

ANALISIS KENDALI *PD PLUS GRAVITY* UNTUK PERANGKAT PENGATUR POSISI SUMBER ION DECY-13

Saefurrochman

PSTA-BATAN, Kawasan BATN Yogyakarta, Depok, Sleman, Yogyakarta,
saefurrochman@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS KENDALI *PD PLUS GRAVITY* UNTUK PERANGKAT PENGATUR POSISI SUMBER ION DECY-13. Arus proton DECY-13 yang optimal dapat tercapai dengan salah satu cara yaitu dengan mengatur posisi sumber ion yang akurat. Untuk itu dibutuhkan sebuah perangkat pengatur posisi yang mampu menggerakkan seluruh bagian sumber ion (termasuk tangkai dan kelongsong tangkai). Konstruksi dari perangkat pengatur posisi ini memiliki kesamaan dengan manipulator yang memiliki dua buah *link*. Pada penelitian ini disimulasikan kendali posisi menggunakan pengendali *PD plus gravity* untuk perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 yang akan dibandingkan dengan pengendali PD. Simulasi dilakukan menggunakan program Simulink Matlab. Penelitian ini ditekankan pada penalaan nilai K_p dan K_d yang sederhana yaitu dengan cara memvariasi frekuensinya. Jangkauan frekuensi dibatasi antara 0,025 Hz hingga 10 KHz. Dengan membandingkan frekuensinya, dapat dilihat tanggapan kendali dari perangkat tersebut berupa *overshoot*, *rise time* serta *settling time* dan kinerjanya yang diwakili oleh nilai ISE, IAE dan ITAE. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa, secara umum perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 dengan pengendali *PD plus gravity* memiliki tanggapan dan kinerja yang relatif lebih baik dibandingkan dengan pengendali PD, khususnya parameter IAE dan ITAE. Frekuensi 500 Hz dipilih untuk menala K_p dan K_d . Frekuensi ini dipilih, karena dianggap optimal untuk mendapatkan tanggapan yang paling cepat dan kinerja yang paling baik.

Kata kunci: DECY-13, sumber ion, pengendali PD, pengendali *PD plus gravity*, frekuensi.

ABSTRACT

ANALYSIS OF *PD PLUS GRAVITY* CONTROLLER FOR THE POSITION CONTROL OF DECY-13 ION SOURCE. The optimum proton current of DECY-13 can be obtained by controlling the position of ion source accurately. Here, the position control device is needed to drive all parts of ion source. It is seen that the construction of the device is similar to manipulator with two links. In the experiment, position control with *PD plus gravity* was simulated for the position control apparatus of DECY-13 ion source and it was compared with conventional PD controller. It was simulated by using Simulink Matlab software. The simple tuning of K_p dan K_d was the priority of this simulation. It was conducted by varying of its frequency. The range of frequency was limited between 0.025 Hz until 10 KHz. Based on the frequency comparison, the response and performance of the controller for the device could be observed. This response included: *overshoot*, *rise time* and *settling time* and also its performance was represented by ISE, IAE and ITAE. The simulation results show that generally, the response and performance *PD plus gravity* controller are better than conventional PD controller. The frequency of 500 Hz is chosen to tune K_p and K_d . This frequency is an optimum frequency to obtain the fastest response and the best performance.

Key words: DECY-13, ion source, PD controller, *PD plus gravity* controller, frekwensi.

PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan-BATAN, Yogyakarta sebagai satu-

satunya institusi akselerator (pusat rancangbangun alat pemercepat partikel) di Indonesia mencoba menjawab tantangan tersebut dengan memulai kegiatan rancangbangun siklotron “khas” Indonesia yang

diberi nama DECY-13 (*Design of Experimental Cyclotron in Yogyakarta-13 MeV*). Kegiatan ini telah tertuang dalam Renstra BATAN 2010-2014 [1].

Berdasarkan rancangan konseptual, akan didesain sebuah siklotron proton untuk fasilitas PET dengan energi dan arus berkas proton 13 MeV/50 μ A. Sumber ion merupakan salah satu komponen utama. Sumber ion bertipe PIG dengan arus keluaran 100 μ A. Posisi sumber ion adalah radial terhadap sisi tangki siklotron [2].

Untuk mendapatkan arus proton optimal, sumber ion dilengkapi dengan perangkat pengatur posisi. Perangkat pengatur posisi dirancang berdasarkan desain sumber ion. Sumber ion DECY-13 memiliki konstruksi *head* yang statis, sehingga dibutuhkan sebuah sistem elektromekanik sebagai pengatur posisi yang mampu menggerakkan seluruh bagian sumber ion (termasuk tangkai dan kelongsong tangkai). Prinsip kerja perangkat pengatur posisi sumber ion memiliki kesamaan dengan prinsip kerja manipulator.

Penelitian di bidang manipulator sudah cukup banyak dilakukan. Algoritma PD dan modifikasi PD merupakan salah satu jenis pengendali paling sering digunakan oleh peneliti, selain jaringan syaraf tiruan (JST) [3], *fuzzy* [4], *adaptive force control* [5], PID [6]. Permasalahan yang sering muncul dalam kendali PD adalah penalaan K_p dan K_d yang bersifat *trial and error*.

Kendali PD dengan kompensasi gravitasi dimanfaatkan secara *online* untuk mengendalikan robot manipulator dengan *link* yang fleksibel [7]. Kompensasi gravitasi secara *online* dilakukan dengan mengestimasi torsi gravitasi pada sebuah modifikasi *gravity-biased* dari deformasi *link* yang dikehendaki berdasarkan pada variabel *joint*. Sebuah kendali PD menggunakan kompensasi gravitasi dengan sebuah tingkat konvergensi *finite-time* yang digunakan untuk robot manipulator, sehingga diperoleh kecepatan tinggi dan posisi dengan presisi tinggi [8]. Terdapat sedikit kekurangan dalam penelitian ini yaitu penalaan K_p dan K_d bersifat *trial and error*.

Masalah lain yang muncul adalah penalaan K_p dan K_d yang tidak sederhana. kendali PD diusulkan untuk sebuah manipulator dengan *link* tunggal yang fleksibel [9]. Kendali ini disusun berdasarkan pada teori Lyapunov. Namun metode ini memiliki persamaan yang

relatif kompleks dan dalam menentukan K_p dan K_d masih belum sederhana [9]. Tiga buah pendekatan kendali *saturating PD telah dikembangkan* [10] dengan memanfaatkan *decimal fraction power* dari *error* posisi, pendekatan tersebut mampu mencapai tingkat konvergensi yang relatif lebih cepat. Perhitungan parameter K_p dan K_d relatif kompleks. Permasalahan penalaan untuk kendali PD diselesaikan dengan *gravity compensation* yang diaplikasikan pada sebuah robot 3-DOF [11]. Kendali tersebut terbukti stabil dan memiliki respon yang cepat. Dalam penelitian ini telah dilakukan penghitungan secara analitik parameter K_p dan K_d . Namun penghitungan tersebut masih belum sederhana.

