

Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa Pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Metode *Sliding Mode Control (SMC)*

Adityo Yudistira, Rusdhianto Effendie AK, dan Josaphat Pramudijanto
Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

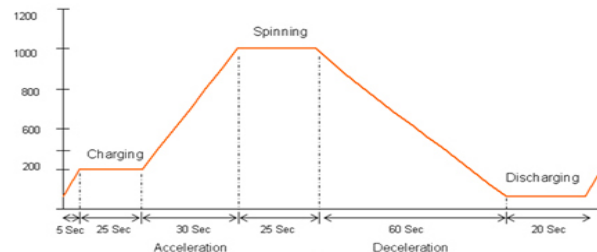
E-mail: adityoy@gmail.com, rusdhi@ee.its.ac.id, jos@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Motor induksi tiga fasa banyak digunakan di industri, salah satunya pada industri pabrik gula. Di industri pabrik gula motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada mesin sentrifugal. Mesin ini digunakan pada proses pemisahan cairan *massacuite* dan *strup* hingga didapat kristal gula. Pada proses tersebut terjadi perubahan beban oleh karena itu pada siklus kecepatannya mengalami proses *Charging*, *Spinning* dan *Discharging*. Pengaturan kecepatan motor induksi masih dilakukan secara manual yaitu dengan merubah posisi puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal. Pengaturan dengan metode ini mengakibatkan kecepatan motor akan sulit dikendalikan sesuai dengan yang diharapkan. Pengaturan kecepatan yang tidak tepat juga dapat mengakibatkan hasil produksi gula yang kurang maksimal. Oleh karena itu dibutuhkan metode kontrol untuk mengoptimalkan kecepatan *setpoint* motor saat mengalami proses *Charging*, *Spinning* dan *Discharging*. Metode kontrol yang digunakan adalah metode *Sliding Mode Control*. Kontroler SMC yang diimplementasikan pada PLC memiliki $W=10$ dan $\alpha=0,2$. Dari hasil analisa *sliding surface* diketahui bahwa semakin bertambahnya beban maka *hitting time* semakin lama. Hasil implementasi kontroler SMC yang digunakan terjadi *error* $\pm 6,6\%$ pada kecepatan 300 rpm sedangkan pada kecepatan 800 rpm dan 200 rpm terjadi *error* $\pm 2,5\%$. Selain itu dalam Tugas Akhir ini kontroler SMC juga mampu memperbaiki spesifikasi respon agar lebih baik. Sehingga Tugas Akhir ini dapat membantu meningkatkan efisiensi mesin sentrifugal pada pabrik gula.

Kata Kunci— Motor Induksi, Mesin Sentrifugal, SMC, PLC.

I. PENDAHULUAN

Mesin sentrifugal adalah mesin yang menggunakan prinsip gaya sentrifugal. Mesin ini biasanya digunakan pada proses di industri yang pada proses pembuatan produk menggunakan reaksi kimia, contohnya pada industri gula digunakan sebagai pemisah cairan *massecuite* dengan *strup* agar didapat kristal gula. Oleh karena itu, mesin sentrifugal banyak ditemui pada Pabrik Gula yang ada di Indonesia. Pentingnya pemanfaatan mesin sentrifugal ini membutuhkan proses pengaturan kecepatan yang sesuai yaitu proses *charging*, *spinning* dan *discharging*. Pengaturan kecepatan yang ada masih dilakukan secara manual yaitu dengan merubah posisi puli atau ukuran poros dari mesin sentrifugal. Pengaturan dengan metode ini mengakibatkan kecepatan yang akan sulit dikendalikan sesuai dengan yang diharapkan.



Gambar 1. Lintasan *Tracking* Kecepatan Mesin Sentrifugal

Pengaturan kecepatan yang tidak tepat juga dapat mengakibatkan hasil produksi gula yang kurang maksimal.

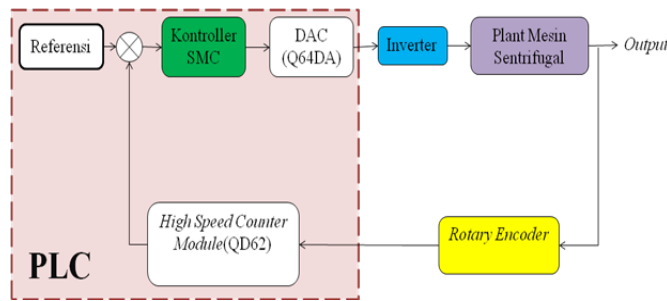
Oleh karena itu dibutuhkan suatu cara untuk dapat mengatur kecepatan dari mesin sentrifugal ini agar dapat mempertahankan kecepatan secara optimal meski terjadi perubahan beban sehingga waktu interval yang dibutuhkan untuk mesin sentrifugal tersebut *charging*, *spinning* dan *discharging* dapat sesuai dan lebih optimal. Karena karakteristik dari kecepatan sentrifugal yang *tracking* maka metode kontrol yang akan digunakan yaitu metode *Sliding Mode Control (SMC)*.

