

INVESTIGASI PENGENDALIAN LEVEL PERMUKAAN AIR *PRESSURIZER* DI PWR BERBASIS KENDALI *PROPORTIONAL INTEGRAL*

Syaiful Bakhri

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gedung No 80. Serpong - 15310

Email: bakhri@batan.go.id

Diterima editor 29 Agustus 2014

Disetujui untuk publikasi 7 Oktober 2014

ABSTRAK

INVESTIGASI PENGENDALIAN LEVEL PERMUKAAN AIR *PRESSURIZER* DI PWR BERBASIS KENDALI *PROPORTIONAL INTEGRAL* . Sistem kendali level air di *pressurizer* sangat dibutuhkan bagi keselamatan pengoperasian PWR dengan menyelaraskan perubahan volume sekaligus mempertahankan tekanan yang ada di kalang primer pada *set point* tertentu. Beberapa riset telah mengusulkan sistem cerdas baik *neural network* maupun *fuzzy logic* untuk meningkatkan kemampuan sistem kendali konvensional level yang umum dipakai di PWR yaitu *Proportional-Integral* (PI) atau *Proportional-Integral-Derivative* (PID). Namun sangat disayangkan penelitian-penelitian ini kurang mengkaji secara komprehensif potensi kendali konvensional ini. Padahal jika parameternya ditentukan dengan lebih seksama akan memberikan hasil yang setara bahkan lebih baik. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab tantangan ini dengan meneliti lebih seksama sekaligus menguji parameter-parameter kendali ini agar diperoleh konfigurasi terbaik untuk sistem kendali level air *pressurizer*. Dibanding dengan dengan hasil simulasi sistem cerdas jaringan saraf tiruan yang pernah dibuat sebelumnya, ternyata kendali PI hasil penelitian ini memberikan peningkatan waktu naik yang lebih baik sekitar 280 kali, peningkatan waktu penetapan sekitar 293 kali, penurunan lewatan maksimum sekitar 1,1 kali, dan penurunan puncak sekitar 0,2 %. Hasil validasi dari konfigurasi ini juga terbukti stabil, mampu mengatasi gangguan selama 10 detik dengan puncak maksimum level 0,005%, dan mampu mengikuti perubahan *set point* dengan baik.

Kata Kunci : *Pressurizer, proportional integral, proportional integral derivative, PWR*

ABSTRACT

INVESTIGATION OF *PROPORTIONAL INTEGRAL* BASED TECHNIQUE FOR CONTROLLING *PWR PRESSURIZER* WATER LEVEL. The control system in the *pressurizer* water level is necessary for the safety of the operation of *pressurizer* water reactors (PWRs). It will compensate the primary loop volume changes while keeping the existing pressure of the primary loop at a certain *set point*. Some researchers have proposed both an intelligent system of *neural network* and a *fuzzy logic* to improve the capability of the common conventional control systems used in PWR, i.e. *Proportional-Integral* (PI) or *Proportional-Integral-Derivative* (PID). However, those studies did not comprehensively assess the potential of the conventional control systems. It has been confirmed that if the parameters of the PI-based control system are determined more carefully, its results will be equivalent to the results of other control systems or even better. This study aims to address this challenging topic by examining and testing control parameters more closely to obtain the best configuration of the PI-based control system. Compared to the results of the artificial *neural network*-based control system, the PI results of this study provide an increase of rise time around 280 times, better settling time for approximately 293 times, a decrease of overshoot about 1.1 times, and a reduction of the peak around 0.2%. The configuration has also been validated to be stable and able to overcome disturbances for about 10 seconds with a maximum peak level of 0.005%. Moreover, it can track the *set point* changes very well.

Keywords: *Pressurizer, proportional integral, proportional integral derivative, PWR*

PENDAHULUAN

Sistem kendali level air di *pressurizer* berperilaku seperti kompensator kehilangan air di kalang primer, dengan cara mempertahankannya pada level tertentu di *pressurizer*. Level air di *pressurizer* akan berubah-ubah tergantung status keadaan dari reaktor nuklir seperti karena proses pengisian, pemanasan, pendinginan, perubahan konsentrasi *boric acid* dalam kalang primer, kemungkinan kebocoran di pompa sirkulasi utama atau jalur pipa primer. Syarat operasi *pressurizer* yang aman juga dengan menjaga levelnya konstan pada *set point* tertentu. Level air yang terlalu rendah akan berbahaya bagi pemanas yang seharusnya terendam di dalam tangki, namun sebaliknya level air yang terlalu tinggi akan sangat mengganggu bagi *spray flooding nozzles* yang terletak di tangki bagian atas, yang berarti juga mengganggu sistem pengaturan tekanan menjadi tidak valid.

Ditinjau dari metode sistem kendali level air, PWR yang ada, telah mengaplikasikan beragam metode, mulai sistem kendali *Proportional (P)*, *Proportional-Integral (PI)* dan *Proportional-Integral dan Derivative (PID)* [1,2]. Metode konvensional ini kurang stabil dengan semakin banyaknya masukan parameter data kendali yang masuk. Selain itu, *overshoot* atau lewatan maksimum dari sebuah pengesetan *set point* sangatlah tergantung dari seberapa jauh ketepatan penentuan parameter proporsional, differensial dan integral [3,4]. Beberapa riset juga berusaha meningkatkan kemampuan kendali konvensional ini dengan menambahkan metode lain, seperti menggunakan *fuzzy logic* dan *neural network*. Sebuah riset mengusulkan aplikasi *fuzzy logic* sebagai *tuning* kendali metode konvensional ini, sedangkan riset lainnya meningkatkan sistem kendali *hybrid* dengan *fuzzy-PID* untuk memperbaiki respon kondisi transient [1,5,6]. Aplikasi *neural network* juga digunakan untuk meningkatkan kemampuan kendali PID dengan penambahan arsitektur *neural network* CMAC (Cerebellar Model Articulation Controller) [7] yang pada dasarnya menggunakan *lookup table* hasil pembelajaran relasi *input* dan *output* kendali sebagai koreksi tambahan bagi ralat dari kendali PID. Metode lainnya menggunakan aplikasi *artificial neural network-radial basis function (ANN-RBF)* [8] untuk memperbaiki sekaligus menghaluskan luaran kendali PID, yang selanjutnya di klaim lebih tahan terhadap interferensi.

