

RANCANG BANGUN SISTEM ELEKTRO-MEKANIK SEBAGAI ALAT TERAPI PENDERITA GANGGUAN OTOT KAKI

Irawan Pandu Buditomo¹, Welina Ratnayanti Kawitana², Tri Anggono Prijo³.
^{1,2,3} Program Studi Teknobiomedik, Departemen Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas
Airlangga

Email : aksoro_jowo@yahoo.co.id

ABSTRACT

This research was done to make a frequency controlling system of motor rotation which is being used for foot muscle disruption sufferer physiotherapy. The controlling system which is made, expectally could keep the frequency stability of motor rotation. The used method to keep the setting frequency stability of rotation was by set the motor PWM. This PWM setting process was done by using PID control which data is got from the rotation sensor used for feedback. The used rotation frequency sensor was consist of opto-coupler and rotary encoder. Based on data and analysis that have been done, conclude that optimal PID constants for this design are $K_p=0,043$, $K_i=1,200$ and $K_d=0,005$. The used system had error percentage is less than 7,5%. In this research, increasing the weight mass caused increasing the PWM average percentage and error average value of rotation frequency. As well as increasing response time towards the increasing weight mass for each setting frequency.

Keyword: Physiotherapy, Foot Muscle, Rotation Frequency, PID, PWM.

PENDAHULUAN

Pasien yang mengalami gangguan organ gerak pada otot kaki biasanya diakibatkan karena pola hidup yang kurang sehat, pasien pasca stroke dan cedera otot yang dialami karena salah melakukan gerakan. Pada pasien yang mengalami gangguan organ gerak membutuhkan pola latihan untuk memulihkan kondisi organ tersebut. Latihan gerak untuk memulihkan fungsi organ gerak pada umumnya dilakukan di bagian rehabilitasi medis, metode latihan yang diberikan bergantung dari organ mana yang mengalami gangguan. Untuk gangguan pada organ gerak kaki biasanya berupa latihan dengan menggerakkan organ gerak kaki menyerupai mengayuh sepeda dipandu oleh para perawat. Meningkatnya jumlah pasien yang mengalami gangguan pada otot kaki harus ditangani, mengakibatkan beban lebih bagi para perawat, hal ini disebabkan metode latihan yang diberikan masih dilakukan secara manual. Selain itu, dengan beban kerja perawat yang berlebih ini dikhawatirkan dapat menurunkan efektifitas terapi pada pasien.

Untuk mengatasi masalah tersebut maka dalam penelitian ini akan diwujudkan suatu sistem elektro-mekanik rehabilitasi medis orang yang mengalami gangguan pada otot kaki. Sistem ini diharapkan dapat memandu pasien dalam melakukan latihan gerak sesuai dengan pola latihan yang dibutuhkan. Sistem yang akan diwujudkan berbasis mikrokontroler yang akan mengendalikan motor yang akan diatur variasi waktu dan frekuensi putarnya. Pengaturan waktu dan frekuensi putaran dapat diatur sesuai dengan kondisi pasien dan target hasil latihan yang diharapkan. Rancang bangun sistem ini diharapkan dapat meningkatkan ketepatan latihan gerak dan waktu latihan. Ketepatan latihan gerak ini meliputi ketepatan pola latihan dan ketepatan frekuensi latihan. Sehingga dengan terciptanya sistem ini diharapkan dapat meningkatkan mutu layanan kesehatan.

Pengaturan waktu dan frekuensi putar diatur dengan menggunakan mikrokontroler. Dengan sistem ini waktu latihan yang diberikan pada pasien dapat diatur oleh perawat sesuai dengan status pasien yang menjalani latihan, sedangkan pengaturan frekuensi putar diatur dengan cara memodulasi lebar pulsa (PWM) yang dibangkitkan oleh mikrokontroler.

Rancang bangun yang akan dibuat menyesuaikan dengan kebutuhan terapi yang akan diterapkan oleh fisioterapis terhadap perancangan sistemnya. Akan dilakukan penelitian dalam menyanggupi kebutuhan fisioterapis dalam ketepatan pengaturan putaran yakni dengan pemberian variasi beban terhadap sistem dan rekondisi sistem tersebut.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah: PCB, timah, kabel, resistor, kapasitor, transistor, optocoupler, motor DC, arduino UNO, konektor 2 dan 3 pin, regulator 7801, jack dan socket RCA, set kotak dan panel, LCD dan transformator.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: Multimeter, osiloskop, frekuensi meter, timbangan digital, solder.

