

## Implementasi Penggerak Elektronika Sederhana Sebagai Upaya Meningkatkan Respon Waktu Motor Listrik DC

Muhammad Afnan Habibi<sup>1</sup>

1. Universitas Negeri Malang, Indonesia | [afnan.habibi.ft@um.ac.id](mailto:afnan.habibi.ft@um.ac.id)

### Abstrak

Motor listrik adalah mesin dinamis yang mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Ketika sebuah motor diberi suplai dengan tegangan konstan, ia berputar pada kecepatan konstan. Beberapa aplikasi atau pekerjaan tertentu memerlukan motor berkecepatan rendah, seperti pengaduk semen, kren, konveyor, dan lain-lain. Di lain pihak, kecepatan tinggi diperlukan pada beberapa peralatan rumah tangga, contohnya adalah kipas angin, penyedot sepeda listrik, mixer, dan sebagainya. Pada penelitian ini, rangkaian elektronika pengubah daya dan sebuah mikrokontroler diterapkan kepada motor listrik DC. Hal ini memungkinkan catu daya memberikan suplai yang fleksibel sehingga motor bekerja menyesuaikan kecepatan stabilnya sesuai dengan harapan pengguna. Lebih dari itu, dengan menggunakan teknik kontrol sederhana, pengguna dapat mengatur respon motor menjadi lebih cepat untuk mencapai kecepatan yang diinginkan tersebut. MOS-FET, baterai, resistor, kapasitor, dioda dan kabel adalah komponen elektronika yang diperlukan sebagai penggerak motor maupun pengukuran kecepatan. Pengaturan motor DC telah dilakukan dengan menerapkan komponen elektronika sederhana dan kontroler PI. Komponen elektronika digunakan sebagai pengatur daya dan pengukuran respon kecepatan motor DC. Dengan menggabungkan sirkuit penggerak motor dan pengukur kecepatan maka didapat rangkaian kombinasi eksperimental. Sementara itu, kontrol PI diterapkan pada kode program yang kompatibel dengan mikrokontroler. Setiap konstanta proporsional  $K_p = 0,5, 0,7, 1,1$  dan  $1,2$  dan juga beberapa nilai konstanta integral  $K_i = 0,4, 0,5,$  dan  $0,6$ , memiliki respon putaran mesin yang bervariasi. Implementasi kontrol PI kepada motor DC mempunyai efek mengatur rotasi dan meningkatkan respon transien motor. Berdasarkan hasil percobaan, untuk membuat kecepatan motor  $r = 200$ , maka diterapkan konstanta  $K_p=1,2$  dan  $K_i=0,5$ . Lebih dari itu, dengan kedua konstanta tersebut, kondisi transien motor meningkat, sehingga motor lebih cepat berakselerasi mulai dari diam menuju putaran yang diinginkan.

### Kata Kunci

Elektronika daya, kontrol PI, mikrokontroler, motor DC, rangkaian penggerak motor, respon waktu transien

## 1. Pendahuluan

Motor listrik adalah mesin dinamis yang mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Ketika sebuah motor diberi suplai dengan tegangan konstan, ia berputar pada kecepatan konstan (Karaisas, Balan and Laslo, 2019). Butuh beberapa saat bagi motor yang bermula dalam keadaan diam hingga mendapatkan kecepatan yang stabil. Kecepatan tersebut dapat berubah sesuai dengan proporsi tegangan masukan kepada motor. Dengan mengatur tegangan suplai yang berkerja, kecepatan putar motor dapat diatur sesuai dengan kebutuhan kerja manusia.

