

Studi Kasus terhadap Alat Penukar Kalor 127-C PUSRI IV Berbasis Simulasi Program *Heat Transfer Research Inc.* (HTRI) dengan Variabel Jumlah *Plug* dan Material *Tube*

Case Study of PUSRI IV 127-C *Heat exchanger* Based on Heat Transfer Research Inc. Program Simulation (HTRI) with Variable Number of *Plugs* and *Tube* Materials

Nucke Aurelia¹, Lia Cundari¹, Winandyo Mangkoto²

¹ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indonesia

² PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Aug 31 ,2022

Revised Dec 09 ,2022

Accepted Dec 09 ,2022

Keywords:

HTRI

Heat exchanger

Amonia

Tube

Plug

ABSTRACT

Heat exchanger (HE) is used as a medium for heat exchange between fluids. One of the most critical HE at PT. Pupuk Sriwidjaja (PUSRI), is the 127-C (Ammonia Refrigerant Condenser) in the PUSRI-IV ammonia unit which is supported by 2 identical HEs, namely 127-CA and 127-CB. This HE serves to condense ammonia gas into liquid. The evaluation report of this HE showed depretiation of performance in an average of 31.46%. Therefore, it is necessary to optimize this HE, one of which is through research using the Heat Transfer Research Inc. (HTRI) simulator to see the effect of the number of plugs and tube material replacement. The variable number of plugs used are 17, 250, 500, 750 and 1000 for the 127-CA and 21, 250, 500, 750 and 1000 for the 127-CB. As for the tube material variables, namely Carbon Steel (CS), 304- Stainless Steel (304-SS), and 316- Stainless Steel (316-SS). After simulation and analysis were carried out by considering the factors of heat transfer performance, corrosion resistance and cost-benefit, it was concluded that re-tubing with 304-SS material was the most appropriate choice. The maximum number of plugs for CS material is 1000 pieces while for 304-SS and 316-SS materials it is 750 pieces.

Copyright © 2022 Universitas Sriwijaya.
All rights reserved.

Corresponding Author:

Lia Cundari,

Jurusan Teknik Kimia,

Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya,

Jl. Raya Palembang – Prabumulih KM.32, Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan.

Email: liacundari@ft.unsri.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pembangunan dan perkembangan industri kimia yang semakin pesat setiap harinya mendorong diprakarsainya pendirian pabrik-pabrik kimia di Indonesia, salah satunya yaitu PT. Pupuk Sriwidjaja

Palembang (PUSRI). PUSRI menjadi pelopor dan produsen pupuk urea nasional sejak 24 Desember 1959. Alat penukar kalor (*heat exchanger*) diibaratkan sebagai pembuluh darah dalam proses produksi di PUSRI. *Heat exchanger* (HE) digunakan sebagai media atau sarana untuk menukarkan energi dalam bentuk panas antara fluida yang berbeda temperatur. Hal ini dapat terjadi melalui kontak langsung maupun kontak secara tidak langsung, sama seperti fungsi pembuluh darah di tubuh manusia. Fluida yang bertukar energi dapat berupa fluida yang sama fasanya (cair ke cair atau gas ke gas) atau dua fluida yang berbeda fasanya. HE yang digunakan oleh PUSRI dalam menunjang berbagai kebutuhan prosesnya terutama dalam proses pertukaran panas (*heat transfer*).

HE ini digunakan untuk memenuhi kondisi operasi tertentu pada masing-masing alat terutama temperatur atau suhu. Hal ini karena masing-masing peralatan ini memerlukan suatu kondisi yang optimum untuk dapat bekerja secara maksimal. Peran HE ini sangat vital dan menentukan performa pabrik. Salah satu HE yang sangat kritis di PUSRI khususnya di Unit Amonia PUSRI-IV adalah HE 127-C (*Amonia Refrigerant Condenser*). HE ini berfungsi untuk mengkondensasikan gas amonia menjadi *hot product* dan *cold product*. *Hot product* amonia akan dialirkan ke unit urea sebagai bahan baku sedangkan *cold product* disimpan di dalam tangki. PUSRI-IV telah didirikan sejak tahun 1977, maka terdapat HE 127-C ini didesain dengan dua buah HE identik yang terpisah yakni 127-CA dan 127-CB. Pada waktu tersebut kemungkinan belum ada teknologi membuat HE yang mampu mempertukarkan panas dalam kapasitas laju alir besar. Kemungkinan kedua yakni terdapat pertimbangan lain dari segi ekonomi yang lebih menguntungkan jika kedua HE tersebut dipisah. Kedua HE tersebut memiliki geometri dan spesifikasi yang identik satu dengan lainnya mulai dari ukuran, material hingga kapasitas. Kedua HE tersebut hingga saat ini menopang proses kondensasi produk amonia di PUSRI-IV. Dalam satu jam HE ini rata-rata mampu mengkondensasikan 71.794 kg amonia pada *rate* operasi pabrik 100% dengan aliran air pendingin (*cooling water*) sebesar 10.393.000 kg. Aliran amonia yang masuk ke 127-CA dan 127-CB berasal dari 105-J (*Amonia Refrigeration Compressor*).

Konfigurasi HE ini merupakan *shell and tube* dengan tipe CEN. Konfigurasi 127-C ini sesuai dengan *Tubular Exchangers Manufacturers Association* (TEMA), yang memiliki makna *stationary head types* yakni tipe C (*Channel Integral with Tubesheet and Removable Cover*), tipe shell yaitu E (*One-Pass Shell*), dan *rear head types* yakni tipe N (*Fixed Tube Sheet Like "N" Stationary Head*) [1]. Tipe ini dipilih untuk mempermudah *maintenance* selama proses operasi karena sifat amonia yang korosif sehingga mudah dibersihkan sewaktu-waktu. Fluida yang dipertukarkan di dalam 127-C ini sesuai dengan nama alatnya *amonia refrigerant condenser* yakni amonia yang panasnya diserap oleh *cooling water*. Amonia yang bersifat korosif ditempatkan pada bagian *shell* (*shell side*) sedangkan *cooling water* pada sisi *tube* (*tube side*). Material *tube* yang digunakan hingga saat ini yaitu *carbon steel* karena alasan ekonomi dan kebutuhan proses.

Setelah dilakukan evaluasi terhadap performa HE ini dengan data aktual dari PUSRI selama rentang 4 bulan di tahun 2021 (Mei, Juni, Juli dan Agustus). Kinerja HE ini mengalami penurunan rata-rata sebesar 31,46% dibandingkan dengan desain. Peninjauan kinerja ini dilakukan dari sisi nilai U (*overall heat transfer coefficient*) dan beban HE tersebut (*duty*). Penurunan kinerja ini disebabkan oleh berbagai faktor misalnya *scaling* pada *tube* dan *plugging* alami pada *tube* akibat adanya partikel asing. Hal ini juga dapat diakibatkan oleh kebocoran *tube* dan kurang maksimalnya material *tube* dalam menghantarkan panas. Upaya optimasi terhadap HE ini sangat diperlukan untuk meningkatkan kinerjanya, salah satunya dengan menggunakan *software* simulasi proses karena murah, efisien dan cepat.