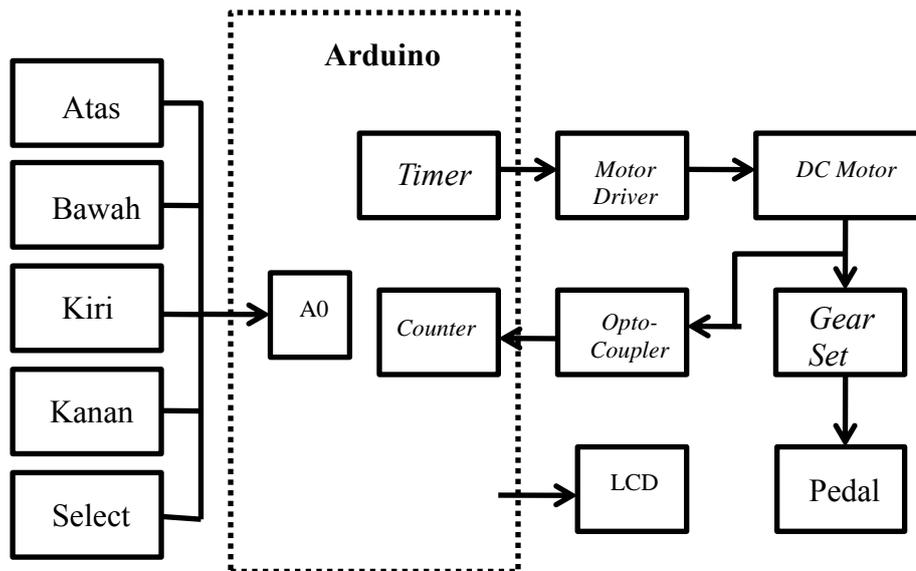
Untuk tahap rancang bangun alat ini, terbagi dalam dua tahap yaitu pembuatan perangkat keras (*hardware*) dan pembuatan perangkat lunak (*software*).

Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Sistem yang akan digunakan untuk mengatur frekuensi putar terdiri atas *gear set*, motor DC dan sistem *opto-coupler*. *Gear set* ini digunakan untuk mengatur torsi motor, sehingga motor tetap dapat mengayunkan lengan pedal meskipun masa pada pedal besar. Untuk mengatur frekuensi putar motor dapat dilakukan dengan mengatur PWM yang dibangkitkan oleh mikrokontroler. PWM yang dibangkitkan dengan mikrokontroler ini bisa dilakukan dengan menggunakan *port timer* yang sudah tersedia pada mikrokontroler. PWM akan aktif apabila tombol *start* ditekan yang berarti motor akan berputar. Sedangkan untuk membaca frekuensi putar motor dilakukan dengan sensor *opto-coupler* yang ditengahnya dipasang *rotary encoder*. *Rotary encoder* ini terpasang pada as motor sehingga putaran motor sama dengan putaran *rotary encoder*. Sehingga frekuensi putar motor dapat diketahui dari jumlah pulsa yang dihasilkan dibagi jumlah celah pada *rotary encoder*.

Data yang diperoleh dari sensor *opto-coupler* dan *rotary encoder* akan dijadikan *feedback* dalam proses kontrol kecepatan putar motor. Apabila frekuensi putar motor lebih kecil dari frekuensi *setting* maka PWM akan meningkat, sedangkan apabila frekuensi putar motor lebih besar dari pada frekuensi *setting* maka PWM akan berkurang. Proses kontrol frekuensi putar motor ini akan dilakukan oleh mikrokontroler.

Proses kontrol waktu pada sistem ini dibangkitkan oleh mikrokontroler. Cara mengatur *timer* pada mikrokontroler dapat dilakukan dengan memakai salah satu *port timer* yang sudah tersedia pada mikrokontroler. Frekuensi *setting*, waktu *setting*, frekuensi putar motor dan massa beban akan ditampilkan pada display LCD. Rancangan perangkat keras sistem kontrol tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.

