

# Rancang Bangun *Rotary Inverted Pendulum* (RIP) dengan Menggunakan Kontrol PID

Goegoes Dwi Nusantoro, M. Aziz Muslim, Purwanto dan Ravi Indra C.

**Abstrak**—Pendulum terbalik adalah sistem non linear orde tinggi, multivariabel dan sistem dinamik yang sangat tidak stabil. Ia telah digunakan untuk menguji banyak desain sistem kontrol dan pengajaran kontrol modern. Pada penelitian ini yang menjadi fokus bahasan adalah pendulum terbalik yang menggunakan lintasan berbentuk lingkaran (*Rotary Inverted Pendulum*). Lintasan berupa lingkaran bertujuan untuk menghilangkan batasan panjang lintasan yang terdapat pada pendulum terbalik dengan lintasan transversal.

Kontroler PID yang digunakan sebagai pengendalinya, merupakan kontroler yang memiliki stabilitas yang baik dengan tingkat error dan overshoot yang kecil. Kontroler PID diprogram pada sebuah digital signal processor dalam modul eZdsp F2812. Pemograman dilakukan pada software matlab/simulink dan dikompilasi pada software code composer studio. Tuning dari kontroler PID dilakukan dengan metode hand tuning dan didapatkan nilai  $K_p=100$ ,  $K_d=8 \times 10^{-8}$  dan  $K_i=1000$ . Dengan nilai  $K_p$ ,  $K_d$  dan  $K_i$  tersebut sistem dapat berjalan dengan baik dan berhasil mempertahankan posisi setimbang pendulum.

**Kata Kunci**— modul eZdsp F2812, *Rotary Inverted Pendulum*, Kontroler PID.

## I. PENDAHULUAN

KONTROLER PID adalah kontrol klasik yang telah mapan dan lama digunakan di industri. Ia memiliki struktur kontrol yang sederhana sehingga dapat dimengerti oleh operator atau teknisi dan lebih mudah untuk menyetel (*tuning*) parameternya. Penggunaan kontroler ini telah terbukti memuaskan. Menurut survey yang dilakukan pada tahun 1989 lebih dari 90% loop kontrol yang digunakan dalam industri menggunakan tipe ini [1]. Kontrol PID telah menjadi topik riset aktif dalam beberapa tahun terakhir ini. Riset mengenai kontrol PID pada garis besarnya meliputi metode tuning parameter, perancangan filter tambahan pada kontrol PID dan metode implementasi kontrol PID [2].

Sementara itu kontrol pendulum terbalik adalah salah satu problem klasik yang paling menarik dalam teknik kontrol. Pendulum terbalik adalah sistem pendulum

Goegoes Dwi Nusantoro adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang Indonesia (Korespondensi penulis melalui HP 081328199511; email [goegoesdn@ub.ac.id](mailto:goegoesdn@ub.ac.id), [goegoesdn@yahoo.com](mailto:goegoesdn@yahoo.com))

M. Aziz Muslim adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang Indonesia.

Purwanto adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang Indonesia.

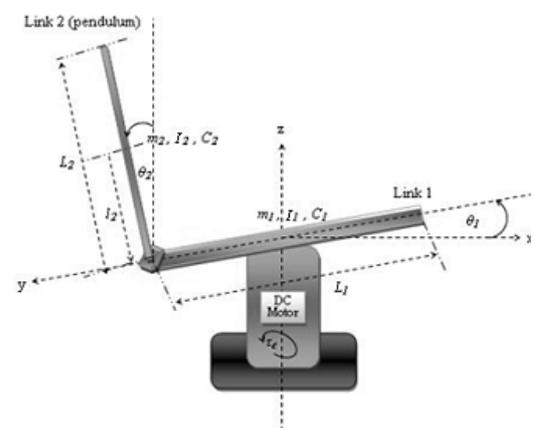
Ravi Indra C. adalah alumni Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

yang titik beratnya berada di atas titik tumpunya [3]. Tujuan dari penelitian ini adalah mendesain kontrol PID yang mampu mempertahankan posisi kesetimbangan tongkat pendulum untuk tetap tegak ke atas (*upright position*). Dan tipe pendulum terbalik yang digunakan adalah *Rotary Inverted Pendulum* yang menggunakan lintasan berbentuk lingkaran. Lintasan berupa lingkaran bertujuan untuk menghilangkan batasan lintasan yang terjadi pada pendulum terbalik dengan lintasan lurus sehingga pendulum dapat disetimbangkan dengan leluasa.

Pendulum terbalik secara alamiah pada dasarnya tidak stabil. Agar tetap tegak, pendulum terbalik harus secara aktif disetimbangkan, antara lain dengan dengan menggerakkan lengan pendulum secara rotasional dengan menggunakan sistem kendali umpan balik [4]. Secara umum, suatu pendulum selalu bergerak kembali ke posisi setimbangnya. Waktu yang diperlukan untuk mencapai posisi kesetimbangannya bergantung pada jarak antara titik tumpu dan titik beratnya. Kesetimbangan ini tidak mudah dicapai.

Untuk itu tujuan dari penelitian ini adalah membuat sebuah sistem rotary inverted pendulum yang dapat mempertahankan kesetimbangan pada posisi ekuilibrium dengan atau tanpa gangguan. Desain dan implementasi rotary inverted pendulum ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai referensi untuk pengendalian sistem non-linier dan bermanfaat dalam pengembangan penelitian dengan objek inverted pendulum dimasa mendatang.

## II. ROTARY INVERTED PENDULUM

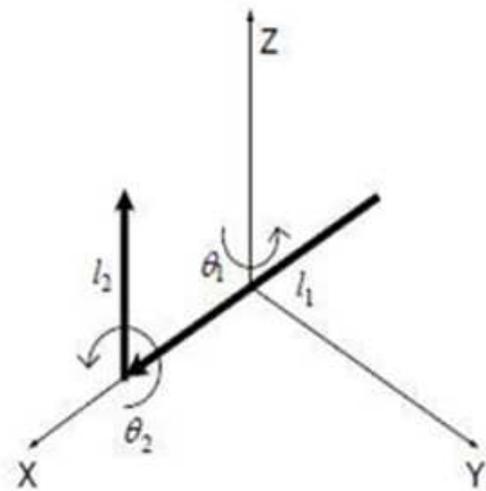


Gambar 1. Rotary Inverted Pendulum

Gambar skema RIP dengan beberapa parameter ditunjukkan dalam Gambar 1. Motor DC digunakan untuk menerapkan torsi  $\tau$  ke lengan pendulum (*link* 1). Perpotongan antara *link* 1 dan *link* 2 (tongkat pendulum) tidak digerakkan tetapi bebas untuk berputar. Kedua lengan memiliki panjang  $L_1$  dan  $L_2$  dan memiliki massa  $m_1$  dan  $m_2$  yang berlokasi masing-masing di  $l_1$  dan  $l_2$ , yang merupakan panjang dari sudut rotasi lengan pusat massa. Lengan memiliki momen inersia  $I_1$  dan  $I_2$ . Setiap rotasi sendi teredam dengan koefisien redaman  $C_1$  dan  $C_2$ , di mana  $C_1$  adalah redaman disediakan oleh bantalan motor dan  $C_2$  adalah redaman yang timbul dari kopel antara lengan 1 dan lengan 2. [3]

A. Model Fisika

Gambar 2 adalah gambar skematik (*free body diagram*) dari RIP beserta arah pergerakannya.



