

Integrasi Modul RF 2,4 GHz Pada Sistem Minimum ATmega328P dan Analisis Performa Komunikasi

Erik Agustian Yulanda^{1*}, Dea Junia²

^{1,2}Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pamulang, Kota Tangerang Selatan, Indonesia

Email: ¹*dosen02636@unpam.ac.id , ²deajunia27@gmail.com

(* : coresponding author)

Abstrak—Komunikasi nirkabel berdaya rendah semakin menjadi kebutuhan penting dalam sistem kendali dan pemantauan skala kecil, khususnya pada perangkat berbasis mikrokontroler yang memerlukan konsumsi energi minimal dengan tetap mempertahankan jangkauan dan keandalan yang memadai. Mikrokontroler ATmega328P banyak digunakan dalam aplikasi embedded; namun, konfigurasi standarnya tidak menyediakan kemampuan komunikasi Radio Frequency (RF) secara bawaan. Keterbatasan ini mendorong pengembangan sistem minimum yang mampu mendukung komunikasi nirkabel jarak dekat secara efisien. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, modul RF nRF24L01 berfrekuensi 2,4 GHz diintegrasikan ke dalam sistem minimum ATmega328P, disertai perancangan rangkaian regulasi daya, antarmuka pemrograman FTDI, serta jalur komunikasi yang kompatibel dengan berbagai sensor. Evaluasi kinerja dilakukan melalui pengujian jangkauan, analisis stabilitas transmisi, pengukuran latensi transfer data, serta analisis konsumsi daya pada kondisi dalam ruangan dan luar ruangan dengan variasi jarak serta hambatan fisik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komunikasi tetap stabil pada jarak 5–15 meter di dalam ruangan dan 1–20 meter di luar ruangan, dengan latensi rata-rata sebesar 271,1 ms. Konsumsi daya berada pada rentang 14,2 hingga 31,8 mA, bergantung pada mode operasi. Integrasi modul RF berhasil meningkatkan kemampuan komunikasi ATmega328P serta memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan perangkat Internet of Things (IoT) dan sistem otomasi jarak dekat.

Kata Kunci: ATmega328P; nRF24L01; Sistem Minimum; Komunikasi Radio Frekuensi; Mikrokontroler.

Abstract—Low-power wireless communication has become increasingly essential in small-scale control and monitoring systems, especially in microcontroller-based devices that require minimal energy consumption while maintaining adequate range and reliability. The ATmega328P microcontroller is widely used in embedded applications; however, its standard configuration does not provide built-in Radio Frequency (RF) communication capabilities. This limitation necessitates the development of a minimum system capable of supporting efficient short-range wireless communication. To address this need, a 2.4 GHz nRF24L01 RF module was integrated into an ATmega328P minimum system, accompanied by the design of a power regulation circuit, an FTDI programming interface, and communication pathways compatible with various sensors. Performance evaluation was carried out through range testing, transmission stability assessment, data-transfer latency measurement, and power-consumption analysis under both indoor and outdoor conditions with variations in distance and physical obstructions. The results indicate that communication remained stable at distances of 5–15 meters indoors and 1–20 meters outdoors, with an average latency of 271.1 ms. Power consumption ranged from 14.2 to 31.8 mA, depending on the mode of operation. The integration of the RF module successfully enhances the communication capability of the ATmega328P and provides a strong foundation for the development of IoT devices and short-range automation systems.

Keywords: ATmega328P; nRF24L01; Minimum System; Radio Frequency Communication; Microcontroller.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan perangkat elektronik berbasis mikrokontroler semakin mendorong kebutuhan akan sistem komunikasi nirkabel yang hemat daya, andal, dan mudah diimplementasikan. Berbagai aplikasi seperti sistem monitoring lingkungan, *smart home*, robotika, dan perangkat *Internet of Things* (IoT) menuntut media komunikasi jarak pendek yang mampu mentransmisikan data secara stabil dengan konsumsi daya minimal. Dalam konteks tersebut, mikrokontroler ATmega328P menjadi salah satu *platform* yang paling banyak digunakan karena kemudahan pemrograman, ketersediaan modul pendukung, serta efisiensi daya yang baik. Namun demikian, ATmega328P tidak memiliki fitur komunikasi Radio Frekuensi (RF) terintegrasi sehingga dibutuhkan perangkat tambahan untuk mendukung komunikasi nirkabel (Mude et al., 2021).