Beberapa aplikasi atau pekerjaan tertentu memerlukan motor berkecepatan rendah, seperti pengaduk semen, kren, konveyor, dan lain-lain (Krishna *et al.*, 2015; Gavrishev, Burmistrov and Tomilina, 2016; Gramblička, Kohár and Stopka, 2017). Di lain pihak, kecepatan tinggi diperlukan pada beberapa peralatan rumah tangga, contohnya adalah kipas angin, sepeda listrik, mixer, dan sebagainya (Wei *et al.*, 2013; Ji *et al.*, 2014; Johnson and Rose, 2015; Mbizvo *et al.*, 2019; McQueen, MacArthur and Cherry, 2020). Berkaitan dengan itu, manusia menuntut agar motor listrik dapat berputar pada kecepatan yang mereka inginkan. Tegangan suplai listrik tidak dapat diatur kecuali sirkuit antara sumber listrik dan motor dimodifikasi (Chanpeng and Hachanont, 2014; Wenning, Kawollek and Kampker, 2020).

Modifikasi rangkaian penggerak motor terus berkembang dalam lima tahun terakhir ini (Gasiyarova *et al.*, 2017; Uriarte *et al.*, 2019; Beller and Yavuz, 2021). Selain mengatur dari kecepatan nominalnya, sebagian pekerja memerlukan motor listrik dengan respon lebih cepat. Akan tetapi, setiap mesin membutuhkan waktu tertentu sehingga dapat berputar secara konstan. Durasi waktu tersebut merupakan kondisi alamiah dari setiap mesin. Dalam beberapa situasi, seperti perlombaan robot atau penyelamatan bencana, durasi waktu yang singkat menjadi perhatian khusus. Motor listrik yang digunakan dalam kondisi ini perlu berputar sesuai dengan keinginan dan dapat berakselerasi lebih cepat. Oleh karena itu, diperlukan sebuah rangkaian khusus yang dapat mengatur respon waktu motor dan juga sebuah kontroler yang melakukan perhitungan serta menggunakannya pada rangkaian tersebut.

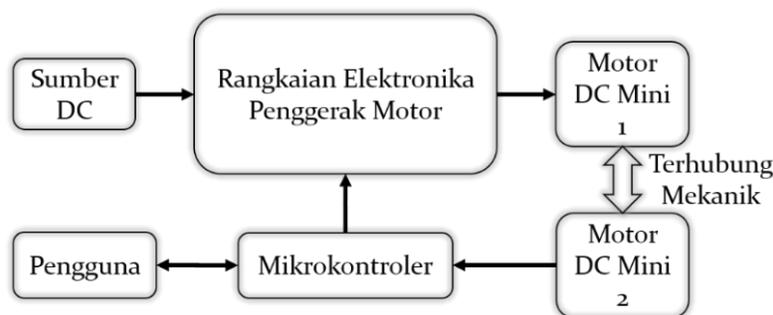
Pada penelitian ini, rangkaian elektronika pengubah daya dan sebuah mikrokontroler diterapkan kepada motor listrik DC. Hal ini memungkinkan catu daya memberikan suplai yang fleksibel sehingga motor bekerja menyesuaikan kecepatan stabilnya sesuai dengan harapan pengguna. Lebih dari itu, dengan menggunakan teknik kontrol sederhana, pengguna dapat mengatur respon motor menjadi lebih cepat untuk mencapai kecepatan yang diinginkan tersebut.

## 2. Metode Kontrol

Kecepatan dan respon mesin dapat dikontrol dengan berbagai cara (Bochkarev, 2015; Petru and Mazen, 2015; Zhou, 2018). Penelitian ini mengusulkan penggunaan sebuah mikrokontroler untuk memonitor dan mengatur baik kecepatan maupun respon mesin. Mikrokontroler yang dieksplorasi dalam penelitian ini yaitu Arduino yang juga memanfaatkan bahasa pemrograman untuk membaca dan menulis perintah dari pengguna. Bahasa pemrograman ini tidak berbeda

jauh dengan C. Dalam perangkat lunak Arduino, program dapat dibangun dan dieksekusi menurut intuisi penulis programnya. Dengan adanya kode program yang berasal dari intuisi tersebut, mikrokontroler melakukan perhitungan tahap demi tahap dan memberikan sinyal tenaga rendah kepada rangkaian penggerak motor.

