

**RANCANG BANGUN PENALA GITAR OTOMATIS BERBASIS ARDUINO DENGAN
FAST FOURIER TRANSFORM SEBAGAI DETEKSI NADA**

**DESIGN AND BUILD AN AUTOMATIC GUITAR TUNER BASED ON ARDUINO
WITH *FAST FOURIER TRANSFORM* AS TONE DETECTION**

Friska Alfatika*, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta
Sumarna, Departemen Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta

*e-mail: friskaalfatika.2020@student.uny.ac.id

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk merancang-bangun penala senar gitar otomatis berbasis Arduino dan motor servo dengan *fast fourier transform* sebagai deteksi frekuensi nada, menguji tingkat akurasi dari sistem pengukur frekuensi yang digunakan dalam penala, dan menguji keseluruhan alat yang telah dibuat untuk mengetahui performanya. Penelitian terbagi menjadi tiga tahap, yaitu perancangan, perakitan, dan pengujian alat. Mikrofon elektret sebagai sensor yang menerima sinyal suara dan mengubahnya menjadi sinyal listrik. Rangkaian pengondisi sinyal menguatkan dan memfilter frekuensi sinyal mikrofon. Arduino menganalisis sinyal menggunakan algoritma *fast fourier transform* (FFT) untuk mendapatkan nilai frekuensi. Motor servo memutar *peg* gitar untuk menyesuaikan tegangan atau frekuensi senar. Arah rotasi motor servo dikontrol oleh Arduino setelah frekuensi terukur hasil FFT dibandingkan dengan frekuensi penyetalan standar gitar yang menjadi *set point*. Penelitian telah menghasilkan sebuah sistem yang mengatur tegangan senar gitar secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengukuran frekuensi menggunakan algoritma FFT pada Arduino mempunyai tingkat akurasi sebesar 99,82%. Sistem penala otomatis dapat melakukan penyetalan senar dengan eror tertinggi sebesar 1,2 hertz (senar 4) dan terendah 0,1 hertz (senar 1) dengan waktu penyetalan (*settling time*) cenderung linier terhadap frekuensi awal senar, yaitu semakin jauh frekuensi awal dari *set point*, maka penyetalan semakin lama.

Kata kunci: *frekuensi, penala, Arduino, FFT, motor servo, otomatis*

Abstract. This research aims to design and build an automatic guitar string tuner based on Arduino and a servo motor with *Fast fourier transform* as the method for detecting pitch frequency, test the accuracy level of the frequency measurement system used in the tuner, and evaluate the overall device created to determine its performance. The research is divided into three stages: design, assembly, and testing of the device. An electret microphone serves as a sensor that receives sound signals and converts them into electrical signals. The signal conditioning circuit amplifies and filters the microphone signal frequencies. The Arduino analyzes the signal using the *Fast fourier transform* (FFT) algorithm to obtain the frequency value. The servo motor rotates the guitar *peg* to adjust the string tension or frequency. The servo motor's rotation direction is controlled by the Arduino after the measured frequency from the FFT is compared with the standard guitar tuning frequency, which serves as the *set point*. The research has produced a system that automatically adjusts the tension of guitar strings. Test results indicate that frequency measurements using the FFT algorithm on Arduino have an accuracy rate of 99.82%. The automatic tuning system can perform string adjustments with a maximum error of 1.2 hertz (4th string) and a minimum of 0.1 hertz (1st string), with the

settling time tending to be linear relative to the initial string frequency; that is, the farther the initial frequency from the set point, the longer the tuning process.

Keywords: *frequency, tuner, Arduino, FFT, servo motor, automatic*

PENDAHULUAN

Gitar umumnya mempunyai enam senar dan masing-masing senar perlu diatur tensinya untuk dapat menghasilkan nada (frekuensi) yang diinginkan. Penyetelan nada merupakan cara untuk menyelaraskan frekuensi suara senar gitar agar menghasilkan suara yang harmonis (Kautsar, 2016). Frekuensi penyetelan standar secara berurutan dari senar pertama hingga senar enam: $E_4 = 329,6$ hertz, $B_3 = 246,9$ hertz, $G_3 = 196,0$ hertz, $D_3 = 146,8$ hertz, $A_2 = 110,0$ hertz, dan $E_2 = 82,4$ hertz. Frekuensi penyetelan gitar merupakan nada dasar atau fundamental senar. Selain nada dasar, senar juga menghasilkan banyak nada tambahan (Parker, 2009). Posisi pemetikan senar mempengaruhi karakteristik frekuensi. Semakin dekat posisi pemetikan dengan ujung senar, maka rata-rata kekuatan harmonik akan semakin menguat (Moravcsik, 1987).

Arduino Uno adalah papan mikrokontroler *open source* yang dirancang untuk memudahkan pengembangan prototipe elektronik. Kode program Arduino dibuat menggunakan perangkat lunak Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino IDE mempunyai banyak *library* yang menyediakan fungsi-fungsi untuk memudahkan menjalankan Arduino (Ridwan, 2023). Motor servo sering diaplikasikan dalam pembuatan robot dan otomatisasi. Umumnya motor servo hanya mempunyai sudut putar yang terbatas sampai 180° saja. Namun, ada motor servo yang mampu berotasi kontinu dan hanya dapat diatur kecepatan serta arah putarannya saja (Bakker, 2024).

