

Pembangkitan Pulsa Orde Nanodetik Berbasis Mikrokontroler Untuk Eksitasi Transduser Ultrasonik

FAATIH RIFQI MUQAFFI, BAMBANG MukTI WIBAWA, DARMAWAN HIDAYAT

Department of Electrical Engineering, Universitas Padjadjaran, Indonesia
Email: darmawan.hidayat@unpad.ac.id

Received 10 Desember 201x | *Revised* 5 Januari 2020 | *Accepted* 20 Januari 2020

ABSTRAK

Makalah ini melaporkan suatu teknik pembangkitan pulsa lebar orde nanodetik (ns) repetitif yang terprogram berbasis mikrokontroler untuk keperluan eksitasi transduser ultrasonik. Pembangkitan pulsa dan pengaturan jarak antar pulsa dilakukan melalui operasi timer mikrokontroler. Sebuah monostable multivibrator mengubah lebar pulsa dari mikrokontroler dalam orde nanodetik melalui pengaturan komponen pewaktuan resistor-kapasitor (RC) dengan cara pengaturan nilai R yang dibuat dari sebuah potensiometer digital. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mikrokontroler membangkitkan pulsa repetitif dengan interval terprogram dalam orde 1 detik dan lebar pulsa minimum 1,25 ms. monostable multivibrator dapat mengubah lebar pulsa tersebut menjadi sekitar 140 ns. Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem berfungsi sesuai rancangan, sistem dapat membangkitkan pulsa repetitif dengan lebar pulsa hingga 140 ns dengan parameter interval dan lebar yang dapat diprogram.

Kata kunci: generator pulsa, lebar pulsa singkat, mikrokontroler, monostable multivibrator, eksitasi transduser ultrasonik

ABSTRACT

This paper reports a repetitive, programmable, microcontroller-based pulse width generation technique for the purpose of ultrasonic transducer excitation. Pulse generation and distance adjustment between pulses is done through the microcontroller timer. A monostable multivibrator changes the pulse width of the microcontroller in the order of nanoseconds by adjusting the resistor-capacitor time constant which are done by adjusting the R value made from a digital potentiometer. The test results show that the microcontroller generates repetitive pulses with programmed intervals in order of 1 second and pulse width of 1.25 ms. A monostable multivibrator converts the pulse width to ca. 140 ns. Based on the test results, it can be concluded that the system functions according to the design as the system can generate repetitive pulses with pulse widths up to 140 nanoseconds with programmable interval and width parameters.

Keywords: pulse generator, short-width pulse, microcontroller, monostable multivibrator, ultrasonic transducer excitation

1. PENDAHULUAN

Gelombang ultrasonik banyak digunakan untuk aplikasi-aplikasi pengujian tak-merusak (NDT) terhadap objek atau medium uji karena relatif murah, sederhana, dan cepat (**Ingale & Kale, 2017; Jaffar, K, & Y.B, 2016**). Pembangkitan gelombang ultrasonik berbasis elemen aktif piezoelektrik dapat dilakukan dengan memicu transduser oleh sinyal listrik dalam bentuk pulsa (**Chaney & Sundararajan, 2004; Darmawan Hidayat, Setianto, Syafei, & Wibawa, 2018**). Teknik ini memiliki fleksibilitas dalam implementasi dan akuisisi sinyal (**Svilainis, Chaziachmetovas, & Dumbrava, 2015**). Transduser ultrasonik mengubah pulsa listrik menjadi energi dalam bentuk gelombang akustik. Transduser bervibrasi dan membangkitkan gelombang ultrasonik jika dieksitasi pulsa tegangan-tinggi. Gelombang ultrasonik tersebut selanjutnya dirambatkan ke objek atau medium uji dan diterima kembali oleh transduser penerima. Gelombang terima selanjutnya diproses untuk memperoleh berbagai informasi tentang objek atau medium uji tersebut. Pulsa eksitasi ini dapat dibangkitkan dengan penyaklaran (*switching*) tegangan tinggi searah (DC) oleh pulsa penggerak (*drive*) yang dibangkitkan dari suatu generator pulsa (**Darmawan Hidayat, Ismail, Syafei, & Wibawa, 2018; Darmawan Hidayat, Syafei, Wibawa, & Tumbelaka, 2018**). Frekuensi kerja transduser menentukan lebar pulsa eksitasi yang tepat agar transduser membangkitkan gelombang ultrasonik pada frekuensi kerjanya (**D. Hidayat, Syafei, Wibawa, & Tumbelaka, 2018**). Pada pembangkitan gelombang ultrasonik frekuensi tinggi (di atas 1 MHz) dan daya tinggi berbasis piezoelektrik, eksitasi transduser membutuhkan pulsa singkat (dalam orde kurang dari 500 nanodetik atau sub-nanodetik) dan tegangan tinggi (dalam orde ratusan volt) karena pulsa singkat ini mengandung sinyal spektrum yang lebar dan frekuensi tinggi (**D. Hidayat, Syafei, et al., 2018**). Jadi, sistem generator pulsa penggerak memegang peranan kunci dalam perangkat/teknologi berbasis gelombang ultrasonik (**Ega, Suhendi Syafei, Mukti Wibawa, & Hidayat, 2016**).

