

# Rancang Bangun Wireless Waveform Generator Berbasis ESP32 dengan Kendali Perangkat Lunak

Bima Wahyu Maulana<sup>1</sup>, Agung Muliawan<sup>2</sup>

Teknik Komputer, Politeknik Negeri Jember<sup>1</sup>

Manajemen Informatika, Politeknik Negeri Jember<sup>2</sup>

## ABSTRACT

Waveform generator merupakan perangkat elektronik yang berfungsi menghasilkan sinyal listrik dengan berbagai bentuk gelombang, seperti gelombang sinus, kotak, dan segitiga, yang parameter utamanya meliputi frekuensi dan amplitudo. Perangkat ini memiliki peranan penting dalam pengujian dan pengembangan sistem elektronik, baik di bidang industri maupun biomedis. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi kinerja waveform generator berbasis mikrokontroler ESP32 yang dikendalikan melalui aplikasi berbasis Internet of Things (IoT). Metode penelitian yang digunakan meliputi pengujian kuantitatif terhadap parameter frekuensi, amplitudo, dan duty cycle, serta pengamatan kualitatif terhadap kestabilan dan kualitas bentuk gelombang yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ESP32 mampu menghasilkan gelombang kotak, sinus, dan segitiga dengan performa yang baik pada rentang frekuensi rendah. Namun, terdapat keterbatasan kinerja pada pembangkitan gelombang sinus dan segitiga di atas 1 kHz, yang ditandai dengan penurunan amplitudo. Selain itu, pada gelombang kotak dengan frekuensi di atas 10 kHz terjadi pergeseran duty cycle antara kondisi HIGH dan LOW. Meskipun demikian, amplitudo gelombang kotak relatif stabil pada rentang frekuensi 1 Hz hingga 1 MHz. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa ESP32 layak digunakan sebagai waveform generator berbasis IoT dengan kinerja optimal pada rentang frekuensi 1 Hz hingga di bawah 1 kHz, dengan syarat koneksi internet dan sistem ESP32 berada dalam kondisi stabil.

**Keywords:** Gelombang Kotak, Gelombang Segitiga, Gelombang Sinusoida, Waveform Generator, ESP32

## 1. PENDAHULUAN

*Waveforms Generator* adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk menghasilkan sinyal listrik dalam bentuk gelombang. Umumnya gelombang yang dibentuk adalah gelombang sinusoidal, gelombang kotak, dan gelombang segitiga/*sawtooth*. Sinyal Listrik dalam bentuk gelombang tersebut memiliki karakteristik temporal dan dapat dikontrol parameter nilainya. Kontrol nilai gelombang secara umum dilakukan pada parameter frekuensi dan amplitudo (*Voltage peak-to-peak/Vpp*) (Takase et al., 2022). Pengujian perangkat elektronik di bidang industri dan biomedis memerlukan pengujian frekuensi dengan alat untuk membangkitkan gelombang dengan frekuensi tertentu (Álvarez-Gariburo et al., 2023).

ESP32 adalah mikrokontroler yang mampu bekerja dengan koneksi internet dan mampu untuk dirangkai menjadi perangkat elektronik berbasis *Internet of Things* (IoT). ESP32 umumnya diprogram dengan menggunakan Bahasa C++ menggunakan aplikasi

### Corresponding Author:

Agung Muliawan

(agung.muliawan@polje.ac.id)

Received: December 10, 2025

Revised: January 02, 2026

Accepted: January 15, 2026

Published: January 18, 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Arduino IDE, tetapi dapat juga menggunakan alternatif lain seperti menggunakan Bahasa pemrograman micropython menggunakan aplikasi Thonny. ESP32 bekerja pada tegangan 3,3 Volt, memiliki resolusi DAC 8-bit, Resolusi ADC 12-bit, bekerja dengan sistem *dual core*, dan mampu melakukan komunikasi wireless berbasis Wi-fi atau Bluetooth (Pramuditya et al., 2023).