Dalam penelitian ini, kendali *PD plus gravity* (PD dengan kompensasi gravitasi) dipilih dikarenakan memiliki konsep yang sederhana dan telah dibuktikan kestabilan dengan Lyapunov. Selain itu metode tersebut memiliki komputasi yang sederhana. Pada penelitian ini diusulkan penalaan nilai K_p dan K_d yang didasarkan pada pendekatan penalaan orde dua dengan kondisi *critical damping* ($\zeta = 1$) dengan memvariasi frekuensi.

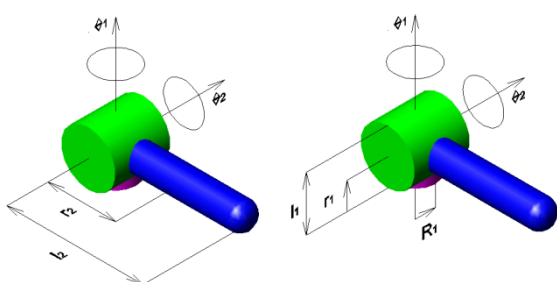
Makalah ini tersusun dari pendahuluan, penjelasan mengenai perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13, metodologi penelitian, pemodelan dan perancangan kendali, hasil dan pembahasan serta kesimpulan.

PERANGKAT PENGATUR POSISI SUMBER ION DECY-13

Perangkat pengatur posisi sumber ion berfungsi untuk mengatur posisi sumber ion di dalam ruang tabung siklotron agar dapat menghasilkan karakteristik berkas ion yang optimal.

Posisi sumber ion memiliki korelasi dengan optimasi berkas proton [12]. Posisi sumber ion menjadi salah satu faktor penting untuk mendapatkan berkas proton yang optimal. Untuk mendapatkan posisi sumber ion yang diinginkan, maka dibutuhkan sebuah perangkat pengatur posisi yang mampu menggerakkan seluruh bagian sumber ion (termasuk tangkai dan kelongsong tangkai). Perancangan perangkat pengatur posisi sumber ion harus disesuaikan dengan desain sumber ion, dimana sumber ion yang digunakan pada siklotron DECY-13 memiliki konstruksi *head* yang statis.

Gambar 1 adalah perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13. Perangkat tersebut bergerak ketiga arah yang berbeda yaitu arah pergerakan maju-mundur, kanan-kiri dan atas-bawah. Untuk mempermudah konstruksi, maka kedua arah pergerakan tersebut (arah pergerakan kanan-kiri dan atas-bawah) digabung menjadi satu oleh sendi kombinasi [13]. Hal ini menjadikan dinamika dari kedua arah pergerakan tersebut relatif lebih kompleks dibandingkan dengan arah pergerakan maju-mundur, sehingga diperlukan sebuah kendali. Konstruksi dari kedua arah pergerakan tersebut (kanan kiri dan atas bawah) mirip manipulator yang memiliki dua buah *link*, dimana *link* 1 relatif lebih pendek daripada *link* 2.



Gambar. 1. Perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13

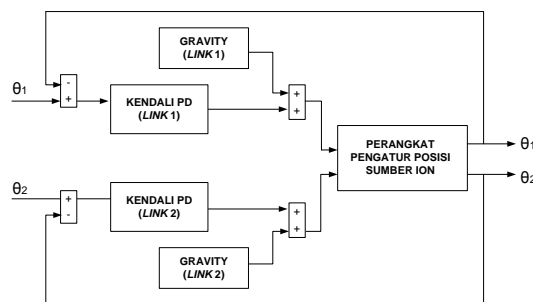
METODOLOGI

Dalam penelitian ini alat dan bahan yang digunakan meliputi perangkat mekanik pengatur posisi sumber ion DECY-13, sebuah laptop dengan processor Core i3, yang dilengkapi dengan perangkat lunak Matlab dan CAD.

Langkah pemodelan

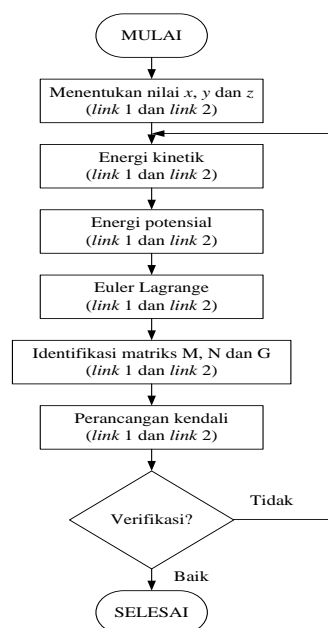
Sebelum pemodelan dilakukan, maka perlu dipelajari blok diagram kendali posisi dari perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 terlihat bahwa sistem memiliki dua buah input yaitu posisi link 1 dan link 2. Error dari masing-masing link menjadi masukan bagi kendali. Pada kendali *PD plus gravity*, keluaran sinyal kendali PD akan ditambah dengan *gravity* dan keluarannya akan mengatur torsi perangkat pengatur posisi sumber ion. Dengan mengatur torsinya, maka posisi sumber ion juga berubah sesuai dengan masukan.



Gambar. 2. Kendali posisi dari perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 dengan jenis pengendali *PD plus gravity*

Gambar 3 merupakan langkah dalam pembuatan model dari perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13.



Gambar. 3. Langkah pemodelan perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13

Langkah awal pemodelan adalah menentukan nilai *x*, *y* dan *z* untuk *link* 1 dan *link* 2. Berdasarkan nilai *x*, *y* dan *z*, dapat ditentukan energi kinetik dan potensial semua *link*. Dengan bantuan rumus Euler Lagrange akan diperoleh gaya yang dibangkitkan pada sebuah *joint* (torsi). Matriks torsi untuk *link* 1 dan *link* 2 tersebut akan diidentifikasi sebagai matriks *M*, *N* dan *G*. Langkah selanjutnya dari pemodelan adalah perancangan kendali yang dipilih berdasarkan *literature review*. Setelah dilakukan pemodelan dan perancangan, maka dilakukan verifikasi terhadap hasilnya. Apabila terdapat kesalahan, maka akan dilakukan penghitungan ulang terhadap energi kinetik dan

langkah-langkah berikutnya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.

