

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Menurut Indra (2013) bahwa stasiun masak merupakan tempat yang digunakan untuk proses lanjutan penguapan air dari nira kental yang dihasilkan oleh evaporator pada stasiun penguapan. Tujuannya untuk mengubah bentuk sukrosa dan zat terlarut dalam nira menjadi lewat jenuh sehingga sukrosa mengkristal. Proses tersebut terjadi pada alat yang bernama *pan* masak/vakum dan dilakukan pada tekanan vakum 60 – 65 mmHg dan suhu pemanasan sekitar 60 – 70 °C agar sukrosa tidak rusak. Proses pembentukan kristal gula pada dasarnya adalah penghilangan air dari larutan sukrosa sehingga larut menjadi jenuh dan pada akhirnya mengalami pengkristalan. Pada larutan yang kental tersebut, jarak antara masing-masing molekul saling berdekatan sehingga masing-masing molekul akan saling tarik-menarik. Bila saat itu terdapat kristal sukrosa di dalamnya, maka akan terjadi kesetimbangan antara molekul sukrosa yang larut dan yang mengkristal. Peristiwa ini dinamakan dengan lewat jenuh.

Menurut Winarno (1997) bahwa pemisahan bahan padat berbentuk kristal dari suatu larutan atau lelehan disebut kristalisasi. Bila suatu larutan yang mengandung gula, misalnya sukrosa diuapkan, maka konsentrasinya akan meningkat dan proses akan terus berlangsung sehingga seluruh air menguap. Apabila keadaan tersebut tercapai dan pemanasan diteruskan, maka cairan yang ada bukan lagi terdiri dari air tetapi cairan sukrosa yang telah lebur.

Proses pemasakan atau kristalisasi menggunakan sistem vakum yang bertujuan untuk mencegah terjadi karamelisasi dan terbentuknya kerak akibat dari pemanasan secara kontinyu. Proses pemasakan (kristalisasi) merupakan suatu proses yang bertujuan untuk mengkristalkan sukrosa yang ada pada nira kental menjadi kristal-kristal gula dengan kehilangan gula yang seminimal mungkin dalam waktu singkat. Sehingga dengan demikian kerusakan sukrosa dapat dicegah, karena sukrosa ini akan mudah rusak pada suhu yang tinggi. Sesuai teori

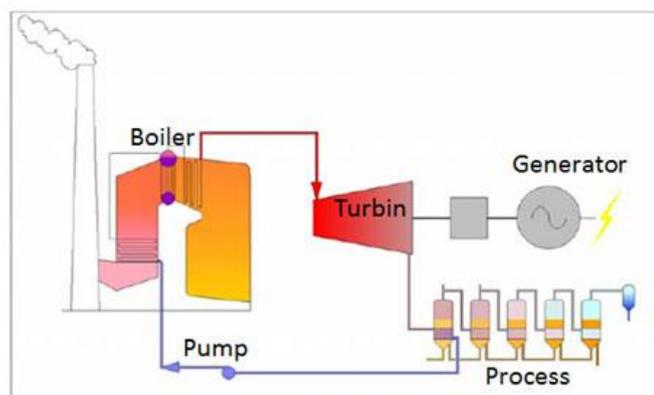
yang dikemukakan oleh Winarno (1997) bahwa titik lebur sukrosa adalah 160°C , sehingga apabila gula dipanaskan sampai melebihi suhunya maka akan terjadi karamelisasi.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pemanfaatan Energi Pada Pabrik Gula