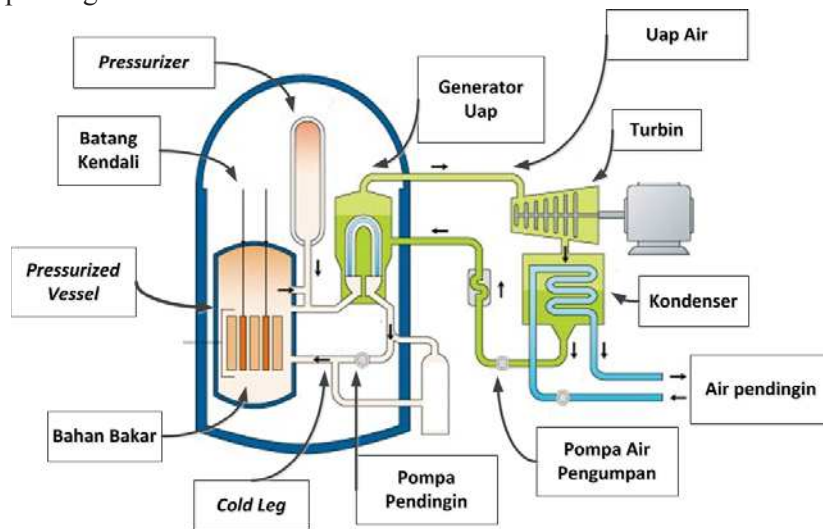
Namun penelitian-penelitian terdahulu ini belumlah membuktikan secara lebih seksama dan komprehensif, bahwa unjuk kerja kendali konvensional (P, PI maupun PID), sangatlah tergantung dari seberapa baik parameter konstanta kendalinya ditentukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjawab masalah ini dan sekaligus membuktikan bahwa penentuan parameter konstanta kendali konvensional (dalam hal ini PI) yang teliti dan detil akan memberikan hasil yang sama bahkan lebih baik dari aplikasi sistem cerdas yang diusulkan. Dua hal akan dilakukan dalam penelitian ini. Pertama, penelitian ini akan membahas secara lengkap kinerja dari sistem pengontrolan PI untuk berbagai variasi konfigurasi sehingga dapat diperoleh pemahaman yang utuh dan didapat konfigurasi PI terbaik dalam mengendalikan level permukaan air *pressurizer* di PWR. Kedua, penelitian ini akan membandingkan hasil penelitian ini dengan sebuah hasil simulasi kendali level air *pressurizer* dengan sistem cerdas terbaik yang sudah dipublikasikan secara internasional [9]. Parameter yang akan dibandingkan di antaranya adalah waktu naiknya, waktu penetapan, lewatan maksimum, dan persentase puncak yang dihasilkan. Diharapkan hasil penelitian ini memberikan kontribusi positif tentang pemahaman sistem kendali level air berbasis PI serta praktek terbaik yang harus diaplikasikan.

DASAR TEORI

Pressurizer di PWR

Pressurizer pada dasarnya adalah perangkat yang bertanggung jawab untuk menyelaraskan perubahan volume pada sistem pendingin primer dan mempertahankan tekanan yang dibutuhkan, yang bisa jadi akan terganggu karena perubahan suhu seiring dengan fluktuasi daya reaktor. Aplikasi

penggunaan beberapa heater yang terendam dibagian bawah *pressurizer* adalah munculnya sebuah kantong uap air bertekanan untuk mengkompensasi perubahan volume pendingin dan mencegah pendidihan air pendingin.



Gambar 1. Kalang primer dan sekunder berikut posisi pressurizer [10]

Gambar 1 menunjukkan kalang primer dan beberapa elemen utama seperti reaktor, pompa sirkulasi utama, steam generator dan pressurizer. Pressurizer adalah bejana tekan vertikal yang didesain dengan sambungan las cincin *ferritic stainless steel* dan mangkuk bejana dibagian atas dan bawahnya. Dibagian bawah dari tangki ini terdapat pemanas-pemanas elektrik dan jalur pemipaan yang menghubungkan pemanas-pemanas ini dengan sirkuit primer (dibagian atas juga terdapat katup pembuangan, katup pengaman, katup venting, dan *injection nozzles*) [11]. Bagian bawah ini diisi air, sedangkan bagian atas adalah uap air tersaturasi yang berkisar antara 36-40 % dari volume total [12]. Sebagai tambahan *pressurizer* juga dilengkapi *sprayer* untuk menyemprotkan air dingin untuk menjaga stabilitas uap pada suhu tertentu [13].