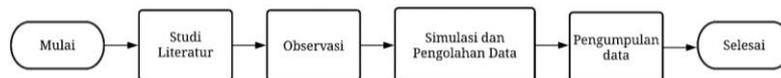
Salah satu simulator yang telah teruji untuk melakukan perancangan termal HE yang mendekati metode Kern dibandingkan dengan *software* lainnya yaitu Heat Transfer Research Inc. (HTRI) [2]. Ratnawati dan Salim telah melakukan penelitian untuk melihat pengaruh jenis material terhadap beberapa parameter *heat exchanger* yaitu *duty* dan nilai U [3]. Perbedaan material ini mengakibatkan perbedaan nilai U dan *duty* yang signifikan. Hal ini dipengaruhi nilai konduktivitas termal yang berbeda-beda pada setiap material. Masrufaiyah & Sulistiono telah meneliti pengaruh jumlah *plugging* pada *tube* terhadap performa transfer panas di *heat exchanger* [4]. Semakin banyak jumlah *tube* yang di-*plugging* maka akan menurunkan performa transfer panas karena mengurangi luas area terjadinya perpindahan panas. *Plugging* merupakan upaya penyumbatan sisi *inlet* dan *outlet* suatu *tube* agar fluida tidak dapat mengalir melewati *tube*.

Peran HE 127-C ini sangat kritis karena berpengaruh langsung terhadap *rate* operasi unit amonia PUSRI IV. Jika HE ini gagal mengkondensasi amonia dapat menyebabkan amonia terakumulasi terus menerus dan jika sudah melebihi beban yang dapat ditanggung oleh *Purge Gas Recovery Unit* (PGRU), maka amonia ter-*venting*. Untuk mencegah amonia ter-*venting* PUSRI harus melakukan tindakan koreksi dengan menurunkan *rate* operasi yang merugikan bagi PUSRI. Hal ini dilakukan untuk mengurangi beban bagi HE tersebut. Ter-*venting*-nya amonia ini juga akan menimbulkan kerugian karena membuang produk amonia secara percuma. Dari segi lingkungan *venting* ini dapat menimbulkan bau amonia yang menyengat ke lingkungan. Maka dari itu dilakukan penelitian ini dengan menggunakan simulator HTRI (*Heat Transfer Research Inc.*) untuk mengamati pengaruh jumlah *plug* dan penggantian material *tube* terhadap kinerja 127-C yang ditinjau dari nilai U, *duty*, serta beberapa parameter lain dari alat 127-C.

2. METODE

Metodologi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini berupa studi literatur, observasi, pengumpulan data dan simulasi proses. Penelitian ini dilakukan di Departemen Perencanaan dan Pengendalian Produksi (Rendal Produksi), Divisi Operasi Unit Amonia PUSRI-IV dan Departemen Rancang Bangun Pabrik (RBP) PT Pupuk Sriwijaya (PUSRI) Palembang dimulai dari tanggal 5 Juli 2021 hingga 18 Oktober 2021. Data yang digunakan sebagai kondisi operasi pada simulasi proses berasal dari data aktual pada tanggal 18 Agustus 2021 saat *rate* operasi 88,73%. *Software* yang digunakan pada simulasi ini yaitu *Heat Transfer Research Inc. (HTRI) Xchanger Suite* Versi 8.2.

Kondisi ini dipilih karena menunjukkan kondisi performa pabrik yang baik yakni lebih dari 85%. Selain itu, kondisi ini merupakan kondisi bulanan paling terbaru karena di bulan September terdapat shut-down karena terjadinya *black-out* pada tanggal 8 September 2021. Hal ini yang mengakibatkan unit amonia PUSRI-IV mengalami *shut-down* total sehingga data setelahnya berlangsung pada *rate* operasi yang rendah. Karena proses dan kondisi operasi yang cukup kompleks maka dipilih metode simulasi proses dengan simulator dibandingkan metode perhitungan. Penggunaan simulasi ini juga bertujuan untuk mengefisienkan proses pengolahan data yang kompleks. Diagram alir atau tahapan penelitian diilustrasikan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Studi Literatur

Studi literatur sebagai petunjuk dalam mengetahui parameter-parameter yang digunakan untuk evaluasi kinerja alat 127-C (*Amonia Refrigerant Condenser*). Selain itu, dapat diperoleh landasan pemecahan masalah dan metode untuk memperoleh pemahaman yang lebih baik terhadap masalah yang dihadapi. Studi literatur dilakukan dengan cara mempelajari referensi dan informasi yang berasal dari laporan, jurnal, buku, dan catatan yang berhubungan dengan evaluasi yang dilakukan.

2.2 Observasi

Observasi dilakukan seiring dengan dilakukannya studi literatur, akan tetapi studi literatur tetap terus dilakukan setelah observasi. Observasi dilaksanakan dengan melakukan diskusi serta pembahasan dengan pembimbing lapangan untuk mendapatkan informasi dan pengetahuan yang lebih spesifik mengenai penelitian yang sedang dilakukan. Observasi juga dilakukan dengan melihat kondisi operasi di lapangan secara *real* dengan mewawancarai operator unit amonia PUSRI-IV.

2.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data berkaitan dengan data yang diperlukan pada simulasi untuk memperoleh hasil evaluasi yang aktual. Data yang digunakan untuk menyelesaikan penelitian merupakan data desain yang diperoleh dari *Piping & Instrumentation Diagram* (P&ID) setelah *Amonia Optimization Project* (AOP) tahun 1992. Untuk data aktual diambil pada tanggal 18 Agustus 2018. Selanjutnya, dilakukan simulasi dengan kondisi operasi di waktu tersebut dengan variabel material *tube* dan jumlah *plug* pada 127-CA dan 127-CB.

Dari hasil pengumpulan data diketahui bahwa tipe *heat exchanger* adalah *shell dan tube* dengan konfigurasi CEN. Data geometri tube ditunjukkan pada Tabel 1. *Outside diameter shell* yakni 1,448 meter. Geometri 127-CA dan 127-CB secara desain sama persis satu sama lain. Tabel 2 berisi kondisi operasi desain baik dari sisi amonia dan *cooling water* 127-C secara keseluruhan yang terdiri dari 127-CA dan 127-CB. Data aktual dan kondisi operasi yang digunakan pada penelitian ini di ambil pada 18 Agustus 2021 pada pukul 08:00 WIB. Tabel 3 menunjukkan kondisi operasi *shell side* pada 127 CA dan 127 CB. Tabel 4 menunjukkan kondisi operasi *tube side* pada 127 CA dan 127 CB.

Tabel 1. Data Geometri Tube

Keterangan	Nilai	Unit
Diameter (OD)	0,01905	meter
Thickness	0,00211	meter
Inside Diameter	0,01694	meter
Panjang	7,315	meter
Jumlah Tube	3100	buah
Volume	6,46005	m ³
Material	Carbon Steel	

Tabel 2. Kondisi Operasi Desain Amonia 127-C dan *Cooling Water* 127-C

Jenis Fluida	Operating Pressure (kg/cm ² Gauge)	Operating Temp. In (°C)	Operating Temp. Out (°C)	Fouling Factor (m ² °C.hr/kcal)	Total Flow (kg/hr)
AMONIA (127-C)	1	119,12	35	0,000205	73498,02
COOLING WATER (127-C)	5,6	32,2	34,4	0,000342	5196500

Tabel 3. Kondisi Operasi Amonia 127-CA dan Amonia 127-CB pada 18 Agustus 2021

Jenis Fluida	Rate Produksi (%)	Operating Pressure (kg/cm ² Gauge)	Operating Temp. In (°C)	Operating Temp. Out (°C)	Fouling Factor (m ² °C.hr/kcal)	Total Flow (kg/hr)
AMONIA (127-CA)	88,7348	18	138	38	0,000205	29688,91215
AMONIA (127-CB)	88,7348	18	138	38	0,000205	29688,91215

Tabel 4. Kondisi Operasi *Cooling Water* 127-CA dan *Cooling Water* 127-CB pada 18 Agustus 2021

