

BAB II.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Heat Exchanger*

HE secara umum adalah salah satu komponen yang dipasang pada sistem industri atau khususnya pada sistem tenaga uap untuk menukar atau memindahkan panas dari suatu fluida ke fluida yang lain dengan tujuan mendapatkan peningkatan nilai ekonomis. HE tidak saja berfungsi pada aplikasi sistem pemanasan tetapi juga untuk sistem pendinginan seperti pada refrigerator dan AC. Pada pembangkit listrik sistem HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) fungsi HE diaplikasikan disini dengan tujuan berbeda yaitu melakukan proses perpindahan panas dari gas bekas turbin gas yang secara sengaja ditahan dalam temperatur tinggi (kurang lebih 425°C) untuk memanaskan air menjadi uap.

Fluida dalam HE dimana panasnya dipindahkan bisa berupa gas-gas; gas-air; air-air dan air-gas. Pada sistem PLTU gas buang dengan temperatur cukup tinggi sebelum dilepas ke udara bebas dipindahkan dulu panasnya untuk memanaskan udara pembakaran batubara, ini adalah perpindahan panas dari fluida gas ke fluida gas pula (gas-gas). Uap bekas setelah meninggalkan turbin uap dengan temperatur masih tinggi digunakan untuk memanaskan air pengisi ketel (uap-air). Air pendingin rumah turbin dengan temperatur kurang lebih 90°C didinginkan dengan air dingin (air-air). Antara media yang dipanaskan dan yang memanaskan pada umumnya dibatasi media solid untuk menjaga agar keduanya tidak bercampur.

HE pada umumnya memiliki model aliran searah dan berlawanan antara fluida panas dengan fluida dingin. Luasan kontak perpindahan panas serta waktu kontak dan koefisien perpindahan panas bahan merupakan parameter efisiensi dari HE. Parameter ini menjadi dasar bagi para desainer HE dalam mengembangkan berbagai tipe HE yang sekarang ini banyak digunakan dalam industri. Jenis fluida di dalam HE juga menjadi pertimbangan dalam mengembangkan desain.

2.2. Klasifikasi *Heat Exchanger* menurut arah aliran

Menurut arah aliran fluida HE dibedakan menjadi tiga pembagian pokok, yaitu :

- *Linear Flow* (aliran searah)

HE dengan tipe aliran searah sering disebut dengan istilah Pararel Flow Heat Exchanger (PF-HE) atau Linear Flow Heat Exchanger (LF-HE). Pada HE tipe ini fluida panas dan fluida dingin datang atau masuk menuju HE lewat pada sisi yang sama dan keluar pada sisi yang sama pula.

- *Counter Flow* (aliran berlawanan)

HE tipe ini memiliki aliran berlawanan dimana fluida panas datang menuju HE lewat pada salah satu sisi sedang fluida dingin lewat pada sisi lainnya.

- *Cross Flow* (CF)

Pada tipe Cross Flow aliran fluida melintang tegak lurus terhadap aliran fluida yang lainnya.

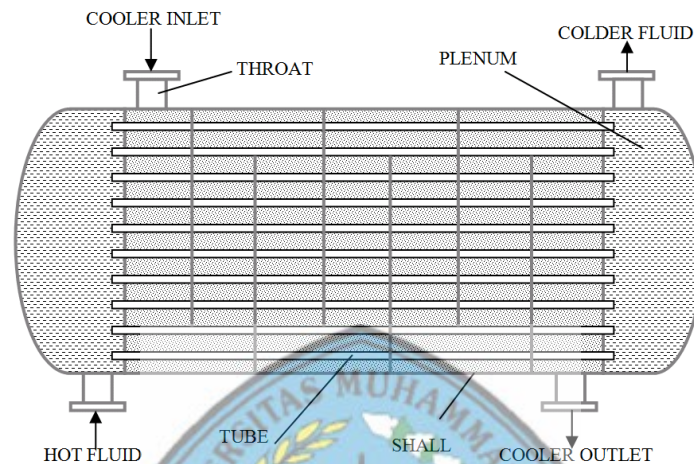
Untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik HE didesain dengan memperbesar luasan dinding dimana terjadi kontak perpindahan panas akan tetapi perlu dipertimbangkan agar aliran fluida memiliki hambatan yang tidak begitu besar. Pengaturan temperatur permukaan pada HE memiliki banyak variasi akan tetapi temperatur rata-rata dapat dihitung sebagai contoh menggunakan prinsip log mean temperature difference (LMTD) atau bisa pula menggunakan normal temperature unit (NTU).

2.3. Tipe *Heat Exchanger* (HE)

2.3.1. *Heat Exchanger Shell and Tube*

Pada umumnya industri memilih HE berdasarkan efisiensi perpindahan panas, dimensi dan kapasitas, jenis fluida dan tentu saja aspek harga juga menjadi pertimbangan. HE tipe *Shell and Tube* terdiri dari multi pipa yang dilewatkan pada aliran fluida. Satu set pipa berisi fluida yang akan dipanaskan atau didinginkan sedangkan fluida yang lain berfungsi sebaliknya mengalir melalui sisi pipa tersebut. Set pipa yang disebutkan lazim

disebut pipa bundle dimana dibuat dengan bahan berkonduktifitas panas yang tinggi sehingga HE *Shell and Tube* mampu beroperasi pada tekanan dan temperatur yang tinggi. Kedua ujung pipa bundle dihubungkan menjadi satu oleh plenum atau terkadang dinamakan kotak air (*water boxes*). Bila pipa bundle dibengkokkan membentuk konfigurasi huruf U maka HE semacam ini lebih lanjut disebut HE *U-Shell and Tube*.