Gambar 2. Skematik Pergerakan Rotary Inverted Pendulum.

Kecepatan angular dari masing - masing *link* diberikan oleh :

$$\bar{\omega}_1 = \dot{\theta}_1 \hat{k} \dots\dots\dots (1)$$

$$\bar{\omega}_2 = -\dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \hat{i} - \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \hat{j} + \dot{\theta}_2 \hat{k} \dots\dots\dots (2)$$

Kecepatan linier dari masing - masing *link* diberikan oleh :

$$\bar{v}_{1c} = \dot{\theta}_1 l_1 \hat{j} \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{v}_{2c} = \dot{\theta}_1 L_1 \sin \theta_2 \hat{i} + (\dot{\theta}_2 l_2 + \dot{\theta}_1 L_1 \cos \theta_2) \hat{j} - l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \hat{k} \dots\dots\dots (4)$$

Motor DC permanen menghasilkan gaya gerak listrik  $E_a$ . Dimana  $E_a$  berbanding lurus dengan kecepatan rotor yang dinyatakan sebagai berikut

$$E_a = K_v \omega_r = K_v \dot{\theta}_1 \dots\dots\dots (5)$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor DC berbanding lurus dengan arus rotor dinyatakan sebagai berikut

$$\tau_e = K_t I_a = K_v I_a \dots\dots\dots (6)$$

Dengan  $K_v$  adalah konstanta untuk tegangan dan  $K_t$  adalah konstanta untuk torsi. Dalam kondisi tunak (*steady state*), persamaan yang menggambarkan tegangan motor adalah :

$$V_a = R_a I_a + E_a \dots\dots\dots (7)$$

Sehingga,

$$I_a = \frac{V_a}{R_a} - \frac{E_a}{R_a} \dots\dots\dots (8)$$

Dari substitusi persamaan 7 dan 5 didapatkan

$$\tau_e = \frac{K_t V_a}{R_a} - \frac{K_t K_v \theta_1}{R_a} \dots\dots\dots (9)$$

dimana,  $V_a$  adalah tegangan yang diterapkan. Dua pertimbangan utama dalam memilih motor adalah untuk menciptakan torsi tinggi dan kecepatan tinggi. Torsi diperlukan untuk lengan putar untuk mengubah arah rotasi dengan cepat dalam rangka untuk menjaga keseimbangan pendulum. Dan kecepatan tinggi diperlukan sedemikian hingga lengan dapat bergerak lebih cepat untuk mencegah jatuhnya pendulum

B. Model Matematika

Sebagaimana diungkapkan pada penelitian tentang pengendalian optimal pendulum penurunan persamaan matematika yang menjelaskan dinamika dari sistem RIP di dasari oleh persamaan Euler-Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial W}{\partial q_i} = Q \dots\dots\dots (10)$$

Di mana,

$q_i$  = vektor posisi sudut (rad)

$\dot{q}_i$  = vektor kecepatan sudut (rad/s)

$Q$  = gaya luar (N)

$L$  = Lagrangian (J)

$W$  = energi yang hilang (J)

Dalam persamaan Euler - Lagrange,  $L$  didefinisikan sebagai ;

$$L(q, \dot{q}) = E_{ktotal} - E_{ptotal} \dots\dots\dots (11)$$

dan

$$q_i = [\theta_1, \theta_2]^T \dots\dots\dots (12)$$

Energi kinetik dari *link* 1 adalah :

$$E_{k_{link1}} = \frac{1}{2} (\bar{v}_{1c}^T m_1 \bar{v}_{1c} + \bar{\omega}_1^T I_1 \bar{\omega}_1) = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{1zz} \dot{\theta}_1^2 \dots\dots\dots (13)$$

karena pusat massa dari lengan seimbang pada titik awal, sedemikian hingga

$$E_{k_{link1}} = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \dots\dots\dots (14)$$

Energi kinetik dari *link* 2 dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$E_{k_{link2}} = \frac{1}{2} (\bar{v}_{2c}^T m_2 \bar{v}_{2c} + \bar{\omega}_2^T I_2 \bar{\omega}_2) \\ E_{k_{link2}} = \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (m_2 L_1^2 + \sin^2(\theta_2) (m_2 l_2^2 + I_{2yy}) + I_{2xx} \cos^2(\theta_2)) + \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (I_{2zz} + m_2 l_2^2) + m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \dots\dots\dots (15)$$

Energi potensial dari *link* 1 dan *link* 2 adalah :

$$E_{p_{link1}} = 0 \\ E_{p_{link2}} = m_2 g l_2 \cos \theta_2 \dots\dots\dots (16)$$

Total energi yang hilang dari sistem adalah jumlahan energi yang hilang dari tongkat pendulum (*link* 2) dan lengan (*link* 1), dinyatakan oleh persamaan berikut,

$$W = \frac{1}{2} C_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} C_2 \dot{\theta}_2^2 \dots\dots\dots (17)$$

Dari persamaan (11), maka didapat Lagrangian:

$$L = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 [(L_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2)^2 + (l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2)^2] - m_2 g l_2 \cos \theta_2 \dots\dots\dots (18)$$

Persamaan Euler-Lagrange dari masing . masing variabel adalah :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} + \frac{\partial W}{\partial \dot{\theta}_1} = \tau_e \dots\dots\dots (19)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} + \frac{\partial W}{\partial \dot{\theta}_2} = 0 \dots\dots\dots (20)$$

Masukkan persamaan (9), (17) dan (18) ke dalam persamaan Euler-Lagrange (19) dan (20), sehingga akan didapatkan persamaan non-linear dari dinamika Rotary Inverted Pendulum sebagai berikut :

$$(I_1 + m_2 L_1^2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 L_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 + (m_2 L_1 l_2 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2 + C_1 \dot{\theta}_1 = \frac{K_t V_a}{R_a} - \frac{K_t K_a \dot{\theta}_1}{R_a} \dots\dots\dots (21)$$

$$(m_2 L_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 L_2^2) \ddot{\theta}_2 + m_2 g l_2 \sin \theta_2 + C_2 \dot{\theta}_2 = 0 \dots\dots\dots (22)$$

