

Simulasi Cycle Tempo Pengaruh Kondisi Operasi HPH Off Service terhadap Performa PLTU Paiton Unit 9

Narumi Dwi Ramadhanti dan Ary Bachtiar Krishna Putra
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: aribach@me.its.ac.id

Abstrak—*Feedwater heater* yang digunakan pada sistem pembangkit tenaga uap adalah *low pressure heater* (LPH), *high pressure heater* (HPH), dan *deaerator*. PLTU Paiton Unit 9 menggunakan 4 LPH, 3 HPH, dan 1 *deaerator*. *High Pressure Heater* (HPH) berfungsi meningkatkan temperatur *feedwater* yang akan dipanaskan di dalam boiler sehingga penggunaan bahan bakar lebih sedikit. Pada kondisi aktual HPH sering menghadapi masalah sehingga harus dilakukan perbaikan, yang mengharuskan HPH dalam kondisi *off service*. Kondisi tersebut memengaruhi daya netto, *net plant heat rate*, dan efisiensi sistem pembangkit. Pada PLTU Paiton Unit 9, apabila salah satu HPH mengalami kerusakan maka seluruh HPH tidak beroperasi karena *by pass* dipasang dari *deaerator* langsung menuju ke *boiler*. Oleh karena itu, dilakukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh kondisi *off service* HPH terhadap performa pembangkit. Analisis dilakukan pada *software Cycle Tempo 5.0* dan menggunakan data operasi aktual. Setelah itu memvariasikan simulasi dengan mengatur kondisi operasi HPH, dilakukan dengan mengatur bukaan *valve* yang masuk ke sisi *tube* HPH. Hasil penelitian dari variasi kondisi HPH *off service* yaitu kondisi yang paling optimal adalah kondisi eksisting dengan nilai NPHR terendah yaitu 2452,047 kCal/kWh dan nilai efisiensi sistem tertinggi yaitu 35,236%. Variasi yang paling merugikan adalah variasi HPH 1,2,3 *off* dengan nilai NPHR terbesar yaitu 2513,818 kCal/kWh dan nilai efisiensi sistem terendah yaitu 34,37%. Dari hasil perhitungan kecepatan fluida di dalam pipa dan beban pemanasan HPH didapatkan hasil bahwa pada variasi kondisi HPH 2 *off*, HPH 3 *off*, HPH 2 dan HPH 3 *off*, serta HPH 1 dan HPH 3 *off*, terdapat kecepatan fluida ekstraksi ke HPH melebihi kecepatan desain dan beban pemanasan HPH melebihi beban pemanasan maksimum. Hal ini karena laju massa uap ekstraksi ke HPH bertambah secara signifikan, beban pemanasan dari HPH meningkat akibat dari temperatur *feedwater* yang masuk ke HPH semakin rendah.

Kata Kunci— Performa Pembangkit, HPH Off Service, Software Cycle Tempo 5.0

I. PENDAHULUAN

EFFISIENSI sistem pembangkit dapat dinaikkan dengan cara menambahkan *regenerative system* yaitu *feedwater heater*, sumber energi untuk pemanasan pada *feedwater heater* berasal dari uap yang di ekstraksi dari turbin uap [1]. *Feedwater heater* yang digunakan pada sistem pembangkit tenaga uap adalah *low pressure heater* (LPH), *high pressure heater* (HPH), dan *deaerator*. PT PJB UBJOM Paiton Unit 9 menggunakan 4 LPH, 3 HPH, dan 1 *deaerator*.

High Pressure Heater (HPH) berfungsi meningkatkan temperatur *feedwater* yang akan dipanaskan di dalam boiler sehingga penggunaan bahan bakar lebih sedikit. Pada kondisi aktual HPH sering menghadapi masalah sehingga harus dilakukan perbaikan, yang mengharuskan HPH dalam



Gambar 1. P&ID PLTU Paiton Unit 9

kondisi *off service*. Kondisi tersebut memengaruhi daya netto, *net plant heat rate*, dan efisiensi sistem pembangkit. Pada PLTU Paiton Unit 9, apabila salah satu HPH mengalami kerusakan maka seluruh HPH tidak beroperasi karena *by pass* dipasang dari *deaerator* langsung menuju ke *boiler*.

Kondisi tersebut memengaruhi daya netto, *net plant heat rate*, dan efisiensi sistem pembangkit. Pada PLTU Paiton Unit 9, apabila salah satu HPH mengalami kerusakan maka seluruh HPH tidak beroperasi karena *by pass* dipasang dari *deaerator* langsung menuju ke *boiler*.