Gelombang kotak adalah gelombang yang membentuk bentuk kotak yang berosilasi. Bentuk gelombang kotak juga dapat merepresentasikan bentuk gelombang digital, karena posisi High dapat direpresentasikan sebagai kondisi ON (bernilai 1) dan posisi Low yang direpresentasikan sebagai kondisi OFF (bernilai 0). Perancangan rangkaian elektronik untuk membentuk gelombang kotak cukup memiliki banyak variasi. Salah satu rangkaian elektronik yang dapat membentuk gelombang kotak adalah rangkaian astable multivibrator menggunakan IC timer NE555. Generator gelombang kotak dengan rangkaian astable multivibrator dapat mengatur nilai periodenya dengan penentuan nilai frekuensi ataupun sebaliknya (Nabila et al., 2023)

Gelombang sinusoida dalam bidang elektronika dapat dibangkitkan melalui dua metode. Metode pertama adalah membuat rangkaian yang menghasilkan gelombang sinusoidal asli dan metode yang kedua adalah melakukan konversi dari gelombang kotak atau PWM menjadi gelombang sinusoida berbasis *Sinusoidal Pulse With Modulation* (SPWM). Penggunaan SPWM ini umum diaplikasikan pada rangkaian inverter (Luqman et al., 2022).

Gelombang segitiga adalah gelombang yang membentuk pola bukit dan Lembah gelombang dalam bentuk segitiga. Gelombang segitiga dapat dibentuk dari rangkaian elektronik. Salah satu rangkaian elektronik yang dirangkai untuk membentuk generator gelombang segitiga adalah dengan merangkai rangkaian gabungan dari *Operational Transconductance Amplifier* (OTA), dengan *Current Feedback Amplifier* (CFA), dan *current-mode integrator*. Sistem rangkaian tersebut dapat digunakan ke antarmuka sensor, modulator, dan pemrosesan sinyal analog (Shekhar, 2025). Generator gelombang segitiga dapat berfungsi sebagai biosensor pendekripsi senyawa yang mengalami reaksi reduksi-oksidasi (analit redoks aktif), dimana generator gelombang segitiga yang dikembangkan Younsu Jung dibangkitkan dengan smartphone berbasis NFC (Jung et al., 2022)

## 2. METODE

Penelitian ini adalah eksperimental. Penelitian eksperimental dipilih karena bertujuan untuk membandingkan, menguji, menganalisis, dan mengambil kesimpulan dibandingkan dengan literatur terdahulu terkait dengan pengembangan *waveform generator* dengan mikrokontroler ESP32. Penelitian ini dilakukan dengan merancang perangkat lunak / aplikasi berbasis *website* untuk pengendali bentuk gelombang dan pengendali nilai frekuensi. Penelitian ini juga menguji bentuk keluaran/*output* gelombang menggunakan osiloskop. Bentuk gelombang yang ditampilkan osiloskop akan menghasilkan besaran berupa frekuensi dan amplitudo dengan menghitung nilai vpp dan menghitung nilai waktu yang tebaca di osiloskop.

Data yang dimasukkan adalah data kuantitatif. Input data kuantitatif dilakukan dengan mangambil nilai frekuensi yang dimasukkan/*di-input* dari perangkat lunak. Selain itu data kuantitatif juga dilihat dari besaran gelombang yang ditampilkan oleh osiloskop. Besaran gelombang yang diambil adalah amplitudo dalam bentuk Vpp, dan frekuensi *output* dari osiloskop. Data kualitatif diambil dari pengamatan bentuk visual gelombang yang ditampilkan oleh osiloskop. Data kualitatif akan melihat bentuk gelombang kotak, gelombang sinusoida dan gelombang segitiga yang frekuensinya diprogram dari perangkat lunak.

Metode pengolahan dan analisis data terdiri dari pengolahan dan analisis data statistik. Pengukuran frekuensi diuji dengan rentang frekuensi 1 Hz hingga 1 MHz. Frekuensi yang

diukur adalah frekuensi input dan frekuensi ukur yang ditampilkan oleh osiloskop dimana dua besaran ini akan berfungsi untuk menghitung nilai error frekuensi dengan persamaan

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{f_{\text{ukur}} - f_{\text{input}}}{f_{\text{input}}} \right| \times 100\%$$

Frekuensi ukur tidak terbaca secara langsung di osiloskop tetapi terbaca melalui pengamatan skala dan jumlah gelombang pada osiloskop. Persamaan untuk perhitungan frekuensi ukur adalah

$$f_{\text{ukur}} = \frac{\text{Jumlah Gelombang}}{\text{total div horizontal dalam layar osiloskop} \times \frac{\text{time/div (ms)}}{1000}}$$

Time/div diatur dalam satuan ms (milisekon/milidetik) untuk mengubahnya menjadi satuan sekon (s) maka perlu bagi nilai time/div dengan 1000. Total div horizontal dalam layar osiloskop diukur dengan menghitung jumlah kotak dari sumbu horizontal. Jumlah gelombang diukur dari banyaknya kombinasi puncak dan lembah gelombang yang muncul pada layar osiloskop. Pengaturan time/div tergantung dari pengaturan di osiloskop. Jika satuan time/div berada di rentang sekon maka, sebelum mengolah data kita harus mengalikan dengan 1000 dan jika satuan time/div berada di rentang mikrosekon maka sebelum mengolah data kita harus membaginya dengan 1000.

