

# Efisiensi Energi dalam Pemanfaatan Limbah Panas dengan Boiler *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG)

Vibianti Dwi Pratiwi<sup>1,a,\*</sup>, Juwari Purwo Sutikno<sup>2,b</sup>, dan Renanto Handogo<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Institut Teknologi Nasional Bandung, PKH Mustopha No 23, Neglasari, Cibeunying Kaler, Jawa Barat, 40124

<sup>2</sup> Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Kota SBY, Jawa Timur 60111

Email: <sup>a</sup>[vibiantidwi@itenas.ac.id](mailto:vibiantidwi@itenas.ac.id), <sup>b</sup>[juwari@chem-eng.its.ac.id](mailto:juwari@chem-eng.its.ac.id) (\*Corresponding author)

**Abstrak.** Sumber limbah panas termasuk gas pembakaran yang dibuang ke atmosfer, produk yang dipanaskan keluar dari proses industri dan perpindahan panas dari permukaan peralatan panas tersebut. Sekitar 20% hingga 50% panas yang hilang dari konsumsi energi dibuang sebagai limbah panas. Sistem boiler Heat Recovery Steam Generator (HRSG) sangat banyak digunakan dalam proses industri kimia untuk penghematan biaya operasi pabrik. Efisiensi energi dalam pemanfaatan limbah panas dengan boiler HRSG disimulasikan menggunakan Aspen Hysys. Perancangan boiler HRSG dengan Aspen Hysys sebagai upaya pemanfaatan kembali waste heat dari Kiln dan menghitung besar energi yang dapat dihasilkan dari rancangan boiler HRSG. Rancangan boiler HRSG yang terdiri dari economizer, evaporator, dan superheater yang disimulasikan menggunakan Aspen Hysys pada kondisi *steady state*. Data suhu, tekanan, *mass flow*, fraksi air dan udara diinputkan ke dalam rancangan *flowsheet* pada Aspen Hysys kemudian dihitung efisiensi energi dari rancangan boiler HRSG. Boiler HRSG yang disimulasikan menghasilkan steam suhu 300 °C dan dapat menurunkan suhu flue gas dari 325 °C menjadi 259,2 °C. Selain itu, rancangan boiler HRSG menghasilkan power turbin sebesar 1.141 kW pada kondisi *steady state*. Efisiensi energi yang didapatkan dari perancangan boiler HRSG dalam memanfaatkan limbah panas dari Kiln PT. Semen Gresik dengan simulasi Aspen Hysys sebesar 26,61%.

**Kata Kunci:** Energi, Limbah Panas, Boiler, HRSG

**Abstract.** Sources of waste heat include combustion gas that discharged into the atmosphere, products that heated out of industrial processes and heat transfer from the surface of the hot equipment. About 20% to 50% of heat lost from energy consumption is discharged as heat waste. The System of Heat Recovery Steam Generator (HRSG) is very widely used in the chemical industry process to save factory operating costs. Energy efficiency in waste heat utilization with HRSG boilers is simulated using Aspen Hysys. HRSG boiler design with Aspen Hysys as an effort to reuse the waste heat from the Kiln and calculate the amount of energy that can be generated from the HRSG boiler design. The HRSG boiler design consisting of economizer, evaporator, and superheater is simulated using Aspen Hysys in steady state conditions. Temperature, pressure, mass flow, water and air fractions are inputted into the flowsheet design of Aspen Hysys and energy efficiency is calculated from the HRSG boiler design. The simulated HRSG boiler produces a temperature of 300°C and can reduce the flue gas temperature from 325°C to 259.2°C. In addition, the HRSG boiler design produces a turbine power of 1,141 kW at steady state conditions. Energy efficiency obtained from the design of HRSG boilers in utilizing waste heat from Kiln PT. Semen Gresik with Aspen Hysys simulation is 26.61%.