Sistem Kendali Kalang Tertutup Konvensional di Pressurizer

Metode kendali P, PI maupun PID adalah sistem otomatis yang umum dan *proven* dipakai di reaktor nuklir. Kendali kalang tertutup ini bahkan menjadi prasyarat kebutuhan operasi otomatis di reaktor nuklir. Kebutuhan ini tidak hanya untuk mendukung keselamatan operasi reaktor dengan memberikan kemudahan bagi operator, namun juga mengurangi keausan elemen-elemen aktuator jika disebabkan interaksi perintah kendali yang berlebihan seperti saat kendali *on-off* diaplikasikan. Secara lengkap kendali PID dapat dituliskan sebagai persamaan berikut [1]:

$$f_{PID} = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \right) \quad (1)$$

dimana K_p adalah gain *proportional*, T_i adalah waktu *integral*, T_d adalah waktu *derivative*, ε menunjukkan ralat ($\varepsilon = set\ point - variable\ terukur$), dan t adalah variable waktu. Dengan mentransformasikannya ke domain s dalam Laplace maka didapat persamaan PID sebagai berikut[1]:

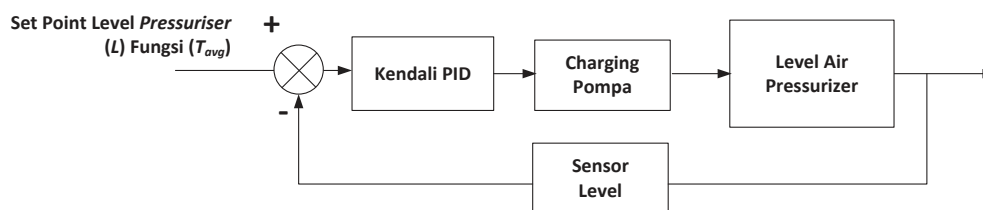
$$Gc(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

$$Gc(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

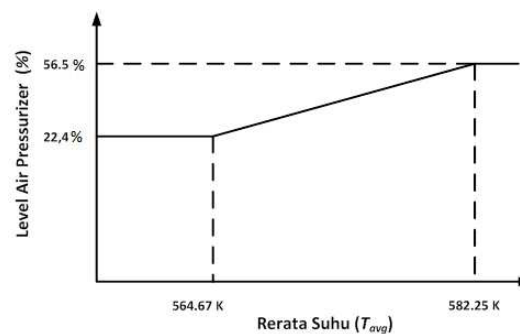
dengan K_p , K_i dan K_d adalah gain untuk *proportional*, *integral* dan *derivative*.

Konstanta proportional K_p berguna untuk menunjukkan faktor penguatan dari sinyal kesalahan, dan sinyal ini akan sebanding dengan besarnya input. Konstanta ini harus diaplikasikan dengan hati-hati mengingat karakternya yang jika berlebihan akan mengakibatkan osilasi yang besar dan offset yang signifikan, walaupun nilainya sangat dibutuhkan untuk mempercepat kestabilan. Sebaliknya, jika terlalu kecil maka responnya akan membuat lambat sebuah sistem kendali mencapai set point yang diinginkan. Komponen lainnya yaitu komponen kendali integral akan mempunyai karakter persis seperti fungsi integral dimana sinyal perubahan akan sangat tergantung dari jumlahan terus menerus dari nilai masukannya. Sama seperti proportional, komponen itu juga harus dipakai dengan seksama karena nilainya yang besar akan memperlambat proses dan belum tentu menghilangkan osilasi sinyal keluaran kontroler seperti yang diharapkan saat nilainya yang relatif kecil diaplikasikan. Komponen ketiga adalah komponen derivative yang akan berperilaku mirip diferensiasi pada operasi matematika. Karakteristik mendahuluinya akan mengoreksi pembangkitan ralat sebelum membesar. Namun pemakaiannya harus diperhatikan saat sinyal banyak mengandung riak agar riak ini tidak dideferensiasi menjadi sinyal-sinyal yang tidak beraturan. Selain itu kendali *derivative* tidak dapat dipakai bersendirian mengingat perilakunya yang tidak menghasilkan output saat jika tidak terjadi perubahan sama sekali di sisi input. Jumlahan ketiga komponen PID ini yang akan digunakan untuk kendali tentunya dengan kombinasi pengaturan yang tepat diantara ketiganya. Kombinasi besaran komponen masing-masing kendali yang tepat ini akan menentukan karakteristik respon sistem secara keseluruhan.

Diagram blok kendali PID pada pressurizer PWR secara umum dapat ditunjukkan di Gambar 2 berikut. Sistem kendali akan membaca masukan level dari sensor dan mengoreksinya dengan set point level yang sudah ditentukan berdasarkan referensi suhu air pendingin reaktor. Nilai kendali ini yang akan digunakan untuk mengaktifkan dan mematikan charging pump penyalp air ke dalam *pressurizer*. Perlu dicatat bahwa metode penentuan set point dari level air di *pressurizer* ditentukan oleh nilai inferensi dari suhu pendingin primer reaktor. Hal ini biasa dilakukan di PWR dengan asumsi bahwa peningkatan dan penurunan level karena peningkatan dan penurunan volume air pendingin yang dapat dideteksi suhu pendingin primer di reaktor. Sebagai catatan, sistem ini berlaku juga pada kendali PI dengan hanya mengganti PID menjadi PI.



Gambar 2. Kendali pressurizer dengan PID [7,9]



Gambar 3. Inferensi persentase *set point level pressurizer* sebagai fungsi suhu rerata pendingin primer di PWR [2]

Gambar 2 menunjukkan metode kendali sederhana dari level air *pressurizer*, *set point* level *pressurizer* ditentukan oleh nilai inferensi dari suhu pendingin primer di Gambar 3. Rerata suhu pendingin primer tertentu bersesuaian dengan level air terendah dan tertinggi yang diijinkan dalam pengoperasian *pressurizer*. Selisih nilai dari pembacaan variable terukur luaran sensor level di *pressurizer* dan nilai *set point* T_{avg} diumpankan pada blok kendali PID untuk menyalakan dan mematikan *charging pump* serta menutup atau membuka *relief valves*. Untuk mendapatkan kendali PID yang baik maka *gain* K_p , K_i dan K_d harus ditentukan dan diuji dengan sinyal masukan tertentu sekaligus melihat tanggapan reaksi sistem ini terhadap sinyal tersebut. Sinyal ini dapat berupa data operasi saat kondisi normal maupun saat gangguan yang terjadi di level air *pressurizer*.