Amplitudo yang dihasilkan dari generator bernilai tetap dengan Vp-p 3,3 Volt (tegangan maksimum yang dihasilkan oleh DAC ESP32). Nilai ini dihitung sebagai tegangan ideal. Untuk tegangan pengukuran diukur dari nilai Vp-p yang terbaca osiloskop yang disebut sebagai tegangan ukur. Besaran tegangan ukur dan tegangan ideal berfungsi untuk menghitung nilai error dari amplitudo

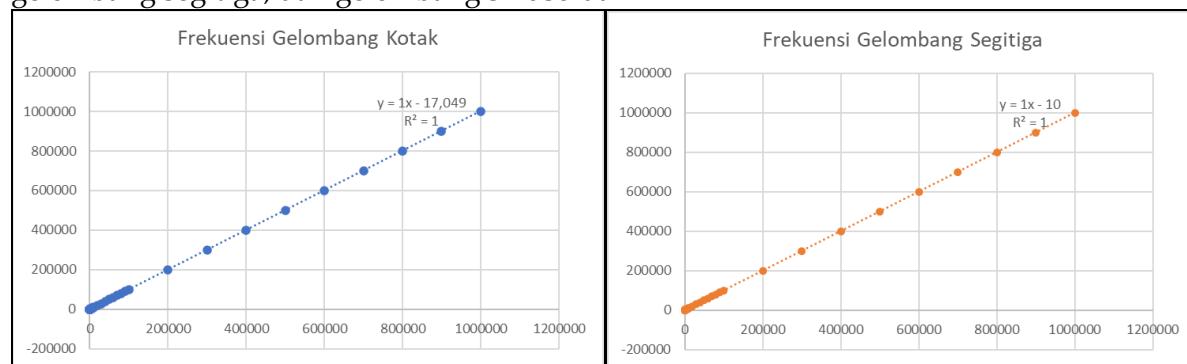
$$\text{Error Amplitudo}(\%) = \left| \frac{V_{\text{ukur}} - V_{\text{ideal}}}{V_{\text{ideal}}} \right| \times 100\%$$

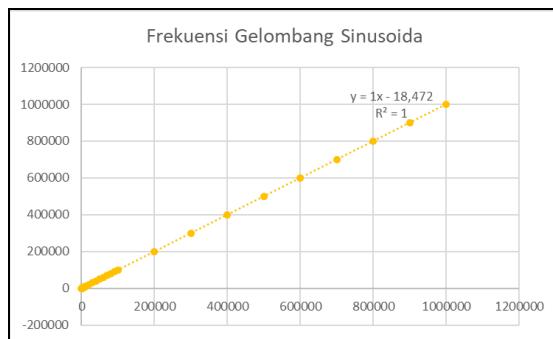
Analisis data kualitatif dilihat dari bentuk gelombang yang ditampilkan oleh osiloskop. Bentuk gelombang yang diamati adalah bentuk gelombang yang dihasilkan dari DAC ESP32 dari *input* perangkat lunak. Bentuk gelombang tersebut akan ditampilkan oleh osiloskop.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Perbandingan Besaran Gelombang Input dan Gelombang Ukur

Berikut adalah grafik perbandingan nilai frekuensi pada bentuk gelombang kotak, gelombang segitiga, dan gelombang sinusoida