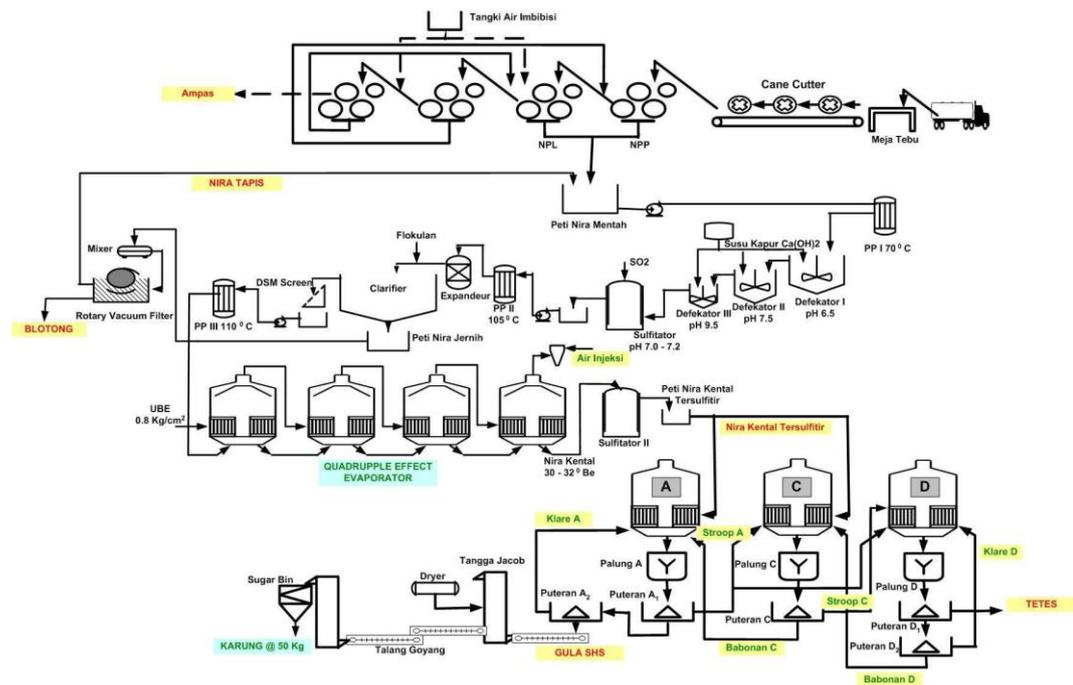
Industri gula yang berbasis perkebunan maupun rafinasi merupakan salah satu industri dengan konsumsi energi dalam bentuk uap dan listrik yang sangat tinggi.

Setiap industri gula harus memiliki alat yang disebut tungku uap guna memenuhi kebutuhan uap dan listrik. Tungku uap tersebut menggunakan berbagai jenis bahan bakar yaitu bagas atau batu bara. Tipikal dari alur pemanfaatan energi pada pabrik gula dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tipikal alur pemanfaatan energi di pabrik gula (Fathurohman, 2015)

Proses pengolahan pada gula yang berbasis perkebunan berbeda dengan proses pengolahan pada pabrik gula rafinasi. Perbedaan tersebut pada bagian penggilingan tebu, afinasi, dan sumber energi yang digunakan. Proses penggilingan gula perkebunan dan rafinasi menggunakan cara berbeda dalam memanfaatkan sumber energi. Sebagai contoh, bahan bakar ketel uap pada pabrik gula perkebunan menggunakan bagas tebu, sedangkan pabrik gula rafinasi menggunakan batu bara.



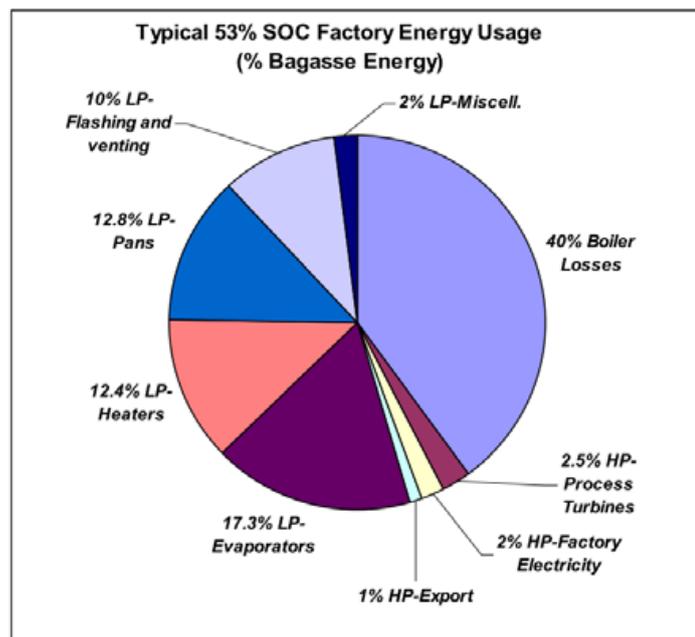
Gambar 2.2 Alur Proses Produksi pada Pabrik Gula Perkebunan
(Fathurohman, 2015)