Oleh karena itu melalui tugas akhir ini, dilakukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh kondisi *off service* HPH terhadap performa pembangkit. Parameter performa yang akan di analisa adalah *net plant heat rate*, efisiensi sistem pembangkit, fraksi massa, kecepatan fluida dalam pipa dan beban pemanasan HPH. Proses mencari performa pembangkit tersebut menggunakan *software Cycle-Tempo 5.0*.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Objek Penelitian

Objek pada penelitian ini adalah PLTU PT. PJB UBJOM Paiton Unit 9, terletak di kabupaten Probolinggo. Bahan bakar yang digunakan adalah batu bara, daya yang dihasilkan turbin sebesar 660 MW.

B. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah data operasi aktual PLTU Paiton Unit 9. Data yang didapatkan berupa data teknis, spesifikasi *apparatus*, dan *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID). Dari P&ID didapatkan data propertis berupa laju massa, temperatur, dan tekanan pada tiap-tiap *apparatus* PLTU. Salah satu P&ID yang digunakan adalah P&ID PLTU Paiton Unit 9 seperti Gambar 1.

Tabel 1.
Spesifikasi HPH

Parameter	Unit	HPH 1	HPH 2	HPH 3
Quantity	set	1	1	1
Total area	m ²	2200	2170	1650
Design pressure at shell side	C	410/325	360/265	460/220
Tube side design pressure	MPa	28	28	28
Tube side design temperature	C	325	285	240
Shell side testing pressure	MPa	12,165	7,2	3,45
Tube side testing pressure	MPa	42	42	42
Feedwater terminal temp difference (TTD)	C	-1.7	0	0
Drainage terminal difference (DCA)	C	5,6	5,6	5,6

Tabel 2.
Beban pemanasan maksimum HPH

HPH	Beban Pemanasan Maks (Q maks)
HPH 1	120292,92 kW
HPH 2	125153,24 kW
HPH 3	156684,566 kW

Tabel 3.
Parameter desain pipa

Item	Tekanan (bar)	Temp (C)	Velocity (m/s)	Pipe size (di x t) mm
Main steam pipe	174,4	546	58,91	(495x50)
Reheat pipe	47,53	546	68,81	(933x50)
Inlet pipe of LP bypass	47,53	546	65,67	(933x50)
HP feedwater pipe	240	281,4	4,79	(508x40)
1st extraction	71,49	414,37	47,43	(245x12)
2nd extraction	45,42	352,66	51,13	(273x11)
4th extraction	21,66	462,6	45,04	(377x13)

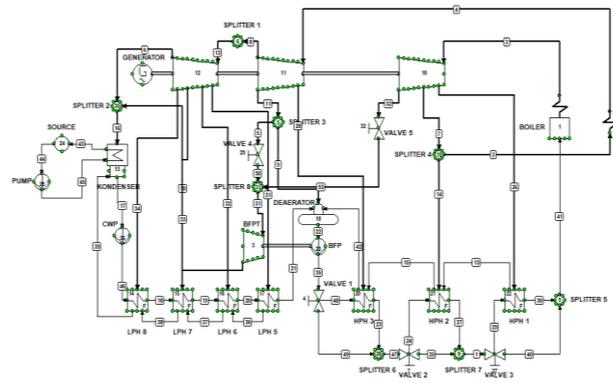
Tabel 1 adalah spesifikasi HPH yang digunakan pada PLTU PT.PJB UBJOM Paiton Unit 9. Data spesifikasi HPH ini digunakan sebagai acuan dalam menentukan apakah HPH dapat beroperasi dengan baik apabila dilakukan variasi.

Beban pemanasan maksimum pada HPH dapat dilihat pada tabel 2.

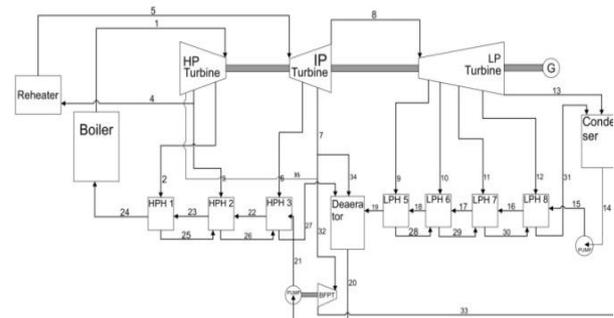
Tabel 3 adalah parameter pada pipa yang digunakan pada PLTU PT.PJB UBJOM Paiton Unit 9. Data parameter pipa ini digunakan sebagai acuan dalam menentukan apakah kecepatan fluida yang mengalir pada pipa melebihi nilai maksimum.