**Keywords:** Energy, Waste Heat, Boiler, HRSG



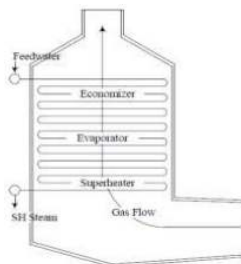
## 1. Pendahuluan

Limbah panas (waste heat) pada suatu industri mengacu pada energi yang dihasilkan tanpa penggunaan secara praktis pada prosesnya. Jika panas terbuang dapat dimanfaatkan kembali maka sejumlah bahan bakar primer dapat dihemat. Energi yang hilang dalam limbah gas tidak seluruhnya dapat dimanfaatkan kembali, tetapi banyak panas yang dapat dimanfaatkan. Berikut contoh sumber limbah panas dan penggunaannya yang tercantum pada tabel 1 di bawah ini;

Tabel 1. Contoh Sumber Limbah Panas dan Penggunaannya<sup>[1]</sup>.

Sumber Limbah Panas	Penggunaan Limbah panas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Combustion Exhaust</i> : Peleburan kaca pada <i>furnace</i> Kiln Semen <i>Fume Incinerator</i> Tungku Aluminium pada <i>Reverberatory Boiler</i></li> <li>• <i>Process off Gasses</i> Busur <i>steel</i> elektrik pada <i>furnace</i> <i>Furnace Reverberatory</i> aluminium</li> <li>• Pendinginan Air dari : <i>Furnace</i> Kompresor udara Mesin pembakaran internal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pemanasan udara</li> <li>• Pemanas boiler untuk feedwater</li> <li>• Beban pemanas</li> <li>• Generator pembangkit listrik</li> <li>• Steam generator untuk Generator tenaga Tenaga mekanik Steam untuk proses industri</li> <li>• Pemanas Ruang</li> <li>• Pemanas air industri</li> </ul>

Pemanfaatan kembali limbah panas memerlukan peralatan yang dapat menangkap dan menggunakan kembali limbah panas untuk menghasilkan kerja meliputi, pembangkit listrik, pemanasan awal udara pembakaran, pemanasan awal furnace, dan pendinginan absorpsi. Salah satu peralatan yang biasa digunakan untuk waste heat recovery adalah boiler HRSG. Karena di boiler ini terjadinya proses transfer panas dari waste heat menjadi steam yang akan digunakan untuk memutar turbin. Secara sederhana susunan HRSG yang terdiri economizer, evaporator dan superheater sesuai gambar 1 dibawah ini,



Gambar 1. Struktur Sederhana Boiler HRSG<sup>[2]</sup>.

Ada beberapa variable yang perlu diperhatikan dalam merancang boiler pada sistem HRSG, seperti; pinch point, approach point, suhu flue gas keluar boiler dan tekanan steam. Pinch point adalah perbedaan suhu antara flue gas keluar evaporator dan suhu saturated steam. sedangkan approach point adalah perbedaan suhu air keluar economizer atau suhu air masuk evaporator dengan saturated steam<sup>[3]</sup>.

Pengendalian volume bahan bakar, pengendalian volume udara keluar, pengendalian temperatur ruang bakar, pengendalian tekanan uap dan pengendalian volume air merupakan bentuk kinerja pada

boiler untuk memanaskan air. Perancang boiler selalu melibatkan dan memasang perangkat kendali boiler supaya mendapatkan hasil yang maksimal dan mencegah terjadinya ledakan dan bahaya lain yang sering terjadi pada mesin-mesin boiler. Perangkat kendali tersebut terpasang pada beberapa subsistem yaitu bagian-bagian yang membentuk suatu sistem pada boiler yang bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan masing-masing produk yang saling berkaitan.

Sistem pengendalian koordinasi boiler dalam mengendalikan volume bahan bakar, udara keluar, temperatur ruang bakar, tekanan uap dan volume air dapat dilakukan dengan permodelan matematis atau simulasi. Pemodelan dan simulasi merupakan dua hal utama yang terkait dengan kajian tentang optimisasi proses di boiler maupun sistem kontrolnya. Peran simulasi dalam menggali sifat-sifat dinamik di boiler menjadi lebih penting dengan melakukan pengujian secara riil karena alasan ekonomi, mengganggu produksi, maupun resiko keamanan.

Penentuan efisiensi energi dalam pemanfaatan limbah panas pada boiler HRSG dipermudah dengan menggunakan simulasi Aspen Hysys. Rancangan boiler HRSG sebagai upaya pemanfaatan kembali limbah panas dari kiln berdasarkan kondisi *steady* dapat menggunakan Aspen Hysys. Selain efisiensi energi, simulasi Aspen Hysys mampu menghitung besarnya energi yang dihasilkan dari rancangan boiler HRSG yang memanfaatkan limbah panas dari kiln suatu industri.