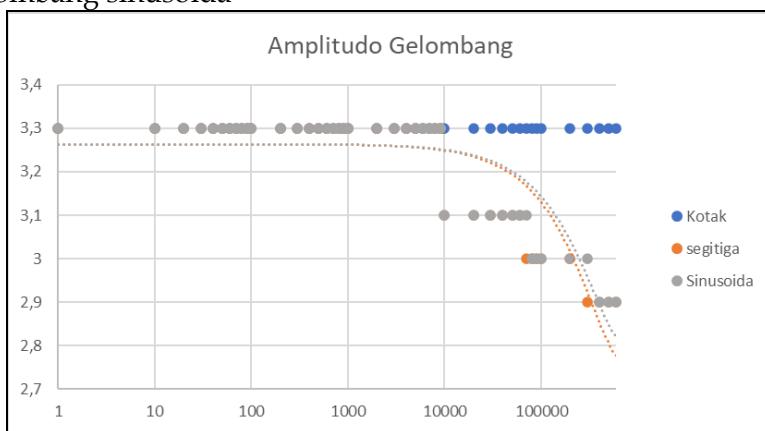




Gambar 1. Grafik frekuensi ukur (sumbu x) dan frekuensi *input* (sumbu y)

Berdasarkan hasil pengukuran frekuensi didapatkan data bahwa, rata-rata error frekuensi terbesar terukur pada gelombang segitiga dengan nilai 0,776% diikuti pengukuran dari gelombang sinusoida dengan rata-rata error 0,301%. Nilai error frekuensi terendah terukur pada gelombang kotak dengan nilai 0,202%. Hal ini berbanding terbalik dengan rata-rata akurasi frekuensi, dikarenakan nilai akurasi rata-rata diukur dari pengurangan angka 100 dengan nilai rata-rata error frekuensi. Secara ideal, nilai frekuensi *input* dari ESP32 harus sama dengan nilai frekuensi yang terukur dari osiloskop. Pengukuran ini memerlukan analisis linearitas salah satunya dengan pengukuran korelasi pearson. Berdasarkan pengukuran korelasi pearson, nilai linearitas dari frekuensi *input* dari ESP32 dan frekuensi terukur dari osiloskop didapatkan nilai 0,99 untuk semua jenis gelombang. Nilai korelasi pearson 0,99 menunjukkan hubungan antara frekuensi *input* dari ESP32 dengan frekuensi yang terukur di osiloskop memiliki karakteristik linear dan memiliki distorsi skala yang sangat kecil antara frekuensi *input* dari ESP32 dengan frekuensi yang terukur di osiloskop.

Pengukuran amplitudo gelombang atau Vpp pada gelombang sinusoida dan gelombang segitiga memiliki karakteristik yang sama, yaitu nilai amplitudonya akan menunjukkan penurunan nilai Vpp dari 3,3 Volt hingga 2,8 Volt. Penurunan nilai amplitudo mulai terjadi pada frekuensi 10 KHz hingga 1 MHz. Penurunan nilai amplitudo ini tidak berlaku untuk pembangkitan gelombang kotak. Gelombang kotak tetap membangkitkan gelombang dengan amplitudo sebesar 3,3 Volt sesuai dengan tegangan operasional dari ESP32. Berikut ini grafik perbandingan nilai amplitudo antara gelombang kotak, gelombang segitiga dan gelombang sinusoida



### Perbandingan Bentuk Gelombang

Perbandingan bentuk gelombang berdasarkan rentang sinyal gelombang adalah sebagai berikut

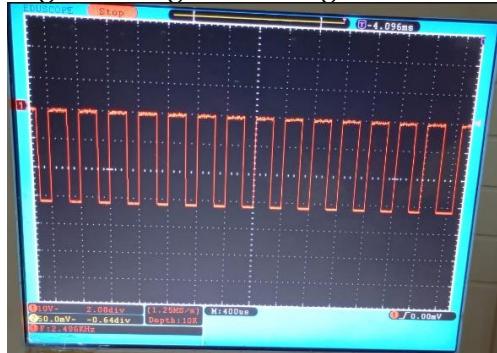
Tabel 1. Perbandingan bentuk gelombang

Rentang Frekuensi	Bentuk Gelombang		
	Kotak	Sinusoida	Segitiga
1 - 50 Hz	Kotak	Sinusoida	Segitiga
50 - 100 Hz	Kotak	Sinusoida	Segitiga

<b>100 - 500 Hz</b>	Kotak	Sinusoida	Segitiga
<b>500 Hz - 1 KHz</b>	Kotak	Sinusoida	Segitiga
<b>1 KHz - 5 KHz</b>	Kotak	Gelombang Tangga	Gelombang Tangga
<b>5 KHz - 10 KHz</b>	Kotak	Gelombang Tangga	Gelombang Tangga
<b>10 KHz - 50 KHz</b>	Kotak*	Gelombang Tangga	Gelombang Tangga
<b>50 KHz - 100 KHz</b>	Kotak*	Gelombang Tangga	Gelombang Tangga
<b>100 KHz - 500 KHz</b>	Kotak*	Gelombang Tangga	Gelombang Tangga
<b>500 KHz - 1 MHz</b>	Kotak*	Gelombang Tangga	Gelombang Tangga

