

Aplikasi Internal Loop Berbasis Disturbance Observer pada Sistem Kontrol PI dalam Pengaturan Kecepatan Motor Universal Satu Fasa

Oleh:

I Gede Nurhayata

Jurusan Teknik Elektronika Undiksha

Abstrak

Pengaturan kecepatan motor universal berbasis sistem kontrol PI memberikan respon lambat dalam mengatasi perubahan kecepatan akibat pembebanan, karena penerapan satu loop umpan balik eksternal berbasis sinyal error. Penelitian ini bertujuan mengurangi pengaruh gangguan terhadap sinyal error sehingga dapat mempercepat aksi sistem kontrol PI. Hal ini dilakukan dengan menambahkan loop umpan balik internal berbasis disturbance observer. Penelitian ini diawali dengan mendesain sistem plant, menentukan persamaan model matematis sebagai dasar perancangan sistem kontrol loop internal berbasis disturbance observer. Hasil pengujian diperoleh respon pengaturan kecepatan motor universal yang lebih cepat sehingga dapat meningkatkan kestabilan kecepatan motor universal.

Kata kunci : motor universal, disturbance observer, kecepatan, plant

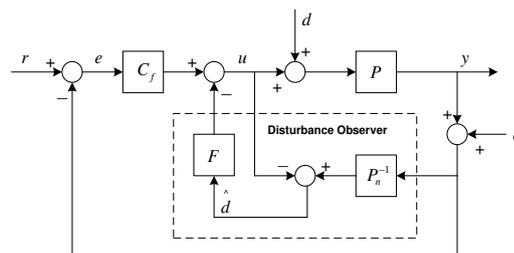
1. PENDAHULUAN

Motor universal memiliki suatu kelemahan terutama pada karakteristik kecepatannya yang merosot dengan cepat akibat pembebanan. Hal ini mengakibatkan kestabilan kecepatan motor universal tidak dapat dipertahankan[1]. Oleh karena itu perlu diterapkan suatu sistem kontrol yang tepat pada motor universal [2]. Dalam penelitian ini pengontrolan kecepatan motor universal menerapkan sistem kontrol dengan satu loop umpan balik secara eksternal berbasis kontrol PI. Sistem kontrol ini sudah cukup memadai untuk mengatur kecepatan motor universal. Namun terdapat suatu kelemahan pada kontrol ini yakni pengaruh pembebanan belum bisa direspon dengan cepat, sehingga kecepatan motor universal masih kurang stabil. Hal ini disebabkan karena sistem kontrol PI hanya menerapkan satu loop umpan balik eksternal yang berbasis pada sinyal kesalahan, *error*.

Perubahan kecepatan akibat pengaruh pembebanan pada motor universal sesungguhnya dianggap sebagai suatu gangguan secara eksternal. Gangguan eksternal ini secara langsung mempengaruhi sinyal kesalahan menjadi semakin besar dan aksi sistem kontrol PI menjadi lebih berat dan lamban. Oleh karena itu guna mengurangi pengaruh gangguan eksternal terhadap sinyal kesalahan perlu ditambahkan satu loop umpan balik internal yang bertugas mengestimasi dan mengeliminasi gangguan eksternal tersebut dengan menerapkan sistem kontrol berbasis *disturbance observer* [3] [4]. Pada penelitian ini, merancang, mengamati dan mengevaluasi kerja dari sistem kontrol loop umpan balik internal berbasis disturbance observer guna mengurangi pengaruh gangguan eksternal terhadap sinyal kesalahan sehingga mempercepat kerja sistem kontrol PI dalam mengatasi perubahan kecepatan akibat pembebanan.

2.1. DESKRIPSI SISTEM

Adapun penerapan sistem kontrol kecepatan motor universal dengan dua loop umpan balik yakni loop eksternal dengan sistem kontrol PI dan loop internal dengan sistem kontrol disturbance observer seperti diperlihatkan pada Gambar 1 di bawah ini.