Untuk melinearakan model yang telah didapatkan, digunakan pendekatan sebagai berikut :

$$\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta, \dot{\theta}^2 \approx 0 \dots\dots\dots (23)$$

Sehingga persamaan menjadi :

$$h_1 \ddot{\theta}_1 + h_2 \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_1 = h_5 V_a - h_6 \dot{\theta}_1 \dots\dots\dots (24)$$

$$h_2 \ddot{\theta}_1 + h_3 \ddot{\theta}_2 + h_4 \theta_2 + C_2 \dot{\theta}_2 = 0 \dots\dots\dots (25)$$

Dimana didefinisikan :

$$h_1 = I_1 + m_2 L_1^2, \quad h_2 = m_2 L_1 l_2, \quad h_3 = I_2 + m_2 L_2^2$$

$$h_4 = m_2 g l_2, \quad h_5 = \frac{K_t}{R_a}, \quad h_6 = \frac{K_t K_v}{R_a}$$

Dengan eliminasi, diperoleh persamaan :

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{-h_3(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - h_2 h_4 \theta_2 + h_2 C_2 \dot{\theta}_2 + h_3 h_5 V_a}{h_1 h_3 - h_2^2} \dots\dots\dots (26)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{h_2(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 + h_1 h_4 \theta_2 + h_1 C_2 \dot{\theta}_2 - h_2 h_5 V_a}{h_1 h_3 - h_2^2} \dots\dots\dots (27)$$

Misalkan,

$$H = \begin{bmatrix} h_3 & -h_2 \\ -h_2 & h_1 \end{bmatrix}, \quad \det[H] = h_1 h_3 - h_2^2$$

$$d_1 = \frac{a_{11}}{\det[H]} = \frac{h_3}{\det[H]}, \quad d_2 = \frac{a_{12}}{\det[H]} = -\frac{h_2}{\det[H]}$$

$$d_3 = \frac{a_{21}}{\det[H]} = -\frac{h_2}{\det[H]}, \quad d_4 = \frac{a_{22}}{\det[H]} = \frac{h_1}{\det[H]}$$

Maka persamaan (2-26), (2-27) sistem Rotary Inverted Pendulum dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\ddot{\theta}_1 = -d_1(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - d_2 h_4 \theta_2 - d_2 C_2 \dot{\theta}_2 + d_1 h_5 V_a \dots\dots\dots (27)$$

$$\ddot{\theta}_2 = -d_3(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - d_4 h_4 \theta_2 - d_2 C_2 \dot{\theta}_2 + d_3 h_5 V_a \dots\dots\dots (28)$$

Persamaan keadaan dan output dari sistem Rotary Inverted Pendulum adalah

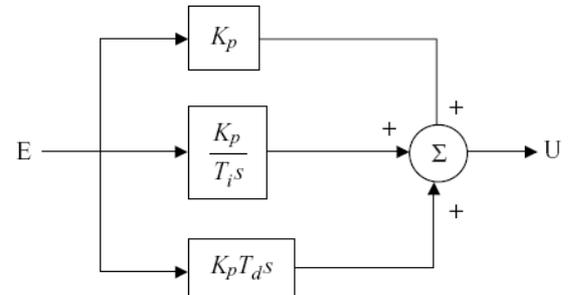
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -d_1(h_6 + C_1) & -d_2 h_4 & -d_2 C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -d_3(h_6 + C_1) & -d_4 h_4 & -d_2 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 h_5 \\ 0 \\ d_3 h_5 \end{bmatrix} \quad (29)$$

C. Kontroler PID

Menurut Ibrahim [5] Kontroler PID sering disebut sebagai istilah tiga kontroler yaitu kontroler proporsional yang error umpan balik dikalikan dengan gain  $K_p$ . Gain yang sangat tinggi dapat menyebabkan sistem tidak stabil dan gain yang sangat rendah menyebabkan sistem untuk menjauh. Kontroler integral adalah kontroler yang error umpan balik di kalikan dengan gain  $K_i$ . Gain dapat disetel untuk mendorong error menuju nol dalam waktu yang dibutuhkan. Terlalu tinggi gain menyebabkan sistem berosilasi dan terlalu kecil gain menyebabkan respon sistem lamban. Kontroler derivatif adalah kontroler yang error umpan baliknya dikalikan dengan gain  $K_d$ . Gain  $K_d$  dapat disetel untuk mendapatkan waktu tunda yang lebih baik

.Sekali lagi, jika gain terlalu tinggi menyebabkan sistem berosilasi dan jika terlalu rendah menyebabkan respon sistem lambat.

Gambar 3 menunjukkan blok diagram dari kontroler PID klasik. Menyetel kontroler meliputi penyesuaian parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  untuk tujuan mendapatkan respon yang memuaskan. Karakteristik kontroler PID telah dikenal baik dan mapan. Serta kontroler paling modern didasarkan pada beberapa bentuk kontroler PID.



Gambar 3. Kontroler PID sistem waktu-kontinyu

Hubungan input-output suatu kontroler PID dapat dinyatakan sebagai

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \dots\dots\dots (30)$$

dimana  $u(t)$  adalah keluaran dari kontroler dan  $e(t) = r(t) - y(t)$ , dimana  $r(t)$  adalah set-point yang diinginkan (reference input) dan  $y(t)$  adalah keluaran plant.  $T_i$  dan  $T_d$  dikenal sebagai waktu aksi integral dan derivatif. Perhatikan bahwa (30) terkadang ditulis sebagai,

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (31)$$

Dimana,

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{dan} \quad K_d = K_p T_d \dots\dots\dots (32)$$

Melakukan Transformasi Laplace (30), kita dapat menuliskan fungsi alih PID waktu-kontinyu sebagai

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_d s \dots\dots\dots (33)$$

Untuk mengaplikasikan kontroler PID menggunakan suatu komputer digital kita harus mengubah (30) dari waktu-kontinyu ke representasi diskrit. Cara yang paling sederhana melakukannya adalah menggunakan pendekatan trapezoidal untuk integral dan pendekatan backward difference untuk derivatif:

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \quad \text{dan} \quad \int_0^t e(t) dt \approx \sum_{k=1}^n e(kT)$$

Persamaan (30) kemudian menjadi

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{T}{T_i} \sum_{k=1}^n e(kT) + T_d \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \right] + u_0 \dots\dots\dots (34)$$

Bentuk kontroler PID ini juga dikenal sebagai kontroler PID positional.