Untuk memudahkan simulasi pengontrolan level air di *pressurizer* PWR, beberapa penelitian mengusulkan fungsi transfer untuk memodelkan sebuah *pressurizer*[7,8]. Fungsi transfer yang dibuat ini berupa model independen *pressurizer* di PWR terlepas dari interaksi pengaruh teras reaktor, *steam generator* dan permintaan beban. Literatur menunjukkan bahwa perilaku *pressurizer* tersusun dari persamaan kekekalan massa, konservasi energi dan konservasi total volume yang salah satunya ditunjukkan secara sederhana di persamaan (4) [8]. Persamaan ini menunjukkan pemodelan dinamika ketinggian level *pressurizer* (dz/dt) dengan memperhitungkan beberapa parameter seperti luasan *pressurizer* (parameter diameter D dalam meter), laju massa aliran pendingin *surge line* (M_1 dalam kg/m^3), volume air *pressurizer* (v_1 dalam m^3), tekanan *pressurizer* (p dalam MPa) dan *enthalpy* air pada *surge* (h dalam satuan kJ/kg).

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{4}{\pi D^2} \left[v_1 \frac{dM_1}{dt} + M_1 \left(\frac{dv_1}{dp} \frac{dp}{dt} + \frac{dv_1}{dh_1} \frac{dh_1}{dt} \right) \right] \quad (4)$$

Untuk memudahkan simulasi, maka persamaan differensial *linier pressurizer* ini diubah menjadi fungsi transfer dengan transformasi Laplace seperti yang diusulkan oleh penelitian sebelumnya seperti di persamaan (5) [8] atau (6) [8],

$$H(s) = \frac{10,05}{S^2 + 2S + 10.5} \cdot \frac{0,003}{s} \quad (5)$$

$$H(s) = \frac{8,47}{(102s + 1)(2973s + 1)} \cdot \frac{2.892 * 10^{-4}}{s} \quad (6)$$

Fungsi-fungsi transfer inilah yang akan digunakan untuk mensimulasikan perilaku level di *pressurizer*, yang selanjutnya dikendalikan menggunakan metode kendali PI, seperti yang akan diimplementasikan dalam penelitian ini.

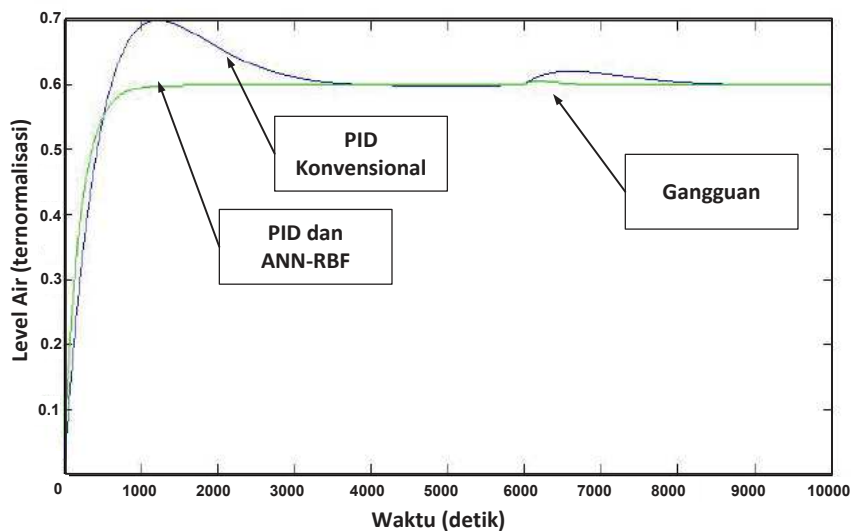
METODOLOGI

Hasil kajian metode kendali di penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem cerdas lebih baik dibanding PID konvensional[3]. Namun karena sistem kendali PID adalah metode yang nyata diimplementasikan di PWR untuk mengontrol level permukaan air *pressurizer*, maka pernyataan bahwa metode konvensional bisa sama baiknya dengan metode maju akan dibuktikan di penelitian ini. Untuk itu variasi konfigurasi dari PID akan dibahas dalam makalah ini untuk mencapai hasil yang terbaik. Beberapa variasi konfigurasi parameter *proportional* (K_p) dan *integral* (K_i) diberikan untuk mendapatkan hasil kendali dengan waktu kenaikan yang tercepat, waktu penetapan yang tercepat, dan waktu lewatan maksimum yang tercepat, dan persentase puncak paling rendah. Parameter K_D tidak disimulasikan secara khusus dalam penelitian ini, hal ini mengacu pada penelitian sebelumnya dan sekaligus keumuman aplikasinya di PWR [4]. Melalui simulasi ini, kinerja dari sistem kendali PID akan dapat dipahami secara komprehensif. Penelitian ini memanfaatkan fungsi transfer model *pressurizer* PWR di Persamaan 5, yang diikuti dengan *fine tuning* terhadap konstanta parameter PI

untuk memperoleh unjuk kerja pengontrolan yang lebih baik. Untuk dapat melihat kemampuan sistem kendali PID dalam mengikuti perubahan level permukaan air dan mengatasi gangguan yang mungkin terjadi, konfigurasi terbaik yang didapat akan diuji melalui simulasi terhadap beragam kondisi masukan dengan cara melihat kemampuannya dalam mengikuti perubahan dari *set point* secara dinamis dan mengatasi gangguan yang diberikan secara cepat selama operasi *pressurizer*.

