

# Rancang Bangun Robot Pemain Musik Gamelan Menggunakan Mikrokontroler ATmega16

Handri Jir Azhar<sup>1)</sup>, Ferry Hadary<sup>2)</sup>, Syaifur Rahman<sup>3)</sup>  
 Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura  
 E-mail: handrijrazhar@rocketmail.com

**Abstrak.**--Robot musik gamelan adalah robot yang dapat memainkan gamelan pada bilah-bilah nada yang diinginkan dengan batas oktaf gamelan berjumlah 2 oktaf 15 nada. Robot musik gamelan mempunyai input berupa tombol perintah *keypad* 4x4, sensor posisi DC gear motor *magnetic rotary encoder* dan sensor *limit switch* sebagai pembatas jalur kereta. Perangkat pengendali menggunakan mikrokontroler Atmega 16. Perangkat penggerak robot gamelan adalah DC gear motor dan motor servo pemukul gamelan. Peran motor DC adalah untuk menggerakkan kereta agar bergeser kearah kiri atau kanan. Posisi putaran motor DC menggunakan sistem kendali tertutup proporsional derivatif (PD). Konstanta pengali PD diperoleh dari *try* dan *error*, dengan konstanta proporsional ( $K_p$ ) = 5 dan konstanta derivatif ( $K_d$ ) = 15. Nilai  $K_p$  dan  $K_d$  berfungsi untuk menentukan besarnya lebar pulsa yang berpengaruh terhadap kecepatan DC gear motor disaat DC gear motor memposisikan posisi diinginkan dari *set point* (SP). Apabila data posisi DC gear motor yang diperoleh/*present value* (PV)  $\neq$  SP, maka posisi motor dapat menggunakan nilai toleransi *error* ( $E_r$ ) yaitu  $E_r < 3$  dan  $E_r > -3$ . Nilai toleransi *error* bertujuan agar nilai PV pada posisi DC gear motor bisa mendekati nilai SP, yang menandakan bahwa posisi pemukul kereta telah berada pada area bilah nada yang ingin dituju. Motor servo sebagai penggerak pemukul gamelan akan memukul bilah nada apabila nilai posisi DC gear motor memenuhi syarat  $PV = SP$  atau syarat toleransi *error*.

**Kata kunci:** Gamelan, mikrokontroler Atmega 16, *magnetic rotary encoder*, *limit switch*, DC gear motor, *set point*, *present value*, *error*.

## I. LATAR BELAKANG

Robot musik gamelan diciptakan untuk memberikan suatu inovasi robotika dibidang seni alat musik tradisional gamelan. Melihat gamelan merupakan suatu warisan kultural Indonesia yang harus dilestarikan. Alat musik gamelan lambat laun ada kemungkinan akan ditinggalkan oleh masyarakat, terutama generasi muda Indonesia. Hal ini dikarenakan ada kemungkinan alat musik gamelan sudah tidak menarik lagi. Oleh karena itu diperlukan adanya inovasi dari alat musik ini untuk menarik minat masyarakat. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka dalam tugas akhir ini dibuat suatu inovasi robotika dibidang seni musik tradisional gamelan. Inovasi robotika pada alat musik

gamelan diharapkan kedepannya akan menambah minat masyarakat untuk mengenal alat musik tradisional ini, sehingga bisa menumbuhkan minat untuk mempelajarinya kembali.

## II. KONSEP DASAR PENELITIAN

### A. Penelitian Terkait

Robot gamelan merupakan salah satu inovasi teknologi robotika di bidang seni alat musik perkusi melodis (alat musik pukul bernada). Robot musik gamelan difungsikan dapat memainkan untaian dari setiap bilah nada gamelan, pada gamelan sendiri ada bernada 5 nada hingga 15 nada. Beberapa penelitian tentang robot musik gamelan maupun robot musik pukul/tekan yang pernah dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Robot Pemukul Gamelan Versi 2, oleh Rezeki Kurniawan, 2006 [1] menciptakan robot berlengan pemain gamelan, pada robot ini menggunakan gamelan berjenis *pelog* dengan nada berjumlah 11 nada. Robot berlengan memiliki 3 buah titik lengan sendi, lengan sendi 1 berfungsi sebagai sendi putar motor dalam pergerakan lengan secara horizontal, sedangkan lengan sendi ke-2 dan ke-3 berfungsi sebagai sendi putar motor dalam pergerakan lengan robot secara vertikal. Khusus lengan sendi ke-3 adalah lengan sendi yang membawa pemukul gamelan. Tiap-tiap motor nya menggunakan motor DC dan dibantu menggunakan sensor *rotary encoder* untuk menanda posisi motor.
- b. Robot Musisi Dengan Aktivasi Pembacaan Not Angka, oleh Anton Wahyu Prihandono, 2007 [2] menciptakan robot dapat memainkan alat musik *keyboard*. Robot yang diciptakan dapat menekan papan nada/*tuts keyboard* nada, baik *tuts keyboard* berwarna putih sebagai nada asli/pokok maupun *tuts keyboard* berwarna hitam sebagai nada kromatis (nada yang jarak antar nadanya hanya 1/2). Untuk menekan papan nada/*tuts keyboard* putih dan hitam masing-masing menggunakan 1 buah motor *stepper*. Lengan *shaft* putar motor *stepper* berfungsi untuk menekan *tuts keyboard*. Sedangkan untuk menggeser perpindahan motor *stepper* terhadap papan nada, motor *stepper* dipasang pada media yang dapat ditarik oleh motor *servo continous* melalui katrol rantai yang telah terhubung.

Pada penelitian ini dilakukan inovasi terhadap penelitian sebelumnya yaitu robot musik gamelan ini tidak memerlukan banyak sendi robot dalam mengarahkan pemukul gamelan, tetapi menggunakan kereta yang dapat

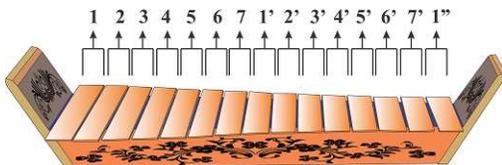
bergeser dengan cepat dalam mengarahkan pemukul gamelan yang dibawa oleh robot. Pemukul gamelan dapat memukul bilah nada gamelan dengan cepat menggunakan penggerak motor servo.

### B. Gamelan Gambang

Gamelan berasal dari bahasa Jawa "gamel" yang berarti memukul dan diikuti akhiran-an yang menjadikannya kata benda. Sedangkan gamelan gambang merupakan bagian dari jenis instrument gamelan dengan jumlah bilah daun pukul mulai dari 15 hingga 20. Teknik memainkan gambang dimainkan tanpa *memathet*/ menekan jari pada ujung bilah daun pukul setelah pemukulan. Pada gamelan gambang bisa dikategorikan jenis gamelan modern dikarenakan berjumlah 2 oktaf dari 15 bilah. Oktaf adalah interval antara 1 not nada dengan not nada lain dengan frekuensi nada dua kalinya. Perbandingan frekuensi antara dua not yang terpisah oleh interval satu oktaf adalah 2:1.

Oktaf nada secara umum terdiri dari 3 oktaf nada yaitu oktaf pertama yang merupakan oktaf bernada rendah, oktaf ke dua adalah oktaf bernada sedang, dan ke tiga oktaf yang bernada tinggi. Ada tujuh jenis nada pokok yang ditulis dalam huruf yaitu nada C\_D\_E\_F\_G\_A\_B yang disebut oktaf pertama, dengan keterangan bahwa C = nada Do (1), D = Re (2), E = Mi (3), F = Fa (4), G = Sol (5), A = La (6), B = Si (7). Oktaf nada ke 2 memiliki frekuensi nada 1 kali lebih tinggi dibandingkan dengan frekuensi oktaf pertama. Penulisan oktaf nada ke 2 adalah dengan memberi tanda petik pada huruf not nada, oktaf nada ke 2 dapat ditulis yaitu nada C'\_D'\_E'\_F'\_G'\_A'\_B'. Sedangkan untuk oktaf ke 3 dapat pada penulisan huruf not nada dengan menambahkan tanda petik menjadi petik dua [3].