Bentuk diskrit kontroler PID dapat juga diturunkan dengan menemukan Transformasi Z dari (33):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[ 1 + \frac{T}{T(1-z^{-1})} + T_d \frac{(1-z^{-1})}{T} \right] \dots\dots\dots (35)$$

Ekspansi (2-35) memberikan

$$u(kT) = u(kT - T) + K_p [e(kT) - e(kT - T)] +$$

$$\frac{K_p T}{T_i} e(kT) + \frac{K_p T_d}{T_i} [e(kT) - 2e(kT - T) - e(kT - 2T)] \dots\dots\dots (36)$$

Bentuk kontroler PID ini dikenal sebagai kontroler PID velocity.

D. Hand tuning Kontroler PID

Kontroler PID dapat di tuning dalam beberapa cara, antara lain Ziegler-Nichols tuning, loop shaping, metode analitis, optimisasi, pole placement, auto tuning dan hand tuning (Smith,1979; Astrom & Hagglund,1995). Pada penelitian ini digunakan cara hand tuning untuk menentukan besar  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Hal ini dilakukan karena ada kendala untuk melakukan cara lain yang disebutkan diatas. Kendala tersebut adalah tidak dapat melihat respons motor secara langsung karena tidak digunakannya sensor untuk mengukur kecepatan motor saat sistem berjalan. Selain itu tidak adanya model matematis dari motor membuat cara analitis sulit untuk dilakukan.

Menurut Smith [6], prosedur untuk melakukan *hand tuning* adalah sebagai berikut :

- Melepaskan kontroler integral dan differensial dengan memberikan nilai  $K_i = 0$  dan  $K_d = 0$ .
- Mengatur nilai  $K_p$  hingga didapatkan respons yang diinginkan, dengan mengabaikan *offset* dari *setpoint*.
- Dengan terus menaikkan nilai  $K_p$ , nilai dari  $K_d$  dinaikkan untuk mengurangi *overshoot* yang terjadi.
- Naikkan nilai  $K_i$  untuk mengurangi *offset*.

Keuntungan dari *hand tuning* adalah dapat dilakukan dengan segera, *on-line* dan dapat melihat dengan cepat *respons* sistem setelah perubahan  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ . Kerugian dari cara ini adalah kesulitan untuk melihat apakah setting akhir dari kontroler merupakan nilai optimal atau tidak [7].

III. PERANCANGAN DAN PEMBUATAN ALAT

A. Perancangan Sistem

Perancangan alat ini dilakukan secara bertahap yaitu blok demi blok, sehingga akan memudahkan dalam menganalisa setiap bloknnya maupun secara keseluruhan. Perancangan dan pembuatan sistem ini terdiri atas dua bagian yaitu perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perancangan perangkat lunak (*software*). Perancangan ini meliputi :

- Perancangan sistem elektrik Rotary Inverted Pendulum.
- Perancangan sistem mekanik Rotary Inverted Pendulum.
- Spesifikasi alat.
- Perancangan algoritma PID pada Digital Signal Processor TMS320F2812.

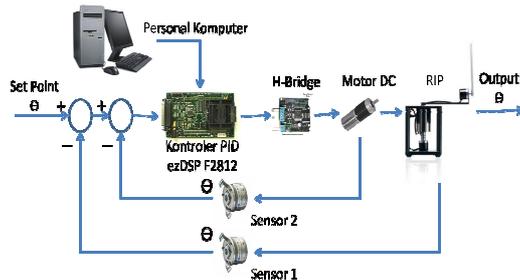
B. Blok Diagram

Untuk mempermudah pengerjaan alat maka perlu adanya diagram blok umum sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 4 :

Keterangan dari blok diagram diatas adalah sebagai

berikut :

- Sensor 1 dan 2 adalah rotary encoder yang digunakan untuk mengetahui posisi sudut pendulum dan posisi motor.
- Pusat pengendalian sistem menggunakan Digital Signal Processor TMS320F2812 yang memberikan keluaran berupa duty cycle PWM kepada driver motor.
- Motor yang digunakan adalah motor DC, yang berfungsi sebagai aktuator dalam proses penyeimbangan pendulum terbalik.
- Driver motor menggunakan modul EMS 5A H-Bridge dengan IC MC33887VW.



Gambar 4 Blok Diagram Sistem Rotary Inverted Pendulum

C. Perancangan Driver Motor

Untuk driver motor DC digunakan Embedded Module Series (EMS) 5A H-Bridge yang menggunakan IC MC33887VW. Modul ini merupakan driver H-Bridge yang dirancang untuk menghasilkan drive 2 arah dengan arus kontinyu sampai dengan 5 A pada tegangan 5 Volt sampai 40 Volt. Modul ini mampu men-drive beban-beban induktif seperti misalnya relay, solenoida, motor DC, motor stepper, dan berbagai macam beban lainnya. Modul EMS 5A digambarkan dalam Gambar 5.

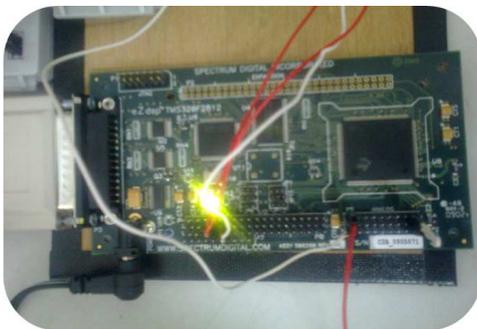


Gambar 5 Driver H-Bridge EMS 5A

D. Rangkaian Digital Signal Processor TMS320F2812

Pada pendulum terbalik ini digunakan Digital Signal Processor TMS320F2812 sebagai pusat dari pengolahan data. Agar sebuah Digital Signal Processor dapat bekerja sebagai pengontrol, kaki-kaki/pin Digital Signal Processor dihubungkan dalam rangkaian-rangkaian eksternal. Dalam perancangan ini, pin yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Pin ADCINA0  
Pin ini terhubung dengan sensor potensiometer. Pin ini merupakan input dari kontroler.
- Pin ADCLO, ADCREFP, dan ADCREFM  
Pin ini merupakan pin yang digunakan sebagai tegangan referensi dari ADC. Sedikit berbeda dengan mikrokontroler, Digital Signal Processor mempunyai tiga buah referensi ADC yaitu : low , middle, dan positive. Untuk referensi low diberikan tegangan sebesar 0 Volt. Sedangkan untuk referensi middle diberikan tegangan sebesar 1 Volt dan untuk referensi positive diberikan tegangan sebesar 2 Volt. Untuk tegangan yang diberikan pada referensi middle dan positive mempunyai ketentuan sebagai berikut :  
$$V_{ADCREFP} - V_{ADCREFM} = 1 \dots\dots\dots (37)$$
- Pin PWM1, PWM2, dan PWM4



Gambar 6. Modul Ezdsp F2812 dengan DSP TMS320F2812

Pin ini merupakan pin output dari Digital Signal Processor. Bentuk sinyal keluaran dari pin ini adalah sinyal pulse width modulation (PWM). Pada perancangan ini, sinyal PWM1 dan PWM2 digunakan sebagai penentu arah putaran motor. Jika PWM1 mempunyai besar duty cycle 100% dan PWM2 mempunyai besar duty cycle 0% maka motor akan berputar searah dengan arah jarum jam. Jika PWM2 mempunyai besar duty cycle 0% dan PWM2 mempunyai besar duty cycle 100% maka motor akan berputar berlawanan dengan arah jarum jam. Pin PWM4 digunakan sebagai enable.