Teknologi RF yang beroperasi pada pita frekuensi 2,4 GHz banyak digunakan dalam sistem embedded berdaya rendah karena menawarkan jangkauan yang sesuai untuk aplikasi jarak pendek, tingkat interferensi yang dapat ditangani, serta protokol komunikasi yang ringan (Nizma'urrahmi et al., 2022). Modul nRF24L01 merupakan salah satu transceiver yang banyak digunakan dalam sistem tersebut, karena memiliki konsumsi daya rendah, mendukung komunikasi dua arah, serta mampu beroperasi pada kecepatan data hingga 2 Mbps. Meski demikian, integrasi modul ini ke dalam sistem minimum ATmega328P memerlukan desain perangkat keras yang tepat, mencakup pengaturan catu daya, antarmuka pemrograman, serta konfigurasi jalur komunikasi agar dapat berfungsi secara optimal (Choeri, 2019) (Af'idah et al., 2014).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menggunakan nRF24L01 untuk berbagai aplikasi, seperti sistem telemetri, monitoring lingkungan, serta pengiriman data jarak pendek pada robotika. Namun, sebagian besar penelitian lebih berfokus pada implementasi aplikatif tanpa mengulas secara mendalam performa komunikasi, kestabilan transmisi, pengaruh penghalang, maupun konsumsi daya modul ketika diintegrasikan langsung pada

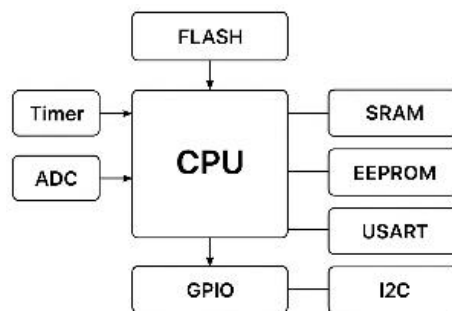
sistem minimum ATmega328P. Selain itu, kajian mengenai pengaruh kondisi lingkungan baik dalam ruangan maupun luar ruangan terhadap jangkauan dan latensi komunikasi masih terbatas (Muhendra et al., 2021).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan kajian terstruktur mengenai integrasi modul RF 2,4 GHz pada sistem minimum ATmega328P beserta analisis performa komunikasinya. Penelitian ini menyajikan perancangan perangkat keras meliputi regulator daya, modul pemrograman FTDI, serta integrasi antarmuka nRF24L01. Selanjutnya dilakukan pengujian jangkauan, stabilitas transmisi, latensi pengiriman data, dan konsumsi daya pada berbagai kondisi lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi pengembangan perangkat IoT serta sistem otomasi skala kecil yang membutuhkan komunikasi nirkabel yang efisien.

2. STUDI LITERATUR

2.1 Mikrokontroller ATmega328P

ATmega328P adalah mikrokontroler 8-bit berbasis arsitektur AVR yang banyak digunakan dalam sistem embedded karena memiliki konsumsi daya rendah, kemudahan pemrograman, dan dukungan perangkat keras yang luas. Mikrokontroler ini memiliki 32 KB Flash, 2 KB SRAM, 1 KB EEPROM, serta 23 pin *input/output* yang dapat dikonfigurasi sebagai digital I/O, PWM, atau ADC (Arvin & Rusindiyanto, 2022).

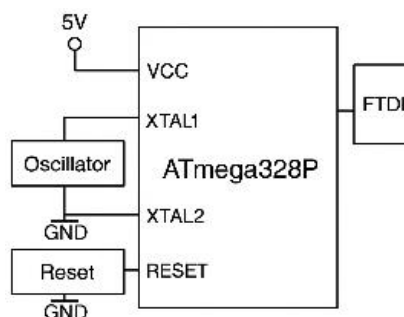


Gambar 1. Arsitektur Atmega328P

ATmega328P memiliki berbagai antarmuka komunikasi seperti USART, SPI, dan I2C yang memungkinkan integrasi dengan berbagai sensor dan modul eksternal. Dalam penelitian ini, antarmuka SPI dimanfaatkan untuk menghubungkan ATmega328P dengan modul RF nRF24L01 (Chafid & Zulkifli, 2021).

2.2 Sistem Minimum ATmega328P

Sistem minimum merupakan konfigurasi dasar mikrokontroler yang memungkinkan perangkat bekerja secara mandiri tanpa board tambahan. Sistem minimum ATmega328P umumnya terdiri atas: Catu daya 5 V atau 3,3 V, Osilator kristal, Rangkaian reset, Konektor pemrograman (ISP atau FTDI) (Al Hafiz & Erlinda, 2020).



Gambar 2. Skema Sistem Minimum Atmega32P

Desain sistem minimum yang baik memastikan stabilitas operasi mikrokontroler dan kompatibilitas dengan perangkat eksternal seperti sensor, LCD, dan modul RF. Pada penelitian ini, sistem minimum dirancang agar mendukung modul RF 2,4 GHz yang membutuhkan suplai daya stabil sebesar 3,3 V (Berlianto et al., 2021).