Penguat operasional umumnya mempunyai 5 bagian yaitu masukan *inverting* (-), *non-inverting* (+), keluaran, suplai daya positif, dan negatif. Penguat operasional dibedakan menjadi *inverting* dan *non-inverting*. Filter adalah rangkaian elektronik untuk menyaring frekuensi sinyal. Frekuensi pada rentang yang dibutuhkan akan dipertahankan, sedangkan frekuensi lain dilemahkan. Filter mempunyai frekuensi *cut-off* yaitu titik di mana sebuah frekuensi mempunyai pelemahan sebesar 3 dB ($-3 \text{ dB} = 0,707$) dari *pass-band* (Fiore, 2018).

Sinyal analog diubah menjadi sinyal digital agar dapat diproses oleh perangkat digital. Perubahan sinyal analog ini dilakukan menggunakan *analog-to-digital converter* (ADC). Proses sampling mengubah sinyal analog menjadi sinyal diskrit waktu. Sampling frekuensi setidaknya mempunyai nilai dua kali dari komponen frekuensi yang ada di dalam sinyal untuk menghindari *aliasing*. Frekuensi $f_s/2$ disebut frekuensi Nyquist. Frekuensi di atas Nyquist dapat dihilangkan menggunakan filter *anti-aliasing* berupa filter *low-pass* dengan frekuensi *cut-off*, $f_c \leq f_s/2$ (Kuo et al., 2013).

Sistem kontrol merupakan gabungan beberapa sub sistem dan proses yang bertujuan untuk memperoleh keluaran dengan proses kerja diinginkan berdasarkan masukannya. Performa sistem kontrol dapat dilihat langsung dari respons waktu sementara dan eror *steady-state*. Respons waktu sementara merupakan respons dari keadaan awal menuju ke keadaan akhir. *Steady-state* terjadi saat respons keluarannya stabil dan nilainya sama atau hampir sama dengan masukan (Ogata, 2010).

Discrete Fourier Transform (DFT) merupakan jenis transformasi yang digunakan dalam pemrosesan sinyal. DFT memetakan sampel data berurutan ke domain frekuensi. Perhitungan DFT dari N -titik secara langsung membutuhkan operasi aritmetika kompleks sebanyak $O(N^2)$. Kompleksitas perhitungan DFT dapat dikurangi dengan algoritma FFT (*fast fourier transform*) yang dikembangkan oleh Cooley dan Tukey. FFT mengurangi operasi aritmetika DFT menjadi hanya $O(N \log_2 N)$ (Rao et al., 2010). FFT dapat digunakan sebagai pendeteksi *pitch* atau frekuensi pada suara alat musik.

Setyoadi (2024) membuat aplikasi android untuk menyetel senar gitar menggunakan mikrofon sebagai sensor dan algoritma FFT untuk pengolahan sinyal suara. FFT dapat membaca frekuensi dengan akurasi yang baik. Boestad dan Rudberg (2021) membuat penala gitar otomatis menggunakan sensor piezoelektrik, pengolahan sinyal FFT, dan *stepper* motor. Kekurangan penelitian ini adalah penala gitar hanya dirancang untuk menyetel senar 1 saja, dengan rata-rata kesalahan 2 hertz. Penelitian yang akan dilakukan, dirancang penala gitar yang dapat mendeteksi senar mana yang sedang dibunyikan sekaligus menyetel masing-masing senar gitar sesuai dengan nada standarnya menggunakan penggerak berupa motor servo.

Teknologi otomatisasi dengan memanfaatkan mikrokontroler yang didukung FFT sebagai pendeteksi frekuensi, mikrofon sebagai sensor penerima suara, dan motor servo sebagai pemutar *peg* diharapkan dapat diterapkan dengan baik pada proses penyetelan nada senar gitar. Penerapan otomatisasi dapat membantu proses pengaturan senar gitar menjadi lebih mudah, cepat, dan efisien.