C. Permodelan dan Simulasi

Tahap selanjutnya adalah dilakukan pemodelan menggunakan software cycle tempo 5.0 berdasarkan data propertis yang sudah didapatkan dari control room. Cycle Tempo 5.0 adalah sebuah software yang digunakan untuk membantu perhitungan performa PLTU. Cycle Tempo 5.0 melakukan analisa termodinamika pada berbagai close



Gambar 2. Pemodelan PLTU Paiton Unit 9 menggunakan software Cycle Tempo 5.0



Gambar 3. Skema sistem PLTU Paiton Unit 9

system seperti PLTU. Input data yang dibutuhkan dalam pemodelan adalah temperatur, tekanan dan efisiensi isentropik pada tiap apparatus.

Pada penelitian ini dilakukan analisa pengaruh HPH off service, variasi dilakukan dengan menambahkan valve pada sisi feedwater (sisi tube). Variasi kondisi off service HPH dilakukan dengan mengatur bukaan valve yang masuk ke sisi tube HPH. Pada penelitian ini daya yang dihasilkan turbin dijaga tetap yaitu 660MW. Pemodelan PLTU seperti pada gambar 2 yang terdiri dari 3 tingkat turbin uap, boiler, kondenser, pompa, dan feedwater heater.

Pada gambar 2 adalah pemodelan pembangkit menggunakan software cycle tempo diawali dengan memasukkan data yang kita peroleh dari data aktual pembangkit.

D. Perhitungan Termodinamika

Perhitungan manual performa dari PLTU menggunakan acuan data DCS. Perhitungan dilakukan dengan beberapa langkah, langkah pertama adalah menghitung kalor yang dibutuhkan boiler, dan reheater, kemudian mencari daya gross turbin di setiap tingkatan turbin uap (high pressure, intermediate pressure, low pressure), serta menghitung daya pompa. Perhitungan tersebut digunakan untuk menghitung NPHR dan efisiensi sistem. Gambar 3 di bawah ini adalah skema sistem pembangkit yang digunakan untuk mempermudah perhitungan termodinamika

Perhitungan menggunakan persamaan energi sebagai berikut[1]

- Q_{boiler}
- $Q_{reheater}$

$$Q_{boiler} = \dot{m}_1(h_1 - h_{24}) \tag{1}$$

Tabel 5.
Deviasi hasil simulasi dan perhitungan termodinamika

Parameter	Simulasi	Perhitungan Termodinamika	Deviasi (%)
Main steam	568,706	569,750	0,18
Daya turbin HP	184,384	183,583	0,43
Daya turbin IP	189,224	189,066	0,08
Daya turbin LP	293,057	282,778	3,51
Q fuel	1880,209	1873,912	0,33
Net power	657,785	654,160	0,55
Net eff	34,985	34,837	0,42
NPHR	2469,653	2475,021	0,22

Tabel 6.
Variasi kondisi operasi HPH

Variasi	Kondisi
Eksisting	HPH 1,2,3 on service
Variasi 1	HPH 1 off service, HPH 2 dan HPH 3 on service
Variasi 2	HPH 2 off service, HPH 1 dan HPH 3 on service
Variasi 3	HPH 3 off service, HPH 1 dan HPH 2 on service
Variasi 4	HPH 1 dan HPH 2 off service, HPH 3 on service
Variasi 5	HPH 2 dan HPH 3 off service, HPH 1 on service
Variasi 6	HPH 1 dan HPH 3 off service, HPH 2 on service
Variasi 7	HPH 1,2,3 off service

$$Q_{reheater} = \dot{m}_4 (h_5 - h_4) \tag{2}$$

- Q total

$$Q_{total} = Q_{boiler} + Q_{reheater} \tag{3}$$

- Daya HP turbin

$$W_{HP} = (\dot{m}_1 h_1) - (\dot{m}_2 h_2) - (\dot{m}_3 h_3) - (\dot{m}_4 h_4) \tag{4}$$

- Daya IP turbin

$$W_{IP} = (\dot{m}_5 h_5) - (\dot{m}_6 h_6) - (\dot{m}_7 h_7) - (\dot{m}_8 h_8) \tag{5}$$

- Daya LP turbin

$$W_{LP} = (\dot{m}_9 h_9) - (\dot{m}_{10} h_{10}) - (\dot{m}_{11} h_{11}) - (\dot{m}_{12} h_{12}) - (\dot{m}_{13} h_{13}) \tag{6}$$

- Daya pompa

$$W_{pump} = \dot{m}_1 (h_{21} - h_{20}) + \dot{m}_{14} (h_{15} - h_{14}) \tag{7}$$

