

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Landasan Landasan teori merupakan teori-teori yang berhubungan atau berfungsi sebagai pedoman atau acuan agar peneliti tidak menyimpang dari tujuan awal yang telah ditetapkan.

2.1.1 Kalimba

Kacamata Kalimba adalah alat musik petik tradisional yang berasal dari Afrika dan termasuk dalam keluarga *lamellophone*, yaitu instrumen yang menghasilkan suara dari getaran bilah logam *tipis* yang dipetik. Kalimba modern merupakan bentuk adaptasi dari alat musik tradisional *mbira* dari Zimbabwe, yang kemudian dipopulerkan secara global oleh etnomusikolog Hugh Tracey pada pertengahan abad ke-20 (Moore, 2014). Instrumen ini dikenal juga sebagai *thumb piano* karena dimainkan menggunakan ibu jari. Bentuk fisik dari kalimba bisa dilihat pada Gambar 2. 1. (The Kalimba, n.d.)



Gambar 2. 1 Alat Musik Kalimba 17 Tuts

Kalimba biasanya terdiri dari 5 hingga 21 tuts logam, dengan versi 17 tuts sebagai varian paling umum karena mencakup rentang nada sekitar 2,5 oktaf. Namun, kalimba versi 21 tuts atau lebih juga tersedia dan digunakan oleh pemain yang menginginkan jangkauan nada lebih luas dan kemampuan memainkan lagu yang lebih kompleks (Hluru, 2023). Tuts-tuts kalimba disetel dalam tangga nada tertentu, seperti C mayor atau G mayor, namun beberapa model memungkinkan penyesuaian ke skala pentatonik atau minor.

Desainnya yang sederhana namun elegan membuat kalimba menjadi alat musik yang digemari untuk pembelajaran musik, meditasi, terapi, hingga pertunjukan musik kontemporer. Resonansi suara yang dihasilkan kalimba berasal dari getaran tuts logam yang diperkuat oleh kotak kayu berlubang atau papan resonansi.

2.1.2 Teknik Bermain Kalimba

Teknik bermain kalimba relatif mudah dipelajari, namun tetap membutuhkan keterampilan motorik dan ritme untuk menghasilkan permainan yang harmonis. Teknik umum meliputi petikan ibu jari, akor, ostinato, vibrato, dan glissando.

1) Posisi Memegang Kalimba

Kalimba dipegang dengan kedua tangan pada sisi kiri dan kanan alat. Bagian belakang alat dapat direkatkan ke telapak tangan agar lebih stabil saat dimainkan. Ibu jari dibiarkan bebas untuk memetik tuts logam dari bawah ke atas.

2) Teknik Memetik Tuts

Bilah logam dipetik menggunakan ujung kuku atau ujung ibu jari. Petikan dilakukan dari bawah ke atas untuk menghasilkan suara. Tuts di sisi kanan biasanya mewakili nada tinggi, sedangkan sisi kiri nada rendah.

3) Ostinato dan Ritme Berulang

Teknik ostinato melibatkan pola permainan ritmis yang diulang-ulang, biasanya digunakan sebagai pengiring melodi. Tangan kiri biasanya memainkan pola ritme, sementara tangan kanan fokus pada melodi utama.

4) Memainkan Akor dan Harmoni

Beberapa nada dapat dipetik secara bersamaan untuk membentuk akor sederhana seperti mayor atau minor. Ini digunakan untuk memperkaya tekstur harmoni dalam permainan musik kalimba.

5) Vibrato dan Efek Suara

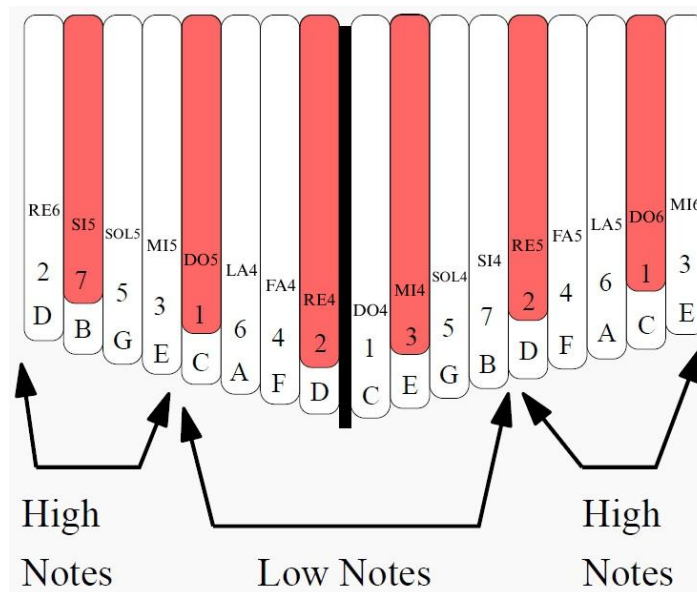
Setelah bilah dipetik, alat dapat digoyangkan sedikit untuk menciptakan efek *vibrato* atau getaran suara yang menambah ekspresi musikal.