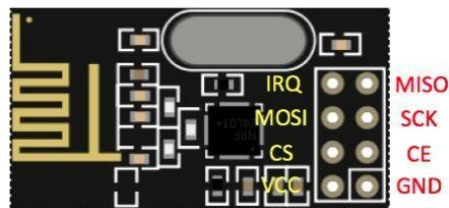
2.3 Komunikasi Radio Frekuensi 2,4 GHz

Komunikasi nirkabel yang bekerja pada pita *Industrial, Scientific, and Medical* (ISM) 2,4 GHz umum digunakan dalam perangkat berdaya rendah seperti IoT, sensor nirkabel, dan kontrol jarak pendek. Keunggulan pita frekuensi 2,4 GHz meliputi: Tidak membutuhkan lisensi (*unlicensed band*), Modulnya berukuran kecil dan murah, Mendukung kecepatan data yang tinggi, Kompatibel dengan berbagai protokol seperti *Bluetooth*, *ZigBee*,

dan komunikasi proprietari. Namun demikian, pita 2,4 GHz cukup rentan terhadap interferensi dari Wi-Fi, *microwave*, atau perangkat *Bluetooth* sehingga analisis performa pada kondisi lingkungan berbeda diperlukan (Andi et al., 2021).

2.4 Modul nRF24L01

nRF24L01 adalah modul *transceiver* nirkabel 2,4 GHz berdaya rendah yang diproduksi oleh *Nordic Semiconductor*. Modul nRF24L01 mendukung komunikasi dua arah (*bidirectional*) dengan kecepatan data 250 kbps, 1 Mbps, atau 2 Mbps serta dilengkapi dengan fitur *Auto-Acknowledgment* dan *Auto-Retransmit* untuk meningkatkan keandalan transmisi (Pradana et al., 2024).



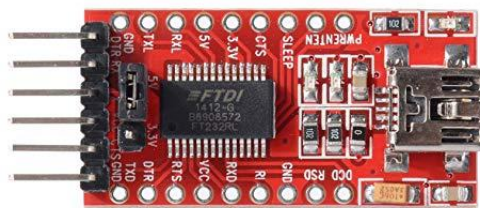
Gambar 3. Modul nRF24L01

Beberapa karakteristik penting modul nRF24L01 meliputi: Tegangan kerja 1,9–3,6 V, Mode konsumsi daya rendah, Rentang frekuensi 2.400–2.525 GHz, Maximum *payload* hingga 32 bytes, Menggunakan antarmuka SPI untuk komunikasi dengan mikrokontroler. Performa nRF24L01 dipengaruhi oleh konfigurasi daya pancar (*TX Power*), data *rate*, panjang *payload*, serta kondisi lingkungan tempat pengujian dilakukan (Kana Hebi et al., 2023).

2.5 Modul FTDI USB-to-Serial

Modul FTDI merupakan perangkat konverter USB ke UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) yang digunakan untuk menjembatani komunikasi antara komputer dan mikrokontroler. Modul ini umumnya menggunakan IC FT232RL, sebuah chip *USB-to-Serial* berperforma tinggi yang mampu menyediakan antarmuka komunikasi serial yang stabil, mendukung kecepatan hingga 3 Mbps, serta kompatibel dengan sebagian besar sistem operasi modern (Anwar & Hermanto, 2020).

Pada *platform* mikrokontroler seperti ATmega328P, antarmuka UART digunakan untuk melakukan proses pemrograman dan komunikasi serial. Modul FTDI menyediakan jalur TX, RX, DTR, serta suplai daya 5 V atau 3,3 V sehingga memungkinkan proses pemrograman seperti *burn bootloader* dan *upload firmware* melalui *Arduino IDE*. Dibandingkan dengan konverter *USB-to-Serial* lainnya, FTDI memiliki kestabilan yang baik dan kompatibilitas, sehingga sering digunakan pada sistem minimum berbasis Arduino.



Gambar 4. Modul FTDI

Dalam penelitian ini, modul FTDI digunakan sebagai antarmuka pemrograman utama untuk ATmega328P sebelum sistem beroperasi secara mandiri. Setelah program berhasil diunggah, modul FTDI tidak lagi digunakan selama perangkat berkomunikasi menggunakan modul RF nRF24L01.

