



Pengendali Single Neuron PID untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi pada Prototipe Karakterisasi Irradiator Gamma dan Perbandingannya dengan Pengendali PID Klasik Menggunakan Metode Modified Ziegler-Nichols

Single Neuron PID Controller for Speed Regulation of Induction Motor on Gamma Irradiator Characterization Prototype and Its Comparison with Classical PID Controller Using the Modified Ziegler-Nichols Method

Ryan Tirta Saputra¹⁾, Benyamin Kusumoputro²⁾

^{1,2} Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

^{1,2} Kampus UI Depok, Pondok Cina, Depok, Jawa Barat, Indonesia

ryan.tirta@ui.ac.id¹⁾, kusumo@ui.ac.id²⁾

Diterima: 09 Mei 2025 | | Direvisi: 21 Juni 2025 | | Disetujui: 07 Desember 2025

Abstrak – Pengendalian motor induksi menjadi bagian penting dalam pengoperasian prototipe karakterisasi irradiator gamma yang digunakan untuk pengujian komponen hingga pelatihan operator irradiator. Motor induksi berfungsi sebagai aktuator utama dalam sistem transportasi otomatis pada fasilitas irradiator gamma, sehingga kecepatan dan kestabilan motor akan sangat menentukan akurasi posisi sampel terhadap sumber radiasi. Pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) banyak digunakan karena strukturnya yang sederhana, tetapi memiliki keterbatasan dalam merespons dinamika sistem yang kompleks dan berubah-ubah. Untuk meningkatkan performa pengendalian, metode pengendalian berbasis kecerdasan buatan seperti *Single Neuron PID* (SNPID) banyak dikembangkan sebagai alternatif yang dapat menghasilkan karakteristik adaptif pada pengendali. Penelitian ini membandingkan performa pengendali PID yang dituning dengan metode *Modified Ziegler-Nichols* (MZN) dan pengendali SNPID dalam mengatur kecepatan motor induksi pada sistem irradiator gamma. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pengendali SNPID dengan parameter laju pembelajaran seragam sebesar 0.5 dan konstanta Hebb 0.0018 mampu menghasilkan respon lebih cepat, lebih stabil, dan lebih adaptif dibandingkan PID-MZN dengan *phase margin* 30°. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengendali SNPID merupakan pilihan yang lebih efektif untuk sistem kendali motor pada aplikasi iradiasi gamma yang memerlukan respon cepat, presisi tinggi, dan robust terhadap gangguan.

Kata Kunci: motor induksi, irradiator gamma, PID, *Single Neuron PID*

Abstract – *Induction motor control is a crucial part in the operation of gamma irradiator characterization prototypes, which are used for component testing and operator training. In this system, the induction motor functions as the primary actuator within the automated transport mechanism, therefore the motor's speed and stability greatly affect the accuracy of sample positioning relative to the radiation source. Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers are widely used due to their simple structure but have limitations in responding to complex and time-varying system dynamics. To improve control performance, artificial intelligence-based control methods such as the Single Neuron PID (SNPID) have been developed as alternatives, offering adaptive characteristics through dynamic parameter adjustment. This study presents a comparative performance analysis between a PID controller tuned using the Modified Ziegler-Nichols (MZN) method and a SNPID controller in regulating the speed of an induction motor in a gamma irradiator system. Evaluation results show that the SNPID controller with a uniform learning rate of 0.5 and a Hebbian constant of 0.0018 produces faster, more stable, and more adaptive response compared to the MZN-tuned PID controller with a 30° phase margin. These results indicate that the SNPID controller is a more effective choice for motor control systems in gamma irradiation applications that require fast response, high precision, and robustness against disturbances.*

Keywords: *induction motor, gamma irradiator, PID, Single Neuron PID*

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi iradiasi gamma telah menjadi solusi penting dalam berbagai sektor seperti pertanian, pangan, kesehatan, dan industri (Jacobs, 2021; Koubaa, Barba-Orellana, Roselló-Soto, & Barba, 2016; O'Hara, 2012). Teknologi ini memungkinkan peningkatan daya simpan dan keamanan mikrobiologis produk melalui penyinaran dengan dosis terkontrol tanpa meninggalkan residu bahan kimia berbahaya (Indiarto, Pratama, Sari, & Theodora, 2020). Di Indonesia, infrastruktur teknologi iradiasi terus dikembangkan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang pada tahun 2017 membangun Irradiator Gamma Merah Putih (IGMP) sebagai bagian dari program penguasaan teknologi nasional melalui strategi *reverse engineering* (Sutmoko, Gunawan, Rozali, & Budiyono, 2017). IGMP didesain agar dapat memenuhi Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) hingga 85% (Damayanti, Syawaludin, & Gunawan, 2022).

Salah satu bentuk lanjutan dari proyek IGMP adalah pembangunan prototipe karakterisasi irradiator gamma. Prototipe ini akan digunakan untuk mendukung pengujian komponen lokal, pelatihan operator, dan penelitian kendali sistem (Kepala Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir, 2018, 2019). Dalam sistem ini, motor induksi tiga fasa digunakan sebagai aktuator utama untuk sistem transportasi produk iradiasi, khususnya pada proses *loading* dan *unloading* tote (Syawaludin, Gunawan, & Tukiman, 2021). Agar proses iradiasi dapat berlangsung presisi sesuai dosis dan waktu yang ditentukan, sistem penggerak motor harus dikendalikan secara stabil, responsif, dan sesuai spesifikasi yang dibutuhkan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Damayanti, Syawaludin, dan Gunawan (2022) mengembangkan sistem kendali berbasis *Proportional-Integral* (PI) dan *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dengan parameter yang diatur menggunakan metode *tuning Modified Ziegler-Nichols* (MZN). Metode *tuning* ini menggabungkan pendekatan frekuensi dengan kriteria margin fasa untuk menghasilkan pengendali dengan performa dinamis yang baik. Hasil studi mereka menunjukkan bahwa pengendali PID hasil *tuning* MZN mampu mencapai waktu tunak di bawah satu detik tanpa *overshoot* dan dengan *error steady-state* mendekati nol.