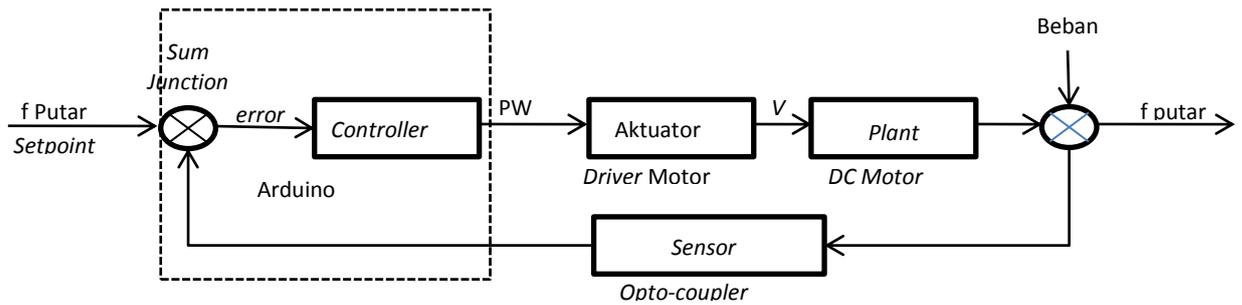


Gambar 1. Diagram Blok Rancangan Hardware

Sistem kontrol frekuensi putar yang telah digunakan dalam penelitian ini, diharapkan dapat menghasilkan *output* berupa frekuensi putar motor yang diinginkan. Frekuensi putar dihasilkan oleh sebuah *plant* atau proses yang dihasilkan oleh motor DC. Sistem kontrol frekuensi putar motor ini membutuhkan sebuah *controller* yang dapat mengatur frekuensi putar pada motor DC. Arduino UNO merupakan sebuah mikrokontroler yang hanya dapat menghasilkan tegangan referensi maksimal sebesar 5 volt dan arus maksimal sebesar 20mA. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah *aktuator* atau sebuah proses yang dapat memanipulasi variabel dari *controller* agar dapat memutar motor. Aktuator tersebut berupa sebuah *driver* motor yang dapat mengolah variabel *output* dari *controller* agar sesuai dengan motor DC. *Driver* motor tersebut bekerja dengan cara menghasilkan tegangan referensi rata-rata hasil dari pengontrolan lebar pulsa (PWM) yang dilakukan oleh *controller*. Kontrol sinyal PWM ini mulai dilakukan ketika sinyal berupa inisialisasi *error* yang didefinisikan sebagai ketidaksesuaian frekuensi putar motor seperti yang diinginkan diterima oleh *controller*. Sinyal tersebut dapat dikenali setelah hasil *output* berupa frekuensi putar dapat terdeteksi oleh sensor. Sensor yang digunakan untuk menghitung frekuensi putar yang dihasilkan oleh motor DC adalah sensor cahaya *opto-coupler*. Pengolahan inisialisasi *error* pada *sum junction* didapatkan dengan membandingkan *output* frekuensi putar dengan *input* berupa frekuensi putar *setting*.

Pada penelitian ini, salah satu penggunaan variabel kontrol yang dapat mempengaruhi sistem adalah penambahan massa beban yang diberikan pada pedal. Gangguan (*disturbance*) tersebut secara tidak langsung mempengaruhi sistem kontrol frekuensi putar. Oleh karena itu, untuk pengolahan pada *sum junction* terhadap inisialisasi *error* yang disampaikan ini sangatlah penting, dimana proses tersebut dinamakan *feed-back control*.

Secara garis besar, diagram blok sistem kontrol frekuensi putar motor dengan rangkaian tertutup pada penelitian ini digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Kontrol Frekuensi Putar Motor DC

Rangkaian *Opto-coupler*

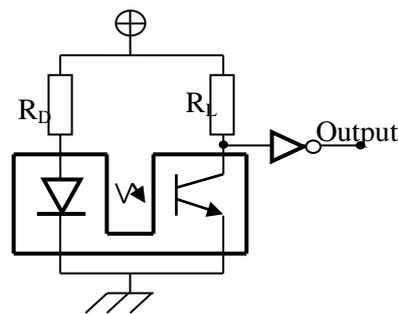
Pembacaan perubahan kecepatan putar motor dilakukan dengan memasang *opto-coupler* dan sebuah roda cacah (*optical rotary encoder*). Sensor cahaya pada *opto-coupler* merupakan sensor foto-transistor dan LED infra merah sebagai sumber cahayanya.

Berikut ini akan dijelaskan prinsip sensor *opto-coupler* dengan meninjau Gambar 3.4.

$$V_{out} = V_{cc} - I_L R_L$$

$$I_L = \beta I_b$$

$R_L = 100K\Omega$, $R_D = 390\Omega$, I_b adalah arus yang mengalir pada basis *foto-transistor*, I_L adalah arus yang mengalir kolektor *foto-transistor*. Pada saat $I_b = 0$ (keadaan gelap), maka $I_L = 0$ sehingga $V_{out} = V_{cc}$ (kondisi *High*). Pada saat $I_b = max$ (keadaan terang), maka $I_L = max$ sehingga $V_{out} = 0$ (kondisi *Low*). Pada *foto-transistor* $I_b \approx$ Intensitas. Sehingga dapat ditulis $I_b = (\text{Intensitas}) \times K$, dengan K adalah konstanta. Sehingga $I_L = \beta \times K \times \text{Intensitas}$. Dengan menggunakan persamaan tersebut maka dapat diketahui hubungan antara intensitas cahaya dan tegangan keluaran. Sehingga untuk meningkatkan sensitifitas sensor dapat dilakukan dengan memperbesar nilai R_L . Dalam penelitian ini agar pulsa yang akan diproses oleh mikrokontroler benar-benar dalam kondisi *high* atau *low*, maka setelah rangkaian sensor diberi gerbang logika NOT. Gerbang logika NOT ini difungsikan sebagai komparator digital, hal ini karena tegangan keluaran dari gerbang logika NOT hanya 0 atau 5 volt. Rangkaian yang digunakan dalam penelitian ini akan ditunjukkan pada gambar 3.