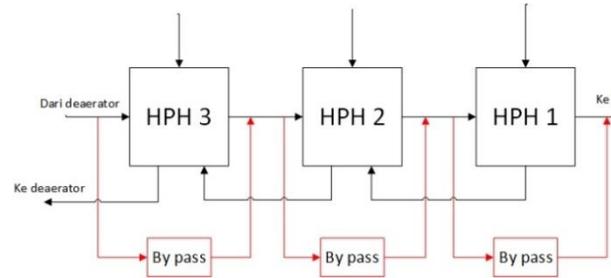
- Daya netto

$$W_{net} = W_{HP} + W_{IP} + W_{LP} - W_{pump} \tag{8}$$

Setelah menghitung daya turbin, dilakukan perhitungan *net plant heat rate* (NPHR). NPHR adalah perbandingan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan pembangkit dibanding jumlah daya yang dihasilkan pembangkit, dimana pembangkit dikatakan baik ketika heat rate mempunyai nilai rendah. Perhitungan heat rate dilakukan seperti dibawah ini:

$$NPHR = \frac{Q_{total}}{W_{net}} \tag{9}$$

Setelah melakukan perhitungan NPHR selanjutnya dilakukan perhitungan efisiensi pembangkit. fSebaliknya dari heat rate, pembangkit dikatakan baik apabila memiliki



Gambar 4. Urutan HPH pada sistem

Tabel 4.
Propertis laju massa sebelum dan setelah dilakukan variasi

m out boiler (kg/s)	m HPH 1 (kg/s)	m HPH 2 (kg/s)	m in reheater (kg/s)	m HPH 3 (kg/s)	m in DA (kg/s)	m out IP tur (kg/
568,706	39,67	35,777	479,66	30,426	26,998	410,
536,045	0	36,428	486,017	27,394	31,613	4,
569,794	74,152	0	482,06	27,168	30,662	412,
575,399	40,137	66,47	455,192	0	31,113	412,
508,634	0	0	495,034	27,747	32,878	423,
578,312	104,563	0	460,15	0	31,257	417,
542,886	0	67,636	461,65	0	32,086	418,
489,973	0	0	476,373	0	34,02	431,

efisiensi pembangkit yang tinggi. Perhitungan efisiensi pembangkit dilakukan seperti di bawah ini[1].

$$Eff = \frac{W_{net}}{Q_{total}} \times 100 \tag{10}$$

E. Validasi Data

Data aktual yang telah disimulasikan dan dihitung secara termodinamika, hasilnya dibandingkan untuk mengetahui penyebab adanya deviasi antar kedua hasil. Berikut tabel hasil perbandingan

Dari perbandingan beberapa parameter diatas didapatkan deviasi yang besar pada daya yang dihasilkan turbin. Hal ini dikarenakan tidak diketahui data laju massa uap masuk IP turbin, LP turbin, dan LPH 6 sehingga diasumsikan berdasarkan *mass balance*.

F. Variasi Penelitian

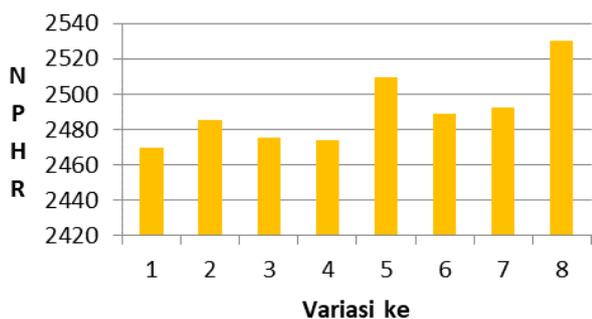
Penelitian dilakukan dengan memvariasikan kondisi operasi HPH untuk mengetahui pengaruhnya terhadap NPHR, efisiensi sistem pembangkit, fraksi massa, kecepatan fluida dalam pipa, dan *heating duty* HPH. Simulasi pada *software cycle tempo 5.0* ditambahkan *valve* pada sisi *feedwater* (sisi *tube*), untuk variasi dilakukan dengan mengatur bukaan *valve* yang masuk ke sisi *tube* HPH.

Gambar 4 merupakan urutan letak HPH yang akan dilakukan variasi. HPH 1 terletak yang paling dekat dengan boiler.

III. HASIL DAN ANALISA

A. Hasil Simulasi

Laju massa uap ekstraksi pada HPH berbeda karena laju massa *main steam* mengalami perubahan akibat terdapat massa uap ekstraksi menuju HPH yang ditutup (*off service*) dan daya turbin yang dihasilkan dijaga tetap. Apabila salah



Gambar 5. Grafik NPHR (kCal/kWh) pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan variasi

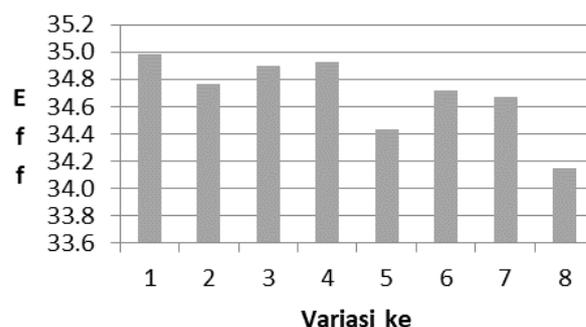
satu atau dua HPH *off* maka terdapat massa uap ekstraksi masuk ke HPH lain yang beroperasi dan ada massa masuk ke turbin tingkat yang lebih rendah. Setiap variasi kondisi HPH *off service* memiliki performa pembangkit yang berbeda, berikut penjelasan hasil simulasi