Namun, sistem kendali yang dihasilkan melalui metode *tuning* konvensional seperti MZN memiliki

parameter yang bersifat statik sehingga tidak dapat menyesuaikan diri secara otomatis terhadap perubahan kondisi sistem, seperti fluktuasi beban atau gangguan eksternal. Dalam penggunaan untuk sistem iradiasi gamma yang dinamis dan memiliki beban yang bervariasi, keterbatasan ini dapat mengurangi efektivitas dan efisiensi kendali. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan yang adaptif dan cerdas dalam perancangan sistem kendali untuk aktuator dinamis seperti motor induksi pada sistem transportasi irradiator. Pendekatan berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) merupakan salah satu metode yang banyak dikembangkan saat ini untuk mengatasi keterbatasan tersebut (Luo, Liu, Song, Yang, & Qiao, 2021).

Single Neuron Proportional-Integral-Derivative (SNPID) merupakan metode kendali berbasis pendekatan kecerdasan buatan yang mengkombinasikan struktur PID klasik dengan algoritma jaringan syaraf tiruan (*Artificial Neural Network/ANN*) seperti pembelajaran Hebbian (*Hebbian learning*) dalam satu unit neuron. SNPID memiliki kemampuan untuk melakukan penyesuaian parameter secara waktu nyata (*realtime*) berdasarkan sinyal *error* sehingga sesuai untuk sistem yang dinamis dan non linear (Mao & Ge, 2020). Beberapa studi menunjukkan bahwa SNPID efektif diterapkan pada sistem yang non linear dan memiliki dinamika yang kompleks (Mao & Ge, 2020; Sobhan, Nagesh Kumar, Amarnath, & Subbarao, 2014). Pada kondisi pengendalian motor induksi untuk sistem transportasi pada irradiator, pengendali SNPID dapat memberikan respon yang lebih adaptif terutama ketika mengalami perubahan beban secara mendadak atau gangguan eksternal yang tidak dapat diprediksi. Kemampuan SNPID untuk mengoptimalkan parameter kendali secara otomatis memungkinkan sistem mempertahankan performa yang stabil tanpa memerlukan *tuning* ulang secara manual (Feng, 2022). Hal ini menjadikan pengendali SNPID sangat sesuai untuk aplikasi pada sistem transportasi irradiator, di mana kecepatan motor induksi harus dijaga secara konsisten agar durasi penyinaran tetap akurat dan efisien dalam berbagai kondisi operasional.

Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk membandingkan performa pengendali SNPID dengan pengendali PID konvensional yang di-*tuning* dengan menggunakan metode MZN untuk pengendalian kecepatan motor induksi pada sistem transportasi

prototipe karakterisasi irradiator gamma. Perbandingan ini dilakukan untuk mengevaluasi performa pengendalian dari kedua metode kendali tersebut dalam mengendalikan sistem transportasi irradiator, baik pada kondisi operasi normal ataupun kondisi operasi dengan gangguan.

Makalah ini disusun dengan struktur sebagai berikut. Bagian kedua membahas metodologi penelitian, yang mencakup deskripsi *plant* motor induksi, perancangan sistem kendali PID konvensional menggunakan metode MZN, perancangan pengendali SNPID, serta metodologi evaluasi performa pengendali. Bagian ketiga menyajikan hasil simulasi dan analisis perbandingan antara kedua metode kendali. Selanjutnya, bagian keempat memuat kesimpulan dari penelitian ini.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini meliputi beberapa tahapan utama, yaitu pemodelan matematis dari *plant* motor induksi, perancangan sistem kendali berbasis PID menggunakan metode MZN, serta perancangan pengendali adaptif berbasis SNPID. Evaluasi performa dilakukan melalui lingkungan simulasi yang terdiri dari uji *step response*, *setpoint tracking*, dan uji gangguan eksternal, sehingga perbandingan antara pengendali PID-MZN dan SNPID dapat diukur secara objektif dan komprehensif.

Deskripsi *Plant* Motor Induksi

Plant yang digunakan dalam penelitian ini adalah motor induksi tiga fasa yang menjadi aktuator utama dari sistem transportasi pada prototipe karakterisasi irradiator gamma. Motor induksi tersebut bertugas untuk menggerakkan sistem transportasi produk pada tahapan *loading* dan *unloading* dalam simulator irradiator. Motor yang digunakan merupakan motor tipe sangkar tupai (*squirrel cage induction motor*) dengan spesifikasi seperti yang tertera pada Tabel 1 (Damayanti, Syawaludin, & Gunawan, 2022).

Tabel 1 Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa

Parameter	Nilai
Tegangan sumber (V)	220 V
Frekuensi (f)	50 Hz
Daya nominal (P)	1,5 kW
Arus nominal (I)	6,3 A
Faktor daya ($\cos \phi$)	0,79
Kecepatan nominal	1400 rpm
Jumlah kutub (p)	4 kutub
Momen inersia (J)	31,3 kg·cm ²

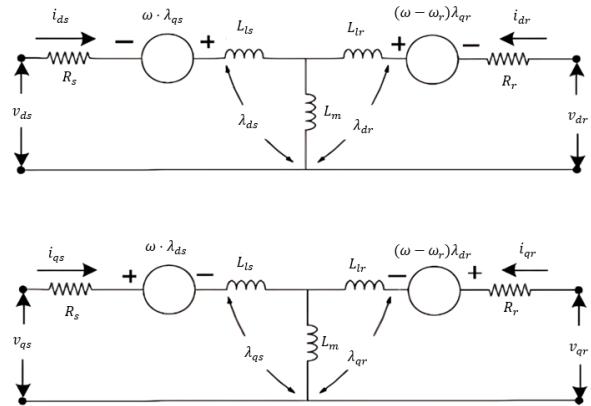
Model matematis motor induksi diperoleh melalui pendekatan sistem *direct-quadrature axis* (d-q) dalam domain transformasi Laplace berdasarkan rangkaian ekuivalen dari sistem motor induksi. Berdasarkan rangkaian ekuivalen seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, persamaan matematis dari dinamika motor induksi ditunjukkan sebagai berikut.

$$V_{sd}(t) = R_s i_{sd}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \quad (1)$$

$$V_{sq}(t) = R_s i_{sq}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} \quad (2)$$

$$V_{rq}(t) = R_r i_{rq}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{rd} + \frac{d}{dt} \lambda_{rq} = 0 \quad (3)$$

$$V_{rd}(t) = R_r i_{rd}(t) - n_p \omega_m(t) \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{rd} = 0 \quad (4)$$