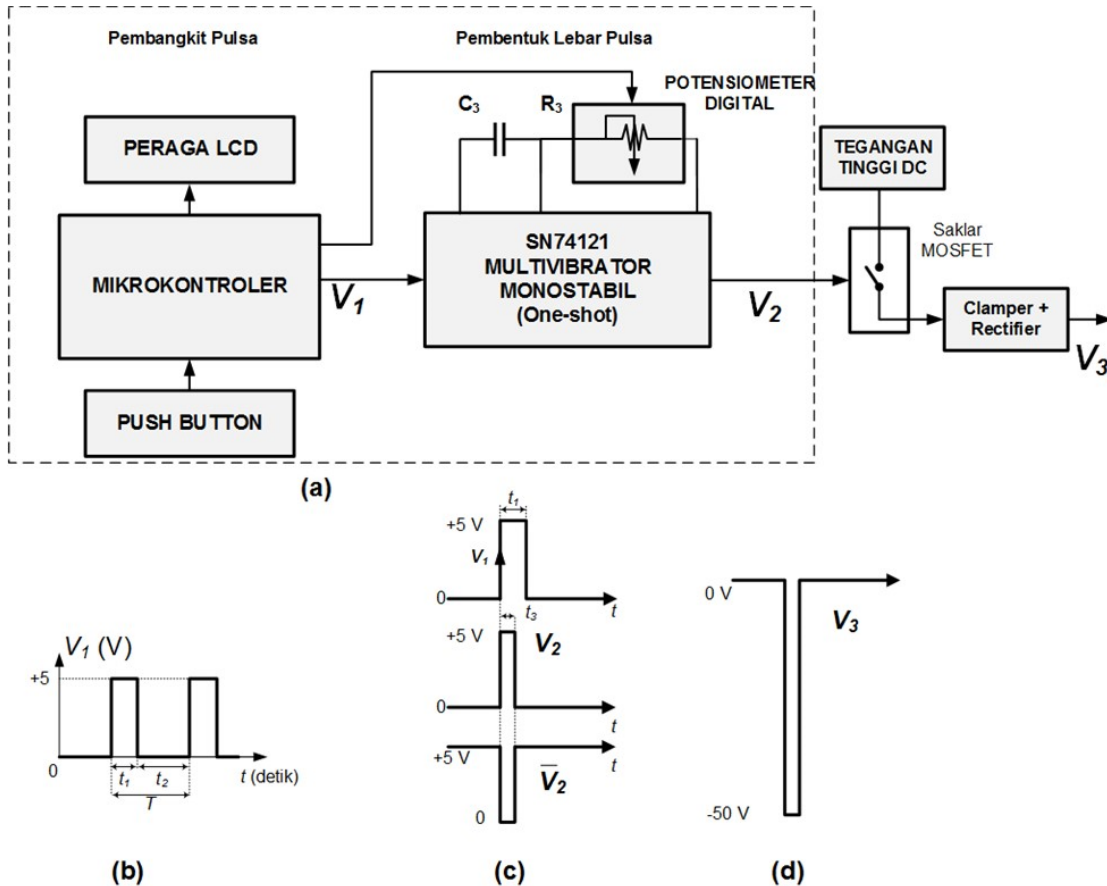
Terdapat beberapa generator pulsa komersial untuk keperluan eksitasi transduser ultrasonik, seperti tipe PR5900 (Panametrics Inc, Waltham, MA, USA). Namun perangkat komersial memiliki beberapa keterbatasan dalam sensitivitas ketika digunakan untuk proses pencitraan berbasis-ultrasonik frekuensi tinggi (**Wu, Chen, Wang, Chen, & Chen, n.d.**). Selain itu, faktor akses harga menjadi kendala ekonomis ketika suatu aplikasi memerlukan lebih dari satu perangkat. Oleh karena itu, diperlukan suatu alternatif generator pulsa eksitasi yang dapat digunakan untuk eksitasi transduser frekuensi tinggi (di atas 1 MHz) dengan fitur yang dapat diprogram sesuai kebutuhan pengguna dan perangkat ini dapat diperoleh dan diproduksi dengan harga terjangkau. Beberapa sistem generator pulsa dibangun berbasis mikrokontroler. Penggunaan mikrokontroler memberikan peningkatan fitur dan kemudahan dalam operasional oleh pengguna (**Aydn & Güler, 2010; Vyaghra, Sharma, & Rajagopalan, 2016**). Makalah ini melaporkan rancangan dan pengujian sistem generator pulsa repetitif yang dibangun dari mikrokontroler Arduino dan *monostable multivibrator* sehingga lebar dan interval pulsa dapat diprogram masing-masing dalam orde 140 ns dan 1 μ s – 1 s.

2. METODE

2.1 Blok Diagram Sistem

Gambar 1 memperlihatkan blok diagram sistem dan proses pembentukan pulsa secara keseluruhan. Sistem keseluruhan dibangun dari dua blok utama yaitu bagian pertama adalah *pembangkit pulsa* dan blok kedua adalah *pembentuk lebar pulsa* (kotak garis putus-putus Gambar 1.a). Pembangkit pulsa dibangun dari komponen mikrokontroler Arduino Uno (ATmega328P) sebagai pengontrol, lima saklar tekan (*push-button*, PB) sebagai antarmuka pengaturan parameter-parameter pulsa dan sebuah peraga LCD 2×16 karakter sebagai

penampil nilai-nilai parameter pulsa. Pembentuk lebar pulsa dibangun dari sebuah *monostable multivibrator* (dengan input picu *Schmitt trigger* tepi positif) dan sebuah potensiometer digital. *Monostable multivibrator* dalam mode *one-shot* dibangun dari komponen IC TTL SN74121. Potensiometer digital adalah IC X9C103 (dari Intersil) memiliki nilai resistansi 0 – 10 k Ω yang terbagi dalam 100 tap (langkah) nilai resistansi, dan antarmuka serial. Skematik rangkaian keseluruhan ditampilkan seperti Gambar 3.