2.5 Protokol Komunikasi SPI

Serial Peripheral Interface (SPI) adalah protokol komunikasi sinkron berkecepatan tinggi yang banyak digunakan untuk menghubungkan mikrokontroler dengan perangkat eksternal seperti sensor dan modul RF. SPI terdiri atas empat jalur utama: MISO (*Master In Slave Out*), MOSI (*Master Out Slave In*), SCK (*Serial Clock*), SS (*Slave Select*), Protokol SPI mendukung kecepatan transmisi jauh lebih tinggi dibanding I2C, sehingga cocok digunakan pada modul nRF24L01 yang memerlukan kecepatan komunikasi tinggi antara mikrokontroler dan *transceiver*.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen dengan melakukan integrasi modul nRF24L01 pada sistem minimum ATmega328P, kemudian mengevaluasi performa komunikasi berdasarkan beberapa parameter

seperti jangkauan, stabilitas transmisi, latensi, dan konsumsi daya. Rangkaian perangkat keras dirancang mulai dari sistem minimum mikrokontroler, modul daya, antarmuka pemrograman, hingga koneksi ke modul nRF24L01. Setelah itu dilakukan serangkaian pengujian baik di dalam ruangan maupun di luar ruangan.

3.1 Skema Rangkaian Sistem Minimum Atmega328P

Sistem minimum dirancang agar mikrokontroler dapat beroperasi secara mandiri tanpa board Arduino. Rangkaian meliputi: Catu daya 5 V dan 3.3 V, Kristal 16 MHz dan dua kapasitor 22 pF, Rangkaian reset dengan resistor *pull-up* 10 k Ω , *Pin* I/O untuk jalur komunikasi SPI, Rancangan keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 5. Modul nRF24L01 dikoneksikan ke ATmega328P menggunakan protokol SPI, dengan konfigurasi pin berikut:

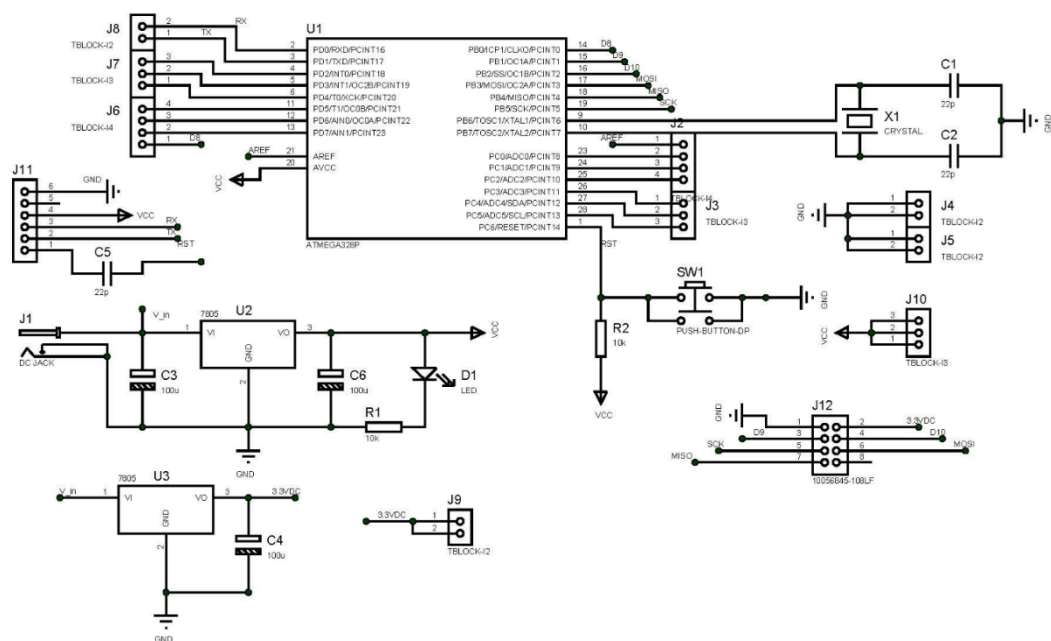
Tabel 1. Skema Atmega328P dan nRF24L01

ATmega328P	nRF24L01
PB3	MOSI
PB4	MISO
PB5	SCK
PB2	CSN/D10
PB1	CE/D9

Catu daya modul nRF24L01 diberi stabilisasi menggunakan kapasitor *bypass* 10 μ F untuk mengurangi *noise*. ATmega328P diprogram menggunakan antarmuka USB-to-Serial FTDI dengan jalur:

Tabel 2. Skema Atmega328P dan Modul FTDI

Modul FTDI	ATmega328P
TX	RX
RX	TX
DTR	RESET



Gambar 5. Skema Rangkaian Sistem Minimum Atmega328P

3.2 Pengujian Jangkauan

Pengujian jangkauan dilakukan untuk mengetahui kemampuan modul dalam melakukan transmisi pada berbagai jarak dan kondisi lingkungan. Pengujian dilakukan pada koridor gedung kampus dengan karakteristik:

1. Banyak permukaan pemantul,
2. Beberapa tembok sebagai penghalang,
3. Terdapat interferensi dari WiFi 2.4 GH,
4. Pengujian dilakukan pada jarak: 1 m, 3 m, 5 m, 10 m, dan 15 m.