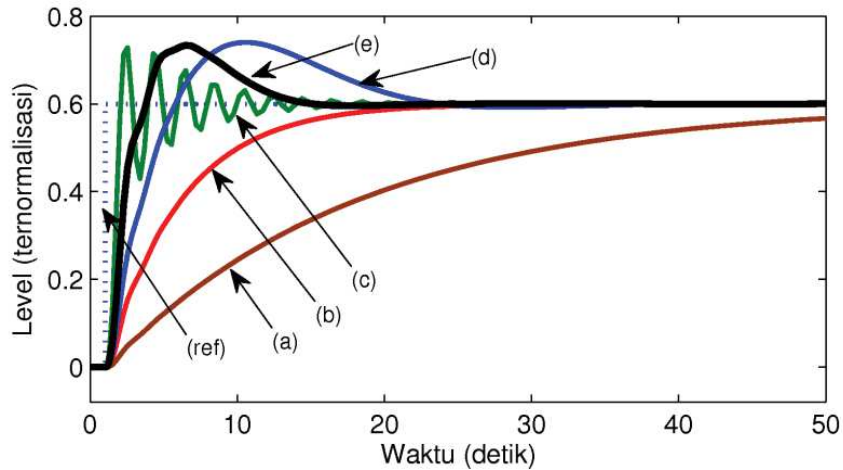
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini didemostrasikan bagaimana pengontrolan sederhana mampu memberikan unjuk kerja yang setara dengan pengontrolan sistem maju (misalkan dengan kecerdasan buatan), jika dilakukan dengan seksama dan dianalisis dengan lebih detil. Sebagai acuan adalah hasil implementasi kendali *pressurizer* dengan gabungan antara metode kecerdasan buatan ANN-RBF dan PID yang diklaim memberikan hasil yang lebih baik dari implementasi PID secara mandiri [8] seperti terlihat di Gambar 4. Terlihat bahwa gabungan PID dan ANN-RBF mempunyai waktu naik (*rise time*) yang lebih cepat tanpa diikuti adanya lewatan maksimum (*overshoot*). Gangguan pada 6000 detik juga tidak menunjukkan respon kenaikan level pendingin air, berbeda dengan PID konvensional yang masih memberikan kenaikan sesaat berkisar 3%. Unjuk kerja sistem inilah yang akan dikomparasi dengan hasil PID di penelitian ini.



Gambar. 4. Hasil perbandingan respon metode PID konvensional serta gabungan PID dan ANN-RBF beserta kemampuannya mengatasi gangguannya [8]

Untuk menyamai unjuk kerja sistem kendali cerdas maka penelitian ini hanya menggunakan dua parameter yaitu *proportional* dan *integral* seperti yang umum di pakai di PWR. Berikut ini didiskusikan simulasi berbagai parameter PI untuk mencapai hasil pengontrolan terbaik yang dapat dicapai.

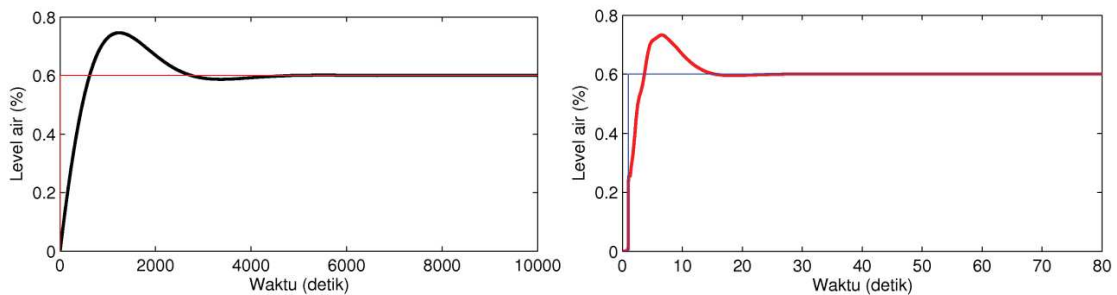


Gambar. 5. Perbandingan kendali PI dengan berbagai konfigurasi dan referensi set pointnya

Tabel 1. Perbandingan konfigurasi kendali PIDan karakteristiknya sesuai Gambar 4

Grafik	K_p	K_i	Waktu naik (detik)	Waktu penetapan (detik)	Lewatan maksimum (%)	Puncak (% level)
(a)	20	0	37,1	66,2	0	0,60
(b)	65	0	10,8	19,7	0	0,59
(c)	479	0	0,61	13,5	23,3	0,72
(d)	102	17	3,31	20,7	23,0	0,73
(e)	187	50	1,7	12,2	22,2	0,73
(ref)	0	0	0,0001	0	0	0,6