Gambar 1 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi dalam Domain D-Q

Hubungan antara arus dan fluks magnetik pada sumbu d dan q dinyatakan sebagai berikut.

$$\lambda_{sd}(t) = L_s i_{sd}(t) + L_m i_{rd}(t) \quad (5)$$

$$\lambda_{sq}(t) = L_s i_{sq}(t) + L_m i_{rq}(t) \quad (6)$$

$$\lambda_{rd}(t) = L_r i_{rd}(t) + L_m i_{sd}(t) \quad (7)$$

$$\lambda_{rq}(t) = L_r i_{rq}(t) + L_m i_{sq}(t) \quad (8)$$

Dimana :

V_{rd}, V_{rq} = Tegangan rotor pada sumbu d-q

V_{sd}, V_{sq} = Tegangan stator pada sumbu d-q

i_{sd}, i_{sq} = Arus stator pada sumbu d-q

i_{rd}, i_{rq} = Arus rotor pada sumbu d-q

$\lambda_{rd}, \lambda_{rq}$ = Fluks rotor pada sumbu d-q

$\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$ = Fluks stator pada sumbu d-q

R_r = Resistansi rotor

R_s = Resistansi stator

L_r = Induktansi rotor

L_s = Induktansi stator

L_m = Induktansi magnetisasi

ω_m = Kecepatan sudut rotor

Persamaan dinamis motor induksi (1) hingga (4) dapat disusun ulang menjadi:

$$\frac{d}{dt} i_{sd}(t) = \beta n_p \omega_m(t) \lambda_{rq}(t) + \eta \beta \lambda_{rd}(t) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd}(t) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq}(t) = -\beta n_p \omega_m(t) \lambda_{rd}(t) + \eta \beta \lambda_{rq}(t) - \gamma i_{sq}(t) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq}(t) \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rd}(t) = -n_p \omega_m(t) \lambda_{rq}(t) + \eta \lambda_{rd}(t) + \eta L_m i_{sd}(t) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) = -n_p \omega_m(t) \lambda_{rd}(t) + \eta \lambda_{rq}(t) + \eta L_m i_{sq}(t) \quad (12)$$

Dimana :

$$\eta = \frac{R_r}{L_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$$

$$\gamma = \frac{L_m}{\sigma L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}, \quad \mu = n_p \frac{L_m}{L_{eq} L_r}$$

Interaksi antara fluks rotor dan arus stator menghasilkan torsi elektromagnetik yang dinyatakan sebagai berikut.

$$T_{em} = n_p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{rd} i_{sq}(t) - \lambda_{rq} i_{sd}(t)) \quad (13)$$

Persamaan matematis untuk dinamika mekanik pada motor induksi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$J_{eq} \frac{d}{dt} \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_b(t) - T_L(t) \quad (14)$$

$$T_b(t) = B_m \omega_m(t) \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m(t) = \omega_m(t) \quad (16)$$

Dalam kerangka referensi d-q, motor induksi memiliki beberapa variabel input utama, yaitu $V_{sd}(t)$, $V_{sq}(t)$, dan $T_L(t)$. Proses penurunan fungsi transfer dalam sistem ini menjadi lebih kompleks dibandingkan dengan sistem yang hanya memiliki satu input. Oleh karena itu, dalam studi ini digunakan asumsi tegangan input $V_{sq}(t)$ dan beban $T_L(t)$ berada dalam kondisi nol. Dengan menggunakan transformasi Laplace, persamaan (14) hingga (16) dapat disusun ulang sebagai berikut.

$$(J_{eq}s + B_m) \omega_m(s) = T_{em}(s) - T_L(s) \quad (17)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T_{em}(s)}{J_{eq}s + B_m} \quad (18)$$

Berdasarkan persamaan sebelumnya, dapat diketahui bahwa besar tegangan input $V_{sd}(t)$ adalah sebagai berikut.

$$V_{sd}(t) = n_p \beta \omega_m(t) \lambda_{rq} + \eta \beta \lambda_{rd} + \gamma i_{sd}(t) + \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \sigma L_s \quad (19)$$

Dengan mensubstitusi nilai β , η , dan γ , diperoleh bahwa:

$$V_{sd}(t) = n_p \frac{L_m}{L_r} \omega_m(s) \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd} + \left(\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma L_s \right) i_{sd}(s) \quad (20)$$

Sehingga fungsi transfer sistem motor induksi yang digunakan pada studi ini adalah sebagai berikut.

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{n_p L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))}{L_r (J_{eq}s + B_m)} \quad (21)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{n_p \frac{L_m}{L_r} \omega_m(s) \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd}}{n_p \frac{L_m}{L_r} \omega_m(s) \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd} + \left(\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma L_s \right) i_{sd}(s)}$$

Dengan mensubstitusi nilai parameter motor induksi yang digunakan seperti pada Tabel 1, diperoleh fungsi transfer motor induksi sebagai berikut.

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{1.78}{0.72 \times 10^{-3} s^2 + 0.0157 s + 3.168} \quad (22)$$

$$G_m(s) = \frac{2470}{s^2 + 21.79 s + 4400} \quad (23)$$

Perancangan Sistem Kendali PID Konvensional Menggunakan Metode *Modified Ziegler-Nichols*

Pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) merupakan salah satu metode kendali konvensional yang banyak digunakan untuk pengendalian performa sistem dinamik (Çopur, Balta, & Bilgic, 2025). Secara umum, efektivitas pengendali PID sangat dipengaruhi oleh nilai parameter pengendalinya, yaitu konstanta proporsional (K_p), konstanta integral (K_i), dan konstanta derivatif (K_d) (Welander & Vandoren, 2010). Persamaan matematis domain waktu dari pengendali PID ditunjukkan pada persamaan (24).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (24)$$

Dalam domain Laplace, pengendali PID dirumuskan sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (25)$$

Untuk memperoleh nilai parameter pengendali yang menghasilkan performa sesuai kebutuhan, banyak studi yang telah dilakukan untuk menghasilkan metode *tuning* pengendali PID. Salah satu metode *tuning* parameter PID yang banyak digunakan adalah metode *Ziegler-Nichols*. Namun, metode klasik ini memiliki keterbatasan dalam mencapai respon transien dan stabilitas sistem yang dibutuhkan. Metode *Ziegler-Nichols* klasik cenderung menghasilkan respon sistem yang memiliki *overshoot* besar dan bersifat osilatif (Edaris & Abdul-Rahman, 2016).

