

ANALISIS KONDISI NORMAL DAN MALFUNGSI *PRESSURIZED HEAVY WATER REACTOR* DENGAN IAEA *CONVENTIONAL PHWR SIMULATOR*

NORMAL AND MALFUNCTION CONDITION ANALYSIS OF PRESSURIZED HEAVY WATER REACTOR USING IAEA CONVENTIONAL PHWR SIMULATOR

Rachmad Widyanto, Rida Siti Nuraini Mahmudah*

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta 55281, Indonesia

*email korespondensi: rida@uny.ac.id

Abstrak

Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) adalah salah satu reaktor nuklir yang teknologinya terus dikembangkan hingga saat ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan nilai parameter besaran daya yang dihasilkan saat kondisi normal dan malfungsi menggunakan *conventional PHWR simulator*. Telah dilakukan empat simulasi variasi keadaan, yaitu keadaan normal sebagai pembandingan atau variabel kontrol dan tiga keadaan malfungsi yang akan menunjukkan beberapa perubahan nilai parameter. Setiap variasi keadaan diberi waktu pengamatan selama empat menit dengan pencatatan data untuk setiap menitnya. Analisis data dilakukan dengan membandingkan nilai dari beberapa parameter yang dapat mempengaruhi besaran daya yang dihasilkan. Pada keadaan normal, nilai parameter pada *reactor power*, *thermal power* dan *turbine power* cenderung konstan atau stabil dengan beberapa perubahan nilai yang kecil serta daya yang dihasilkan tetap yaitu 924,04 MW. Sedangkan pada keadaan *turbine spurious trip* terdapat nilai parameter yang fluktuatif, tetap, menurun, dan meningkat dengan daya yang dihasilkan sebesar 0 MW. Untuk malfungsi *FW LCV101 fails open*, perubahan nilainya juga fluktuatif, menurun, dan berubah dengan daya akhir yang dihasilkan sebesar 0 MW. Terakhir, pada keadaan *one bank of absorber rod drops* terjadi perubahan nilai yang fluktuatif, meningkat, dan tetap dengan daya akhir yang dihasilkan sebesar 380,58 MW.

Kata kunci: reaktor nuklir, PHWR, malfungsi, daya

Abstract

Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) is one of nuclear reactors whose technology being developed continuously up until now. This study aims to investigate parameter value changes in the generated power at normal and malfunction conditions using *conventional PHWR simulator*. We performed four simulations, i.e., normal condition as the benchmark or control variable, and three malfunction conditions that show several parameter values changes. Every simulation was run for four minutes, and data was taken in every minute. Data was analyzed by comparing value of several parameters that affect the generated power level. In normal condition, parameter value of *reactor power*, *thermal power* and *turbine power* are tending to constant or stable with relatively small changes and constant power level, i.e., 924.04 MW. Meanwhile, on *turbine spurious trip*, parameter value changes are volatile: constant, decreasing and increasing with the power level of 0 MW. On *FW LCV101 fails open* malfunction, the changes are also volatile, decreasing and changing constantly with the final power level of 0 MW. Lastly, on *one bank of absorber rod drops* condition, parameter values are also changing volatily increasing with final generated power level of 380.58 MW.

Keywords: nuclear reactor, PHWR, malfunction, power

Pendahuluan

Reaktor merupakan pusat dari pembangkit tenaga nuklir. Hingga sekarang, teknologi ini memiliki perkembangan yang pesat. Salah satunya berkaitan dengan jenis desain reaktor yang meliputi *Pressurized Water Reactor (PWR)*, *Boiling Water Reactor (BWR)*, *Conventional PHWR* atau *Pressurized Heavy Water Reactors* [1]. Dalam reaktor akan dihasilkan energi panas dari reaksi nuklir, baik fisi maupun fusi sebagai tenaga untuk menggerakkan sistem pembangkit listrik. Jenis reaktor yang akan diteliti difokuskan pada *Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR)*.