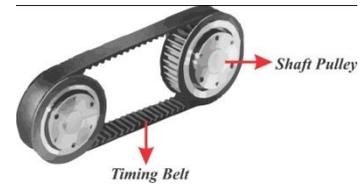
komposisi unsur pada bilah daun pukul gamelan bervariasi diantaranya buatan Papingan (Yogyakarta) = Cu 52,87 % : Sn 34,82 % : Zn 12,55 %, adapun dari Bekonang (Surakarta) = Cu 48,80 % : Sn 39,88 % : Zn 10,86 %, dan dari Kauman (Magetan) = Cu 51,00 % : Sn 40,26 % : Zn 8,39 %. Keterangan Cu adalah *Cuprum*/ Tembaga, Sn adalah *Stannum*/ Timah Putih, dan Zn adalah *Zinc*/Seng.



Gambar 1. Gamelan jenis gambang 15 bilah nada pukul (Sumber: Haryono (2001))

### C. Timing Belt dan Shaft Pulley

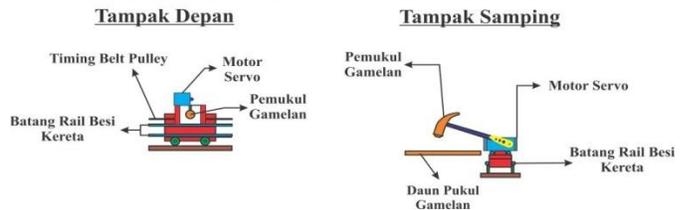
*Timing belt* berfungsi sebagai tali penghubung diantara kedua *shaft/poros gear* motor baik itu motor *stepper* maupun motor DC, *timing belt* diperlihatkan pada Gambar 2.2. Spesifikasi *timing belt* memiliki panjang 2 meter, lebar *timing belt* 6 mm, dan untuk ketebalan setiap gigi *timing belt* yaitu 2 mm. Total gigi pada *timing belt* panjang 2 m memiliki 1000 gigi. Sedangkan *shaft pulley* merupakan roda gigi yang dapat dipasang pada batang poros motor/*shaft* motor [4].



Gambar 2. Dua buah *shaft pulley* yang dihubungkan oleh *timing belt*

(Sumber: <http://www.mymachineinfo.com>)

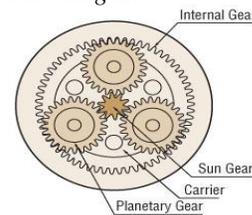
Aplikasi *shaft pulley* dan *timing belt* dapat diaplikasikan untuk menggeser kereta pembawa pemukul gamelan. Kereta pembawa pemukul gamelan terhubung dengan *timing belt* dan terdapat batang rel penyeimbang dan penstabil kereta ketika bergeser ke kanan atau kiri sehingga kereta tetap pada jalurnya.



Gambar 3. Kereta pembawa pemukul gamelan tampak depan dan samping

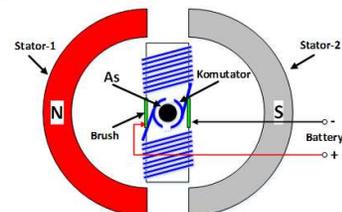
### D. DC Gear Motor

DC gear motor merupakan alat yang mengubah tenaga listrik arus searah menjadi tenaga mekanik. DC gear motor menggunakan konsep struktur mekanik *gear/gigi* pada motor DC menggunakan struktur *planetary gear*. Terdapat 3 jenis *gear* dari struktur *planetary gear*, yaitu *sun gear*, *planetary gear*, dan *internal gear*.



Gambar 4. Struktur *planetary gear* (Sumber: <http://www.orientalmotor.com>)

Motor DC yang biasa menggunakan konsep struktur *planetary gear* adalah motor DC magnet permanen. Motor DC magnet permanen adalah motor yang medan magnet utamanya berasal dari magnet permanen dan kumparan medan elektromagnetik digunakan untuk medan jangkar [5].

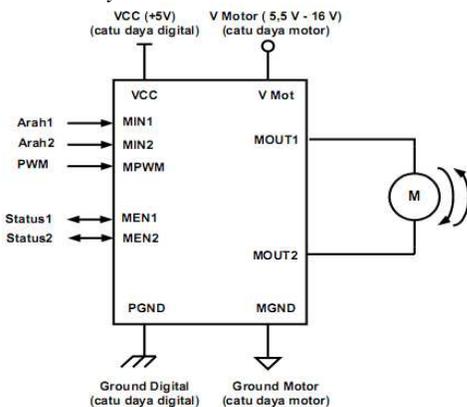


Gambar 5. Bagian-bagian motor DC magnet permanen (Sumber: <http://www.robotics-university.com>)

### E. Driver Motor DC

Driver motor DC merupakan driver H-Bridge yang di disain untuk menghasilkan *drive/kemudi* 2 arah putaran, yaitu putaran motor ke arah kanan/*clockwise* (CW) & putaran motor ke arah kiri/*counter clockwise* (CCW) [6]. Untuk *driver* DC gear motor menggunakan *driver* motor EMS 30 A H-Bridge dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Terdiri dari 1 *driver full H-Bridge* beserta rangkaian *current sense*.
- Mampu melewati arus kontinyu 30 A.
- *Range* tegangan Output untuk beban : 5,5 V sampai 16 V.
- Input kompatibel dengan level tegangan TTL dan CMOS.
- Jalur catu daya input (VCC) terpisah dari jalur catu daya untuk beban (V motor)
- Dilengkapi dengan dioda eksternal untuk pengaman beban induktif.
- Frekuensi PWM sampai dengan 20 KHz.
- Proteksi hubung singkat.
- Proteksi *overtemperature*.
- *Undervoltage* dan *Overvoltage Shutdown*.
- *Reverse Battery Protection*

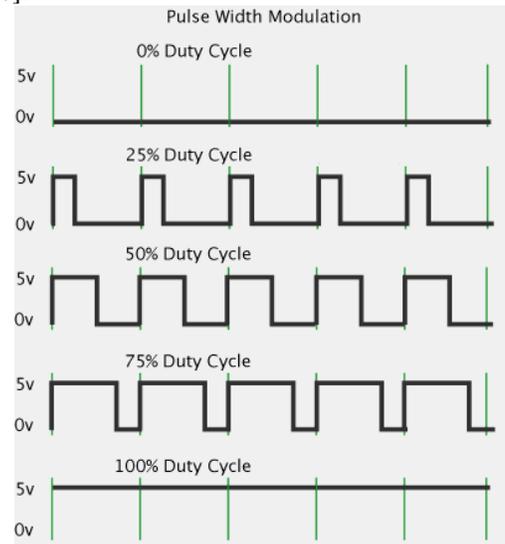


Gambar 6. Skema koneksi *driver* motor EMS 30 A H-Bridge (Sumber: Data Sheet: *Innovative Electronic* (2007: 5))

### F. Motor Servo

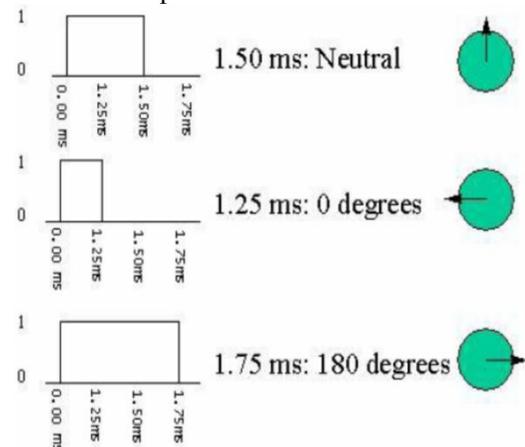
Motor *servo* merupakan motor penggerak dua arah yaitu arah putar kanan/ *clockwise* (CW) dan arah putar kiri/*counter clockwise* (CCW), dimana arah dan sudut pergerakan rotornya dapat dikendalikan hanya dengan memberikan pengaturan *duty cycle* sinyal *pulse wide modulator* (PWM) pada bagian pin kendalinya [7]. Pengertian PWM adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu perioda, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0% hingga 100%. PWM dengan resolusi 8 bit memiliki variasi perubahan nilai

sebanyak 28 = 256 variasi mulai dari 0 - 255 perubahan nilai yang memiliki *duty cycle* 0 - 100% dari keluaran PWM tersebut [8].