6) Glissando

Teknik ini dilakukan dengan menyapu beberapa tuts secara cepat dan berurutan, menghasilkan efek suara meluncur seperti pada harpa atau piano.

2.1.3 Tangga Nada Kalimba

Komunikasi Tangga nada merupakan urutan nada-nada dalam satu oktaf yang tersusun menurut interval tertentu. Kalimba modern umumnya menggunakan tangga nada *diatonik mayor*, khususnya *C mayor*, yang terdiri dari nada Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, dan Si, lalu kembali ke Do pada oktaf berikutnya. Kalimba dengan 17 tuts biasanya mencakup rentang dari Do₄ (C₄) hingga Mi₆ (E₆), atau sekitar 2,5 oktaf. Tangga nada ini banyak dipilih karena kesesuaiannya dengan sistem notasi Barat yang lazim digunakan dalam lagu populer dan edukasi musik pemula. Urutan tangga nada pada kalimba ditunjukkan pada Gambar 2. 2 (Hluru, 2023).



Gambar 2. 2 Tangga Nada pada Kalimba

Frekuensi setiap nada dalam sistem ini dihitung berdasarkan *equal temperament tuning*, yaitu sistem penyetelan yang membagi satu oktaf menjadi dua belas nada dengan rasio konstan 2 pangkat 1/12 atau sekitar 1,05946 antar setiap nada. Rumus umum untuk menghitung frekuensi suatu nada ditunjukkan pada Persamaan 3.1:

$$f(n) = 440 \times (2^{1/12})^{(n-49)} \quad (2.1)$$

Di mana $f(n)$ adalah frekuensi dalam satuan Hertz, dan n merupakan nomor urutan tuts piano berdasarkan standar internasional (dengan A₄ = 440 Hz pada tuts ke-49) (Wikipedia, 2024). Sebagai contoh, nada C₄ (Do₄) memiliki frekuensi

sekitar 261,63 Hz, nada E4 (*Mi4*) berada di sekitar 329,63 Hz, dan nada D6 (*Re6*) mencapai frekuensi kurang lebih 1174,66 Hz.

Dengan mengacu pada standar frekuensi internasional, suara yang dihasilkan oleh kalimba dapat dipastikan akurat dan harmonis sesuai harapan. Selain itu, perhitungan frekuensi ini juga menjadi acuan penting dalam pengujian kesesuaian suara selama proses kalibrasi alat.

2.1.4 Sistem Kontrol Otomatis

Sistem kontrol otomatis adalah sistem yang dirancang untuk menjalankan proses atau mengendalikan perangkat tanpa keterlibatan manusia secara langsung setelah sistem aktif (Kusnadi & Andriansyah, 2016). Komponen utama dalam sistem kontrol otomatis meliputi sensor/*input*, pengendali (*controller*), dan aktuator/*output* yang bekerja secara terintegrasi dalam *loop control* (Ogata, 2010).

Pada proyek ini, sistem kontrol otomatis diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32, yang menerima *input* perintah dari *Human Machine Interface* (HMI). Perintah tersebut kemudian diterjemahkan menjadi sinyal *pulse-width modulation* (PWM) melalui *driver* servo, yang menggerakkan 17 unit *micro* servo MG90S untuk memetik tuts kalimba sesuai urutan nada lagu. Implementasi ini menggunakan pendekatan *open-loop control*, karena gerakan servo mengikuti instruksi terprogram tanpa umpan balik *real-time*.

Menurut Ogata (2010), sistem kontrol otomatis dapat dibedakan menjadi dua jenis: *open-loop* dan *closed-loop*. Pada sistem *open-loop*, tidak terdapat umpan balik dari *output* untuk penyesuaian kendali, sedangkan sistem *closed-loop* menggunakan sensor silang untuk koreksi kesalahan secara berkelanjutan. Dalam konteks proyek ini, penggunaan kontrol terbuka sudah cukup memadai karena gerakan setiap servo telah ditentukan dengan jelas dalam kode.

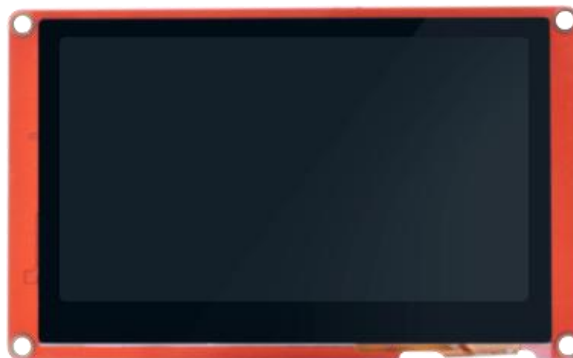
2.1.5 Human Machine Interface (HMI)

Human-Machine Interface (HMI) merupakan media komunikasi antara manusia dan sistem yang berfungsi dalam monitoring dan pengendalian. HMI memvisualisasikan data dan memungkinkan pengguna memberikan perintah secara langsung melalui *input* yang mudah dipahami. Dalam sistem otomasi modern, HMI menjadi jembatan interaktif yang mempermudah pengaturan perangkat elektronik

tanpa memerlukan pemahaman detail teknis. Oleh karena itu, antarmuka HMI sebaiknya dirancang secara intuitif dengan mempertimbangkan ergonomi, keamanan, dan fungsionalitas sehingga sistem dapat dioperasikan dengan efisien dan minim risiko kegagalan (Miller, 2012).