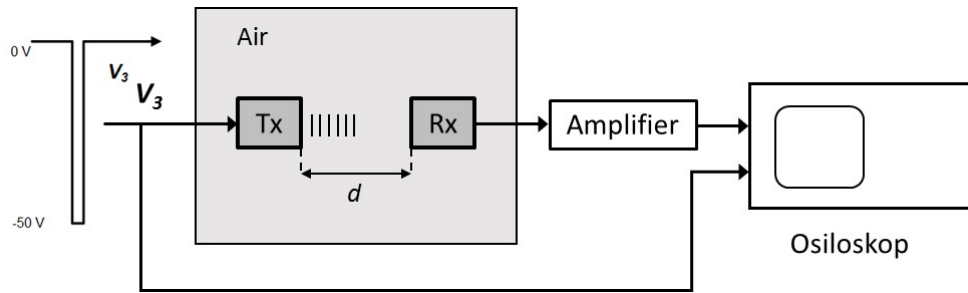


Gambar 1. Blok Diagram Sistem Pembangkit Pulsa Terprogram Berbasis Mikrokontroler Dengan Lebar Pulsa Orde Nanodetik (a) Blok Diagram, (b) Bentuk Pulsa dari Mikrokontroler, (c) Pembentukan Lebar Pulsa Nanodetik dan (d) Pulsa Nanodetik yang Telah Dikuatkan Daya untuk Eksitasi Transduser

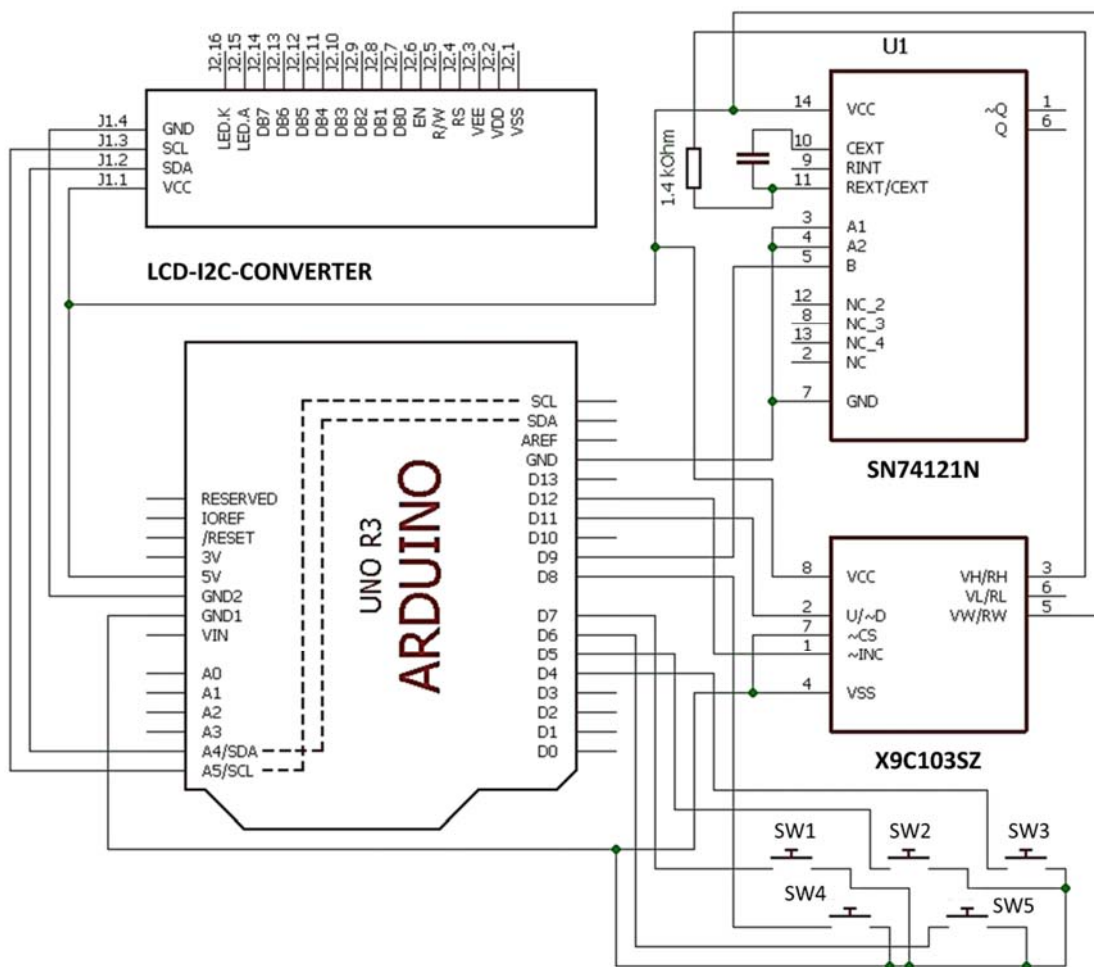
Pulsa terprogram V_2 yang dibangkitkan dari sistem mikrokontroler dan *monostable multivibrator* masih memiliki daya rendah (level TTL) sehingga tidak cukup daya untuk eksitasi transduser ultrasonik. Untuk meningkatkan daya, pulsa V_2 selanjutnya dikuatkan melalui rangkaian penyaklaran tegangan tinggi MOSFET dan dibentuk oleh rangkaian penjepit (*clammer*) dan penyearah (*rectifier*) menjadi pulsa negatif -50 V sehingga menghasilkan pulsa V_3 seperti Gambar 1.d. Pulsa V_3 ini selanjutnya digunakan untuk eksitasi transduser.