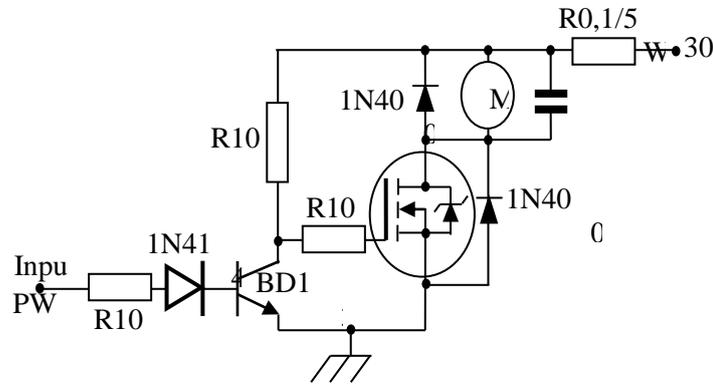


Gambar 3. Rangkaian Sensor *Opto-Coupler*

Rangkaian Driver Motor

Mikrokontroler merupakan perangkat yang bekerja dalam level TTL (*Transistor-Transistor Logic*) yang memiliki *range* tegangan 0 volt hingga 5 volt. *Port I/O* (Input/Output) mikrokontroler hanya memberikan arus sebesar 20 mA sehingga jika ingin menggunakan mikrokontroler untuk mengendalikan perangkat yang membutuhkan arus lebih besar dibutuhkan suatu rangkaian *driver* (Heryanto dan Adi, 2008). Salah satu perangkat yang membutuhkan konsumsi arus besar adalah motor DC. Rangkaian *driver* merupakan suatu rangkaian penguat arus atau penguat tegangan yang terdiri dari transistor.

Dalam rangkaian elektronika, transistor digunakan untuk memperkuat isyarat, artinya isyarat lemah pada masukan diubah menjadi isyarat yang kuat pada keluaran (Sutrisno, 1986). Dalam hal ini isyarat masukan lemah berasal dari mikrokontroler dan isyarat kuat keluaran berasal dari catu daya secara langsung. Rangkaian dasar *driver* motor ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Rangkaian *Driver* Motor

Pada rangkaian driver motor ini, sinyal PWM yang dibangkitkan oleh mikrokontroler dengan tegangan sebesar 5 volt menuju basis transistor BD 139. Kemudian transistor NPN berfungsi sebagai saklar elektronik menerima tegangan *input* pada kolektor bergantung dari arus (I_c) yang masuk. Transistor akan aktif, ketika arus I_c yang mengalir dari basis menuju kolektor, maka tegangan 34 volt mengalir menuju *gate* MOSFET *N-Channel* (V_{gs}) yang kemudian akan memutar motor.

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c \cdot R_c$$

$$V_{ce} = 5 \text{ V}$$

Namun, jika tidak ada arus yang masuk melewati transistor NPN BD 139, maka arus dari masukan 34 volt akan mengalir dari kolektor menuju emitor.

$$V_{ce} = V_{cc} - I_c \cdot R_c$$

$$V_{ce} = 0 \text{ V}$$

Tahap Perwujudan Alat

Perangkat sistem mekanik yang akan digunakan dalam penelitian ini berupa motor DC sebagai sistem putar yang akan menggerakkan pedal yang terhubung pada miniature kaki. Karena pada penelitian ini digunakan gerakan kaki menyerupai gerakan bersepeda, maka agar menyerupai gerakan kaki manusia tersebut, gerakan miniatur kaki tersebut akan dibentuk mirip dengan gerakan orang bersepeda. Agar memiliki massa pada tiap kaki tersebut maka akan diberi variasi massa beban yang sama.

Analisis Data

Konstanta-konstanta dari *Proportional*, *Integral* dan *Derivative* dari hasil pengujian perlu dianalisis untuk menguji apakah konstanta-konstanta tersebut telah mampu membentuk sebuah sistem kontrol yang baik atau tidak. Berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil pengujian variasi massa beban (4 kg, 8 kg, 12 kg dan 16 kg) perlu dilakukan analisis untuk menguji apakah sistem yang dibuat telah dapat mengontrol frekuensi putar sesuai dengan frekuensi putar *setting* (100 RPM, 150 RPM dan 200 RPM). Untuk menguji hal tersebut maka harus dicari frekuensi putar rata-rata, deviasi standart frekuensi putar, *error* pada

stabilitas frekuensi putar rata-rata dan frekuensi putar setting, PWM rata-rata dan deviasi standart PWM.

Berdasarkan data yang telah diperoleh dari pengujian variasi massa beban yakni 4 kg, 8 kg, 12 kg dan 16 kg perlu dilakukan analisis untuk menguji apakah sistem yang dibuat mampu mengendalikan sistem kontrol frekuensi putar setting 100 RPM, 150 RPM dan 200 RPM terhadap perubahan variasi massa beban yang diberikan. Dalam pengujian tersebut maka harus dicari nilai dari *time response* dari masing-masing frekuensi putar terhadap variasi massa yang diberikan. Kemudian hasil nilai *time response* tersebut dibandingkan untuk menentukan hubungan antara *time response* terhadap variasi massa beban.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Konstruksi Mekanik