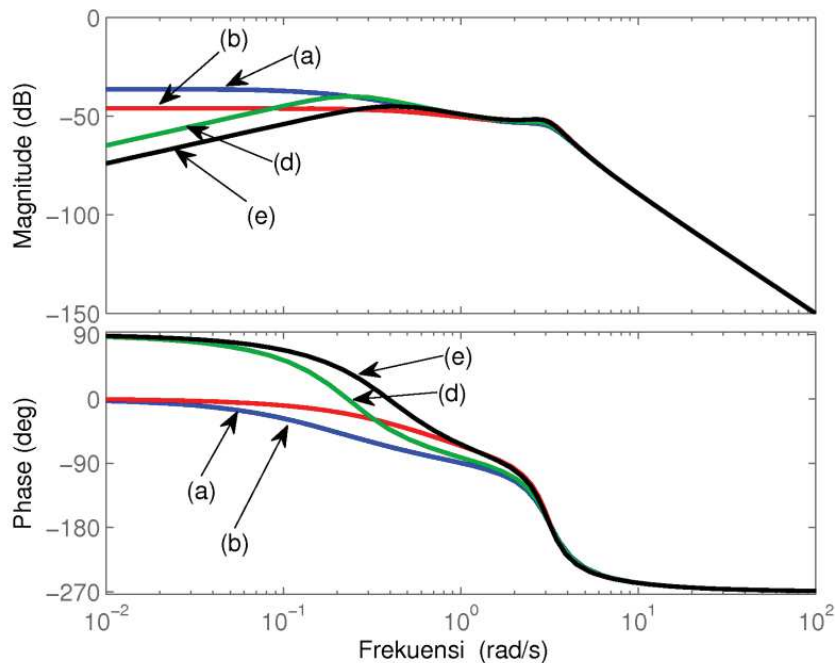
Implementasi metode pengontrolan PI termasuk beberapa variasi parameter yang diberikan untuk memperoleh performa terbaiknya ditunjukkan di Gambar 5 dan Tabel 1. Seperti ditunjukkan di Gambar 5 dan Tabel 1, input fungsi *step* digunakan untuk menentukan besaran gain *proportional* (K_p), dan (K_i) berikut karakteristik sistem kendalinya. Terlihat di Gambar 5 grafik (a), (b) dan (c) bahwa K_p yang semakin besar menaikkan *rise time* atau waktu naiknya dengan cepat. Namun waktu naik yang teramat cepat berimplikasi menimbulkan lewatan maksimum dan osilasi berlebihan yang mengarah pada ketidakstabilan (lihat Gambar 5 grafik (c)). Oleh karena itu, pengaturan selanjutnya dengan mengambil nilai K_p yang relatif moderat dan mulai memasukkan algoritma kendali *integral* (K_i). Dua variasi kombinasi *proportional* dan *integral* dilakukan dan salah satunya (lihat Gambar 5 grafik (e)) menunjukkan variasi yang lebih optimal. Kombinasi ini mempunyai beberapa parameter yang cukup moderat untuk sebuah sistem pengontrolan, seperti waktu naik (*rise time*) 1,7 detik, waktu penetapan (*settling time*) 12,2 detik, lewatan maksimum (*overshoot*) 22,2% dengan puncak (*peak*) 0,73 % dari level.



Gambar. 6. Perbandingan simulasi pengontrolan level PI antara referensi penelitian sebelumnya[8] dan hasil penelitian ini (lihat Gambar 5 grafik e)

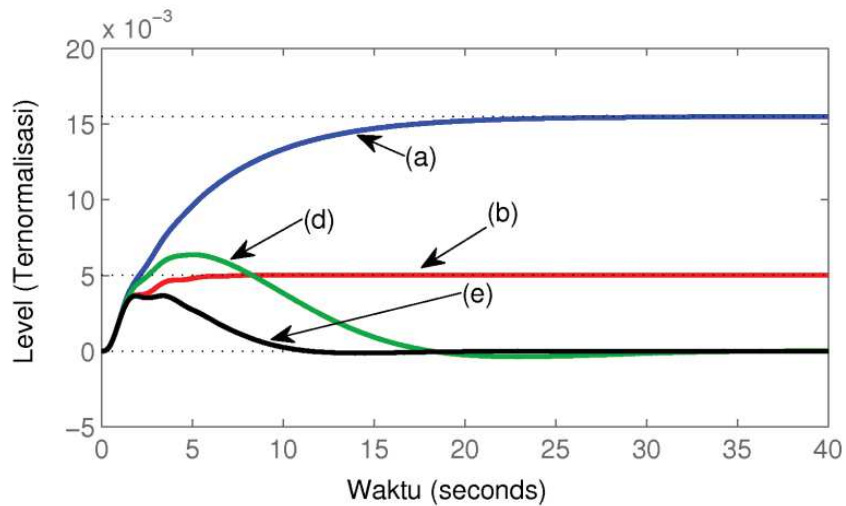
Gambar 6 membandingkan rekonstruksi simulasi yang dilakukan oleh penelitian terdahulu seperti di Gambar 4 [8] dan hasil simulasi terbaik yang bisa dihasilkan dalam penelitian ini (konfigurasi (e) di Tabel 2). Terlihat bahwa pengaturan pengontrolan PI ((konfigurasi (e)) yang sederhana ini mampu memberikan unjuk kerja yang lebih baik dibanding penelitian sebelumnya. Analisis rekonstruksi fungsi *output step* mengikuti hasil di Gambar 4, dengan parameter $K_p = 0,76$, dan $K_i = 1,16 \cdot 10^{-3}$, $K_d = 0$, menghasilkan beberapa parameter yang tidak lebih baik dibanding konfigurasi PI di Gambar 6, seperti waktu naiknya yang lebih lama 476 detik (lebih lama 280 kalinya), waktu penetapan 3570 detik (lebih lama 293 kalinya), lewatan maksimum 24,3% (1.1 kali lebih tinggi) dan puncak 0,746 %. Nilai-nilai ini juga tidak dapat diterima jika dibandingkan dengan beberapa persyaratan *pressurizer* yang sebenarnya di PWR, sebagai contoh salah satunya seperti waktu penetapan maksimum tidak lebih dari 300 detik.

Untuk memastikan stabilitas, analisis respon frekuensi dengan grafik *bode* dilakukan terhadap parameter kendali yang dimaksud seperti ditunjukkan pada Gambar 7 berikut ini. Analisis respon frekuensi yang dilakukan dengan memberikan pulsa sinus ke dalam sistem akan memberikan konfirmasi nilai gain pengendalian optimum dari operasi dan frekuensi kritis dari sebuah sistem.