Pengujian pulsa V_3 untuk eksitasi transduser dilakukan dengan cara mode transmisi perambatan gelombang ultrasonik dalam medium air menggunakan sepasang transduser identik jenis tercelup (*immersible*) yang memiliki frekuensi kerja masing-masing $1,00 \pm 0,05$ MHz seperti pada Gambar 2. Pulsa V_3 mengeksitasi transduser pengirim Tx sehingga gelombang ultrasonik terbangkit dari Tx dan merambat melalui medium air. Gelombang

ultrasonik yang telah merambat kemudian diterima oleh transduser, dikuatkan oleh amplifier, dan diterima oleh osiloskop (GW-Instek GDS2014) untuk ditampilkan dan direkam.



Gambar 2. Sistem Pengujian Pulsa V_3 untuk Eksitasi Transduser



Gambar 3. Rangkaian Skematik Sistem Pembangkit Pulsa Terprogram Berbasis Mikrokontroler

2.2 Perangkat Lunak

Pembangkitan pulsa dilakukan oleh mikrokontroler dengan memanfaatkan pustaka (*library*) pembangkitan pulsa *pulse-width modulation* (PWM) melalui operasi *Timer1* (bentuk pulsa ditampilkan seperti pada Gambar 1.b). Parameter pulsa meliputi lebar pulsa (t_i) dan interval

pulsa (T) diatur melalui saklar PB. Peraga LCD menampilkan nilai-nilai parameter tersebut. Berikut adalah algoritma pembangkitan pulsa dengan contoh pengaturan nilai parameter t_1 adalah 512 ns dan T sebesar 10.000 ns (10 ms).

```
const int sigIn = 9;
void setup() {
  pinMode(sigIn, OUTPUT);
  Timer1.initialize(10000); // nilai T = jarak interval pulsa
  Timer1.pwm(sigIn, 512); // lebar pulsa t1
}
```

Lebar pulsa t_1 dari mikrokontroler dikonversi pada tepi positif pulsa menjadi t_3 dalam orde nanodetik oleh *monostable multivibrator Schmitt trigger*. Lebar pulsa keluaran multivibrator ini ditentukan oleh nilai pewaktuan dari rangkaian R_3 (yang dibangun dari potensiometer digital) dan C_3 yang dipasang sebesar 50 pF, mengikuti Persamaan (1) (**Darmawan Hidayat, Setianto, et al., 2018**).

$$t_3 = 0,33 \times R_3 \times C_3 \quad (1)$$

Nilai R_3 diatur oleh mikrokontroler melalui tiga saluran kontrol IC X9C103 yaitu pin U/\bar{D} , \bar{CS} dan \bar{INC} . Berikut adalah algoritma pengaturan nilai R_3 ke nilai minimum (nol Ω) dengan melakukan cacah turun sebanyak 101 kali. Langkah ini dilakukan untuk memastikan nilai resistansi berangkat dari nol.

```
x9c103Down(101);

void x9c103DownOnce() {
  digitalWrite(UD, LOW);
  digitalWrite(INC, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(INC, LOW);
}

void x9c103Down(int banyak) {
  for (int i = 0; i < banyak; i++) {
    x9c103DownOnce();
    delay(200);
  }
}
```

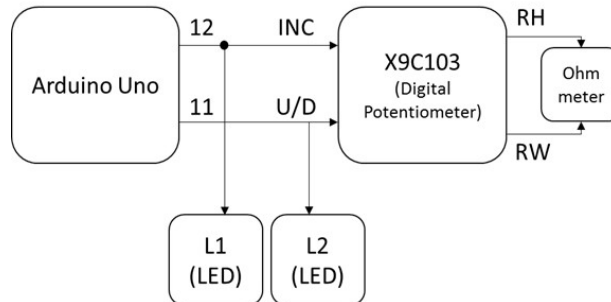
Kemudian proses cacah (*counting*) untuk pengaturan ke nilai R_3 tertentu dilakukan secara naik dari kondisi minimum dengan melakukan perulangan fungsi program sebagai berikut. Dengan rentang nilai resistansi IC X9C103 adalah 0 – 10 k Ω dan terdapat 100 langkah nilai, maka nilai resolusi potensiometer digital ini adalah 100 Ω /langkah.

```
void x9c103UpOnce() {
  digitalWrite(UD, HIGH);
  digitalWrite(INC, HIGH);
  delay(50);
  digitalWrite(INC, LOW);
}
```

2.3 Pengujian

Pulsa yang dibangkitkan dari mikrokontroler dan pulsa konversi dari *monostable multivibrator* ditampilkan dan direkam dengan menggunakan osiloskop (GW-Instek 2104A). Interval pulsa diukur melalui pengukuran jarak pulsa berdampingan. Pengujian resistansi terhadap nilai

cacahan IC X9C103 dilakukan seperti Gambar 4. Mikrokontroler memberikan nilai cacahan naik dengan cara membuat tinggi pin U/\bar{D} dan memberikan tepi negatif pada pin \overline{INC} sebanyak n tap sesuai resolusi X9C103 sebesar $100 \Omega/\text{tap}$. Nilai resistansi pada pin RH dan RW diukur menggunakan multimeter digital (Sanwa 800a).