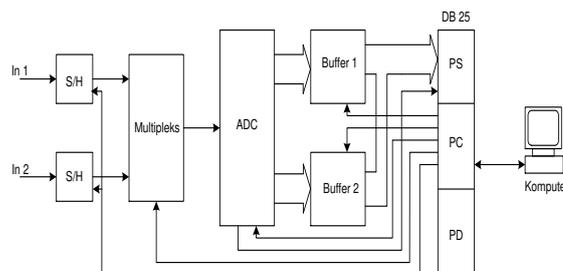
Gambar 1. Sistem Kontrol Berbasis Disturbance Observer

Sebuah plant P berupa penggerak, motor universal dan sensor kecepatan. Bila gangguan eksternal, d diberikan pada poros motor sebagai efek pembebanan maka kecepatan motor akan menurun. Kontroler, C_f pada loop eksternal berbasis kontrol PI, akan bekerja mengatur kecepatan motor universal berdasarkan sinyal error, e , selisih antara kecepatan acuan/referensi, r dengan kecepatan sebenarnya, y . Pengaturan kecepatan yang diperoleh masih kurang cepat karena hanya berdasarkan respon sinyal error. Untuk membantu mempercepat aksi kerja dari kontroler C_f ini maka diperlukan kompensator berbasis *disturbance observer* seperti terlihat pada kotak dengan garis putus-putus. Kompensator ini bertugas mengestimasi besarnya gangguan. Estimasi yang diperoleh digunakan untuk membantu mengurangi pengaruh gangguan terhadap sinyal error pada kontroler C_f sehingga diperoleh aksi kontroler yang lebih cepat.

2.2. PEMODELAN PLANT

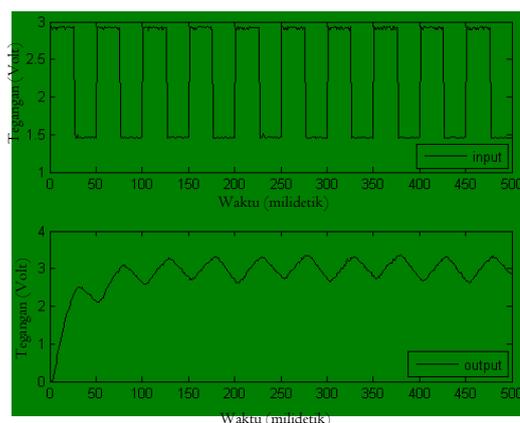
Dalam penelitian ini, motor universal dianggap sebagai suatu sistem tidak linier sehingga sulit untuk menentukan persamaan model matematikanya. Permasalahan ini dipecahkan dengan menggunakan suatu pendekatan model matematika berbasis identifikasi data pengukuran respon input-output dari motor universal.

Pengukuran respon input-output motor universal menggunakan perangkat keras berupa ADC dua masukan yang terhubung dengan komputer untuk penyimpanan dan pemrosesan datanya. Periode sampling yang digunakan sebesar 50 milidetik. Adapun diagram blok perangkat keras dalam proses pengukuran respon input-output plant motor universal diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Pengukuran Data Input-Output Plant.

Pada gambar 3 memperlihatkan hasil pengukuran respon antara tegangan input yang diberikan pada driver motor universal dengan tegangan keluaran dari sensor kecepatan. Tampak bahwa kecepatan motor universal kurang stabil terhadap perubahan yang cepat dari tegangan inputnya.

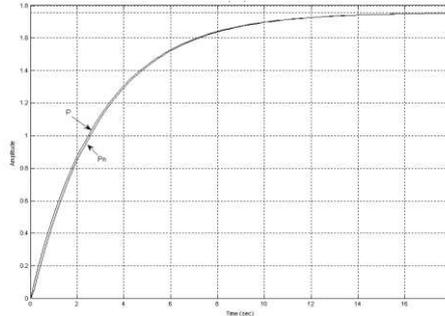


Gambar 3. Data Hasil Pengukuran dengan ADC

Selanjutnya data input output plant diproses untuk menentukan persamaan model matematis plant. Proses estimasinya menggunakan metode *Recursive Least Square Estimator* yang dikerjakan dengan menggunakan bantuan program Matlab [5]. Dari estimasi tersebut diperoleh persamaan model matematis plant dalam bentuk fungsi Laplace sebagai berikut :

$$Pn(s) = \frac{s + 16.63}{s^2 + 28.26 s + 9.498} \quad (1)$$

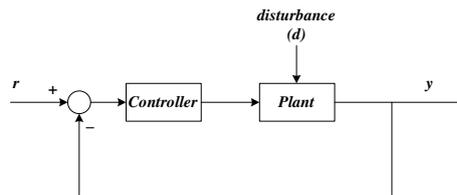
Berdasarkan model plant ini kemudian dilakukan uji step respon yang hasilnya seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Tampak pada gambar tersebut, kecepatan motor universal melampaui nilai masukannya. Hal ini disebabkan adanya efek momen roda gila pada rotor.