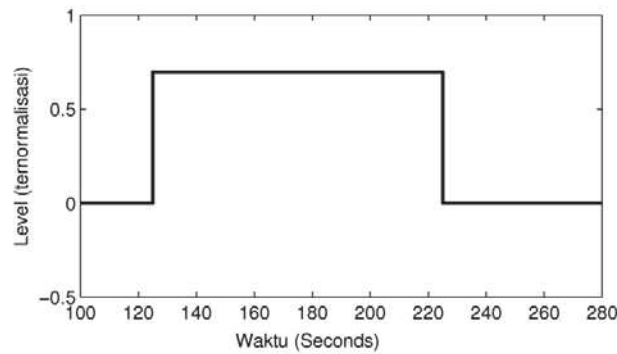
Gambar. 7. Analisis stabilitas pengontrolan yang mengacu pada parameter di Tabel 1

Gambar 7 menunjukkan analisis kestabilan yang dicapai dengan aplikasi beberapa variasi parameter kendali. Terlihat bahwa tidak muncul magnitudo puncak frekuensi antara 100 sampai dengan 101 rad/s tekukan antara daerah respon frekuensi dan redaman yang biasanya menunjukkan ketidakstabilan. Perbedaan magnitudo di frekuensi rendah (10^{-2} sampai 10^{-1}) menunjukkan perilakunya yang menunjukkan pengaruh pelemahan karena gain integral (K_i) yang dominan. Pengaruh ini dapat dikonfirmasi dengan pergeseran fase yang terjadi pada frekuensi rendah 0 -1 rad/sec, dimana fungsi pengontrolan integram menggeser fase mendahului 900 dibanding hanya dengan kontribusi kendali proporsional saja. Namun dapat dipastikan bahwa pada frekuensi yang lebih besar yang biasanya frekuensi operasi dari pengendalian, perilaku ini terlihat lebih konvergen dan stabil.

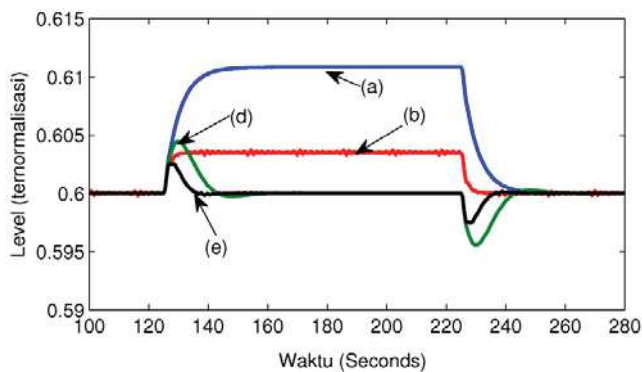


Gambar. 8. Analisis pengontrolan terhadap gangguan dengan parameter di Tabel 1

Analisis selanjutnya dilakukan untuk memvalidasi sejauh mana kemampuan kendali kalang tertutup sistem kendali level *pressurizer* dalam mengatasi gangguan. Terlihat bahwa konfigurasi pengontrolan (a) dan (b) tidak bisa mengkompensasi setiap gangguan dengan baik. Terjadi *offset* 0,02% untuk (a) dan 0,005% untuk konfigurasi (b) dari *set point* akibat kegagalan sistem mengkompensasi gangguan ini. Sedangkan konfigurasi kendali (d) mampu merespon dengan lebih baik gangguan level air selama 15 detik dengan simpangan puncak maksimum 0,006% dari level air. Hasil terbaik diberikan oleh pengontrolan mode (e) dimana hanya diperlukan waktu 10 detik mengatasi gangguan yang mungkin muncul di *pressurizer* dengan simpangan maksimum berkisar 0,004%. Untuk membuktikan analisis repon ini maka ditambahkan gangguan pada sistem dengan fungsi undak 0,7% selama 100 detik seperti terlihat di Gambar 9.

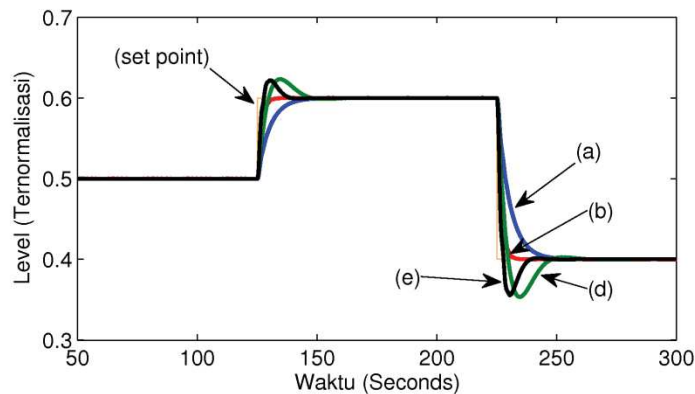


Gambar. 9. Kurva sinyal gangguan 0.7% level air



Gambar. 10. Respon output level air terhadap gangguan

Gambar 9 menunjukkan masukan gangguan yang diberikan terhadap sistem *pressurizer* dengan parameter seperti terlihat di Tabel 1, berupa kenaikan ekstrem seketika level air 0,1% dari level sebelumnya di 0,6%. Masukan input gangguan ini direspon oleh sistem pengontrolan yang *output* ganggaunnya ditunjukkan di Gambar 10. Terlihat bahwa di grafik konfigurasi (a) dan (b) dimana level air naik 0,01% dan 0,05% dari *set-point* yang berarti sistem tidak dapat merespon gangguan ini. Hal ini berbeda dengan konfigurasi (c) dan (d) dimana gangguan dapat diredam walaupun terjadi *overshoot* saat terjadi kenaikan gangguan secara ekstrem dan *undershoot* yang relative singkat saat penurunan gangguan secara ekstrem. Untuk membuktikan kemampuan sistem pengontrolan mengikuti perubahan *set point* secara dinamis dilakukan validasi seperti ditunjukkan di Gambar 11.