Untuk mengatasi keterbatasan metode *Ziegler-Nichols* klasik yang menghasilkan respon sistem osilatif dan *overshoot* tinggi, dikembangkan metode *Modified Ziegler-Nichols* (MZN). Metode ini merupakan pendekatan *tuning* PID berbasis domain frekuensi yang mempertimbangkan margin fasa sistem sebagai indikator kestabilan. Dalam MZN, dua parameter utama digunakan, yaitu r_b (ratio amplitudo) dan ϕ_b (margin fasa yang diinginkan), yang memungkinkan penyesuaian karakteristik respon sistem secara lebih fleksibel (Xue, Chen, & Atherton, 2008). Nilai r_b memengaruhi kecepatan respon dan *overshoot*, sedangkan ϕ_b memengaruhi derajat osilasi dan kestabilan. Dengan pemilihan parameter yang sesuai, misalnya $r_b = 0.45$ dan $\phi_b = 45^\circ$, dapat diperoleh respon sistem yang cepat dan tanpa *overshoot*, berbeda dengan metode *Ziegler-Nichols* asli yang cenderung menghasilkan respon yang agresif dan kurang stabil.

Untuk melakukan *tuning* pengendali PID dengan metode MZN, digunakan kurva respon frekuensi Nyquist. Misalkan titik A merupakan titik pada kurva respon frekuensi Nyquist yang memiliki representasi $G(j\omega_0) = r_a e^{j(\pi+\phi_a)}$, yang akan dipindahkan ke posisi baru A₁ dengan representasi $G_1(j\omega_0) = r_b e^{j(\pi+\phi_b)}$. Misalkan pengendali PID pada frekuensi ω_0 direpresentasikan sebagai $G_c(s) = r_c e^{j\phi_c}$, maka dapat dirumuskan:

$$r_c e^{j\phi_c} = \frac{r_b}{r_a} e^{j(\phi_b - \phi_a)} \quad (26)$$

Dimana:

$$r_c = \frac{r_b}{r_a}, \quad \phi_c = \phi_b - \phi_a$$

Berdasarkan analisis ini, dapat dirumuskan aturan *tuning* untuk pengendali PID sebagai berikut.

$$K_p = \frac{r_b \cos(\phi_b - \phi_a)}{r_a} \quad (27)$$

$$\omega_0 T_d - \frac{1}{\omega_0 T_i} = \tan(\phi_b - \phi_a) \quad (28)$$

Berdasarkan persamaan (27) dan (28), dapat diketahui bahwa K_p adalah sebuah nilai unik namun tidak dengan T_i dan T_d . Untuk memperoleh nilai T_i dan T_d yang unik, digunakan hubungan sebagai berikut.

$$T_i = \frac{1}{2\alpha\omega_0} \left(\frac{\tan(\phi_b - \phi_a)}{+ \sqrt{4\alpha + \tan^2(\phi_b - \phi_a)}} \right) \quad (29)$$

Dimana:

$$T_d = \alpha T_i \quad (30)$$

Jika nilai α yang digunakan adalah 0.25, maka aturan *tuning* MZN dapat dituliskan sebagai berikut.

$$K_p = K_c r_b \cos \phi_b \quad (31)$$

$$T_i = \frac{T_c}{\pi} \left(1 + \frac{\sin \phi_b}{\cos \phi_b} \right) \quad (32)$$

$$T_d = \frac{T_c}{4\pi} \left(1 + \frac{\sin \phi_b}{\cos \phi_b} \right) \quad (33)$$

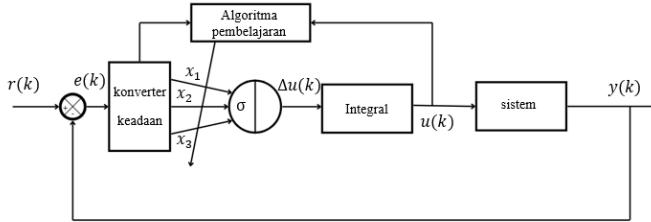
Dimana:

$$r_a = \frac{1}{K_c}, \quad \phi_a = 0, \quad \alpha = \frac{1}{4}$$

Perancangan Pengendali Single Neuron PID

Pengendali *Single Neuron PID* (SNPID) merupakan bentuk adaptif dari pengendali PID klasik yang mengintegrasikan prinsip pengendali PID klasik dengan algoritma pembelajaran dari ANN (Ma et al., 2021). Jika pada pengendali PID klasik nilai parameter pengendali K_p , K_i , dan K_d merupakan nilai statis, pengendali SNPID akan memperbarui parameter kendali secara dinamis berdasarkan informasi sinyal kesalahan sistem (Kusumoputro & RifAn, 2016). Pendekatan ini menyebabkan pengendali SNPID memiliki kemampuan adaptasi terhadap perubahan kondisi sistem secara *real-time* (Wang & Wang, 2025), sehingga lebih baik dalam menghadapi dinamika sistem yang nonlinear, gangguan eksternal, atau perubahan beban yang tidak dapat diprediksi. Arsitektur dasar dari SNPID terdiri dari sebuah neuron tunggal dengan tiga input seperti yang terlihat pada Gambar 2. Keluaran dari pengendali SNPID adalah

sinyal kontrol yang digunakan untuk mengendalikan sistem dinamik.



Gambar 2 Blok Diagram Pengendali SNPID

Arsitektur pengendali SNPID dapat diturunkan dari persamaan diferens pengendali PID diskrit. Bentuk diskrit dari persamaan matematis pengendali PID berdasarkan persamaan (24) adalah sebagai berikut.