Melalui Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Tiga Fasa Pada Mesin Sentrifugal Menggunakan Metode *Sliding Mode Control (SMC)*” diharap dapat menjadi referensi untuk menangani masalah pengaturan kecepatan motor pada mesin sentrifugal ini secara baik. Selain itu juga dapat membantu meningkatkan efisiensi mesin sentrifugal.

II. DISKRIPSI PERMASALAHAN

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada berbagai proses produksi di industri karena motor induksi memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal, serta berbiaya murah. Motor induksi tiga fasa juga memiliki efisiensi yang tinggi saat berbeban penuh dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak. Akan tetapi, jika dibandingkan dengan motor DC, motor induksi masih memiliki kelemahan dalam hal pengaturan kecepatan, dimana pada motor induksi pengaturan kecepatan sangat sulit untuk dilakukan. Pada Tugas Akhir ini penggerak mesin sentrifugal yang digunakan motor induksi tiga fasa. [1]

Pengaturan kecepatan motor induksi yang relatif sulit untuk di kendalikan Sehingga dibutuhkan Kontroler yang bisa



Gambar 2. Blok Fungsional Sistem

membuat kecepatan motor tetap stabil walaupun diberi beban yang besar. Selain itu pada kasus mesin sentrifugal kecepatan motor harus mengikuti *tracking* yang telah ditentukan karena jika kecepatan dari motor tidak bisa mengikuti *tracking* maka kualitas gula juga tidak akan sesuai yang diharapkan.

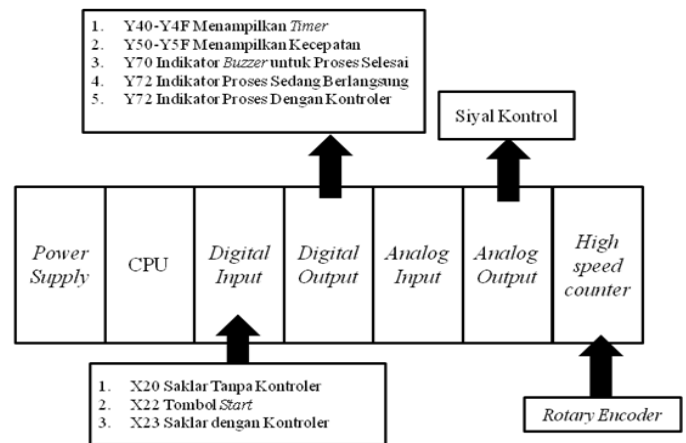
Beberapa Pabrik Gula sudah menggunakan PLC dalam melakukan kontrol kecepatan dari mesin sentrifugal untuk mengatasi permasalahan tersebut, biasanya menggunakan algoritma kontrol yang sederhana yaitu dengan mengganti *setpoint* dari kecepatan motor dengan *timer*. Penggunaan *timer* sebagai algoritma kontrol dari mesin sentrifugal tentunya kecepatan motor tidak akan sesuai dengan yang telah ditentukan karena terdapat *error steady state*. Sehingga dibutuhkan kontroler yang dapat mengatasi permasalahan *tracking* dimana *setpoint* yang diinginkan dapat tercapai seperti pada Gambar 1 dan sistem dapat stabil terhadap beban yang diputar. Untuk mengatasi permasalahan yang terjadi, maka dirancang Kontroler *Sliding Mode Control* sehingga kecepatan motor dapat mengikuti *tracking* yang telah ditentukan.

III. PERANCANGAN SISTEM

Secara umum alur proses dari pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *Sliding Mode Control* dengan PLC dapat dilihat pada Gambar 1 untuk memonitoring nilai *Setpoint*, *Present Value*, dan sinyal kontrol menggunakan *software GT Designer3*. Dan untuk kontroler *Sliding Mode Control* ditanamkan kedalam *Programmable Logic Controller* yang akan digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi, di PLC menggunakan modul DAC (Q62DA) dan juga *non-inverting amplifier* untuk memberikan sinyal kontrol ke *inverter* yang nantinya akan memutar motor induksi tiga fasa. Dari motor induksi kemudian ada umpan balik melalui *rotary encoder* masuk ke ke modul *high speed counter* (QD62) yang pada akhirnya akan masuk dan diolah datanya oleh PLC. Gambar 2 memperlihatkan diagram blok sistem secara keseluruhan.