Gambar 4. Step Respon Plant

2.3. PERANCANGAN SISTEM KONTROL LOOP EKSTERNAL

Adapun diagram blok sistem kontrol dengan satu loop tertutup berbasis kontrol PI diperlihatkan pada Gambar 5 [6].



Gambar 5. Sistem Kontrol dengan Satu Loop Tertutup.

Pada gambar tersebut keluaran sistem kontrol satu loop tertutup dapat dinyatakan dengan persamaan fungsi Laplace sebagai berikut :

$$y(s) = \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} r(s) \quad (2)$$

Apabila kontrolnya $C(s)$ berupa kontrol PID maka fungsi alihnya dapat dinyatakan dengan persamaan fungsi Laplace sebagai berikut :

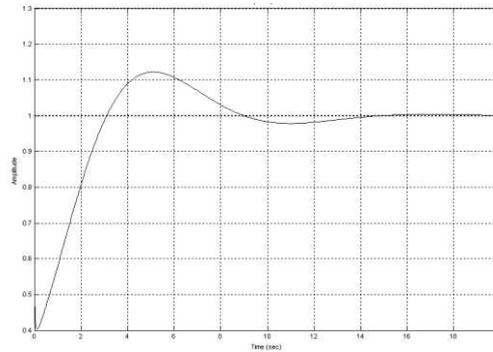
$$C(s) = \frac{Kd s^2 + Kp s + Ki}{s} \quad (3)$$

dimana koefisien Kd , Ki , dan Kp berurut-turut menyatakan konstanta *derivative*, *proportional* dan *integral* yang nilai awalnya ditentukan sama dengan satu sehingga diperoleh persamaan keluaran sistem, $y(s)$ terhadap masukan, $r(s)$ sebagai berikut:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{0.5s^3 + 8.815 s^2 + 8.815 s + 8.315}{s^3 + 22.94 s^2 + 13.55 s + 8.315} \quad (4)$$

Persamaan (4) dievaluasi lagi dengan melihat step respon seperti pada Gambar 6. Pada gambar tersebut terlihat bahwa aksi kontroler yang cukup cepat dikembangkan oleh aksi derivative, Kd . Aksi ini secara riil tidak dapat dilakukan oleh motor universal, karena bobot awal rotor yang berat tidak

dapat dianjak dengan cepat untuk mengikuti aksi derivative. Sedangkan aksi integral K_i dan aksi proporsionalnya K_p dapat diikuti oleh motor universal.

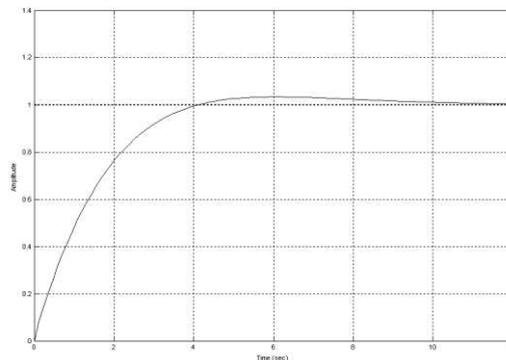


Gambar 6. Step Respon Loop Tertutup Berbasis Kontrol PID.

Sehingga dalam kontrol loop terluar ini kontrol derivativenya dieleminasi sehingga diperoleh sistem kontrol berbasis PI yang lebih realitis.