Gambar 2.3 Alur Proses Produksi pada Pabrik Gula Rafinasi
(Fathurohman, 2015)

Pemakaian energi pada pabrik gula utamanya berupa pemakaian uap dan energi listrik. Uap dihasilkan dari alat yang disebut ketel uap dan pembangkit uap ini digunakan untuk menggerakkan turbin dan generator, yang menghasilkan energi

listrik. Energi listrik digunakan untuk menggerakkan motor mesin pabrik gula pada proses produksi gula. Penelitian yang telah dilakukan Lavarack, dkk menyatakan bahwa pemakaian energi pada pabrik gula perkebunan untuk setiap bagian proses pengolahannya mempunyai tipikal yang berbeda-beda (Fathurohman, 2015).



Gambar 2.4 Penggunaan Energi di Pabrik Gula (Fathurohman, 2015)

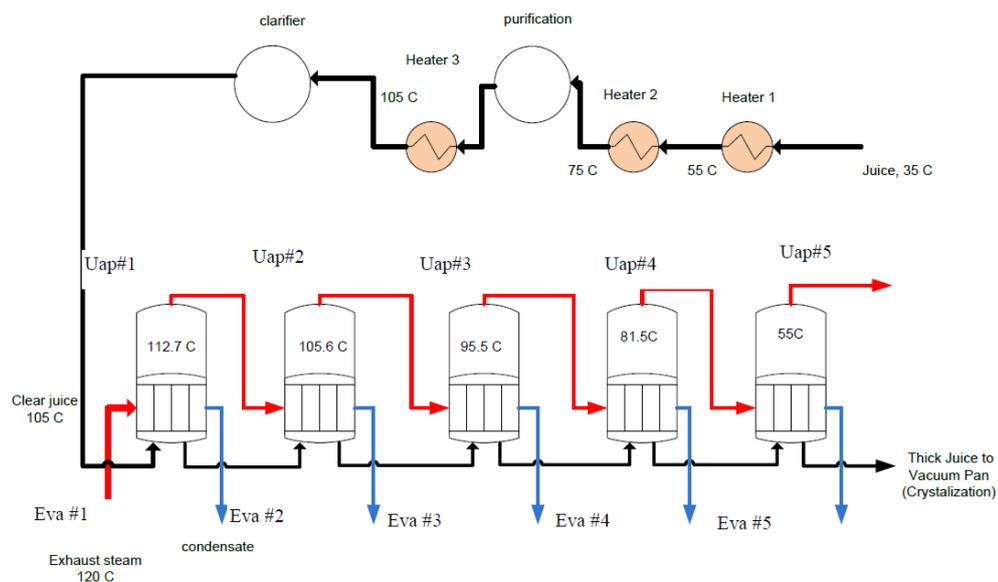
Pemakaian energi dominan di pabrik gula secara berurutan dapat menyebabkan kerugian *boiler*, *evaporator*, *pan* vakum, pemanas air, dan *flashing*. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah dilakukan guna meningkatkan efisiensi pemakaian energi untuk setiap bagian produksi.

Pemanfaatan sistem kogenerasi, kontrol operasional yang tepat, pemilihan bahan bakar, pengontrolan kualitas air dan berbagai parameter lainnya, digunakan sebagai upaya efisiensi pemakaian energi pada ketel uap. Upaya efisiensi lainnya yaitu perbaikan pada sistem *condensate recovery* dan sistem kondenser pada turbin uap.