E. Pemilihan Motor DC

Motor yang dipakai pada alat harus memenuhi spesifikasi dari perancangan meliputi torsi dan kecepatannya. Torsi motor berhubungan dengan beban yang ditanggung oleh motor meliputi : lengan pemutar, poros dan tongkat pendulum (rod). Sedangkan kecepatan motor berhubungan dengan kecepatan jatuh dari rod menuju sudut yang dibatasi.

Besar torsi motor yang dibutuhkan sebanding dengan total beban dan berbanding terbalik dengan panjang lintasan. Hubungan antara torsi motor, beban motor, dan panjang lintasan dapat ditulis dengan persamaan,

$$\tau = \frac{\text{total beban}}{\text{jari-jari lintasan}} \dots\dots\dots (38)$$

Pada perancangan ini panjang lengan pemutar adalah 15 cm dan total beban adalah 700 gram. Dengan memasukkan spesifikasi tersebut pada persamaan 4.3 diatas didapatkan :

$$\tau = \frac{0.700}{15} \dots\dots\dots (39)$$

Maka motor DC yang digunakan harus mempunyai torsi minimal sebesar 0,0467 Kg/cm atau 46,7 gram/cm. Untuk menentukan spesifikasi kecepatan motor terlebih dahulu harus ditentukan besar simpangan maksimal dari rod. Tujuan dari penentuan simpangan maksimal adalah untuk mengetahui kecepatan jatuhnya rod pada simpangan tersebut. Setelah mengetahui besar simpangan tersebut, setelah mengetahui besar kecepatan jatuhnya rod dapat ditentukan spesifikasi untuk kecepatan motor dimana kecepatan motor harus lebih besar dibandingkan kecepatan jatuh rod. Persamaan kecepatan jatuhnya rod dituliskan pada persamaan 4.4 :

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \dots\dots\dots (40)$$

Dimana  $\dot{\theta}$  adalah besar kecepatan sudut (rad/s),  $\theta$  adalah simpangan maksimal dari rod. Pada perancangan ini simpangan dibatasi maksimum sebesar  $\pm 100$  atau  $\pm 0.1745$  rad dan waktu jatuh yang dibutuhkan pendulum dari posisi tegak (upright) ke posisi bawah (downright) adalah 0,7 detik. Berdasarkan spesifikasi perancangan tersebut, didapatkan kecepatan sudut sebesar :

$$\dot{\theta} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\pi}{0,7} = 4,4880 \text{ rad/s} = \frac{4,4880 \cdot 60}{2\theta} = 42,8572 \text{ rpm.}$$

F. Perancangan Mekanik Rotary Inverted Pendulum



Gambar 7. Hasil rancang bangun Rotari Inverted Pendulum

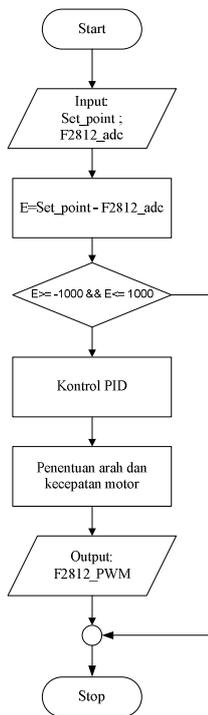
Mekanik dari Rotary inverted Pendulum mempunyai tiga bagian penting yaitu : rod atau tongkat pendulum yang akan dipertahankan posisinya (upright position), motor DC, dan lengan pendulum. Ujung bawah rod diletakkan pada poros rotary encoder, sehingga setiap pergeseran sudut pada rod, maka akan terjadi pergeseran sudut pula pada poros rotary encoder tersebut. rotary encoder diletakkan pada sebuah lengan yang terhubung dengan poros motor DC, sehingga pada saat terjadi kemiringan pada pendulum terbalik, maka motor DC akan memutar lengan tersebut dengan arah sesuai dengan kemiringan dari pendulum dengan kecepatan tertentu. Gambar hasil perancangan mekanik ditunjukkan dalam Gambar 7.

G. Spesifikasi Alat

Spesifikasi alat yang dibuat adalah sebagai berikut:

- Sistem penggerak menggunakan motor DC.
- Menggunakan catu daya 5V untuk catu potensiometer linier, Digital Signal Processor dan driver motor EMS 5A H-Bridge.
- Menggunakan catu daya 24V untuk motor DC.
- Sensor posisi menggunakan rotary encoder.
- Berat tongkat pendulum (*rod*) 200 g dengan bahan aluminium.
- Berat total rod, lengan penggerak, rotary encoder dan komponen lain yang terdapat pada lengan pemberat 700 g.
- Panjang rod 30 cm.
- Panjang lengan pendulum/chart 15 cm.

H. Perancangan Perangkat Lunak (software)



Gambar 8. Flowchart Program

Perangkat lunak pada penelitian ini dikerjakan pada program matlab/simulink dan di-compile dengan menggunakan program *code composer studio*. Tuning kontroler PID yang digunakan adalah metode *hand tuning*. Flowchart perancangan perangkat lunak ditunjukkan dalam Gambar 8.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Tujuan pengujian sistem ini adalah untuk menentukan apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan perancangan. Sampai laporan ini ditulis masih terdapat kendala teknis yang dihadapi. Yaitu belum berfungsinya GPIO dari modul DSP, untuk menerima masukan lebih dari satu kanal, sehingga tidak bisa melakukan pengujian untuk lebih dari satu posisi. Untuk itu yang digunakan adalah satu sensor yaitu sensor yang terdapat diujung tongkat

pendulum (*rod*). Yang sedianya untuk posisi digunakan sensor rotary encoder, namun karena ada kendala teknik diatas maka sensor tersebut diganti dengan potensiometer dan diumpangkan kemasukan ADC dari modul DSP.