Gambar 2 1. Heat Exchanger Shell and Tube

Pipa bundle pada umumnya dibuat berdiameter kecil untuk mendapatkan koefisiensi perpindahan panas yang lebih baik akan tetapi hal ini bermasalah terhadap potensi pembentukan kerak serta cepat menjadi tersumbat dan susah dalam proses penghilangan kerak seperti ditunjukkan pada Gambar 2 1. Untuk menjawab permasalahan ini akhirnya diameter pipa bundle diperbesar walaupun koefisien perpindahan panas sedikit berkurang. Permasalahan mendasar yang harus diperhitungkan dalam membuat desain HE *Shell and Tube* adalah:

- Ketebalan Pipa

Ketebalan pipa harus direncanakan dengan baik untuk mengantisipasi berbagai permasalahan sebagai berikut : memberi ruangan yang cukup untuk menjaga kemungkinan pertumbuhan kerak; mampu mengatasi gaya axial; mampu menahan getaran akibat aliran fluida.

- Panjang Pipa

Pada umumnya HE dengan ukuran lebih panjang dan diameter shell lebih kecil memiliki harga yang lebih murah. Biasanya tipe seperti ini memiliki kapasitas lebih

kecil. Untuk meningkatkan kapasitas maka panjang pipa cenderung lebih kecil akan tetapi diameter shell diperbesar.

- Jarak Pusat Pipa

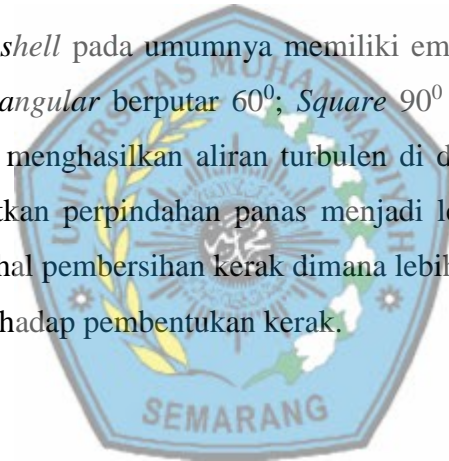
Jarak antara pusat pipa satu dengan lainnya pada umumnya tidak lebih dari 1,25 dari diameter luar pipa. Perpaduan jarak antara pusat pipa berpengaruh terhadap diameter shell dimana dapat berakibat memperbesar biaya pembuatan HE.

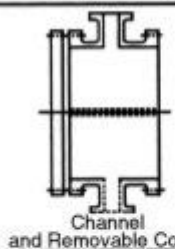
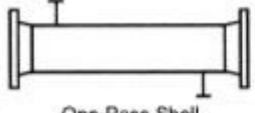
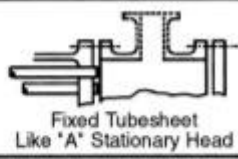
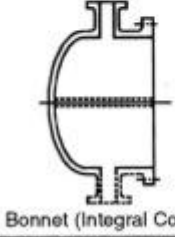
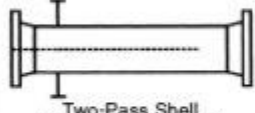
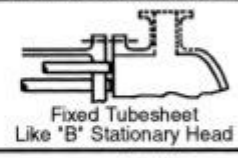
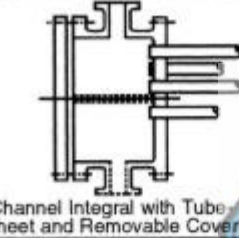
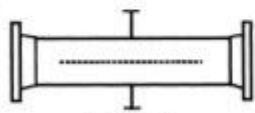
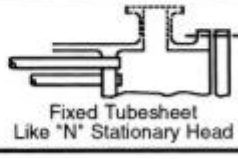
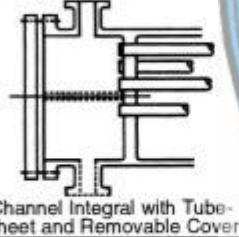
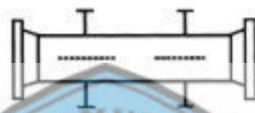
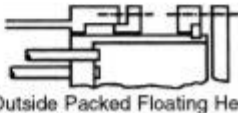
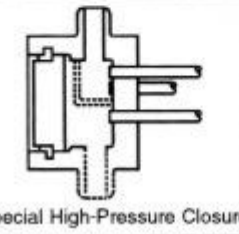

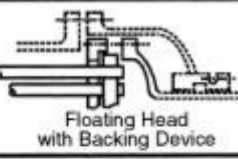

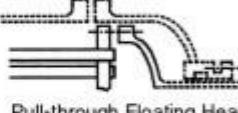
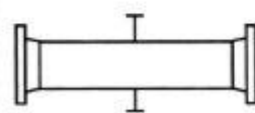
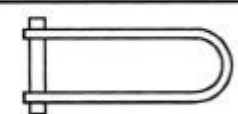
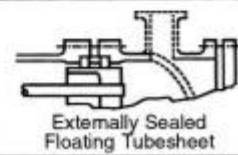
- Gelombang permukaan dalam pipa

Permukaan dalam pipa dengan bentuk bergelombang berakibat meningkatkan turbulensi aliran sehingga koefisien perpindahan panas menjadi lebih besar. Akan tetapi dalam hal ini harus pula dipertimbangkan bahwa permukaan dalam pipa yang berkerut akan menjadikan kerak semakin mudah menempel.