Pemakaian energi terbesar lainnya pada bagian Evaporator *process house* pada evaporator. Garis besar proses pengolahan yang terjadi di *process house*

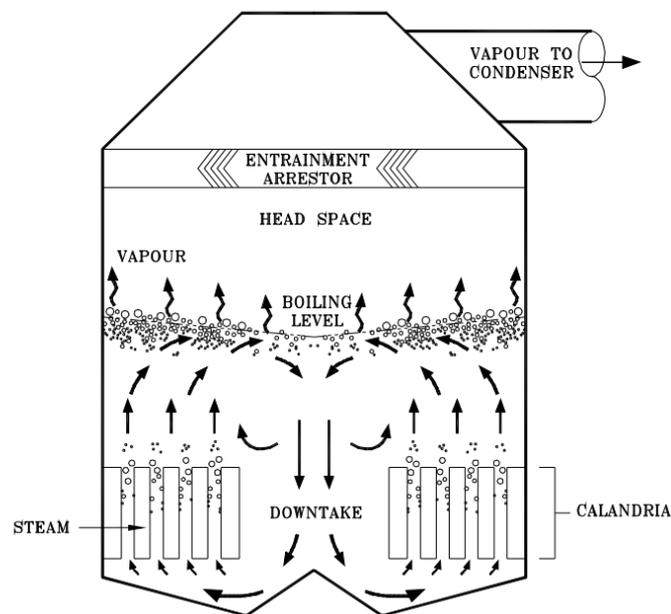
ditampilkan dalam Gambar 2.5. Nira mentah (suhu 35°C, 12% brix) dihilangkan kotorannya di unit pemurnian dengan dipanaskan hingga suhu 105°C di pemanas 1, pemanas 2 dan pemanas 3 dengan sumber panas dari uap evaporator atau *exhaust steam*. Pemurnian nira mentah menjadi nira jernih dan kotoran dalam bentuk *filtercake*. Nira jernih selanjutnya diuapkan dalam *multiple-effect evaporator* menjadi nira kental (60% brix). Nira kental selanjutnya dipanaskan dalam pan masak dengan sumber panas dari uap evaporator atau *exhaust steam*. Dalam pan masak terjadi penguapan air dan pengkristalan sukrosa.

Bagian *process house* pabrik gula memiliki sistem transformasi energi yang unik dengan evaporator difungsikan sebagai pemberi (donor) energi panas untuk alat perpindahan panas yang lain. Evaporator bagian *process house* dioperasikan mengikuti sistem *multiple-effect evaporator*. *Exhaust steam* difungsikan sebagai pemberi (donor) energi dan nira difungsikan sebagai penerima (aseptor). Aliran *exhaust steam* dan nira dijalankan secara searah. *Exhaust steam* digunakan hanya sebagai pemberi energi di evaporator 1, evaporator selanjutnya menggunakan uap yang dihasilkan oleh evaporator sebelumnya. Uap evaporator 1 digunakan sebagai donor energi di evaporator 2, begitu seterusnya.



Gambar 2.5 *Multiple-Effect Evaporator* Bagian *Process House* (Daniyanto, 2013)

Pan vakum digunakan untuk memasak dan mengubah sirup gula kental (*liquor*) menjadi *massecuite* dengan brix dari 60 menjadi 96. Gula pada *pan* vakum dididihkan pada temperatur antara 65 s/d 85 °C dengan kondisi rata-rata pada 75 °C dan tekanan pada kisaran 4 inchHg s/d 9 InchHg, sehingga terjadi proses kristalisasi. Proses masakan dengan tekanan lebih rendah akan berakibat mengurangi sirkulasi pada *pan* vakum, sedangkan proses pada temperatur lebih tinggi menyebabkan penurunan kadar gula.