Simulasi

Setelah dilakukan pemodelan, tahap berikutnya adalah membuat blok-blok pada Simulink yang didasarkan hasil dari pemodelan perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 dan blok diagram Kemudian setelah blok-blok tersebut selesai disusun, maka simulasi akan dilakukan.

Simulasi dilakukan selama 50 detik dengan memvariasi beberapa frekuensi dari jangkauan frekuensi 0,025 Hz hingga 10 KHz. Dengan memvariasi frekuensi, itu berarti nilai K_p dan K_d juga berubah. Pada penelitian ini variasi frekuensi tersebut diaplikasikan untuk simulasi dengan pengendali *PD plus gravity* dan PD sebagai pembanding, baik pada kondisi tanpa beban maupun dengan beban.

Analisis hasil simulasi

Langkah selanjutnya adalah menganalisis hasil simulasi. Analisis dilakukan dengan menilai kinerja dari setiap sistem kendali yang dirancang. Sistem kendali yang dirancang meliputi *PD plus gravity* yang akan dibandingkan dengan PD. Pengendali tersebut diintegrasikan pada *plant* sistem kendali posisi dari perangkat pengatur posisi sumber ion.

Untuk kategori tanpa gangguan dan dengan gangguan, terdapat tiga parameter kinerja yaitu *overshoot*, *settling time* dan nilai *steady state error* yang direpresentasikan oleh ISE, IAE dan ITAE.

Pada sistem ini, *overshoot* dan *settling time* diharapkan minimal karena berkaitan dengan tingkat sensitivitas sistem terhadap gangguan dan seberapa cepat sistem kembali pada kondisi tunak. Selain itu kinerja seperti ISE, IAE dan ITAE diharapkan minimal..

Setelah dilakukan analisis, maka dilakukan verifikasi terhadap hasilnya. Apabila terdapat kesalahan, maka akan dilakukan pengecekan ulang dan perbaikan terhadap pemodelan dan langkah-langkah berikutnya.

PEMODELAN DAN PERANCANGAN KENDALI

Pemodelan

Untuk mendesain sebuah manipulator dibutuhkan sebuah model matematika yang merepresentasikan dinamika dari persamaan gerak manipulator tersebut. Secara umum model dinamik dari sebuah manipulator ditunjukkan oleh persamaan (1)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

Langkah pertama adalah menentukan posisi dari *link* 1 dan *link* 2 seperti yang terlihat pada persamaan (2) hingga (8)

$$x_1 = r_1 \cos \theta_1 \quad (2)$$

$$y_1 = r_1 \sin \theta_1 \quad (3)$$

$$z_1 = 0 \quad (4)$$

$$x_2 = l_1 \cdot \cos \theta_1 + r_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \quad (5)$$

$$y_2 = l_1 \cdot \sin \theta_1 + r_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \quad (6)$$

$$z_2 = r_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (7)$$

Posisi *link* 1 dan *link* 2 digunakan untuk menghitung energi kinetik dan energi potensial dari masing-masing *link*. Energi kinetik *link* 1 dan *link* 2 ditunjukkan oleh persamaan (8) dan (9), sedangkan energi potensial *link* 1 dan *link* 2 ditunjukkan oleh persamaan (10) dan (11).

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot r_1^2 + \frac{1}{2} \cdot I_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot r_2^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \cos^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot r_2^2 \cdot \dot{\theta}_2^2 + 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin^2 \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos^2 \theta_1 \cdot \sin \theta_2 + I_2 \cdot \dot{\theta}_2^2 \quad (9)$$

$$V_1 = m_1 \cdot g \cdot z_1 = 0 \quad (10)$$

$$V_2 = m_2 \cdot g \cdot z_2 = m_2 \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (11)$$

Setelah energi kinetik dan energi potensial dari masing-masing *link*., maka ditentukan nilai torsi menggunakan persamaan Euler Lagrange. Persamaan (12) dan (13) menunjukkan torsi pada *link* 1 dan *link* 2.

$$\tau_1 = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1}$$

$$= (m_1 \cdot r_1^2 + I_1 + m_2 \cdot l_1^2 + m_2 \cdot r_2^2 \cdot \cos^2 \theta_2 + m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2) \cdot \ddot{\theta}_1 + (m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \sin \theta_2) \cdot \ddot{\theta}_2$$

$$\begin{aligned}
 & + (2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 & - 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2) \quad (12) \\
 \tau_2 & = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} \\
 & = (m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \sin \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 + (m_2 \cdot r_2^2 + \\
 & l_2) \cdot \ddot{\theta}_2 \\
 & = (m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \sin \theta_2) \cdot \dot{\theta}_1 + (m_2 \cdot r_2^2 + \\
 & l_2) \cdot \ddot{\theta}_2 \\
 & + (m_2 \cdot r_2^2 \cdot \sin \theta_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 & + 2 \cdot m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1^2 \\
 & - m_2 \cdot l_1 \cdot r_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2) \\
 & + (-m_2 \cdot g_2 \cdot r_2 \cdot \cos \theta_2) \quad (13)
 \end{aligned}$$

Kendali PD plus gravity

Pada penelitian ini akan digunakan pengendali *Proportional Derivative Plus Gravity (PD plus gravity)* seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (14).

$$\tau = K_P e + K_D \dot{e} + G(q) \quad (14)$$

Persamaan kalang tertutup untuk vektor ruang keadaan $[\tilde{q}^T \dot{q}^T]^T$ dapat ditulis seperti pada persamaan (15) [14].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q_d - \tilde{q})^{-1} [K_P \tilde{q} - K_D \dot{q} - C(q_d - \tilde{q}, \dot{q}) \dot{q}] \end{bmatrix} \quad (15)$$

Untuk membuktikan kendali *PD plus gravity* adalah stabil, maka digunakan metode Lyapunov langsung dan teorema La Salle. Kandidat fungsi Lyapunov beserta turunannya dapat ditulis dengan persamaan (16) dan (17). Kemudian $M(q)\ddot{q}$ disubstitusi ke dalam persamaan (15), sehingga diperoleh persamaan (18).

$$V(\tilde{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_P \tilde{q} \quad (16)$$

$$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = \dot{q}^T M(q) \ddot{q} + \frac{1}{2} \dot{q}^T \dot{M}(q) \dot{q} + \tilde{q}^T K_P \dot{q} \quad (17)$$

$$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = - \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \leq 0 \quad (18)$$

Fungsi $V(\tilde{q}, \dot{q})$ bernilai *globally positive definite* saat energi kinetik bernilai *positive definite* pada \dot{q} . K_P juga merupakan matriks *positive definite*. Bentuk kuadratik $\tilde{q}^T K_P \tilde{q}$ merupakan sebuah fungsi *positive definite* dari \tilde{q} .