Pengujian juga dilakukan pada area lapang tanpa banyak penghalang dengan variasi jarak, 1 m hingga 20 m. Pada setiap jarak, dikirim 100 paket data dan dihitung rasio keberhasilannya.

3.3 Pengujian Stabilitas Transmisi

Pengujian stabilitas dilakukan untuk melihat konsistensi sinyal ketika perangkat bekerja terus-menerus. Perangkat mengirim satu paket setiap 500 ms selama durasi 5 menit per jarak pengujian. Parameter yang diamati meliputi:

1. Tingkat kehilangan paket (*packet loss*),
2. Rasio keberhasilan transmisi (*packet delivery ratio*),
3. Nilai RSSI sebagai indikator kekuatan sinyal,
4. Fluktuasi pada data.

3.4 Pengujian Latensi

Pengujian latensi dilakukan pada seluruh variasi jarak baik *indoor* maupun *outdoor*. Latensi dihitung menggunakan metode *Round-Trip Time* (RTT). Setiap paket memiliki timestamp saat dikirim (TX). Setelah diterima oleh perangkat penerima, perangkat tersebut mengirimkan ACK atau balasan dengan *timestamp* nya sendiri. Latensi dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Latensi} = T_{RX} - T_{TX}$$

3.5 Pengujian Konsumsi Daya

Konsumsi daya diukur menggunakan multimeter digital pada supply 3,3 V modul RF. Nilai arus yang terukur (mA) digunakan untuk menentukan konsumsi daya pada setiap mode operasi. Pengukuran dilakukan pada tiga kondisi, yaitu:

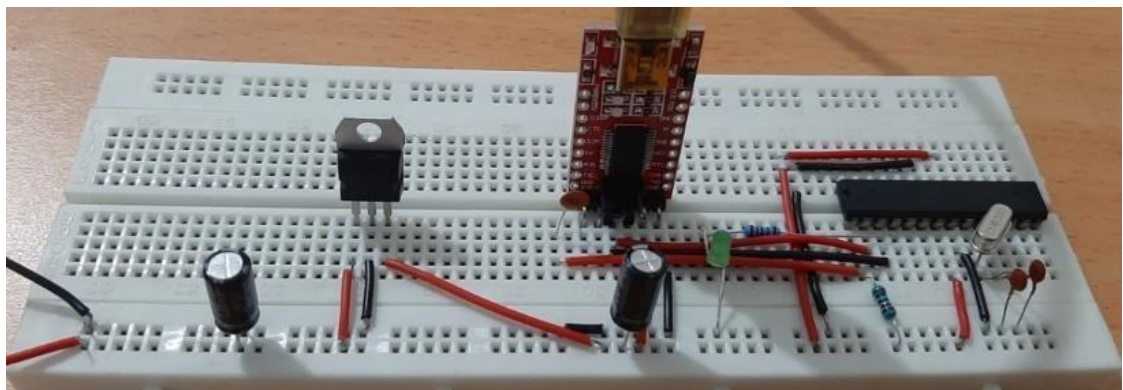
1. *Mode Idle*: Tidak ada transmisi atau penerimaan; modul berada dalam mode *standby*.
2. *Mode Transmit* (TX): Modul memancarkan paket data secara terus menerus.
3. *Mode Receive* (RX): Modul berada pada mode mendengarkan (*listening mode*).

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Rangkaian Menggunakan *Project Board*

Tahap awal penelitian difokuskan pada proses simulasi rangkaian untuk memastikan bahwa desain sistem minimum ATmega328P telah memenuhi kebutuhan integrasi dengan modul komunikasi nRF24L01. Simulasi dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu pengujian rangkaian pada *project board* dan simulasi skematik menggunakan perangkat lunak *Proteus 8 Professional*.

Pengujian menggunakan *project board* dilakukan dengan tujuan memvalidasi fungsi dasar mikrokontroler sebelum dipindahkan ke papan PCB. Pada tahap ini, koneksi catu daya, rangkaian *clock*, jalur UART untuk pemrograman menggunakan modul FTDI, serta antarmuka SPI diuji secara langsung. Seluruh komponen divalidasi untuk memastikan bahwa: Tegangan kerja stabil pada 5 V, ATmega328P dapat merespons sinyal *clock* eksternal, Komunikasi serial melalui FTDI berlangsung tanpa *error*, Jalur SPI dapat diteruskan ke modul RF dengan baik.