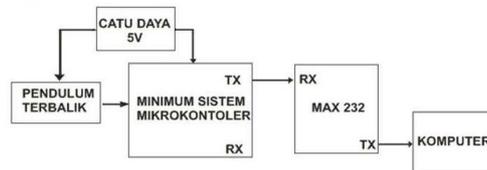
Pengujian pada sistem ini meliputi pengujian setiap blok maupun pengujian secara keseluruhan. Pengujian setiap blok ini dilakukan untuk menemukan letak kesalahan dan mempermudah analisis pada sistem apabila alat tidak bekerja sesuai dengan perancangan. Pengujian pada sistem ini dibagi menjadi lima bagian, yaitu:

- Pengujian sistem mekanik
- Pengujian motor DC
- Pengujian driver motor
- Pengujian sistem secara keseluruhan

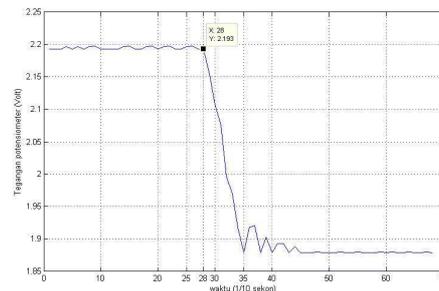
A. Pengujian Sistem Mekanik

Tujuannya untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan pendulum terbalik dari kondisi tegak (*upright position*) sampai pada kondisi jatuh (*downright position*). Langkah pengujian

- Merangkai alat seperti dalam Gambar 9
- Menjalankan software plotter untuk melihat perubahan tegangan dari potensiometer pada komputer dengan menggunakan komunikasi serial.
- Menyimpan hasil perubahan tegangan potensiometer tersebut dalam format file .txt
- Melakukan import data format file .txt tersebut pada program matlab untuk menampilkan grafik perubahan tegangan terhadap waktu.



Gambar 9. Diagram blok pengujian sistem mekanis



Gambar 10. Gambar respons mekanis Rotary Inverted Pendulum

Gambar 10 menunjukkan grafik perubahan tegangan dari potensiometer pada saat berada pada kondisi tegak hingga jatuh. Sumbu y menunjukkan tegangan yang diberikan potensiometer dan sumbu x menunjukkan waktu yang ditempuh rod untuk jatuh. Periode sampling yang digunakan pada mikrokontroler adalah sebesar 0,1 detik. Sehingga berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat waktu yang dibutuhkan *rod* dari tegak hingga

jatuh adalah

$$t_{jatuh} = (35 - 28) \times 0,1 = 0,7 \text{ detik}$$

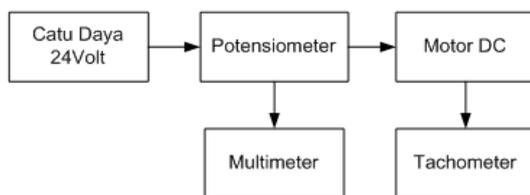
Dari pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem yang dirancang untuk mengendalikan *inverted pendulum* harus bekerja lebih cepat dari 0,7 detik.

**B. Pengujian Motor DC**

Bertujuan untuk mengetahui karakteristik motor DC yang digunakan pada sistem Rotary Inverted Pendulum terhadap tegangan. Adapun langkah pengujiannya adalah sebagai berikut,

- Menyusun alat seperti dalam Gambar 11.
- Mengatur tegangan input motor mulai dari 0 volt hingga 24 volt dengan interval 0,5 volt.
- Mengukur kecepatan motor dengan tachometer.
- Menggambar data kecepatan motor untuk mendapatkan grafik karakteristik kecepatan motor terhadap tegangan.

Grafik karakteristik motor ditunjukkan dalam Gambar 12.



Gambar 11. Diagram blok pengujian motor DC



Gambar 12. Gambar hubungan antara tegangan motor terhadap kecepatan motor

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa motor akan berputar dengan tegangan minimal sebesar 2,5 volt sedangkan untuk tegangan dibawah 2,5 volt motor tidak berputar. Selain itu dapat dilihat bahwa hubungan antara tegangan dan kecepatan motor relatif linier. Sehingga dapat disimpulkan bahwa motor DC tipe Globe 20V ini cukup baik untuk diterapkan pada sistem *Rotary Inverted Pendulum*.

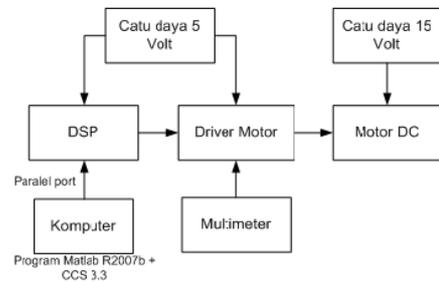
**C. Pengujian Driver Motor**

Bertujuan untuk mengetahui output dari driver motor apabila diberi input yang berbeda-beda. Dan langkah-langkah pengujiannya adalah sebagai berikut,

- Merangkai alat seperti dalam Gambar 13.
- Membuat program untuk menentukan arah dan kecepatan motor pada software matlab.
- Compile program yang telah dibuat pada software matlab dengan software Code Composer Studio.
- Mengukur tegangan pada pin PWM 4 dari digital

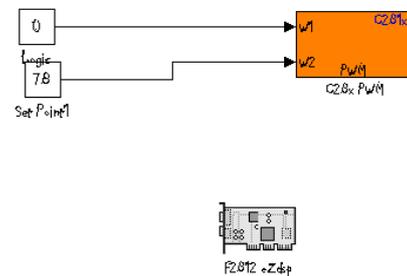
signal processor yang digunakan sebagai input pin enable driver motor.

- Mengukur tegangan pada pin MOUT 1 dan MOUT 2 dari driver motor yang digunakan sebagai tegangan untuk motor.
- Menggambar data yang didapatkan pada grafik.



Gambar 13. Diagram Blok Pengujian Driver Motor

Program Pengujian Driver motor ditunjukkan dalam Gambar 14. Pada program dilakukan setting output PWM pada block C281x PWM yang terdapat pada Matlab/Simulink. PWM 1 di setting aktif pada logika tinggi dan PWM 2 di setting aktif pada logika rendah. Dengan setting tersebut maka apabila input W1 pada block diberi masukan bernilai 100 maka PWM 1 akan aktif sehingga mengeluarkan tegangan 3,3 Volt dan PWM 2 akan tidak aktif. Apabila input W1 pada block diberi masukan bernilai 0 maka PWM 1 akan tidak aktif dan PWM 2 akan aktif sehingga mengeluarkan tegangan 3,3 volt.