PHWR telah dioperasikan sebagai reaktor nuklir yang efisien dan fleksibel dalam bahan bakar [2]. Reaktor ini dikembangkan di Canada dengan desain yang disebut CANDU (Canada Deuterium Uranium) [3] menggunakan silinder yang disebut *calandria* dengan diameter 7,6 meter sebagai tempat menyimpan tabung horizontal (*Zircaloy*) yang berisi bahan bakar UO_2 . *Zircaloy* dikelilingi pendingin berupa air berat D_2O . Pendingin tersebut seperti halnya pada *Pressurized Water Reactors (PWR)* yang menggunakan air biasa sebagai pendinginnya. Di luar *calandria* digunakan D_2O sebagai moderator [4] serta dijaga agar berada pada tekanan dan temperatur rendah.

Terdapat juga tabung tekanan yang membatasi suhu dan tekanan tinggi di dalam tabung dengan suhu dan tekanan rendah di luar tabung [5]. Spasi antara tekanan dan tabung *calandria* berfungsi menjaga suhu rendah pada moderator yakni kurang 80 °C [6]. Air berat yang digunakan diberi perlakuan agar tidak mengalami proses pendidihan [7]. Penelitian ini mengetahui nilai parameter akibat adanya perubahan kondisi nilai parameter daya yang dihasilkan. Dari keadaan akhir dapat dirunut parameter lain yang menyebabkan perubahan pada nilai daya tersebut. Terdapat beberapa penelitian mengenai reaktor PHWR yang telah dilakukan [8-11], di antaranya adalah penelitian Erlandson *et al.* [8] mengenai aplikasi keamanan terhadap bahan bakar nuklir menggunakan *Muon Scattering Tomography*.

Penelitian tersebut lebih memfokuskan analisis bahan bakar yang digunakan pada PHWR. Sedangkan penelitian ini lebih fokus pada analisis hasil simulasi terhadap variasi keadaan untuk mengetahui hasil daya yang dihasilkan berdasar parameter lain yang mempengaruhinya. Penelitian lain oleh Pranetha [9] membahas pengaruh seismik terhadap sistem reaktor nuklir PHWR, dimana digunakan data gempa lampau sebagai data pendukung analisisnya. Sedangkan pada penelitian ini lebih mengacu pada data simulasi yang diperoleh menggunakan simulator CANDU.

Metode Penelitian

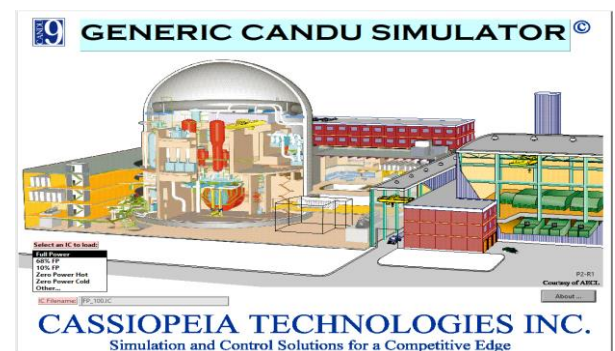
Pada penelitian ini digunakan simulator CANDU PHWR. Simulator ini menampilkan komponen reaktor secara lengkap serta mudah dipahami. Terdapat 17 jendela tampilan yang menunjukkan beberapa tampilan sistem kerja reaktor secara menyeluruh termasuk grafik. Beberapa fitur dapat di-*setting* manual maupun otomatis. Pada penelitian ini digunakan tampilan *plant overview* yang menunjukkan sistem reaktor secara keseluruhan. Tampilan ini cenderung otomatis dengan beberapa parameter yang dapat di-*setting* manual seperti *time scroll* dan *resolution* yang berada di pojok kanan bawah tampilan. Terdapat juga *control button* lain yang difungsikan untuk mengontrol jalannya simulasi seperti menu *freeze*, *run*, *iterate*, *IC*, *malf*, dan *help*.

Freeze berfungsi menghentikan simulasi, *run* digunakan menjalankan simulasi, *iterate* berfungsi mengulang simulasi, *IC* berfungsi *load* data simulasi, *malf* berfungsi men-*setting* malfungsi yang akan digunakan, dan *help* berfungsi bantuan. Simulasi ini menghadirkan penanda apabila terjadi malfungsi dalam indikator lampu yang akan

menyala kuning apabila situasi tertentu terjadi dan akan mati apabila situasi kembali normal. Terdapat 21 peringatan sebagai contoh yaitu *Reactor Trip*, *Turbine Trip*, *ROH Press Lo Lo*, dan *ROH Press Hi Hi*. Indikator peringatan ini sama untuk ke-16 tampilan yang disediakan kecuali tampilan *Trends*.