Gambar 1 menunjukkan hubungan antara manusia, perangkat elektronika, dan motor DC. Manusia sebagai pemberi perintah melalui kode program yang dituliskan kepada mikrokontroler. Pada sisi beban listrik, dua motor DC digabungkan bersama dengan sebuah kopel mekanik. Salah satunya adalah perangkat yang dikendalikan, sementara yang lain digunakan untuk pengukuran kecepatan rotasi tegangan digital. Tegangan digital yang berasal dari motor kedua dapat dibaca oleh mikrokontroler kemudian pengguna dapat menginterpretasi data tersebut.



**Gambar 1.** Alur sistem pengendalian motor DC

MOS-FET, baterai, resistor, kapasitor, dioda dan kabel adalah komponen elektronika yang diperlukan sebagai penggerak motor. Komponen-komponen tersebut terhubung secara detail dalam jenis dan nilainya pada Gambar 2. Jika rangkaian penggerak motor telah terhubung dengan benar, selanjutnya kode program dikembangkan sehingga memungkinkan sumber memberi tegangan yang diinginkan pengguna untuk mengaktifkan mesin. Tegangan ini adalah unit langkah tegangan sebagai sinyal kendali tegangan analog dari sumber DC untuk motor DC 1. Setelah motor DC 1 berputar, motor DC 2 berputar dengan kecepatan yang sama karena terhubung secara mekanik. Kecepatan motor DC 2 direkam untuk setiap nilai waktu digital, dalam bentuk tegangan digital, sebagai respon motor DC 1 berputar dari nol ke kecepatan konstan (Nazih *et al.*, 2020; D'Urso *et al.*, 2021).

Waktu yang dibutuhkan mesin untuk mencapai kecepatan tetap adalah  $T$ . Kecepatan peningkatan respon motor disimbolkan dengan gradien  $K$ . Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan waktu respon putaran mesin  $T$  yang lebih singkat dan gradien  $K$  yang lebih besar. Pengontrol proporsional dan integral (pengontrol PI) diimplementasikan ke dalam mikrokontroler sehingga mendapatkan respon motor yang dikendalikan, motor DC 1, yang lebih baik (Gu *et al.*, 2020). Formulasi PI diberikan dalam Pers. (1) sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{Pers. (1)}$$

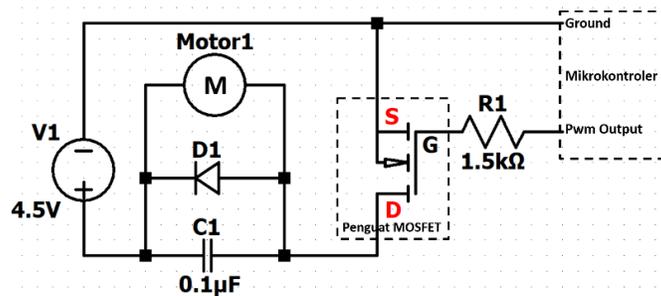
Keterangan:

- $u(t)$  : Tegangan input
- $K_p$  : Konstanta proporsional
- $K_i$  : Konstanta integral
- $e(t)$  : Kesalahan/eror

Istilah proporsional menghasilkan nilai rasio tegangan langkah yang sebanding secara linier terhadap nilai kesalahan saat terkini. Respon tegangan input untuk motor dapat diubah dengan mengalikan kesalahan dengan konstanta  $K_p$  yang disebut konstanta/gain proporsional. Sementara itu, kontribusi dari suku integral tergantung pada tingkat kesalahan dan panjang kesalahan. Integral dalam pengontrol PI adalah total kesalahan langsung dari waktu ke waktu dan memberikan kompensasi kumulatif yang sebelumnya telah diperbaiki. Akumulasi kesalahan kemudian ditambahkan ke output kontrol dengan konstanta penguatan terintegrasi  $K_i$ .