Jenis Fluida	Operating Pressure (kg/cm ² Gauge)	Operating Temp. In (°C)	Operating Temp. Out (°C)	Fouling Factor (m ² °C.hr/kcal)	Total Flow (kg/hr)
COOLING WATER (127-CA)	5,2	34,2	36,4	0,00054	3722000
COOLING WATER (127-CB)	5,2	34	35,9	0,00053	3502000

2.4 Prosedur Evaluasi 127-C dengan Permodelan HTRI

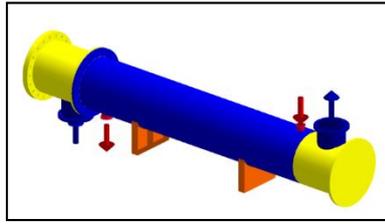
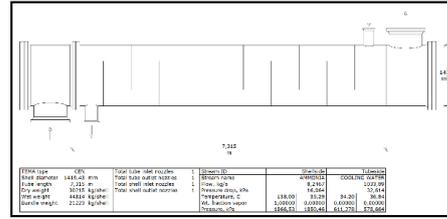
Pertama-tama aplikasi HTRI pada *desktop* dibuka dengan cara meng-klik *shortcut* HTRI. Jenis laptop yang digunakan pada penelitian ini yaitu laptop Asus *Vivobook S14 M4331A*; dengan spesifikasi: AMD Ryzen™ 7 4700U Processor 2.0 GHz (8M Cache, up to 4.1 GHz). Kemudian, *file* baru dibuat dengan cara meng-klik *file* kemudian *new shell and tube exchanger* (Xist). Selanjutnya, dilakukan pemilihan *case mode*. Dalam penelitian ini, *case mode* yang dipilih yaitu *simulation* dengan tipe *heat exchanger* (HE) yakni CEN, *hot fluid: shellside*, dan *orientation: horizontal*. Pada bagian kanan, terdapat bagian *process*, data-data pada bagian tersebut diisi sesuai dengan Tabel 3 dan Tabel 4 untuk 127-CA dan 127-CB.

Properti *hot fluid* dan *cold fluid* selanjutnya dimasukkan ke dalam *software* menggunakan *property generator* dari HTRI. Pada bagian kanan, terdapat bagian *geometry*, bagian ini diisi sesuai dengan Tabel 1. Kemudian sesuai dengan sampel yang disimulasikan, material *tubenya* diganti sesuai dengan sampel yakni *carbon steel* (CS), *304 Stainless Steel*, dan *316 Stainless Steel*. Untuk mengilustrasikan *tube ter-plug*, klik bagian *tube layout* kemudian klik *use tube layout drawing as input* → *yes* → *edit*, kemudian beberapa *tube* diklik → klik kanan → *tube* → *changed to plugged* → *apply* → *done*. Jumlah *plug* ini disesuaikan dengan variabel bebas yakni 17, 250, 500, 750 dan 1000 buah pada 127-CA dan 21, 250, 500, 750 dan 1000 buah pada 127-CB. Setelah semua data operasi telah dimasukkan ke dalam *software* HTRI, selanjutnya kasus ini telah dapat disimulasikan dengan klik *run case*. Proses iterasi memakan waktu selama beberapa detik saja dikarenakan spesifikasi laptop yang handal. Jika proses iterasi telah selesai, *user* akan diarahkan oleh HTRI secara otomatis untuk melihat hasil simulasi pada bagian *reports*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Hasil Penelitian

Data *vapor fraction* amonia, suhu keluar amonia (°C), *duty* (MW), nilai actual U (W/m² K), nilai *required* U (W/m² K) dan *effective area* (m²) dari hasil simulasi perancangan termal *shell and tube heat exchangers* 127-CA dan 127-CB setelah disimulasikan dengan menggunakan *software* HTRI dengan variabel jumlah *plug* dan material *tube*. Pengertian nilai actual U mengacu pada nilai U dari peralatan sementara *required* U merupakan U yang dibutuhkan dari sisi proses. Gambar 2 menunjukkan tampilan 3 dimensi dari desain *shell and tube heat exchanger*. Gambar 3 mengilustrasikan geometri dari HE 127-C.

Gambar 2. Tampilan 3-D dari Desain *Shell and Tube Heat Exchanger*Gambar 3. *Exchanger Drawing Hasil Simulasi*

Variabel jumlah *plug* untuk 127-CA yaitu 17, 250, 500, 750, dan 1000 buah. Variabel jumlah *plug* untuk 127-CB yaitu 21, 250, 500, 750, dan 1000 buah. Variabel jumlah *plug* dipilih untuk menganalisa berapa jumlah maksimal *plug* di 127-C sebelum gagal mengkondensasikan amonia. Jumlah *plug* yang ada di 127-CA saat ini sebanyak 17 buah sedangkan 127-CB yaitu 21 buah. *Plug* ini umumnya dilakukan jika ada *tube* yang mengalami kebocoran ataupun akumulasi partikel asing yang menyebabkan saluran *tube* tersumbat. Kebocoran *tube* ditandai dengan tingginya kandungan amonia di air pendingin. Variabel material *tube* yaitu *carbon steel* (CS), 304- *Stainless Steel* (304-SS), dan 316-SS. Ketiga jenis material ini merupakan material yang paling umum digunakan sebagai material *tube* sehingga tersedia secara komersial. Sehingga, total keseluruhan sampel yang diperoleh datanya berjumlah 120 sampel. Hasil simulasi terhadap 127-CA disajikan pada Tabel 5, dan hasil simulasi terhadap 127-CB disajikan pada Tabel 6.

3.2 Pembahasan Hasil Penelitian

Simulasi dengan bantuan komputer pada penelitian kali ini menggunakan *software* HTRI. Simulasi dilakukan terhadap perancangan termal terhadap HE 127-C dengan fluida panas (*hot fluid*) berupa amonia yang berada di sisi *shell*, sedangkan fluida pendingin (*cold fluid*) berupa *cooling water* atau air pendingin yang berada di sisi *tube*. Simulasi proses berfokus pada proses perpindahan panas yang terjadi antara kedua fluida dengan variabel bebas berupa jumlah *plug* dan material *tube* sehingga dapat diketahui perubahan terhadap variabel terikat. Setelah melakukan proses simulasi dengan HTRI terjadi perubahan nilai terhadap keenam variabel terikat yang diamati yaitu: *vapor fraction*, temperatur keluaran amonia, *duty*, nilai *actual U*, nilai *required U*, dan *effective area*. Perubahan terhadap keenam variabel tersebut tentunya dipengaruhi oleh beberapa faktor baik dari material *tube*, jumlah *plug* serta *software* HTRI.

Case mode yang digunakan dalam proses desain termal yaitu *simulation* karena variabel terikat berupa temperatur keluaran amonia dari 127-C. Dengan pemilihan *case mode* ini data yang perlu dimasukkan pada *software* lebih sedikit. *Case mode* simulasi dapat digunakan untuk memprediksi kondisi *outlet* berdasarkan kondisi *inlet*. Untuk konfigurasi dan geometri HE mengikuti data desain karena penelitian ini berfokus kepada upaya untuk mengoptimasi kinerja 127-C yang telah ada saat ini atau optimasi minor. Variabel yang penting untuk diperhatikan yaitu *vapor fraction* dan temperatur keluaran amonia keluaran 127-C.