Penelitian ini dilakukan dengan empat variasi kondisi yaitu normal, *turbine spurious trip*, *FW LCV101 fails open*, dan *one bank of absorber rod drops*. Pada kondisi normal, sistem reaktor berjalan stabil dengan adanya sedikit perubahan nilai yang masih dapat ditoleransi serta dapat menghasilkan daya yang optimal. Malfungsi *turbine spurious trip* merupakan kondisi kegagalan turbin yang diakibatkan putaran turbin yang terlalu cepat, tersendatnya turbin, dan masalah pada aliran uap bertekanan sehingga mengakibatkan penutupan katup aliran uap bertekanan. Hal ini menghentikan putaran turbin sehingga tidak dapat menghasilkan daya.

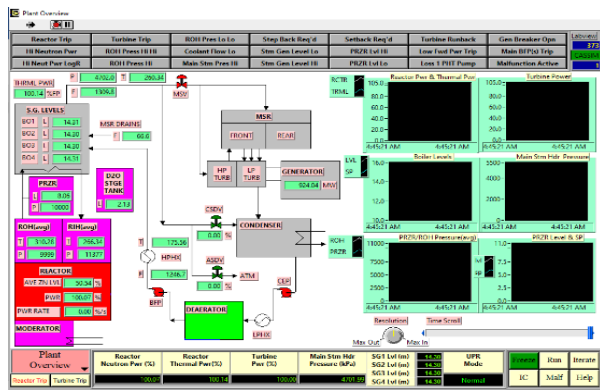
Pada *FW LCV101 fails open*, *FW LCV101* merupakan katup kontrol *feed water* yang mengatur aliran uap bertekanan dari *condenser* ke SG 1 dimana pada kondisi malfungsi, katup tidak dapat dibuka, sedangkan malfungsi terakhir yaitu *one bank of absorber rod drops* merupakan malfungsi pada sistem batang kendali yang berakibat berkurangnya energi yang dihasilkan. Setiap variasi diberikan waktu pengamatan selama empat menit dengan dilakukan pencatatan data untuk setiap menitnya.



Gambar 1. Tampilan awal simulator CANDU

Objek yang diamati pada simulasi ini yaitu parameter daya yang dihasilkan. Parameter ini disajikan dalam Tabel 1, 2, 3, dan 4. Untuk kondisi normal dapat dilakukan dengan membuka aplikasi CANDU dan memilih IC pada kondisi *full power* seperti Gambar 1. Untuk menjalankannya dengan menekan tombol *run* di pojok kanan bawah tampilan seperti Gambar 2. Sedangkan untuk memilih jenis malfungsi dapat melalui ikon *malf* pada pojok kanan bawah tampilan.

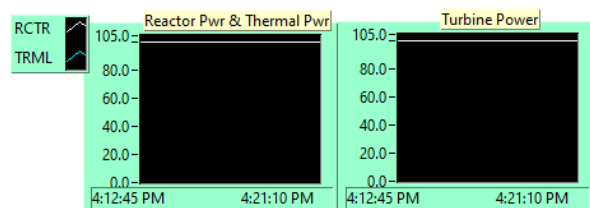
Pencatatan data pada setiap menitnya dilakukan dengan menekan tombol *freeze* untuk menghentikan sementara simulasi. Beberapa perubahan nilai yang terjadi dicatat sebagai keadaan pembandingan terhadap lama waktu simulasi yang dianalisis perubahan yang terjadi yang berakibat pada perbedaan nilai daya. Gambar 2 menunjukkan beberapa nilai parameter beserta tampilan grafik. Dalam penelitian ini lebih difokuskan pada analisis grafik *reactor power*, *thermal power*, dan *turbine power*. Sedangkan grafik lain digunakan sebagai parameter pendukung. Data nilai parameter yang sudah diperoleh ditabulasi menggunakan *Microsoft Excel* yang selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik khusus pada parameter daya generator vs *t*.