\* mengalami *duty cycle shift*

Berdasarkan hasil pengamatan kualitatif, input gelombang kotak dengan rentang frekuensi 1 Hz hingga 1 MHz tetap menunjukkan bentuk gelombang kotak, tetapi pada rentang 10 KHz hingga 1 MHz gelombang kotak mengalami pergeseran *duty cycle*, dimana periode saat gelombang kotak di posisi HIGH dan LOW perbandingannya tidak sama. Berikut contoh cuplikan layer osiloskop dari gelombang kotak dengan frekuensi 10 KHz



Gambar 1. Gelombang Kotak 10 KHz

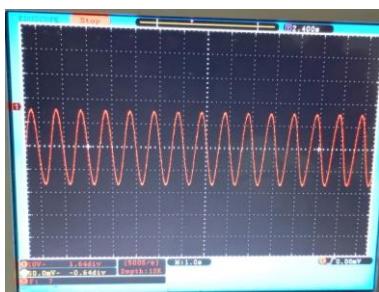
Pada gambar diatas dengan time/div 400 mikrodetik (skala gelombang adalah 1 maka nilai periodenya adalah 400 mikrodetik atau frekuensi aktualnya adalah 2500 Hz), didapatkan kesimpulan bahwa, perbandingan antara skala div HIGH dan skala div LOW adalah 3:2 (kondisi HIGH terukur 0,6 div dan kondisi LOW terukur 0,4 div). Hal ini menunjukkan bahwa periode saat HIGH adalah

$$T_{HIGH} = 400 \mu s \times 0,6 \text{ div} = 240 \mu s$$

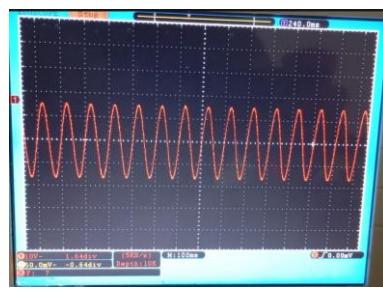
Periode saat LOW hasilnya adalah

$$T_{LOW} = 400 \mu s \times 0,4 \text{ div} = 160 \mu s$$

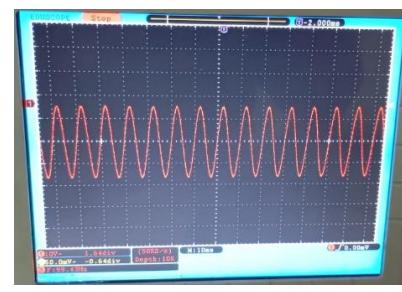
Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi diatas 10 KHz yang diberikan ke gelombang kotak, akan menyebabkan nilai perbandingan *duty cycle* pada gelombang kotak tersebut tidak akan menjadi 50% : 50%. Perbandingan bentuk gelombang sinusoida juga menghasilkan bentuk perbedaan gelombang seiring dengan kenaikan frekuensi, berikut adalah perbandingannya