Gambar 7. *Duty cycle* dan resolusi PWM (Sumber: Eka maulana (2012))

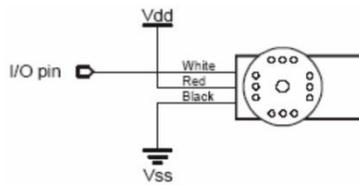
Untuk mengarahkan posisi serta derajat putar *servo* dapat dilakukan dengan memberi pulsa bervariasi, seperti memberikan pulsa dengan besar 1.5 ms mencapai gerakan 90 derajat, maka bila kita berikan data kurang dari 1.5 ms maka posisi mendekati 0 derajat dan bila kita berikan data lebih dari 1.5 ms maka posisi mendekati 180.



Gambar 8. Posisi dan waktu pemberian pulsa pada motor *servo*

(Sumber: Sumber: Buku: *Workshop KRI-KRCI PENS ITS* (2007: 52))

Motor *servo* memiliki 3 pin yaitu pin catu daya 5 V ( $V_{dd}$ ), pin *ground* ( $V_{SS}$ ), dan pin kendali motor *servo*. Operasional dari *servo* motor dikendalikan oleh sebuah pulsa selebar  $\pm 20$  ms, dimana lebar pulsa antara 0.5 ms dan 2 ms menyatakan akhir dari *range*/rentang sudut maksimum dan Konstruksi didalamnya meliputi *internal gear*, potensiometer, dan *feedback control*.



Gambar 9. Pin-pin motor *servo*  
(Sumber: Buku: *Workshop KRI-KRCI PENS ITS*  
(2007 : 54))

#### G. Kontroler AVR ATMEGA 16

Mikrokontroler ATmega16 memiliki keunggulan dibandingkan dengan mikrokontroler lainnya, keunggulan mikrokontroler ATmega16 yaitu pada kecepatan eksekusi program yang lebih cepat karena sebagian besar instruksi dieksekusi dalam 1 siklus *clock*, lebih cepat dibandingkan dengan mikrokontroler MCS51 yang memiliki arsitektur CISC (*Complex Instruction Set Computer*) di mana mikrokontroler MCS51 membutuhkan 12 siklus *clock* untuk mengeksekusi 1 instruksi [9]. Selain itu, mikrokontroler ATmega16 memiliki fitur yang lengkap (ADC internal, EEPROM internal, *Timer/Counter*, *Watchdog Timer*, PWM, *Port I/O*, komunikasi serial, Komparator dan lain-lain), sehingga dengan fasilitas yang lengkap ini, *programmer* dan desainer dapat menggunakannya untuk berbagai aplikasi sistem elektronika seperti robot, otomasi industri, peralatan telekomunikasi, dan berbagai keperluan lain.

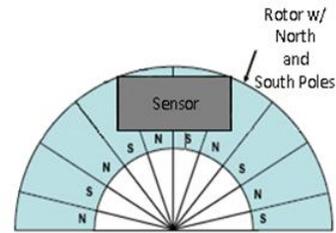
Fitur mikokontroler ATmega16 sebagai berikut:

- Mikrokontroler ATmega16 yang memiliki 8 bit dan kemampuan tinggi dengan daya rendah.
- Arsitektur RISC dengan *throughput* mencapai 16 MIPS pada frekuensi 16 MHz.
- Memiliki kapasitas *Flash* memori 16 KByte, EEPROM 512 Byte dan SRAM 1 KByte.
- Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu *Port A*, *Port B*, *Port C*, dan *PortD*.
- Unit interupsi internal dan eksternal.

Fitur *Peripheral* yaitu tiga buah *Timer/Counter*, *Real Time Counter* dengan *Oscillator* tersendiri, empat *channel* PWM, delapan *channel* 10-bit ADC, *Byte-oriented Two-wire Serial Interface*, *Programmable Serial USART*, antarmuka SPI, *Wachdog Timer* dengan *oscillator internal*, dan *On-chip Analog Comparato*.

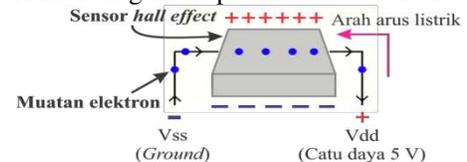
#### H. Sensor Magnetic Rotary Encoder

Perangkat sensor *magnetic rotary encoder* terdiri dari 2 komponen yaitu pertama *magnetic rotor disc* (piringan rotor bermagnet dengan kutub magnet utara dan selatan), dan kedua sensor *hall effect*. *Magnetic rotor disc* adalah merupakan rotor berupa piringan yang dilengkapi dengan sejumlah magnet berkutub utara dan selatan yang dipasang pada seluruh sisi lingkaran piringan rotor, dengan susunan kutub magnet berselang seling. *Magnetic rotor disc* dipasang pada *As shaft* motor DC [10].



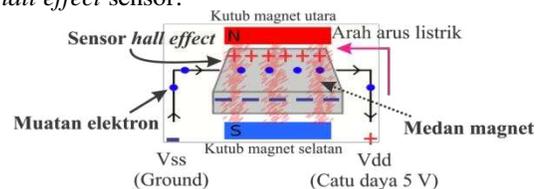
Gambar 10. *Magnetic rotor disc* dengan susunan kutub magnet berselang-seling  
(Sumber: <http://www.anaheimautomation.com>)

Sensor *hall effect* merupakan sensor yang dapat mendeteksi perubahan tegangan akibat pembelokan muatan elektron yang terjadi pada sensor akibat adanya medan magnet yang menembus material sensor *hall effect*. Material *hall effect* sensor terbuat dari bahan *gallium arsenide* (GaAs), *indium antimonide* (InSb) atau *indium arsenide* (InAs) yang dapat dilalui arus listrik/elektron dengan mudah dan merupakan komponen semikonduktor tipe-P [11]. Sistem kerja pada sensor *hall effect* yaitu pertama elemen sensor *hall effect* diberi tegangan suplai 5 V sehingga akan ada arus listrik yang mengalir pada sensor dan dalam material sensor *hall effect* akan ada muatan elektron yang berpindah dari kutub negatif ke positif elemen sensor.



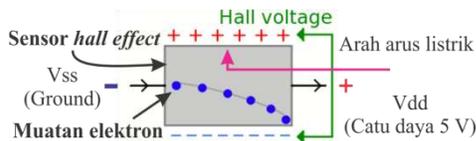
Gambar 11. Elemen sensor *hall effect* dialiri muatan elektron  
(Sumber: Chris Woodford (2015))

Ketika elemen sensor *hall effect* ditempatkan dalam suatu celah diantara dua kutub magnet yang berbeda yang saling tarik menarik, maka akan ada medan magnet yang menembus elemen sensor *hall effect* tersebut. Medan magnet yang menembus elemen *hall effect* sensor akan membelokkan aliran muatan elektron ke arah penampang kutub negatif dari elemen *hall effect* sensor.



Gambar 12. Elemen sensor *hall effect* diberi medan magnetik  
(Sumber: Chris Woodford (2015))

Muatan-muatan elektron yang membelok ke penampang kutub negatif elemen sensor *hall effect* akan memancing arus listrik dari catu daya mengalir ke penampang kutub positif dari elemen sensor *hall effect*, maka akan ada tegangan yang keluaran dari sensor *hall effect* ini. Sensor *hall effect* ini diaplikasikan menjadi sensor *magnetic encoder* yaitu *hall effect* sensor di pasang pada celah piringan rotor bermagnet pada motor DC.



Gambar 13. Muatan elektron yang dibelokkan ke penampung kutub negatif dari elemen sensor *hall effect* (Sumber: Chris Woodford (2015))

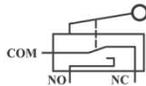
Ketika motor DC berputar maka piringan rotor bermagnet ikut berputar dan sensor *hall effect* akan membaca tegangan output *hall effect*, tegangan output sensor sebesar 5 V apabila sensor *hall effect* ditembus medan magnet dari piringan rotor magnetik, dan 0 V apabila sensor *hall effect* tidak ditembus medan magnet dari piringan rotor magnetik. Output tegangan sensor dapat dilogikakan menjadi logika "1" apabila tegangan 5 V dan logika "0" apabila tegangan 0 V.