Tabel 5. Data Hasil Simulasi 127-CA

Material Tube	Jumlah Plug	Vapor Fraction	TOut Amonia (°C)	Duty (MW)	Actual U (W/m ² K)	Required U (W/m ² K)	Effective Area (m ²)
Carbon Steel (CS)	17	0	35,29	11,530	862,57	813,68	1312,6
	250	0	35,82	11,507	868,80	861,90	1212,7
	500	0	37,67	11,426	879,13	873,13	1105,5
	750	0	42,22	11,226	890,61	888,46	998,35
	1000	0,0702	46,48	10,395	896,21	888,65	891,19
304 Stainless Steel (18 Cr, 8 Ni)	17	0	35,92	11,502	794,29	795,14	1307,3
	250	0	37,69	11,425	802,64	798,12	1207,8
	500	0	42,04	11,235	812,46	808,40	1101,1
	750	0,0535	46,51	10,547	816,72	811,60	994,37
	1000	0,1550	46,49	9,6153	817,02	810,95	887,63
316 Stainless Steel (17 Cr, 12 Ni)	1000	0,1545	46,49	9,6198	817,02	811,04	888,03
	17	0	35,95	11,501	794,38	793,64	1307,9
	250	0	37,77	11,421	802,61	795,51	1208,4
	500	0	41,94	11,239	812,37	808,83	1101,6
	750	0,0531	46,51	10,551	816,61	811,82	994,81
1000	0,1545	46,49	9,6198	817,02	811,04	888,03	

Tabel 6. Data Hasil Simulasi 127-CB

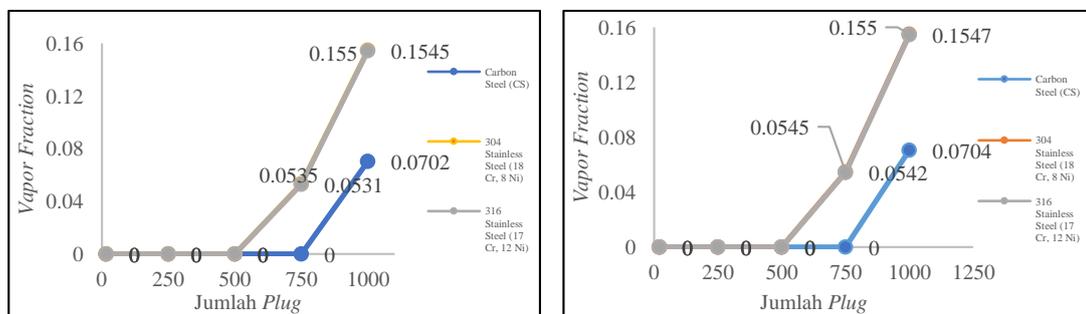
Material Tube	Jumlah Plug	Vapor Fraction	TOut Amonia (°C)	Duty (MW)	Actual U (W/m ² K)	Required U (W/m ² K)	Effective Area (m ²)
Carbon Steel (CS)	21	0	34,82	11,550	862,97	862,96	1310,8
	250	0	35,88	11,504	872,46	864,47	1212,7
	500	0	37,61	11,429	883,23	880,46	1105,5
	750	0	41,30	11,267	894,94	903,68	998,35
	1000	0,0704	46,48	10,393	901,26	893,18	891,19
304 Stainless Steel (18 Cr, 8 Ni)	21	0	35,83	11,506	796,43	804,21	1305,6
	250	0	37,90	11,416	805,48	797,52	1207,8
	500	0	42,10	11,232	815,08	813,27	1101,1
	750	0,0545	46,51	10,539	820,48	815,44	994,37
	1000	0,1550	46,49	9,6158	820,80	815,49	887,63
316 Stainless Steel (17 Cr, 12 Ni)	21	0	35,87	11,504	796,54	802,12	1306,2
	250	0	37,86	11,418	805,55	797,99	1208,4
	500	0	42,06	11,234	815,05	813,20	1101,6
	750	0,0542	46,51	10,541	820,32	815,56	994,81
	1000	0,1547	46,49	9,6181	820,81	815,38	888,03

Jika *vapor fraction* memiliki nilai sama dengan nol maka fraksi fluida berupa cairan (*liquid*). Nilai ini perlu dijaga karena jika *vapor fraction* lebih dari nol artinya sebagian atau seluruh amonia tidak dapat terkondensasi. Jika HE ini gagal mengkondensasi amonia dapat menyebabkan amonia terakumulasi terus menerus. Jika akumulasi ini sudah melebihi beban yang dapat ditanggung oleh *Purge Gas Recovery Unit* (PGRU), maka amonia ter-venting. Untuk mencegah amonia ter-venting PUSRI harus melakukan tindakan koreksi dengan menurunkan *rate* operasi yang merugikan bagi PUSRI. Hal ini dilakukan untuk mengurangi beban bagi HE 127-C tersebut. Ter-ventingnya amonia ini juga akan menimbulkan kerugian karena membuang produk amonia secara percuma. Dari segi lingkungan *venting* ini dapat menimbulkan bau amonia yang menyengat ke lingkungan.

3.2.1 Pengaruh Jumlah Plug dan Material Tube terhadap Vapor Fraction Amonia Keluaran 127-C

Hasil simulasi menggunakan *software* HTRI menunjukkan jumlah *plug* dan material *tube* memberikan pengaruh terhadap *vapor fraction* amonia keluaran HE. Hasil permodelan setiap variabel ditunjukkan pada Gambar 4 (a) untuk 127-CA dan Gambar 4 (b) untuk 127-CB. Dari Gambar 4 dapat dilihat seiring bertambahnya jumlah *plug* maka nilai *vapor fraction* keluaran amonia semakin meningkat. Dari Gambar 4 diketahui bahwa nilai *vapor fraction* amonia keluaran HE dengan material *tube* 304-SS dan 316-SS memiliki nilai yang mirip.

Pada simulasi terhadap 127-CA, untuk material *carbon steel*, *vapor fraction* lebih dari nol ketika jumlah *plug* sekitar 1000 buah yaitu sebesar 0,0702. Sedangkan untuk material 304-SS dan 316-SS memiliki *vapor fraction* lebih dari nol ketika jumlah *plug* sekitar 750 buah yakni sebesar 0,0535 dan 0,0531. HE terus mengalami peningkatan *vapor fraction* seiring meningkatnya jumlah *plug*. Hal ini dikarenakan meningkatnya *plug* dikaitkan dengan penurunan performa dari HE [5]. *Vapor fraction* ini menjadi parameter yang penting untuk mengetahui fase produk keluaran HE, karena jika *vapor fraction* lebih dari nol maka artinya HE gagal mengkondensasikan produk ammonia [6].



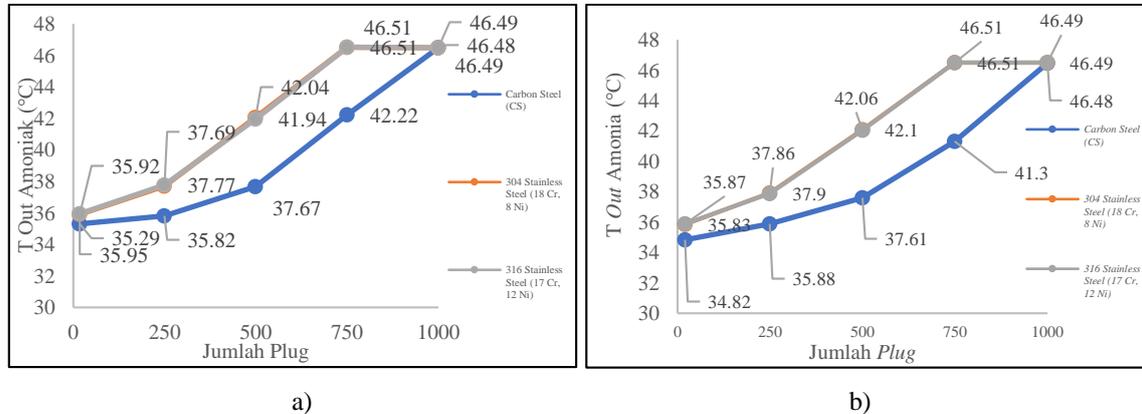
Gambar 4. Vapor Fraction Keluaran Amonia: a) 127-CA dan b) 127-CB