Pada sistem tertanam, HMI dapat diimplementasikan dalam bentuk antarmuka grafis berbasis layar sentuh yang memungkinkan pengguna berinteraksi dengan sistem melalui berbagai elemen antarmuka, seperti tombol, teks, gambar, dan indikator. Perintah yang diberikan melalui antarmuka tersebut kemudian dikirimkan ke sistem kendali untuk diproses sesuai dengan fungsi yang telah ditentukan. Dengan demikian, HMI dapat meningkatkan kemudahan pengoperasian dan memberikan informasi mengenai kondisi sistem secara langsung kepada pengguna.

Pada Pada tugas akhir ini, HMI berfungsi sebagai penghubung antara pengguna dengan sistem kendali robot kalimba. Melalui antarmuka yang tersedia, pengguna dapat memilih lagu, mengoperasikan sistem dalam mode manual, serta memberikan perintah untuk menghentikan proses permainan. Perintah yang diberikan pengguna selanjutnya diproses oleh sistem kendali untuk mengatur pergerakan aktuator dalam memainkan tuts kalimba sesuai dengan instruksi yang diterima. Dengan penerapan HMI, proses pengoperasian robot kalimba menjadi lebih interaktif, praktis, dan mudah digunakan. Tampilan antarmuka pengguna pada sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2. 3 (Halawa, 2024).



Gambar 2. 3 Human Machine Interface (HMI) Nextion

2.1.6 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah *Integrated Circuit (IC)* yang memiliki kemampuan untuk menerima sinyal *input*, mengolah data berdasarkan program tertanam, dan menghasilkan sinyal *output* yang dapat digunakan untuk mengendalikan aktuator seperti motor, relay, atau sistem otomatisasi lainnya. Secara ringkas, mikrokontroler berfungsi sebagai otak suatu sistem elektronik yang mampu berinteraksi secara otomatis dan terprogram dengan lingkungannya (Mohod, 2018).

Dalam sistem otomasi, mikrokontroler berperan sebagai pengendali utama yang memproses data dari perangkat masukan, menjalankan logika pemrograman, serta mengirimkan sinyal kendali ke perangkat keluaran sesuai dengan instruksi yang telah diprogram. Kemampuan tersebut menjadikan mikrokontroler banyak digunakan pada berbagai aplikasi, seperti sistem kendali, robotika, Internet of Things (IoT), instrumentasi, dan perangkat elektronik cerdas.

Pada tugas akhir ini, mikrokontroler berfungsi sebagai pusat pengendali sistem robot kalimba. Mikrokontroler menerima perintah dari antarmuka pengguna, memproses data sesuai program yang telah dirancang, kemudian mengirimkan sinyal kendali kepada aktuator untuk memainkan tuts kalimba secara otomatis maupun manual. Selain itu, mikrokontroler juga menangani komunikasi data antarbagian sistem sehingga proses pengendalian dapat berlangsung secara terintegrasi. Salah satu contoh papan mikrokontroler yang digunakan pada sistem tertanam ditunjukkan pada Gambar 2. 4 (Mohod, 2018).



Gambar 2. 4 Papan Mikrokontroler ESP 32

2.1.7 Pulse Width Modulation (PWM) dan Aktuator

Aktuator Pulse Width Modulation (PWM) merupakan teknik pengendalian sinyal digital dengan memvariasikan lebar pulsa (*pulse width*) pada frekuensi yang tetap. Besarnya lebar pulsa dinyatakan dalam bentuk *duty cycle*, yaitu perbandingan antara durasi sinyal berada pada kondisi aktif (*ON*) terhadap satu periode sinyal. Dengan mengubah nilai *duty cycle*, nilai tegangan rata-rata yang diterima oleh beban dapat diatur tanpa mengubah besar tegangan sumber. Oleh karena itu, PWM banyak diterapkan pada sistem elektronika dan otomasi sebagai metode pengendalian yang efisien, khususnya dalam pengaturan kecepatan motor, intensitas daya, serta pengendalian posisi aktuator (Chatterjee, 2023).

Secara matematis, *duty cycle* PWM dapat dinyatakan menggunakan Persamaan (2.1).