#### I. Sensor Limit Switch

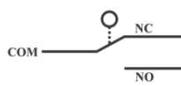
*Limit Switch* merupakan jenis saklar yang dilengkapi dengan katup yang berfungsi menggantikan tombol. Prinsip kerja *limit switch* sama seperti saklar Push ON yaitu hanya akan menghubungkan pada saat katupnya ditekan, dan memutuskan pada saat katup tidak ditekan. *Limit switch* termasuk dalam kategori sensor mekanis yaitu sensor yang akan memberikan perubahan elektrik saat terjadi perubahan mekanik pada sensor tersebut. Penerapan dari *limit switch* adalah sebagai sensor posisi suatu benda (objek) yang bergerak. *Limit switch* memiliki 2 kontak yaitu *normally open* (NO) dan *normally close* (NC) dimana salah satu kontak akan aktif jika tombolnya tertekan [12].



Bentuk Fisik Limit Switch



Konstruksi Limit Switch



Simbol Limit Switch

Gambar 14. Gambar bentuk fisik, konstruksi, dan simbol dari *limit switch*

(Sumber: Ervin Saeful Anwar (2011))

#### J. Keypad Matrik 4x4

*Keypad* matrik  $4 \times 4$  memiliki konstruksi atau susunan yaitu terdiri dari 4 baris dan 4 kolom dengan *keypad* berupa saklar *push button* yang diletakkan di setiap persilangan kolom dan barisnya. Sistem kerja *keypad* matrik  $4 \times 4$  ini menggunakan sistem *scanning* untuk membaca penekanan tombol pada *keypad* matrik  $4 \times 4$  yang menjadi input mikrokontroler dilakukan secara bertahap kolom demi kolom, dari kolom pertama sampai kolom ke-4 dan baris pertama hingga baris ke-4 [13].

#### K. Teori Kendali Proporsional Derivatif (PD)

Kendali proporsional derivatif merupakan gabungan dari sistem kendali proporsional dan sistem kendali derivatif. Kendali proporsional derivatif pada pengaturan posisi motor DC memerlukan konstanta yang didapat dari hasil penalaan. Penalaan untuk mendapatkan konstanta proporsional ( $K_p$ ) dan konstanta derivatif ( $K_d$ ) pada kendali posisi motor

didapatkan dengan 2 cara, yaitu metode *trial error* dan metode Ziegler Nicols [14].

#### L. Teori Kendali Proporsional

Kendali proporsional memiliki keluaran yang sebanding/proporsional dengan besar dari sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan nilai aktual). Keluaran kendali proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional ( $K_p$ ) dengan nilai *error*. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluaran sebesar konstanta pengali [15]. Penalaan  $K_p$  dengan metode *trial error* dalam memposisikan posisi DC *gear* motor tipe GM420024-SY telah diperoleh dengan nilai  $K_p = 5$ . Rumus kendali proporsional sebagai berikut:

$$P = K_p \times e(t)$$

Dengan:

$P$  adalah proporsional

$K_p$  adalah nilai konstanta proporsional

$e(t)$  adalah nilai *error* yang selalu akan berubah

Rumus nilai *error* adalah:

$$e(t) = S_p - P_v$$

Dengan:

$S_p$  adalah *setpoint*/nilai acuan

$P_v$  adalah *process variable*/nilai aktual yang diproses

Nilai *error* sebagai contoh berfungsi untuk memberikan nilai *pulse width modulation* (PWM) yang sesuai pada motor DC terhadap gerakan putar kiri dan kanan agar dapat menuju ke posisi ideal.

#### M. Teori Kendali Derivatif

Kendali derivatif berfungsi untuk mengantisipasi perubahan *error* yang besar, memberikan aksi yang bersifat korektif dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem. Sebagai contoh apabila motor DC yang ingin dikendalikan pada posisi derajat yang diinginkan, tetapi bergerak sangat cepat, maka semakin besar nilai derivatif ( $D$ ). Konstanta derivatif ( $K_d$ ) diperlukan untuk menambah atau mengurangi imbas dari derivatif terhadap nilai PWM yang diperlukan.

Dengan mendapatkan nilai  $K_d$  yang tepat pergerakan kecepatan putaran motor yang kurang stabil dalam mencapai posisi derajat putar motor, akibat dari kendali proporsional dapat diminimalisasi [15]. Kendali derivatif memerlukan *rate error* yaitu selisih dari *error* aktual terhadap *error* lampau, adalah:

$$\text{rate error} = \text{error} - \text{error lampau}$$

Rumus kendali derivatif adalah:

$$D = \text{rate error} \times K_d$$

Dengan:

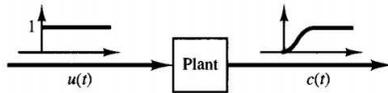
*rate error* adalah selisih dari *error* aktual terhadap *error* lampau

$K_d$  adalah nilai konstanta derivatif.

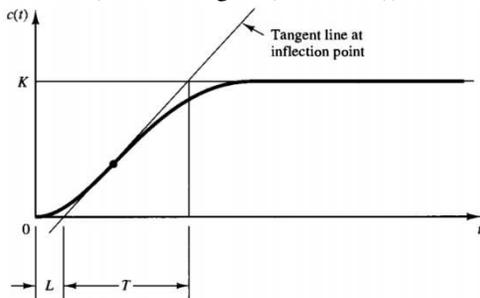
Penalaan  $K_d$  dengan metode *trial error* dalam memposisikan posisi motor DC tipe GM420024-SY telah diperoleh dengan nilai  $K_d = 15$ .

N. Teori Kendali Proporsional Integral Derivatif (PID) Zieger Nichols.

Metode Zieger Nichols adalah metode untuk memperoleh respon sistem dengan lonjakan maksimum sebesar 25%. Metode kurva reaksi didasarkan terhadap reaksi sistem untai terbuka. Plant sebagai untai terbuka dikenai sinyal fungsi tangga satuan. Jika plant tidak mengandung unsur integrator atau pole-pole kompleks, reaksi sistem akan berbentuk huruf S.



Gambar 15. Respon tangga satuan sistem (Sumber: Ogata (1997: 671))



Gambar 16. Kurva respon berbentuk S (Sumber: Ogata (1997: 671))

Kurva berbentuk-s mempunyai dua konstanta, waktu tunda  $L$  dan waktu konstan  $T$ . Dari Gambar 2.23 terlihat bahwa waktu  $L$  dan konstan  $T$  ditentukan oleh garis singgung yang memotong sumbu absis dan garis maksimum. Apabila waktu tunda  $L$  dan waktu konstan  $T$  diketahui, maka untuk nilai konstanta  $K_p$ ,  $T_i$  atau  $K_i$  dan  $T_d$  atau  $K_d$  dapat diketahui menggunakan aturan Zieger Nichols [16].

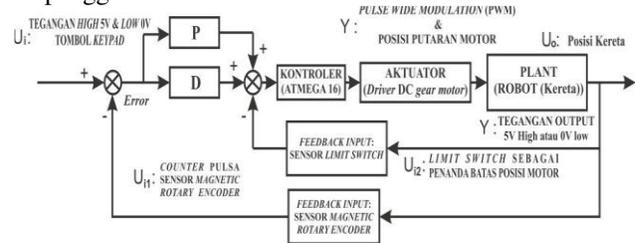
Tabel 1. Tabel metode PID Zieger Nichols

Type of Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
I	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

III. PERANCANGAN

A. Perancangan Sistem Kendali Robot Musik Gamelan Sistem kendali robot musik gamelan menggunakan sistem kendali tertutup Proporsional Derivatif (PD). Blok diagram sistem kendali robot musik gamelan terdiri dari input, perangkat pengendali, perangkat aktuator, dan plant. Input dari robot musik gamelan adalah tombol *keypad* nada/ tombol lagu, sensor *magnetic rotary encoder*, dan sensor *limit switch*. Aktuator robot musik gamelan adalah *driver* motor DC.

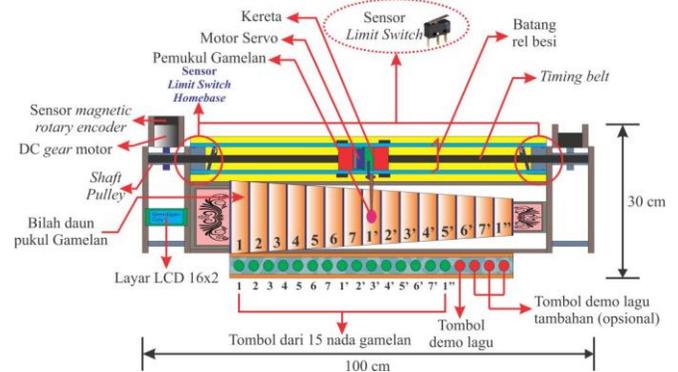
Plant pada robot musik gamelan adalah kereta pemukul gamelan. Kereta robot musik gamelan terdiri dari DC gear motor yang terhubung dengan kereta, dan kereta robot musik gamelan dilengkapi pemukul gamelan berpengergerak motor servo.