A. Programmable Logic Controller

PLC (*Programmable Logic Controller*) adalah sistem elektronik yang beroperasi secara *digital* dan didisain untuk pemakaian di lingkungan industri, dimana sistem ini menggunakan memori yang dapat diprogram untuk penyimpanan secara internal instruksi-instruksi yang mengimplementasikan fungsi-fungsi spesifik seperti logika, urutan, perwaktuan, pencacahan dan operasi aritmatik untuk mengontrol mesin atau proses melalui modul-modul I/O



Gambar 3. Perancangan I/O Modul PLC

digital maupun *analog*. Dimana PLC akan digunakan sebagai *controller* pada penelitian ini.

Pada Gambar 3 komponen pada modul *controller* terdiri dari enam modul, yaitu: modul *power suplay*, CPU, *digital input*, *digital output*, *analog input*, *high speed counter*, dan modul *base plate*. Spesifikasi dari modul-modul yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. *Power supply* (Q61P): masukan *power supply* (100 – 240VAC), keluaran 5VDC (6A).
2. CPU (Q02HCPU): kapasitas program (28 *kstep*), kecepatan pemrosesan (0,034 μ sec), tipe memori (standar ROM).
3. *Digital input* (QX42): terdiri dari 64 *point*, 32 *point* dan 32 *common*, dengan tegangan 24VDC *input* (4mA), dan tipe pengkabelanya menggunakan *sink type*.
4. *Digital output* (QY42P): terdiri dari 64 *point*, 32 *point* dan 32 *common*, dengan tegangan 12 to 24 VDC, Dan sudah didukung dengan perlindungan *termal* dan *short sirkuit* serta tegangan kejut.
5. *Analog Input* (Q64AD): total *channel analog* (4 ch), *range* konversi dari *analog* ke *digital* adalah 0 – 5 VDC *linier* dengan nilai *digital* 0 – 4000.
6. *High Speed Counter* (A1SD61): membutuhkan *supply* 24VDC dan dapat mengolah sinyal pulsa A dan B.

Bahasa pemrograman yang digunakan adalah *ladder*. *Software* yang digunakan untuk pemrograman PLC adalah *software integrasi* berbasis *windows* tipe GX Work2 versi 1.77F.

B. Mesin Sentrifugal

Mesin sentrifugal yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah mesin yang digunakan pada Tugas Akhir sebelumnya [1]. Namun mesin sentrifugal yang digunakan telah dimodifikasi dengan mengganti *tachogenerator* dengan *rotary encoder*, dan pemberian roda pada kaki-kaki penopang mesin. Mesin yang dibuat berbahan *stainless* dan berbentuk tabung. Didalam mesin ini terdapat tabung *stainless* berukuran lebih kecil dari tabung luar dan memiliki lubang-lubang kecil. Kemudian terdapat saluran untuk keluarnya air dari proses sentrifugal. Berikut ini mesin sentrifugal yang telah dibuat dan digunakan pada Tugas Akhir yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Mesin Sentrifugal dan Panel Kontrol

Semua komponen perangkat keras digabungkan dalam satu tempat yaitu panel kontrol dimana didalam panel kontrol (Gambar 4) terdapat rangkaian *non-inverting op-amp*, inverter, *power supply*, *wiring rotary encoder*, *pilot lamp*, saklar, *emergency button* dan *pushbutton*. Dari panel kontrol ini mesin sentrifugal dioperasikan dengan menggunakan saklar dan *pushbutton* dimana juga dapat dilihat besarnya nilai frekuensi yang bekerja pada motor tiga fasa.

Pilot lamp yang dipasang pada panel kontrol ada tiga buah dimana lampu berwarna merah menandakan bahwa sistem sudah aktif, kuning menandakan bahwa mesin dalam kondisi beroperasi dengan menggunakan kontroler dan hijau menandakan bahwa sistem sudah siap untuk dioperasikan. Pada panel kontrol juga terdapat dua buah saklar dan sebuah *pushbutton* dimana saklar berfungsi untuk menyalakan sistem dan mengatur mesin beroperasi dengan kontroler atau tanpa kontroler sedangkan *pushbutton* berguna untuk mengoperasikan mesin.