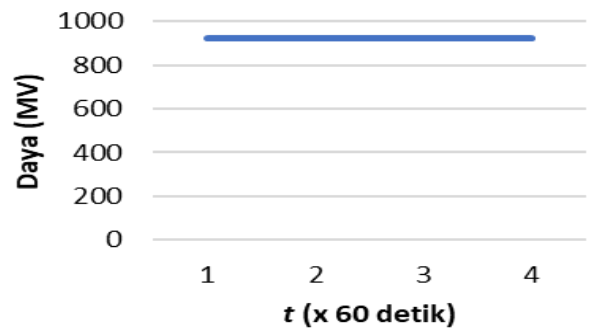
Gambar 2. Tampilan reaktor simulator CANDU

Hasil dan Pembahasan

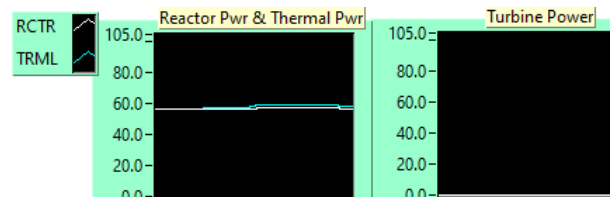
Data yang dihasilkan pada kondisi normal menunjukkan nilai yang cukup konstan dan cenderung stabil (Tabel 1). Perubahan nilai hanya terlihat hingga satu poin. Nilai daya yang dihasilkan stabil selama empat menit pengamatan yaitu 924,04 MW (Gambar 4). Pengaruh besar daya yang dihasilkan diakibatkan turbin power yang secara langsung memiliki kontak terhadap generator sebagai penghasil daya. Perubahan nilai *reactor power* dan *thermal power* sebesar 0,01 tidak mempengaruhi nilai daya yang dihasilkan. Grafik yang dihasilkan pada tiga parameter yaitu *reactor power*, *thermal power* dan *turbine power* menunjukkan hasil cukup konstan (Gambar 3).



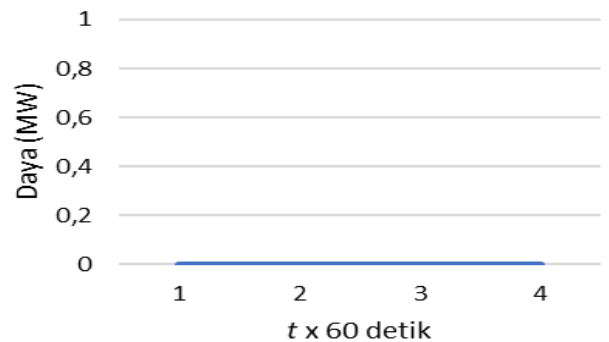
Gambar 3. Reactor power, thermal power dan turbine power pada kondisi normal



Gambar 4. Daya vs t kondisi normal



Gambar 5. Reactor power, thermal power dan turbine power pada kondisi turbine spurious trip

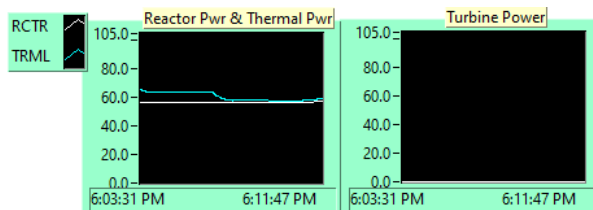


Gambar 6. Daya vs t kondisi turbine spurious trip

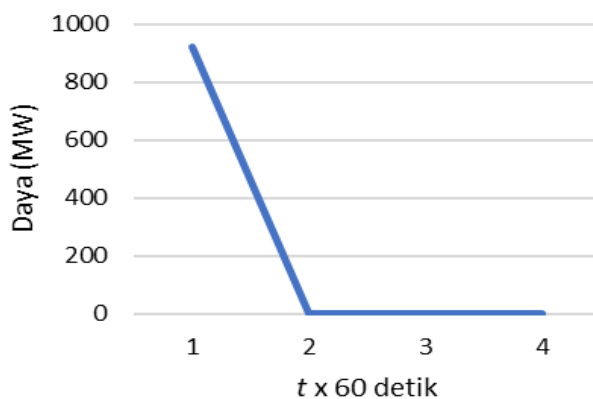
Hasil data pada kondisi malfungsi *turbine spurious trip* menunjukkan perubahan yang signifikan. Terjadi fluktuasi dan penurunan nilai parameter walaupun terdapat beberapa nilai yang tetap namun berbeda jauh dengan kondisi normal. *Main stm header pressure* mengalami peningkatan kurang lebih 53 kPa apabila dibanding pada kondisi normal (Gambar 5). *Neutron power* yang dihasilkan menjadi kurang lebih setengahnya dari kondisi normal (Tabel 2). Terdapat juga penurunan tekanan dan suhu pada ROH dan RIH serta *pressurizer level* dan *pressure*.