- Susunan pipa

Susunan pipa pada *shell* pada umumnya memiliki empat susunan pokok, yaitu : *Triangular* 30^0 ; *Triangular* berputar 60^0 ; *Square* 90^0 dan *Square* berputar 45^0 . Susunan *triangular* menghasilkan aliran turbulen di dalam pipa yang lebih baik sehingga meningkatkan perpindahan panas menjadi lebih baik. Susunan *square* lebih mudah dalam hal pembersihan kerak dimana lebih sesuai bila air pengumpan berpotensi tinggi terhadap pembentukan kerak.



	Front-End Stationary Head Types		Shell Types		Rear-End Head Types
A	 Channel and Removable Cover	E	 One-Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like 'A' Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like 'B' Stationary Head
C	 Channel Integral with Tube Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow	N	 Fixed Tubesheet Like 'N' Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High-Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle-Type Reboiler	T	 Pull-through Floating Head
		X	 Crossflow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

Gambar 2 2. Tipe-Tipe Desain Front-End Head, Shell, dan Rear-End Head

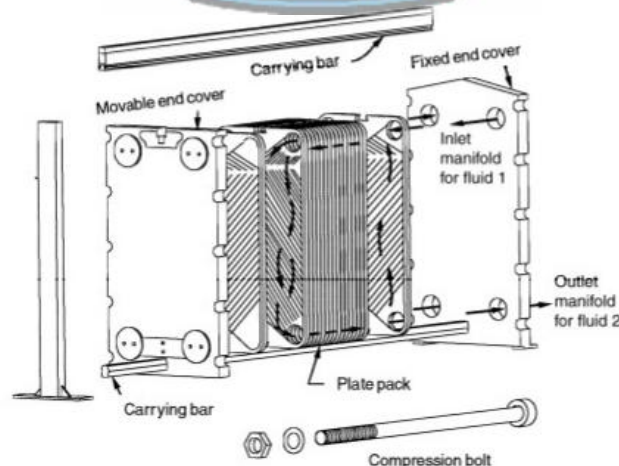
Tipe-tipe desain dari shell ditunjukkan pada gambar di atas. Tipe E adalah yang paling banyak digunakan karena desainnya yang sederhana serta harga yang relatif murah. Shell tipe F memiliki nilai efisiensi perpindahan panas yang lebih tinggi dari tipe E, karena shell tipe didesain untuk memiliki dua aliran (aliran U). Aliran sisi shell yang dipecah seperti pada tipe G, H, dan J, digunakan pada kondisi-kondisi khusus seperti pada kondenser dan

boiler thermosiphon. Shell tipe K digunakan pada pemanas kolam air. Sedangkan shell tipe X biasa digunakan untuk proses penurunan tekanan uap.

2.3.2. Plate heat exchangers

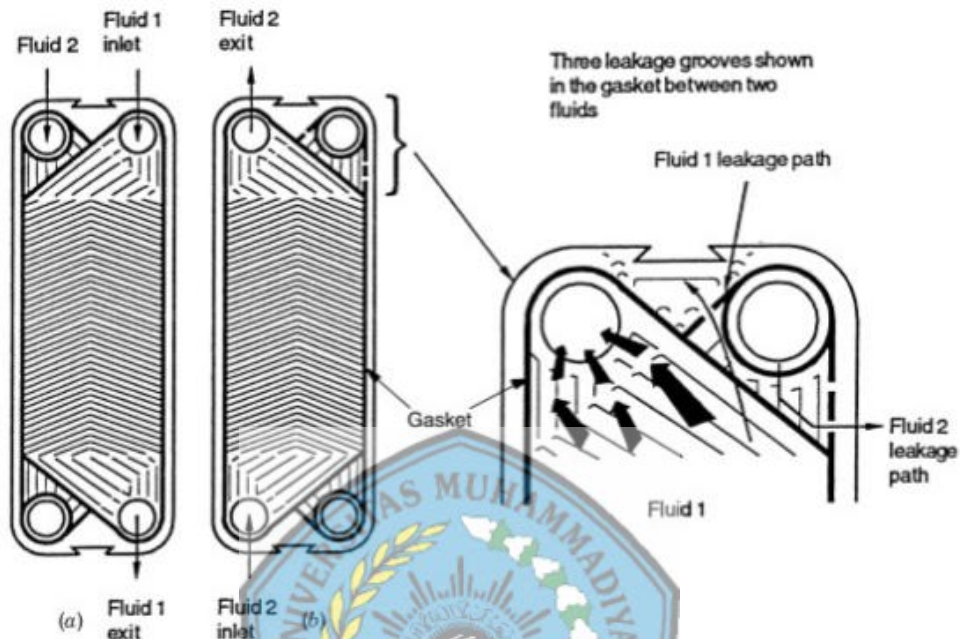
Plate Heat Exchanger adalah suatu media pertukaran panas yang terdiri dari Pelat (*plate*) dan Rangka (*frame*). Dalam *Plate Heat Exchanger*, pelat disusun dengan susunan tertentu, sehingga terbentuk dua jalur yang disebut dengan *Hot Side* dan *Cold Side*. *Hot Side* dialiri dengan cairan dengan suhu relatif lebih panas dan *Cold Side* dialiri dengan cairan dengan suhu relative lebih dingin. Zat cair yang digunakan sebagai medium bisa dari jenis yang sama atau lain, misalnya air-air, air-minyak, dll. *Heat exchanger* tipe ini menggunakan plat tipis sebagai komponen utamanya. Plat yang digunakan dapat berbentuk polos ataupun bergelombang sesuai dengan desain yang dikembangkan. *Heat exchanger* jenis ini tidak cocok untuk digunakan pada tekanan fluida kerja yang tinggi, dan juga pada diferensial temperatur fluida yang tinggi pula. Berikut adalah beberapa jenis *heat exchanger* tipe plat:

1. *Heat exchanger* tipe plat dengan gasket. *Heat exchanger* tipe ini termasuk tipe yang banyak dipergunakan pada dunia industri, bisa digunakan sebagai pendingin air, pendingin oli, dan sebagainya. Prinsip kerjanya adalah aliran dua atau lebih fluida kerja diatur oleh adanya gasket-gasket yang didesain sedemikian rupa sehingga masing-masing fluida dapat mengalir di plat-plat yang berbeda.



Gambar 2 3. *Heat Exchanger* Plat Tipe Gasket

Gasket berfungsi utama sebagai pembagi aliran fluida agar dapat mengalir ke plat-plat secara selang-seling. Gambar di bawah ini menunjukkan desain gasket sehingga di satu sisi plat fluida 1 masuk ke area plat yang (a), sedangkan gasket yang lain mengarahkan fluida 2 agar masuk ke sisi plat (b).

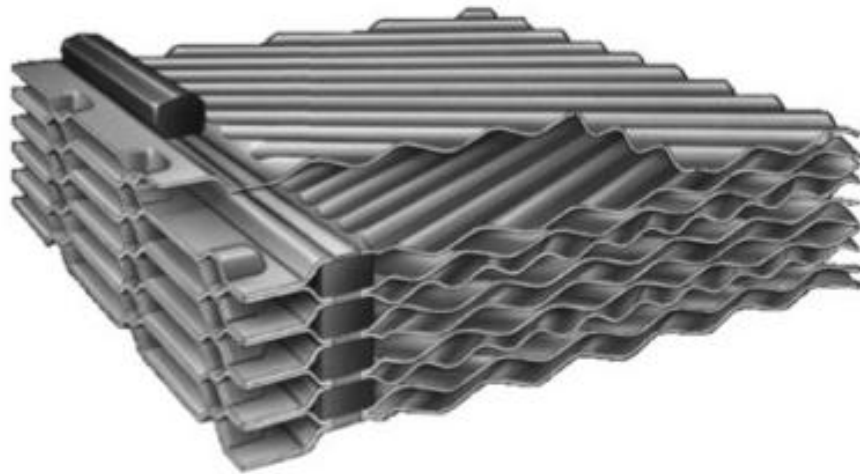


Gambar 2 4. Desain Gasket Untuk Pendistribusian Fluida Kerja

Heat exchanger tipe ini termasuk tipe yang cukup murah dengan koefisien perpindahan panas yang baik. Selain itu tipe ini juga mudah dalam hal perawatannya, karena proses bongkar-pasang yang lebih mudah jika dibandingkan tipe lain seperti shell & tube. Namun di sisi lain, tipe ini tidak cocok jika digunakan pada aliran fluida dengan debit tinggi. Dan seperti yang telah saya singgung di atas bahwa *heat exchanger* tipe ini tidak cocok digunakan pada tekanan dan temperatur kerja fluida yang tinggi, hal ini berkaitan dengan kekuatan dari material gasket yang digunakan.

2. *Welded Plate Heat Exchanger* (WPHE). Satu kelemahan yang paling mendasar dari *heat exchanger plat* dengan gasket, adalah adanya penggunaan gasket tersebut. Hal tersebut membatasi kemampuan *heat exchanger* sehingga hanya fluida-fluida jenis tertentu yang dapat menggunakan *heat exchanger* tipe ini. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakanlah *heat exchanger tipe plat* yang menggunakan sistem pengelasan sebagai pengganti sistem gasket. Sehingga *heat exchanger* tipe ini lebih aman jika digunakan pada fluida kerja dengan temperatur maupun tekanan kerja

tinggi. Hanya saja tentu *heat exchanger* tipe ini menjadi kehilangan kemampuan fleksibilitasnya dalam hal bongkar-pasang dan perawatan.



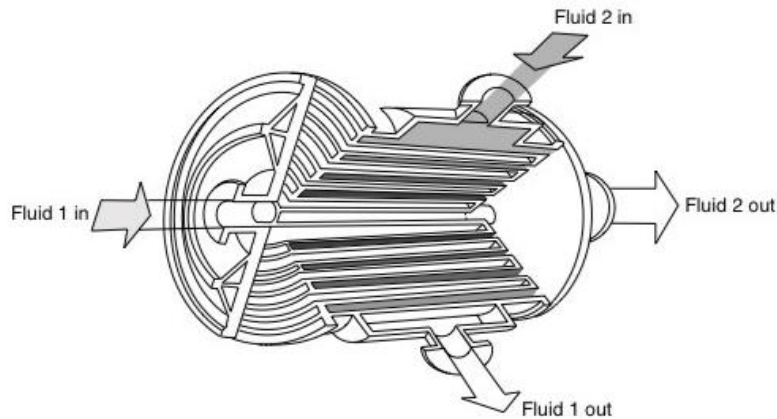
Gambar 2 5. Elemen Plat Pada WPHE



Gambar 2 6. Salah Satu Desain *Welded Plate Heat Exchanger*

3. *Spiral Plate Heat Exchanger*. *Heat exchanger* tipe ini menggunakan desain spiral pada susunan platnya, dengan menggunakan sistem sealing las. Aliran dua fluida di dalam *heat exchanger* tipe ini dapat berbentuk tiga macam yakni (1) dua aliran fluida spiral mengalir berlawanan arah (*counter flow*), (2) satu fluida mengalir spiral dan yang lainnya bersilangan dengan fluida pertama (*cross flow*), (3) satu fluida mengalir