Konstruksi mekanik yang dibuat dalam penelitian ini terdiri atas motor dengan gir banding, miniature kayu menyerupai kaki serta beban yang digunakan dalam penelitian ini. Motor yang digunakan ialah *Hitachi DC Motor D06D304E*. Motor yang telah dipasang gir banding dengan rasio 4:1 ini dipasangkan pada pedal dengan berat sebesar 1 kg. Kaki penderita gangguan otot kaki pada penelitian ini menggunakan miniature kayu dengan masing-masing bagian kaki memiliki panjang 50 cm dan memiliki berat total 3 kg. Kaki tersebut bergerak menyerupai gerakan kaki manusia ketika bersepeda. Beban dengan massa yang sama diletakan pada pengait besi yang terdapat pada masing-masing kaki bagian atas (paha) dan bagian bawah (betis). Dalam penelitian ini digunakan 12 plat beban yang dipasangkan pada sisi-sisi tengah bagian miniatur kaki kayu. Dimana pada masing-masing bagian kaki kayu tersebut terpasang pengait beban dengan jarak 10 cm terhitung dari tengah kaki kayu. Beban tersebut terbuat dari besi dan masing-masing plat besi memiliki berat 1 kg.

Hasil Rancangan Hardware

Perangkat keras yang dibuat dalam penelitian ini terdiri dari rangkaian sensor cahaya, rangkaian *driver* motor dan rangkaian *interface* LCD.

Sensor cahaya terdiri dari rangkaian sensor dan *opto-coupler* telah mampu membaca frekuensi putaran. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan maka didapatkan hasil pada saat *opto-coupler* terhalang (keadaan gelap) level tegangan yang dihasilkan adalah 5 volt (*high*) dan pada saat tidak terhalang (keadaan terang) level tegangan yang dihasilkan adalah 0 volt (*low*). Akan tetapi setelah rangkaian sensor diberi gerbang logika NOT maka tegangan keluaran nya menjadi kebalikannya.

Driver motor yang dibuat dalam penelitian ini merupakan driver motor yang hanya mampu menggerakkan motor dengan satu arah gerakan saja. Driver motor ini menggunakan transistor NPN BD139 dan MOSFET *n-channel* IRFP460. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan maka dapat diketahui bahwa rangkaian yang telah dibuat dapat berfungsi dengan baik, hal ini ditunjukkan pada *display* LCD yang mampu menampilkan data sesuai yang diinginkan.

Hasil Pengukuran

Setelah melakukan perancangan sistem mekanik dan *hardware* maka langkah selanjutnya adalah melakukan pemrograman yang salah satunya bertujuan untuk membuat sistem kontrol frekuensi putar. Sistem pengaturan frekuensi putar dalam penelitian ini menggunakan sistem kontrol PID. Dalam penelitian ini, langkah yang digunakan untuk

menentukan konstanta-konstanta tersebut adalah dengan menggunakan metode *trial and error*. Nilai konstanta PID yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah konstanta Kp sebesar 0.043, konstanta Ki sebesar 1.200 dan konstanta Kd 0.005. Hasil analisis data berupa nilai rata-rata dan simpangan baku frekuensi terukur pada masing-masing massa beban ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 : Frekuensi Putar Motor Menggunakan Sistem PID.

Massa(Kg)	f setting (RPM)	f rata(RPM)	Δf	Error
0	100	100,46	5,42843	5,403574
	150	151,83	9,64665	6,353586
	200	199,73	9,81607	4,91467
1	100	99,74	7,32832	7,347423
	150	150,53	9,32598	6,195429
	200	199,61	13,8444	6,9357

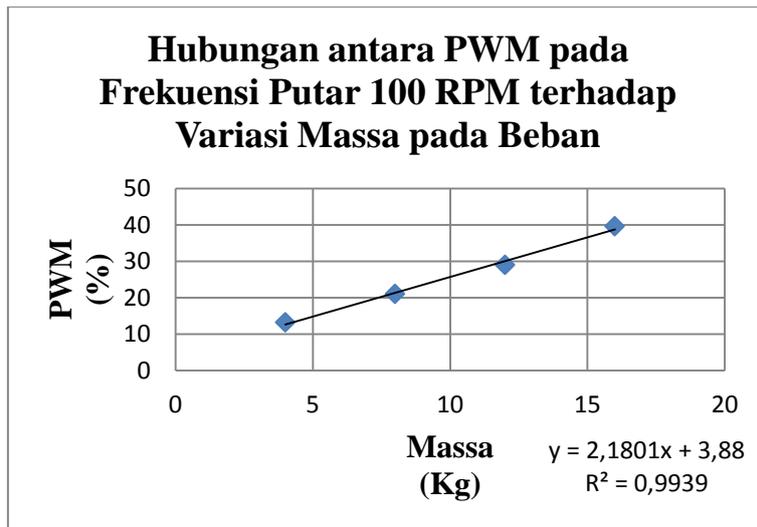
Pemberian variasi massa beban pada pedal saat sistem bekerja mempengaruhi stabilitas masing-masing frekuensi putar rata-rata.