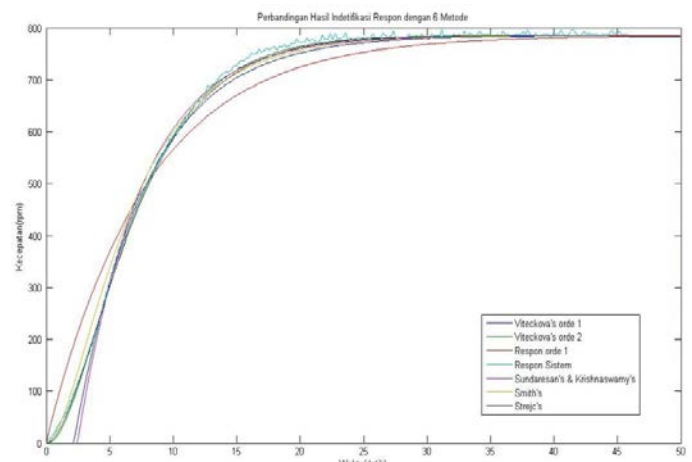
C. Identifikasi Sistem [2]

Proses identifikasi dilakukan secara *open loop* dan statis dengan memberikan sinyal *step* dan melihat respon berupa kecepatan putar. Sinyal uji *step* diberikan dengan menggunakan program, kemudian hasil respon *plant* yang terbaca oleh *rotary encoder* ditampilkan pada komputer melalui proses akusisi data dengan PLC Mitsubishi. Pengambilan data untuk proses identifikasi dilakukan sebanyak 5 kali, kemudian dicari nilai RMSE terkecil.

6 metode identifikasi diterapkan pada satu sampel data untuk didapatkan metode yang paling sesuai. Hasil pengitungan terbaik dengan nilai RMSE terkecil dari berbagai macam metode. Keenam metode identifikasi tersebut adalah metode Viteckova orde 1, Viteckova orde 2, Respon orde 1, Sundaresan Krishnaswamy, Smith, dan Strejc. Metode Viteckova orde 2 dipilih karena memiliki validasi nilai RMSE yang paling kecil dari kelima metode yang lain. Hasil validasi pemodelan berbagai metode beserta nilai RMSE dari masing-masing metode dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan perbandingan respon pemodelan dengan respon *plant* nyata ditampilkan pada Gambar 5 dengan *Simulation stop time* 50 detik.

Tabel 1. Perbandingan Metode Pendekatan Model

No	Metode	Model Matematika	RMSE
1.	Viteckova 1 st Order	$\frac{0,975}{3,510 s + 1}$	23,040
2.	Viteckova 2 nd Order	$\frac{0,975}{5,010 s^2 + 4,476 s + 1}$	9,646
3.	Sundaresan & Krishnaswamy	$\frac{0,975}{3,217 s + 1}$	23,740
4.	Respon Orde 1	$\frac{0,975}{5,877 s + 1}$	48,300
5.	Smith	$\frac{0,975}{6,002 s^2 + 5,545 s + 1}$	15,950
6.	Strejc	$\frac{0,975}{11,0016 s^2 + 5,745 s + 1}$	11,150



Gambar 5. Respon Identifikasi Pendekatan Model dengan Berbagai Metode

Tabel 2. Hasil Identifikasi Viteckova 2nd Order Mesin Sentrifugal (minimal, nominal, dan maksimal).

No	Beban	Model Matematika	RMSE
1.	Maksimal	$\frac{0,984}{12,5966 s^2 + 7,098 s + 1}$	8,798
2.	Nominal	$\frac{0,976}{5,056 s^2 + 4,4972 s + 1}$	14,760
3.	Minimal	$\frac{1,0002}{4,235 s^2 + 4,116 s + 1}$	29,22

Dari hasil identifikasi dan hasil dari validasi pemodelan dengan menggunakan metode RMSE (*Root Mean Square Error*), maka dipilih pemodel yang memiliki hasil RMSE terkecil dari 5 data yang lain untuk kondisi minimal, nominal, dan maksimal yaitu dengan metode Viteckova 2nd Order. Sehingga didapat persamaan untuk tiap kondisi beban seperti Tabel 2.

D. Perancangan Kontroler SMC [3]

Pada Tugas Akhir ini akan didesain dan implementasikan kontroler SMC untuk membantu kinerja mesin sentrifugal, sehingga saat akselerasi kecepatan yang dihasilkan sesuai

dengan *setpoint*. Pada tahap perancangan kontroler, fungsi alih yang digunakan adalah pada saat beban nominal, dapat dilihat pada Persamaan 1 sebagai berikut :

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0,975}{5,056s^2 + 4,497s + 1} \quad (1)$$

Dimana,

$$K = 0,975 \quad a = 5,056$$

$$b = 4,497 \quad c = 1$$

Fungsi alih tersebut dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan diferensial (dengan asumsi semua nilai awal adalah nol) :

$$\begin{aligned} a\ddot{y} + b\dot{y} + c &= Ku \\ \ddot{y} &= -\frac{b}{a}\dot{y} - \frac{c}{a}y + \frac{K}{a}u \end{aligned} \quad (2)$$