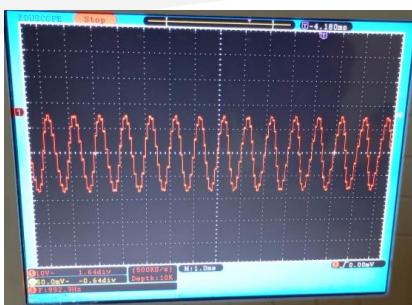
1 Hz



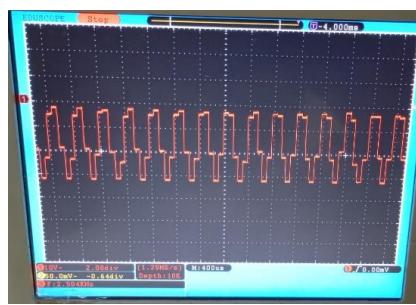
10 Hz



100 Hz



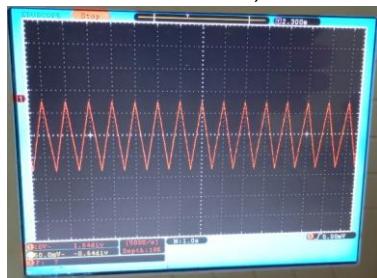
1 KHz



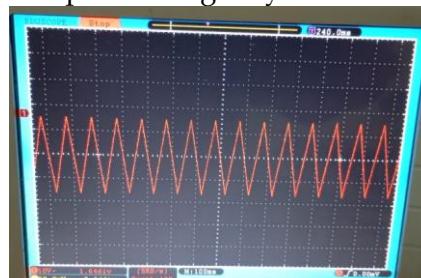
10 KHz

Gambar 1. Perbandingan bentuk gelombang sinusoida

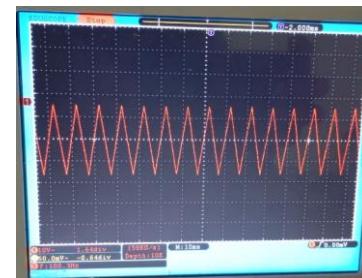
Berdasarkan gambar diatas didapatkan data bahwa diatas 1 KHz, bentuk gelombang sinusoida akan berubah menjadi gelombang tangga. Dibawah 1 KHz bentuk gelombang sinusoida mendekati gelombang sinosida yang diharapkan. Gelombang sinusoida pada rentang 1 KHz dan 10 KHz menunjukkan bahwa semakin besar nilai frekuensinya maka bentuk gelombang sinosida akan semakin menunjukkan bentuk gelombang tangga. Jumlah tangga pada frekuensi 1 KHz lebih banyak daripada frekuensi 10 KHz. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar frekuensi diatas 1 KHz maka jumlah tangga pada gelombang tangga yang dihasilkan akan semakin berkurang. Perbandingan bentuk gelombang segitiga juga menghasilkan bentuk perbedaan gelombang seiring dengan kenaikan frekuensi, berikut adalah perbandingannya