Fungsi $V(\tilde{q}, \dot{q})$ adalah sebuah fungsi Lyapunov saat $\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) \leq 0$ untuk semua \tilde{q} dan \dot{q} dan akibatnya, *origin* stabil dan semua solusi $\tilde{q}(t)$ dan $\dot{q}(t)$ adalah *bounded*.

Teorema La Salle digunakan untuk menganalisis *global asymptotic stability* dari *origin*. Langkahnya adalah menentukan nilai Ω seperti pada persamaan (19).

$$\begin{aligned}
 \Omega & = \{x \in \mathbb{R}^{2n} : V(x) = 0\} \\
 & = \left\{ x = \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{2n} : V(\tilde{q}, \dot{q}) = 0 \right\} \\
 & = \{ \tilde{q} \in \mathbb{R}^n, \dot{q} = 0 \in \mathbb{R}^n \} \quad (19)
 \end{aligned}$$

$\dot{V}(\tilde{q}, \dot{q}) = 0$, jika dan hanya jika $\dot{q} = 0$. Untuk solusi $x(t)$ dalam Ω untuk semua $t \geq 0$, perlu dan cukup bahwa $\dot{q}(t) = 0$ untuk semua $t \geq 0$. Oleh karena itu, nilai $\dot{q}(t) = 0$ untuk semua $t \geq 0$. Dengan ini jika $x(t) \in \Omega$ untuk semua $t \geq 0$, maka

$$0 = M(q_d - \tilde{q}(t))^{-1} K_P \tilde{q}(t) \quad (20)$$

$M(q_d - \tilde{q}(t))^{-1}$ dan K_P adalah definit positif, hasil matriknya adalah *non singular*. Hal ini menyiratkan bahwa $\tilde{q}(t) = 0$ untuk semua $t \geq 0$ dan oleh karena itu, $[\tilde{q}(0)^T \dot{q}(0)^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{2n}$ adalah satu-satunya kondisi awal pada Ω dimana $x(t) \in \Omega$ untuk semua $t \geq 0$. Berdasarkan teorema La Salle, hal ini cukup untuk membangun *global asymptotic stability* dari *origin*, $[\tilde{q}^T \dot{q}^T]^T = 0 \in \mathbb{R}^{2n}$.

Dalam merancang kendali *PD plus gravity* perlu ditentukan persamaan *error* untuk *link 1* dan *link 2*. Untuk mempermudah dalam hal komputasi, maka dibuat persamaan (21) dan (22) sebagai asumsi.

$$\dot{x}_1 = \theta_{1d} - \theta_{1a} \quad (21)$$

$$\dot{x}_2 = \theta_{2d} - \theta_{2a} \quad (22)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (21) dan (22) ke dalam persamaan (1) dan (14) sehingga diperoleh persamaan posisi dari perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 untuk tiap *link* seperti yang terlihat pada persamaan (23).

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = M(q)^{-1} \left(-N(q, \dot{q}) + \begin{bmatrix} K_{P1}(\theta_{1d} - \theta_{1a}) - K_{D1}\theta_{1a} \\ K_{P2}(\theta_{2d} - \theta_{2a}) - K_{D2}\theta_{2a} \end{bmatrix} \right) \quad (23)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan parameter input

Bahan yang digunakan untuk *link 1* adalah *Cast Carbon* yang memiliki densitas sebesar 7.800 kg/m³. *Link 1* memiliki panjang (*l1*) dan diameter *link 1* masing-masing adalah

0,3 m dan 0,062 m. Besar massa *link* 1 ditunjukkan oleh persamaan (24).

$$m_1 = 7.800 \text{ kg/m}^3 \cdot \left(3,14 \cdot \left(\frac{0,062}{2} \right)^2 \cdot 0,3 \right) m^3$$

$$= 7,061 \text{ kg} \quad (24)$$

Link 2 terdiri dari tiga bagian yaitu saluran gas H_2 , pegangan sumber ion dan sumber ion. Saluran gas H_2 terbuat dari tembaga dan memiliki diameter yang relatif sangat kecil. Diameter saluran gas $H_2 \ll$ diameter pegangan sumber ion maupun diameter sumber ion, sehingga saluran gas H_2 tidak menjadi salah satu parameter penghitungan massa *link* 2.

Pegangan sumber ion memiliki dua ukuran (volume) yang berbeda, namun menggunakan bahan yang sama yaitu *Cast Carbon*. Diameter pegangan sumber ion yaitu 0,12 m dan 0,18 m. Dari data tersebut, nilai massa pegangan sumber ion dapat dihitung seperti persamaan (25).

$$m_{ps} = 7.800 \text{ kg/m}^3 \left(3,14 \cdot \left(\frac{0,12}{2} \right)^2 \cdot 0,205 \right. \\ \left. + 3,14 \cdot \left(\frac{0,18}{2} \right)^2 \cdot 0,02 \right) m^3$$

$$= 22,0428 \text{ kg} \quad (25)$$

Bagian sumber ion terbuat dari tembaga yang memiliki densitas sebesar 8.900 kg/m³. Sumber ion memiliki diameter 0,13 m dan 0,07 m. Dari data tersebut, nilai massa sumber ion dapat dihitung seperti persamaan (26).

$$m_s = 8.900 \text{ kg/m}^3 \cdot \left(3,14 \cdot \left(\frac{0,13}{2} \right)^2 \cdot 0,012 \right. \\ \left. + 3,14 \cdot \left(\frac{0,07}{2} \right)^2 \cdot 0,703 \right) m^3$$

$$= 25,48326 \text{ kg} \quad (26)$$

Dari nilai massa pegangan sumber ion dan massa sumber ion, maka besarnya massa *link* 2 dapat dilihat pada persamaan (27).