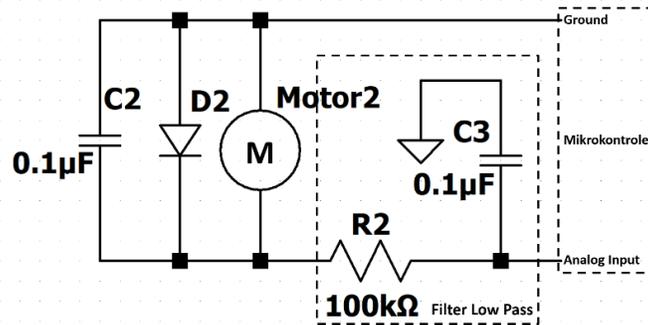
### 3. Rangkaian Penggerak Motor Listrik DC

Sebuah mikrokontroler tidak memiliki daya yang cukup untuk mensuplai mesin secara langsung (Akhil *et al.*, 2020). Padahal, motor 1 yang dikendalikan perlu suplai yang memadai agar berputar sesuai dengan keinginan pengguna. Oleh karena itu, komponen elektronik tertentu perlu ditambahkan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.



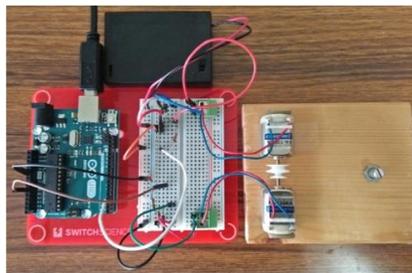
Gambar 2. Rangkaian sederhana penggerak motor DC

Mikrokontroler mendapatkan besar putaran dari motor 1 yang telah dikopel secara mekanik dengan motor 2. Motor 2 berfungsi sebagai tachometer yang mengubah besaran mekanik menjadi tegangan analog. Tegangan tersebut terhubung ke filter low pass sebelum diolah menjadi besaran digital oleh mikrokontroler seperti diagram rangkaian pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian pengukuran rotasi motor DC

Penelitian ini menggunakan mikrokontroler Arduino yang dapat membaca-menulis masukan tegangan berdasarkan kecepatan yang dirasakan oleh motor 2. Dengan menggabungkan sirkuit penggerak motor dan pengukur kecepatan maka didapat rangkaian kombinasi eksperimental yang diilustrasikan pada Gambar 4. Dalam merangkai sirkuit, diperlukan kesabaran dan ketelitian sehingga sirkuit berkerja dengan semestinya.



Gambar 4. Rangkaian gabungan untuk pengaturan respon motor DC

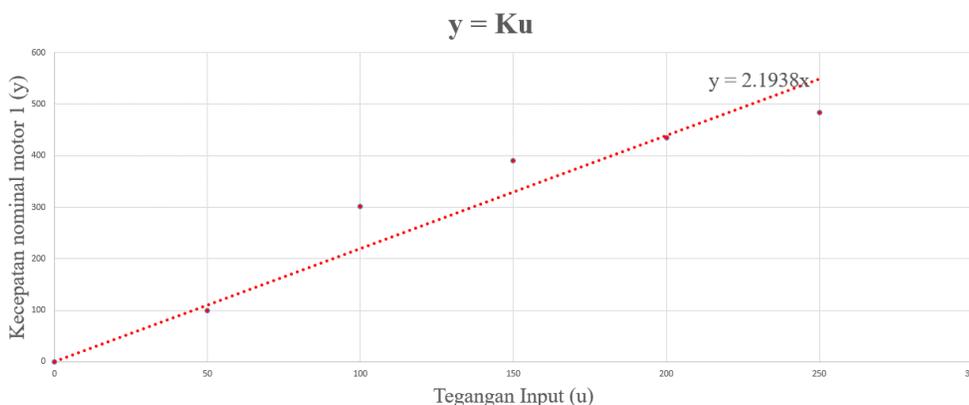
Penulisan program dalam perangkat lunak Arduino diawali setidaknya menggunakan *analogRead* dan *analogWrite* untuk memperoleh data hubungan kecepatan (*y*) dan tegangan input (*u*). Perintah tersebut dapat dituliskan pada Gambar 5, sebagai berikut:

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  pinMode(3,OUTPUT);  
}  
void loop() {  
  int u, y;  
  u=50;  
  analogWrite(3,u);  
  while(1){  
    delay(500);  
    y=analogRead(0);  
    Serial.print(u);  
    Serial.print(",");  
    Serial.println(y);  
  }  
}
```

Gambar 5. Pengaturan jenis dan ukuran huruf dalam dokumen

## 4. Hasil Percobaan dan Diskusi

Tujuan awal dari program yang telah dituliskan sebelumnya adalah mengetahui relasi antara kecepatan  $y$  sebagai fungsi dari tegangan digital yang diberikan oleh Arduino. Setiap tegangan digital itu, yang diberi nilai  $u = 50, 100, 150, 200, 250$  dan seterusnya, mempengaruhi kecepatan putar dari motor 1 (Badihi, Jadidi and Zhang, 2018). Ketika tegangan input meningkat, kecepatan mesin meningkat. Dengan rangkaian pada Gambar 4 kecepatan motor 1 dapat divisualisasikan secara digital berdasarkan data  $y$  pada setiap  $u$ . Maka, Gambar 6 menunjukkan rasio/gradien/kemiringan antara  $y$  dan  $u$  yang dengan regresi linier didapat  $K = 2.194 \approx 2.2$ .



**Gambar 6.** Hubungan linier antara tegangan dan kecepatan motor DC

Selanjutnya, motor 1 diinginkan bekerja dalam kecepatan tertentu sebesar  $r$  yang dinyatakan dalam tegangan digital Arduino. Misalkan, tegangan  $u = (1/K)r$ , maka kecepatan  $y = Ku = K(1/K)r = r$ . Hal tersebut menyiratkan bahwa output sebenarnya dari putaran mesin  $y$  sama dengan putaran motor yang diinginkan. Namun, pada kenyataannya terdapat ketidaksesuaian/selisih antara kedua kecepatan itu. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah umpan balik untuk mengatur kecepatan yang diinginkan (Huba and Vrančić, 2018). Kode program Arduino untuk mengatur putaran mesin menggunakan kontroler PI diberikan dalam Gambar 7, sebagai berikut:

```

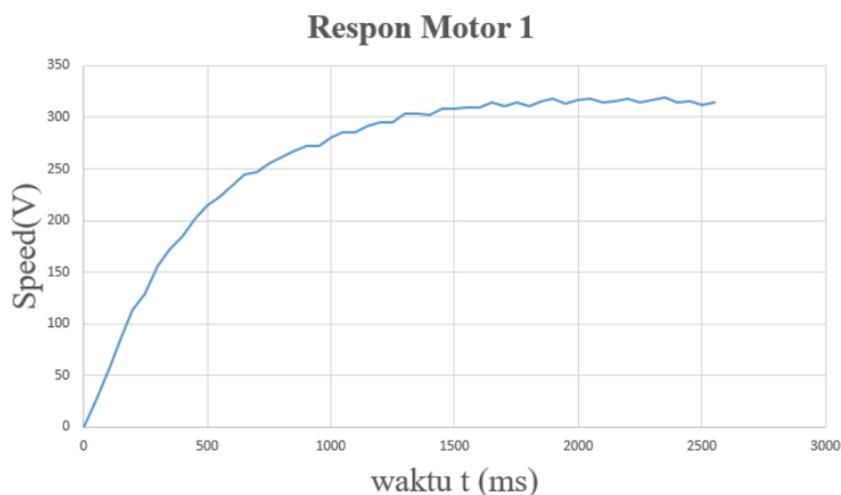
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(3,OUTPUT);
}

void loop() {
  int r,u,y,e,i,u1;
  float K,a,b;
  a=0.0; //Kp
  b=0.0; //Ki

  analogWrite(3,0);
  delay(5000);
  K=2.2;
  r=200;
  u1=int(r/K);
  analogWrite(3,u1);
  for(i=0;i<=100;i++){
    delay(50);
    y=analogRead(0);
    e=r-y;
    u1=u1+int(b*e/K);
    u=a*e+u1;
    analogWrite(3,u);
    Serial.println(y);
  }
  analogWrite(3,0);
  while(1);
}
    