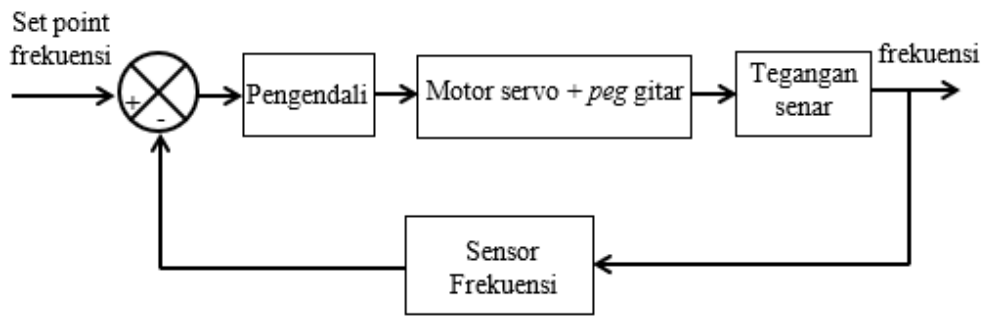
METODE

Desain Penelitian

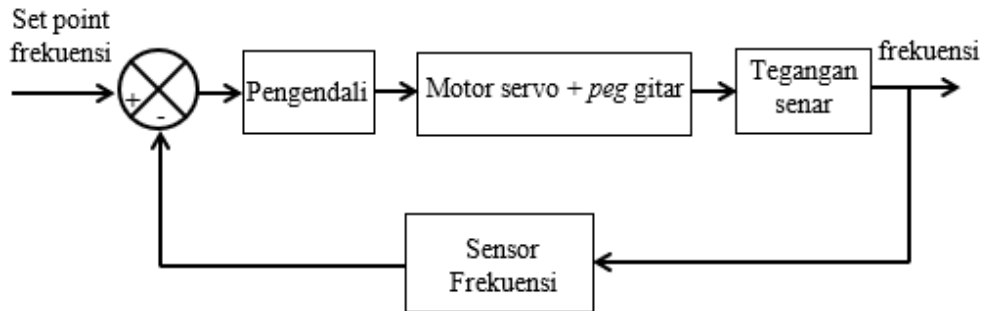
Sistem kontrol otomatis pengaturan senar gitar mempunyai komponen utama, yaitu mikrofon elektret dengan rangkaian pengondisi sinyal sebagai sensor suara, Arduino sebagai pengolah sinyal dan pengontrol keseluruhan sistem, serta motor servo MG996R 360⁰ sebagai penggerak. Mikrofon menangkap suara atau frekuensi yang dihasilkan senar gitar. Rangkaian pengondisi sinyal terdiri dari gabungan rangkaian filter dan penguat.

Keluaran dari gabungan mikrofon dan rangkaian pengondisi sinyal dihubungkan ke pin analog Arduino. Sinyal diolah menggunakan FFT Arduino. Frekuensi terukur dibandingkan dengan *set point*, yaitu berupa frekuensi nada penyetelan standar senar gitar. Perbandingan nilai *set point* dan frekuensi yang sedang terukur digunakan untuk menentukan rotasi motor servo.

Motor servo mengatur frekuensi nada senar gitar dengan cara memutar *peg* gitar. Apabila frekuensi suara bernilai kurang dari frekuensi penyetelan standar (*set point*), maka motor servo berputar untuk memperkuat tegangan senar sehingga frekuensi suara menjadi lebih tinggi. Jika frekuensi terlalu tinggi, maka motor servo akan memutar *peg* ke arah sebaliknya untuk mengendurkan tegangan senar gitar. Motor servo berhenti berotasi saat frekuensi senar gitar yang terukur mencapai rentang toleransi eror frekuensi yang ditentukan dari *set point*, yaitu ± 1 hertz. Desain alat yang dibuat dapat ditunjukkan oleh diagram blok pada



Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok penala senar gitar otomatis

Teknik Pengumpulan Data

Rangkaian pengondisi sinyal untuk mikrofon menggunakan komponen aktif berupa IC LM358. Komponen penguat yang digunakan terdiri dari resistor 20 k Ω dan resistor 680 k Ω . Filter *high-pass* terdiri dari kapasitor 116 nF dan resistor 20 k Ω . Filter *low-pass* terdiri dari kapasitor 640 pF dan resistor 680 k Ω . Rangkaian diuji dengan memberikan masukan sinyal sinus dengan frekuensi yang bervariasi dan amplitudo tetap. Sinyal untuk pengujian diperoleh dari AFG (*Audio Frequency Generator*). Variasi frekuensi masukan diukur menggunakan frekuensi-meter digital. Amplitudo sinyal keluaran diukur menggunakan osiloskop.

Hasil pengukuran frekuensi berdasarkan kode program Arduino yang telah disusun, diuji dengan memberikan gelombang suara sinus frekuensi tunggal yang bervariasi mulai 70 hertz hingga 400 hertz. Hasil pengukuran akan muncul di serial monitor Arduino IDE. Hasil pengukuran perlu dikalibrasi untuk mengurangi nilai kesalahan.

Data pengujian penala diperoleh dengan cara senar gitar diatur agar menghasilkan frekuensi selain frekuensi penyetalannya (misalnya senar 1 diatur ke frekuensi antara 300 hertz hingga kurang dari 329,6 hertz) dan diukur frekuensi suaranya menggunakan alat ukur pembandingan (MATLAB). Senar gitar dipetik di posisi setengah dari panjang senar agar frekuensi fundamentalnya mempunyai magnitudo tertinggi. Frekuensi hasil pengukuran oleh sistem adalah frekuensi yang mempunyai magnitudo tertinggi. Senar dipetik secara berkala agar menghasilkan suara yang kontinu. Data perubahan frekuensi tiap waktu muncul di Serial Monitor dari awal pemetikan senar hingga akhir, yaitu saat motor berhenti. Frekuensi akhir diukur menggunakan alat ukur pembandingan.

Teknik Analisis Data

Data sinyal keluaran dari pengujian rangkaian pengondisi sinyal dibandingkan dengan sinyal masukan untuk mengetahui penguatan untuk setiap frekuensi uji. Setiap frekuensi uji

dan besarnya penguatan dibuat grafik untuk mengetahui respons frekuensi rangkaian.

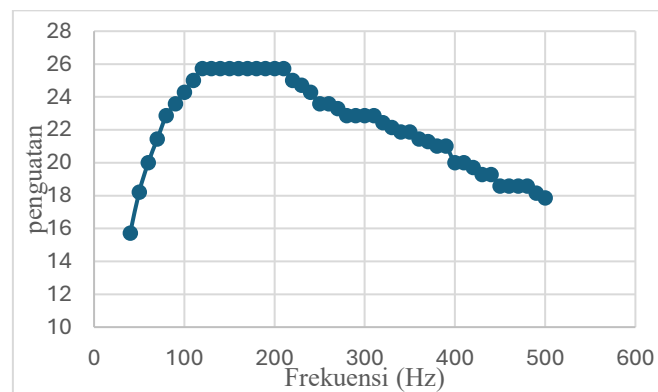
Data pengujian pengukuran frekuensi menggunakan kode program Arduino mempunyai eror yang berbeda-beda untuk setiap frekuensi sehingga perlu dikalibrasi. Hasil pengukuran setelah kalibrasi mempunyai nilai eror yang lebih kecil dari sebelumnya. Eror pengukuran digunakan untuk menghitung tingkat akurasinya.