Selanjutnya nilai keofisien integral dan proporsionalnya ditentukan secara eksperimen berdasarkan kondisi step respon yang ingin dicapai sesuai dengan kriteria perancangan yakni memiliki overshoot kurang dari 5% dan rise time kurang dari 3 detik. Dengan kriteria perancangan tersebut diperoleh nilai $K_p=1$ dan $K_i=0,5$ sehingga persamaan kontrolernya dalam bentuk Laplace sebagai berikut :

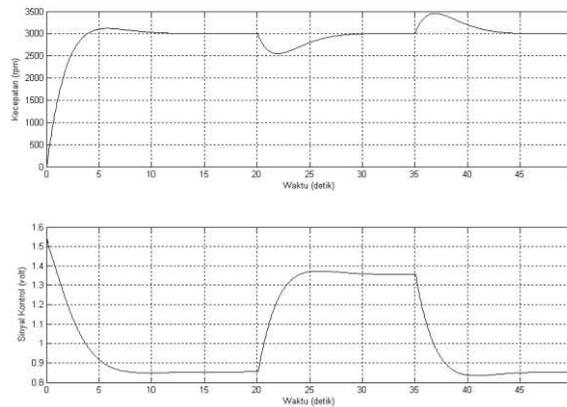
$$C(s) = \frac{s + 0,5}{s} \quad (5)$$



Gambar 7. Step Respon Loop Tertutup Berbasis Kontroler PI

Adapun step responnya dari sistem kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 7. Tampak bahwa respon kecepatan motor universal sudah mampu mencapai nilai kecepatan referensi yang diinginkan dengan overshoot 3,35% dan rise time 2,69 detik sehingga kriteria perancangan telah terpenuhi.

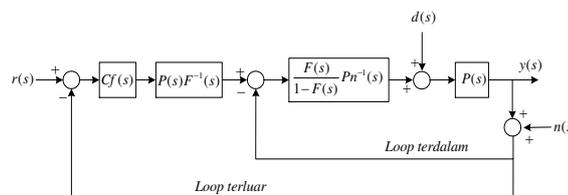
Pada Gambar 8 memperlihatkan pengujian kontrol PI untuk mengetahui efek pembebanan dan aksi terhadap sinyal kontrolnya. Tampak bahwa kecepatan motor menurun cukup besar 500 rpm dan mengembangkan waktu pulih cukup lama 10 detik untuk kembali pada kecepatan mantapnya. Aksi sinyal kontrol yang cukup besar menunjukkan bahwa kerja dari kontrol PI ini masih cukup berat untuk memberikan kestabilan kecepatan.



Gambar 8. Respon Kecepatan Motor Universal dan aksi sinyal kontrol PI terhadap Pembebanan

2.4. PERANCANGAN SISTEM KONTROL LOOP INTERNAL

Ekivalen sistem kontrol loop internal berbasis disturbance observer diperlihatkan dengan diagram blok seperti pada Gambar 9 [3].



Gambar 9. Ekivalen Sistem Kontrol Berbasis Disturbance Observer.

Pada gambar 9, memperlihatkan sebuah sistem yang memiliki tiga masukan yakni referensi, $r(s)$, disturbance, $d(s)$, dan noise, $n(s)$ dan memiliki satu keluaran yakni $y(s)$. Pengaruh setiap masukan sistem terhadap keluaran dapat ditentukan dengan menggunakan metode superposisi sehingga diperoleh persamaan di bawah ini [4]:

$$G_r(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{P(s)Pn^{-1}(s)}{Pn^{-1}(s) + F(s)(P(s) - Pn^{-1}(s))} \quad (6)$$

$$G_d(s) = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{P(s)Pn^{-1}(s)(1 - F(s))}{Pn^{-1}(s) + F(s)(P(s) - Pn^{-1}(s))} \quad (7)$$

$$G_n(s) = \frac{y(s)}{n(s)} = \frac{P(s)F(s)}{Pn^{-1}(s) + F(s)(P(s) - Pn^{-1}(s))} \quad (8)$$

Pada persamaan (7) apabila filter $F(s)$ bernilai satu maka mengeleminasi pengaruh *disturbance*. Sedangkan pada persamaan (8) apabila filter $F(s)$ bernilai nol maka mengelaminasi pengaruh noise. Melihat ciri respon filter $F(s)$ terhadap frekuensi dari disturbance dan noise tersebut maka pada dasarnya jenis filter $F(s)$ berupa filter lulus bawah atau *Low Pass Filter* dengan orde pertama.