Net Plant Heat Rate (NPHR)

Berdasarkan gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai NPHR mengalami fluktuasi setelah dilakukan beberapa variasi. Setelah dilakukan variasi, nilai NPHR cenderung mengalami peningkatan apabila dibandingkan dengan kondisi eksisting. Nilai NPHR terendah pada kondisi eksisting yaitu 2452,047 kCal/kWh. Sedangkan nilai NPHR tertinggi pada kondisi saat semua HPH dalam keadaan *off service* yaitu 2513,818 kCal/kWh.

Nilai NPHR menyatakan performa dari suatu pembangkit. NPHR adalah perbandingan antara kalor yang diperlukan boiler untuk memanaskan *feedwater* atau konsumsi bahan bakar untuk proses pembakaran di boiler dengan daya netto yang dihasilkan turbin tetap. Semakin tinggi nilainya maka semakin buruk performa pembangkit tersebut. Nilai NPHR pada variasi kondisi HPH *off service* mengalami peningkatan disebabkan daya netto turbin yang dihasilkan tetap dan tidak sebanding dengan kenaikan jumlah konsumsi bahan bakar, maka variasi kondisi HPH *off service* ini akan mengalami kerugian. Keadaan ini disebabkan oleh penggunaan bahan bakar yang lebih besar karena temperatur *feedwater* ke boiler mengalami penurunan. Semakin banyak HPH dalam keadaan *off service* maka nilai NPHR semakin besar.

Nilai NPHR tertinggi terjadi pada kondisi ketiga HPH mengalami *off service*, yaitu kondisi ketika sistem *by pass* HPH langsung ke boiler, karena pada saat kondisi tersebut *feedwater* tidak mengalami pemanasan awal oleh HPH sedangkan temperatur *outlet boiler* dijaga tetap agar daya yang dihasilkan turbin tetap. Hal ini membuktikan bahwa sistem *by pass* yang dimiliki oleh PLTU Paiton Unit 9 saat ini menghasilkan performa sistem pembangkit yang kurang maksimal. Nilai NPHR tertinggi ketika kondisi 1 HPH *off* adalah kondisi HPH 1 *off service*, karena HPH 1 terletak yang paling dekat dengan boiler sehingga ketika HPH 1 mengalami *off service* maka temperatur *feedwater* yang masuk ke boiler lebih rendah dan beban pemanasan yang ditanggung boiler untuk menaikkan temperatur *feedwater* lebih besar. Hal ini menyebabkan konsumsi bahan bakar lebih besar sedangkan daya yang dihasilkan turbin tetap, kenaikan jumlah bahan bakar yang tidak sebanding dengan daya yang dihasilkan turbin menyebabkan nilai NPHR naik. Hal ini juga



Gambar 6. Grafik efisiensi pembangkit (%) pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan variasi

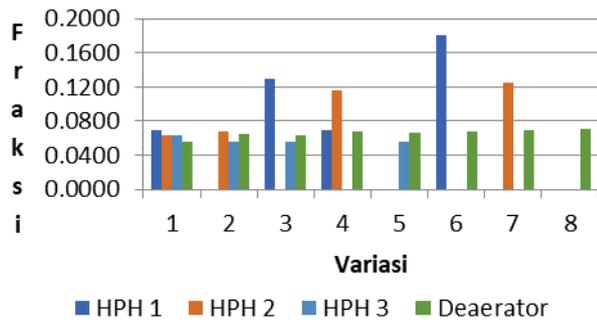
berlaku ketika 2 HPH *off service*, NPHR tertinggi terjadi pada kondisi HPH 1 dan 2 *off* yang mana HPH 1 dan HPH 2 terletak yang paling dekat dengan boiler.

Efisiensi Sistem Pembangkit

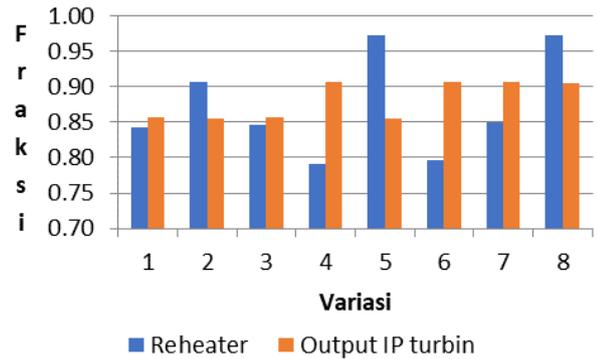
Berdasarkan gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai efisiensi sistem pembangkit mengalami fluktuasi setelah dilakukan beberapa variasi. Pada kondisi HPH yang divariasikan cenderung mengalami penurunan efisiensi apabila dibandingkan dengan kondisi eksisting. Nilai efisiensi tertinggi pada kondisi eksisting yaitu 35,236%, sedangkan nilai efisiensi terendah pada kondisi saat semua HPH dalam keadaan *off service* yaitu 34,37%.