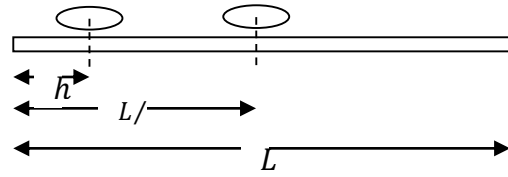
$$m_2 = 22,0428 \text{ kg} + 25,48326 \text{ kg}$$

$$= 47,53 \text{ kg} \quad (27)$$

Besarnya momen inersia dari *link* 1 ditentukan oleh persamaan (28). *Link* 1 akan diletakkan pada sepertujuh dari panjang *link* 2 seperti yang terlihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, besarnya momen inersia *link* 2 dapat ditentukan seperti persamaan (29)

$$I_1 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot R_1^2 \quad (28)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} m_2 L^2 + \frac{1}{49} m_2 L^2 = \frac{61}{588} m_2 L^2 \quad (29)$$

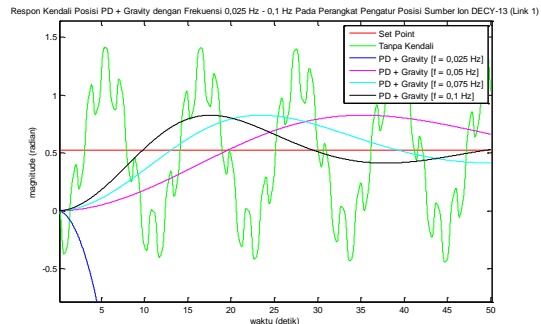


Gambar. 4. *Link* 2

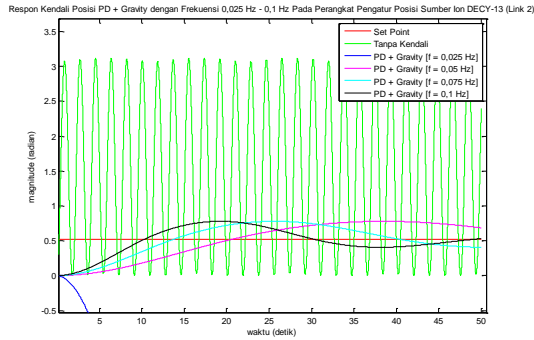
Hasil simulasi

Pada frekuensi 0,025 Hz, tanggapan kendali posisi perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 menggunakan pengendali *PD plus gravity* masih mengalami osilasi, baik pada *link* 1 maupun *link* 2 seperti terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gambar 5 dan Gambar 6 merupakan tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,1 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 *link* 1 dan *link* 2.

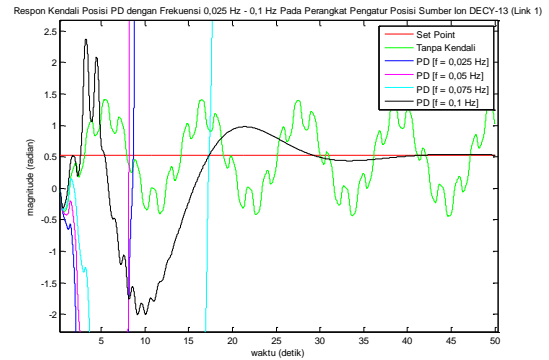
Setelah frekuensi dinaikkan 0,05 Hz hingga 0,1 Hz, tanggapan dengan pengendali *PD plus gravity* relatif lebih baik dibandingkan dengan frekuensi dibawahnya (< 0,05 Hz). Efek eliminasi gravitasi yang dilakukan dengan cara penambahan nilai gravitasi pada sistem, menyebabkan tidak terjadi osilasi pada *link* 1 dan *link* 2. Penambahan frekuensi menyebabkan *rise time* semakin cepat yaitu dari 19,6521 detik menjadi 9,8322 detik untuk *link* 1 dan 20,758 detik menjadi 10,3855 detik. Namun *overshoot* memiliki nilai yang tidak jauh berbeda yaitu antara 57,7158 % hingga 57,7731 % untuk *link* 1 dan 48,835 % hingga 48,8732 % untuk *link* 2. Untuk nilai *settling time* diperkirakan lebih dari 50 detik.



Gambar. 5. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,1 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 *link* 1



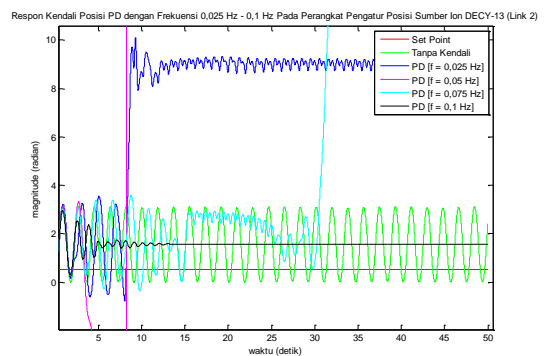
Gambar. 6. Tanggapan kendali posisi PD plus gravity dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,1 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2



Gambar. 7. Tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,1 Hz – 0,1 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1

Gambar 7 merupakan tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,1 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1, sedangkan Gambar 8 adalah untuk link 2. Dari kedua gambar tersebut diketahui bahwa ketika pengendali PD diaplikasikan ke dalam sistem dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,075 Hz, sistem masih mengalami osilasi, baik pada link 1 maupun link 2. Osilasi menyebabkan nilai overshoot, rise time dan settling time belum bisa diamati. Steady state error pada ketiga frekuensi tersebut memiliki nilai yang relatif besar, baik pada link 1 maupun link 2. ISE yang diperoleh dari kendali PD berkisar antara $5,803e4$ hingga $1,804e8$ (link 1) dan $2,634e25$ hingga $6,966$ (link 2). Kendali PD akan menghasilkan IAE bernilai antara $1,844e4$ hingga 1151 (link 1) dan $2,527e4$ hingga $362,8$ (link 2). Untuk ITAE pada link 1 berkisar antara $5,037e5$ sampai $3,638e4$, sedangkan pada link 2 bernilai antara $7,34e5$ sampai $1,033e4$.

Nilai steady state error menjadi lebih baik saat frekuensi dinaikkan menjadi 0,1 Hz yaitu 100,6 (ISE link 1), 18,19 (ISE link 2), 24,43 (IAE link 1), 52,53 (IAE link 2), 286,7 (ITAE link 1) dan 1307 (ITAE link 2). Pada frekuensi ini tidak terjadi osilasi, sehingga dapat diamati tanggapannya baik pada link 1 dan link 2. Pada link 1, nilai overshoot-nya adalah 353,3995%, rise time 2,6437 detik dan settling time bernilai 40,1986 detik. Jika dibandingkan link 1, link 2 memiliki nilai overshoot dan settling time yang lebih tinggi yaitu 465,9855% dan > 50 detik, sedangkan nilai rise timerelatif lebih cepat yaitu 0,2587 detik.