Tabel 2 : Hubungan Frekuensi Putar Rata-Rata terhadap Variasi Massa Beban

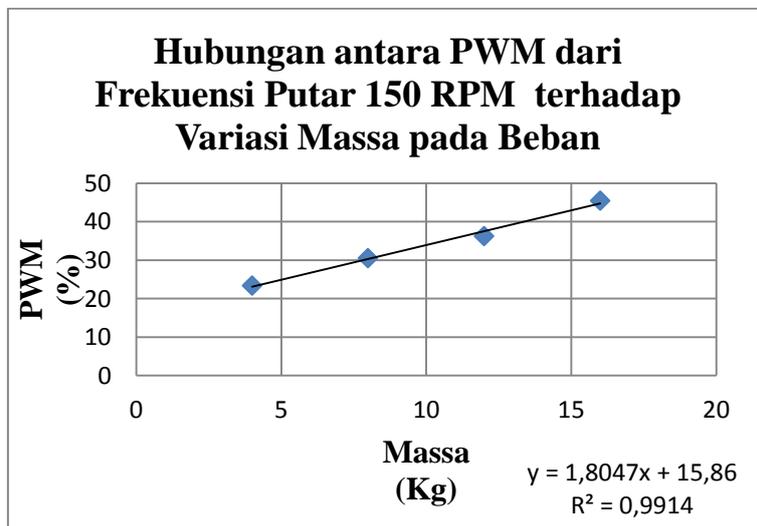
Massa (Kg)	Fsetting (RPM)	f rata2 (RPM)	Δf	Error f rata-rata (%)	Error Setting (%)
4	100	102,43	8,53052	8,328146051	8,53052
	150	150,95	5,81108	3,849672077	3,874053333
	200	201,05	8,93287	4,443108679	4,466435
8	100	101,56	9,09095	8,951309571	9,09095
	150	150,7	6,96873	4,624240212	4,64582
	200	198,51	9,142403	4,605512569	4,5712015
12	100	100,51	9,71865	9,669336384	9,71865
	150	150,05	7,09347	4,727404199	4,72898
	200	196,11	9,40659	4,796588649	4,703295
16	100	100,66	11,1936	11,12020664	11,1936
	150	149,38	7,25862	4,859164547	4,83908
	200	194,35	9,42	4,84692565	4,71

Mengacu dari Tabel 2 yang diperoleh sistem pengatur frekuensi putar lebih mampu mengendalikan stabilitas frekuensi putar terhadap variasi massa beban dibandingkan dengan frekuensi putar yang rendah dibuktikan dengan nilai error frekuensi putar yang berbeda-beda pada penambahan variasi massa beban. Stabilitas sistem pengaturan frekuensi putar ini dipengaruhi oleh besarnya nilai PWM yang diberikan.

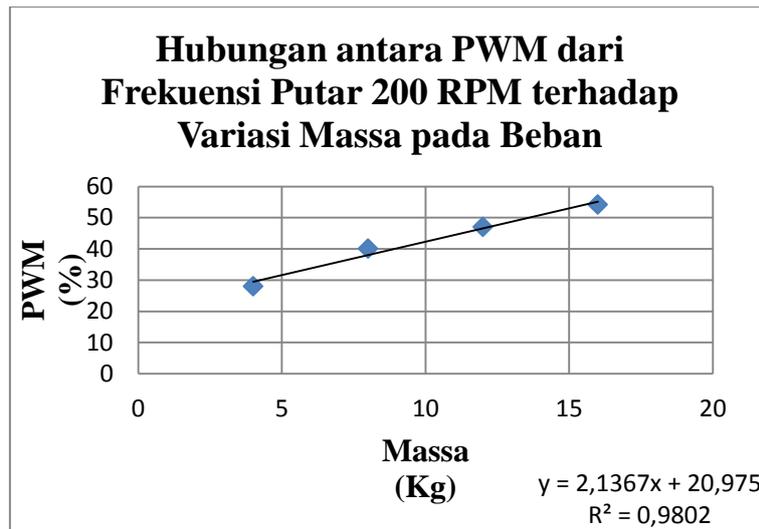
Untuk menghasilkan sistem pengaturan frekuensi putar alat yang terbaik adalah dengan menggunakan linearitas PWM yang terbaik pula. Perubahan nilai PWM yang terjadi untuk setiap penambahan massa beban yang berbeda mengalami kenaikan pada masing-masing frekuensi putar seting. Hal ini terjadi disebabkan untuk menjaga stabilitas frekuensi putar dibutuhkan nilai PWM yang lebih tinggi.