Pada Gambar 9 kompensator observer $C_{obsv}(s)$ dapat dinyatakan dengan suatu persamaan sebagai berikut [3]:

$$C_{obsv}(s) = \frac{F(s)}{1 - F(s)} P_n^{-1}(s) \quad (9)$$

Dari persamaan (9) dapat diketahui bahwa bila terjadi gangguan atau disturbance pada sistem mengakibatkan filter $F(s)$ bernilai 1 sehingga aksi kompensator observer menjadi sangat tinggi sekali dan ini menghasilkan respon yang sangat cepat sesuai yang diharapkan. Sementara bila terdapat noise pada sistem internal, nilai filter $F(s)$ bernilai 0 sehingga aksi kompensatornya menjadi nol dan sistem menjadi kebal terhadap noise sebagaimana diharapkan.

Dalam penelitian ini diasumsikan batas frekuensi disturbance berada pada frekuensi 0,8 Hz dan frekuensi noise minimal 100 Hz. Berdasarkan pada kriteria perancangan tersebut, diperoleh persamaan filter lulus bawah sebagai berikut :

$$F(s) = \frac{0.8}{s + 0.8} \quad (10)$$

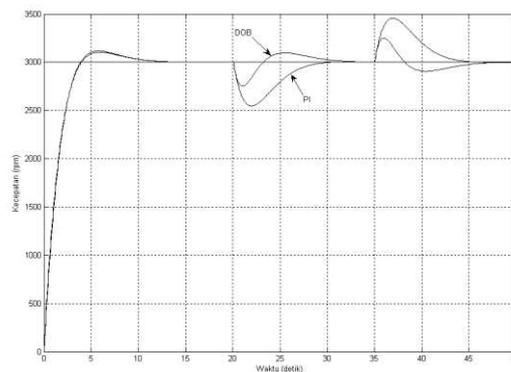
Sedangkan persamaan kompensator observernya diperoleh :

$$C_{obsv} = \frac{0.8s^2 + 22.61s + 7.574}{s^2 + 16.63s} \quad (11)$$

dan kontrol loop tambahan sebagai penguat bagi kontrol PI diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P_n F^{-1} = \frac{1.25s^2 + 21.79s + 16.63}{s^2 + 28.26s + 9.468} \quad (12)$$

Berdasarkan persamaan (10), (11) dan (12), diperoleh hasil pengujian sistem kontrol berbasis PI tanpa dan dengan disturbance observer seperti diperlihatkan pada Gambar 10. Pada gambar tersebut terlihat bahwa saat pembebanan, sistem kontrol PI dengan disturbance observer mampu mengatasi penurunan kecepatan dan memberikan waktu pulih lebih cepat bila dibandingkan tanpa dilengkapi dengan disturbance observer.



Gambar 10. Respon Keluaran Sistem Kontrol PI dan Disturbance Observer (DOB).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Persamaan kontrol PI dan disturbance observer sebagaimana yang telah diuraikan di atas masih dinyatakan dalam bentuk fungsi Laplace, sehingga perlu diubah dahulu dalam bentuk fungsi keadaan (*state space*) agar dapat digunakan pada program Delphi untuk proses pengendalian hardware motor universal [5],[7]. Adapun persamaan fungsi keadaannya (*state space*) sebagai software kontrol kecepatan motor universal pada program Delphi7 dapat dinyatakan sebagai berikut :

State space kontrol PI :

$$\begin{aligned} x_1[n+1] &= x_1[n] + 0,125 u[n] \\ y[n] &= 0,2x_1[n] + u[n] \end{aligned} \quad (13)$$

State space penguat kontrol PI :

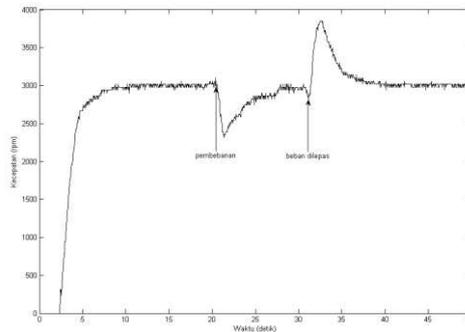
$$\begin{aligned} x_1[n+1] &= 1,231 x_1[n] - 0,4868 x_2[n] + u[n] \\ x_2[n+1] &= 0,5x_1[n] \\ y[n] &= -0,3571 x_1[n] + 0,727 x_2[n] + 1,25 u[n] \end{aligned} \quad (14)$$