Gambar. 11. Respon *output* kendali level air mengikuti perubahan set point dinamis

Sedikit berbeda dengan analisis respon terhadap gangguan, validasi kemampuan berbagai konfigurasi kendali dengan mengikuti perubahan *set point* menunjukkan superioritas pengontrolan *proportional* dibanding pengontrolan *proportional-integral*. Terlihat bahwa pengontrolan *proportional* konfigurasi (b) dengan gain K_p yang relatif besar menghasilkan unjuk kerja terbaik tanpa *overshoot* maupun *undershoot* dengan waktu penetapan yang cepat juga. Namun kelebihan ini saja tidaklah cukup menjamin unjuk kerja konfigurasi (b) mengingat kelemahan konfigurasi (b) ini dalam mengatasi gangguan. Mempertimbangkan hal ini, maka tetaplah konfigurasi (e) menjadi pilihan yang paling menjanjikan untuk *pressurizer* pembangkit daya nuklir karena berbagai kelebihan seperti karakteristik yang lebih baik, ketahanan terhadap gangguan yang lebih baik, dan lebih stabil dibanding konfigurasi lainnya.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa jika implementasi PID dilakukan dengan detil dan seksama maka unjuk kerja yang diperoleh dapat lebih baik, bahkan bisa *comparable* dengan metode maju yang ada, dalam hal ini kombinasi ANN-RBF dan PID. Penelitian ini membuktikan dengan konfigurasi $K_p = 187$ dan $K_i = 50$, diperoleh waktu naik yang lebih cepat, berkisar 280 kalinya, waktu penetapan lebih cepat 293 kalinya, lewatan maksimum 1,1 kali lebih rendah, dan puncak 0,2 % lebih rendah. Hasil validasi unjuk kerja sistem konfigurasi pengontrolan PID yang diusulkan ini juga terbukti stabil, mampu mengatasi gangguan selama 10 detik dengan puncak maksimum level 0,005%, dan mampu mengikuti perubahan *set point* dengan baik.

Terlepas dari kemampuannya yang cukup menjanjikan ini, model *pressurizer* dari fungsi transfer yang ada, menjadi bagian yang butuh dikembangkan agar akurasi pengontrolannya dapat diimplementasikan lebih jauh untuk analisis keselamatan atau simulator PWR. Sebagai contoh, dengan cara memodelkan *pressurizer* menggunakan perangkat lunak yang biasa digunakan dalam *benchmarking* PWR seperti RELAP atau MAAP. Oleh karena itu, penelitian ini juga

merekomendasikan pengembangan lebih lanjut kopling antara perangkat lunak pemodelan *pressurizer* ini dengan perangkat lunak desain model kendali seperti SIMULINK atau LabVIEW.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kepada Ibu Restu Merani, ST yang sudah membantu kelancaran penulisan makalah ilmiah ini, Ibu Dr. Geni Sunaryo atas kepercayaan yang diberikan kepada kami untuk melaksanakan penelitian ini, dan kepada semua karyawan di bidang Teknologi Keselamatan Reaktor, Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir atas segala dukungannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Oliveira MVd, Almeida JCSd. Application of artificial intelligence techniques in modeling and control of a nuclear power plant pressurizer system. *Progress in Nuclear Energy*. 2013;63(0):71-85.
2. Wang Y-C, Wang S-J, Chien C-S, Chiang S-C. Analysis of pressurizer level control system using MAAP4 code. *Nuclear Engineering and Design*. 2010;240(1):160-5.
3. Maerani R, Bakhri S. Perbandingan Sistem Pengontrolan PID Konvensional dengan Pengontrolan CMAC, Fuzzy Logic, dan ANN pada Water Level Pressurizer. *Sigma Epsilon, Majalah Ilmiah Teknologi Nuklir*. 2013;17(3):129-41.
4. Oka Y, Suzuki K. *Nuclear Reactor Kinetics and Plant Control*: Springer Japan; 2013.
5. Zhang G-D, Yang X-H, Ye X-L, Xu H, Lu D-Q, Chen W. Research on Pressurizer Water Level Control of Pressurized Water Reactor Nuclear Power Station. *Energy Procedia*. 2012;16, Part B(0):849-55.
6. Zhou W, Zhang X. The Preliminary Research of Pressure Control System Dynamic Simulation for Ap1000 Pressurizer Based on Parameter Adaptive Fuzzy Pid Control Algorithm. In: Zhu M, editor. *Electrical Engineering and Control*: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 583-91.
7. Jinming Y, JianHua Y, Yang X, Xuhong Y, Hong Q, editors. Research on Pressurizer Water Level Control of Nuclear Reactor Based on CMAC and PID Controller. *Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009 AICI '09 International Conference on*; 2009 7-8 Nov. 2009.
8. Jian-Hua Y, Jin-Ming Y, Hua-Yan J, editors. Research on pressurizer water level control of nuclear reactor based on RBF neural network and PID controller. *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2010 International Conference on*; 2010 11-14 July 2010.
9. Liu J. *Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems : Design, Analysis and Matlab Simulation*: Springer 2013.
10. Fujimoto H, Shinohara H, Akizuki Y, Fukui T, Tanaka Y, Kiuchi S, et al. Control system for nuclear power facility. *Google Patents*; 2013.
11. Ammon JH, Leonard JJW. Fluid pressurizer. *Google Patents*; 1967.
12. Testa D, editor. *the Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant*. Pittsburgh, Pennsylvania 15230 Westinghouse Electric Corporation; 1984.
13. Dibyo S. Studi Karakteristik Pressurizer Pada PWR. *Prosiding PPI - PDIPTN 2007, Pustek Akselerator dan Proses Bahan - BATAN*; Yogyakarta: BATAN; 2007.