Diperoleh daya sebesar 0 MW untuk seluruh variasi waktu yang digunakan (Gambar 6). Nilai tersebut diakibatkan dari nilai 0 pada *turbine power* sebagai gaya penggerak generator. Indikator warna hijau pada *main steam stop valve* menunjukkan jalur yang dilalui uap bertekanan ditutup sebagai respon terhadap adanya malfungsi sehingga uap bertekanan tidak dapat memutar turbin sebagai gaya penggerak generator untuk menghasilkan daya.

Nilai *reactor power* dan *thermal power* yang dihasilkan menurun apabila dibanding keadaan normal menjadi 56,81 hingga 63,78 % dengan hasil yang fluktuatif. Kondisi ini lebih didominasi nilai fluktuatif dengan beberapa peningkatan, penurunan dan nilai yang tetap.



Gambar 7. Reactor power, thermal power dan turbine power pada kondisi FW LCV101 fails open

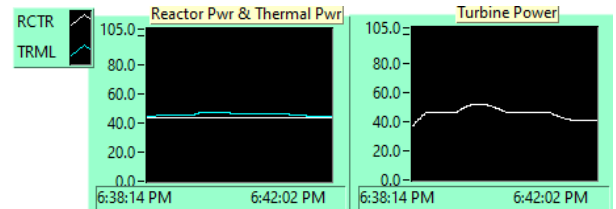


Gambar 8. Daya vs t kondisi FW LCV101 fails open

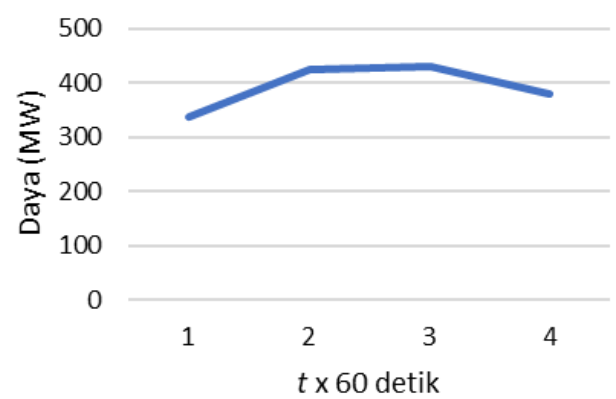
Pada kondisi malfungsi FW LCV101 fails open diperoleh nilai *main stm header pressure* yang lebih tinggi daripada kondisi normal dengan perbedaan hingga 61 kPa (Tabel 3). Nilai *neutron power* mengalami penurunan menjadi kurang lebih setengahnya pada menit kedua hingga keempat. Walaupun memiliki hasil yang fluktuatif, namun tekanan dan suhu ROH mengalami penurunan dibanding kondisi menit pertama. Tekanan dan suhu RIH mengalami penurunan apabila dibandingkan pada menit pertama. Apabila dibandingkan dengan kondisi normal, menit kedua hingga keempat memiliki perbedaan yang jauh.

Didapati adanya penurunan daya secara drastis pada menit pertama hingga menit kedua dengan nilai akhir 0 MW (Gambar 8). Hal ini diakibatkan penurunan pada *turbin power* yang awalnya 100 % menjadi 0 %. Terlihat pada menit kedua, indikator pada *main steam stop valve* berubah menjadi warna hijau yang menunjukkan tertutupnya aliran uap bertekanan sebagai tenaga penggerak turbin. Pada Gambar 7 terlihat nilai *reactor power* dan *thermal power* berbeda jauh daripada kondisi normal.