State space kompensator observer :

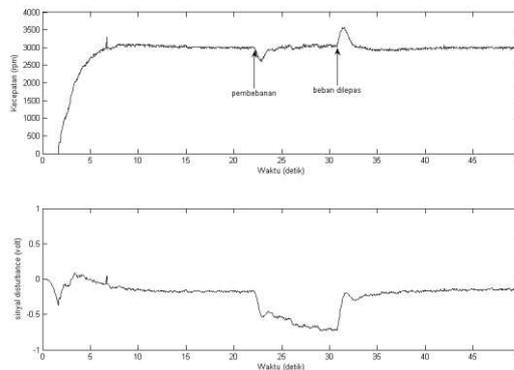
$$\begin{aligned} x_1[n+1] &= 1,435 x_1[n] - 0,4354 x_2[n] + u[n] \\ x_2[n+1] &= x_1[n] \\ y[n] &= 0.3232 x_1[n] - 0.3103 x_2[n] + 0.8u[n] \end{aligned} \quad (15)$$

Untuk proses pengujian motor universal guna mengetahui performance sistem kontrol PI tanpa dan dengan disturbance observer akibat pengaruh pembebanan terhadap perubahan kecepatan motor universal, perlu memberikan perlakuan yang sama dalam hal pembebanan berupa gaya berat dari sebuah benda.

Berdasarkan proses pengujian tersebut, ditampilkan salah satu hasil pengujian motor universal untuk sistem kontrol PI dan disturbance observer pada pembebanan sebesar 1000 gram seperti diperlihatkan berturut-turut pada Gambar 11 dan 12.



Gambar 11. Respon kecepatan pada pengujian kontrol PI tanpa disturbance observer pada gaya berat sebesar 10 Newton.



Gambar 12. Respon kecepatan pada pengujian kontrol PI dengan disturbance observer pada berat air sebesar 10 Newton

Berdasarkan grafik pada Gambar 11 dan 12 terlihat bahwa pada kondisi awal, sistem kontrol berbasis PI tanpa disturbance observer membutuhkan waktu lebih cepat untuk mencapai kecepatan pada kondisi mantapnya. Namun pada saat terjadi gangguan akibat pembebanan, kecepatannya menurun cukup besar. Sebaliknya bila dilengkapi dengan disturbance observer mampu mengatasi penurunan kecepatan lebih cepat akibat pengaruh pembebanan. Sebagai pembandingan respon kecepatan antara sistem kontrol PI dan Disturbance Observer pada berbagai nilai pembebanan secara lengkap dapat dilihat berturut-turut pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Pada tabel 1, 2 dan 3 tersebut tampak bahwa sistem kontrol berbasis disturbance observer memberikan penurunan kecepatan lebih rendah sebesar 380 rpm atau 12,67 % pada beban maksimum 10 Newton bila dibandingkan sistem kontrol PI dengan penurunan kecepatan sebesar 700 rpm atau 23,33 % pada beban yang sama terhadap kecepatan mantapnya.

Tabel 1. Kecepatan Silinder

| Gaya berat (N) | kecepatan silinder (rpm) | | | |
|----------------|--------------------------|------|---------------|------|
| | pembebanan | | beban dilepas | |
| | PI | DOB | PI | DOB |
| 0 | 3000 | 3000 | 3000 | 3000 |
| 0,2 | 2820 | 2860 | 3140 | 3140 |
| 0,4 | 2700 | 2740 | 3300 | 3240 |
| 0,6 | 2640 | 2720 | 3360 | 3340 |
| 0,8 | 2500 | 2700 | 3550 | 3440 |
| 10 | 2300 | 2620 | 3850 | 3600 |