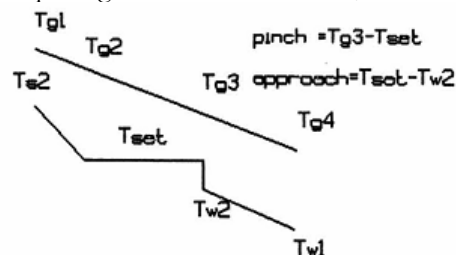
## 2. Metodologi Penelitian

Sistem HRSG meliputi tipe boiler, tata letak dan perancangan HRSG serta mempelajari simulasi *steady state* menggunakan *software* Aspen Hysys. Data suhu, laju alir, tekanan dan komposisi baik pada stream *flue gas* dari kiln maupun *feedwater* yang digunakan berasal dari PT. Semen Gresik dicatat pada tabel 2 dibawah ini;

Tabel 2. Data Spesifikasi input HRSG dari PT. Semen Gresik

Spesifikasi	Stream	
	<i>Flue gas</i> dari Kiln	<i>Feedwater</i>
Suhu	325 <sup>0</sup> C	92 <sup>0</sup> C
Tekanan	95,44 kPa	2.300 kPa
Laju Alir	375.000 kg/h	10.200 kg/h
Komposisi (mol fraksi)	CO <sub>2</sub> = 0,4072	H <sub>2</sub> O = 1
	O <sub>2</sub> = 0,0306	
	H <sub>2</sub> O = 0,0301	
	CO = 0,0020	
	N <sub>2</sub> = 0,5301	

Sistem HRSG yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 3 *heat exchanger* yang merupakan econizer, evaporator dan superheater dengan tipe *shell and tube* di mana air berada di *tube*. Umumnya profil suhu gas dan steam seperti pada gambar 2 di bawah ini,



Gambar 2. Profil Suhu Flue Gas dan Steam pada Boiler HRSG<sup>[4]</sup>.



Tg1, Tg2, Tg3, dan Tg4 berturut-turut menunjukkan suhu flue gas masuk boiler, masuk evaporator dan masuk economizer. Sedangkan Tw1, Tw2 adalah suhu air masuk dan keluar economizer. Ts merupakan suhu saturated steam dan Ts2 adalah suhu superheated steam. Besarnya pinch point dan approach point yang diijinkan dalam boiler HRSG dapat dilihat dalam tabel 3 di bawah ini;

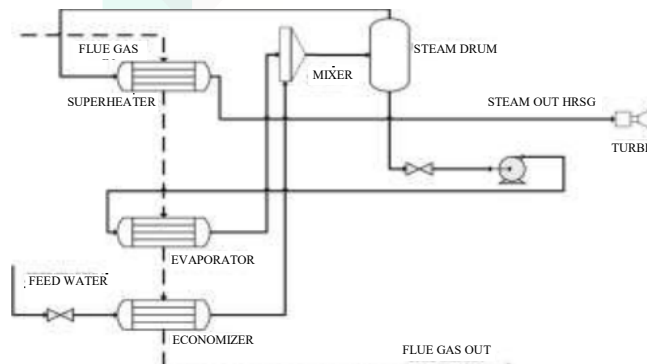
Tabel 3. Syarat Pinch Point dan Approach Point<sup>[4]</sup>.

Inlet Gas, °C	Pinch Point, $\Delta T^{\circ}\text{C}$		Approach point, $\Delta T^{\circ}\text{C}$
	Bare tube	Finned Tube	
649-982	72-83	17-33	22-39
271-649	44-72	5,5-17	5,5-22

Sistem ini dirancang menggunakan Aspen Hysys dengan kondisi *steady*. Kondisi *steady* merupakan kondisi sewaktu sifat suatu sistem tak berubah dengan berjalannya waktu atau dengan kata lain, konstan. Simulasi dibuat menggunakan data flue gas yang telah diperoleh dari PT. Semen Gresik. *Flue gas* masuk melalui superheater menuju evaporator kemudian ke economizer. Sedangkan *feedwater* masuk melalui economizer, menuju evaporator kemudian ke superheater dan keluar sebagai steam untuk dialirkan menuju turbin. Asumsi tidak ada *heatloss* dan suhu steam keluar economizer dan superheater ditentukan. Setelah didapatkan profil suhu yang sesuai dengan persyaratan yang ada maka rancangan sistem HRSG tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi energi dalam pemanfaatan limbah panas dari kiln pada PT. Semen Gresik.