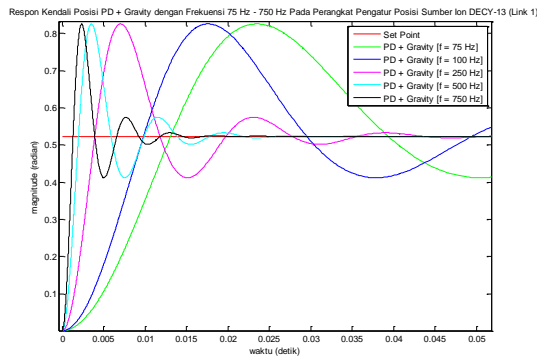


Gambar. 8. Tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 0,025 Hz – 0,1 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2

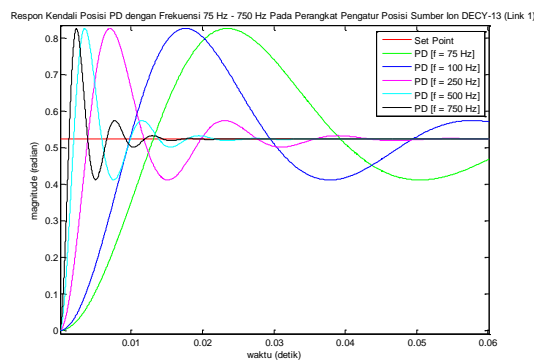
Pada jangkauan frekuensi 0,025 Hz hingga 0,1 Hz, kinerja dari kendali PD plus gravity relatif lebih baik dibandingkan dengan kinerja kendali PD. Hal ini dapat dilihat dari steady error untuk link 1 dan link 2 relatif lebih kecil. Nilai steady state error direpresentasikan oleh ISE, IAE dan ITAE. Nilai ISE berkisar antara 64,72 hingga 52,12 (link 1) dan 65,44 hingga 52,51 (link 2), IAE yang diperoleh dari kendali PD plus gravity berkisar antara 13,57 sampai 8,19 (link 1) dan 13,36 sampai 7,837 (link 2). Nilai ITAE bernilai dikisaran 219,9 hingga 133,2 (link 1) dan 207,9 hingga 129,6 (link 2).

Gambar 9 adalah tanggapan kendali posisi PD plus gravity dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1, sedangkan tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1 terlihat pada Gambar 10. Ketika frekuensi divariasi antara 75

Hz – 750 Hz dan diaplikasikan untuk kendali PD dan *PD plus gravity* frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1, dihasilkan tanggapan kendali posisi yang lebih baik sebanding dengan penambahan frekuensi. Dengan adanya kenaikan frekuensi antara 75 Hz sampai 750 Hz akan diperoleh nilai K_p dan K_d akan meningkat, sehingga dihasilkan tanggapan kendali posisi yang lebih baik. Hal ini dapat dilihat pada nilai *rise time* dan *settling time* yang semakin cepat, sedangkan *overshoot* cenderung stabil diantara 57,7349% sampai 57,754%.



Gambar. 9. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1

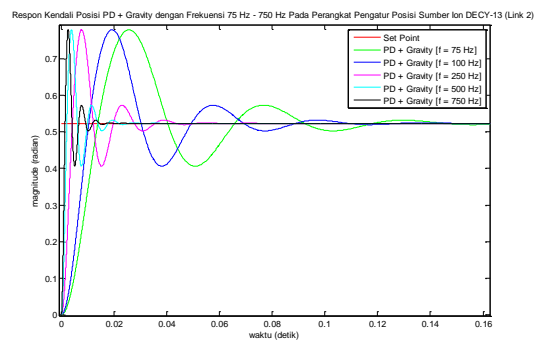


Gambar. 10. Tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1

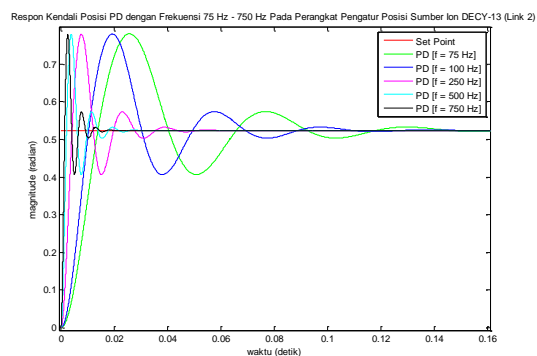
Nilai *rise time* dan *settling time* yang diperoleh dari kendali *PD plus gravity* relatif setara dengan nilai *rise time* dan *settling time* yang dihasilkan oleh kendali PD. *Rise time* dan *settling time* yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* dan PD masing-masing berkisar antara 0,0131 detik sampai 1,3102e-3 detik dan 0,1132 detik hingga 0,0113 detik.

Kinerja kendali PD dan *PD plus gravity* pada jangkauan frekuensi 75 Hz – 750 Hz untuk link 1, yang direpresentasikan oleh *steady state error* yaitu ISE, IAE dan ITAE memiliki nilai yang relatif lebih baik dibandingkan dengan frekuensi dibawahnya (< 75 Hz). Ketika frekuensi dinaikkan dari 75 Hz hingga 750 Hz, kinerja semakin meningkat yang ditandai dengan nilai *steady state error* bernilai semakin kecil. Kinerja kendali *PD plus gravity* pada jangkauan frekuensi tersebut setara dengan kinerja kendali PD. Nilai IAE dan ITAE yang dihasilkan berkisar antara 0,01239 hingga 0,001239 dan 0,0003815 sampai 3,814e-6, sedangkan nilai ISE bernilai relatif stabil di kisaran 50.

Gambar 11 adalah tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2. Gambar 12 adalah tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2.



Gambar. 11. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2



Gambar. 12. Tanggapan kendali posisi PD dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2

Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa kinerja kendali PD dan *PD plus gravity* pada jangkauan frekuensi 75 Hz – 750 Hz untuk *link 2*, yang direpresentasikan oleh *steady state error* yaitu ISE, IAE dan ITAE memiliki nilai yang relatif lebih baik dibandingkan dengan frekuensi dibawahnya (< 75 Hz). Ketika frekuensi dinaikkan dari 75 Hz hingga 750 Hz, kinerja semakin meningkat yang ditandai dengan nilai *steady state error* bernilai semakin kecil. Kinerja kendali *PD plus gravity* pada jangkauan frekuensi tersebut relatif lebih baik dibandingkan dengan kinerja kendali PD. Nilai IAE yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* berkisar antara 0,01185 sampai 0,001185, sedangkan IAE yang diperoleh oleh kendali PD bernilai antara 0,04747 hingga 0,001542. Untuk nilai ITAE yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* berkisar antara 0,0003667 hingga 3,667e-6, sedangkan ITAE yang diperoleh dari kendali PD bernilai antara 0,8944 sampai 0,008948. Nilai ISE yang dibangkitkan oleh kendali PD dan *PD plus gravity* bernilai relatif stabil di kisaran 50.

Pada jangkauan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 *link 2*, nilai *overshoot* yang dihasilkan oleh kendali PD mengalami penurunan seiring dengan penambahan frekuensi yaitu berkisar antara 49,0451% hingga 48,8541%, sedangkan *overshoot* yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* relatif stabil yaitu 48,8541%.