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T_s \sum_{i=0}^k e(i) + K_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (34)$$

Bentuk diferens dari persamaan diskrit pengendali PID adalah sebagai berikut.

$$\Delta u(k) = K_p \cdot \Delta e(k) + K_i \cdot T_s \cdot e(k) + K_d \cdot \frac{\Delta e(k) - \Delta e(k-1)}{T_s} \quad (35)$$

Dengan mendefinisikan $x_1 = \Delta e(k)$, $x_2 = e(k)$, dan $x_3 = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$, serta $w_1 = K_p$, $w_2 = K_i T_s$, dan $w_3 = \frac{K_d}{T_s}$, maka persamaan (35) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta u(k) = w_1(k) \cdot x_1(k) + w_2(k) \cdot x_2(k) + w_3(k) \cdot x_3(k) \quad (36)$$

Berdasarkan persamaan (36), dapat diketahui bahwa persamaan pengendali PID diskrit memiliki bentuk yang serupa dengan persamaan output dari sebuah neuron tunggal dalam algoritma jaringan syaraf tiruan. Jika diberikan sebuah fungsi aktivasi linier, maka persamaan (36) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta u(k) = K \cdot \sum_{i=1}^3 w_i(k) \cdot x_i(k) \quad (37)$$

Dengan menerapkan algoritma pembelajaran seperti pada jaringan syaraf tiruan, maka nilai parameter pengendali PID dapat diperbarui secara simultan berdasarkan input yang diberikan. Hal ini memberikan kemampuan adaptif kepada pengendali SNPID dalam menyesuaikan nilai parameter pengendalinya berdasarkan kondisi sistem saat ini.

Untuk mencegah nilai sinyal kontrol menjadi terlalu besar dan menjaga konvergensi pembelajaran, perlu dilakukan normalisasi bobot seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$\bar{w}_i(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|} \quad (38)$$

Dalam studi ini, digunakan algoritma pembelajaran *Supervised Hebb* untuk memperbarui parameter pengendali dalam setiap waktunya seperti yang terlihat pada persamaan (39), dimana α menunjukkan laju pembelajaran untuk masing-masing bobot.

$$w_i(k+1) = \bar{w}_i(k) + \alpha \cdot e(k) \cdot u(k) \cdot x_i(k) \quad (39)$$

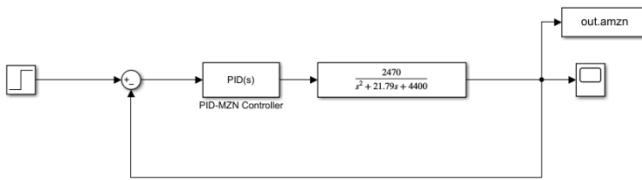
Metodologi Evaluasi Performa Pengendali

Evaluasi performa dilakukan untuk membandingkan efektivitas dari dua jenis pengendali yang telah didesain sebelumnya, yaitu pengendali PID klasik yang di-tuning menggunakan metode MZN dan pengendali SNPID. Proses evaluasi dilakukan melalui lingkungan simulasi MATLAB/Simulink, dimana kedua pengendali akan diuji untuk mengendalikan kecepatan motor induksi pada sistem transportasi prototipe karakterisasi irradiator gamma berdasarkan model matematis motor induksi yang telah diturunkan sebelumnya. Model matematis motor akan menggunakan parameter motor induksi seperti pada Tabel 1. Evaluasi perbandingan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

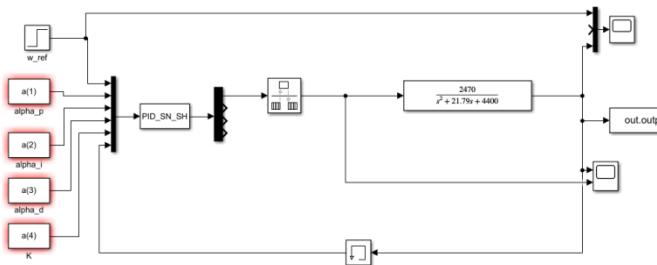
1. Uji *step response*, untuk melihat performa transien dari masing-masing pengendali.
2. Uji *setpoint tracking*, untuk melihat kemampuan pengendali saat terjadi perubahan nilai *setpoint*.
3. Uji terhadap gangguan, untuk mengukur ketahanan pengendali saat sistem mengalami gangguan.

Pengujian dilakukan dengan pendekatan simulasi menggunakan model matematis motor induksi yang telah diturunkan sebelumnya. Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan blok diagram pengujian untuk pengendali PID-MZN dan SNPID berturut-turut. Setiap pengujian akan dilakukan dengan kondisi yang sama untuk memastikan kesetaraan dan konsistensi hasil pengujian. Dalam pengujian *step response*, sistem diberi input berupa sinyal tangga unit (*unit step*) dengan durasi uji selama 10 detik untuk mengamati waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), *overshoot*, dan *error keadaan tunak* (*steady state error*). Pada pengujian *setpoint tracking*, nilai input kecepatan motor divariasikan secara bertahap setiap 5

detik untuk menilai kemampuan pengendali dalam mengikuti perubahan *setpoint*. Performa pengendali dinilai berdasarkan kecepatan sistem dalam menyesuaikan nilai output tanpa menyebabkan osilasi dan *overshoot* signifikan, atau waktu adaptasi yang terlalu lama. Pada pengujian terhadap gangguan, sistem diberi gangguan secara mendadak pada waktu tertentu (detik ke-5) untuk mengamati kemampuan sistem kendali dalam mempertahankan kestabilan dan memulihkan respon ke level yang seharusnya. Parameter evaluasi yang digunakan yaitu *overshoot* setelah gangguan, durasi pemulihan, serta *error steady state* pada keadaan tunak.



Gambar 3 Blok Diagram Simulasi Pengendalian Kecepatan Motor dengan Pengendali PID-MZN



Gambar 4 Blok Diagram Simulasi Pengendalian Kecepatan Motor dengan Pengendali SNPID

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengendali PID di-tuning dengan metode MZN dengan variasi *phase margin* sebesar 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , dan 80° untuk mendapatkan hasil evaluasi yang lebih luas terhadap performa pengendali PID yang di-tuning dengan metode ini. Parameter yang digunakan dalam melakukan *tuning* pengendali PID dengan metode MZN ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai K_c dan ω_c ditentukan berdasarkan titik potong *magnitude* dan fasa sistem lup terbuka (titik batas kestabilan kritis sistem), sedangkan nilai r_b dan α dipilih untuk menghasilkan respon yang cepat dan tidak osilatif sesuai margin fasa yang diinginkan.