### 3. Hasil dan Pembahasan

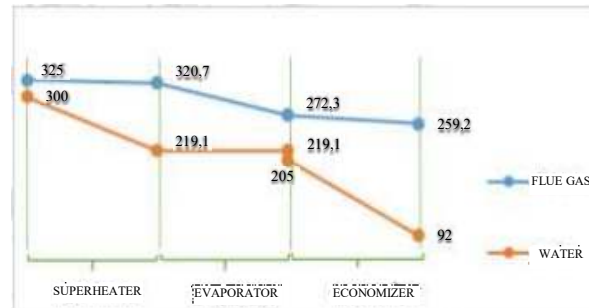
Perancangan boiler HRSG dalam penelitian ini terdiri dari economizer, evaporator, dan superheater yang memiliki prinsip yang sama sebagai penukar panas (*heat exchanger*), seperti ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Skema Rancangan Boiler HRSG

Skema rancangan pada gambar 3 dimasukkan ke dalam simulasi Aspen Hysys pada kondisi *steady state*. Aliran masuk *flue gas* dari data PT. Semen Gresik masuk ke dalam superheater melalui shell dan aliran masuk air melalui tube. *Flowrate* air yang masuk ke dalam superheater perlu diasumsi sementara sehingga perancangan dapat dilanjutkan dengan menambahkan alat evaporator dan economizer. Aliran *feedwater* masuk melalui tube economizer lalu masuk menuju tube evaporator. Sementara aliran *flue gas* dari superheater masuk menuju shell evaporator, lalu keluar dari evaporator masuk menuju shell economizer. Asumsi yang digunakan dalam perancangan ini antara lain *pressure drop* pada economizer, evaporator maupun superheater untuk aliran air (tube) adalah sebesar 25 kPa, dan

untuk aliran *flue gas* (shell) sebesar 10 kPa sesuai dengan batas maksimal sesuai literatur<sup>[5]</sup>. Suhu steam keluar superheater ditetapkan sebesar 300°C, fase vapor pada steam keluaran evaporator sebesar 1,00 dan suhu keluar economizer di-*trial* hingga memenuhi nilai *pinch point* dan *approach point* sesuai literatur<sup>[4]</sup>. Hasil *trial* didapatkan suhu air keluar economizer sebesar 205°C. Berdasarkan rancangan yang dilakukan pada penelitian didapatkan profil suhu seperti yang ditunjukkan pada gambar 4 berikut ini;



Gambar 4. Profil Suhu Boiler HRSG pada *Steady State*

Rancangan boiler HRSG dilengkapi dengan *steam drum* supaya steam yang keluar dari evaporator yang kemungkinan masih mengandung liquid dapat dipanaskan kembali pada evaporator. Steam yang keluar dari evaporator dicampur dengan air keluar economizer menggunakan mixer kemudian masuk kembali ke dalam *steam drum* untuk dipisahkan. Uap yang keluar dari bagian atas *steam drum* dialirkan menuju tube superheater menggantikan aliran yang pada awalnya diasumsikan, sementara liquid yang keluar dari bawah *steam drum* dialirkan menuju tube evaporator dengan 1% keluar sebagai *blowdown*, sehingga ditambahkan alat pemisah. Alat pemisah yang digunakan pada simulasi ini adalah *splitter (tee)* yang mengeluarkan 1% *blowdown* ke lingkungan.