Nilai *thermal power* mengalami penurunan lagi setelahnya hingga berimpitan pada grafik *reactor power*. Data parameter pada kondisi ini didominasi oleh nilai fluktuatif dengan beberapa penurunan nilai.



Gambar 9. Reactor power, thermal power dan turbine power pada kondisi one bank of absorber rod drops



Gambar 10. Daya vs t kondisi one bank of absorber rod drops

Kondisi malfungsi terakhir yaitu *one bank of absorber rod drops*. Apabila dibandingkan pada kondisi awal yaitu menit pertama, maka nilai *main stm header pressure* cenderung mengalami peningkatan. Dihasilkan *neutron power* yang bernilai paling rendah daripada kondisi lainnya yakni berkisar 43,1 – 44,15% namun mengalami peningkatan hingga menit keempat (Tabel 4). Tekanan serta suhu ROH dan RIH mengalami perbedaan nilai yaitu lebih kecil dibanding dengan keadaan normal namun secara umum mengalami peningkatan seiring berjalannya waktu.

Perbedaan cukup jauh terjadi pada *pressurizer level* dan *pressure* dibanding dengan keadaan normal dengan nilai yang secara umum meningkat hingga menit keempat. Kondisi ini didominasi nilai yang fluktuatif dengan beberapa peningkatan nilai. Berdasarkan Gambar 9 diketahui nilai *reactor power* dan *thermal power* berada lebih rendah daripada kondisi malfungsi lainnya atau bahkan jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondisi normal. Diperoleh nilai *thermal power* yang fluktuatif begitu pula dengan *turbine power*.

Tabel 1. Nilai parameter kondisi normal

No	Parameter	Satuan	Hasil				Keterangan
			1 menit	2 menit	3 menit	4 menit	
1	Reactor Neutron Power	%	100,06	100,05	100,06	100,06	normal
2	Reactor Thermal Power	%	100,13	100,13	100,14	100,14	normal
3	Turbine Power	%	100	100	100	100	normal
4	Main Stm Header Pressure	kPa	4702,13	4702,11	4702,03	4701,03	normal
5	Neutron Power Rate	%/s	0	0	0	0	normal
6	Neutron Power	%	100,6	100,05	100,06	100,06	normal
7	Average Zone Level	%	50,79	51,04	51,28	51,51	normal
8	Reactor Outlet Header (P)	kPa	9999	10000	10000	10000	normal
9	Reactor Outlet Header (T)	°C	310,29	310,28	310,28	310,28	normal
10	Reactor Inlet Header (P)	kPa	11377	11377	11377	11377	normal
11	Reactor Inlet Header (T)	°C	266,30	266,26	266,24	266,21	normal
12	Pressurizer Level	m	8,05	8,06	8,06	8,06	normal
13	Pressurizer Pressure	kPa	10000	10000	10000	10000	normal
14	Boiler 1	m	14,3	14,3	14,3	14,31	normal
15	Boiler 2	m	14,3	14,3	14,31	14,31	normal
16	Boiler 3	m	14,31	14,3	14,3	14,31	normal
17	Boiler 4	m	14,31	14,31	14,3	14,31	normal
18	Main Steam Stop Valve	Status	merah	merah	merah	merah	normal
19	Generator	MW	924,04	924,04	924,04	924,04	normal