Data pengujian penala berupa frekuensi awal senar, frekuensi akhir, dan proses penyetelan gitar (perubahan frekuensi awal hingga akhir tiap waktu). Frekuensi akhir dibandingkan dengan frekuensi *set point* masing-masing senar untuk mengetahui eror hasil penyetelan. Data perubahan frekuensi tiap waktu dibuat grafik untuk mengetahui respons waktu sementara dan *settling time*. Data *settling time* dari setiap pengujian dibuat grafik untuk mengetahui hubungan dan pengaruh antara frekuensi awal terhadap *settling time*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Rangkaian Pengondisi Sinyal

Rangkaian diuji untuk mengetahui karakteristik aslinya. Sinyal untuk pengujian diperoleh dari AFG (*Audio Frequency Generator*). Pengujian dilakukan dari frekuensi 40 hertz hingga 500 hertz. Berikut ini grafik data penguatan dari rangkaian filter aktif yang telah dilakukan.



Gambar 2. Respons frekuensi rangkaian aktif

Berdasarkan grafik pada

Gambar 2, penguatan maksimal adalah 25,7 kali yaitu pada frekuensi 120 hertz hingga 210 hertz. Sinyal di bawah frekuensi 120 hertz dan di atas frekuensi 210 hertz mengalami penguatan yang tidak stabil dan penurunan.

Pengujian Pengukur Frekuensi

Berdasarkan pengujian, sistem mempunyai nilai eror dalam mengukur frekuensi. Nilai eror cenderung semakin besar ketika frekuensi semakin tinggi. Kalibrasi yang dilakukan berhasil menghasilkan pengukuran yang lebih baik dan mendekati nilai asli. Perbandingan hasil pengukuran sebelum dan setelah kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengukuran sebelum dan setelah kalibrasi

Frekuensi uji (Hz)	Rerata Frekuensi terukur (Hz)			
	Sebelum kalibrasi	eror	Setelah kalibrasi	eror
70	70,99	0,99	70,03	0,03
100	101,76	1,76	100,33	0,33
150	151,71	1,71	149,54	0,46
190	192,89	2,89	190,01	0,03
200	203,53	3,53	200,45	0,45
250	253,25	3,25	249,48	0,52
300	305,13	5,13	300,48	0,48
350	355,06	5,06	349,63	0,37
390	395,51	5,51	389,41	0,59
400	406,60	6,60	400,34	0,34

Data menunjukkan bahwa nilai hasil pengukuran hasil kalibrasi mendekati frekuensi asli yang dibunyikan. Untuk mengetahui tingkat kedekatan hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya, maka dihitung akurasi.

Tabel 2. Akurasi pengukuran frekuensi

Frekuensi (Hz)	Rerata Frekuensi terukur (Hz)	Akurasi (%)
70	70,03	99,96
100	100,33	99,67
150	149,54	99,69
200	200,45	99,78
250	249,48	99,79
300	300,48	99,84
350	349,63	99,89
400	400,34	99,92
Rata-rata		99,82

Berdasarkan perhitungan, hasil pengukuran yang dilakukan oleh alat mempunyai akurasi rata-rata sebesar 99,82%. Nilai akurasi yang tinggi ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran oleh alat mendekati nilai asli frekuensi dan mempunyai nilai kesalahan pengukuran yang kecil.

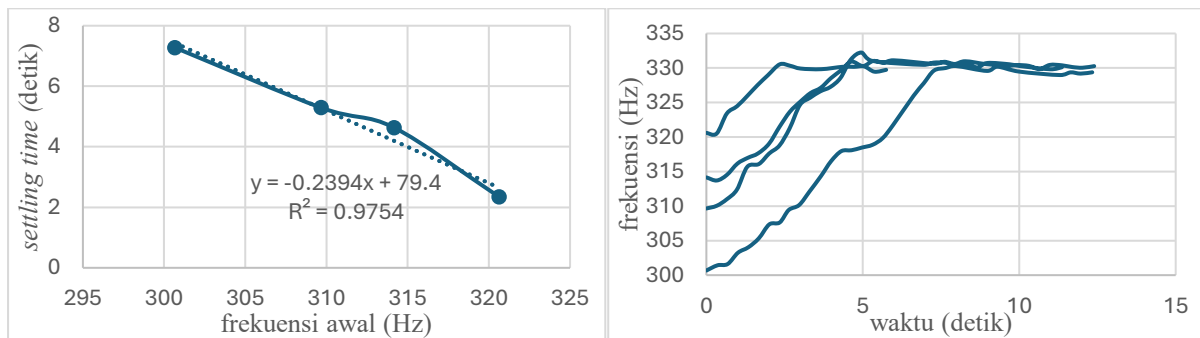
Pengujian Performa Penala Senar 1

Pengujian penyetelan senar 1 dilakukan dengan frekuensi awal kurang dari frekuensi *set point* dan bervariasi mulai dari 300 hertz. Frekuensi awal dan frekuensi akhir diukur menggunakan penala yang dibuat dan dibandingkan dengan alat ukur pembanding. Hasil pengujian performa alat saat digunakan untuk mengatur senar 1 ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Performa penyetelan senar 1

Frekuensi Awal (Hz)		Frekuensi Akhir (Hz)		Settling time (detik)	Eror (Hz)
Pembanding	Alat	Pembanding	Alat		
300,1	300,67	329,4	329,63	7,28	0,2
309,5	309,66	329,7	330,46	5,29	0,1
314,3	314,16	329,7	330,11	4,63	0,1
321	320,62	329,7	330,54	2,35	0,1
Rata-rata					0,1

Penala menyetel senar 1 dengan eror tertinggi sebesar 0,2 hertz lebih rendah dari frekuensi penyetulan standar gitar untuk senar 1 yaitu 329,6 hertz, diukur menggunakan alat ukur pembandingan.