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \times 100\% \quad (2.2)$$

dengan:

$D = \text{Duty cycle (\%)}$

$T_{ON} = \text{Durasi sinyal berada pada kondisi aktif (ON) (s)}$

$T = \text{Periode sinyal PWM (s)}$

Berdasarkan perubahan nilai *duty cycle*, sistem kendali dapat mengatur keluaran sesuai kebutuhan aplikasi. Pada pengendalian posisi aktuator, sinyal PWM dimanfaatkan untuk menghasilkan perubahan posisi sudut secara presisi melalui variasi lebar pulsa yang diberikan secara periodik. Teknik ini banyak digunakan pada sistem robotika dan sistem tertanam karena memiliki tingkat akurasi yang tinggi serta efisiensi daya yang baik (Chatterjee, 2023).

Pada pengontrolan posisi *servo motor* menggunakan *driver* eksternal seperti PCA9685 berbasis resolusi 12-bit (0 – 4095), sinyal PWM dinyatakan dalam bentuk nilai register pulsa (*pulse ticks*). Pada frekuensi kerja standar 50 Hz (periode 20 ms), sudut gerakan servo (0° – 180°) ditransformasikan menjadi rentang lebar pulsa tertentu (umumnya $SERVOMIN = 100$ hingga $SERVOMAX = 500$).

Hubungan matematis konversi sudut derajat (θ) menjadi nilai register pulsa PWM (P) dinyatakan dalam Persamaan (2.2):

$$P = P_{\min} + \left(\frac{\theta}{180} \times (P_{\max} - P_{\min}) \right) \quad (2.3)$$

dengan:

P = Nilai register pulsa PWM 12-bit PCA9685

θ = Sudut pergerakan servo ($0^\circ - 180^\circ$)

$P_{\min}$ = Nilai batas pulsa minimum pada 0° (100)

$P_{\max}$ = Nilai batas pulsa maksimum pada 180° (500)

Pada tugas akhir ini, aktuator digunakan untuk menghasilkan gerakan mekanis yang berfungsi memainkan tuts kalimba secara otomatis. Sistem kendali menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur posisi aktuator sehingga setiap aktuator dapat bergerak sesuai urutan nada dan durasi yang telah ditentukan. Dengan penerapan teknik PWM, pergerakan aktuator dapat dikendalikan secara presisi sehingga mekanisme pemetik mampu menghasilkan permainan nada pada kalimba secara otomatis. Salah satu contoh aktuator servo ditunjukkan pada Gambar 2. 5 (IXEN Robotics, n.d.)



Gambar 2. 5 Micro Servo SG90

2.1.8 Komunikasi Nirkabel

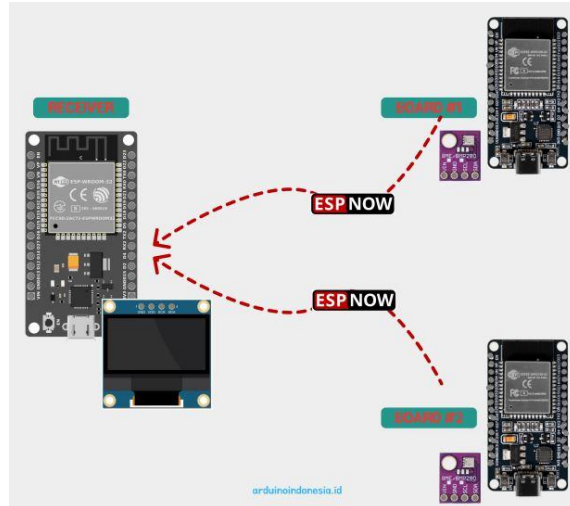
Komunikasi nirkabel (*wireless communication*) merupakan proses pertukaran informasi antara dua atau lebih perangkat tanpa menggunakan media penghantar fisik, seperti kabel. Proses komunikasi ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik sebagai media transmisi untuk mengirimkan data dari perangkat pengirim (*transmitter*) menuju perangkat penerima (*receiver*). Teknologi

komunikasi nirkabel telah banyak diterapkan pada berbagai bidang, seperti sistem otomasi, robotika, Internet of Things (IoT), jaringan sensor nirkabel, serta sistem kendali jarak jauh karena mampu memberikan fleksibilitas instalasi dan mobilitas yang lebih tinggi dibandingkan komunikasi berbasis kabel (IEEE, 2025)

Pada sistem komunikasi nirkabel, proses pertukaran data diawali dengan pembentukan informasi pada sisi pengirim, kemudian informasi tersebut dikodekan menjadi sinyal yang dipancarkan melalui media udara menggunakan gelombang elektromagnetik. Selanjutnya, perangkat penerima menerima sinyal tersebut, melakukan proses dekode, kemudian mengubahnya kembali menjadi data yang dapat diproses oleh sistem. Keberhasilan komunikasi nirkabel dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jarak komunikasi, interferensi sinyal, daya pancar, sensitivitas penerima, serta kondisi lingkungan di sekitar media transmisi (Haroun, 2023)