Nilai efisiensi sistem pembangkit juga menyatakan performa dari pembangkit tersebut. Semakin tinggi nilainya maka semakin baik performa pembangkit tersebut. Berdasarkan teori, nilai efisiensi sistem pembangkit dikatakan berbanding terbalik dengan NPHR yaitu perbandingan antara daya netto yang dihasilkan turbin dengan kalor yang diperlukan boiler untuk memanaskan air atau konsumsi bahan bakar untuk proses pembakaran di boiler. Nilai efisiensi sistem pembangkit pada variasi kondisi HPH *off service* mengalami penurunan disebabkan daya turbin yang dihasilkan tetap dan tidak sebanding dengan kenaikan jumlah konsumsi bahan bakar, maka variasi kondisi HPH *off service* ini akan mengalami kerugian. Semakin banyak HPH dalam keadaan *off service* maka nilai efisiensi semakin rendah karena temperatur *feedwater* masuk ke boiler semakin rendah.

Nilai efisiensi sistem pembangkit terendah terjadi pada kondisi ketiga HPH mengalami *off service*, yaitu kondisi ketika sistem *by pass* HPH langsung masuk ke boiler, karena pada saat kondisi tersebut *feedwater* tidak mengalami pemanasan awal oleh HPH sedangkan temperatur *outlet boiler* dijaga tetap agar daya yang dihasilkan turbin tetap sehingga penggunaan bahan bakar menjadi lebih besar. Hal ini membuktikan bahwa sistem *by pass* yang dimiliki oleh PLTU Paiton Unit 9 saat ini menghasilkan performa sistem pembangkit yang kurang optimal. Nilai efisiensi terendah ketika kondisi 1 HPH *off* adalah kondisi HPH 1 *off service*, karena HPH 1 terletak yang paling dekat dengan boiler sehingga ketika HPH 1 mengalami *off service* maka temperatur *feedwater* yang masuk ke boiler lebih rendah dan beban pemanasan yang ditanggung boiler untuk menaikkan temperatur *feedwater* lebih besar. Hal tersebut menyebabkan konsumsi bahan bakar lebih besar sedangkan daya yang dihasilkan turbin tetap, kenaikan jumlah bahan bakar yang



Gambar 7. Grafik fraksi massa HPH 1, HPH 2, HPH 3, dan deaerator pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan variasi



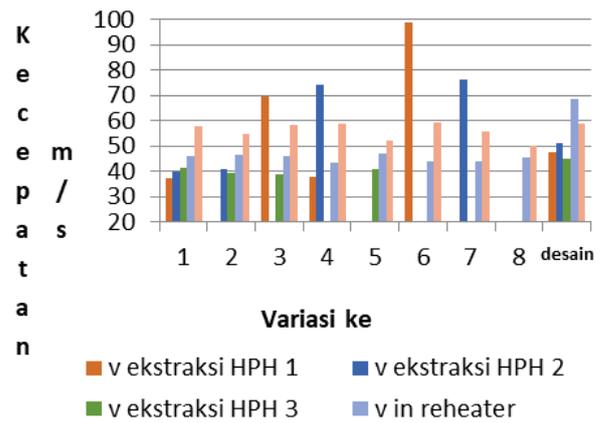
Gambar 8. Grafik fraksi massa reheat dan output IP turbin pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan variasi

tidak sebanding dengan daya yang dihasilkan turbin menyebabkan efisiensi sistem pembangkit turun. Hal ini juga berlaku ketika 2 HPH off service, efisiensi terendah terjadi pada kondisi HPH 1 dan 2 off yang mana HPH 1 dan HPH 2 terletak yang paling dekat dengan boiler.