Gambar 14. Program Pengujian Driver Motor

TABEL I  
HASIL PENGUJIAN ARAH PUTARAN MOTOR

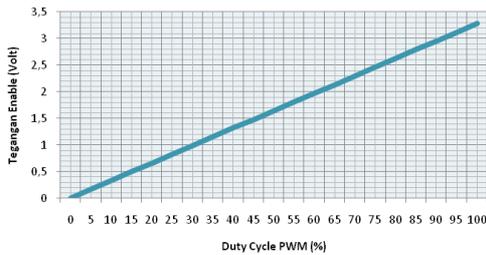
Input W1 (%)	Input W2 (%)	Tegangan pada pin (volt)					arah motor
		PWM 1	PWM 2	PWM 4	Mout 1	Mout 2	
0	100	0	3.3	3.3	15	0	kiri
50	100	1.67	1.67	3.3	7.5	7.5	diam
100	100	3.3	0	3.3	0	15	kanan

Pengaturan untuk PWM 4 dilakukan dengan memberikan nilai pada input W2 dari block. Nilai yang diberikan adalah nilai duty cycle PWM yang akan menentukan besar tegangan pada pin MEN driver motor. Besar tegangan pada pin MEN driver motor akan menentukan besar tegangan pada MOUT motor sehingga berpengaruh pada kecepatan motor. Pada pengujian yang pertama logika untuk PWM 4 dibuat tetap dan logika untuk PWM 1 dan PWM 2 diubah-

ubah. Hasil dari pengujian diperlihatkan dalam Tabel I.

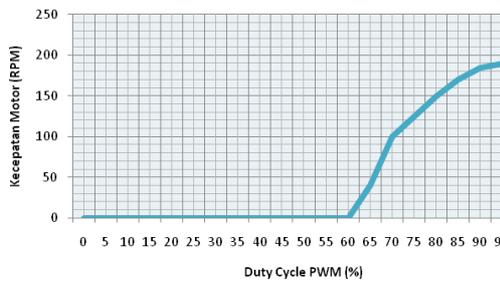
Untuk pengujian yang kedua logika untuk input W1 dibuat tetap yaitu 100 dan logika untuk input W2 dibuat berubah – ubah. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan tegangan pada pin MEN driver motor terhadap tegangan dan kecepatan motor.

Dalam Gambar 15 dapat dilihat grafik hubungan antara tegangan enable pin MEN driver motor dengan *duty cycle* PWM pada pin PWM 4 *digital signal processor* dari grafik dapat dilihat bahwa hubungan antara kedua nilai tersebut linier.

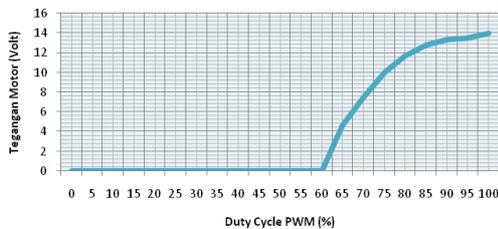


Gambar 15. Hubungan Antara Duty Cycle PWM dengan Enable Driver Motor

Hubungan antara *duty cycle* PWM terhadap tegangan dan kecepatan motor dapat dilihat dalam Gambar 16 dan 17. Berdasarkan hasil pengujian driver motor dapat dilihat arah motor dipengaruhi oleh kondisi PWM 1 dan PWM 2 dan kecepatan motor dipengaruhi oleh kondisi PWM 4. Motor akan mulai bergerak ketika *duty cycle* bernilai 60%. Tegangan enable, tegangan motor dan *duty cycle* memiliki hubungan yang linier. Berdasarkan data-data tersebut driver motor EMS 5A H-Bridge memiliki kemampuan yang baik untuk men-drive motor DC.



Gambar 16. Hubungan Antara Duty Cycle PWM dengan Kecepatan Motor



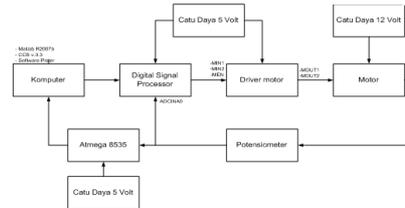
Gambar 17. Hubungan Antara Duty Cycle PWM dengan Tegangan Motor

D. Pengujian Keseluruhan

Bertujuan untuk mengetahui kerja dari perangkat keras dan perangkat lunak setelah diintegrasikan dalam

sebuah sistem terpadu. Sedangkan langkah-langkah pengujiannya adalah sebagai berikut,

- Memasang alat yang dibutuhkan seperti dalam Gambar 18.
- Mengaktifkan semua catu daya.
- Membuat program untuk pengendalian Rotary Inverted Pendulum dengan kontroler PID pada software matlab/simulink.
- Melakukan incremental build pada matlab/simulink
- Melakukan running program pada code composer studio.
- Mengamati kinerja dari Rotary Inverted Pendulum dalam menjaga kesetimbangan
- Melihat dan mengamati grafik respons kemiringan pada program software plotter laboratorium sistem kontrol TEUB dan selanjutnya menyimpan data tersebut dalam format file .txt
- Melakukan import data format .txt tersebut pada matlab untuk menghasilkan grafik respons kemiringan Rotary Inverted Pendulum.
- Merubah nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  sampai didapatkan respons yang diinginkan.



Gambar 18. Diagram Blok Pengujian Keseluruhan Sistem

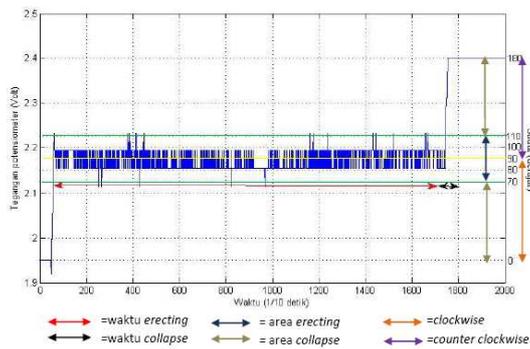
TABEL II  
HASIL PENGATUTAN NILAI  $K_i$  DENGAN  $K_p$  DAN  $K_d$  TETAP PADA RIP

$K_p$	$K_d$	$K_i$	waktu <i>erecting</i> (sekon)			
			percobaan ke-			rata-rata
			1	2	3	
100	0.00000008	1	50	65	55	57
100	0.00000008	10	65	65	70	67
100	0.00000008	50	70	85	65	73
100	0.00000008	75	90	85	100	92
100	0.00000008	100	100	85	80	88
100	0.00000008	250	115	100	135	117
100	0.00000008	500	120	115	120	118
100	0.00000008	750	130	150	140	140
100	0.00000008	1000	180	175	185	180
100	0.00000008	2000	180	180	175	178