Dalam sistem tertanam, komunikasi nirkabel banyak dimanfaatkan untuk menghubungkan beberapa perangkat pengendali sehingga proses pertukaran data dapat dilakukan secara cepat tanpa memerlukan koneksi kabel. Selain meningkatkan fleksibilitas dalam perancangan sistem, komunikasi nirkabel juga mampu menyederhanakan proses instalasi, mengurangi kompleksitas pengkabelan, serta meningkatkan mobilitas perangkat pada aplikasi robotika dan otomasi (IEEE, 2025)

Pada tugas akhir ini, komunikasi nirkabel digunakan sebagai media pertukaran data antara dua mikrokontroler yang memiliki fungsi berbeda. Mikrokontroler pertama berperan sebagai pengendali antarmuka pengguna yang mengirimkan perintah pengoperasian sistem, sedangkan mikrokontroler kedua menerima data tersebut untuk diproses menjadi sinyal kendali aktuator sehingga robot kalimba dapat memainkan nada sesuai dengan instruksi yang diberikan. Selain mengirimkan perintah, komunikasi nirkabel juga digunakan untuk mengirimkan informasi status sistem sehingga proses pengendalian dapat berlangsung secara dua arah. Ilustrasi komunikasi nirkabel pada sistem ditunjukkan pada Gambar 2. 6 (IEEE, 2025).



Gambar 2. 6 Komunikasi Nirkabel pada ESP NOW

2.1.9 MIDI dan Representasi Data Musik

Musical Instrument Digital Interface (MIDI) merupakan standar komunikasi digital yang digunakan untuk merepresentasikan serta mempertukarkan informasi musik antarperangkat elektronik. Berbeda dengan berkas audio yang menyimpan gelombang suara, MIDI hanya menyimpan informasi mengenai permainan musik, seperti nada (*note*), durasi, tempo, intensitas (*velocity*), dan waktu penekanan maupun pelepasan nada (*note on* dan *note off*). Oleh karena itu, ukuran berkas MIDI relatif kecil dan mudah diproses oleh sistem digital maupun sistem tertanam (The MIDI Association, n.d.)

Data MIDI terdiri atas serangkaian pesan (*MIDI messages*) yang digunakan untuk merepresentasikan suatu komposisi musik. Setiap nada direpresentasikan menggunakan nomor nada (*note number*) yang telah distandarkan, sedangkan informasi waktu digunakan untuk menentukan durasi permainan dan tempo lagu. Dengan representasi tersebut, suatu perangkat elektronik dapat memainkan kembali sebuah lagu dengan urutan nada dan waktu yang sama tanpa harus menyimpan data audio secara langsung (The MIDI Association, n.d.)

Dalam sistem tertanam, data musik umumnya direpresentasikan ke dalam bentuk struktur data yang lebih sederhana agar mudah diproses oleh mikrokontroler. Representasi tersebut dapat berupa urutan indeks nada yang dipadukan dengan informasi durasi permainan dan jeda antarnada sehingga proses pemutaran lagu dapat dilakukan secara berurutan sesuai algoritma yang telah

dirancang. Pendekatan ini mampu mengurangi penggunaan memori sekaligus meningkatkan efisiensi pemrosesan data pada sistem dengan sumber daya yang terbatas (The MIDI Association, n.d.)

Pada tugas akhir ini, data lagu direpresentasikan dalam bentuk struktur data yang memuat informasi indeks nada, durasi permainan, dan durasi jeda antarnada. Data tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan aktuator yang harus digerakkan beserta waktu pengaktifannya sehingga robot mampu memainkan lagu sesuai dengan urutan nada yang telah ditentukan.

2.1.10 Latensi Sistem

Latensi merupakan waktu tunda (*delay*) yang dibutuhkan sejak suatu masukan (*input*) diberikan hingga menghasilkan keluaran (*output*) pada suatu sistem. Dalam sistem kendali dan komunikasi, latensi menjadi salah satu parameter penting karena memengaruhi kecepatan respons sistem terhadap perintah yang diberikan. Semakin kecil nilai latensi, maka semakin cepat sistem merespons sehingga kinerja sistem menjadi lebih baik (Cisco Systems., 2023)

Pada sistem tertanam, latensi dipengaruhi oleh beberapa tahapan proses, mulai dari pengiriman data, pemrosesan oleh mikrokontroler, hingga aktuator menghasilkan gerakan mekanis. Oleh karena itu, semakin singkat waktu yang dibutuhkan pada setiap tahapan tersebut, maka semakin kecil pula latensi total sistem. Sebaliknya, apabila salah satu tahapan membutuhkan waktu yang lebih lama, maka respons sistem secara keseluruhan akan mengalami peningkatan waktu tunda.

Pada sistem interaktif, besar kecilnya latensi akan memengaruhi persepsi pengguna terhadap respons sistem. Berdasarkan rekomendasi *International Telecommunication Union* (ITU), keterlambatan transmisi satu arah (*one-way delay*) kurang dari 150 ms masih dianggap dapat diterima pada aplikasi interaktif, sedangkan keterlambatan yang lebih besar dapat mulai mengurangi kualitas interaksi pengguna (ITU, n.d.). Pada aplikasi yang memerlukan sinkronisasi gerakan dan suara, seperti robot musik, latensi yang rendah sangat diperlukan agar waktu respons sistem tetap selaras dengan urutan permainan nada.