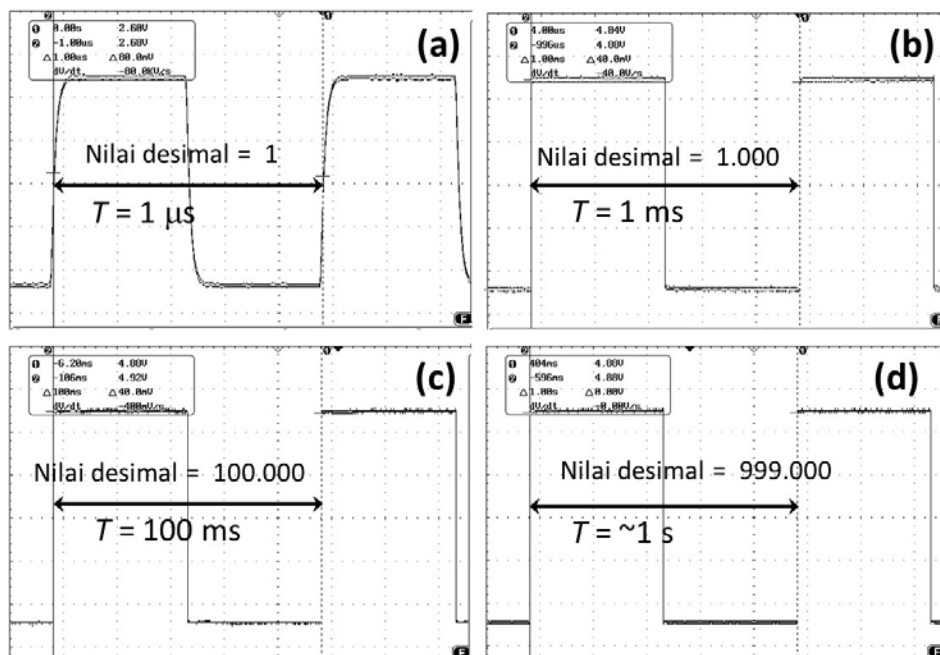


Gambar 4. Blok Pengujian Resistansi terhadap Nilai Cacah IC X9C103

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 5 memperlihatkan bentuk pulsa yang dibangkitkan di pin-9 dari mikrokontroler V_I dengan variasi nilai desimal pada fungsi `Timer1.initialize(nilai_desimal);` adalah 1, 1000, 100000 dan 999.000 yang berhubungan dengan interval waktu T sebesar $1 \mu\text{s}$, 1 ms , 100 ms dan 1 s . Dari hasil pengukuran pada tampilan osiloskop tampak bahwa bentuk sinyal yang dihasilkan adalah pulsa PWM. Siklus kerja pulsa V_I adalah 50%, artinya lebar t_1 sama dengan lebar t_2 . Ketika nilai desimal fungsi diubah tampak bahwa lebar T berubah memiliki interval pulsa T adalah $1 \mu\text{s}$, 1 ms , 100 ms dan 1 s , mengikuti sesuai dengan nilai desimal. Hasil pengukuran ini menunjukkan bahwa pulsa repetitif dengan nilai interval pulsa T dapat dibangkitkan dari mikrokontroler melalui pengaturan nilai desimal pada fungsi.

Untuk tahap berikutnya, lebar t_1 diubah menjadi lebih pendek tanpa mengubah jarak interval T . Perubahan t_1 menjadi t_3 dilakukan oleh multivibrator melalui pengaturan nilai resistansi potensiometer digital R_3 . Untuk keperluan tersebut diperlukan potensiometer yang memiliki linearitas tinggi. Gambar 6 memperlihatkan nilai resistansi potensiometer digital IC X9C103 terhadap nilai cacahan 0 – 100. Nilai korelasi antara resistansi dan nilai cacahan adalah $R^2 = 0,9999$ menandakan bahwa linearitas potensiometer digital sangat baik. Secara visual dapat dilihat garis yang lurus dengan linearitas tinggi menghubungkan resistansi dan nilai cacahan.

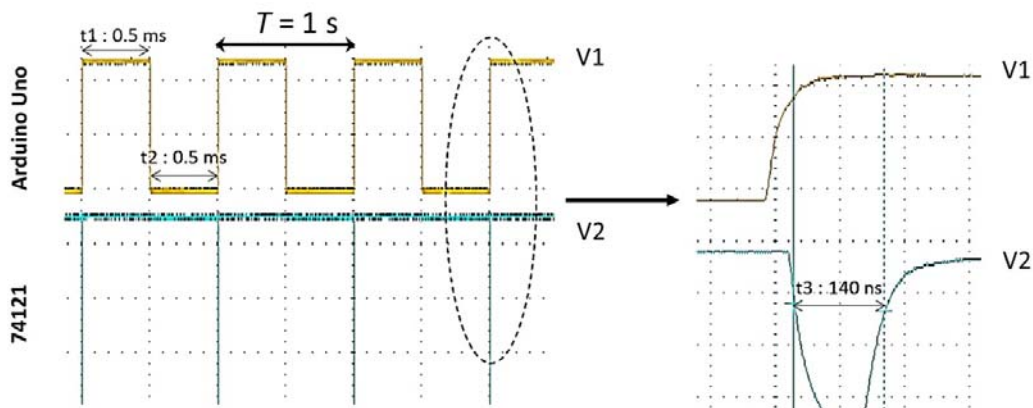


Gambar 5. Bentuk Pulsa dari Mikrokontroler Dengan Pengaturan Variasi Interval Pulsa T Bernilai (a) $1 \mu s$, (b) $1 ms$, (c) $100 ms$ Dan (d) $1 s$