Fraksi Massa

Berdasarkan gambar 7 dan gambar 8 dapat dilihat bahwa fraksi massa pada setiap apparatus mengalami perubahan karena perubahan kondisi HPH off service. Laju massa uap ekstraksi pada apparatus di setiap variasi yang dilakukan akan berbeda karena laju massa main steam mengalami perubahan akibat terdapat massa uap ekstraksi menuju HPH yang ditutup (off service). Pada saat HPH 1 off, laju massa main steam berkurang karena HPH 1 yang paling dekat dengan boiler sehingga apabila HPH 1 tidak beroperasi maka tidak ada tambahan beban pemanasan untuk HPH yang lain, namun beban pemanasan akan bertambah di boiler. Hal ini menyebabkan massa uap yang masuk ke HPH lain cenderung lebih sedikit sehingga main steam mengalami penurunan. Pada saat HPH 2 off, laju massa uap ekstraksi yang menuju ke HPH 1 bertambah secara signifikan dikarenakan beban pemanasan dari HPH 1 meningkat akibat dari temperatur feedwater yang masuk ke HPH 1 semakin rendah atau dengan kata lain ΔT feedwater (ΔT_w) semakin besar sehingga dibutuhkan massa uap ekstraksi yang besar. Pada HPH 3 off, laju massa uap ekstraksi yang menuju ke HPH 2 bertambah secara signifikan dikarenakan beban pemanasan dari HPH 2 meningkat akibat dari temperatur feedwater yang masuk ke HPH 2 semakin rendah atau dengan kata lain ΔT_w semakin besar sehingga dibutuhkan massa uap ekstraksi yang besar.

Pada HPH 1 dan HPH 2 off, laju massa uap ekstraksi yang menuju ke HPH 3 cenderung konstan karena HPH 1 dan HPH



Gambar 9. Grafik kecepatan fluida dalam pipa pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukan variasi

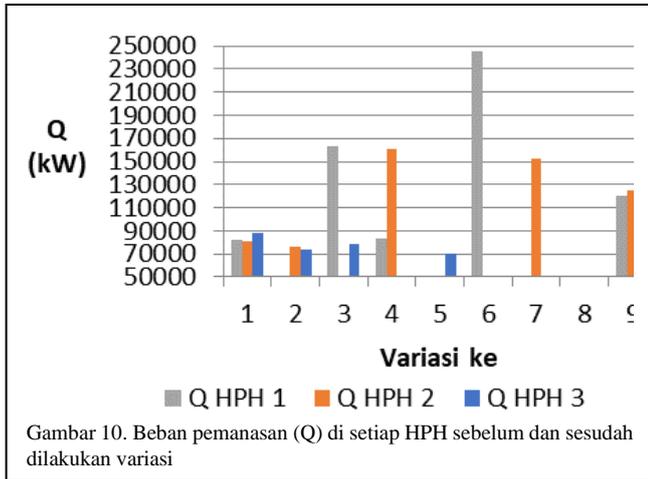
2 paling dekat dengan boiler sehingga apabila HPH 1 dan HPH 2 tidak beroperasi maka tidak ada tambahan beban pemanasan untuk HPH 3, namun beban pemanasan akan bertambah di boiler. Pada HPH 2 dan HPH 3 off, laju massa uap ekstraksi yang menuju ke HPH 1 bertambah secara signifikan dikarenakan beban pemanasan dari HPH 1 meningkat akibat dari temperatur feedwater yang masuk ke HPH 1 semakin rendah atau dengan kata lain ΔT_w semakin besar sehingga dibutuhkan massa uap ekstraksi yang besar. Pada HPH 1 dan HPH 3 off, laju massa uap ekstraksi yang menuju ke HPH 2 bertambah secara signifikan dikarenakan beban pemanasan dari HPH 2 meningkat akibat dari temperatur feedwater yang masuk ke HPH 2 semakin rendah atau dengan kata lain ΔT_w semakin besar sehingga dibutuhkan massa uap ekstraksi yang besar.

Nilai fraksi massa menyatakan perbandingan laju massa masuk dengan laju massa keluar. Laju massa uap ekstraksi HPH 1, HPH 2, BFPT 1 dan laju massa uap ke reheat dibandingkan dengan laju massa uap total masuk HP turbin. Laju massa uap ekstraksi HPH 3, deaerator, BFPT 2 dan laju massa uap output IP turbin dibandingkan dengan laju massa uap total masuk IP turbin. Dari hasil perbandingan tersebut didapatkan fraksi massa seperti gambar 4.5 di atas.

Kecepatan Fluida Dalam Pipa

Dari gambar 9 menunjukkan bahwa saat variasi kondisi HPH 2 off, kecepatan fluida ekstraksi ke HPH 1 melebihi kecepatan desain. Pada variasi kondisi HPH 3 off, kecepatan fluida ekstraksi ke HPH 2 melebihi kecepatan desain. Pada variasi kondisi HPH 2 dan HPH 3 off, kecepatan fluida ekstraksi ke HPH 1 melebihi kecepatan desain. Pada variasi kondisi HPH 1 dan HPH 3 off, kecepatan fluida ekstraksi ke HPH 2 melebihi kecepatan desain. Hal ini dikarenakan laju massa uap ekstraksi ke HPH bertambah secara signifikan, beban pemanasan dari HPH meningkat akibat dari temperatur feedwater yang masuk ke HPH semakin rendah.