Setiap variasi *phase margin* akan menghasilkan konfigurasi parameter pengendali (K_p , K_i , dan K_d) yang berbeda, dengan performa yang dianalisis

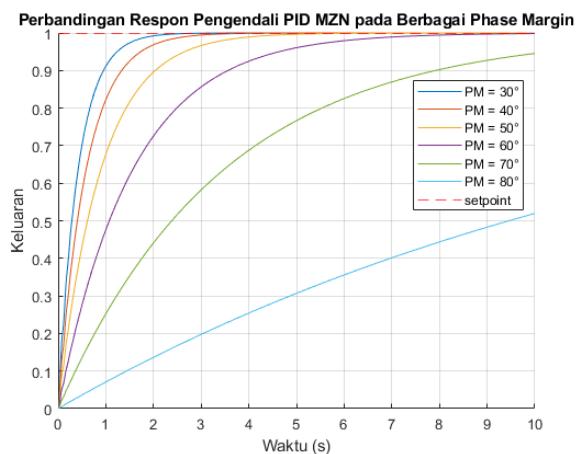
berdasarkan metrik *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *error steady state* (ESS). Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian dari pengendali PID yang di-tuning dengan metode MZN, sedangkan Gambar 5 menunjukkan perbandingan *step response* dari sistem motor induksi yang dikendalikan menggunakan setiap variasi pengendali.

Tabel 2 Parameter Tuning Pengendali PID dengan Metode Modified Ziegler-Nichols (MZN)

Variabel	Nilai
K_c	68.2 dB
ω_c	2520 rad/s
ω_p	78.60 rad/s
r_b	0.0001
α	0.25

Tabel 3 Hasil Evaluasi Performa Pengendali PID-MZN

PM	K_p	K_i	K_d	Over shoot	Rise time	Settling time	ESS
30	0,01	4,30	0,00	0,00	0,90	1,61	0,00
40	0,01	3,07	0,00	0,00	1,27	2,26	0,00
50	0,00	2,01	0,00	0,00	1,94	3,46	0,00
60	0,00	1,15	0,00	0,00	3,40	6,05	0,00
70	0,00	0,52	0,00	0,00	7,55	-	0,05
80	0,00	0,13	0,00	0,00	-	-	0,48



Gambar 5 Perbandingan Respon Pengendali PID-MZN pada Berbagai *Phase Margin*

Dari hasil simulasi dan pengujian *step response*, diketahui bahwa konfigurasi pengendali PID yang di-tuning dengan *phase margin* sebesar 30° memberikan performa terbaik secara keseluruhan. Pada konfigurasi ini, respon sistem menunjukkan *settling time* tercepat yaitu 1.612 detik, tanpa *overshoot* dan *error steady state*. Secara umum, setiap konfigurasi pengendali tidak menghasilkan respon sistem dengan karakteristik yang osilatif dan fluktuatif. Namun, respon sistem yang dikendalikan dengan variasi pengendali ini cenderung

lambat yang ditunjukkan dengan nilai *settling time* tercepat hanya sebesar 1.612 detik.

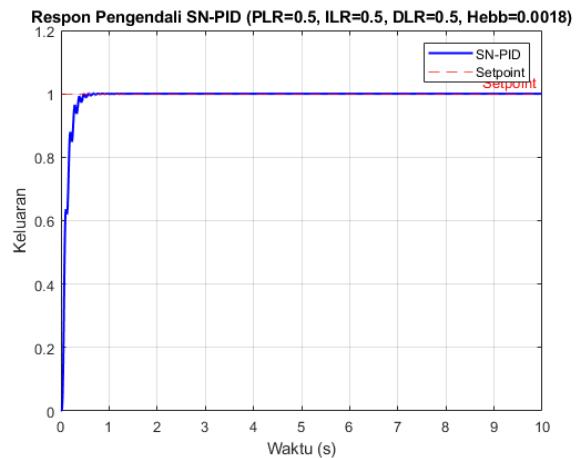
Pengendali SNPID yang digunakan memiliki parameter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Parameter pembelajaran pada pengendali SNPID terdiri dari laju pembelajaran (α_p , α_i , α_d) dan konstanta Hebb, yang secara langsung memengaruhi kemampuan adaptasi sistem terhadap perubahan kondisi. *Learning rate* menentukan seberapa cepat bobot kendali diperbarui berdasarkan sinyal *error*, dimana nilai yang terlalu besar dapat menyebabkan osilasi, sedangkan nilai yang terlalu kecil dapat membuat sistem lambat beradaptasi. Dalam studi ini, ketiga nilai *learning rate* disamakan pada 0.5 karena konfigurasi ini terbukti memberikan keseimbangan antara kecepatan adaptasi dan kestabilan sistem. Secara khusus, α_i memiliki pengaruh paling dominan dalam mempercepat konvergensi respon dibandingkan dengan α_p dan α_d , yang perubahan bobotnya cenderung kecil. Sementara itu, konstanta Hebb sebesar 0.0018 dipilih karena mampu memperkuat sinyal kendali secara efektif tanpa menimbulkan osilasi atau ketidakstabilan, sehingga menghasilkan performa sistem yang responsif dan stabil

Tabel 4 Parameter Tuning Pengendali SNPID

Parameter	Nilai
α_p	0.5
α_i	0.5
α_d	0.5
Konstanta Hebb	0.0018

Hasil pengujian pengendali SNPID terhadap masukan *step*, ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan hasil pengujian, dapat dilihat bahwa pengendali SNPID yang digunakan mampu menghasilkan respon sistem yang jauh lebih cepat jika dibandingkan dengan pengendali PID yang di-tuning menggunakan metode MZN seperti sebelumnya. Pengendali SNPID mampu menghasilkan respon transien sistem dengan *rise time* sebesar 0.152 detik, serta waktu tunak (*settling time*) sebesar 0.443 detik, yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan pengendali PID-MZN terbaik pada konfigurasi *phase margin* 30° yang memiliki *settling time* sebesar 1.612 detik. Selain itu, *overshoot* yang dihasilkan oleh pengendali SNPID juga sangat kecil, yaitu hanya sebesar 0.24% dengan *error steady state* yang mendekati nol. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendali SNPID mampu menghasilkan performa sistem yang sangat baik,