Ketika *tube* disumbat atau di-*plugging*, aliran air pendingin melewati jumlah *tube* yang lebih sedikit, hal ini akan menyebabkan laju aliran juga bertambah karena luas area yang semakin sempit dan akibatnya terjadi turbulensi. Turbulensi antar fluida mengakibatkan suhu air pendingin di dalam *tube* meningkat. Hal ini mengakibatkan menurunnya kemampuan dari air pendingin untuk mendinginkan amonia. Hasil simulasi 127-CA sejalan dengan 127-CB dimana semakin banyak jumlah *plug* akan meningkatkan *vapor fraction* amonia di

outlet. Pengaruh material 304-SS dan 316-SS tidak terlalu jauh berbeda pada nilai *vapor fraction* namun terlihat perbedaan jika dibandingkan dengan material CS. Hal ini dikarenakan nilai konduktivitas material CS lebih tinggi dibandingkan dengan SS. Namun, pada jumlah *plug* dibawah 500 buah, tidak terdapat perbedaan antara ketiga material karena *vapor fraction* amonia keluaran 127-C masih nol atau dalam fase cairan.

3.2.2 Pengaruh Jumlah *Plug* dan Material *Tube* terhadap Suhu Keluar Amonia

Temperatur amonia keluaran 127-C menjadi parameter yang sangat penting dalam menentukan keberhasilan kondensasi produk amonia. Selama simulasi HTRI terhadap proses pertukaran panas antara amonia dan air pendingin di alat 127-C, temperatur bervariasi mulai dari 35,29°C - 46,51°C karena adanya pengaruh jumlah *plug* dan material *tube*. Gambar 5 (a) dan Gambar 5 (b) menunjukkan hasil simulasi data temperatur keluaran amonia untuk 127-CA dan 127-CB.



Gambar 5. Temperatur Keluaran Amonia : a) 127-CA dan b) 127-CB

Serupa dengan hasil simulasi di 127-CA karena HE ini identik, peningkatan temperatur sejalan dengan penambahan jumlah *plug*. Kenaikan temperatur inilah yang menyebabkan kegagalan kondensasi amonia karena HE ini berperan untuk menurunkan temperatur amonia. Pada tekanan operasi 127-C, gas amonia tidak boleh melewati temperatur 45°C karena amonia akan berubah menjadi fase gas jika melewati temperatur tersebut. Temperatur menjadi parameter yang krusial untuk menentukan dan mengamati kinerja HE baik digunakan sebagai pemanas maupun pendingin karena menentukan parameter HE [7].

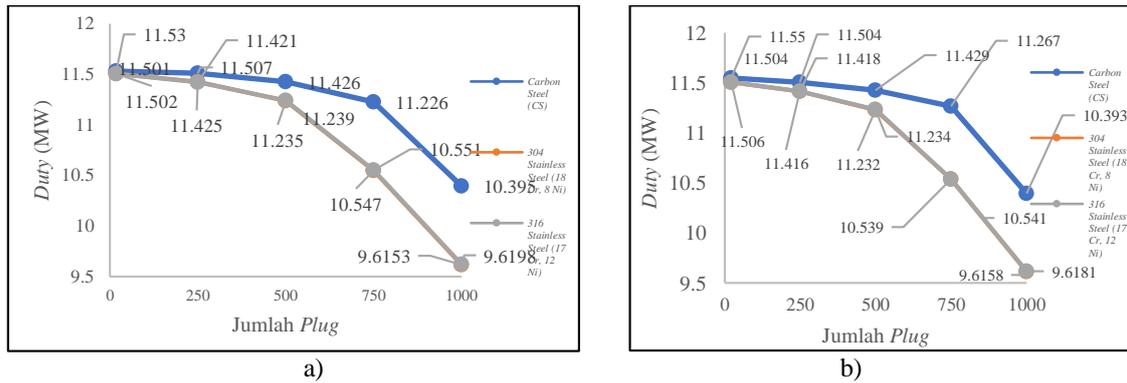
Jumlah *plug* mengakibatkan menurunnya performa HE akibat terjadinya turbulensi pada aliran fluida. Turbulensi terjadi karena penyempitan luas area perpindahan panas sementara *flow rate* tetap sama pada variabel jumlah *plug*. Hal ini menyebabkan molekul antar fluida saling bergesekan dan menimbulkan panas konduksi. Oleh karena itu, jumlah *plug* tidak boleh mencapai 1000 buah untuk material CS dan 750 buah untuk material 304-SS serta 316-SS. Dari PUSRI-IV berdiri pada tahun 1977, 127-CA telah di-*plug* sebanyak 17 buah dan 127-CB sebanyak 21 buah. *Plugging* ini disengaja untuk mencegah terjadinya pencampuran antara amonia dan air pendingin di HE akibat adanya *tube-tube* yang mengalami kebocoran. Kebocoran *tube* ini biasanya disebabkan karena adanya pengaruh sifat fluida yang korosif yaitu amonia sehingga timbul lubang-lubang kecil pada *tube*. *Plugging* ini hanya berupa perbaikan yang bersifat sementara, jika *plugging* tidak mampu dilakukan lagi maka diperlukan penggantian *tube* [5].

Material *tube* juga berpengaruh terhadap temperatur amonia keluaran 127-C. Dapat dilihat pada Gambar 5, bahwa material 304-SS dan 316-SS memiliki temperatur yang serupa. Namun, jika dibandingkan dengan material CS, perbedaan temperaturnya cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh nilai konduktivitas termal material CS yang lebih tinggi dari material SS [3]. Semakin tinggi konduktivitas termal dari suatu material maka panas yang dapat dipindahkannya per luas area juga akan semakin tinggi [8]. Konduktivitas termal yang tinggi membuat air pendingin lebih maksimal dalam menyerap panas sehingga temperatur keluaran amonia 127-C dengan material CS lebih rendah dibandingkan dengan material SS. Nilai konduktivitas termal ini penting karena perpindahan panas pada *shell and tube heat exchangers* melalui *tube-tube* yang merupakan material logam [9]. Namun, perbedaan atau rentang temperatur antara material CS dan SS tidak terlalu jauh berbeda dan masih dikatakan hampir mirip dari sisi temperatur amonia di *outlet*.

3.2.3. Pengaruh Jumlah *Plug* dan Material *Tube* terhadap *Duty*

Pengertian *duty* atau beban panas pada *heat exchanger* didefinisikan sebagai jumlah panas yang dibutuhkan untuk mentransfer dari *hot side* ke *cold side* selama satuan waktu tertentu [10]. Oleh karena itu, semakin tinggi *duty* dari suatu HE maka beban panas yang berpindah semakin besar karena menandakan bahwa perpindahan panas antara 2 fluida berlangsung dengan baik. Gambar 6 (a) dan 6 (b) masing-masing

menunjukkan grafik *duty* dari 127-C dengan variabel jumlah *plug* dan tiga jenis material *tube*. Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa seiring bertambahnya jumlah *plug*, *duty* dari 127-C terus mengalami penurunan yang signifikan. Material 304-SS dan 316-SS memiliki nilai *duty* serupa. Hal ini dikarenakan komposisi logam dari kedua jenis material ini tidak jauh berbeda.