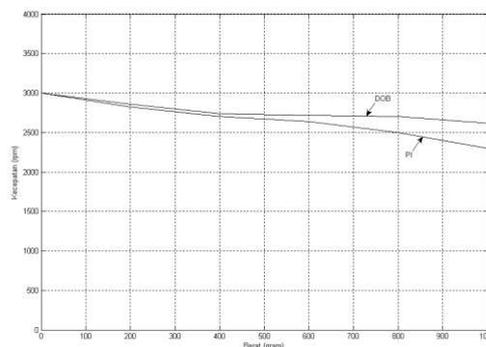
Tabel 2. Perubahan kecepatan silinder

| berat benda (N) | perubahan kecepatan (rpm) | | | |
|-----------------|---------------------------|-----|---------------|-----|
| | pembebanan | | beban dilepas | |
| | PI | DOB | PI | DOB |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,2 | 180 | 140 | 140 | 140 |
| 0,4 | 300 | 260 | 300 | 240 |
| 0,6 | 360 | 280 | 360 | 340 |
| 0,8 | 500 | 300 | 550 | 440 |
| 10 | 700 | 380 | 850 | 600 |

Tabel 3. Perubahan kecepatan silinder (%)

| Gaya berat (N) | perubahan kecepatan (%) | | | |
|----------------|-------------------------|-------|---------------|-------|
| | pembebanan | | beban dilepas | |
| | PI | DOB | PI | DOB |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,2 | 6 | 4.67 | 4.67 | 4.67 |
| 0,4 | 10 | 8.67 | 10 | 8 |
| 0,6 | 12 | 9.33 | 12 | 11.33 |
| 0,8 | 16.67 | 10 | 18.33 | 14.67 |
| 10 | 23.33 | 12.67 | 28.33 | 20 |

Adapun respon kecepatan dari sistem kontrol PI dengan dan tanpa disturbance observer pada berbagai beban dengan berat air dapat dilihat pada Gambar 13. Pada gambar tersebut, tampak bahwa kecepatan silinder pada sistem kontrol PI yang dilengkapi disturbance observer lebih stabil bila dibandingkan dengan kontrol PI tanpa disturbance observer.



Gambar 13. Respon kecepatan motor universal antara kontrol PI tanpa dan dengan disturbance observer.

Analisa lebih lanjut terhadap waktu pulih yaitu waktu yang dibutuhkan oleh kontroler untuk mengembalikan kecepatannya pada keadaan mantapnya sejak diberikan pembebanan. Adapun

waktu pulihnya dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5. Pada Tabel 4 tampak bahwa saat pembebanan sistem kontrol disturbance observer memberikan waktu pulih lebih cepat sebesar 2 sampai 3 detik bila dibandingkan dengan kontrol PI dengan waktu pulih 8 sampai 9 detik.

Sementara pada Tabel 5, saat beban dilepas, sistem kontrol disturbance observer memberikan waktu pulih yang sama 2 sampai 3 detik bila dibandingkan dengan kontrol PI dengan waktu pulih 6 sampai 7 detik.

Tabel 4. Waktu pulih kecepatan saat pembebanan

| Gaya berat (N) | waktu pembebanan (detik) | | | | waktu pulih (detik) | |
|----------------|--------------------------|----|-----|----|---------------------|-----|
| | PI | | DOB | | PI | DOB |
| | aw | ak | aw | ak | | |
| 0,2 | 19 | 27 | 27 | 29 | 8 | 2 |
| 0,4 | 20 | 28 | 23 | 26 | 8 | 3 |
| 0,6 | 19 | 27 | 22 | 25 | 8 | 3 |
| 0,8 | 21 | 30 | 23 | 25 | 9 | 2 |
| 10 | 20 | 29 | 22 | 24 | 9 | 2 |