Gambar 3. Respons alat untuk senar 1

Grafik hubungan frekuensi awal dan *settling time* pada pengujian senar 1 menunjukkan bahwa respons waktu yang dihasilkan cukup baik karena membentuk kecenderungan linier dengan sedikit simpangan. Berdasarkan kurva respons waktu dapat diketahui adanya simpangan pada kecenderungan linier disebabkan karena adanya redaman di antara 315 hertz dan 320 hertz sehingga rotasi motor yang memutar *peg* gitar menjadi terhambat.

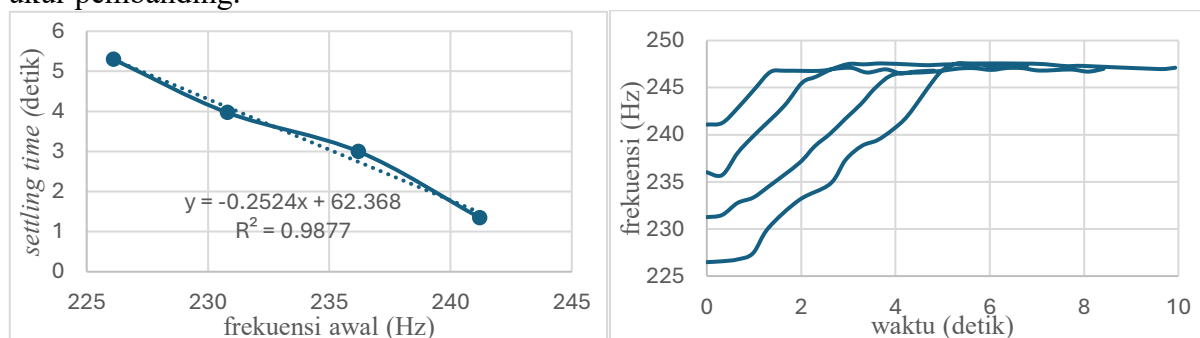
Pengujian Performa Penala Senar 2

Pengujian penyetulan senar 2 dilakukan dengan frekuensi awal yang bervariasi dalam rentang 225 hertz hingga kurang dari 246 hertz. Hasil pengujian performa alat saat digunakan untuk mengatur senar 2 ditunjukkan oleh Tabel 4.

Tabel 4. Performa penyetulan senar 2

Frekuensi Awal (Hz)		Frekuensi Akhir (Hz)		<i>Settling time</i> (detik)	Eror (Hz)
Pembandingan	Alat	Pembandingan	Alat		
226,1	226,5	245,6	247,11	5,3	1,3
230,8	231,26	245,6	246,99	3,97	1,3
236,2	236,02	246,3	247,28	3	0,6
241,2	241,08	245,9	246,8	1,35	1
Rata-rata					1,0

Penala menyetel senar 2 dengan eror tertinggi yaitu sebesar 1,3 hertz lebih rendah dari frekuensi penyetulan standar gitar untuk senar 2 yaitu 246,9 hertz, diukur menggunakan alat ukur pembandingan.



Gambar 4. Respons alat untuk senar 2

Grafik hubungan frekuensi awal dan *settling time* pada pengujian senar 2 menunjukkan bahwa respons waktu yang dihasilkan cukup baik dengan sedikit simpangan dari kecenderungan linier. Kurva respons waktu pada pengujian senar 2 menunjukkan hal yang mempengaruhi *settling time* yaitu adanya redaman yang menyebabkan *peg* gitar tidak berputar dengan kecepatan maksimal sehingga frekuensi tidak mengalami banyak perubahan. Hal ini dilihat di awal kurva respons yaitu pada saat tersebut motor baru mulai memutar *peg* gitar. Pada kondisi awal ini motor membutuhkan waktu untuk menyesuaikan torsi dengan cara menarik arus listrik yang lebih besar dari sumber daya agar mampu memutar *peg* gitar.