Kemudian, ambil sinyal *error* sebagai variabel *state* :

$$\begin{aligned} x_1 &= e \\ x_2 &= \dot{x}_1 = \dot{e} \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan untuk sinyal *error* adalah :

$$e = r - y$$

Maka,

$$x_1 = e = r - y \rightarrow y = r - x_1 \quad (4)$$

Sehingga didapat,

$$\dot{x}_1 = x_2 = \dot{r} - \dot{y} \rightarrow \dot{y} = \dot{r} - \dot{x}_1 \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_2 = \ddot{r} - \ddot{y} \rightarrow \ddot{y} = \ddot{r} - \dot{x}_2 \rightarrow \ddot{y} = \ddot{r} - \dot{x}_2 \quad (6)$$

Substitusikan Persamaan 5 dan 6 pada Persamaan 2 maka :

$$\begin{aligned} \ddot{r} - \dot{x}_1 &= -\frac{b}{a}(\dot{r} - \dot{x}_1) - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{K}{a}u \\ \ddot{r} - \dot{x}_2 &= -\frac{b}{a}(\dot{r} - x_2) - \frac{c}{a}(r - x_1) + \frac{K}{a}u \\ \dot{x}_2 &= \ddot{r} + \frac{b}{a}(\dot{r} - x_2) + \frac{c}{a}(r - x_1) - \frac{K}{a}u \\ \dot{x}_2 &= \ddot{r} + \frac{b}{a}\dot{r} - \frac{b}{a}x_2 + \frac{c}{a}r - \frac{c}{a}x_1 - \frac{K}{a}u \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c/a & -b/a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K/a \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ c/a \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ b/a \end{bmatrix} \dot{r} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r} \end{aligned}$$

Didefinisikan suatu permukaan lancar :

$$\sigma_s : \alpha e + \dot{e} = 0$$

$$\sigma_s : \alpha x_1 + x_2 = 0$$

Dengan $\alpha > 0$

Maka sinyal kontrol ekivalen dapat dicari dengan :

$$\dot{\sigma}_s = 0$$

$$\alpha \dot{x}_1 + \dot{x}_2 = 0$$

$$\alpha x_2 + \left(\ddot{r} + \frac{b}{a}(\dot{r} - x_2) + \frac{c}{a}(r - x_1) - \frac{K}{a}u_{eq} \right) = 0$$

$$-\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha + \frac{b}{a} \right) x_2 + \frac{c}{a}r + \frac{b}{a}\dot{r} + \ddot{r} - \frac{K}{a}u_{eq} = 0$$

$$\frac{K}{a}u_{eq} = -\frac{c}{a}x_1 + \left(\alpha + \frac{b}{a} \right) x_2 + \frac{c}{a}r + \frac{b}{a}\dot{r} + \ddot{r}$$

$$Ku_{eq} = -cx_1 + \left(\alpha a - \frac{b}{a} \right) x_2 + cr + b\dot{r} + a\ddot{r} \quad (7)$$

Setelah ditemukan sinyal kontrol ekivalen, maka dapat dicari sinyal kontrol natural dengan cara :

$$\dot{\sigma} = \alpha x_2 + \left(\ddot{r} + \frac{b}{a}(\dot{r} - x_2) + \frac{c}{a}(r - x_1) - \frac{K}{a}u \right)$$

$$\dot{\sigma} = \alpha x_2 + \left(\ddot{r} + \frac{b}{a}(\dot{r} - x_2) + \frac{c}{a}(r - x_1) - \frac{K}{a}(u_{eq} + u_n) \right)$$

$$\dot{\sigma} = -\frac{K}{a}u_n$$

Berdasarkan syarat kestabilan Lyapunov, maka ditentukan :

$$\dot{\sigma} = -\frac{K}{a}u_n$$

$$\dot{\sigma} = -W \cdot \text{sat}(\sigma)$$

$$-\frac{K}{a}u_n = -W \cdot \text{sat}(\sigma)$$

$$u_n = \frac{a}{K}W \cdot \text{sat}(\sigma) \quad (8)$$

maka sinyal kontrol total adalah :

$$u = u_{eq} + u_n \quad (9)$$

IV. IMPLEMENTASI DAN ANALISIS

A. Simulasi dalam Bentuk Kontinyu

Dalam membuat kontroler SMC pada Matlab, maka disimulasikan dalam bentuk kontinyu terlebih dahulu sesuai dengan persamaan Model Referensi maupun *Sliding Mode Control* dan pada simulasi kontroler digunakan fungsi alih dengan beban nominal. Dimana nilai dari α dan W didapatkan $\alpha=0,2$, dan $W=10$.