Gambar 17. Blok diagram robot musik gamelan

B. Perancangan Mekanik Robot Musik Gamelan

Perancangan mekanik robot musik gamelan menggunakan konsep kereta yang berjalan di atas papan jalur, kereta diseimbangkan oleh batang besi rel. Kereta berfungsi membawa motor servo untuk bergerak di sepanjang jalur rel dari kanan ke kiri atau sebaliknya. Shaft motor servo terhubung dengan tangkai pemukul gamelan, sehingga pemukul gamelan dapat bergerak untuk memukul bilah daun pukul gamelan. Pergerakan kereta menggunakan DC gear motor melalui shaft pulley, dimana shaft pulley dihubungkan ke timing belt pulley untuk menarik kereta. Dimensi robot musik gamelan berukuran 100cm x 30cm x 25cm.



Gambar 18. Rancangan mekanik robot musik gamelan

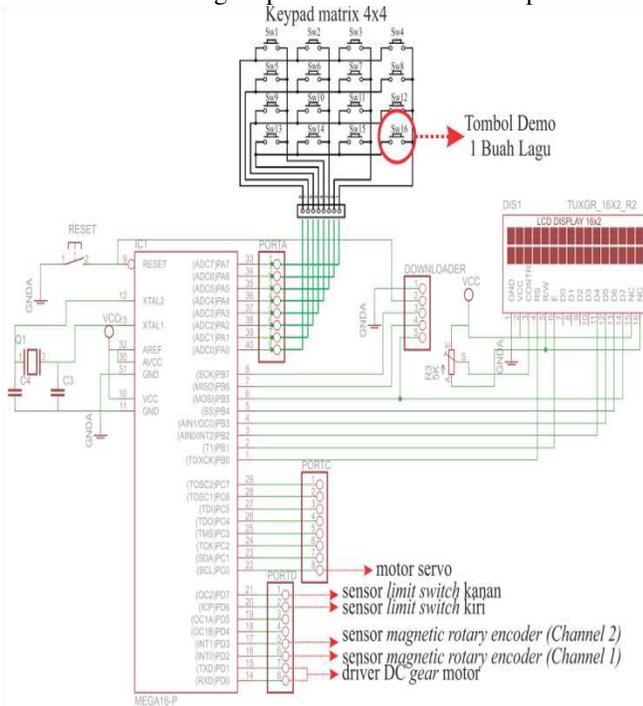
C. Perancangan Elektronik Rangkaian Mikrokontroler ATMEGA 16.

Rangkaian mikrokontroler menggunakan empat buah port sebagai jalur keluar masuk data I/O. selain itu, rangkaian ini juga terdiri dari rangkaian pembangkit pulsa clock dan rangkaian reset.

Pin-pin pada port I/O yang digunakan dalam perancangan adalah sebagai berikut:

1. Port A0-A7 digunakan sebagai input Keypad matrik 4x4 dan tombol 16 pada Keypad matrik 4x4 merupakan tombol 1 buah lagu.
2. Port D3 terhubung ke sensor CH2 dan Port D2 terhubung ke sensor CH1 dari pin sensor magnetic rotary encoder.
3. Port D7 terhubung ke sensor limit switch bagian kanan

- Port D6 terhubung ke sensor *limit switch* bagian kiri (sebagai *home base*).
- Port B0-B5 digunakan sebagai *output* LCD 16x2.
- Port D0 & D1 terhubung ke *driver* motor DC EMS 30 H-Bridge untuk kendali arah putar motor.
- Port C0 terhubung ke pin kendali motor servo pemukul.



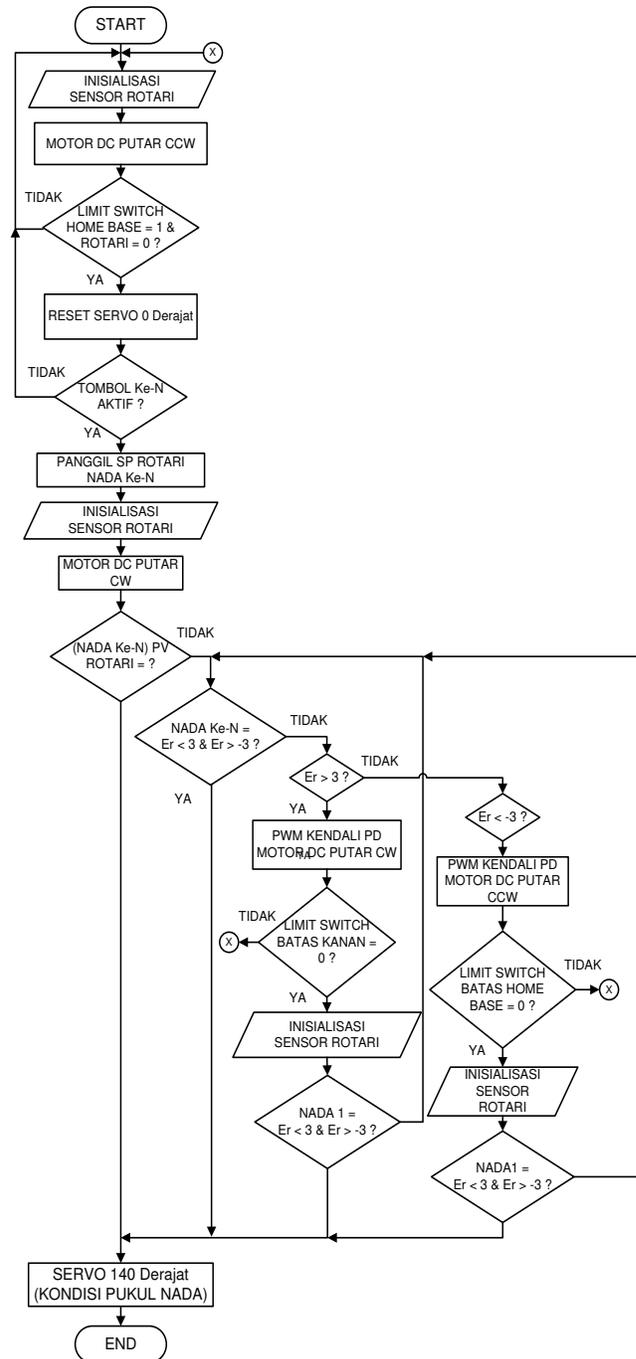
Gambar 19. Rangkaian mikrokontroler ATMEGA 16

#### D. Perancangan *Software* Robot Musik Gamelan

Perancangan *software* menjelaskan bagaimana sistem kerja dari robot musik gamelan. Robot musik gamelan dapat memainkan nada diperintah menggunakan tombol manual dan dapat memainkan untaian nada lagu secara otomatis. Adapun perancangan diagram alir/*flowchart*-nya sebagai berikut:

#### E. Perancangan *Flowchart* Robot Musik Gamelan Bermain Manual

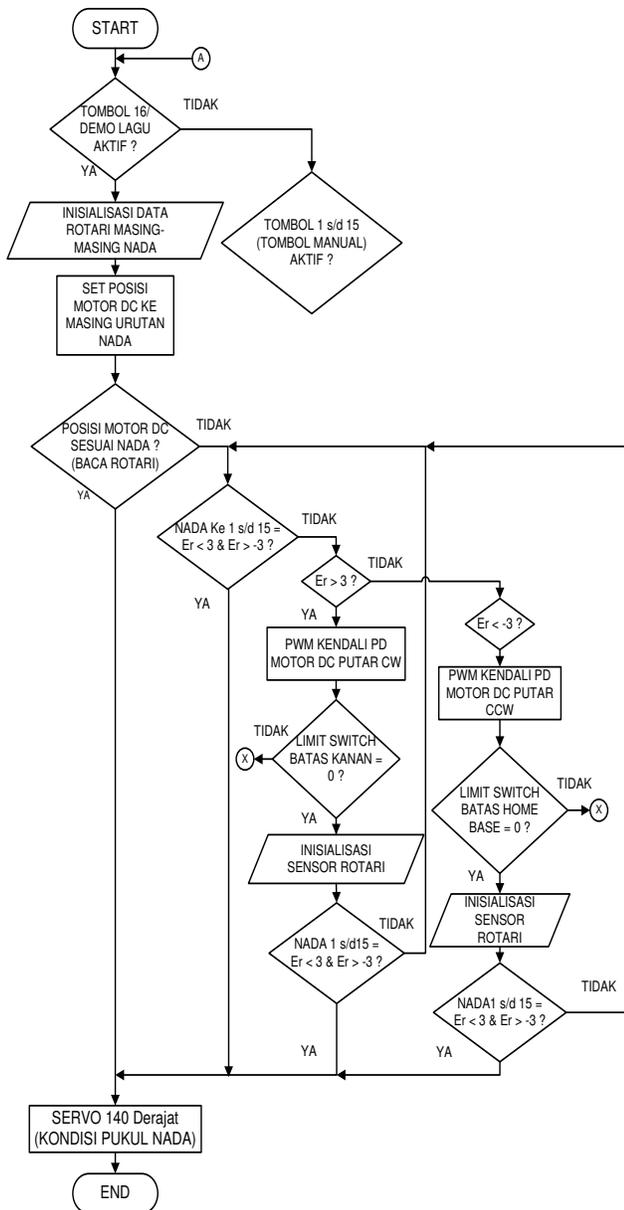
Perancangan *flowchart* robot musik gamelan bermain manual adalah robot bermain gamelan dengan perintah tekan tombol manual nada dari *keypad* 4x4. *Flowchart* nya dimulai dari inialisasi sensor, perintah putaran motor kemudian pengecekan sensor posisi hingga kendali PD dan nilai toleransi error. Jika nilai *present value* (PV) = *setpoint* (SP) atau  $PV \approx SP$  berdasarkan toleransi *error* ( $Er$ )  $< 3$  atau  $Er > -3$  maka servo aktif dan memukul bilah nada gamelan. Berikut adalah *flowchart* nya:



Gambar 20. *flowchart* robot musik gamelan bermain manual

#### F. Perancangan *Flowchart* Robot Musik Gamelan Bermain Otomatis

Perancangan *flowchart* robot musik gamelan bermain otomatis adalah robot dapat memainkan lagu pada gamelan secara otomatis. Cara kerja robot sama seperti bermain manual, yang membedakan hanyalah urutan nada lagu yang telah diatur dalam memainkan nada lagu. Posisi pergerakan motor berdasarkan data panggil terhadap *setpoint* data pulsa-pulsa sensor *magnetic rotary encoder* yang telah diregister. Berikut adalah *flowchart* nya:



Gambar 21. flowchart robot musik gamelan bermain otomatis

#### IV. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian yang dilakukan dari robot gamelan ini yaitu. melakukan pengujian pengujian robot menggunakan tombol nada manual dan pengujian robot menggunakan tombol nada otomatis.

##### A. Pengujian Robot Gamelan Bermain Manual

Dalam pengujian robot gamelan dimainkan secara manual menggunakan inputan berupa keypad matrik 4x4 yang dapat menampung 15 nada sebagai media tombol inputan ke robot gamelan. Prosedur dalam pengujian robot, pertama kali kereta pemukul gamelan harus di posisi home base, yaitu ditandai dengan aktif nya sensor limit switch home base yang ada bagian kiri. Pada limit switch sebagai home base terhubung pada Port D7. Jadi ketika setiap kali

robot gamelan diaktifkan, maka DC gear motor selalu di program arah putar motor ke arah kiri hingga kereta pemukul gamelan mengenai limit switch home base.

Saat kereta pemukul gamelan mengenai limit switch home base maka motor akan berhenti dan motor akan memutar kearah kanan dan akan berhenti berada pada nada 1. Nada 1 dibaca sensor magnetic rotary encoder adalah berjumlah 40 pulsa berdasarkan hasil pengujian sensor sebelumnya. Data pengujian robot gamelan akan ditampilkan di layar LCD adalah berupa data jumlah pulsa sensor magnetic rotary encoder (R), data posisi nada (N), dan error (E).



Gambar 22. Contoh salah satu pengujian nada 1 robot gamelan dimainkan manual

Tabel 2. Data hasil uji robot gamelan dimainkan secara manual menggunakan tombol keypad matrix 4x4.

Bilah Nada	Not	SP	PV1 (Pulsa)	PV2 (Pulsa)	Error	PWM DC Gear Motor	Arah Putar DC Gear Motor	PWM Kendali PD DC Gear Motor	Arah Putar DC Gear Motor	Servo (°)
1	1	40	40	40	0	200	CW	—	—	140
2	2	90	91	91	1	200	CW	—	—	140
3	3	140	140	140	0	200	CW	—	—	140
4	4	200	197	200	3	200	CW	60	CW	140
5	5	250	246	200	4	200	CW	80	CW	140
6	6	300	295	301	5	200	CW	100	CW	140
7	7	350	344	351	6	200	CW	120	CW	140
8	1'	400	407	401	7	200	CW	-140	CCW	140
9	2'	450	458	451	8	200	CW	-160	CCW	140
10	3'	500	500	500	0	200	CW	—	—	140
11	4'	550	557	551	7	200	CW	-140	CCW	140
12	5'	600	609	601	0	200	CW	-180	CCW	140
13	6'	650	645	651	5	200	CW	100	CW	140
14	7'	700	693	701	7	200	CW	140	CW	140
15	1''	750	750	750	0	200	CW	—	—	140

Data pengujian gerakan posisi motor menggunakan sensor magnetic rotary encoder terhadap set point (SP) posisi motor yang diinginkan untuk posisi nada yang dituju. Intruksi untuk menggerakkan posisi motor pada nada yang diinginkan pertama kali diinput oleh tombol nada melalui keypad matrix 4x4. Tombol nada keypad matrix 4x4 telah di register ke dalam mikrokontroler ATmega 16 dengan pasangan data pulsa sensor magnetic rotary encoder yang telah dilakukan pengujian terhadap posisi tiap-tiap bilah nada gamelan. Sebagai contoh tombol 8 (SW8) yang merupakan not nada 1' memiliki pasangan data rotari 400 pulsa. Data rotari 400 pulsa merupakan data set point (SP) not nada 1'. Apabila data SP dari not nada 1' tidak tercapai, maka dapat menggunakan syarat toleransi SP yaitu nilai error (Er) rotari yang didapat < 3 atau error (Er) rotari yang didapat > -3. Syarat toleransi mempunyai tujuan bahwa pemukul gamelan dapat diizinkan untuk memukul wilayah not nada yang dituju, ini dikarenakan dengan menggunakan syarat toleransi error maka pemukul gamelan masih masuk

dalam kawasan bilah not nada yang ingin dituju (kawasan bilah not nada 1'). Data pengujian not nada 1' dimulai dari posisi nada 1, sehingga motor bergerak ke arah kanan. Data pengujian not nada 1' ditampilkan di layar LCD.



