungan N 46%, pupuk fosfor yang digunakan merupakan pupuk superfosfat dengan kandungan P 46%, dan pupuk kalium yang digunakan merupakan pupuk kalium klorida dengan kandungan K 46%. Pupuk-pupuk ini diujikan satu per satu dengan dilarutkan dalam air tawar 300 ml dengan massa pupuk yang divariasikan, yakni 10 gram, 20 gram, 30 gram, 40 gram, 50 gram, dan 60 gram. Kemudian akan diamati bagaimana linieritas sensor terhadap masing-masing pupuk. Adapun hasil pengujian ini diberikan pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sensor tetap memberikan hasil pembacaan pupuk lainnya meskipun hanya satu jenis pupuk yang diujikan. Namun, hasil pembacaan sensor pada pupuk yang diujikan menghasilkan pembacaan sensor yang lebih linier pada jenis pupuk itu sendiri dan hasil yang kurang linier pada jenis pupuk lainnya.

C. Pengujian Sistem Monitoring Menggunakan Blynk

Pengujian sistem monitoring menggunakan Blynk meliputi pengiriman data menuju Blynk App dan memastikan apakah *widget* Blynk App berhasil menampilkan data pembacaan sensor NPK. Aplikasi Blynk berhasil menampilkan data pembacaan sensor, *setpoint* masing-masing pupuk NPK, dan menampilkan kadar pupuk NPK terhadap waktu. Selain itu, aplikasi Blynk berhasil memberikan notifikasi berupa peringatan ketika pupuk kurang dari atau lebih dari *setpoint* dalam kurun waktu 1 jam. Hasil ini dapat dilihat pada Gambar 16.

D. Pengujian Sistem Kontrol Pemupukan

Pengujian dilakukan dengan cara menancapkan sensor NPK pada tanah dimana tanaman berada. Adapun *setpoint* yang digunakan adalah 158 mg/kg untuk pupuk N, 60 mg/kg untuk pupuk P, dan 67 mg/kg untuk pupuk K. Untuk mendapatkan nilai parameter PID yang cocok dengan error maksimal ± 5 mg/kg, maka dilakukan metode tuning.

Pada pemupukan jenis N, sistem kontrol mampu menjaga kadar pupuk pada *setpoint* 158 mg/kg dengan *steady state error* 2 mg/kg. Adapun grafik respons sistem dapat dilihat pada Gambar 17. Pada pemupukan jenis P, sistem kontrol mampu menjaga kadar pupuk pada *setpoint* 60 mg/kg tanpa *steady state error*. Grafik respons sistem dapat dilihat pada Gambar 18. Sedangkan pada kontrol pemupukan jenis K, sistem kontrol mampu menjaga kadar pupuk pada *setpoint* 67 mg/kg dengan *steady state error* 2 mg/kg. Adapun grafik respons sistem dapat dilihat pada Gambar 19.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dibuat alat sistem kontrol dan monitoring pemupukan NPK tanaman yang terdiri dari

mikrokontroler ESP32, sensor NPK JXCT, modul konversi RS485 to TTL MAX485, dan pompa peristaltik. Sistem kontrol ini menggunakan metode PID agar pupuk dalam tanah yang diperlukan oleh tanaman seakurat mungkin. Monitoring dilakukan dengan bantuan aplikasi Blynk sehingga dapat diamati melalui *smartphone* secara *real-time* dari mana saja. Sistem kontrol PID yang telah dibuat mampu menjaga kadar pupuk pada *setpoint* yang telah ditentukan dalam rentang error pupuk N maksimal ± 2 mg/kg, pupuk P ± 2 mg/kg, dan pupuk K ± 3 mg/kg. Sistem monitoring menggunakan Blynk dapat menampilkan kadar pupuk, grafik kadar pupuk terhadap waktu, dan tombol menyalakan dan mematikan sistem. Selain itu, sistem monitoring dapat memberi notifikasi pada *smartphone* pengguna apabila kadar pupuk kurang atau lebih dari yang seharusnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Mashumah, M. Rivai, and A. N. Irfansyah, "Nutrient Film Technique based Hydroponic System Using Fuzzy Logic Control," in *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*, pp. 387–390, 2018. doi: 10.1109/ISITA.2018.8711201.
- [2] R. Madhumathi, T. Arumuganathan, and R. Shruthi, "Soil NPK and Moisture Analysis Using Wireless Sensor Networks," in *11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies*, pp. 1–6, 2020. doi: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225547.
- [3] C. Joseph, I. Thirunavuakarasu, A. Bhaskar, and A. Penujuru, "Automated Fertigation System for Efficient Utilization of Fertilizer and Water," in *Int. Conf. Technol. Electr. Eng.*, pp. 1–6, 2017. doi: 10.1109/ICITEED.2017.8250474.
- [4] A. Oberoi, S. Basavaraju, and S. Lekshmi, "Effective Implementation of Automated Fertilization Unit Using Analog pH Sensor and Arduino," in *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, pp. 1–5, 2017. doi: 10.1109/ICCIC.2017.8524170.
- [5] F. R. Kulcheski, R. Córrea, I. A. Gomes, J. C. de Lima, and R. Margis, "NPK macronutrients and microRNA homeostasis," *Front. Plant Sci.*, vol. 6, pp. 1–19, 2015. doi: 10.3389/fpls.2015.00451.
- [6] C. J. Rosen and B. P. Horgan, "Preventing Pollution Problems from Lawn and Garden Fertilizers," University of Minnesota, 2005.
- [7] N. Cameron, "Electronics Projects with the ESP8266 and ESP32: Building Web Pages, Applications, and WiFi Enabled Devices," Edinburgh, UK: Apress, 2020.
- [8] A. Wijaya and M. Rivai, "Monitoring dan kontrol sistem irigasi berbasis iot menggunakan banana PI," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 2, pp. 288–292, 2018.
- [9] D. Schoder, "Introduction to the Internet of Things," *Internet of Things A to Z: Technologies and Applications*, 1st ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [10] P. D. Wijaya, M. Rivai, and Tasripan, "Rancang bangun mesin pemotong styrofoam 3 axis menggunakan hot cutting pen dengan kontrol PID," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 2, pp. A766–770, 2017.
- [11] A. Khalid, K. Zeb, and A. Haider, "Conventional PID, Adaptive PID, and Sliding Mode Controllers Design for Aircraft Pitch Control," in *International Conference on Engineering and Emerging Technologies*, pp. 1–6, 2019.
- [12] M. Stork and D. Mayer, "Peristaltic pump with magnetoelastic drive," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 5, pp. 1–4, 2018.
- [13] N. Dey, U. Mondal, and A. Sengupta, "Modified Repetitive Controller for Disturbance Rejection of Peristaltic Pump," in *International Conference on Opto-Electronics and Applied Optics*, pp. 1–5, 2019.