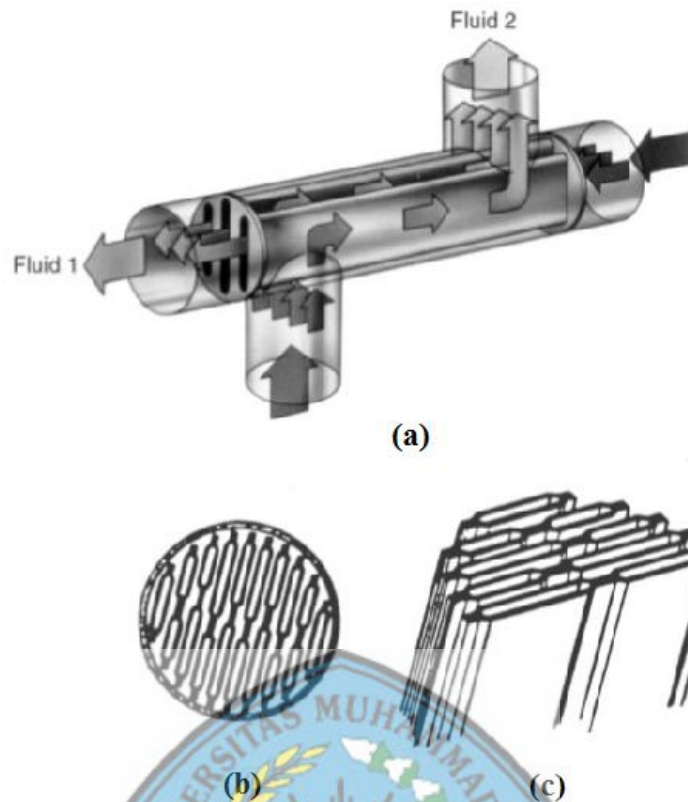
secara spiral dan yang lainnya mengalir secara kombinasi antara spiral dengan *cross flow*.



Gambar 2 7. Desain *Heat Exchanger Plat Tipe Spiral*

Heat exchanger tipe ini sangat cocok digunakan untuk fluida dengan *viskositas* tinggi atau juga fluida yang mengandung material-material pengotor yang dapat menimbulkan tumpukan kotoran di dalam elemen *heat exchanger*. Hal ini disebabkan karena desainnya yang satu lintasan, sehingga apabila terjadi penumpukan kotoran di satu titik, maka secara alami kecepatan aliran fluida pada titik tersebut akan meningkat, sehingga kotoran tadi akan terkikis sendiri oleh fluida kerja tersebut. Karena kelebihan inilah sehingga *heat exchanger* tipe ini sangat cocok untuk digunakan pada fluida kerja dengan *viskositas* sangat tinggi, fluida slurries (semacam lumpur), air limbah industri, dan sejenisnya.

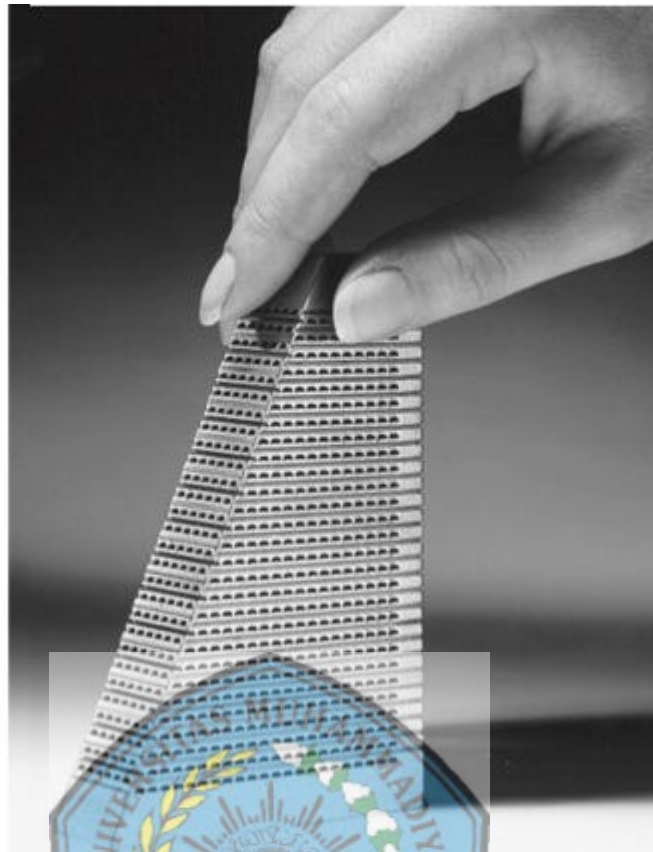
4. *Lamella Heat Exchanger*. *Lamella heat exchanger* tersusun atas sebuah *shell* berbentuk silindris dengan elemen berdesain khusus berada di dalamnya. Elemen dengan desain khusus ini disebut dengan Lamella. Di antara elemen lamella dengan sisi *shell* dibatasi dengan sistem sealing berupa gasket. Untuk lebih memahami desain *heat exchanger* tipe ini, mari perhatikan gambar berikut