Pada tugas akhir ini, pengukuran latensi dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan sistem sejak perintah dikirim hingga aktuator mulai memainkan tuts kalimba. Hasil pengukuran tersebut digunakan untuk mengevaluasi performa sistem komunikasi dan sistem kendali yang telah dirancang sehingga dapat diketahui tingkat responsivitas robot kalimba dalam memainkan lagu secara otomatis.

2.1.11 Material Filamen

Fused Deposition Modeling (FDM) merupakan salah satu teknologi *additive manufacturing* yang banyak digunakan dalam pembuatan prototipe hingga komponen mekanik robotika pada *3D Printing*. Proses ini bekerja dengan cara melelehkan filamen termoplastik melalui *nozzle* yang dipanaskan, kemudian mendeposisikannya lapis demi lapis (*layer by layer*) hingga membentuk objek tiga dimensi. Pemilihan jenis material filamen sangat menentukan sifat mekanik akhir dari komponen yang dicetak, meliputi kekuatan tarik (*tensile strength*), kelenturan, ketahanan terhadap benturan (*impact resistance*), serta kemudahan proses pencetakan (Gibson, 2021)

Pada perancangan struktur mekanik robot kalimba, digunakan dua jenis material termoplastik utama, yaitu *Polylactic Acid* (PLA) dan *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG):

1) Polylactic Acid (PLA)

PLA merupakan polimer termoplastik terbarukan yang berasal dari pati jagung atau tebu. Material ini dikenal memiliki tingkat penyusutan (*warping*) yang sangat rendah selama proses pendinginan, sehingga menghasilkan akurasi dimensi yang tinggi dan mudah dicetak tanpa memerlukan ruang cetak berpemanas (*heated chamber*). Namun demikian, PLA memiliki sifat cenderung getas (*brittle*) dan memiliki ketahanan terhadap beban benturan berulang yang relatif rendah (Callister, 2018). Pada sistem robot ini, PLA dimanfaatkan pada tahap pembuatan prototipe awal serta komponen pelindung statis seperti *component box* dan *casing* HMI yang tidak menerima beban mekanis tinggi.

2) Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)

PETG merupakan modifikasi dari Polyethylene Terephthalate (PET) dengan penambahan glikol untuk mencegah kristalisasi material, sehingga menghasilkan sifat mekanik yang lebih tangguh (*toughness*). PETG menggabungkan kemudahan pencetakan seperti PLA dengan kekuatan dan fleksibilitas mendekati ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene). Material ini memiliki daya rekat antar-lapisan (*layer adhesion*) yang sangat kuat, ketahanan benturan berulang (*impact resistance*) yang baik, serta sifat fleksibilitas yang mampu menyerap getaran tanpa mudah patah (Gibson, 2021).

Pada tugas akhir ini, material PETG dipilih sebagai bahan utama pembuatan komponen *body* dan lengan (*arm*) penekan tuts kalimba. Pemilihan PETG terbukti mampu menahan beban benturan siklis akibat pergerakan dinamis 17 unit micro servo saat memetik bilah logam kalimba, sehingga mencegah terjadinya kerusakan struktural atau patah fatigue pada lengan mekanik.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian oleh Halawa (2024) yang berjudul "Robot Angklung Menggunakan *Human Machine Interface* (HMI)". Permasalahan dalam penelitian ini adalah melestarikan angklung yang mulai terlupakan karena keterbatasan keterampilan masyarakat dalam memainkannya, dan memanfaatkan teknologi untuk membuatnya lebih interaktif dan mudah dimainkan. Tujuan dari alat ini adalah menciptakan robot angklung yang dapat bermain secara otomatis melalui sistem HMI agar menjadi alat musik yang lebih modern dan menarik, serta melestarikan angklung sebagai alat musik tradisional khas Indonesia. Metode penelitian ini melibatkan studi literatur, identifikasi permasalahan, perancangan (mekanik, pengendali, program), dan pengujian (fungsionalitas dan *usability*). Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa koneksi antara HMI dan mikrokontroler berhasil dilakukan dengan baik dan stabil, menunjukkan efisiensi dalam pengiriman dan penerimaan data. Meskipun terdapat perbedaan frekuensi nada asli dengan hasil rekaman aplikasi, hal ini disebabkan oleh faktor teknis aplikasi rekaman dan lingkungan, bukan fungsionalitas robot. Pengujian *usability* menunjukkan tingkat kepuasan yang tinggi dari pengguna (94.65% dari guru seni budaya dan 91.66%

dari masyarakat), meskipun sistem terbatas pada 18 nada atau 2.5 oktaf dan tidak memiliki fitur penyesuaian tempo atau kontrol volume.