Tabel 2. Nilai parameter kondisi *turbine spurious trip*

No	Parameter	Satuan	Hasil				Keterangan
			1 menit	2 menit	3 menit	4 menit	
1	Reactor Neutron Power	%	56,81	56,76	57,13	56,92	fluktuatif
2	Reactor Thermal Power	%	63,78	57,05	59,36	58,13	fluktuatif
3	Turbine Power	%	0	0	0	0	tetap
4	Main Stm Header Pressure	kPa	4755,44	4743,44	4749,09	4740,8	fluktuatif
5	Neutron Power Rate	%/s	0,01	-0,01	-0,01	-0,01	menurun
6	Neutron Power	%	56,81	56,76	57,13	56,92	fluktuatif
7	Average Zone Level	%	45,56	44,96	46,36	51,18	fluktuatif
8	Reactor Outlet Header (P)	kPa	9863	9889	9895	9905	fluktuatif
9	Reactor Outlet Header (T)	°C	288,72	288,05	287,6	286,57	menurun
10	Reactor Inlet Header (P)	kPa	11246	11270	11277	11286	meningkat
11	Reactor Inlet Header (T)	°C	256,53	257,87	256,79	256,13	fluktuatif
12	Pressurizer Level	m	6,93	6,87	6,88	6,86	fluktuatif
13	Pressurizer Pressure	kPa	9883	9886	9897	9905	meningkat
14	Boiler 1	m	13,94	14	13,85	13,75	fluktuatif
15	Boiler 2	m	13,97	14	13,85	13,75	fluktuatif
16	Boiler 3	m	14,00	14	13,83	13,75	menurun
17	Boiler 4	m	13,95	13,99	13,83	13,76	fluktuatif
18	Main Steam Stop Valve	Status	hijau	hijau	hijau	hijau	tetap
19	Generator	MW	0	0	0	0	tetap

Tabel 3. Nilai parameter kondisi *FW LCV101 fails open*

No	Parameter	Satuan	Hasil				Keterangan
			1 menit	2 menit	3 menit	4 menit	
1	Reactor Neutron Power	%	100,07	56,84	56,8	57,17	fluktuatif
2	Reactor Thermal Power	%	100,37	63,89	57,98	58,93	fluktuatif
3	Turbine Power	%	100	0	0	0	menurun
4	Main Stm Header Pressure	kPa	4701,04	4763,19	4729,46	4729,53	fluktuatif
5	Neutron Power Rate	%/s	0	0,01	-0,01	0	fluktuatif
6	Neutron Power	%	100,07	56,84	56,8	57,17	fluktuatif
7	Average Zone Level	%	50,56	45,79	45,21	46,34	fluktuatif
8	Reactor Outlet Header (P)	kPa	9987	9869	9882	9894	fluktuatif
9	Reactor Outlet Header (T)	°C	310,18	288,05	283,97	284,02	fluktuatif
10	Reactor Inlet Header (P)	kPa	11365	11251	11264	11276	fluktuatif
11	Reactor Inlet Header (T)	°C	264,41	255,79	253,54	253,33	menurun
12	Pressurizer Level	m	7,95	6,97	6,84	6,87	fluktuatif
13	Pressurizer Pressure	kPa	9989	9888	9882	9895	fluktuatif
14	Boiler 1	m	14,75	14,56	15,62	15,62	fluktuatif
15	Boiler 2	m	14,28	13,94	13,94	13,8	menurun
16	Boiler 3	m	14,29	13,97	13,99	13,73	fluktuatif
17	Boiler 4	m	14,28	13,91	13,93	13,8	fluktuatif
18	Main Steam Stop Valve	Status	merah	hijau	hijau	hijau	berubah
19	Generator	MW	924,01	0	0	0	menurun

Tabel 4. Nilai parameter kondisi *one bank of absorber rod drops*

No	Parameter	Satuan	Hasil				Keterangan
			1 menit	2 menit	3 menit	4 menit	
1	Reactor Neutron Power	%	43,1	43,54	43,61	44,15	meningkat
2	Reactor Thermal Power	%	43,2	45,59	46,33	45,19	fluktuatif
3	Turbine Power	%	36,43	46,12	46,76	41,19	fluktuatif
4	Main Stm Header Pressure	kPa	4569,22	4751,63	4679,63	4704,19	fluktuatif
5	Neutron Power Rate	%/s	0,26	-0,07	0,02	0,12	fluktuatif
6	Neutron Power	%	43,1	43,54	43,61	44,15	meningkat
7	Average Zone Level	%	7,71	15,45	15,04	15	fluktuatif
8	Reactor Outlet Header (P)	kPa	9851	9889	9882	9896	fluktuatif
9	Reactor Outlet Header (T)	°C	276,45	286,01	281,51	281,98	fluktuatif
10	Reactor Inlet Header (P)	kPa	11234	11269	11264	11278	fluktuatif
11	Reactor Inlet Header (T)	°C	253,32	262,2	257,42	258,22	fluktuatif
12	Pressurizer Level	m	6,63	6,87	6,74	6,76	fluktuatif
13	Pressurizer Pressure	kPa	9852	9888	9885	9896	fluktuatif
14	Boiler 1	m	13,77	13,92	13,66	13,62	fluktuatif
15	Boiler 2	m	13,85	13,92	13,65	13,63	fluktuatif
16	Boiler 3	m	13,82	13,88	13,66	13,63	fluktuatif
17	Boiler 4	m	13,83	13,93	13,65	13,63	fluktuatif
18	Main Steam Stop Valve	Status	merah	merah	merah	merah	tetap
19	Generator	MW	336,61	426,12	432,06	380,58	fluktuatif