Gambar 2 8. *Lamella Heat Exchanger* Beserta Desain Emailnya

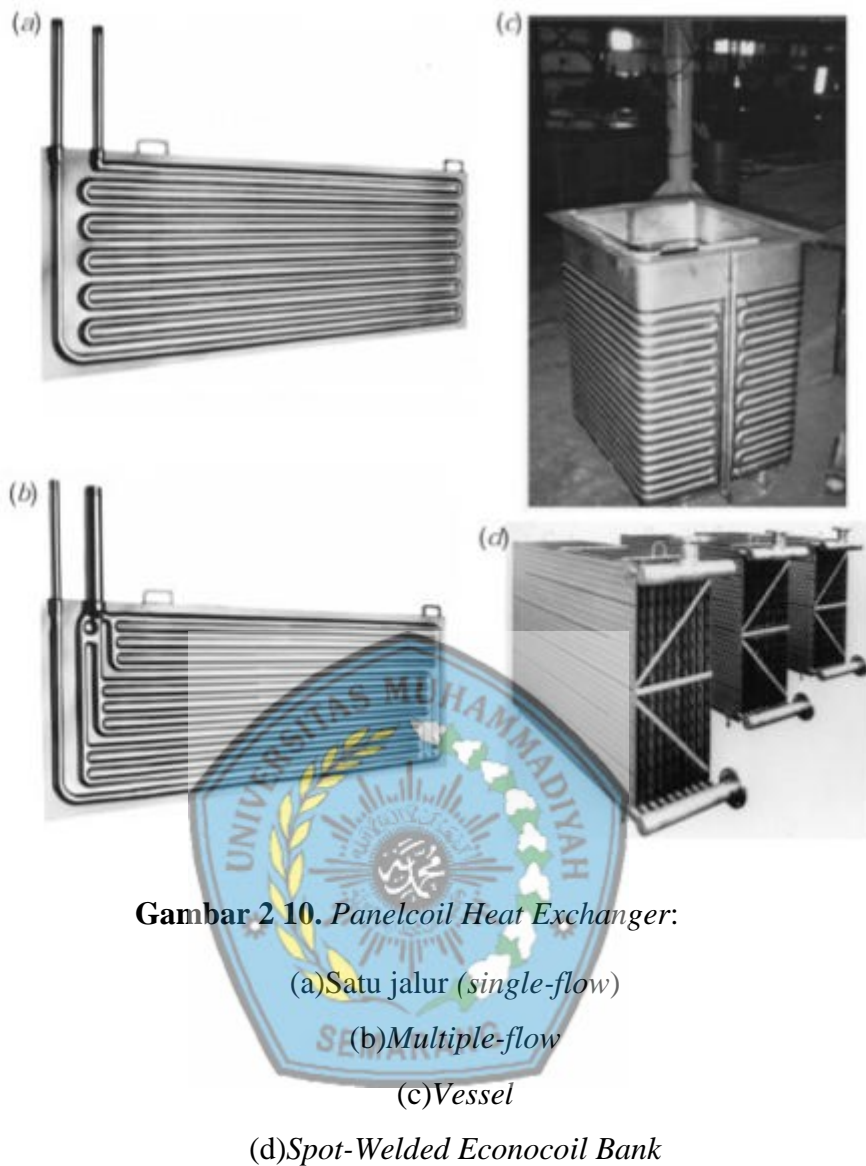
Lamella Heat Exchanger memiliki berat total yang lebih ringan daripada *heat exchanger tipe shell & tube* dengan beban kerja yang sama. Tipe ini juga dapat bekerja pada temperatur yang tinggi apabila gasket yang digunakan tepat, yakni hingga 500°C jika menggunakan gasket berbahan *non-asbestos*. Penggunaan *heat exchanger* tipe ini biasanya ada pada industri kertas, industri kimia, serta industri lain yang sejenisnya.

5. *Printed-Circuit Heat Exchanger*. *Heat exchanger* tipe selanjutnya ini berdesain khusus seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah. Proses pembuatannya menggunakan berbagai jenis plat dari material stainless steel, titanium, tembaga, aluminium, atau yang lainnya, dengan jalan mirip proses kimia pada pembuatan sirkuit PCB rangkaian elektronika. *Heat exchanger* tipe ini cocok digunakan pada pemrosesan kimia, pemrosesan bahan bakar, mesin pendingin, industri separasi udara, komponen pendingin kompresor, dan lain sebagainya.



Gambar 2 9. *Printed-Circuit Heat Exchanger*

6. *Panelcoil Heat Exchanger.* *Heat exchanger* tipe ini menggunakan semacam pipa yang dipasangkan ke sebidang plat dengan proses pengelasan, stamping, atau proses roll-bond sehingga didapatkan sebuah desain *heat exchanger* yang diberi istilah panelcoil. Material yang digunakan untuk panelcoil umumnya adalah baja karbon, stainless steel, titanium, nikel, dan monel. Penggunaan *heat exchanger* tipe ini ada pada industri farmasi, industri fiber, industri kimia, industri makanan, dan juga pada penyerap panas tenaga matahari.