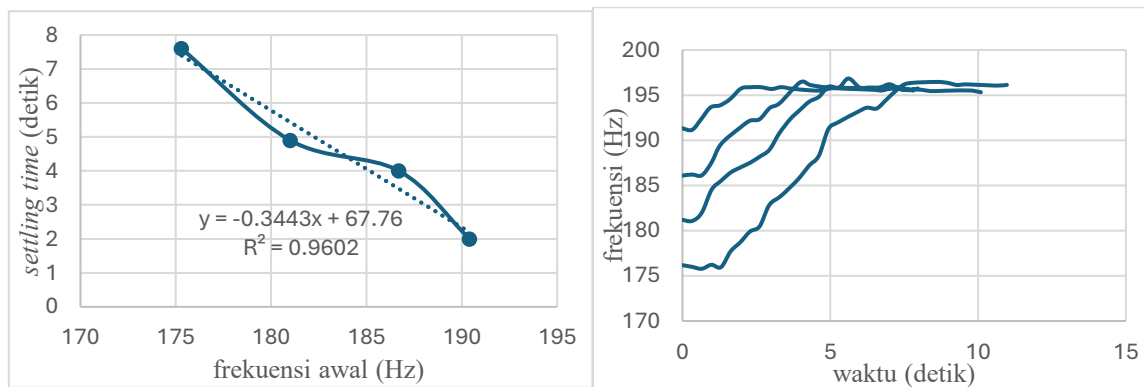
Pengujian Performa Penala Senar 3

Pengujian penyetelan senar 3 dilakukan dengan frekuensi awal yang bervariasi dalam rentang 170 hertz hingga kurang dari 196 hertz. Hasil pengujian performa alat saat digunakan untuk mengatur senar 3 ditunjukkan oleh Tabel 5.

Tabel 5. Performa penyetelan senar 1

Frekuensi Awal (Hz)		Frekuensi Akhir (Hz)		<i>Settling time</i> (detik)	Error (Hz)
Pembanding	Alat	Pembanding	Alat		
175,3	176,2	195,1	196,1	7,6	0,9
181	181,2	194,8	195,3	4,9	1,2
186,7	186,1	195,8	195,7	4	0,3
190,4	191,3	195,5	195,5	2	0,5
Rata-rata					0,7

Penala menyetel senar 3 dengan error tertinggi yaitu sebesar 1,2 hertz lebih rendah dari frekuensi penyetelan standar gitar untuk senar 3 yaitu 196 hertz, saat diukur menggunakan alat ukur pembanding.



Gambar 5. Respons alat untuk senar 3

Grafik hubungan frekuensi awal dan *settling time* pada pengujian senar 3 menunjukkan bahwa respons waktu yang dihasilkan terdapat simpangan data dari kecenderungan linier. Adanya redaman di kondisi awal, terutama untuk frekuensi awal 175 hertz, menyebabkan motor dan *peg* gitar tidak berputar dengan kecepatan maksimal sehingga frekuensi tidak mengalami banyak perubahan.

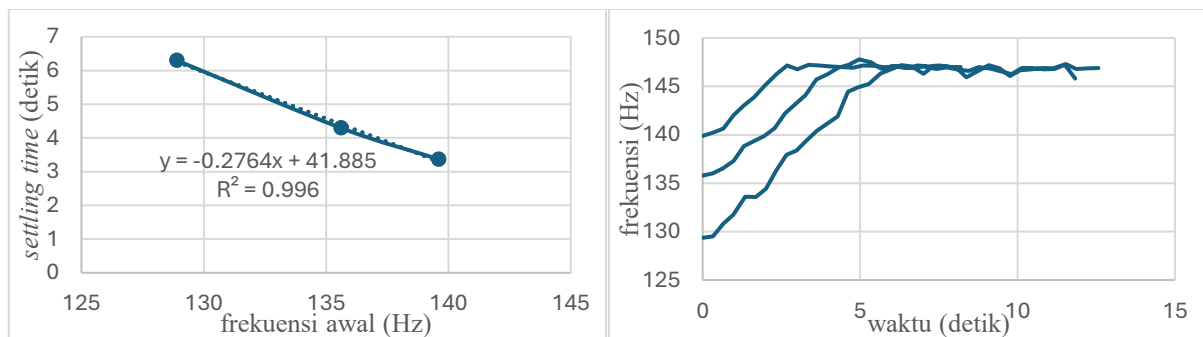
Pengujian Performa Penala Senar 4

Pengujian penyetelan senar 4 dilakukan dengan frekuensi awal yang bervariasi dalam rentang 125 hertz hingga kurang dari 146 hertz. Hasil pengujian performa alat saat digunakan untuk mengatur senar 4 ditunjukkan oleh Tabel 6.

Tabel 6. Performa penyetelan senar 4

Frekuensi Awal (Hz)		Frekuensi Akhir (Hz)		Settling time (detik)	Error (Hz)
Pembanding	Alat	Pembanding	Alat		
128,9	129,36	145	145,82	6,3	1,8
135,6	135,78	145,3	146,91	4,3	1,5
139,6	139,62	146,4	147,04	3,37	0,4
Rata-rata					1,2

Penala gitar otomatis menyetel senar dengan hasil akhir mendekati frekuensi yang ditentukan dengan eror tertinggi yaitu sebesar 1,8 hertz dan terendah 0,4 hertz kurang dari frekuensi penyetelan standar gitar untuk senar 4 yaitu 146,8 hertz.



Gambar 6. Respons alat untuk senar 4

Respons waktu yang diperoleh cukup baik sehingga dihasilkan kecenderungan linier dengan simpangan yang minim. Kurva respons waktu pengujian senar 4 menunjukkan bahwa motor dapat memutar *peg* dengan kecepatan yang cukup konstan tanpa hambatan yang mengganggu.