Persamaan Model Referensi,

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s + 1}$$

Persamaan *Sliding Mode Control*:

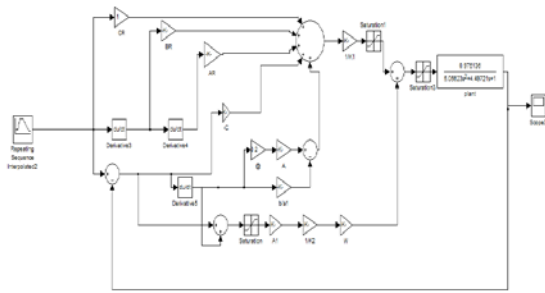
$$u_{eq} = \left(\frac{-1x_1 + \left(0,2 \cdot 5,056 - \frac{4,497}{5,056} \right) x_2 + 1 \cdot r + 4,497 \cdot \dot{r} + 5,056 \cdot \ddot{r}}{0,975} \right)$$

$$U_n = \frac{5,056}{0,975} \cdot 10 \cdot \text{sat}(\sigma)$$

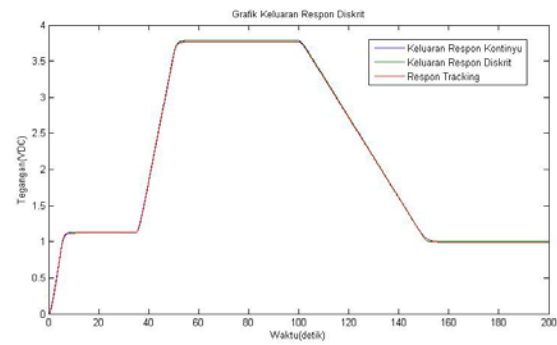
Sehingga sinyal kontrol total dari kontroler SMC berdasar Persamaan 9 didapat Persamaan *Sliding Mode Control* seperti Persamaan 10.

$$u = \left(\frac{-1x_1 + \left(0,2 \cdot 5,056 - \frac{4,497}{5,056} \right) x_2 + 1 \cdot r + 4,497 \cdot \dot{r} + 5,056 \cdot \ddot{r}}{0,975} \right) + \left(\frac{5,056}{0,975} \cdot 10 \cdot \text{sat}(\sigma) \right) \quad (10)$$

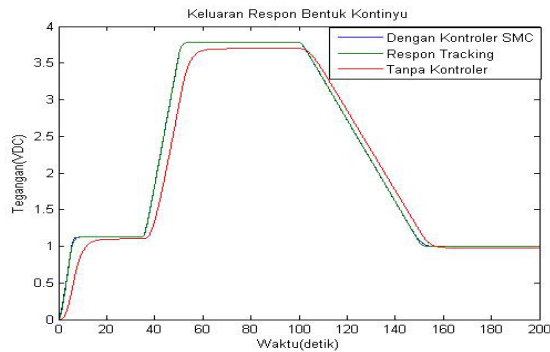
Dari persamaan model referensi dan persamaan SMC telah didapatkan di atas, selanjutnya untuk melihat hasil kontroler jika digabungkan dengan fungsi alih dari *plant* mesin sentrifugal maka simulasinya akan seperti Gambar 6.



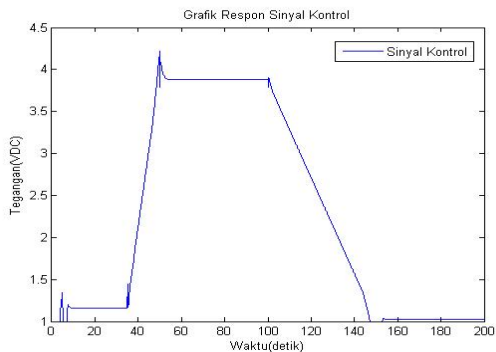
Gambar 6. Simulasi dalam Bentuk Kontinyu



Gambar 9. Keluaran Respon Perbandingan Bentuk Kontinyu dan diskrit



Gambar 7. Keluaran Respon Bentuk Kontinyu



Gambar 8. Keluaran Sinyal Kontrol Bentuk Kontinyu

Dari hasil simulasi tersebut didapatkan respon dari *plant* setelah diberikan kontroler seperti Gambar 7.

Untuk mendapatkan respon *plant* seperti Gambar 7, kontroler memberikan sinyal kontrol seperti pada Gambar 8. Sinyal kontrol dari detik 0 hingga detik ke 9,2 terjadi *chattering*, karena kontroler berusaha mengejar nilai dari *setpoint* yang telah ditentukan. Jika dibandingkan dengan respon tanpa kontroler dari *plant* maka, terlihat pada Gambar 7 bahwa respon dengan kontroler (warna merah) lebih cepat dari pada tanpa kontroler (warna biru). Selain itu, kontroler juga memperbaiki *error steady state*.