```

**Gambar 7.** Pengaturan jenis dan ukuran huruf dalam dokumen

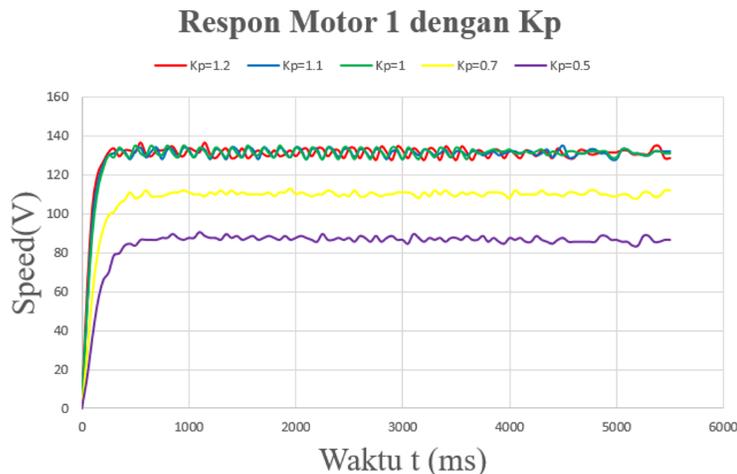
Rangkaian pengukuran dengan menggunakan motor 2 berhasil mendapatkan data kecepatan rotasi motor 1 terhadap fungsi waktu. Kedua parameter terukur secara digital sehingga terbentuk sebuah grafik yang menyatakan kecepatan putar di setiap cuplikan waktu. Dalam Tabel 2, Konstanta  $K_p$  disimbolkan dengan huruf "a", sedangkan konstanta  $K_i$  adalah "b". Konstanta untuk a dan b adalah nol, untuk menunjukkan respon motor tanpa kontrol PI. Reaksi terhadap putaran mesin terlihat pada Gambar 8. Dalam kasus sederhana, motor 1 diinginkan berputar pada kecepatan  $r = 200$ . Sedangkan motor 1 berputar pada  $r \approx 330$  tanpa kontrol. Maka, selanjutnya konstanta a dan b diberikan nilai tertentu sehingga motor 1 bekerja sesuai keinginan pengguna.



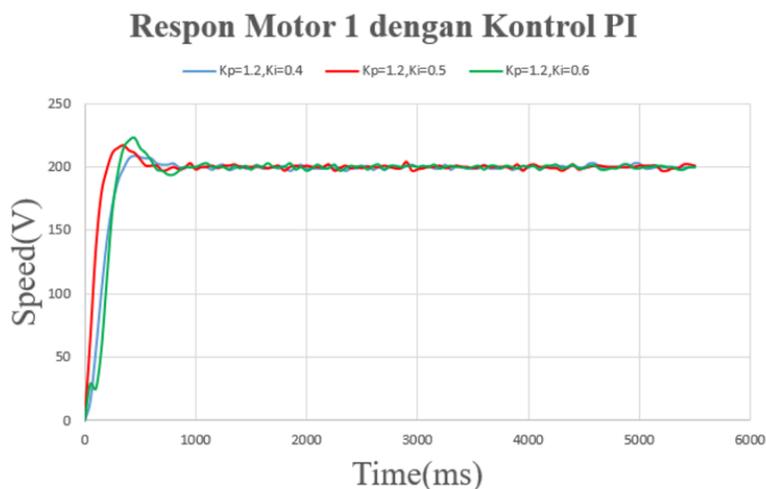
**Gambar 8.** Respon dinamik kecepatan motor DC kondisi normal

Sekarang, konstanta  $K_p$  diubah menjadi beberapa nilai untuk melihat beberapa garis respon dari motor 1. Setiap  $K_p$  memiliki respon putaran mesin yang bervariasi. Dengan menyatakan konstanta  $K_p = 0,5, 0,7, 1,1$  dan  $1,2$ , maka, diperoleh Gambar 9. Garis merah menunjukkan reaksi tercepat,  $K_p 1,2$ . Akan tetapi kecepatan motor dalam konstanta  $K_p$  ini adalah 130, sedangkan rotasi yang diinginkan 200. Konstanta  $K_p$  lainnya sangat jauh dari putaran tersebut. Oleh karena itu, kontrol integral  $K_i$  dapat diberikan dalam uji respon berikutnya.

Kecepatan nyata dari motor 1 tidak setara dengan kecepatan yang pengguna inginkan sehingga terdapat selisih/eror antara keduanya. Kompensasi kesalahan ini ditangani oleh pengontrol integral. Diberikan konstanta  $K_p = 1,2$  dan juga beberapa nilai konstanta  $K_i = 0,4, 0,5$ , dan  $0,6$ . Hasil yang didapat adalah Gambar 10, yang menunjukkan kurva kecepatan motor dengan mengaktifkan kedua konstanta dalam sistem. Dari berbagai respon itu menunjukkan kontrol  $K_i$  mampu mengatur putaran motor 1 pada kecepatan  $r = 200$ . Lebih dari itu, konstanta  $K_i$  dapat meningkatkan respon waktu motor tersebut. Garis merah dengan  $K_p=1,2$  dan  $K_i=0,5$  adalah kontrol yang memiliki transisi waktu tercepat untuk mencapai kecepatan yang diinginkan.



**Gambar 9.** Respon dinamik kecepatan motor DC dengan konstanta proporsional



**Gambar 10.** Respon dinamik kecepatan motor DC dengan konstanta proporsional dan integral

## 5. Kesimpulan

Pengaturan motor DC telah dilakukan dengan menerapkan komponen elektronika sederhana dan kontroler PI. Komponen elektronika digunakan sebagai pengatur daya dan pengukuran respon kecepatan motor DC. Sedangkan kontrol PI diterapkan pada kode program yang kompatibel dengan mikrokontroler. Implementasi kontrol PI kepada motor DC mempunyai efek mengatur rotasi dan meningkatkan respon transien motor. Berdasarkan hasil percobaan, untuk membuat kecepatan motor  $r = 200$ , maka diterapkan konstanta  $K_p=1,2$  dan  $K_i=0,5$ . Lebih dari itu, dengan kedua konstanta tersebut, kondisi transien motor meningkat, sehingga motor lebih cepat berakselerasi mulai dari diam menuju putaran yang diinginkan. Hal yang perlu diperhatikan