Gambar 5.1. Grafik Hubungan antara PWM pada Frekuensi Putar 100 RPM terhadap Variasi Massa pada Beban



Gambar 5.2. Grafik Hubungan antara PWM pada Frekuensi Putar 150 RPM terhadap Variasi Massa pada Beban

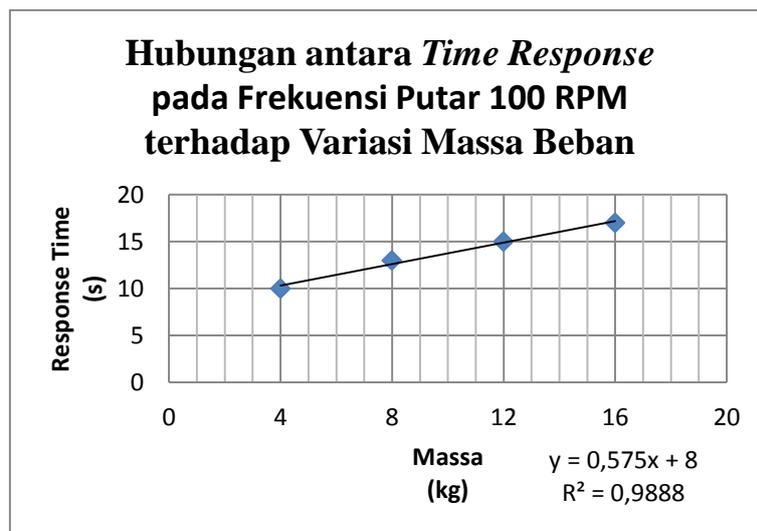


Gambar 5.3: Grafik Hubungan antara PWM pada Frekuensi Putar 200 RPM terhadap Variasi Massa pada Beban

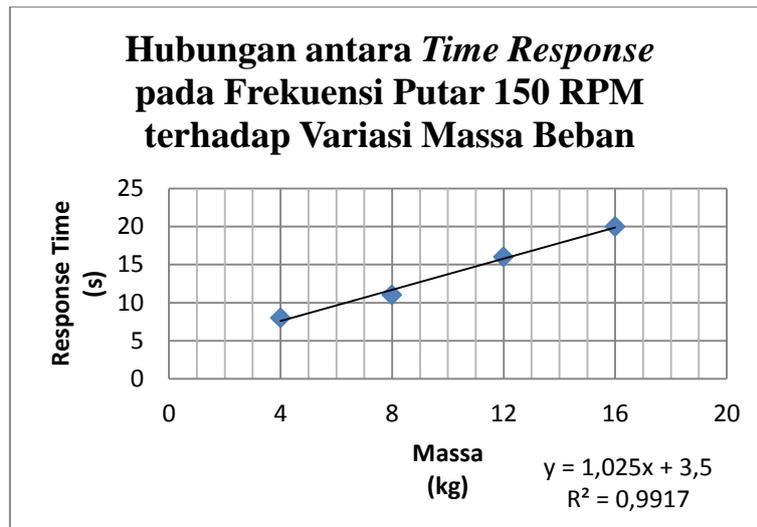
Berdasarkan pada Gambar 5.1, 5.2 dan 5.3, tampak bahwa nilai error terbesar yang didapat adalah pada frekuensi putar setting 100 RPM terhadap variasi massa beban yang dihasilkan. Persentase *error* yang tinggi pada frekuensi seting rata-rata yang didapatkan tersebut, disebabkan karena sistem mengalami kesulitan untuk menjaga stabilitas frekuensi putaran terhadap variasi massa beban yang diberikan. Pada frekuensi putar setting 200 RPM didapatkan nilai error frekuensi putar terhadap frekuensi setting yang cukup besar daripada frekuensi putar lainnya.

Stabilitas sistem pengaturan frekuensi putar ini dipengaruhi oleh besarnya nilai PWM yang diberikan. Hal itu dibuktikan dengan perubahan yang terjadi pada nilai PWM ketika diberikan variasi beban yang berbeda pada masing- masing frekuensi putar seting.

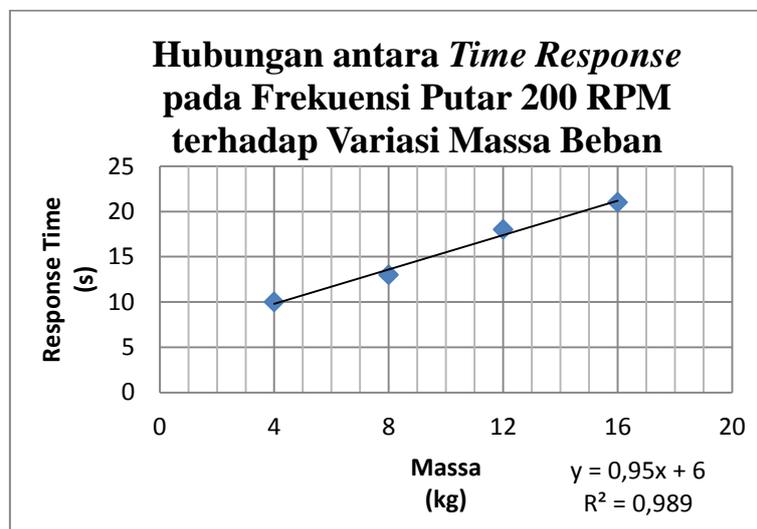
Berdasarkan data yang diperoleh, nilai *time response system* meningkat ketika dilakukan penambahan massa pada beban. *Time response* untuk mencapai frekuensi seting yang terjadi bergantung pada nilai PWM yang dihasilkan. Masing-masing *time response* yang dihasilkan dari frekuensi seting yang berbeda menghasilkan perbedaan pada setiap interval kenaikan *respon time* tersebut.