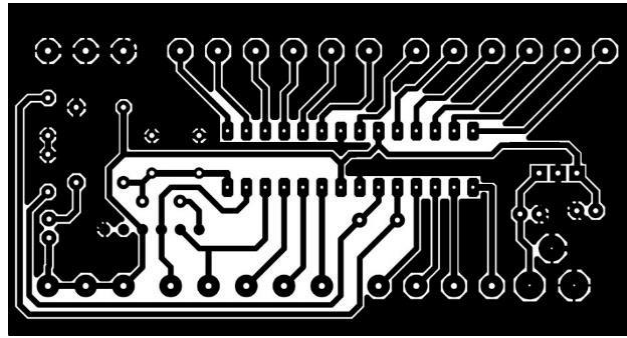


Gambar 6. Simulasi dengan *Project Board*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh blok rangkaian telah berfungsi sesuai karakteristiknya, sehingga layak untuk dilanjutkan pada tahap simulasi skematik.

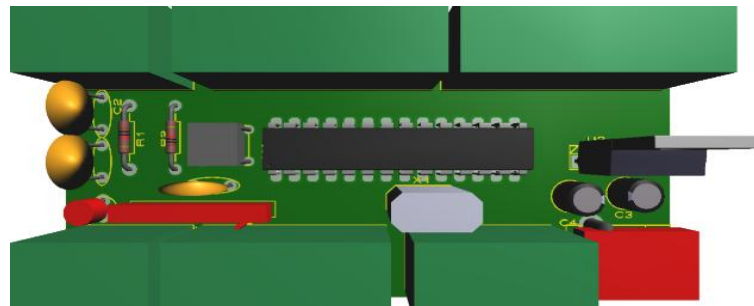
4.2 Perancangan PCB

Hasil dari *project board* kemudian menjadi acuan utama dalam menyusun desain PCB menggunakan *software proteus*.



Gambar 7. Desain PCB Sistem Minimum

Penempatan komponen, pengaturan jalur sinyal, dan tata kelola catu daya dirancang berdasarkan hasil simulasi sehingga desain PCB dapat berfungsi optimal dan bebas *noise* saat modul nRF24L01 diintegrasikan.



Gambar 8. Penempatan Komponen dalam Sistem Minimum

Hasil realisasi sistem minimum ATmega328P yang telah dirakit pada papan PCB 1-layer diperlihatkan pada Gambar 9. Seluruh komponen utama, meliputi mikrokontroler ATmega328P tipe DIP, regulator tegangan LS7805T, rangkaian *clock* 16 MHz, serta *header* antarmuka FTDI. Penempatan komponen disusun secara terstruktur untuk memastikan aliran sinyal dan distribusi catu daya berjalan stabil selama proses pengujian.



Gambar 9. Hasil Perancangan

Pada sisi input, rangkaian catu daya dilengkapi dengan kapasitor elektrolit berkapasitas 100 μF untuk meredam riak tegangan, sehingga memberikan suplai yang stabil bagi mikrokontroler maupun modul RF yang akan dihubungkan. Jalur antarmuka FTDI ditempatkan dekat dengan area mikrokontroler untuk mempermudah proses pemrograman dan meminimalkan panjang jalur sinyal UART.

Header SPI untuk modul nRF24L01 ditempatkan pada area dengan jalur pendek dan rapi guna mengurangi potensi interferensi dan noise pada sinyal kecepatan tinggi. Selain itu, indikator LED disertakan untuk mendukung proses verifikasi fungsional selama pengujian awal.

Hasil perakitan menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat beroperasi sesuai spesifikasi, ditandai dengan keberhasilan proses burn bootloader dan eksekusi program dasar. Tampilan akhir rangkaian ini juga menunjukkan distribusi *layout* yang bersih dan efisien, sehingga siap digunakan untuk tahap integrasi modul RF dan pengujian performa komunikasi.

4.3 Pengujian Konektifitas Komunikasi RF

Pengujian konektifitas dilakukan menggunakan dua perangkat ATmega328P yang dipasangkan dengan modul nRF24L01 sebagai *transmitter* dan *receiver*. Tujuan pengujian ini adalah mengevaluasi stabilitas komunikasi serta kemampuan modul dalam mengirim dan menerima data pada berbagai kondisi lingkungan.

Pengujian konektifitas dilakukan di dalam ruangan dengan jarak bervariasi antara 5 hingga 40 meter dan menggunakan beberapa jenis penghalang (plastik, kain, kayu, dan logam).

Tabel 3. Pengujian Konektifitas Dalam Ruang

Jarak (m)	Tanpa Penghalang	Plastik	Kain	Logam	Kayu
5	1	1	1	1	1
10	1	1	1	0	1
15	1	1	0	0	1
20	0	0	0	0	1
25	0	0	0	0	1
30	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0
40	0	-	-	0	0

1 = stabil; 0 = tidak stabil; - = tidak terhubung

Hasil pengujian konektifitas dalam ruangan menunjukkan bahwa, Komunikasi stabil pada rentang 5–15 meter. Penurunan stabilitas mulai terlihat pada ≥ 20 meter, terutama dengan penghalang logam. Pada jarak ≥ 30 meter, sebagian besar transmisi mengalami gangguan atau paket gagal diterima. Pengujian dilakukan di area terbuka dengan jarak 5–40 meter tanpa banyak penghalang.