selanjutnya adalah menerapkan kontrol diferensial kedalam sistem bersamaan dengan *auto tuning* konstanta PID dalam kondisi dinamis dari putaran motor.

## 6. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik disebabkan karena tidak hanya dukungan finansial dari PNPB Fakultas Teknik tahun 2021 tetapi juga ketersediaan peralatan dan bahan penelitian telah terakomodir oleh segenap pengelola Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang.

## Daftar Rujukan

- Akhil, R. S. et al. (2020) 'Modified flux-weakening control for electric vehicle with PMSM drive', IFAC-PapersOnLine. Elsevier Ltd, 53(1), pp. 325–331. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.06.055.
- Badihi, H., Jadidi, S. and Zhang, Y. (2018) 'Application of Model Reference Adaptive PI Control to FTCC of a Wind Farm', IFAC-PapersOnLine. Elsevier B.V., 51(24), pp. 280–285. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.589.
- Beller, S. and Yavuz, H. (2021) 'Crane automation and mechanical damping methods', Alexandria Engineering Journal. Faculty of Engineering, Alexandria University, 60(3), pp. 3275–3293. doi: 10.1016/j.aej.2021.01.048.
- Bochkarev, I. V. (2015) 'Analysis of a doubly fed induction motor in electric drives of pumping stations', Procedia Engineering. Elsevier B.V., 129, pp. 915–921. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.133.
- Chanpeng, W. and Hachanont, P. (2014) 'Design of efficient in-wheel motor for electric vehicles', Energy Procedia. Elsevier B.V., 56(C), pp. 525–531. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.188.
- D'Urso, D. et al. (2021) 'Dynamic failure rate model of an electric motor comparing the Military Standard and Svenska Kullagerfabriken (SKF) methods', Procedia Computer Science. Elsevier B.V., 180(2019), pp. 456–465. doi: 10.1016/j.procs.2021.01.262.
- Gasiyarova, O. A. et al. (2017) 'Usefulness of Using Elasticity of the Hoisting Tackle in Modeling the Electric Drive of the Main Hoist of the Overhead Casting Crane with Two Driving Motors', Procedia Engineering. Elsevier B.V., 206, pp. 1861–1866. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.726.
- Gavrishev, S. E., Burmistrov, K. V. and Tomilina, N. G. (2016) 'Increasing the work scope of conveyor transport at mining companies', Procedia Engineering. The Author(s), 150, pp. 1317–1321. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.306.
- Gramblička, S., Kohár, R. and Stopka, M. (2017) 'Dynamic Analysis of Mechanical Conveyor Drive System', Procedia Engineering, 192, pp. 259–264. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.045.
- Gu, D. W. et al. (2020) 'Matlab/simulink based modeling and simulation of fuzzy PI control for PMSM', Procedia Computer Science. Elsevier B.V., 166, pp. 195–199. doi: 10.1016/j.procs.2020.02.047.