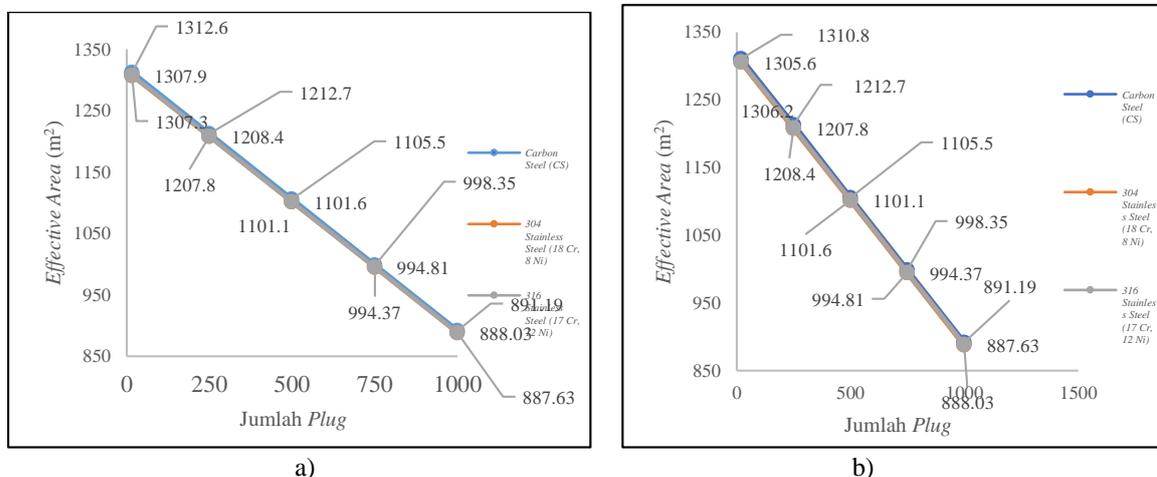
Gambar 6. *Duty* : a) 127-CA dan b) 127-CB

Jika dibandingkan dengan material CS maka terdapat sedikit perbedaan nilai pada rentang jumlah *plug* 0-500 buah. Pada jumlah *plug* bernilai 500 buah, *duty* dari 127-C dengan material CS, 304-SS, dan 316-SS masing-masing sebesar 11,426 MW, 11,235 MW, dan 11,239 MW. Perbedaan nilai *duty* yang signifikan terjadi ketika jumlah *plug* lebih dari 600 buah, misalnya pada jumlah *plug* sebanyak 750 buah. *Duty* dari 127-C dengan material CS, 304-SS, dan 316-SS masing-masing sebesar 11,226 MW, 10,547 MW, dan 10,551 MW. Hal ini disebabkan oleh perbedaan perhitungan beban panas atau *duty* dari sampel.

Karena saat jumlah *plug* sebanyak 750 buah dengan material SS, fase amonia di keluaran 127-C sebagian berupa uap. Perbandingan jenis material pada tahap ini sulit ditentukan analisisnya, karena perhitungan yang tak sama akibat adanya amonia dalam fase uap. Jika dilakukan analisa saat jumlah *plug* dibawah 500 buah, dimana fase keluaran produk amonia pada ketiga jenis material tersebut masih cair tidak terdapat perbedaan yang signifikan dari segi nilai *duty*. Perbedaan yang tidak terlalu signifikan menandakan performa ketiga material dalam menghantarkan panas hampir sama baiknya. Analisa ini juga serupa dengan hasil simulasi pada 127-CB dimana terjadi penurunan seiring meningkatnya jumlah *tube* yang disumbat dengan *plug*.

3.2.4. Pengaruh Jumlah *Plug* dan Material *Tube* terhadap *Effective Area*

Effective area merupakan luas permukaan tempat terjadinya perpindahan panas pada HE [11]. Jika dilihat pada Gambar 7 (a) dan Gambar 7 (b), jenis material dari *tube* tidak mempengaruhi *effective area* dari *heat exchangers* secara signifikan. Pengaruh dari jumlah *plug* sangat signifikan terhadap *effective area* dari *heat exchanger*. Jika *tube* ditutup otomatis maka akan mengurangi luas permukaan perpindahan panas karena *tube* tidak dapat dialiri lagi oleh fluida [5]. Oleh karena itu, luas permukaan atau area tempat terjadinya pertukaran panas fluida semakin berkurang jika jumlah *plug* pada *heat exchangers* terus meningkat.



Gambar 7. *Effective Area* : a) 127-CA dan b) 127-CB

3.2.5. Pengaruh Jumlah *Plug* dan Material *Tube* Terhadap Nilai *Required* dan *Actual* U

Salah satu parameter yang penting untuk menentukan kinerja dari suatu HE yaitu nilai U (*overall heat transfer coefficient*). Nilai U mengacu pada seberapa banyak panas yang dapat berpindah melalui media perpindahan panas [12]. Semakin besar nilai U, maka semakin besar laju perpindahan panas. Nilai U yang lebih tinggi dapat mempersingkat waktu perpindahan panas. Gambar 8 masing-masing menunjukkan nilai U *actual* dan *required* dari 127-C dengan variabel jumlah *plug* dan tiga jenis material *tube*.

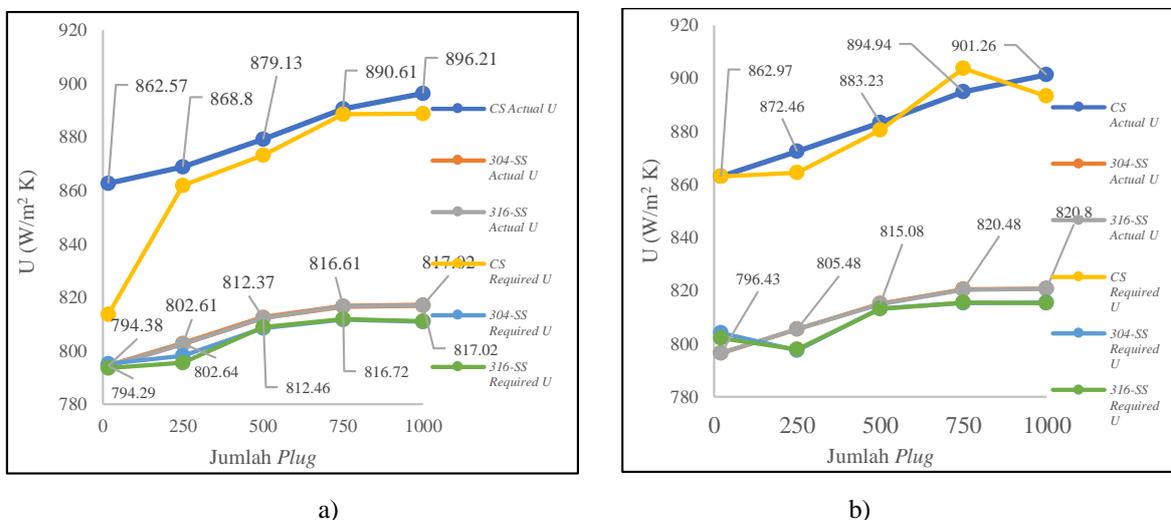
Definisi *actual* U merupakan kemampuan transfer panas yang dilakukan oleh HE atau nilai U dari alat, sedangkan *required* U merupakan nilai U yang dibutuhkan dalam proses transfer panas. Dari hasil simulasi HE yang dapat dilihat pada Gambar 8, nilai *actual* U lebih besar dari nilai *required* U artinya U dari alat mampu untuk menunjang proses perpindahan panas di dalam HE. Selisih antara nilai *actual* U dan *required* U menjadi *overdesign* dari HE [11]. Jika angka *overdesign* bernilai positif maka HE mampu menunjang proses perpindahan panas. Sebaliknya jika angka *overdesign* bernilai negatif maka U dari HE masih belum mampu untuk menunjang transfer panas dari proses. Langkah yang dapat dilakukan untuk mengatasi hal tersebut yaitu dengan menurunkan beban HE melalui pengurangan laju alir fluida di *inlet*. Nilai U secara matematis dinyatakan oleh persamaan (1) [13].