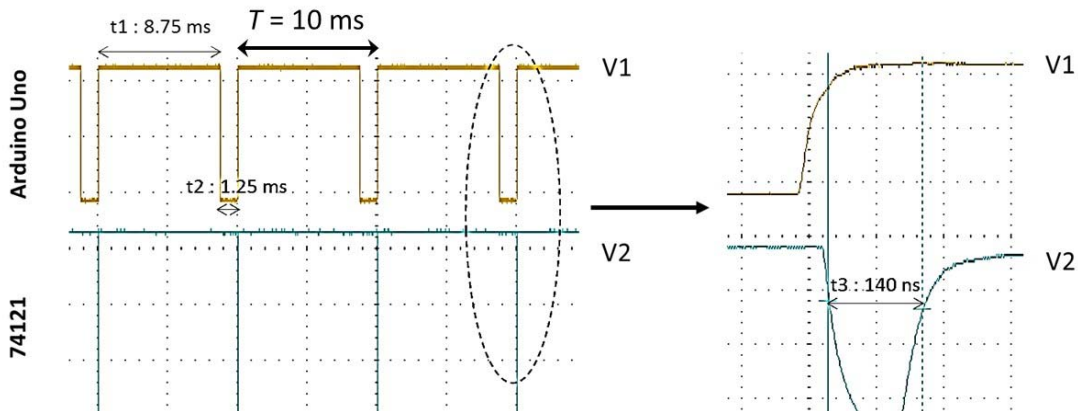
Gambar 6. Resistansi Potensiometer Digital terhadap Nilai Cacah 0 – 100 Desimal

Gambar 6 memperlihatkan proses konversi pulsa V_1 (lebar t_1) menjadi pulsa V_2 (lebar t_3) oleh *monostable multivibrator* SN74121. Lebar interval pulsa V_1 adalah $1 s$ atau lebar t_1 $500 ms$ (dengan siklus kerja 50%). Dengan nilai R_3 dan C_3 masing-masing adalah 4400Ω dan $50 pF$, maka secara perhitungan dari Persamaan 1 nilai t_3 adalah $151,8 ns$. Hasil pengukuran pada Gambar 7 menunjukkan bahwa lebar pulsa t_3 adalah $140 ns$ (terdapat selisih dengan hasil perhitungan $151,8 ns$) dengan lebar pulsa sama dengan V_1 yaitu $1 s$. Hasil ini menunjukkan bahwa lebar pulsa V_1 sebesar t_1 $500 ms$ telah diubah menjadi pulsa singkat orde $140 ns$ tanpa mengubah lebar interval pulsa.



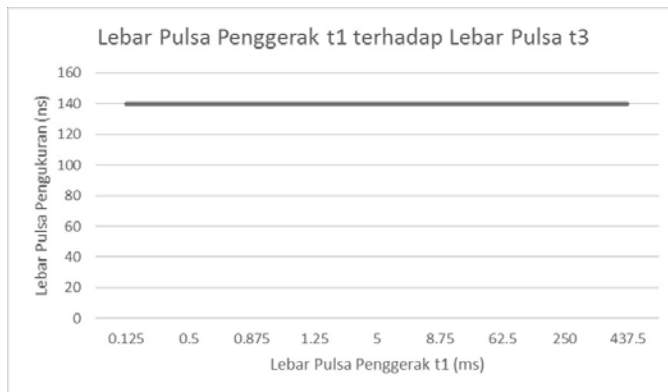
Gambar 7. Bentuk Pulsa yang Dibangkitkan oleh Mikrokontroler (V_1) dengan Lebar Pulsa T_1 adalah 0,5 S dan Pulsa Hasil Konversi oleh *Monostable Multivibrator* (V_2) dengan Nilai $R_3=4400 \Omega$ dan $C_3 = 50 \text{ pF}$

Untuk memastikan fungsi kerja *monostable multivibrator* dalam pembentukan pulsa singkat, maka selanjutnya ditinjau lebar pulsa t_1 lebih lebar dari pulsa V_1 pada Gambar 7, yaitu sebesar 8,75 ms (atau siklus kerja 87,5%) dengan jarak interval T sebesar 10 ms.