Tabel 4. Pengujian Konektifitas Luar Ruang

Jarak (m)	Tanpa Penghalang	Plastik	Kain	Logam	Kayu
5	1	1	1	1	1
10	1	1	1	0	1
15	1	0	1	0	1
20	1	0	0	0	1
25	0	0	0	0	1
30	0	-	0	0	0
35	0	-	0	0	0
40	0	-	-	0	0

1 = stabil; 0 = tidak stabil; - = tidak terhubung

Hasil pengujian di area terbuka menunjukkan komunikasi stabil pada rentang 5–20 meter. Kualitas transmisi mulai menurun pada > 25 meter, terutama ketika terdapat penghalang. Pengujian *outdoor* memperlihatkan performa lebih baik karena minimnya refleksi dan multipath.

4.4 Pengujian Keandalan

Pengujian keandalan dilakukan dalam lima sesi dengan durasi 3 jam per sesi, pada lingkungan yang diisi interferensi dari perangkat WiFi, *Bluetooth*, dan *hotspot*. Sepanjang pengujian, modul RF menunjukkan hasil dengan tetap mengirim dan menerima data, tidak mengalami gangguan signifikan, mempertahankan stabilitas indikator sinyal. Hasil ini menegaskan bahwa mekanisme *auto-retransmission* pada nRF24L01 cukup efektif menangani gangguan pada spektrum 2,4 GHz.

4.5 Pengujian Konsumsi Daya

Pengukuran konsumsi daya dilakukan pada tiga kondisi operasi, yaitu: *Idle*, *Transmit* (TX), *Receive* (RX), Hasil pengukuran menunjukkan konsumsi daya minimum berada pada mode *idle*, yaitu 0,193 W dan konsumsi tertinggi terjadi pada mode *transmit*, yaitu 0,315 W. Nilai konsumsi daya yang rendah menunjukkan bahwa sistem layak digunakan pada perangkat IoT berbasis baterai dengan durasi operasi panjang.

4.6 Pengujian Latensi Komunikasi

Latensi dihitung menggunakan metode *Round-Trip Time* (RTT) dengan 10 kali percobaan. Hasilnya yaitu: Latensi minimum 9 ms, latensi maksimum 505 ms, dan rata-rata latensi sebesar 271,1 ms. Variasi latensi dipengaruhi oleh interferensi, kondisi kanal, dan mekanisme retransmisi modul. Nilai rata-rata masih sesuai untuk aplikasi *non-realtime* seperti monitoring atau sistem kontrol sederhana.

4.7 Pengujian Kompatibilitas Sistem

Untuk memastikan sistem dapat digunakan pada aplikasi IoT yang melibatkan sensor, dilakukan integrasi dengan beberapa modul pendukung yaitu: Sensor Ultrasonik HCSR-04 sebagai sumber data jarak dan LCD 20×4 sebagai media tampilan. Hasil pengujian menunjukkan Pembacaan sensor berjalan stabil, data tampil pada LCD tanpa gangguan dan komunikasi RF tetap berfungsi normal ketika sistem menjalankan fungsi tambahan. Pengujian

ini memastikan bahwa ATmega328P dengan modul RF tetap kompatibel dengan sensor tambahan tanpa terjadi konflik antar-perangkat.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem minimum ATmega328P yang terintegrasi dengan modul RF nRF24L01 pada frekuensi 2,4 GHz, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem minimum ATmega328P berhasil direalisasikan dan beroperasi secara stabil sebagai platform komunikasi nirkabel jarak pendek. Integrasi modul nRF24L01 dapat dilakukan tanpa konflik fungsi, baik pada sisi perangkat keras maupun perangkat lunak.
2. Hasil pengujian jangkauan menunjukkan bahwa komunikasi nirkabel berjalan stabil pada jarak 5–15 meter di dalam ruangan dan hingga 20 meter di luar ruangan, dengan penurunan performa yang dipengaruhi oleh jenis penghalang dan kondisi lingkungan.
3. Pengujian stabilitas transmisi memperlihatkan bahwa penghalang berbahan logam memberikan redaman sinyal paling signifikan dibandingkan penghalang non-logam, yang secara langsung mempengaruhi keberhasilan pengiriman data.
4. Rata-rata latensi komunikasi sebesar 271,1 ms masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring dan kendali sederhana yang tidak memerlukan respon waktu nyata.
5. Konsumsi daya sistem berada pada rentang 14,2–31,8 mA, sehingga sistem ini tergolong efisien dan sesuai untuk aplikasi berbasis IoT yang mengutamakan penggunaan daya rendah.
6. Sistem yang dikembangkan terbukti kompatibel dengan perangkat tambahan seperti sensor dan modul tampilan, tanpa menurunkan stabilitas komunikasi, sehingga memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai *platform* IoT dan sistem otomasi jarak pendek.