Gambar 6.1. Grafik Hubungan antara *Time response* pada Frekuensi Putar 100 RPM terhadap Variasi Massa Beban



Gambar 6.2. Grafik Hubungan antara *Time response* pada Frekuensi Putar 150 RPM terhadap Variasi Massa Beban



Gambar 6.3. Grafik Hubungan antara *Time response* pada Frekuensi Putar 200 RPM terhadap Variasi Massa Beban

Berdasarkan data pada Grafik 6.1, 6.2 dan 6.3 terlihat bahwa linearitas dari ketiga grafik adalah baik. Hal ini dibuktikan dari nilai R^2 masing-masing data hampir mendekati 1. Nilai R^2 dari frekuensi putar setting 100 RPM adalah 0,988. Sedangkan pada frekuensi putar setting 150 RPM sebesar 0,991 dan 0,989 pada frekuensi putar setting 200 RPM. Hal ini tersebut dapat diartikan bahwa sistem pengaturan yang dibuat untuk masing-masing frekuensi putar seting untuk mencapai frekuensi putar seting dengan pembebanan yang berbeda-beda memiliki linearitas yang baik pada *time response*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem pengaturan frekuensi putar motor ini menggunakan sistem PID yang memiliki konstanta *proportional*, *integral* dan *derivative* dalam sistem ini adalah 0.043, 1.200, 0.005. Frekuensi putar telah mampu mencapai sistem dan menghasilkan putaran yang stabil dengan prosentase nilai error masing-masing adalah tidak melebihi kisaran 7,5% Nilai error frekuensi putar rata-rata pada masing-masing frekuensi mengalami peningkatan pada penambahan variasi massa beban. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi beban yang diberikan, maka

semakin berat kinerja dari sistem pengaturan frekuensi putar agar tetap stabil. Hal tersebut ditunjukkan dengan peningkatan PWM yang terjadi tiap kenaikan massa beban pada masing-masing frekuensi putar setting. Dalam penelitian ini nilai *response time* yang didapatkan untuk setiap penambahan beban pada masing-masing frekuensi setting bertambah.

Untuk kesempurnaan sistem pengaturan yang telah dibuat dapat dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menampilkan *response time* pada display sehingga dapat diketahui respon waktu alat, melakukan perhitungan momen inersia pada alat simulasi yang digunakan beserta variasi beban yang diberikan, menggunakan gir banding dengan perbandingan yang lebih baik agar menghasilkan torsi lebih besar agar motor dapat berputar konstan ketika berada pada frekuensi putar rendah dan menggunakan motor dengan karakteristik daya motor lebih besar, agar frekuensi putar stabil ketika mencapai frekuensi putar setting tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]Andrianto, Heri. 2008. *Pemrograman Mikrokontroler AVR ATMEGA16 Menggunakan Bahasa C (CodeVision AVR)*. Informatika: Bandung.
- [2]Brogan, W.L., *Modern Control Theory* , Prentice-Hall, Inc., New Yersey, 1985.
- [3]Gunterus, Frans: *Falsafah Dasar: Sistem Pengendalian Proses*, jakarta: PT. Elex Media Komputindo, Jakarta, 1994
- [4]Johnson, Curtis: *Process Control Instrumentation Technology*, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988
- [5]I Nyoman Sutantra, *Milestone kombinasi kontrol engineering dan mechanical engineering dalam mewujudkan global stability vehicle program dan intelligent car*, Proceeding of Conference on Electrical Electronic Communication an Information (CECI) and Seminar an Intelligent Technologyand Its Application (SITIA) 17th Juni 2003.
- [6]Josaphat Pramudijanto, dkk., “Implementasi kontroler PID pada PLC untuk pengaturan kecepatan motor”, Proceeding of Conference on Electrical, Electronic, Communication an Information (CECI) and Seminar an Intelligent Technologyand Its Application (SITIA) 17th Juni 2003].
- [7]Ogata, Katsuhiko, (1997), “*Teknik Kontrol Automatik Jilid I dan II*” Edisi 2, Jakarta, Erlangga
- [8]Rameli, Mochammad, Rusdhianto E., Djoko Susilo: *Sistem Pengaturan Malang*, 1996
- [9]Rusli, Mohammad: 1997, *Sistem Kontrol kedua*, Malang: Teknik Elektro -Universitas Brawijaya
- [10]Stanley M.Shinners, (1998),”*Modern Control System Theory and Design, 2ed*, New York John Wiley & Sons, Inc.
- [11]Sutrisno. 1986. *Elektronika 1 teori dan penerapannya*. Penerbit ITB: Bandung.
- [12]Ziegler, J. G. Dan N.B. Nichols, 1942, *Optimum Setting for Automatic Controllers*, Tans. ASME, vol. 64, pp. 759-768

Disetujui Oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Welina Ratnayanti Kawitana,

NIP. 195006271979012001

Drs. Tri Anggono Prijo

NIP. 196105171990021001