*Recycle steam* keluar evaporator diasumsi 100% (suhu, tekanan, dan laju alir sama). Untuk menaikkan tekanan steam yang dihasilkan superheater maka liquid keluar steam drum dilengkapi dengan pompa (*vapour phase=0*) dan tekanan keluar di-*trial* agar tekanan steam keluar superheater tidak banyak berubah dari tekanan awal (2300 kPa) sehingga diperoleh tekanan keluar pompa sebesar 2400 kPa. Rancangan boiler HRSG dilengkapi turbin dengan input steam yang keluar dari superheater untuk melihat energi yang dihasilkan. Asumsi tekanan keluar turbin sebesar 125,8 kPa. Perhitungan yang dilakukan untuk merancang boiler HRSG yang terdiri dari komponen utama tiga *heat exchanger* tercantum pada tabel 4 berikut;

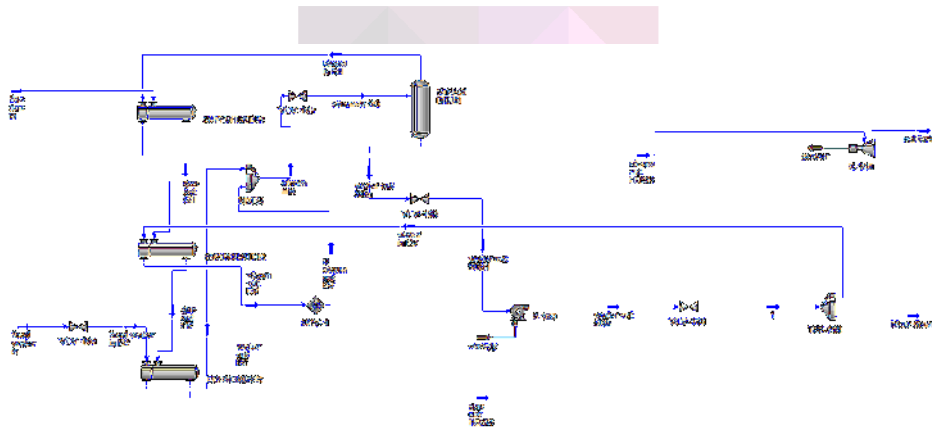
Tabel 4. Hasil Perhitungan Alat Superheater, Evaporator, dan Economizer pada Boiler HRSG<sup>[5]</sup>

Alat	Shell Side		Tube side	
	IDs	in	Jumlah	
Superheater	Baffle	8 in	Panjang	16 ft
	n'	1	OD	1 in
	de	0,73	BWG	16
			Pitch	1 ¼ in <sup>2</sup>
			Passes	2 (triangular)
			a''t	0,2618
			a't	0,594



<b>Evaporator</b>	IDs	8	in	Jumlah	736	
	Baffle	8	in	Panjang	16	ft
	n <sup>o</sup>	1		OD	1	in
	de	0,73		BWG	16	
				Pitch	1 ¼	in <sup>2</sup>
				Passes	2	(triangular)
				a''t	0,2618	
			a't	0,594		
<b>Economizer</b>	IDs	33	in	Jumlah	938	
	Baffle	33	in	Panjang	16	ft
	n <sup>o</sup>	1		OD	¾	in
	de	0,73		BWG	16	
				Pitch	1	in <sup>2</sup>
				Passes	2	(triangular)
				a''t	0,1963	
				a't	0,302	

Simulasi HRSG dalam kondisi *steady state* berdasarkan data *fluegas* dan *feedwater* yang didapatkan dari PT. Semen Gresik menggunakan Aspen Hysys seperti diperlihatkan pada gambar 5 berikut ini;



Gambar 5. Simulasi Steady State Boiler HRSG

Berdasarkan rancangan HRSG yang telah dibuat dalam kondisi *steady state* tersebut, diperoleh suhu flue gas out HRSG sebesar 259,2°C dan power turbin yang dihasilkan menunjukkan harga 1,141 kW. Suhu flue gas yang keluar masih cukup tinggi karena dalam sistem dianggap tidak ada heat loss, serta kecilnya laju alir *feedwater* yang masuk. Perbedaan suhu steam yang keluar dari economizer dengan suhu steam masuk evaporator didapat suhu *approach point* sebesar 14,1°C. Selain itu, perbedaan suhu *flue gas* keluar dari evaporator dengan suhu steam masuk evaporator didapatkan suhu *pinch point* sebesar 67,3°C. nilai *approach point* dan *pinch point* ini telah sesuai dengan persyaratan yang terdapat pada literatur<sup>[4]</sup>. Dengan demikian, rancangan boiler HRSG pada kondisi *steady state* ini telah memenuhi literatur.