B. Simulasi dalam Bentuk Diskrit

Setelah mendapatkan persamaan bentuk kontinyu maka diubah ke bentuk diskrit agar kontroler SMC dapat diimplementasikan dalam bentuk program *ladder diagram* di PLC. Sehingga didapatkan seperti Persamaan 7 yaitu model referensi, sinyal kontrol ekuivalen, dan sinyal kontrol natural:

Persamaan *Sliding Mode Control*, untuk Sinyal Ekuivalen:

$$u_{eq} = \{CR + BR + AR + C + ABC\} \cdot 1,02445$$

Tabel 3.

Spesifikasi Respon

No	Beban	T (detik)	t _d (detik)	t _r (detik)	T _s (5%) (detik)
1.	Tanpa Kontroler	6,070	5,000	18,900	14,000
2.	Kontroler SMC	1,500	1,300	2,266	4,600

Dengan,

$$CR = 1 \cdot Yr(k)$$

$$BR = (Yr(k) - Yr(k-1)) \cdot 449,7216$$

$$AR = (Yr(k) - 2Yr(k-1) + Yr(k-2)) \cdot 50562,3$$

$$C = -e(k)$$

$$ABC = (e(k) - e(k-1)) \cdot 835,807$$

$$= \dot{e}(k) \cdot 835,807$$

Sedangkan untuk Sinyal Natural:

$$u_n = (5,056e(k) + \dot{e}(k)) \cdot W \cdot 1/K$$

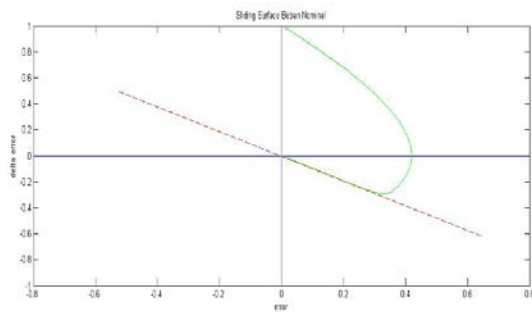
$$u_n = (5,056e(k) + \dot{e}(k)) \cdot 10,2445$$

Dari, hasil simulasi dalam bentuk diskrit ini, didapatkan respon sistem maupun sinyal kontrol yang sama dengan bentuk kontinyu sehingga kontroler dalam bentuk diskrit ini sudah benar dan sudah bisa dibuat logika program nya. Implementasi yang dilakukan adalah menerapkan metode kontroler ke dalam PLC.

C. Spesifikasi Respon

Dari hasil respon yang telah ditunjukkan pada bagian sebelumnya dilakukan analisa spesifikasi respon dari kecepatan motor tiga fasa seperti Tabel 3.

Dari spesifikasi respon pada Tabel 3. diketahui bahwa kontroler SMC dapat memperbaiki spesifikasi respon dari *plant* dimana kontroler SMC dapat mengurangi *time constant* dari 6,07 detik menjadi 1,5 detik. *Time delay* dari sistem juga mengalami penurunan dari 5 detik menjadi 1,3 detik. *Rise time* dari sistem mengalami penurunan dari 18,9 detik menjadi 2,266. Selain itu *time settling* dari sistem setelah diberi kontroler SMC juga mengalami penurunan dari 14 detik menjadi 4,6 detik. Dari data tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa kontroler SMC dapat mempercepat respon dari sistem selain itu kontroler SMC juga dapat menghilangkan *e_{ss}*, dimana jika tanpa kontroler terdapat *e_{ss}* sebesar 2,4%, sehingga trayektori yang diinginkan dapat tercapai sesuai dengan yang direncanakan.



Gambar 10 Trajectory Beban Nominal

Tabel 4.
Time Settling 5%

No	Kondisi Pembebanan	Ts(5%) detik
1	Minimal	3,560
2	Nominal	3,641
3	Maksimal	3,658

Dari hasil pencarian nilai *time settling* pada kondisi beban yang berbeda didapatkan bahwa hasil respon dari sistem masih sesuai dengan *setpoint* yang diberikan, namun jika dilihat dari *settling time* pada Tabel 4.6 diketahui bahwa penambahan maupun pengurangan beban sebesar 3,5 kilogram mempengaruhi *settling time* sebesar $\pm 2\%$.