Kecepatan desain adalah kecepatan yang disarankan untuk dioperasikan di sistem pembangkit. Apabila kecepatan fluida di dalam pipa melebihi kecepatan desain akan menyebabkan pipa mengalami erosi (kebocoran pipa). Oleh karena itu apabila variasi kondisi HPH 2 off, HPH 3 off, HPH 2 dan 3 off, serta HPH 1 dan 3 off dioperasikan dalam tempo waktu yang lama akan menyebabkan kerusakan pada pipa-pipa yang beroperasi dengan kecepatan fluida melebihi kecepatan



desainnya sehingga performa pembangkit akan mengalami penurunan. Kecepatan fluida di dalam pipa di dapatkan persamaan[2].

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \times A} \tag{11}$$

Beban Pemanasan HPH (Q)

Dari gambar 10 menunjukkan bahwa saat variasi kondisi HPH 2 off, beban pemanasan dari HPH 1 melebihi beban pemanasan maksimum. Pada variasi kondisi HPH 3 off, beban pemanasan dari HPH 2 melebihi beban pemanasan maksimum. Pada variasi kondisi HPH 2 HPH 3 off, beban pemanasan dari HPH 1 melebihi beban pemanasan maksimum. Pada variasi kondisi HPH 1 HPH 3 off, beban pemanasan dari HPH 2 melebihi beban pemanasan maksimum. Hal ini dikarenakan temperatur *feedwater* yang masuk ke HPH semakin rendah.

Beban pemanasan maksimum adalah beban pemanasan untuk HPH yang diijinkan untuk dioperasikan di sistem pembangkit. Ketika HPH dioperasikan dengan beban pemanasan melebihi beban pemanasan maksimum maka akan mempengaruhi *life time* HPH, mempercepat kerusakan *tube* HPH. Oleh karena itu apabila variasi kondisi HPH 2 off, HPH 3 off, HPH 2 dan 3 off, serta HPH 1 dan 3 off dioperasikan dalam tempo waktu yang lama akan menyebabkan kerusakan pada *tube* HPH dan perlu dilakukan perbaikan.

Beban pemanasan HPH di dapatkan persamaan

$$Q = \dot{m} \times (hout - hin) \tag{12}$$

Dimana \dot{m} adalah laju massa fluida, hin adalah entalpi *feedwater* pada tekanan dan temperatur tertentu saat masuk pipa, $hout$ adalah entalpi *feedwater* pada tekanan dan temperatur tertentu saat keluar pipa.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisa yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan bahwa kondisi yang paling optimal adalah kondisi eksisting dengan nilai NPHR terendah yaitu 2452,047 kCal/kWh dan nilai efisiensi sistem tertinggi yaitu 35,236%, karena *feedwater* sebelum masuk ke *boiler* mengalami pemanasan awal oleh 3 buah HPH sehingga konsumsi bahan bakar di *boiler* tidak bertambah dan daya turbin yang dihasilkan tetap. Variasi yang paling merugikan adalah

variasi HPH 1,2,3 off dengan nilai NPHR terbesar yaitu 2513,818 kCal/kWh dan nilai efisiensi sistem terendah yaitu 34,37%, kondisi ini terjadi karena *feedwater* tidak mengalami pemanasan awal oleh HPH sehingga konsumsi bahan bakar *boiler* meningkat sedangkan daya yang dihasilkan turbin tetap. Kondisi tersebut merugikan pihak perusahaan karena semakin besar konsumsi bahan bakar maka semakin besar biaya operasional perusahaan untuk membangkitkan daya 660MW. Serta dari hasil perhitungan kecepatan fluida di dalam pipa dan beban pemanasan (Q) dapat disimpulkan bahwa pada variasi kondisi HPH 2 off, HPH 3 off, HPH 2 dan HPH 3 off, serta HPH 1 dan HPH 3 off kecepatan fluida ekstraksi dan beban pemanasan HPH melebihi maksimum. Hal tersebut terjadi karena temperatur *feedwater* yang masuk ke HPH tersebut semakin rendah. Oleh karena itu, apabila variasi tersebut dioperasikan dalam tempo waktu yang lama akan menyebabkan kerusakan pada *tube* HPH dan perlu dilakukan perbaikan. Apabila lebih dari 10% jumlah *tube* pada HPH sudah pernah dilakukan perbaikan maka HPH harus diganti, sehingga PT. PJB memerlukan biaya lebih untuk perbaikan dan pergantian HPH.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. J. Moran, "Engineering thermodynamics," in *The Mechatronics Handbook*, CRC Press, 2002, pp. 12-1-12-32.
 [2] F. P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. England: John Wiley & Sons Inc, 2006.