Tanggapan yang dihasilkan oleh kendali posisi PD dan *PD plus gravity* dengan frekuensi 75 Hz – 750 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 *link 2* adalah lebih baik sebanding dengan penambahan frekuensi. Dengan adanya kenaikan frekuensi antara 75 Hz sampai 750 Hz akan diperoleh nilai K_p dan K_d akan meningkat, sehingga dihasilkan tanggapan kendali posisi yang lebih baik. Hal ini dapat dilihat pada nilai *rise time* dan *settling time* yang semakin cepat.

Nilai *rise time* dan *settling time* yang diperoleh dari kendali *PD plus gravity* relatif sama dengan nilai *rise time* dan *settling time* yang dihasilkan oleh kendali PD. *Rise time* dan *settling time* yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* dan PD masing-masing berkisar antara 0,0138 detik sampai 1,3839e-3 detik dan 0,112 detik hingga 0,0112 detik.

Secara umum tanggapan (*overshoot*, *rise time* dan *settling time*) yang dihasilkan oleh

kendali PD dan *PD plus gravity* pada *link 1* dan *link 2* tidak ada yang terlalu dominan. Pada saat frekuensi tertentu, kendali PD dan *PD plus gravity* menghasilkan tanggapan yang relatif sama. Hal ini juga berlaku pada kinerja yang dihasilkan oleh kedua jenis kendali tersebut pada *link 1*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 13.

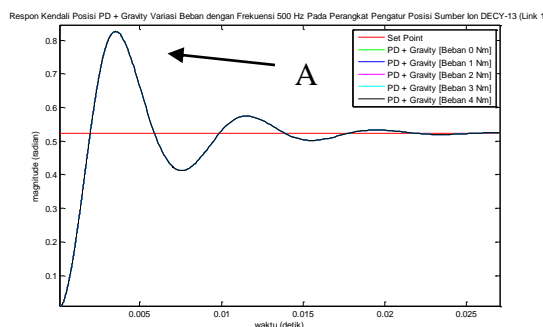
Sedikit berbeda dengan kinerja yang dihasilkan oleh kedua jenis kendali tersebut pada *link 1*, kinerja yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan kendali PD, khususnya IAE dan ITAE.

Frekuensi 500 Hz dipilih untuk menjadi parameter penalaan K_p dan K_d . Frekuensi ini dipilih, karena dianggap optimal untuk mendapatkan tanggapan yang paling cepat dan kinerja yang paling baik.

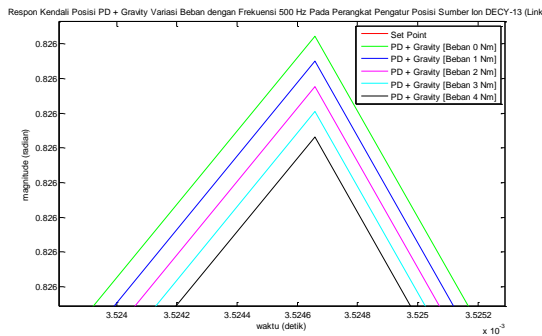
Tanggapan dan Kinerja	Link 1			Link 2		
	Frekuensi	PD	PDG	Frekuensi	PD	PDG
Overshoot	$f \leq 5$ Hz		v	$f < 500$ Hz		v
	5 Hz < $f < 250$ Hz	v	v	$f \geq 500$ Hz	v	v
	$f \geq 250$ Hz	v	v			
Rise time	$f \leq 10$ Hz		v	$f < 75$ Hz	v	
	$f > 10$ Hz	v	v	$f \geq 75$ Hz	v	v
Settling time	$f < 50$ Hz	v	v	$f \leq 25$ Hz	v	v
	$f \geq 50$ Hz	v	v	25 Hz < $f < 250$ Hz	v	v
				$f \geq 250$ Hz	v	v
ISE	$f \leq 0,1$ Hz		v	$f \leq 0,05$ Hz		v
	$0,1$ Hz < $f < 7,5$ Hz	v	v	$0,05$ Hz < $f < 250$ Hz	v	v
	$f \geq 7,5$ Hz	v	v	$f \geq 250$ Hz	v	v
IAE	$f < 50$ Hz		v	$f \leq 10$ KHz		v
	$f \geq 50$ Hz	v	v			
ITAE	$f < 500$ Hz		v	$f \leq 10$ KHz		v
	$f \geq 500$ Hz	v	v			

Gambar. 13. Perbandingan tanggapan dan kinerja PD dan *PD plus gravity link 1* dan *link 2*

Gambar 14 merupakan tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* variasi beban dengan frekuensi 500 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 *link 1*.



a. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity link 1* dengan frekuensi 500 Hz dengan beban 0 Nm, 1 Nm, 2 Nm, 3 Nm dan 4 Nm



b. Perbesaran A

Gambar. 14. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* variasi beban dengan frekuensi 500 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1.

Overshoot, rise time, settling time yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* relatif sama dibandingkan dengan *overshoot, rise time, settling time* yang dihasilkan oleh kendali PD yang masing-masing besarnya 57,754%, 1,9653e-3 detik dan 0,017 detik. Nilai tersebut tidak mengalami perubahan meskipun perangkat tersebut dibebani 1 Nm hingga 4 Nm.

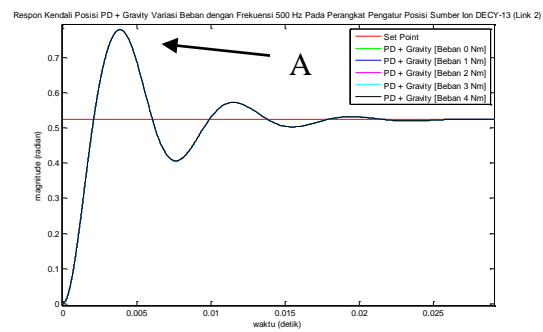
Pada frekuensi 500 Hz, tidak ada perbedaan antara kinerja perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 1 yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* dengan kinerja yang dihasilkan oleh kendali PD. Kinerja direpresentasikan oleh ISE, IAE dan ITAE masing-masing memiliki nilai 50, 0,001859 dan 8,581e-6. Saat perangkat tersebut diberi beban antara 1 Nm hingga 4 Nm, nilai IAE dan ITAE akan meningkat (kinerjanya menurun) yaitu berkisar antara 0,001864 sampai 0,001879 dan 0,0001354 sampai 0,0005157, sedangkan nilai ISE-nya memiliki nilai tetap yaitu 50.

Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* variasi beban dengan frekuensi 500 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2 ditunjukkan oleh Gambar 15.