Gambar 23. Data uji not nada 1 ke nada 1' (nada ke-8)

Hasil data pengujian pada not nada 1' yang dimulai dari nada 1. Untuk menuju nada ke 1', motor akan berputar ke arah kanan (CW) dengan nilai PWM 200 berdasarkan perancangan program. Besar nilai *error* yang didapat ketika motor ingin mencapai nada 1' (*setpoint*/SP = 400) adalah *error* bernilai 7. Jadi nilai aktual/*present value* ke-1 (PV1) rotari yang pernah terjadi adalah 407 berdasarkan nilai *error* nya. Nilai PV1 (PV1 = 407) dari rotari putaran motor belum memenuhi syarat, ini dikarenakan PV1  $\neq$  SP atau nilai *error* (Er) yang di dapat belum  $< 3$ . Untuk memenuhi syarat PV1 = SP atau Er  $< 3$  dan Er  $> -3$ , dan karena PV  $>$  SP maka motor perlu membalikkan arah ke arah kiri (CCW). Agar nilai *error* dari posisi motor dapat diperkecil maka diperlukan adanya pengaturan PWM ketika motor membalikkan arah atau ketika motor akan memposisikan kembali ke nada 1', hal ini dilakukan untuk menekan nilai *error* yang besar. Nilai PWM yang tepat didapat menggunakan perhitungan kendali proporsional derivatif (PD) sebagai berikut:

$$\text{Error} = 400 - 407 = -7$$

$$P = -7 \times 5 = -35$$

$$\text{Rate Error} = -7 - 0 = -7$$

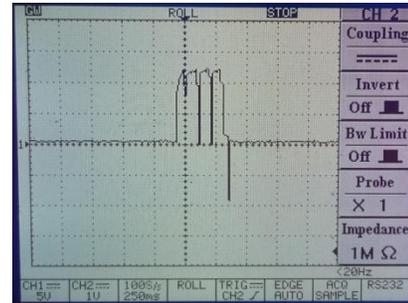
$$D = -7 \times 15 = -105$$

$$\text{PWM Kendali PD} = -35 + (-105) = -140$$

Dari hasil perhitungan didapat nilai *error* bernilai -7. Hasil nilai kendali PWM pada kendali proporsional (P) bernilai -35, dengan nilai konstanta pengali kendali proporsional sebesar 5 ( $K_p = 5$ ). Kalkulasi kendali derivatif memerlukan nilai *rate error*. *Rate error* merupakan selisih *error* aktual terhadap *error* sebelumnya. *Rate error* diperoleh bernilai -7, maka nilai PWM kendali derivatif dapat diperoleh dengan nilai PWM -105. Nilai konstanta pengali dari kendali derivatif bernilai 15 ( $K_d = 15$ ). Nilai PWM dari kendali proporsional dan derivatif (PD) dapat dijumlahkan untuk keperluan keakuratan kendali posisi motor DC. Nilai PWM dari kendali PD didapat bernilai -140.

Karena nilai PWM bernilai negatif maka dalam pemrograman bahasa *basic* dapat digunakan untuk mengendalikan motor ke arah kiri (CCW), dan dengan PWM yang diberikan sebesar 140 dari hasil kendali PD. Berdasarkan hasil kendali PD terhadap PWM dan arah putaran motor ke arah kiri (CCW), maka data posisi motor nada 1' didapat dengan data *present value* ke-2 (PV2) = 401 dan dengan nilai *error* = 1. Nilai PV2 = 401 merupakan bukti keberhasilan bahwa motor DC telah berhasil

memposisikan pada nada 1', hal ini dikarenakan nilai *error* yang memenuhi syarat yaitu Er =  $1 < 3$  dan Er =  $1 > -3$ . Sehingga pemukul gamelan diizinkan untuk memukul bilah nada gamelan pada posisi nada 1'. Bukti adanya membalikkan arah ketika PV  $>$  SP untuk SP nada 1' (nada 1 ke nada 1') dapat diperlihatkan berdasarkan data ukur tegangan output motor DC menggunakan osiloskop.



Gambar 24. Respon tegangan output motor DC berdasarkan kendali posisi motor DC dari nada 1 (nada pertama) ke nada 1' (nada ke-8)

Respon tegangan output motor DC dalam memposisikan pada nada 1 ke nada 1' (nada 8), memperlihatkan tegangan awal +12 V. Tegangan awal +12 V menandakan motor berputar ke arah kanan (CW) dan lama tegangan aktif selama 475 ms. Tegangan aktif 475 ms dengan motor berputar ke arah kanan (CW), sehingga di dapat data rotari PV1 = 407 pulsa dan *error* (Er) bernilai 7. Data rotari PV1 = 407  $>$  SP = 400 dan *error* yang terlalu besar (Er = 7) tidak sesuai dengan syarat toleransi *setpoint* nada yaitu Er  $< 3$  dan Er =  $1 > -3$ , maka dengan kendali PD motor akan di balikkan arah putaran ke arah kiri (CCW) untuk mencapai *setpoint* nada atau mencapai toleransi *error setpoint*. Dalam pengujian nya memperlihatkan adanya tegangan -12V dan tegangan aktif 37,5 ms yang berarti motor berputar ke arah kiri (CCW) untuk mencapai *setpoint*. Data rotari *present value* terakhir dari motor DC atau PV2 diperoleh sebesar 401 pulsa dan nilai *error* bernilai 1.

#### B. Pengujian Robot Gamelan Bermain Otomatis

Pengujian robot musik gamelan bermain lagu secara otomatis menggunakan inputan perintah pada tombol ke-16 dari *keypad* matrik 4x4. Tombol ke-16 *keypad* matrik 4x4 merupakan tombol lagu dari robot musik gamelan. Tombol ke-16 *keypad* matrik 4x4 merupakan inputan untuk memanggil data subprogram untaian nada yang telah tersusun untuk menciptakan sebuah lagu. Untaian nada tersebut adalah data-data pulsa sensor *magnetic rotary encoder* yang ingin dituju dan merupakan penanda posisi DC *gear* motor atau penanda posisi kereta pemukul gamelan terhadap posisi bilah nada gamelan.

Lagu yang dimainkan oleh robot musik gamelan akan bersuara dari hasil pukulan bilah nada gamelan oleh pemukul gamelan yang ada pada kereta. Kereta bergerak bergerak berdasarkan data-data pulsa sensor *magnetic rotary encoder* yang telah tersusun sesuai posisi nada dalam membentuk sebuah lagu. Lagu yang akan dimainkan oleh

robot musik gamelan adalah lagu kebangsaan Indonesia, yaitu lagu "Indonesia Raya".

**INDONESIA RAYA**

WR. SUPRATMAN Do = G  
4/4, CON BRAVURA

Gambar 25. Potongan lirik dan not lagu Indonesia Raya pada baris/row pertama.

Tabel 3. Data hasil uji robot gamelan bermain otomatis lagu "Indonesia Raya" pada baris/row 1.

Baris Lirik (Row)	Lirik	Not Nada	Bilah Nada	SP (Pulsa)	PV1 (Pulsa)	PV2 (Pulsa)	Error	PWM DC Gear Motor	Arah Putar DC Gear Motor	PWM Kendali DC Gear Motor	PD DC Gear Motor	Arah Putar DC Gear Motor	Servo (°)
Row 1	In	3	3	140	139	139	1	200	CW	-	-	-	140
Row 1	do	4	4	200	200	200	0	200	CW	-	-	-	140
Row 1	ne	5	5	250	249	249	1	200	CW	-	-	-	140
Row 1	sia	3'	10	500	495	499	5	200	CW	100	CW	-	140
Row 1	ta	3'	10	500	499	499	1	200	-	-	-	-	140
Row 1	nah	2'	9	450	450	450	0	200	CCW	-	-	-	140
Row 1	a	2'	9	450	450	450	0	200	-	-	-	-	140
Row 1	ir	1'	8	400	400	400	0	200	CCW	-	-	-	140
Row 1	ku	5	5	250	249	249	1	200	CCW	-	-	-	140
Row 1	ta	5	5	250	249	249	1	200	-	-	-	-	140
Row 1	nah	5	5	250	249	249	1	200	-	-	-	-	140

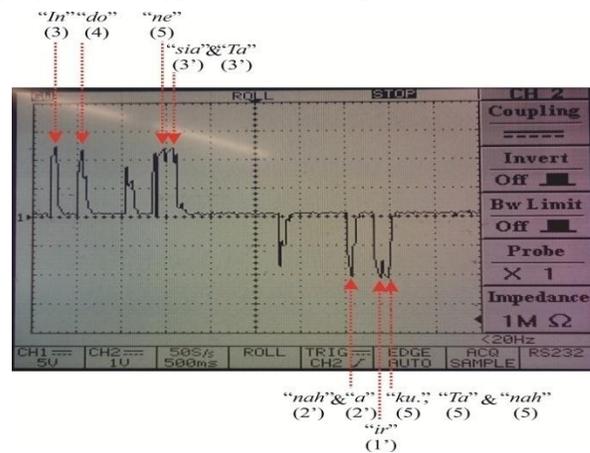
Data hasil pengujian robot gamelan memainkan lagu "Indonesia Raya" pada baris lirik/row ke 1. Baris lirik/row ke 1 dari lagu "Indonesia Raya" adalah berlirik "Indonesia tanah air ku. Ta nah", dengan not nada " 3 = In, 4 = do, 5 = ne, 3' = sia, 3' = ta, 2' = nah, 2' = a, 1' = ir, 5 = ku, 5 = Ta, 5 = nah ". Maka untuk tahapan arah putaran motor DC terhadap lirik pada baris 1 adalah sebagai berikut:

- Not nada 1 ke 3 (lirik "In"), motor putar kanan (CW) dengan PV nada 3 = 139 dan Er = 1 dari SP nada 3 adalah 140, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 3 ke 4 (lirik "In do"), motor putar kanan (CW) dengan PV nada 4 = 200 dan Er = 0 dari SP nada 4 adalah 200, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 4 ke 5 (lirik "do ne"), motor putar kanan (CW) dengan PV nada 5 = 249 dan Er = 1 dari SP nada 5 adalah 250, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 5 ke 3' (lirik "ne sia"), motor putar kanan (CW) dengan PV nada 3' = 495 dan Er = 5 dari SP nada 5 adalah 500, maka pemukul gamelan belum aktif. Pemukul gamelan belum aktif karena error (Er) yang lebih besar dari salah satu syarat toleransi set point (SP) yaitu Er < 3. Nilai error (Er) yang bernilai 5, maka dengan menggunakan rumus perhitungan kendali PD pada PWM didapat PWM bernilai positif sehingga motor akan bergerak ke kanan (CW) lagi. Setelah motor bergerak ke arah kanan maka PV ke-2 dari nada 3' diperoleh sebesar

499 dan Er = 1. Dengan Er = 1 maka memenuhi salah satu syarat toleransi set point (SP) yaitu Er = 1 < 3, Sehingga pemukul gamelan aktif.

- Not nada 3' ke 3' (lirik "sia.Ta"), motor diam karena masih menggunakan nada 3'. PV nada 3' = 499 dan Er = 1 dari SP nada 3' adalah 500, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 3' ke 2' (lirik "Ta nah"), motor putar kiri (CCW) dengan PV nada 2' = 450 dan Er = 0 dari SP nada 2' adalah 450, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 2' ke 2' (lirik "nah a"), motor diam karena masih menggunakan nada 2'. PV nada 2' = 450 dan Er = 0 dari SP nada 2' adalah 450, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 2' ke 1' (lirik "a ir"), motor putar kiri (CCW) dengan PV nada 1' = 400 dan Er = 0 dari SP nada 1' adalah 400, maka pemukul gamelan aktif.
- Not nada 1' ke 5 (lirik "ir ku"), motor putar kiri (CCW) dengan PV nada 5 = 249 dan Er = 1 dari SP nada 5 adalah 250, maka pemukul gamelan aktif.

Lirik lagu pada potongan lirik "Ta nah" merupakan sambungan setelah lirik "ir ku" dan lirik akhir sebelum lirik "Ta nah" adalah lirik "ku". Lirik "ku" adalah menggunakan not nada 5, sedangkan lirik "Ta" dan "nah" menggunakan not nada yang sama yaitu not nada 5. Sehingga untuk lirik "Ta nah" motor tidak bergerak, tetapi pemukul gamelan aktif dan memukul not nada 5 sebanyak 2 kali. Tahapan hasil arah putaran motor DC terhadap lirik nada-nada dari lagu "Indonesia Raya" pada baris/row 1 dapat ditampilkan respon tegangannya menggunakan osiloskop.



Gambar 26. Data ukur respon tegangan pada kendali posisi motor DC terhadap posisi nada-nada dari lirik lagu "Indonesia Raya" pada baris/row 1

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Dari hasil suatu perancangan, pengujian dan analisa dari robot musik gamelan, maka ada beberapa hal yang dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Tombol *keypad* matrik 4x4 digunakan tombol nada manual dari 15 nada dan tombol ke-16 digunakan sebagai tombol demo lagu.
2. Sensor *limit switch* berfungsi sebagai penanda posisi *home base*, dan sebagai pembatas jalur kereta pemukul gamelan.
3. Data posisi putaran sensor *magnetic rotary encoder* digunakan sebagai register *set point* posisi nada.
4. Data pulsa sensor *magnetic rotary encoder* dari hasil putaran motor DC digunakan sebagai data umpan balik/pembanding terhadap data *set point* ketika motor DC ingin mencapai data *set point*.
5. Posisi lengan motor servo dalam memukul bilah nada gamelan adalah dengan posisi  $+140^{\circ}$ , sedangkan posisi dalam keadaan normal atau tidak memukul adalah dengan posisi  $+0^{\circ}$ .
6. Robot menggunakan sitem kendali umpan balik PD untuk mengatasi *error* posisi motor DC.
7. Robot musik gamelan hanya bisa memainkan lagu beritme pelan.
8. Nada lagu yang dapat dimainkan robot hanya dapat memainkan lagu beroktaf rendah dan sedang.
9. Respon dari jeda gerakkan motor DC lebih lama, yang mengakibatkan robot tidak bisa memainkan lagu dengan cepat.

### B. Saran

Saran-saran untuk pengembangan kedepan nya dari robot musik gamelan sebagai berikut :

1. Pembuat mekanik sebaiknya menggunakan *linear rail* sehingga dalam memposisikan nada lebih akurat.
2. Sensor posisi bisa diinovasikan menggunakan sensor jarak ultrasonik.
3. Perintah tombol nada manual bisa dikembangkan menggunakan antar muka aplikasi android menggunakan sistem *bluetooth*.
4. Pembuatan lagu bisa dikembangkan melalui aplikasi komposer menggunakan android.
5. Robot musik gamelan dapat dikendalikan langsung melalui komputer menggunakan aplikasi komposer khusus robot gamelan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rezeki, K. 2006. Robot Pemukul Versi 2 (*Software*). Tesis: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Anton Wahyu Prihandono. 2007. Robot Musisi Dengan Aktivasi Pembacaan Not Angka. Tesis: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] Andi Kurnia. 2011. Penala Nada Alat Musik Menggunakan Alih Ragam Fourier. Tesis: Universitas Diponegoro.
- [4] Patrick Hood, James F.K. 2009. *Build Your Own CNC Machine*. New York: TIA.
- [5] Ananda. SA. ; Sentosa. J. dan Agusta. D. 2002. Studi Penggunaan Permanen Magnet Servo Motor Tegangan 460 V DC, 1850 Rpm Pada Mesin Potong Karton. *Jurnal Teknik Elektro*. 2 (2) : 98-104.
- [6] Muhammad Zamroni. 2013. Kendali Motor DC sebagai penggerak mekanik pada bracket LCD Proyektor dan Layar Dinding Berbasis Mikrokontroler AT89S51. Tesis: Universitas Diponegoro.
- [7] PENS ITS. 2007, Desember 12. *Workshop KRI-KRCI 2007. Workshop Book* : PENS ITS.
- [8] Eka Maulana. 2012. Pengaturan PWM (*Pulse Width Modulation*) dengan PLC. Tesis: UNIBRAW.
- [9] Atmel. 2010. *ATmega 16 and ATmega 16L 8-Bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash*. USA, San Jose: *Data Sheet ATmega 16 and ATmega 16L*.
- [10] Anaheim Automation. 2015. *Magnetic Encoder Guide*. <http://www.anaheimautomation.com/>. Akses 17 November 2015.
- [11] Chris Woodford. 2015. Hall Effect Sensors. <http://www.explainthatstuff.com/>. Akses 19 Desember 2015.
- [12] Ervin Saeful Anwar. 2011. Perancangan Prototipe Pengendali Pintu Gerbang Dan Garasi Menggunakan Modulasi FSK (*Frequency Shift Keying*). Tesis: UNIKOM.
- [13] Nasih. MU. 2013. Prototipe Alat Pengaman Kendaraan Bermotor Menggunakan Password Dan Sms Berbasis Mikrokontroler AT89S52. Yogyakarta: STMIK EL RAHMA.
- [14] Ariel Yagusandri. 2011. Rancang Bangun Prototipe Sistem Akuator Sirip Roket Menggunakan Motor Servo. Depok: Universitas Indonesia.
- [15] I Putu. MP. ; I Nengah. S dan I.B. Alit. S. 2013. Sistem Kontrol Pergerakkan Pada Robot Line Follower Berbasis Hybrid PID-Fuzzy Logic. November, 14-15 *Posiding Conference on Smart Green Technology*. UNUD.
- [16] Katsuhiko Ogata. 1990. *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall International Edition.