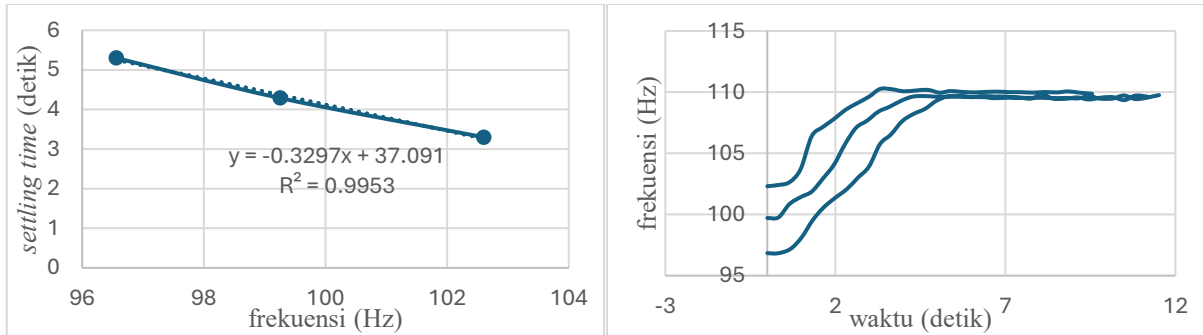
Pengujian Performa Penala Senar 5

Pengujian untuk senar 5 dilakukan dengan frekuensi awal yang bervariasi dalam rentang 95 hertz hingga kurang dari 110 hertz. Hasil pengujian performa alat saat digunakan untuk mengatur senar 5 ditunjukkan oleh Tabel 7.

Tabel 7. Performa penyetelan senar 5

Frekuensi Awal (Hz)		Frekuensi Akhir (Hz)		Settling time (detik)	Error (Hz)
Pembanding	Alat	Pembanding	Alat		
96,56	96,84	109,3	109,6	5,3	0,7
99,25	99,71	109,3	109,6	4,29	0,7
102,6	102,3	110	109,9	3,3	0
Rata-rata					0,5

Penala gitar otomatis menyetel senar dengan eror hasil akhir tertinggi sebesar 0,7 hertz lebih rendah dari frekuensi penyetelan standar gitar senar 5 yaitu 110 hertz.



Gambar 7. Respons alat untuk senar 5

Grafik hubungan frekuensi awal dan *settling time* pada pengujian senar 5 menunjukkan respons waktu yang dihasilkan baik sehingga membentuk hubungan linier. Kurva respons waktu menunjukkan sedikit redaman di awal untuk semua pengujian.

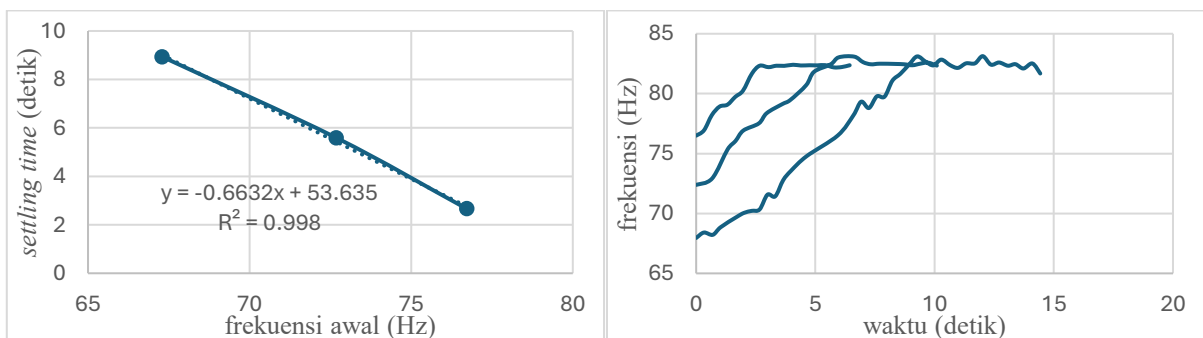
Pengujian Performa Penala Senar 6

Pengujian untuk senar 6 dilakukan dengan frekuensi awal yang bervariasi dalam rentang 65 hertz hingga kurang dari 82 hertz. Hasil pengujian performa alat saat digunakan untuk mengatur senar 6 ditunjukkan oleh Tabel 8.

Tabel 8. Performa penyetelan untuk senar 6

Frekuensi Awal (Hz)		Frekuensi Akhir (Hz)		<i>Settling time</i> (detik)	Error (Hz)
Pembanding	Alat	Pembanding	Alat		
67,29	67,96	81,09	81,68	8,94	1,31
72,67	72,39	81,42	82,34	5,6	1
76,71	76,5	81,42	82,37	2,67	1
Rata-rata					1,1

Penala gitar otomatis menyetel senar 6 dengan hasil akhir mempunyai eror tertinggi yaitu sebesar 1,31 hertz lebih rendah dari frekuensi penyetelan standar gitar untuk senar 6, yaitu 82,4 hertz.



Gambar 8. Respons alat untuk senar 6

Grafik hubungan frekuensi awal dan *settling time* senar 6 menunjukkan bahwa respons waktu yang dihasilkan cukup baik membentuk kecenderungan linier. Kurva respons waktu pada pengujian senar 6 menunjukkan bahwa motor dapat memutar *peg* dengan kecepatan yang cukup konstan sehingga kenaikan kurva atau kenaikan frekuensi juga stabil.

Pembahasan

Berdasarkan teori, rangkaian pengondisi mempunyai penguatan sebesar 34 kali dengan *cut-off* frekuensi dihitung dengan rumus $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ adalah 68,6 hertz dan 365 hertz. Pengujian menunjukkan bahwa penguatan maksimal adalah 25,7 kali. Frekuensi *cut-off* adalah saat sinyal mengalami pelemahan sebesar 0,707 (-3dB) dari penguatan maksimal yaitu 18,18 kali. Berdasarkan data, *cut-off* terjadi pada frekuensi sekitar 50 hertz (*cut-off high-pass*) dan 490 hertz (*cut-off low-pass*). Perbedaan ini wajar terjadi karena terdapat faktor yang menyebabkan rangkaian tidak mungkin memenuhi kondisi ideal berdasarkan teori yang ada.