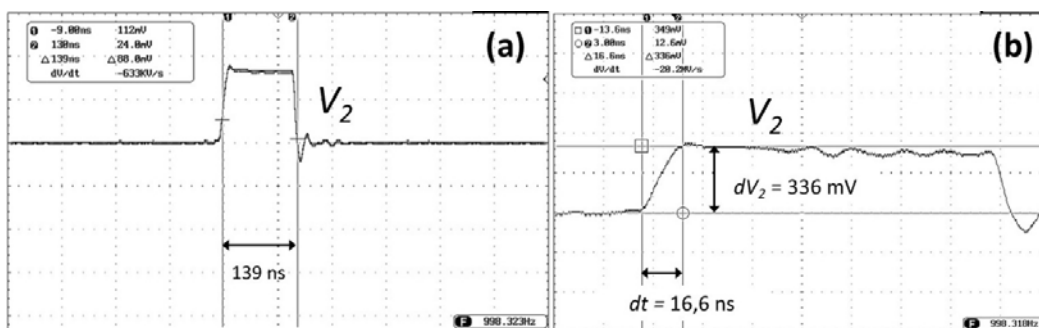


Gambar 8. Bentuk Pulsa yang Dibangkitkan oleh Mikrokontroler (V_1) dengan Lebar Pulsa T_1 Adalah 8,75 ms dan Pulsa Hasil Konversi oleh *Monostable Multivibrator* (V_2) dengan Nilai $R_3=4400 \Omega$ dan $C_3 = 50 \text{ pF}$

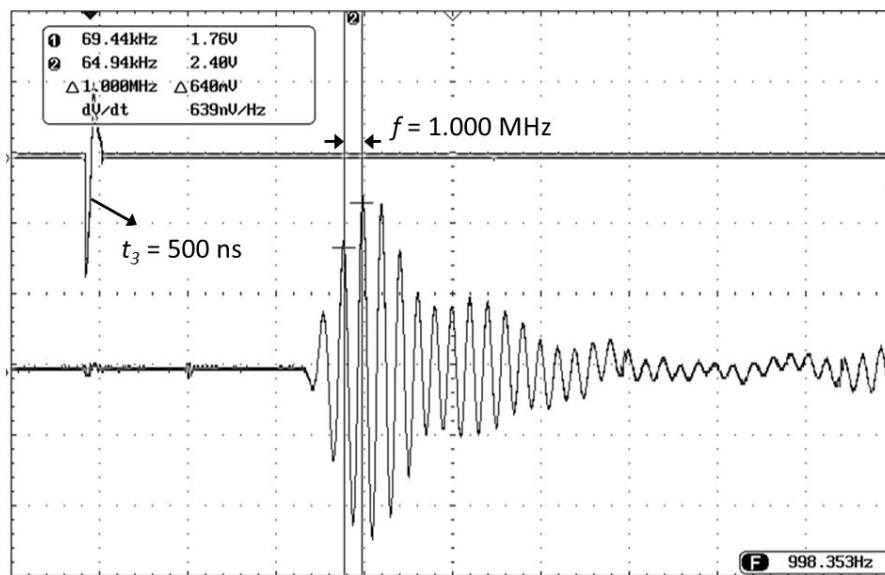
Gambar 8 memperlihatkan ketika lebar pulsa t_1 dinaikkan menjadi 8,75 ms, lebar pulsa t_3 tetap tidak berubah sebesar 140 ns mengikuti nilai pengaturan R_3 dan C_3 sebelumnya. Nilai interval pulsa pada pulsa t_3 juga tidak berubah, sama dengan interval pulsa pada pulsa t_1 sebesar 10 ms. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk berbagai nilai lebar pulsa t_1 dalam rentang 0,125 ms hingga 437,5 ms. Gambar 9 memperlihatkan plot hubungan antara lebar pulsa t_3 dengan lebar pulsa t_1 . Tampak bahwa dengan variasi nilai lebar pulsa t_1 dengan nilai 0,125 – 437,5 ms, lebar pulsa t_3 tetap sebesar 140 ns sesuai dengan kombinasi nilai R_3 dan C_3 . Hasil pengujian yang disajikan Gambar 6, 7 dan 8 menunjukkan bahwa lebar pulsa t_3 hanya ditentukan oleh nilai R_3 dan C_3 , tidak bergantung pada lebar pulsa t_1 . Nilai interval pulsa T pada V_2 juga sama dengan lebar interval V_1 , dan tidak bergantung pada lebar t_1 . Dengan metode ini, nilai t_3 dan T dapat diatur dan diprogram secara independen sehingga dapat memudahkan pengguna dalam pengaturan kedua parameter pulsa tersebut.



Gambar 9. Pembentukan Lebar Pulsa T_3 Orde Nanodetik dari Variasi Lebar Pulsa t_1



Gambar 10. Pengujian pulsa V_2 orde nanodetik (a) lebar 139 ns dan (b) laju perubahan-tegangan (*slew rate*) sinyal V_2



Gambar 11. Sinyal Ultrasonik di Transduser Penerima Rx setelah Merambat melalui Medium Air

Karakteristik pulsa eksitasi V_3 ditentukan dari pulsa V_2 . Salah satu karakteristik penting dalam pembentukan pulsa lebar orde nanodetik adalah parameter laju perubahan-tegangan (*slew rate*, SR) pulsa yang dihitung dengan Persamaan (2). Dengan pengaturan maksimum, lebar pulsa sinyal V_2 diperoleh 139 ns seperti tampilan Gambar 10.a pada skala waktu 100 ns/div. Untuk pengukuran nilai SR , tampilan osiloskop sinyal V_2 diperbesar pada skala waktu 20 ns/div. Dengan perubahan tegangan dan waktu pada tepi positif V_2 masing-masing adalah 336 mV dan 16,6 ns maka nilai SR pulsa V_2 adalah 336 mV/16,6 ns yaitu 0,02024 V/ns. Setelah melalui penyaklaran MOSFET nilai tegangan dV_3 menjadi 50 V sehingga nilai SR pulsa V_3 adalah 3,01 V/ns. Nilai standar SR generator pulsa untuk eksitasi transduser ultrasonik adalah sekitar 3 V/ns (**Hsia, Hsiao, & Huang, 2019**). Hasil ini menunjukkan bahwa pulsa generator yang dibangun memenuhi kriteria untuk keperluan eksitasi transduser.

$$SR = \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Dengan nilai dV adalah perubahan tegangan (V) dan dt adalah perubahan waktu (s).