Gambar 2.6 *Vacuum Pan* (Fathurohman, 2015)

Tolak ukur utama yang perlu dikontrol pada *pan* vakum guna meningkatkan unjuk kerja yaitu dengan pengurangan tekanan pada kalandria, peningkatan koefisien perpindahan panas, dan peningkatan kecepatan sirkulasi.

Berbagai metode mulai dari yang sederhana sampai dengan yang bersifat kompleks telah diteliti untuk meningkatkan unjuk kerja dan efisiensi energi pada *vacuum pan*.

Menurut Rein dkk (2004) bahwa manfaat dari sirkulasi yang baik pada saat pemasakan gula memegang peran penting dalam proses pengolahan gula, yaitu :

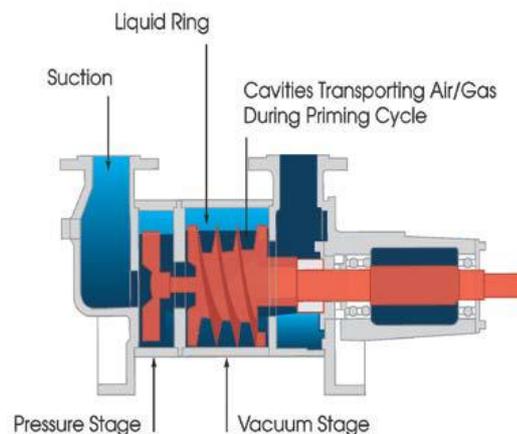
- Kualitas / Mutu : Peningkatan kesamaan ukuran kristal gula dan warna gula yang lebih jernih karena kesamaan pada kondisi fluida didalam *pan* vakum. Sirkulasi yang baik dapat menghilangkan daerah stagnan,

sedangkan ketidakseragaman kondisi panas dan dingin akan mengakibatkan perbedaan level super saturasi dan pertumbuhan kristal.

- Peningkatan perolehan gula : Konsentrasi bagian kering pada *massecuite* akan meningkat, sehingga mengurangi jumlah *mollase* dan kandungan gula pada *mollase*.
- Kapasitas : Peningkatan perpindahan panas akan menghasilkan tingkat kristalisasi yang lebih tinggi dan meningkatkan hasil produksi.
- Efisiensi energi : Penggunaan uap yang tepat dari efek evaporator.

Sirkulasi pada saat mendidihkan nira dapat ditingkatkan dengan menambahkan alat yang disebut *jigger* dan *stirrer* (pengaduk pada bagian atas dari *pan* vakum). Akan tetapi, pemakaian *stirrer* memerlukan energi listrik tambahan sekitar 45 Kw untuk setiap *pan* vakum.

Kondisi vakum pada *pan* vakum selama ini memanfaatkan pompa vakum sehingga butuh energi cukup banyak, sehingga untuk mengurangi kebutuhan energi tersebut dilakukan modifikasi sistem kondenser. Pompa vakum yang biasa digunakan adalah pompa vakum dengan *liquid ring*. *Liquid ring vacuum pump* memiliki keunggulan sifat *sealant* dari *liquid* yang digunakan sehingga dapat menghasilkan kondisi vakum yang baik.

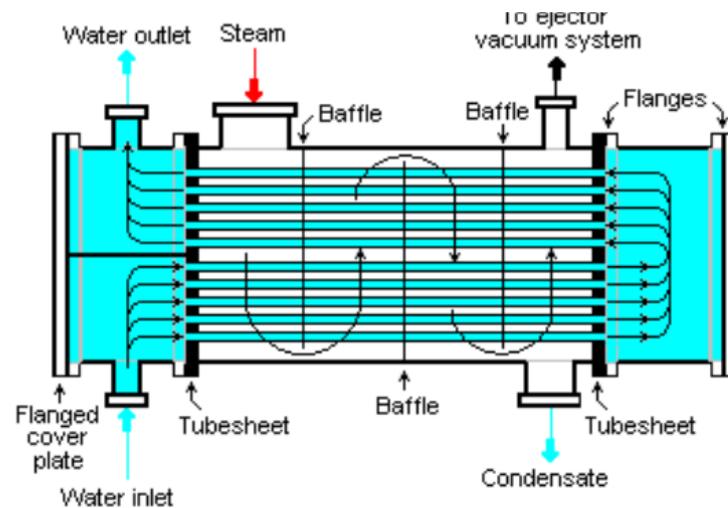


Gambar 2.7 Skema *Liquid Ring Vacuum Pump* (Fathurohman, 2015)