Untuk analisis FFT, diambil 128 sampel sinyal. Frekuensi yang diselidiki dalam penelitian ini adalah frekuensi untuk penyetelan standar gitar, yaitu maksimal sekitar 330 hertz sehingga digunakan frekuensi sampling 1000 hertz. Sistem mempunyai eror dalam mengukur frekuensi sehingga perlu dikalibrasi. Frekuensi terukur dan eror mempunyai hubungan yang cenderung linier, yaitu semakin tinggi frekuensi hasil pengukuran, maka eror semakin tinggi. Hubungan keduanya dapat dinyatakan dalam persamaan garis $y = 0,00156x - 0,1518$. Persamaan garis ini digunakan untuk memprediksi nilai kesalahan dan sebagai nilai kalibrasi. Kalibrasi yang dilakukan berhasil memperkecil nilai rata-rata eror dan meningkatkan akurasi.

Pengujian dilakukan dengan beberapa frekuensi awal untuk mencocokkan setiap kurva respons. Jika kurva respons waktu baik dan stabil, maka *settling time* akan membentuk kecenderungan linier terhadap frekuensi awal. Adanya beberapa data yang menyimpang dari garis linier dapat disebabkan karena adanya redaman (hambatan) pada *peg* gitar yang mengganggu dan menyebabkan kecepatan motor menjadi tidak stabil sehingga akan mempengaruhi respons waktu. Motor perlu waktu untuk menyesuaikan kekuatan torsi untuk memutar *peg* saat terdapat redaman. Eror hasil akhir (*steady-state*) disebabkan karena eror pada pengukur frekuensi serta rentang eror yang diprogram dalam sistem.

SIMPULAN

Penala senar gitar otomatis telah dibuat memanfaatkan Arduino sebagai pengolah sinyal dan pengontrol utama, motor servo sebagai penggerak yang mengatur frekuensi senar, mikrofon dengan rangkaian pengondisi sinyal sebagai sensor yang menerima suara gitar, dan frekuensi penyetelan standar gitar sebagai *set point*. Pengukur frekuensi yang digunakan pada sistem penala frekuensi senar berbasis Arduino menggunakan FFT mempunyai rata-rata akurasi 99,82%, dengan eror pengukuran tertinggi sebesar 0,59 hertz. Performa keseluruhan sistem penala senar gitar otomatis diketahui melalui respons waktu dari kondisi awal menuju *settling time* dan eror *steady-state*. Semakin jauh frekuensi awal dari *set point*, maka *settling time* semakin lama (linier). Rata-rata eror penyetelan tertinggi adalah 1,2 hertz (senar 4) dan terendah sebesar 0,1 hertz (senar 1). Hal yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya, yaitu mengembangkan sistem penala dengan pengukur frekuensi yang dapat mendeteksi frekuensi fundamental di antara frekuensi harmonik lain dalam sebuah suara terutama alat musik, tanpa tergantung pada besar magnitudo atau puncak spektrumnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sumarna, M.Si., M.Eng., selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses penelitian ini. Penulis

mengucapkan terima kasih kepada Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, dan semua pihak di dalamnya atas dukungan yang diberikan selama proses penelitian hingga penulisan jurnal ini. Penulis juga berterima kasih kepada pihak-pihak lain yang memberikan dukungan dan bantuan dalam kesuksesan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Andersson, H., & Sjöberg, J. (2021). *Pitcher: An automatic guitar tuner*. [Disertasi]. KTH Royal Institute of Technology.
- Bakker, B. D. (2024, 29 Januari). How to control servo motor with Arduino. *Makerguides*. <https://www.makerguides.com/servo-Arduino-tutorial/>
- Boestad, A., & Rudberg, F. (2021). *Piezoelectric guitar tuner*. [Disertasi]. KTH Royal Institute of Technology.
- Fiore, J. M. (2018). *Operational amplifier & linear integrated circuits: theory and application*. Dissidents..
- Kautsar, A. F. A. (2016). *Mahir bermain gitar: Panduan lengkap belajar gitar secara otodidak*. Genesis Learning.
- Kuo, S. M., Lee, B. H., & Tian, W. (2013). *Real-time digital signal processing. fundamentals, implementations, and applications (third edition)*. John Wiley & Sons.
- Moravcsik, M. J. (1987). *Musical sound: An introduction to the physics of music*. Kluwer Academic/Plenum Publisher.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering (fifth edition)*. Pearson Education.
- Parker, B. (2009). *Good vibration: The physics of music*. The Johns Hopkins University Press.
- Rao, K. R., Kim, D. N., & Hwang, J. J. (2010). *Fast fourier transform: Algorithm and application*. Springer.
- Ridwan, A., Wulandari, R., Sepriano., Fahrurrozi, M., Darpono, R., & Kharisma, L. P. I. (2023). *Belajar dasar mikrokontroler: teori dan praktik*. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Setyoadi, E. T. (2024). *Fast fourier transform for guitar tuner synchronization*. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 29(5), 1881 – 1890. <https://doi.org/10.18280/isi.290520>
- Swagatam. (2023, 10 Desember). How electret microphones work – full tutorial and diagram. *Homemade Circuit Projects*. <https://www.homemade-circuits.com/how-electret-microphone-works/>