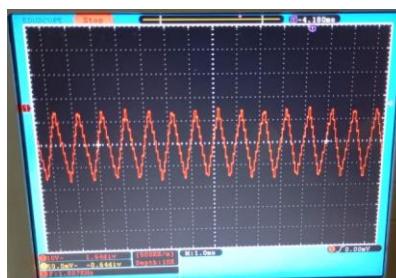
1 Hz



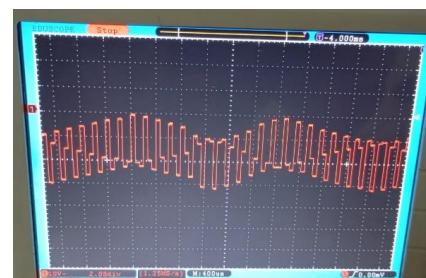
10 Hz



100 Hz



1 KHz



10 KHz

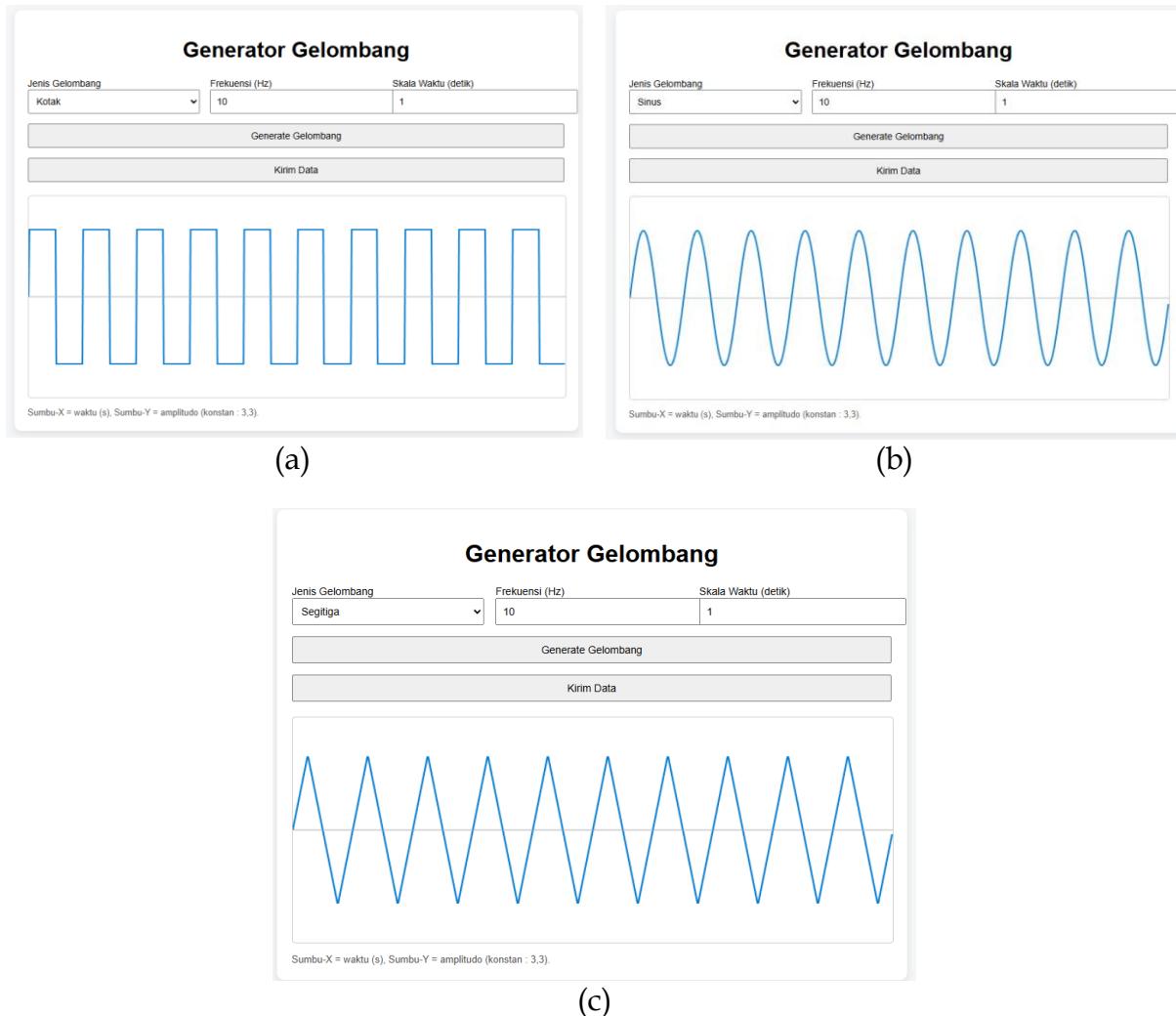
Gambar 1. Perbandingan bentuk gelombang segitiga

Berdasarkan gambar diatas didapatkan data bahwa diatas 1 KHz, bentuk gelombang segitiga akan berubah menjadi gelombang tangga. Dibawah 1 KHz bentuk gelombang segitiga mendekati gelombang segitiga yang diharapkan. Gelombang segitiga pada rentang 1 KHz dan 10 KHz menunjukkan bahwa semakin besar nilai frekuensinya maka bentuk gelombang segitiga akan semakin menunjukkan bentuk gelombang tangga. Jumlah tangga pada frekuensi 1 KHz lebih banyak daripada frekuensi 10 KHz. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar frekuensi diatas 1 KHz maka jumlah tangga pada gelombang tangga yang dihasilkan akan semakin berkurang. Gelombang segitiga pada rentang 10 KHz mengalami Amplitudo naik-turun (*timing jitter*) dengan pola ampolop (*envelope*). Mekanisme multitasking dan interupsi sistem ESP32 menyebabkan *timing jitter* yang akan menyebabkan perubahan kemiringan gelombang dan amplitudo gelombang yang tidak konstan. *Timing*

*jitter* pada ESP32 terjadi akibat dampak sistem *dual-core* saat terjadi *rescheduling* antar *core* meningkatkan waktu eksekusi pada operasi FreeRTOS(Arm et al., 2022).