Kondenser merupakan salah satu bagian tambahan pada unit *vacuum pan* dan evaporator. Fungsi utamanya untuk mengevaporasikan uap air yang terbentuk

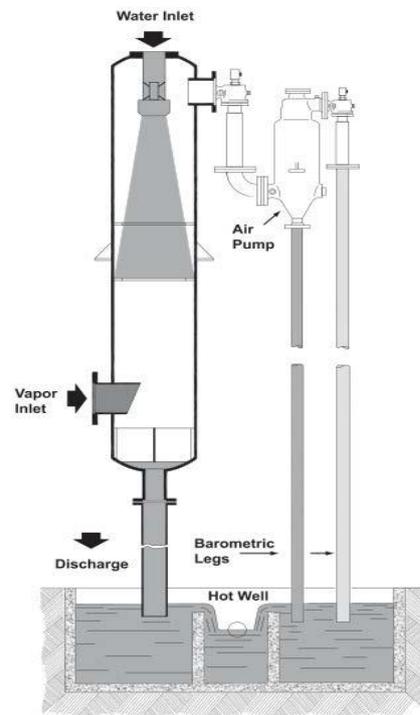
pada proses penguapan maupun pemasakan gula. Kondenser pada prinsipnya adalah alat penukar panas dimana panas (umumnya panas laten) dibuang dengan mengubah uap menjadi cairan menggunakan bantuan cairan pendingin dengan tekanan di bawah tekanan atmosfer. Jenis kondenser secara umum terbagi menjadi kondenser tanpa kontak langsung dan kondenser dengan kontak langsung.

Kondenser tanpa kontak langsung (*surface condenser*) yaitu kondenser di mana antara uap dan cairan pendingin tidak terjadi kontak langsung dan dipisahkan dengan permukaan solid.



Gambar 2.8 *Surface Condenser* (Fathurohman, 2015)

Kondenser dengan kontak langsung merupakan kondenser yang antara uap dan cairan pendingin langsung kontak. Kondenser ini sudah digunakan sejak abad ke-18 dan sebagai contoh adalah *barometric condenser*.

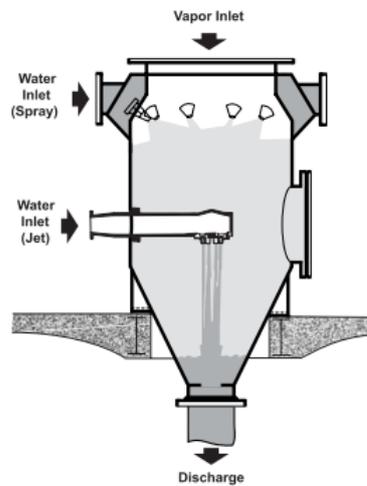


Gambar 2.9 Pemasangan *Barometric Condenser* Standar (Fathurohman, 2015)

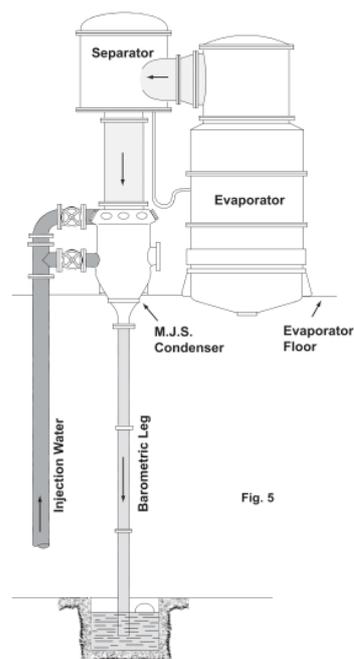
Kondenser jenis ini mempunyai kelebihan, yaitu pada kemudahan perawatan dan kapasitas kondensasi yang lebih tinggi, serta terhindar dari adanya kerak yang menempel pada pipa-pipa. Akan tetapi memiliki kelemahan yaitu tidak adanya kemampuan menghasilkan vakum yang diperlukan, sehingga masih diperlukan tambahan *vacuum pump* yang memerlukan energi cukup besar.