2.4. Potensi Pembentukan Kerak di dalam Pipa

Potensi pembentukan kerak dipengaruhi oleh aspek kinetik dan termodinamik dari larutan pembentuk kerak. Kerak terbentuk apabila konsentrasi senyawa pembentuk kerak pada air pengumpan melebihi batas jenuhnya atau dalam kondisi lewat jenuh. Kondisi ini digambarkan oleh *Langelier Saturation Index* (LSI atau selanjutnya dinamakan SI) [Tzoti et al, 2007] seperti dicantumkan pada persamaan (1) dan (2).

$$S = \{[Ca^{2+}] [CO_3^{2-}] / K_{sp}\}^{1/2} \quad (1)$$

$$SI \approx 2 \log S \quad (2)$$

Apabila nilai $SI \geq 1$ maka kerak memiliki potensi akan terbentuk sebaliknya apa bila nilai $SI \leq 1$ maka kerak tidak berpotensi terbentuk [Schausberger et al, 2009]. Nilai SI sangat dipengaruhi oleh kelarutan (solubilitas) senyawa pembentuk kerak di dalam solven dimana harga solubilitas ini bukan merupakan harga konstan tetapi berubah menurut kondisinya [Bansal et al, 2008]. Beberapa permasalahan yang berpengaruh terhadap pencapaian nilai kejenuhan (SI) adalah :

- Larutan dengan solubilitas normal didinginkan atau mengalami penurunan temperatur maka akan dapat mencapai larutan jenuh.
- Larutan dengan solubilitas terbalik dipanaskan atau temperaturnya meningkat melebihi temperatur solubilitasnya.
- Larutan diuapkan di bawah batas solubilitas dari spesies yang dilarutkan.
- Mencampur jenis yang berbeda dari kondisi kejenuhannya.
- Mengubah pH larutan pada saat proses [Bansal et al, 2008].

Penjelasan di atas jelas menunjukkan bahwa temperatur larutan, memiliki korelasi yang kuat terhadap potensi pembentukan kerak [Muryanto et al, 2013; Raharjo et al, 2016]. Selain temperatur, laju alir dan konsentrasi senyawa pembentuk larutan telah jelas menunjukkan pengaruh terhadap pembentukan kerak CaCO_3 di dalam pipa [Mangestiyono et al, 2016]. Aliran di dalam pipa akan memberikan drag force dan lift force [Laskovski et al, 2014] dimana gaya yang terbentuk akan menyebabkan terbentuk getaran dalam fluida [Cornett et al, 2014]. Getaran memberikan perlakuan seperti agitasi di dalam larutan dan mempercepat pembentukan kerak. Pengaruh getaran di dalam pipa terhadap pembentukan kerak telah diteliti dan menunjukkan hasil bahwa getaran menyebabkan pembentukan kerak lebih banyak [Mangestiyono et al, 2016].

2.5. Pengaruh Pembentukan Kerak terhadap Hambatan Perpindahan Panas

Kerak yang terbentuk di dalam pipa HE akan membentuk lapisan pada dinding permukaan pipa bagian dalam [Hoang et al, 2007]. Keberadaan kerak CaCO_3 dalam permukaan pipa bagian dalam akan menurunkan efisiensi dengan cukup signifikan mengingat daya hantar panas kerak CaCO_3 15 sampai pada 30 kali lebih rendah dibanding tembaga [Belarbi et al, 2014]. Untuk menyelidiki penurunan efisiensi pada HE *Shell and Tube* bisa dilakukan dengan perhitungan hambatan perpindahan panas seperti tercantum berikut ini.

Yang pertama dilakukan adalah melakukan pengukuran ketebalan lapisan kerak yang terbentuk pada permukaan bagian dalam pipa. Ketebalan ini sudah tentu tidak sama untuk setiap bagian permukaan oleh karenanya dihitung dalam ukuran ketebalan rata-rata diungkapkan dalam bentuk diameter setelah terjadi proses pengerakan (D_f). Rumus ini dihitung setelah data massa kerak (w) didapatkan melalui eksperimen seperti tercantum dalam persamaan (3)[Al-Mutairi et al, 2009].

$$w = [\pi/4 (D_f - D_o) L] \rho_f \quad (3)$$

Dimana w adalah massa kerak yang terbentuk di dalam permukaan pipa bagian dalam, D_f adalah diameter dalam pipa setelah terjadi pengerakan, D_o adalah diameter dalam pipa, L adalah panjang pipa dan ρ_f adalah densitas kerak CaCO_3 . Selanjutnya nilai D_f digunakan dalam langkah berikutnya untuk menghitung hambatan perpindahan panas (*Fouling resisstant*, R_f) sesuai rumus (4)[Al-Mutairi et al, 2009].

$$R_f = [\ln (D_f/D_o)]/2\pi k_f L \quad (4)$$

Dimana R_f adalah hambatan perpindahan panas kerak, k_f adalah konduktifitas panas dari kerak CaCO_3 . Harga ρ_f dan k_f didapatkan dari paper Bott [Bott, 1995].

2.6. Pengaruh Pertumbuhan Kerak CaCO_3 terhadap Laju Penyumbatan Pipa

Laju pertumbuhan kerak (gr/min) yang tinggi akan berakibat secara cepat pipa HE menjadi tersumbat. Penyumbatan pipa HE selalu dihindari semaksimal mungkin mengingat potensi kerugian yang ditimbulkan dirasakan sangat besar. Pembersihan yang dilakukan terhadap HE mengharuskan sistem diberhentikan total dan pada saat yang sama produksi juga berhenti sedangkan karyawan tetap harus dibayar.