D. *Sliding Surface*

Setelah didapatkan nilai-nilai parameter kontrol dan fungsi alih dari tiap kondisi pembebanan yaitu minimal, nominal dan maksimal. Maka dapat dilakukan analisa dari sliding mode itu sendiri yaitu dengan melihat trajectory dari sistem ketika diberikan kontroler beban nominal dengan perubahan fungsi alih.

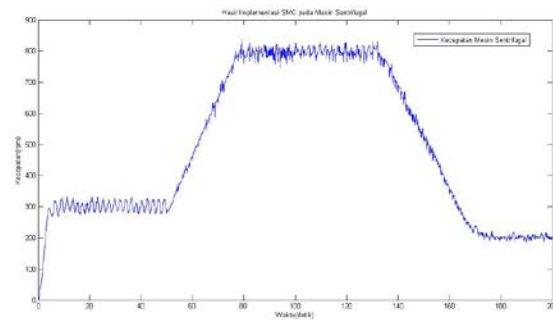
Dari hasil plot *trajectory* sistem dengan kondisi fungsi alih yang berbeda diatas dapat disimpulkan bahwa semakin besar beban maka hitting time dari *trajectory* akan semakin lama dan juga sebaliknya. Selain itu terlihat bahwa kontroler SMC memaksakan *trajectory* plan mengikuti *sliding surface*.

E. Analisa Kekokohan

Analisa kekokohan dilakukan dengan cara memberikan masukan *step* pada kontroler beban nominal dengan fungsi alih minimal, nominal, dan maksimal. Setelah itu dicari *time settling* Ts(5%) dan didapatkan data pada Tabel 4.6.

F. Hasil Implementasi

Implementasi dilakukan dengan cara memasukkan algoritma kontroler SMC dalam bentuk diskrit kedalam pemrograman *ladder diagram* (Lampiran 2). Selanjutnya program tersebut *download* ke PLC yang telah terhubung dengan *plant* mesin sentrifugal. Data kemudian diambil dan disimpan dengan menggunakan *MX-Sheet* dan diplot pada matlab sehingga didapatkan respon grafik seperti pada Gambar 11.



Gambar 11 Kecepatan Mesin Sentrifugal Berbeban dengan Kontroler SMC

Dari grafik pada Gambar 4.24 dapat terlihat bahwa:

1. Saat diberi *setpoint* 300 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 300 rpm, namun memiliki nilai rpm ± 20 rpm pada kondisi *steady state*. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 6,6\%$ dari kondisi *steady state*.
2. Saat diberi *setpoint* 800 rpm, keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 800 rpm, namun memiliki nilai rpm ± 20 rpm pada kondisi *steady state*. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 2,5\%$ dari kondisi *steady state*.
3. Saat diberi *setpoint* 200 rpm keluaran kecepatan dari mesin sentrifugal ada pada rata-rata 200 rpm, namun memiliki nilai rpm ± 5 rpm pada kondisi *steady state*. Sehingga Terjadi *error* sebesar $\pm 2,5\%$ dari kondisi *steady state*.

Dari semua pengujian pada implementasi kontrol *Sliding Mode Controller* yang telah dilakukan, kontroler dapat berjalan sesuai dengan tujuan maka bisa dikatakan bahwa metode *Sliding Mode Control* telah dapat diimplementasikan kedalam PLC dan mampu mengontrol kecepatan mesin sentrifugal sesuai dengan *tracking setpoint* kecepatan yang ditentukan. Terjadinya *error* pada kondisi *steady state* disebabkan karena konstruksi dari *plant* yang tidak seimbang.

V. KESIMPULAN

Dari hasil desain kontrol SMC yang telah dikerjakan dan beberapa penerapan dalam tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. *Plant* mengalami saturasi pada tegangan masukan lebih dari 4,2 Volt DC atau kecepatan motor lebih dari 1100 rpm.
2. Nilai parameter yang digunakan kontrol SMC pada Tugas Akhir ini $\alpha=0,2$, dan $W=10$ untuk mendapatkan hasil *tracking* yang maksimal.
3. Kontrol optimal SMC dapat diimplementasikan pada PLC dengan *ladder diagram*.
4. Kontrol optimal SMC mampu mengontrol kecepatan motor AC induksi 3 Fasa.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ika Putri, R., Fauziyah, M., dan Setiawan, A. Penerapan Kontroler Neural Fuzzy Untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa pada Mesin Sentrifugal, *INKOM, Vol. III, No. 1-2, Nop 2009*, 53-64.
 [2] Ing. Pavel Jakoubek, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods", *Konference Studentskévürčičinnosti*, 2009.
 [3] Vadim Utkin, "*Sliding Mode Control*", Taylor & Francis, Perancis, 1999.