Jet Condense baik yang *Multi Jet Condenser* maupun *Single Jet Condenser* merupakan inovasi jenis kondenser. *Multi Jet Condenser* memerlukan dua jalur masukan air, yaitu satu jalur untuk spray pada bagian atas kondenser yang berfungsi untuk proses kondensasi, dan satu jalur lainnya berfungsi sebagai jet untuk menimbulkan efek vakum.

Single Jet Condenser terdiri dari satu jalur masukan air untuk *jet* dan *spray*, yang pengaturannya dilakukan dengan bukaan katup. Pada kondenser ini, jalur uap yang akan dikondensasikan berada pada bagian atas kondenser, *Spray* pada bagian sedikit di bawah dari jalur masukan uap dengan arah ke samping, dan *jet* berada pada posisi paling bawah, dengan tekanan air yang lebih tinggi.



Gambar 2.10 *Multi Jet Barometric Condenser* (Fathurohman, 2015)



Gambar 2.11 Pemasangan *Multi Jet Barometric Condenser* (Fathurohman, 2015)

Kondenser jenis ini diharapkan dapat menghilangkan kebutuhan akan *vacuum pump*, karena berfungsi untuk kondensasi dan memiliki kemampuan untuk menghasilkan vakum yang diperlukan pada proses pemasakan gula.

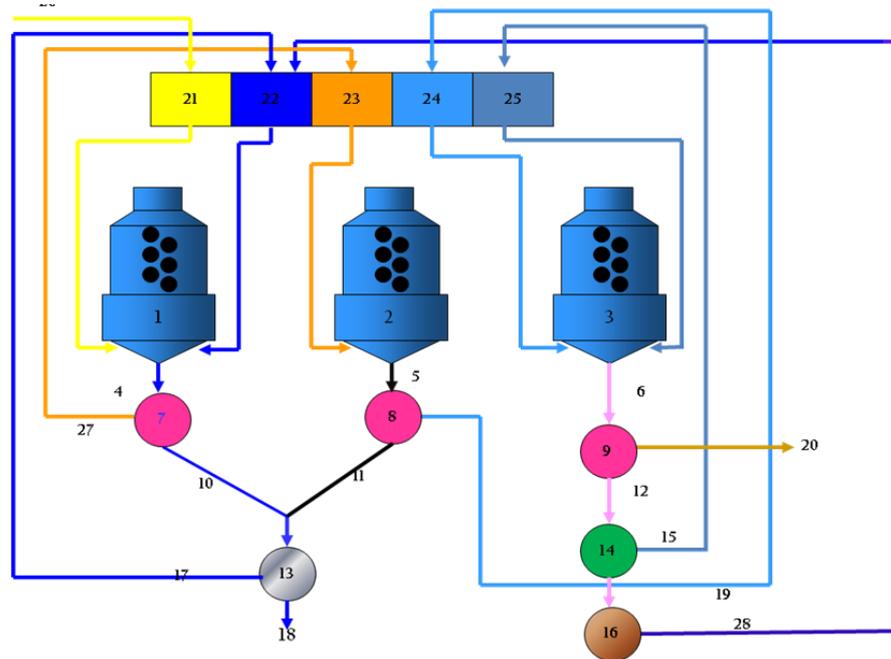
2.2.2. Stasiun Masakan (*Boiling Station*)

Stasiun Masakan adalah stasiun yang beroperasi untuk memperoleh gula dengan cara kristalisasi, yang berfungsi sebagai tempat untuk merubah sukrosa dari nira kental menjadi kristal-kristal gula yang seragam sesuai dengan ukuran yang diinginkan. Prinsip dari stasiun masakan adalah menguapkan kembali nira sehingga tercapai kondisi jenuh dimana molekul sukrosa semakin berdekatan dan saling melekat agar terbentuk gugus kristal.