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \quad \dots(1)$$

Nilai U dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya nilai Q atau *duty*, luas area perpindahan panas (A), serta selisih temperatur fluida *inlet* dan *outlet* (ΔT). Jika dilihat pada Gambar 8, nilai U cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah *plug*. Hal ini berbanding terbalik dengan faktor yang mempengaruhinya yaitu nilai Q, A, dan ΔT yang terus menurun seiring penambahan jumlah *plug*. Nilai A yang terus menurun tajam setiap penambahan jumlah *plug*. Nilai ΔT juga semakin rapat rentang atau selisihnya. Kedua faktor ini merupakan penyebut di dalam persamaan di atas. Karena nilai penyebut mengalami penurunan maka menyebabkan peningkatan nilai pembilang yaitu U. *Duty* yang menurun tidak setajam penurunan nilai *effective area* dan rentang dari ΔT . Hal ini menjelaskan alasan peningkatan nilai U dari hasil simulasi proses.

Plugging pada *tube* mereduksi luas sisi *tube* dan area perpindahan panas. Dengan laju aliran massa yang sama, hal ini mengakibatkan peningkatan kecepatan alir di masing-masing *tube*. Peningkatan dari kecepatan aliran fluida ini akan menaikkan *pressure drop* dan nilai U [14]. Hal ini mengakibatkan air pendingin yang berada di sisi *tube* akan semakin meningkat temperaturnya. Oleh karena itu, kemampuan air pendingin untuk mengkonsentrasikan produk amonia semakin menurun. Peningkatan nilai U dalam penelitian ini memiliki arti seiring bertambahnya jumlah *plug* maka diperlukan kalor yang lebih besar per luas areanya. Meskipun nilai U meningkat sejalan dengan pertambahan jumlah *plug*, hal tersebut justru yang meningkatkan suhu amonia keluaran 127-C dan *vapor fraction* dari amonia karena penurunan performa dari air pendingin.

Sedikit berbeda dengan Gambar 8 (a), pada Gambar 8 (b) terdapat beberapa sampel dimana nilai *actual* U-nya lebih besar dibandingkan dengan *required* U. Hal ini menandakan U yang dibutuhkan dari proses lebih tinggi dibanding nilai U dari alat sehingga laju alir perlu diturunkan agar Unya lebih kecil dari U alat. Jenis material mempengaruhi nilai U dari *duty* dan rentang selisih temperatur. Sehingga, disimpulkan bahwa jenis material amat mempengaruhi perpindahan panas.



Gambar 8. Nilai *Actual* dan *Required* U: a) 127-CA dan b) 127-CB

3.2.6 Analisa *Cost Benefit* terhadap Jumlah *Plug* dan Pemilihan Material *Tube*

Simulasi proses yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk memberikan rekomendasi dalam upaya pengoptimalan kinerja HE 127-C saat dilaksanakannya *turn around* (TA) PUSRI-IV. Pada sub-bab sebelumnya telah dibahas mengenai hasil teknis proses evaluasi dengan variabel jumlah *plug* dan material *tube*. Dalam dunia industri selain aspek teknis mengenai kehandalan alat, peninjauan terhadap aspek *cost-benefit* dari segi ekonomi juga penting untuk dilakukan. Misalnya seperti upaya *plugging* yang dilakukan pada *tube* yang bocor. Solusi ini dipilih karena lebih ekonomis ketimbang penggantian *tube* baru walaupun secara teknis menurunkan performa HE. Oleh karena itu, analisa *cost-benefit* mengambil presentase yang sama krusial dengan hasil analisa teknis ketika *engineer* harus memilih solusi mana untuk dieksekusi.

Dari hasil analisa teknis, jumlah *plug* maksimal yang diperbolehkan untuk material CS yaitu 1000 buah *plug*. Untuk material 304-SS dan 316-SS maksimal 750 buah. Maka disarankan kepada departemen inspeksi teknik agar jumlah *plug* tidak melebihi angka tersebut karena dapat mengakibatkan kegagalan kondensasi di 127-C. Peran 127-C yang sangat kritis di PUSRI maka jika terjadi kebocoran *tube* di HE ini akan mengganggu jalannya produksi di unit amonia. Kebocoran beberapa *tube* pada 127-C akan menyebabkan terjadinya pencampuran antara amonia dan air pendingin atau keracunan air pendingin.

Keracunan ini meningkatkan kandungan amonia di dalam air pendingin. Hal ini juga menyebabkan peningkatan jumlah bakteri pada air pendingin tersebut karena amonia merupakan makanan bagi bakteri. Banyaknya bakteri di dalam air ini mengakibatkan timbulnya *slime*. Akumulasi *slime* ini lama kelamaan dapat menjadi *fouling* bagi pipa. Penumpukan *slime* ini juga dapat menjadi *plug* alami bagi *tube* sehingga dapat menurunkan kemampuan kondensasi dari 127-C. *Fouling* yang terus menerus terakumulasi tadi juga dapat mengeras dan jika dibiarkan dalam jangka waktu panjang dapat mengakibatkan kebocoran pada *tube* yang lain.

Dalam pemilihan material *tube* untuk *re-tubing* 127-C ini juga perlu diamati aspek *cost-benefit* selain dari teknis. Dari analisa aspek teknis, diketahui bahwa kemampuan CS untuk menghantarkan panas lebih tinggi dari material 304-SS dan 316-SS yang ditinjau dari segi *vapor fraction*, temperatur amonia keluaran 127-C, *duty* dan nilai U. Hal ini dikarenakan nilai konduktivitas termal dari material CS lebih tinggi dibandingkan material 304-SS dan 316-SS [3]. Perbedaan signifikan terlihat pada saat jumlah *plug* lebih dari 500 buah. Ketika jumlah *plug* kurang dari 500 buah, perbedaan parameter yang diamati tidak terlampaui signifikan sehingga secara teknis dapat dikatakan ketiga material hampir sama baik dalam menukarkan panas di 127-C.

Namun, secara *cost-benefit* diperlukan material yang lebih ekonomis, handal, dan tahan terhadap fluida yang memiliki sifat korosif seperti amonia. Material 316-SS memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi dibandingkan material 304-SS [15]. Jenis material 316-SS memiliki sifat fisik dan mekanik yang hampir sama dengan material 304-SS karena mengandung bahan paduan yang serupa. Perbedaan utamanya terletak pada kandungan paduan logam molibdenum (Mo). Material 316-SS yang tersedia secara komersial umumnya mengandung sekitar 2-3% Mo, hal ini meningkatkan ketahanannya terhadap korosi, terutama terhadap klorida dan pelarut industri lainnya [16].

Jika ditinjau dari segi harga, material 304-SS memiliki harga yang lebih terjangkau dibandingkan material 316-SS. Pelat yang terbuat dari material 316-SS memiliki harga sekitar 1,5 kali lebih tinggi dari material 304-SS [17]. Hal ini tentu saja diakibatkan perbedaan komposisi elemen dan jumlah paduan yaitu nikel (Ni), kromium (Cr) dan Mo. Harga Mo sekitar dua kali lipat dari Ni, enam kali lipat dari Cr. Pada material 316-SS, kandungan nikel lebih tinggi dari 304-SS serta material 304-SS tidak mengandung logam Mo seperti material 316-SS karena itu biaya material 316-SS lebih tinggi dibandingkan dengan material 304-SS. Maka secara *cost-benefit*, *engineer* lebih memilih material 304-SS [18].