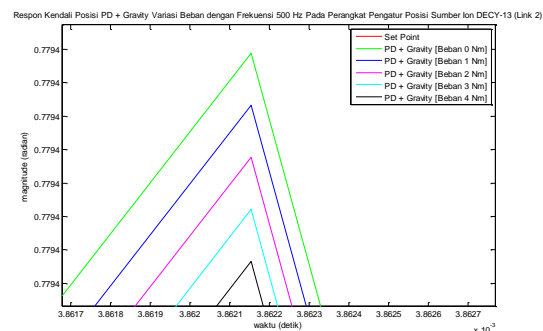
Sedikit berbeda dengan link 1, kinerja perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2 (IAE dan ITAE) yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* relatif lebih baik dibandingkan dengan kinerja yang dihasilkan oleh kendali PD. Hal ini berlaku juga saat

perangkat diberi beban dari 1 Nm hingga 4 Nm. Nilai IAE yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* berkisar antara 0,001777 hingga 0,001798, sedangkan nilai IAE yang dihasilkan oleh kendali PD berkisar antara 0,002582 hingga 0,002561. Nilai ITAE yang dihasilkan oleh kendali PD dan *PD plus gravity* masing-masing berkisar antara 0,02013 sampai 0,01963 dan 8,25e-6 sampai 0,0005154. Untuk nilai ISE, tidak ada perbedaan antara hasil yang diperoleh dari kendali PD dan *PD plus gravity* yaitu 50.

Pada frekuensi 500 Hz, tidak ada perbedaan antara tanggapan yang dihasilkan oleh kendali *PD plus gravity* dengan kendali PD. Hal tersebut juga berlaku saat perangkat tersebut diberi beban antara 1 Nm hingga 4 Nm dimana tidak ada perubahan tanggapan yang diwakili oleh *overshoot, rise time* dan *settling time*. Nilai *overshoot, rise time* dan *settling time* masing-masing bernilai 48,8541%, 2,0759e-3 detik dan 0,0169 detik.



a. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity link 2* dengan frekuensi 500 Hz dengan beban 0 Nm, 1 Nm, 2 Nm, 3 Nm dan 4 Nm



b. Perbesaran A

Gambar. 15. Tanggapan kendali posisi *PD plus gravity* variasi beban dengan frekuensi 500 Hz pada perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 link 2.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa penambahan frekuensi sampai batas tertentu akan menghasilkan tanggapan (*rise time* dan *settling time*) yang lebih cepat dan kinerja (*steady state error*) yang lebih baik.

Penambahan gangguan mengakibatkan tanggapan lebih lambat dan kinerja yang relatif menurun dibandingkan tanpa gangguan. Hal ini berlaku untuk semua *link* dan semua jenis pengendali (PD dan *PD plus gravity*).

Selain itu, perangkat pengatur posisi sumber ion DECY-13 dengan pengendali *PD plus gravity* memiliki tanggapan dan kinerja yang relatif lebih baik dibandingkan dengan pengendali PD, khususnya parameter IAE dan ITAE. Hal ini berlaku untuk semua *link* dan semua kondisi (tanpa maupun dengan gangguan dan frekuensi).

Frekuensi 500 Hz dipilih untuk menjadi parameter penalaan K_p dan K_d . Frekuensi ini dipilih, karena dianggap optimal untuk mendapatkan tanggapan yang paling cepat dan kinerja yang paling baik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada Bapak Drs. Silakhuddin, M.Si selaku Penanggung Jawab Sub Uskeg Siklotron dan semua anggota tim siklotron atas semua bantuan yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonymous, "Renstra BATAN 2010-2014," B. T. N. Nasional, Ed., ed. Jakarta, 2010, p. Lampiran 1.
2. Silakhuddin and S. Santosa, "Conceptual Design Study of 13 MeV Proton Cyclotron" *Atom Indonesia*, vol. 38 No. 1, pp. 7 - 14, 2012.
3. L. Haitao and Z. Tie, "Neural Network-Based Robust Finite-Time Control for Robotic Manipulator Considering Actuator Dynamics" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, pp. 301-308, 2013.
4. H. Chaudary, V. Panwar, N. Sukavanum and R. Prasad, "Fuzzy PD+I Based Hybrid

- Force/Position Control for an Industrial Robot Manipulator," in *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, Kanpur, India, 2014, pp. 429 – 436.
5. J. Pliego-Jimenez and M.A. Arteaga-Perez, "Adaptive Position/Force Control for Robotic Manipulator in Contact with a Rigid Surface with Uncertain Parameters" *Eur. J. Control*, vol. 22, pp. 1 – 12, 2015.
6. R. Sharma, P. Gaur and A.P. Mittal, "Performance Analysis of Two-Degree of Freedom Fractional Order PID Controllers for Robotic Manipulator with Payload" *ISA Transactions*, vol. 58, pp. 279 – 291, 2015.
7. L. Zollo, B. Siciliano, A. D. Luca, and E. Guglielmelli, "PD Control with On-line Gravity Compensation for Robots with Flexible Links," in *Proceedings of the European Control Conference*, Kos, Greece, 2007, pp. 4365 - 4370..
8. J. Fujishiro, Y. Fukui, and T. Wada, "Finite-time PD Control of Robot Manipulators with Adaptive Gravity Compensation," in *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, Buenos Aires, Argentina, 2016, pp. 898 - 904.
9. C. Murrugarra, J. Grieco, G. Fernandez, and O. D. Castro, "Design of a PD Position Control based on the Lyapunov Theory for a Robot Manipulator Flexible-Link," in *2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* Kunming, China, 2006, pp. 890 - 895.
10. D. Zhao and S. Li, "Improvements on Saturating PD with Gravity Compensation Control for Robotic Manipulators," in *7th Asian Control Conference*, Hong Kong, China, 2009, pp. 1497 - 1502.
11. O. R. Arroyo, F. R. Cortés, M. A. D. V. Treviño, and S. V. Limon, "Variable Control Gains for P-D controller for Robot Manipulators," in *2015 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, Cuernavaca, Mexico, 2015, pp. 187 - 192.
12. E. Mulyani, A. Hermanto, and P. Anggraita, "Simulasi Lintasan Berkas Proton Siklotron 13 MeV Menggunakan Program PWHEEL," in *Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Yogyakarta, 2012.
13. S. Atmojo and Silakhudin, "Pembuatan dan Pengujian Perangkat Pengatur Posisi

Sumber Ion untuk Siklotron DECY-13," in *Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya 2014*, Yogyakarta, 2014.

14. R. Kelly, V. S. Davila, and A. Loría, *Control of Robot Manipulators in Joint Space*. London, United Kingdom: Springer, 2005.