Terkait dengan mitigasi pengendalian kerak, dua model aliran HE *Shell and Tube* yaitu searah dan berlawanan akan dikaji potensi penyumbatan kerak di dalam pipa. Diharapkan temuan yang didapatkan memberi manfaat pada desainer HE untuk membuat produk terbaiknya.

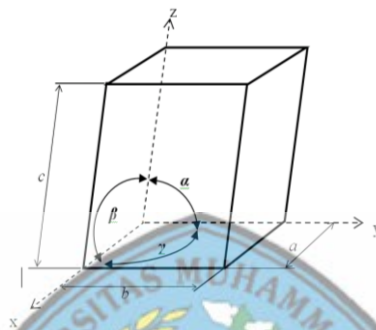
Perhitungan laju penyumbatan pipa diselidiki berdasarkan laju pertumbuhan kerak yang terjadi yang didapat melalui eksperimen. Selanjutnya diperhitungkan waktu yang dibutuhkan sehingga secara menyeluruh volume pipa terisi oleh kerak (tersumbat), menggunakan rumus (5) yang dikembangkan sendiri oleh peneliti.

$$t = (\pi/4 D_o^2 L) / (\rho_f/w) \quad (5)$$

Dimana t adalah waktu yang dibutuhkan untuk terjadi penyumbatan total, D_0 diameter dalam pipa, L adalah panjang pipa sedangkan ρ_f adalah densitas kerak CaCO_3 sedangkan w adalah laju pertumbuhan kerak.

2.7. Sistem Kristal

Mengingat adanya perbedaan yang nyata pada susunan kristal maka untuk mempelajarinya dilakukan pengelompokan kristal - kristal tersebut menurut konfigurasi serta susunan atom seperti terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2 11. Unit sel dengan koordinat x, y, z panjang sisi a, b, c dan sudut α, β, γ (Callister,2001)

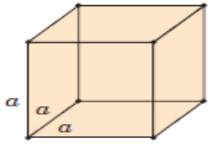
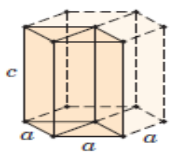
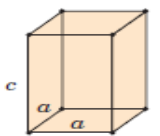

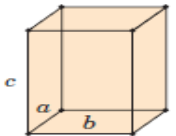
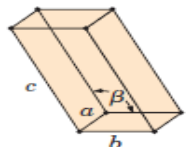
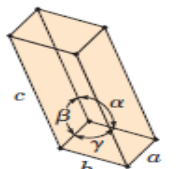
Ada enam parameter yang digunakan untuk mengelompokkan kristal yaitu tiga sisi ujung a, b dan c serta tiga sudut interaksial yaitu $\alpha; \beta$ dan γ (Callister, 2001). Perbedaan nilai dari ke enam parameter menyebabkan adanya perbedaan sistem kristal dan akan menentukan pengelompokan dari masing-masing kristal. Gambar 2.12 menunjukkan pengelompokan kristal menurut sistem kristal yang telah dibahas. Beberapa bentuk kristal ada yang tidak tercantum dalam sistem ini tetapi bisa didekati dengan bentuk yang mirip atau menyerupai sistem yang ada.

Menurut basis yang dijelaskan di atas didapatkan tujuh perbedaan nyata dari sistem kristal yang ada. Sistem kristal tersebut diberi nama sbb : *cubic; tetragonal; hexagonal; orthorhombic, rhombohedral; monoclinic dan triclinic* (Callister, 2001). Tujuh sistem kristal masing-masing dibedakan oleh tiga sudut interaksial yaitu α, β dan γ juga dibedakan oleh panjang ke tiga sisi a, b dan c . Sebagai contoh kristal berbentuk cubic, ia mempunyai sudut interaksial $\alpha = \beta = \gamma$, juga mempunyai sisi-sisi $a = b = c$. Kristal berbentuk hexagonal mempunyai sisi $a = b \neq c$ sedangkan formasi sudut-sudutnya adalah $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$ sedangkan untuk sistem kristal yang berbentuk tetragonal

mempunyai ukuran sisi $a = b = c$ dan untuk ukuran sudutnya adalah $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Jadi sistem kristal tetragonal hampir menyerupai sistem kristal cubic, perbedaannya hanya terletak pada nilai sisi c yang tidak sama dengan sisi a dan sisi b . Kristal rhombohedral mempunyai ketiga sisi sama yaitu $a = b = c$ selain itu juga mempunyai ketiga sudut yang sama yaitu $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$. Untuk kristal berbentuk orthorhombic mempunyai ketiga sisi yang berbeda yaitu $a \neq b \neq c$ tetapi mempunyai ketiga sudut yang sama yaitu $\alpha = \beta = \gamma$.

Lebih lanjut kajian tentang sistem kristal ditunjukkan secara jelas meliputi nama kristal, bentuk kristal, sisi kristal dan sudut - sudut kristal. Diharapkan kajian ini dapat menjadi referensi dalam membahas tentang morfologi kristal (lihat Gambar 2.5).



<i>Crystal System</i>	<i>Axial Relationships</i>	<i>Interaxial Angles</i>	<i>Unit Cell Geometry</i>
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral (Trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Gambar 2 12. Pengelompokan bentuk kristal menurut perbedaan sudut interaksial dan panjang sisinya (Callister, 2001)