Indikator warna *main steam stop valve* menunjukkan warna merah yang berarti kondisi terbuka, sehingga aliran uap bertekanan mengalir untuk memutar turbin dan generator. Jadi, terdapat daya yang dihasilkan walaupun jauh lebih kecil dibanding dengan kondisi normal. Daya terbesar yang dihasilkan pada pengamatan selama empat menit yaitu sebesar 432,06 MW (Gambar 10).

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan kondisi normal menunjukkan nilai parameter yang stabil dengan menghasilkan daya tetap sebesar 924,04 MW. Kondisi malfungsi *turbine spurious trip* menunjukkan nilai parameter fluktuatif, meningkat, tetap, dan menurun dengan nilai daya 0 MW. Kondisi malfungsi *FW LCV101 fails open* menunjukkan nilai parameter yang dominan fluktuatif dengan penurunan nilai. Diperoleh nilai daya 924,01 MW dan menurun menjadi 0 MW pada menit kedua hingga keempat. Kondisi malfungsi *one bank of absorber rod drops* menunjukkan nilai parameter yang dominan fluktuatif dengan terjadi peningkatan nilai. Diperoleh nilai daya terbesar pada pengamatan selama empat menit yaitu 432,06 MW.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada *International Atomic Energy Agency* (IAEA) yang telah menyediakan *simulator* reaktor sebagai sarana pengambilan data dan analisis pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Song, J. H., Shen, W., Griffiths, M., Rhee, B. W., Song, Y., & Naitoh, M. (2016). Advanced phwr safety technology: phwr challenging issues for safe operation and long-term sustainability. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1(1), 134-140.
- [2] Kumar, V., Kalyane, V. L., Prakasan, E. R., Kumar, A., Sagar, A., & Mohan, L. (2004). *Trend of R&D publications in Pressurised Heavy Water Reactors: A study using INIS and other databases*. IAEA-CN-123/03/O/05.
- [3] Kim, H. T., Chang, S. M., Shin, J. H., & Kim, Y. G. (2016). The feasibility of multidimensional CFD applied to calandria system in the moderator of CANDU-6 PHWR using commercial and open-source codes. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 1(1), 150-158.
- [4] Schwanke, P., & Nichita, E. (2021). Time-depnt homogenization for pressurized heavy-water reactors. *EPJ Web Conferences*, 247(1), 1-8.
- [5] Kerlin, T. W., & Upadhyaya, B. R. (2019). *Dynamics and control of nuclear reactors*. Academic press.
- [6] Nichita, E., & Mohapatra, S. (2016). Application of SPH factors to PHWR lattice homogenization. *Transactions of the American Nuclear Society*, 114(1), 189-195.

- [7] Lister, D., & Uchida, S. (2015). Determining water chemistry conditions in nuclear reactor coolants. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 52(4), 451-466.
- [8] Erlandson, A., Anghel, V. N. P., Godin, D., Jewett, C., & Thompson, M. (2021). An analysis of pressurized heavy water reactor fuel for nuclear safeguards applications using muon scattering tomography. *Journal of Instrumentation*, 16(2), 2-24.
- [9] Pranetha, S. (2011). Dynamic analysis of pressurized heavy water reactors. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6), 656-658.
- [10] Ahied, M. (2015). Efisiensi material pada pembangkit listrik tenaga nuklir LWR (Light Water Reactor) dan PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor). *Jurnal Pena Sains*, 2(1), 1-6.
- [11] Susilo, J., Sembiring, T. M., & Dewayatna, W. (2017). Irradiation characteristic of natural Uo2 pin PHWR target at PRTF of RSG–Gas Core. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 19(2), 71-82.