Efisiensi energi dari boiler HRSG dihitung berdasarkan jumlah energi yang dimanfaatkan dibandingkan dengan jumlah energi yang masuk dalam sistem boiler HRSG<sup>[6]</sup>. Energi yang dimanfaatkan dari boiler pada penelitian ini berasal dari energi yang dihasilkan dari superheater, evaporator dan economizer berdasarkan simulasi Aspen Hysys. Energi yang dihasilkan superheater sebesar 483 kW, sedangkan energi yang dihasilkan evaporator sebesar 5.439 kW dan energi yang berasal dari economizer sebesar 1.451 kW. Pada perancangan sistem boiler HRSG pada penelitian terdapat beberapa separator pendukung seperti steam drum dan splitter yang menghasilkan energi

sebesar 123.305 kW sedangkan turbin yang bergerak dengan energi yang dihasilkan dari boiler HRSG sebesar 1.141 kW. Energi yang masuk ke dalam sistem boiler HRSG ini berasal dari aliran *flue gas* yaitu 477.500 kW. Sehingga didapatkan efisiensi energi dari hasil perancangan boiler HRSG dalam memanfaatkan limbah panas (*waste heat*) dari PT. Semen Gresik sebesar 27,61%

#### 4. Kesimpulan

Rancangan boiler HRSG yang terdiri dari economizer, evaporator dan superheater dapat digunakan untuk menghasilkan steam suhu 300°C dan dapat menurunkan suhu *flue gas* dari 325°C menjadi 259,2°C. Turbin yang digerakkan oleh steam keluaran HRSG ini menghasilkan tenaga sebesar 1.141 kW pada kondisi *steady state*. Efisiensi energi yang didapatkan dari perancangan boiler HRSG dalam memanfaatkan limbah panas dari Kiln PT. Semen Gresik dengan simulasi Aspen Hysys sebesar 26,61%.

#### Referensi

- [1] Industrial Technologies Program, "Waste Heat Recovery: Technology And Opportunities," in *U.S. Industry*, USA: BCS Incorporated, 2008.
- [2] Rufaidah A. Pratiwi V D. Juwari. Renanto, "Simulasi Dinamika Boiler Heat Recovery Steam Generator menggunakan Aspen Hysys" *Jurnal Teknik POMITS*, Vol.2, No.1, 2014, ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).
- [3] Ganapathy V, "Simulation Aids Cogeneration", New York: Chemical Engineering Progress, 1993.
- [4] Ganapathy V, "Steam Plant Calculation Manual 2nd Edition", New York: Marcel Dekker Inc, 1993.
- [5] Kern Donald Q, "Process Heat Transfer", New York: Mc Graw Hill, 1955.
- [6] Sitepu T, Hadi Putra Silaban S, "Perancangan Heat Recovery Steam Generator (HRSG) yang Memanfaatkan Gas Buang Turbin Gas di PLTG PT. PLN (Persero) Pembangunan dan Penyaluran Sumatera Bagian Utara Sektor Belawan", *Jurnal e-Dinamis*, Vol. 8 No 4, Maret 2014 ISSN: 2338-1035.



Pemakalah :  
Vibianti Dwi Pratiwi  
11.45-12.00 WIB

Pertanyaan :	Jawaban :
<p>1. - Aspen yang dipakai seri berapa? - Berapa kondisi operasi masing-masing alat? (Agus Aktawan)</p>	<p>1. - Aspen yang dipakai seri 7.3, untuk terbaru sudah ada seri 9. - Suhu masuk 135°C, keluar 300°C. - Feed water masuk suhu 92°C. - Energy 432 kW. - Perhitungan dari aspen hysis karena lebih mudah dalam perhitungannya.</p>
<p>2. - Jenis steam apa yang dipakai? - Apakah perlu tambahan Burner? - Berapa tekanan steam? (Nanda Suhartono)</p>	<p>2. - Steam yang digunakan Saturated. - Butuh burner untuk menggerakkan turbin. - Energi yang dihasilkan di lapangan 8,6 mW, dari data sekitar 1100 kW. - Tekanan steam belum dicek, lebih ke profil suhu.</p>
<p>3. - Feed water agar suhu 92°C ada preheater? - Kenapa memilih bare tube dibanding finned tube? (Moderator)</p>	<p>3. - Sebenarnya ada tapi dilapangan suhunya sudah 92°C. - Karena bare tube lebih disarankan.</p>