Gambar 11 memperlihatkan sinyal gelombang ultrasonik yang diterima oleh transduser Rx. Sinyal ini adalah satu paket gelombang ultrasonik yang dihasilkan dari satu eksitasi pulsa V_3 . Berdasarkan pengukuran, frekuensi sinyal terima adalah sekitar 1,00 MHz. Nilai ini sesuai dengan rentang frekuensi kerja transduser dengan toleransi $\pm 0,05\%$ atau ± 50 kHz. Sinyal terima berbentuk sinusoidal teredam sesuai karakteristik transduser. Hasil ini menunjukkan bahwa gelombang ultrasonik telah dibangkitkan dari transduser Tx, merambat melalui medium dan diterima di transduser Rx, sehingga membuktikan bahwa pulsa V_3 telah mengeksitasi transduser ultrasonik sesuai frekuensi kerjanya melalui pengaturan lebar pulsa eksitasi.

4. KESIMPULAN

Generator pembangkit pulsa terprogram berbasis mikrokontroler Arduino Uno (ATMega328P) telah dibuat dan diuji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat membangkitkan pulsa repetitif dengan lebar pulsa hingga orde 140 ns. Pengaturan lebar pulsa dan interval pulsa dapat dilakukan secara terprogram melalui tombol-tombol tekan (PB). Seluruh parameter pulsa tersebut dapat ditampilkan pada peraga LCD. Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem berfungsi sesuai rancangan, sistem dapat membangkitkan pulsa repetitif dengan lebar pulsa hingga 140 ns dengan parameter interval dan lebar yang dapat diprogram.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Kemenristekdikti melalui skim Riset Dasar (RD) Universitas Padjadjaran tahun anggaran 2019. Kami mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti atas pendanaan RD Universitas Padjadjaran No. 2831/UN6.D/LT2019 Tahun Anggaran 2019.

DAFTAR RUJUKAN

- Aydn, E. A., & Güler, I. (2010). Design of PIC-Controlled pulsed ultrasonic transmitter for measuring gingiva thickness. *Instrumentation Science and Technology*, *38*(6), 411–420.
<https://doi.org/10.1080/10739149.2010.509149>

- Chaney, A., & Sundararajan, R. (2004). Simple MOSFET-based high-voltage nanosecond pulse circuit. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *32*(5), 1919–1924. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.835966>
- Ega, M., Suhendi Syafei, N., Mukti Wibawa, B., & Hidayat, D. (2016). *Proseding Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya Sabtu*.
- Hidayat, D., Syafei, N. S., Wibawa, B. M., & Tumbelaka, B. Y. (2018). Fourier transform of high frequency ultrasonic waves propagated with a transmission mode. *Journal of Physics: Conference Series*, *1080*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1080/1/012034>
- Hidayat, Darmawan, Ismail, T., Syafei, N. S., & Wibawa, B. M. (2018). Generator Pulsa Spike Terprogram untuk Pemicu Transduser Ultrasonik. *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, *3*(2), 295-302. <https://doi.org/10.31544/jtera.v3.i2.2018.295-302>
- Hidayat, Darmawan, Setianto, S., Syafei, N. S., & Wibawa, B. M. (2018). MOSFET-based high voltage short pulse generator for ultrasonic transducer excitation. *AIP Conference Proceedings*, *1927*. <https://doi.org/10.1063/1.5021211>
- Hidayat, Darmawan, Syafei, N. S., Wibawa, B. M., & Tumbelaka, B. Y. (2018). Fabrikasi Transformator Step-up 1-kV Fasa Tunggal untuk Generator Pemicu Transduser Ultrasonik. *Jurnal Teknologi Rekayasa*, *3*(1), 11 - 16. <https://doi.org/10.31544/jtera.v3.i1.2018.11-16>
- Hsia, C., Hsiao, Y. C., & Huang, Y. C. (2019). A single-chip high-voltage integrated actuator for biomedical ultrasound scanners. *Sensors (Switzerland)*, *19*(23). <https://doi.org/10.3390/s19235063>
- Ingale, K. V., & Kale, Y. B. (2017). ULTRASONIC HIGH VOLTAGE PULSER. In *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*.
- Jaffar, D. S. Abdul, K, M., & Y.B, G. (2016). Design of High Voltage Pulse Generator and Receiver Circuit for Ultrasonic velocity and Absorption Measurements In liquids. *Ijireeice*, *4*(1), 88–90. <https://doi.org/10.17148/ijireeice.2016.4121>.
- Svilainis, L., Chaziachmetovas, A., & Dumbrava, V. (2015). Half bridge topology 500 v pulser for ultrasonic transducer excitation. *Ultrasonics*, *59*, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.01.014>
- Vyaghra, R. V, Sharma, S. J., & Rajagopalan, S. (2016). Design of Microcontroller Based Multi-Frequency Ultrasonic Pulser Receiver. In *Journal of Engineering Research and Applications*, *6*.
- Wu, J.-X., Chen, P.-J., Wang, C.-L., Chen, G.-C., & Chen, T. (n.d.). *Development of a Bipolar Pulse Generator for High-Frequency Ultrasound Imaging Systems*.