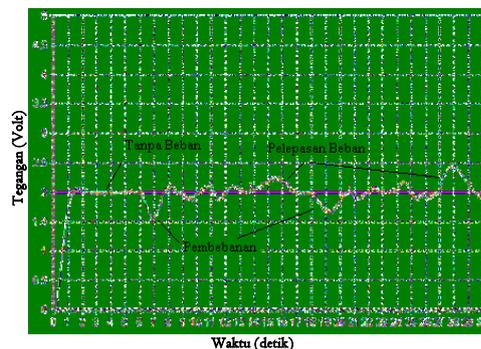
Keterangan : aw = awal ; ak = akhir

Tabel 5. Waktu pulih kecepatan saat beban dilepas

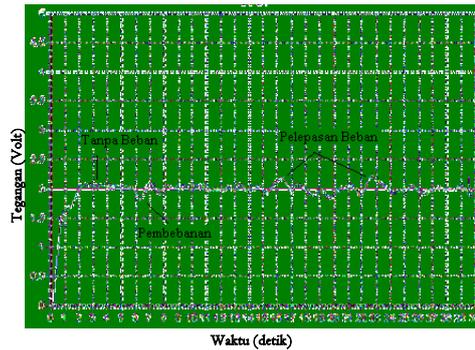
| Gaya berat (N) | waktu beban dilepas (detik) | | | | waktu pulih (detik) | |
|----------------|-----------------------------|----|-----|----|---------------------|-----|
| | PI | | DOB | | PI | DOB |
| | aw | ak | aw | ak | | |
| 0,2 | 29 | 36 | 31 | 34 | 7 | 3 |
| 0,4 | 31 | 37 | 33 | 35 | 6 | 2 |
| 0,6 | 29 | 36 | 34 | 36 | 7 | 2 |
| 0,8 | 32 | 39 | 30 | 32 | 7 | 2 |
| 10 | 31 | 40 | 31 | 33 | 9 | 2 |

Keterangan : aw = awal ; ak = akhir

Untuk mengetahui lebih jauh unjuk kerja sistem kontrol berbasis disturbance observer, maka perlu dilanjutkan dengan uji coba tahap kedua yakni dengan memberikan variasi gangguan secara eksternal berupa gaya tekanan secara langsung pada poros motor universal. Adapun hasil pengujiannya diperlihatkan pada Gambar 14 dan 15.



Gambar 14. Respon kecepatan motor universal dengan tekanan eksternal pada kontrol PI tanpa disturbance observer.



Gambar 15. Respon kecepatan motor universal dengan tekanan eksternal pada kontrol PI dengan disturbance observer.

Dari hasil kedua pengujian pada Gambar 14 dan 15 terlihat bahwa ketika poros motor universal diberikan tekanan eksternal secara langsung, maka pada sistem kontrol berbasis PI tanpa disturbance observer diperoleh kecepatan silinder kurang stabil dan mengalami guncangan cukup besar di sekitar nilai referensinya. Sementara dengan sistem kontrol PI yang dilengkapi disturbance observer diperoleh kecepatan poros yang relatif lebih stabil walaupun ada beberapa sedikit guncangan di sekitar nilai referensinya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan terhadap kinerja sistem kontrol berbasis PI tanpa dan dengan Disturbance Observer (DOB) dalam pengaturan kecepatan motor universal, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penerapan loop umpan balik internal berbasis *disturbance observer* dapat mengestimasi dan mengeliminasi gangguan yang terjadi akibat pembebanan pada poros motor universal.
2. Disturbance observer mengurangi pengaruh gangguan terhadap sinyal error sehingga mempercepat aksi kerja sistem kontrol PI
3. Aksi kontrol yang cepat dari sistem kontrol PI yang dilengkapi disturbance observer dapat memperbaiki karakteristik kecepatan yang buruk dari motor universal sehingga kecepatan menjadi lebih stabil.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Denis O'Kelly (1991), " *Performance and Control of Electrical Machines*", McGraw Hill Book Company, pp 315-319.
- [2] JM. Bourgeois, JM Charreton, P. Rault (1994), " *Improved Universal Motor Driver*", SGS Thomson Microelectronic
- [3] Kok Kiong Tan,dkk (2003), " *Precision Motion Control With Disturbance Observer for Pulsewidth-Modulation-Driven Permanent- Magnet Linear Motor*", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 39.
- [4] Carl J Kempf, Seiichi Kobayashi (1999), " *Disturbance Observer and Feedforward Design for a High-Speed Direct-Drive Positioning Table*", IEEE Transaction on control systems technology Vol 7.
- [5] Paul M. DeRusso,dkk (1998), " *State Variabels For Engineers second edition*", New York, pp 393-401.
- [6] Edwar Arnold (1995), " *Principles of Control Engineering*", Gray Publishing, Tunbridge Wells.
- [7] Chi Tsong Chen,--, " *Analog and Digital Control System Design : Transfer Function, state Space an*".