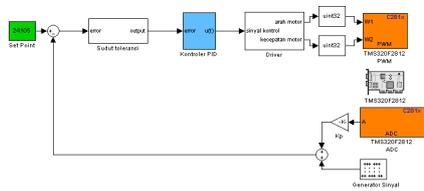
Pada pengujian ini tuning kontroler PID dilakukan dengan metode hand tuning yaitu sebuah metode dengan mengubah nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  secara manual tanpa perhitungan matematis yang didasari pengamatan terhadap respons sistem (Smith,1979). Cara ini biasa disebut dengan metode trial and error. Prosedur untuk melakukan hand tuning, yang pertama kali adalah mencari nilai  $K_p$  yang terbaik. Selanjutnya mencari nilai  $K_i$  dan  $K_d$  sampai ditemukan kombinasi yang hasilnya memuaskan seperti terlihat dalam Tabel II. Dan

tanggapan keluaran sistem ditunjukkan dalam Gambar 19.

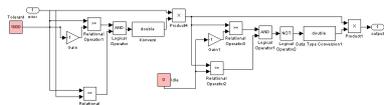
Dalam Gambar 20 dapat dilihat rancangan program untuk Rotary Inverted Pendulum yang dibuat pada matlab/simulink. Setelah program tersebut selesai dibuat dilakukan proses incremental build dengan cara membuka menu pada matlab/simulink untuk melakukan proses tersebut. Setelah proses incremental build berhasil matlab akan membuka program code composer studio secara otomatis. Pada program tersebut program matlab/simulink diubah menjadi bahasa C lalu dilakukan proses compile dan running sehingga digital signal processor akan melakukan instruksi sesuai program.



Gambar 19. Respons kemiringan Rotary Inverted Pendulum dengan nilai  $K_p=100$  ;  $K_d=8 \times 10^{-8}$  ;  $K_i=1000$



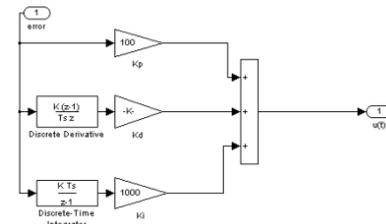
Gambar 20. Blockset program Rotary Inverted Pendulum



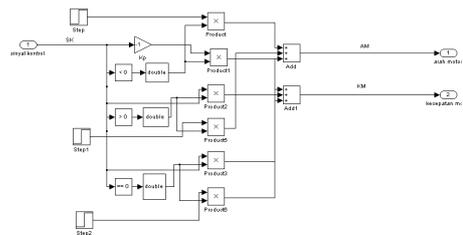
Gambar 21. Blockset Sudut Toleransi program Rotary Inverted Pendulum

Blok setpoint berisi nilai yang diinginkan. Nilai tersebut menggambarkan pembacaan dari Analog to Digital Converter dari Digital Signal Processor pada saat rod dari pendulum berada pada posisi tegak. Gambar 21 menggambarkan blok sudut toleransi berisi blok logika untuk membuat batasan sudut pada sistem. Seperti dijelaskan sebelumnya simpangan maksimal pada sistem Rotary Inverted Pendulum adalah sebesar 100. Gambar 22 menunjukkan blok kontroler PID. Blok ini yang berisi rangkaian kontroler proporsional integral differensial. Nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  diubah-ubah di dalam blok ini. Blok driver menerjemahkan hasil keluaran kontroler menjadi sebuah nilai yang mewakili kecepatan dan arah motor. Blok rangkaian driver ditunjukkan

dalam Gambar 23.



Gambar 22. Blockset Kontroler PID program Rotary Inverted Pendulum



Gambar 23. Blockset Driver program Rotary Inverted Pendulum

V. KESIMPULAN DAN PROSPEK

Secara keseluruhan dari pengujian dapat dilihat bahwa Rotary Inverted Pendulum yang dirancang telah berjalan dengan baik. Proses penyeimbangan dengan bergerak sesuai arah kemiringan dengan kecepatan tertentu dapat berjalan sebagaimana mestinya.

Dengan menggunakan algoritma PID sistem dapat mengambil keputusan tentang arah dari pergerakan motor sebagai upaya untuk menyeimbangkan tongkat pendulum. Parameter PID di tentukan dengan menggunakan metode hand tuning dan didapatkan nilai  $K_p=100$ ,  $K_i=1000$ , dan  $K_d=8 \times 10^{-8}$ . Nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang didapat tersebut tidak bersifat mutlak karena dengan metode tuning dan atau jumlah percobaan yang berbeda maka akan didapatkan parameter PID yang berbeda pula.

Penelitian kedepan dalam rangka memperbaiki hasil dari penelitian sekarang yaitu dengan melakukan identifikasi sistem RIP untuk mendapatkan model matematikanya yang selanjutnya dilakukan disain kontroler PID yang optimal. Secara elektronik menambahkan sensor *rotary encoder* yang digunakan untuk mendapatkan data kecepatan motor dan pengembangan lebih lanjut sistem RIP ini dengan melibatkan kontroler yang berbeda.

PENGHARGAAN

Keseluruhan penelitian ini didanai oleh Dana Pengembangan Pendidikan Universitas Brawijaya dengan kontrak nomor : 61/un10.6/PG/2012 tanggal : 9 April 2012.

REFERENSI

[1] Xue,D., Chen, Y. and Atherton, D.P. 2007. *Linear Feedback Control Analysis and Design with MATLAB*. SIAM, Philadelphia, USA

- [2] Åström, K. J., Hagglund, T., 1995. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. NC, USA.
- [3] Sukontanakarn, Viroch. 2009. *Real Time Optimal Control for Rotary Inverted Pendulum*. Asian Institute of Technology. Pathumtani. Thailand.
- [4] Stephani, Herlina. 2010. *Pengendalian Optimal Furuta Pendulum*, Surabaya. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [5] Ibrahim, Dogan., 2006. *Microcontroller Based Applied Digital Control*. John Willey and Sons, England.
- [6] Innovative Electronics. *EMS 5A H-Bridge Datasheet*.
- [7] Jantzen, Jan, 1998. *Tuning of Fuzzy PID Controller*, Technical University of Denmark, Department of Automation. Denmark.
- [8] John C., Ruan L. 2004. Software of PID Control of An Inverted Pendulum Using the PIC16F684. Microchip Technology inc.
- [9] Spectrum Digital Inc, 2003. eZdsp F2812 Technical Reference DSP Development System, Spectrum Digital.