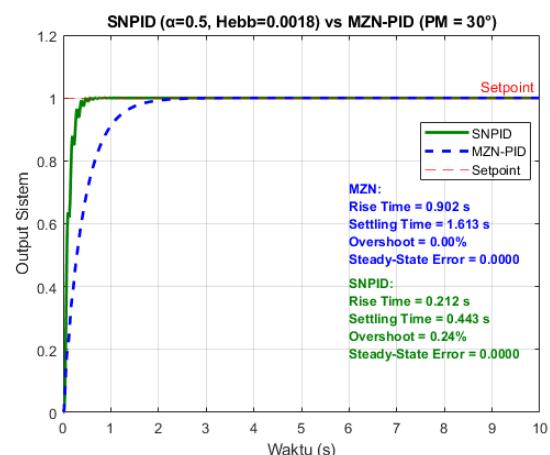
dengan kecepatan respon yang tinggi serta presisi yang stabil terhadap nilai *setpoint*. Tabel 5 menunjukkan perbandingan parameter transien sistem motor induksi dengan pengendali PID yang dituning dengan *phase margin* 30° dan pengendali SNPID, sedangkan Gambar 7 menunjukkan perbandingan *output* respon dari kedua sistem kendali.



Gambar 6 Respon sistem dengan pengendali SNPID

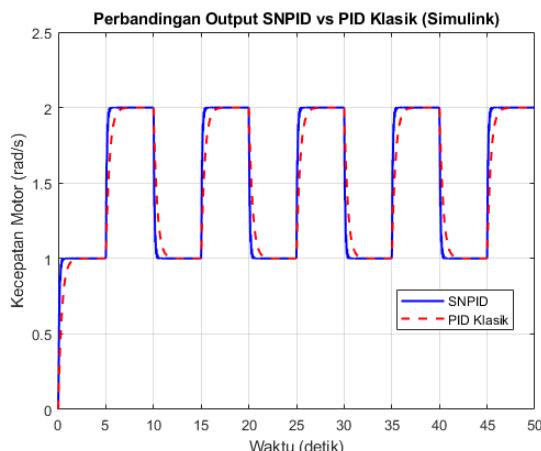
Tabel 5 Perbandingan Respon Transien Pengendali PID-MZN dan Pengendali SNPID

Parameter Evaluasi	PID-MZN	SNPID
Rise Time (s)	0.902	0.212*
Settling Time (s)	1.613	0.443*
Overshoot (%)	0.00*	0.24
Steady-State Error	0.0000	0.0000



Gambar 7 Perbandingan Respon antara Pengendali PID-MZN dan Pengendali SNPID

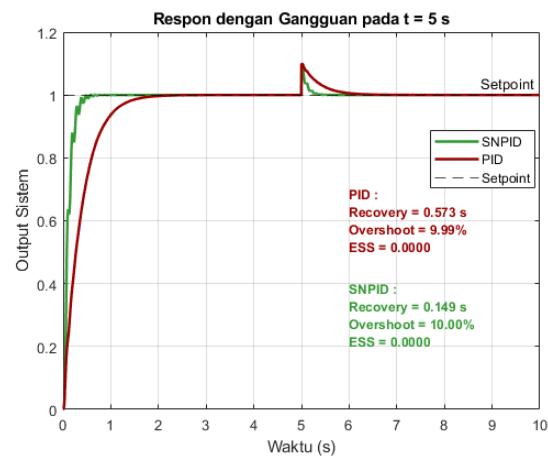
Untuk memperoleh hasil evaluasi yang lebih luas, dilakukan pula pengujian *setpoint tracking* dan pengujian penerapan gangguan pada sistem motor induksi yang dikendalikan dengan masing-masing pengendali. Gambar 8 menunjukkan hasil pengujian *setpoint tracking* dengan pola perubahan *setpoint* secara periodik. Secara umum, baik pengendali PID-MZN maupun pengendali SNPID, mampu mengikuti perubahan *setpoint* dengan baik. Namun, secara visual dapat diamati bahwa pengendali SNPID menghasilkan waktu respon yang sedikit lebih cepat dan lebih stabil dibandingkan pengendali PID-MZN, terutama saat peralihan dari satu level *setpoint* ke level lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali SNPID memiliki kemampuan adaptasi yang baik dalam mengikuti dinamika perubahan referensi secara berulang tanpa menyebabkan osilasi atau keterlambatan signifikan.



Gambar 8 Performa *Setpoint Tracking* dari Pengendali PID-MZN dan SNPID pada Sistem Motor Induksi

Sementara itu, pengujian terhadap respons sistem ketika dikenai gangguan (*disturbance*) pada detik ke-5 ditunjukkan pada Gambar 7. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi ketahanan dari masing-masing pengendali terhadap gangguan eksternal yang bersifat acak. Berdasarkan grafik, dapat dilihat bahwa kedua pengendali mampu membawa keluaran sistem kembali menuju *setpoint*. Selain itu, nilai *overshoot* akibat gangguan pada kedua pengendali relatif serupa, yaitu sekitar 10%, dan *error steady state* tetap berada pada level nol. Akan tetapi, pengendali SNPID menunjukkan kemampuan pemulihan yang lebih cepat dengan waktu pemulihan sebesar 0.149 detik dibandingkan pengendali PID-MZN yang memerlukan waktu 0.573 detik untuk kembali stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun kedua pengendali memberikan respon yang cukup baik, namun pengendali SNPID lebih unggul dalam hal kecepatan

adaptasi terhadap perubahan mendadak dan acak pada sistem motor induksi.



Gambar 7 Respon terhadap Gangguan pada Pengendali PIDMZN dan Pengendali SNPID

Berdasarkan seluruh hasil evaluasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengendali SNPID menghasilkan performa sistem yang lebih baik dibandingkan dengan pengendali PID konvensional yang di-tuning menggunakan metode MZN. Keunggulan SNPID ditunjukkan melalui respon transien yang lebih cepat, kemampuan *tracking* terhadap perubahan *setpoint* yang lebih responsif, serta ketahanan yang lebih baik dalam menghadapi gangguan eksternal. Dengan parameter yang relatif lebih sederhana dan struktur yang adaptif, pengendali SNPID terbukti efektif dalam mengendalikan sistem dinamis seperti motor induksi pada prototipe karakterisasi irradiator gamma. Hasil ini menunjukkan potensi penggunaan pendekatan berbasis kecerdasan buatan, seperti SNPID, sebagai alternatif pengendali adaptif yang dapat digunakan pada sistem industri yang memerlukan presisi dan kecepatan tinggi dalam pengaturan variabel proses.