Selanjutnya penelitian oleh Cui (2020) yang berjudul "*The Design of Automatic Performance Experiment Equipment of Xylophone Based on HMI Technology*". Penelitian ini merancang sebuah alat otomatis yang dapat memainkan xilofon menggunakan antarmuka HMI dan mikrokontroler. Alat ini ditujukan untuk penggunaan edukatif dan hiburan, berfungsi sebagai alat bantu pembelajaran musik, dan dapat mensimulasikan cara manusia memainkan xilofon secara otomatis. Kelebihan penelitian ini terletak pada tampilan antarmuka HMI yang visual dan interaktif, meningkatkan keragaman dan operabilitas xilofon otomatis. Hasil pengujian menunjukkan tingkat penyelesaian 100% untuk nada tunggal dan lagu-lagu dengan kesulitan mudah hingga menengah, dan sekitar 60-70% untuk lagu yang lebih sulit, yang masih dalam rentang desain yang wajar. Tantangannya adalah keterbatasan stabilitas peralatan yang dapat memengaruhi pengulangan lagu yang lebih sulit.

Penelitian oleh Susianti et al (2022) berjudul "Rancang Bangun Robot Bellyra Satu Oktaf". Robot ini dirancang untuk memainkan alat musik bellyra, yang merupakan instrumen perkusi bernada dalam kesatuan musik *drumband*. Robot ini memiliki delapan bilah nada yang mencakup satu oktaf, mulai dari C-D-E-F-G-A-B-C. Untuk menghasilkan bunyi, digunakan dua lengan robot yang masing-masing dilengkapi *micro servo* untuk gerakan kanan-kiri dan *central lock* untuk memukul bilah, yang semuanya diatur oleh mikrokontroler. Tujuan sistem ini adalah memperkenalkan alat musik bellyra kepada masyarakat secara edukatif dengan memainkan lagu-lagu yang telah diprogram secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot dapat memainkan lagu sesuai dengan tempo yang diinginkan, dan meskipun terdapat *error* 2,5% pada pergerakan sudut *micro servo*, hal ini tidak memengaruhi kinerja lengan robot karena posisi lengan saat memukul bilah masih tepat. Kelemahannya adalah keterbatasan pada satu oktaf dan belum mendukung kendali interaktif secara *real-time*.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Karbasi et al (2022) yang berjudul "*A Robotic Drummer with a Flexible Joint: The Effect of Passive Impedance on*

Drumming". Penelitian ini mengembangkan sistem pemukul drum otomatis yang menggunakan aktuator motor *quasi direct-drive* dan sambungan fleksibel (*flexible joint*) berbasis pegas. Fokus utama terletak pada pemanfaatan motor servo presisi untuk menghasilkan pukulan dinamis terhadap drum melalui variasi frekuensi dan amplitudo gerak. Sistem ini menunjukkan bahwa penggunaan aktuator motor yang responsif, meskipun tidak meniru gerak manusia secara langsung, mampu menghasilkan kualitas suara yang mendekati performa alami. Kelebihannya terletak pada kontrol gaya pukulan yang dapat disesuaikan, sementara kelemahannya adalah keterbatasan sistem dalam beradaptasi secara *real-time* karena tidak adanya *feedback loop*.

Terakhir penelitian oleh Mariani & Hastuti (2020) berjudul "*Kendali Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Arduino Mega Berbasis HMI*". Penelitian ini merancang sistem pengendali motor induksi menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan *Human Machine Interface* (HMI) berbentuk layar TFT. Tujuan utamanya adalah memberikan kontrol kecepatan motor induksi secara interaktif melalui antarmuka HMI. Sistem ini memungkinkan pengguna memantau dan mengatur frekuensi serta kecepatan motor secara langsung, menunjukkan efisiensi kerja dengan arus awal rendah dan kestabilan putaran motor. Kelebihan utama sistem adalah kemudahan kontrol visual dan kesederhanaan rangkaian. Namun, kelemahannya adalah sistem ini hanya mendukung kontrol satu arah tanpa fitur adaptasi terhadap variasi beban atau sistem kendali berbasis sensor umpan balik.

Berikut ini adalah perbandingan dari beberapa penelitian terdahulu yang relevan dan sesuai dengan tema sistem kontrol robot kalimba dapat dilihat pada Tabel 2. 1

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul	Kelebihan	Kekurangan
1	Halawa (2024)	Robot Angklung Menggunakan <i>Human Machine Interface</i> (HMI)	Koneksi HMI dan mikrokontroler berhasil dengan baik dan stabil, efisien dalam pengiriman data. Tingkat kepuasan pengguna tinggi (94.65% guru seni budaya, 91.66% masyarakat)	Suara angklung yang dihasilkan memiliki perbedaan dengan nada normal. Sistem belum mendukung penyesuaian tempo atau kontrol volume.
2	Susianti et al (2022)	Rancang Bangun Robot Bellyra Satu Oktaf	Berhasil memainkan lagu secara otomatis sesuai tempo yang diinginkan. Meskipun ada <i>error</i> kecil pada pergerakan sudut servo, hal ini tidak memengaruhi kinerja. Edukatif dalam memperkenalkan alat musik.	Hanya mencakup satu oktaf nada (delapan bilah). Belum mendukung kendali interaktif secara <i>real-time</i>
3	Karbasi et al (2022)	<i>A Robotic Drummer with a Flexible Joint: The Effect of Passive Impedance on Drumming</i>	Menggunakan motor <i>quasi direct-drive</i> dan sambungan fleksibel berbasis pegas pasif untuk menghasilkan pukulan drum yang natural dan efisien. Fokus pada kualitas suara berdasarkan frekuensi dan amplitudo gerakan. Desain	Belum mendukung sistem kontrol berbasis umpan balik (<i>feedback</i>). Presisi frekuensi masih dipengaruhi karakteristik fisik pegas, belum optimal untuk aplikasi interaktif atau