- Huba, M. and Vrančić, D. (2018) 'Comparing filtered PI, PID and PIDD control for the FOTD plants', IFAC-PapersOnLine, 51(4), pp. 954–959. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.099.
- Ji, S. et al. (2014) 'Electric bike sharing: Simulation of user demand and system availability', Journal of Cleaner Production. Elsevier Ltd, 85, pp. 250–257. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.09.024.

- Johnson, M. and Rose, G. (2015) 'Extending life on the bike: Electric bike use by older Australians', *Journal of Transport and Health*. Elsevier, 2(2), pp. 276–283. doi: 10.1016/j.jth.2015.03.001.
- Karaisas, P., Balan, H. and Laslo, H. D. (2019) 'Vibroacoustic diagnosis technique for electric motors in residential environment', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 157(2018), pp. 1525–1536. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.318.
- Krishna, O. B. et al. (2015) 'Measurement and modeling of job stress of electric overhead traveling crane operators', *Safety and Health at Work*. Elsevier Ltd, 6(4), pp. 279–288. doi: 10.1016/j.shaw.2015.06.005.
- Mbizvo, G. K. et al. (2019) 'ur na I P of', *Epilepsy Research*. Elsevier B.V., p. 106192. doi: 10.1016/j.scs.2021.102841.
- McQueen, M., MacArthur, J. and Cherry, C. (2020) 'The E-Bike Potential: Estimating regional e-bike impacts on greenhouse gas emissions', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Elsevier, 87, p. 102482. doi: 10.1016/j.trd.2020.102482.
- Nazih, Y. et al. (2020) 'Performance evaluation of PI controlled series stacked power delivery architectures for high-efficiency data centers', *Alexandria Engineering Journal*. Faculty of Engineering, Alexandria University, 59(6), pp. 4821–4842. doi: 10.1016/j.aej.2020.08.045.
- Petru, L. and Mazen, G. (2015) 'PWM control of a DC motor used to drive a conveyor belt', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 100(January), pp. 299–304. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.371.
- Uriarte, C. et al. (2019) 'Control strategies for small-scaled conveyor modules enabling highly flexible material flow systems', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 79, pp. 433–438. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.117.
- Wei, L. et al. (2013) 'Comparison Study on Travel Characteristics between Two Kinds of Electric Bike', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Elsevier B.V., 96(Cictp), pp. 1603–1610. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.182.
- Wenning, M., Kawollek, S. and Kampker, A. (2020) 'Self-driving chassis for low-invest and highly flexible electric vehicle assembly', *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V., 43, pp. 576–582. doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.157.
- Zhou, J. (2018) 'Adaptive PI Control of Bottom Hole Pressure during Oil Well Drilling', *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier B.V., 51(4), pp. 166–171. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.060.