REFERENCES

- Af'idah, D. I., Rochim, A. F., & Widiyanto, E. D. (2014). Perancangan Jaringan Sensor Nirkabel (JSN) untuk Memantau Suhu dan Kelembaban Menggunakan nRF24L01. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Komputer*, 2(4), 267–276. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.2.4.2014.267-276>
- Al Hafiz, N. W., & Erlinda, E. (2020). Perancangan Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Menggunakan Arduino. *Jurnal Teknologi Dan Open Source*, 3(2), 245–260. <https://doi.org/10.36378/jtos.v3i2.831>
- Andi, S., Suryadi, D., Elektro, J. T., Teknik, F., Tanjungpura, U., & Nawawi, J. H. H. (2021). Identifikasi Penggunaan Frekuensi Radio Fm Menggunakan Software Argus Pada Daerah Layanan Kota Pontianak dan Kabupaten Kubu Raya. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 9(1). <https://doi.org/10.26418/J3EIT.V9I1.46781>
- Anwar, S., & Hermanto. (2020). Pemanfaatan Internet of Thing (IoT) Dalam Pengendalian Lampu Dan Kipas Berbasis Android. *Jurnal RESTIKOM: Riset Teknik Informatika Dan Komputer*, 2(1), 17–31. <https://doi.org/10.52005/RESTIKOM.V2I1.63>
- Arvin, A. N., & Rusindiyanto. (2022). Perancangan Alat Monitoring Kondisi Lingkungan Dan Prediksi Cuaca Bertenaga Surya Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Metode Fuzzy Logic. *J-ENSITEC (Journal of Engineering and Sustainable Technology)*, 9(01), 701–707. <https://doi.org/10.31949/jensitec.v9i01.2735>
- Berlianto, W., Setia Budi, A., Hannats, M., & Ichsan, H. (2021). Implementasi Protokol LEACH pada Wireless Sensor Network dengan Perangkat berbasis nRF24L01. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 5(10), 4680–4688. <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/10058>
- Chafid, N., & Zulkifli. (2021). Sistem Keamanan Brankas Menggunakan Kunci Otomatis Dengan SMS. *Jurnal Satya Informatika*, 6(02), 40–55. <https://doi.org/10.59134/jsk.v6i02.27>
- Choeri, A. (2019). Implementasi Sistem Pemantauan Kondisi Ruangan Menggunakan Jaringan Sensor Nirkabel Berbasis Protokol RF24Network. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 3(1), 274–283. <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/4097>
- Kana Hebi, D., Ray, F. F., Tamal, C. P., Pendidikan Teknik Elektro, P., & Nusa Cendana Jl Adisucipto, U. (2023). Rancang Bangun Pemancar Dan Penerima Wireless Tally Light Kamera Menggunakan Modul Komunikasi NRF24I01. *JURNAL SPEKTRO*, 6(1), 23–30. <https://ejurnal.undana.ac.id/index.php/spektro/article/view/11919>
- Mude, A., Benediktus, L., Mando, F., Artikel, I., & Kunci, K. (2021). Implementasi Keamanan Rumah Cerdas Menggunakan Internet of Things dan Biometric Sistem. *MATRIK : Jurnal Manajemen, Teknik Informatika Dan Rekayasa Komputer*, 21(1), 179–188. <https://doi.org/10.30812/matrik.v21i1.1381>
- Muhendra, R., Kreshnaviyanto, N. I., & Amin, A. (2021). Jaringan Sensor Nirkabel: Studi dan Evaluasi Kinerja LoRa Transmitter dan Long Range Radio Frekuensi (RF) Pada Luar Ruang. *Jurnal Jaring SainTek*, 3(1), 6–12. <https://doi.org/10.31599/jaring-saintek.v3i1.347>
- Nizma'urrahmi, R., Kusyanti, A., & Siregar, R. A. (2022). Implementasi Algoritme SPECK pada Wireless Sensor Network menggunakan Media Pengiriman Data nRF24L01. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 6(5), 2079–2086. <https://j-ptiik.ub.ac.id/index.php/j-ptiik/article/view/10978>
- Pradana, R. W., Pratiwi, G. F., & Arifin, T. N. (2024). Rancang Bangun Sistem Pemantau Ketinggian Air Otomatis Menggunakan Sensor Ultrasonik (HC-SR04) Berbasis Arduino Uno Dengan Antarmuka Komputer Berbasis Microsoft Visual Basic 6.0. *Jurnal Teknik Dan Science*, 3(1), 13–24. <https://doi.org/10.56127/jts.v3i1.1212>