Jika membandingkan material CS dan 304-SS dari performa pertukaran panas memang lebih baik menggunakan material CS pada jumlah *plug* di atas 750 buah. Performa antara kedua material ini tidak jauh berbeda ketika jumlah *plug* masih di bawah 500 buah. Sehingga dari aspek teknis terhadap performa peralatan antara kedua material ini tidak jauh berbeda. Namun, jika ditinjau dari ketahanan terhadap korosi, material *stainless steel* lebih mampu menahan korosi ketimbang CS karena fluida yang mengalir di 127-C adalah amonia. Amonia memiliki sifat korosif, maka pertimbangan ini juga penting. Jika *tube* mudah terkorosi oleh amonia maka *tube* akan rentan bolong dan mengalami kebocoran. Kebocoran ini akan mengakibatkan kerugian karena terganggunya operasi pabrik.

Kandungan Cr yang ditambahkan dalam material 304-SS membuatnya lebih tahan korosi daripada CS. Cr akan lebih mudah menempel pada oksigen daripada besi (Fe). Ketika Cr menempel pada oksigen, akan tercipta lapisan kromium oksida yang melindungi sisa bahan dari degradasi dan korosi. CS biasanya tidak memiliki kandungan Cr yang cukup untuk membentuk lapisan kromium oksida ini. Hal ini memungkinkan oksigen untuk berikatan dengan besi yang menghasilkan oksida besi atau karat. Maka material 304-SS menjadi pilihan yang tepat jika ditinjau dari aspek teknis seperti performa dan ketahanan serta *cost-benefit*.

4. PENUTUP

Dari hasil studi kasus yang telah dilakukan dengan *software* HTRI, semakin banyak jumlah *plug* maka akan menurunkan *effective area* dan *duty* HE. Semakin banyak jumlah *plug* maka akan meningkatkan

temperatur dan *vapor fraction* dari amonia keluaran HE. Peningkatan jumlah *plug* juga berbanding lurus dengan penambahan nilai *actual U* dan *required U* karena makin mengecilnya permukaan perpindahan panas serta berkurangnya ΔT karena suhu *outlet* semakin naik juga. Jumlah *plug* maksimal untuk material CS yaitu sebanyak 1000 buah, 304-SS yaitu 750 buah dan 316-SS yaitu 750 buah. Material CS memiliki kemampuan memindahkan panas lebih baik dari material 304-SS dan 316-SS. Namun, tidak perbedaan terlalu signifikan dari parameter keluaran HE yang diamati. Jika dilakukan *re-tubing* 127C akan dilakukan lebih baik jika menggunakan material 304-SS dari analisa *cost-benefit*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kepada Departemen Perencanaan dan Pengendalian Produksi (Rendal Produksi), Divisi Operasi Unit Amonia PUSRI-IV dan Departemen Rancang Bangun Pabrik (RBP) PT Pupuk Sriwijaya (PUSRI) Palembang atas kesempatan, dukungan dan bimbingan untuk melaksanakan kerja praktek.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. E. M. A. (TEMA), *T.E.M.A., tandards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association Edisi 10*. United States: Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), 2019.
- [2] A. A. Shrikant, R. Sivakumar, and M. Vivekananda, "Comparison of Shell and Tube Heat Exchanger using Theoretical Methods, HTRI, ASPEN and SOLIDWORKS simulation softwares. Int," *J. Eng. Res. Appl.*, vol. 6, no. 3, pp. 99–107, 2016.
- [3] R. Ratnawati and A. Salim, "Desain Ulang Alat Penukar Kalor Tipe Shell and Tube Dengan Material Tube Carbon Stell Dan Stainless Stell 304," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 74–80, 2018, doi: 10.24127/trb.v7i1.712.
- [4] Masrufaiyah and T. Joko Sulistiono, "Analisa Pengaruh Jumlah Plugpada Kondenserterhadap Effisiensi Dan Heat Transfer Yang Hilangdi Pltu Unit 3 Dan 4 Pt. Pjb Up. Gresik," *J. Keilmuan dan Terap. Tek.*, vol. 07, no. Nomor 1, pp. 1–15, 2018.
- [5] G. H. Farrahi, M. Chamani, A. Kiyoumarsioskouei, and A. H. Mahmoudi, "The effect of plugging of tubes on failure of shell and tube heat exchanger," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 104, no. January, pp. 545–559, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.034.
- [6] R. Pořkas *et al.*, "An experimental investigation of water vapor condensation from biofuel flue gas in a model of condenser, (2) local heat transfer in a calorimetric tube with water injection," *Processes*, vol. 9, no. 8, 2021, doi: 10.3390/pr9081310.
- [7] T. Yasunaga, T. Noguchi, T. Morisaki, and Y. Ikegami, "Basic heat exchanger performance evaluation method on OTEC," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 2, 2018, doi: 10.3390/jmse6020032.
- [8] R. K. P. and B. Prasad, "Effect of Thermal Conductivity on Heat Transfer From a Flat Plate With Combined Impingement and Film Cooling," 2012.
- [9] S. Yousufuddin, "Heat Transfer Enhancement of a Shell and Tube Heat Exchanger with Different Baffle Spacing Arrangements," *Sch. J. Appl. Sci. Res.*, vol. 1, no. 6, pp. 50–56, 2018.
- [10] S. Adumene, T. C. Nwaoha, G. P. Ombor, and J. T. Abam, "Design and Off-Design Performance Evaluation of Heat Exchanger in an Offshore Process Configuration," *OALib*, vol. 03, no. 06, pp. 1–9, 2016, doi: 10.4236/oalib.1102748.
- [11] (HTRI), Inc., and H. T. R. I. H. T. Research, *Design Manual*. 2006.
- [12] F. R. P. Arrieta, J. de S. Santos, and W. H. Saldanha, "Calculation of the Heat Transfer Surface Area of Heat Exchangers for Waste Heat Recovery with the Kaline Cycle," *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 5, no. 11, pp. 13–16, 2018, doi: 10.22161/ijaers.5.11.4.
- [13] D. Q. Kern, *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill International Book Company Inc, 1950.
- [14] Prayudi, R. A. Diantari, and S. D. Susilo, "Analisa Pengaruh Plugging Evaporator Terhadap Performance Desalination Plant Unit 2 PLTGU Gresik," *J. Power Plant*, pp. 38–41, 2019.
- [15] R. T. Loto, "Study of the corrosion resistance of type 304L and 316 austenitic stainless steels in acid chloride solution," *Orient. J. Chem.*, vol. 33, no. 3, pp. 1090–1096, 2017, doi: 10.13005/ojc/330304.
- [16] J. R. Davis, *ASM Specialty Handbook Stainless Steels*. Texas: Heat Transfer Rearch Inc. (HTRI), 1995.
- [17] B. C. I. T. J. S. C. Black Cat Insulation Technical Joint Stock Company (BlackCatJSC), "The Difference Between 304 And 316 Stainless Steel," 2020, 2020. <https://blackcatjsc.com.vn/-en/ss304-vs-ss316/#:~:text=304 vs 316- stainless steel cost%3A Tak-ing steel plates as,Ni%2C Cr and Mo>
- [18] P. A. Schweitzer, *Fundamentals of metallic corrosion: Atmospheric and media corrosion of metals*. 2007.