KESIMPULAN DAN RECANA PENGEMBANGAN

Berdasarkan hasil simulasi dan evaluasi performa, dapat disimpulkan bahwa pengendali *Single Neuron PID* (SNPID) menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan pengendali PID konvensional yang dituning menggunakan metode *Modified Ziegler-Nichols* (MZN). Pengendali PID-MZN dengan *phase margin* 30° menghasilkan kinerja terbaik di antara variasi *phase margin* yang diuji, namun tidak menghasilkan respons yang lebih cepat dan lebih presisi dibandingkan dengan pengendali SNPID. Dalam uji *step response*, SNPID menunjukkan waktu respon yang lebih singkat dan *error steady state* yang

mendekati nol. Pada uji *setpoint tracking*, SNPID mampu mengikuti perubahan referensi dengan lebih halus dan cepat. Selain itu, pengujian respon terhadap gangguan menunjukkan bahwa pengendali SNPID memiliki ketahanan yang lebih baik. Hal ini membuktikan bahwa metode kendali berbasis kecerdasan buatan, khususnya SNPID, sangat potensial untuk diimplementasikan dalam sistem kendali motor induksi pada aplikasi irradiator gamma dan sistem dinamis lainnya yang membutuhkan pengaturan presisi dalam kondisi operasional yang berubah-ubah. Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, validasi eksperimental akan dilakukan pada tahap pengembangan berikutnya dengan menerapkan pengendali SNPID secara langsung pada sistem motor induksi pada *plant* prototipe karakterisasi irradiator gamma untuk mengkonfirmasi hasil simulasi dalam kondisi sebenarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Çopur, E. H., Balta, E., & Bilgic, H. H. (2025). Tuning of cascade PID controller gains of quadcopter under bounded disturbances using metaheuristic based research algorithm. *The Aeronautical Journal*, 2025, 1–23.
- Damayanti, R., Syawaludin, B., & Gunawan, H. A. (2022). Design of PI and PID control system for induction motor control on gamma irradiator characterization prototype using a modified Ziegler-Nichols method. *Journal of Electrical Technology UMY (JET-UMY)*, 6(2), 1–10.
- Edaris, Z. L., & Abdul-Rahman, S. (2016). Performance comparison of PID tuning by using Ziegler-Nichols and particle swarm optimization approaches in a water control system. *Journal of Information and Communication Technology*, 15(1), 203–224.
- Feng, W.-H. (2022, January 7–9). Brushless DC motor control based on improved single neuron PID algorithm. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing and Automation Technology (MEMAT 2022)* (pp. 697–700). Guilin, China.
- Indiarto, R., Pratama, A. W., Sari, T. I., & Theodora, H. C. (2020). Food irradiation technology: A review of the uses and their capabilities. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 68(12), 91–98.
- Jacobs, G. P. (2021). Validation of the radiation sterilization of pharmaceuticals. In *Handbook of Validation in Pharmaceutical Processes: Fourth Edition* (pp. 355–373). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003163138-22>
- Kepala Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir. (2018). *MP01-CERG2018-RFN.4, Manual Program Prototipe Karakterisasi Irradiator Gamma*. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).
- Kepala Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir. (2019). *MP001-CERG2019-RFN.4, Manual Program Prototipe Karakterisasi Irradiator Gamma Tahap II* (No. 021, pp. 1–25). Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).
- Koubaa, M., Barba-Orellana, S., Roselló-Soto, E., & Barba, F. J. (2016). Gamma irradiation and fermentation. In *Food Engineering Series* (pp. 143–153). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42457-6_7
- Kusumoputro, B., & Rif'An, M. (2016, December 14–16). Performance characteristics of an improved single neuron PID controller using additional error of an inverted control signal. In *Proceedings of the 2015 World Congress on Industrial Control Systems Security (WCICSS 2015)* (pp. 58–62). London, United Kingdom. IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCICSS.2015.7420324>
- Luo, Q., Liu, D., Song, S., Yang, W., & Qiao, Z. (2021, October 10–11). Research on artificial intelligence technology in electrical automation control. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 632(4), 042085. 2020 Asia Conference on Geological Research and Environmental Technology (GRET 2020), Kamakura City, Japan. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/632/4/042085>
- Ma, F., Lu, J., Liu, L., & He, Y. (2021). Application of improved single neuron adaptive PID control method in the angle predefined loop of active radar seeker for anti-radiation missile. In *Proceedings of the 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)* (pp. 2160–2164). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCEC51613.2021.9482241>
- Mao, Q., & Ge, S. (2020, December 18–20). A parallel nonlinear control system of improved generalized predictive control and single neuron PID based on U-model. In *Proceedings of the 2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE 2020)* (pp. 1595–1599). Changsha, China. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICISCE50968.2020.00315>

- O'Hara, K. (2012). Gamma ray technology for food irradiation. In *Food Irradiation Research and Technology: Second Edition* (pp. 29–46). Wiley-Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781118422557.ch3>
- Satmoko, A., Gunawan, H. A., Rozali, B., & Budiyono, W. (2017, November 21–23). Komisioning awal prototip iradiator Gamma Merah Putih dengan aktivitas sumber Cobalt-60 sebesar 300 KCi. In *Seminar Pendayagunaan Teknologi Nuklir 2017*, Tangerang Selatan, Indonesia: Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).
- Sobhan, P. V. S., Nagesh Kumar, G. V., Amarnath, J., & Subbarao, M. (2014). Stabilization of active magnetic bearing system using single neuron PID controller. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(7), 1149–1155.
- Syawaludin, B., Gunawan, H. A., & Tukiman. (2021). Pembuatan program kendali pergerakan tote pada frame simulator iradiator menggunakan PLC Omron seri CJ2M-CPU13. *PRIMA*, 18(1), 1–10.
- Wang, L., & Wang, H. (2025). Study on the optimization for reactive power regulation of synchronous condenser based on single neuron adaptive PID. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 11(1), 184–193.
<https://doi.org/10.23919/CJEE.2025.0000109>
- Welander, P., & Vandoren, V. (2010, February 1). Understanding derivative in PID control. *Control Engineering*, 57(2).
- Xue, D., Chen, Y., & Atherton, D. P. (2008). *Linear Feedback Control: Analysis and Design with MATLAB*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).