No	Nama Peneliti	Judul	Kelebihan	Kekurangan
			aktuator mampu menghasilkan ritme otomatis tanpa meniru gerakan manusia secara kompleks.	responsif secara <i>real-time</i> .
4	Cui (2020)	<i>The Design of Automatic Performance Experiment Equipment of Xylophone Based on HMI Technology</i>	Tampilan antarmuka HMI visual dan interaktif, meningkatkan keragaman dan operabilitas xilofon otomatis. Tingkat penyelesaian 100% untuk nada tunggal dan lagu mudah hingga menengah. Edukatif dan hiburan.	Keterbatasan stabilitas peralatan dapat memengaruhi pengulangan lagu yang lebih sulit (penyelesaian 60-70% untuk lagu sulit).
5	Mariani & Hastuti (2020)	<i>Kendali Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Arduino Mega Berbasis HMI (Human Machine Interface)</i>	Menunjukkan keberhasilan integrasi sistem HMI dan mikrokontroler Arduino Mega dalam mengendalikan motor induksi dengan kontrol kecepatan berbasis <i>input</i> frekuensi. Pengujian menunjukkan kontrol frekuensi antara 40–60 Hz menghasilkan respons kecepatan motor sesuai target, dengan antarmuka LCD	Penelitian difokuskan pada motor industri, bukan aplikasi seni atau musik. Sistem belum dioptimalkan untuk gerakan presisi kecil seperti dalam robot instrumen musik. Belum menyertakan evaluasi interaksi pengguna terhadap antarmuka HMI.

No	Nama Peneliti	Judul	Kelebihan	Kekurangan
			yang responsif dan <i>real-time</i> .	

2.3 Gap Penelitian

Berdasarkan hasil studi literatur terhadap beberapa penelitian sebelumnya, mayoritas sistem robotik instrumen musik otomatis masih memiliki keterbatasan dalam aspek fleksibilitas kendali, jumlah aktuator, dan kedalaman interaksi antarmuka pengguna. Penelitian oleh Halawa (2024) dan Susianti et al. (2022) membuktikan bahwa mikrokontroler dan aktuator dapat dimanfaatkan untuk memainkan alat musik tradisional seperti angklung dan bellyra, namun masih terbatas pada jumlah nada (maksimal satu oktaf) dan tidak memungkinkan kontrol nada secara individual. Selain itu, fitur interaktif seperti pemilihan lagu maupun pengaturan langsung melalui tampilan *user interface* belum sepenuhnya diterapkan secara fleksibel.

Penelitian oleh Cui (2020) menunjukkan penerapan *Human Machine Interface* (HMI) pada alat musik xilofon otomatis, namun dari hasil pengujiannya diketahui sistem tersebut masih belum stabil untuk memainkan lagu dengan kompleksitas tinggi, serta belum mengakomodasi skala nada diatonik penuh yang umum digunakan pada kalimba. Sementara itu, penelitian oleh Karbasi et al. (2022) lebih berfokus pada eksplorasi dinamika gerakan servo berbasis pegas untuk menghasilkan kualitas bunyi, namun belum mengimplementasikan sistem antarmuka visual atau pemilihan nada secara *real-time*.

Adapun penelitian oleh Mariani et al. (2020) mengenai sistem robotik musik menggunakan mikrokontroler Arduino Mega juga menunjukkan kendala keterbatasan port dan efisiensi pemrograman saat mengatur banyak aktuator, serta belum memanfaatkan *driver* servo eksternal untuk efisiensi pin PWM.

Dengan mempertimbangkan keterbatasan dari penelitian-penelitian tersebut, maka dibutuhkan suatu sistem yang:

- 1) Mampu menggerakkan lebih dari 15 aktuator secara bersamaan secara stabil menggunakan *driver* servo khusus.

- 2) Menggunakan *Human Machine Interface* (HMI) untuk memberikan interaksi visual dalam memilih lagu maupun nada manual.
- 3) Mendukung tangga nada hingga 2.5 oktaf pada instrumen kalimba 17 tuts.
- 4) Menerapkan sistem edukatif dan simulasi musik otomatis yang mudah digunakan oleh pengguna tanpa latar belakang musik.