### Hasil Kinerja Perangkat Lunak

Perangkat lunak dalam bentuk website mengirim bentuk gelombang dengan memasukkan nilai frekuensi dan bentuk gelombang ke mqtt. Mqtt akan mengirim data ke Serial ESP32 untuk membangkitkan gelombang sesuai perintah. Berikut ini adalah tampilan dari perangkat lunak



Gambar 1. Tampilan perangkat lunak *waveform generator*

Berdasarkan tampilan perangkat lunak pada gambar diatas, perangkat lunak *waveform generator* memiliki beberapa tombol (*button*) untuk melakukan dua fungsi. Fungsi yang pertama berfungsi untuk melakukan pembangkitan sinyal sesuai *input* dari kolom Jenis Gelombang, Frekuensi (Hz), dan Skala Waktu (detik). Fungsi yang kedua berfungsi untuk mengirim data ke MQTT dan MQTT secara otomatis mengirimkan data ke Serial ESP32. Perangkat lunak *waveform generator* ini memiliki 3 kolom yang berfungsi untuk mengatur parameter dari gelombang yaitu untuk mengatur jenis gelombang dan frekuensi (dalam satuan Hz) dan mengatur skala waktu. Bagian bawah perangkat lunak *waveform generator* berfungsi untuk menampilkan bentuk gelombang secara teoritis sehingga dapat dibandingkan dengan tampilan dari osiloskop. Performa dari perangkat lunak cukup baik dalam

mengirimkan pembangkitan gelombang ke MQTT dan juga performa MQTT dalam mengirimkan data ke serial ESP32.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran data kuantitatif dan pengamatan data kualitatif didapatkan kesimpulan bahwa perancangan ESP32 sebagai *waveform generator* cukup baik dalam menghasilkan data secara kuantitatif tetapi memiliki keterbatasan pada nilai diatas 1 KHz untuk membangkitkan gelombang segitiga dan gelombang sinusoida. Frekuensi diatas 10 KHz pada gelombang kotak menyebabkan terjadinya pergeseran duty cycle antara kondisi HIGH dan LOW. Nilai amplitudo pada pembangkitan gelombang sinusoida dan gelombang segitiga akan mengalami penurunan nilai jika kita memasukkan *input* diatas 10 KHz, tetapi hal ini tidak berlaku untuk gelombang kotak yang nilai amplitudonya stabil antara rentang 1 Hz hingga 1 MHz. Kesimpulan yang didapat adalah, perancangan ESP32 sebagai *waveform generator* dengan kendali aplikasi berbasis IoT dapat bekerja dengan baik jika kita memasukkan input dari rentang 1 Hz hingga dibawah 1 KHz untuk semua jenis gelombang dengan koneksi internet dan ESP32 yang stabil.

#### REFERENSI

- Álvarez-Gariburo, I., Sarnago, H., Lucía, Ó., & Burdío, J. M. (2023). Design and Optimization of a High-Current Versatile Arbitrary Waveform Generator. *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 710–714. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:258992836>
- Arm, J., Bastan, O., Mihálik, O., & Bradác, Z. (2022). Measuring the Performance of FreeRTOS on ESP32 Multi-Core. *IFAC-PapersOnLine*, 292–297. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:250939238>
- Jung, Y., Shrestha, S., Lim, N., Park, H., Sun, J., Park, J., Parajuli, S., Shrestha, K., Kim, S., & Cho, G. (2022). A Printed Wireless Triangle-Wave Generator via a Smartphone. *2100896(1)*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/adem.202100896>
- Luqman, M., Komarudin, A., & Nurcahyo, S. (2022). Rancang bangun pembangkit Sinusoidal Pulse Width Modulation berbasis arduino. *20(1)*, 25–32. <https://doi.org/10.33795/eltek.v20i1.333>
- Nabila, W., Lanang, I. G. L. D. P., Ramadhani, A. F., & Septian, B. (2023). RANCANG BANGUN OSILATOR GELOMBANG KOTAK UNTUK. *2ND MDP STUDENT CONFERENCE (MSC) 2023*, 198–205.
- Pramuditya, I. M. A., Agung, I. G., Raka, P., Rahardjo, P., Program, M., Teknik, S., Teknik, F., & Udayana, U. (2023). RANCANG BANGUN ALAT UJI PERIFERAL ESP32 DEVKIT V1 - DOIT 30 PIN. *10(4)*, 340–347.
- Shekhar, H. (2025). CA3080 And LT1228 Based Linear Voltage Controlled Square-Triangular Wave Oscillator. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 9, 1–9. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:278757075>
- Takase, K., Kawasaki, A., Jeong, B. K., Kashiwazaki, T., Kazama, T., Enbutsu, K., Watanabe, K., Umeki, T., Miki, S., Terai, H., Yabuno, M., China, F., Asavanant, W., Endo, M., Yoshikawa, J., & Furusawa, A. (2022). Quantum arbitrary waveform generator. *Science Advances*, *8*(43), eadd4019. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add4019>