Proses kristalisasi dilakukan dengan cara mengambil gula sebanyak-sebanyaknya dari larutan induknya dalam bentuk kristal sukrosa. Prinsip dari pengkristalan sukrosa yaitu apabila larutan encer sukrosa dinaikkan konsentrasinya dengan jalan menguapkan airnya. Selanjutnya, pada saat proses penguapan air tersebut, lama-kelamaan akan mencapai kejenuhan dan sukrosa akan menjadi kristal.

Adapun tujuan pengkristalan gula adalah sebagai berikut :

- a. Mengubah sukrosa dalam larutan membentuk kristal gula agar diperoleh kristal gula sebanyak-banyaknya dan sisa gula dalam tetes sekecilnya.
- b. Mendapatkan kristal gula yang dapat dengan mudah dipisahkan pada unit putaran sehingga bisa diperoleh harga kemurnian yang tinggi. Dalam proses kristalisasi hendaknya diusahakan agar tercapai hal-hal sebagai berikut :
 - 1) Hasil gula yang maksimal, baik kualitas maupun kuantitas,
 - 2) Kehilangan gula sekecil mungkin,
 - 3) Waktu proses sedikit mungkin,
 - 4) Biaya operasi serendah mungkin.



Gambar 2.12 Aliran Nira Di Stasiun Masakan & Putaran (Mitsoe, 2012)

Keterangan Gambar :

- | | |
|-------------------|---------------------------------------|
| 1. Masakan A | 15. Klare D |
| 2. Masakan B | 16. Mixer |
| 3. Masakan D | 17. Klare SHS |
| 4. <i>Cuite</i> A | 18. Gula SHS |
| 5. <i>Cuite</i> B | 19. <i>Stroop</i> B |
| 6. <i>Cuite</i> D | 20. Tetes |
| 7. Puteran A | 21. Peti NK |
| 8. Puteran B | 22. Peti Klare SHS |
| 9. Puteran D I | 23. Peti <i>stroop</i> A |
| 10. Gula A | 24. Peti <i>stroop</i> B |
| 11. Gula B | 25. Peti Klare D |
| 12. Gula D I | 26. Nira kental dari
ST. Penguapan |
| 13. Puteran SHS | 27. <i>Stroop</i> A |
| 14. Puteran D2 | 28. Leburan gula D2 |

1. Tahapan pada proses pemasakan gula menurut Lauret dkk (2001), dibagi menjadi beberapa fase, yaitu :

- 1) Pengisian awal
- 2) Konsentrasi
- 3) Pembibitan
- 4) Pemasakan
- 5) Pemakaian pengaduk sebelum masuk ke sentrifugal

2. Tingkatan masakan ada 3 macam yaitu: A, B dan D.

1) Masakan A

Bahan yang diperlukan pertama adalah nira kental, klare SHS dan leburan gula D. Nira kental dimasukan dalam pan lalu dipanaskan sampai larutan mencapai meta stabil. Daerah meta stabil dapat diketahui dengan mengambil larutan tersebut diregangkan dan apabila renggangannya mencapai 3-5 cm, maka daerah tersebut meta stabil. Kemudian bibit gula dimasukan dan dipanaskan sampai bibit bertambah karena adanya penempelan kristal, kemudian nira kental ditambah lagi sampai kristal bertambah besar. Hasil dari masakan A adalah gula A dan *stroop* A. Baru kemudian hasil masakan ini diturunkan di palung pendingin, kemudian diputar di stasiun putaran untuk menghasilkan gula produk (gula SHS), *stroop* A dan *clare* SHS.

2) Masakan B

Bahan dasar *stroop* A yang dihasilkan dari masakan A. Cara kerjanya sama dengan masakan A, hasil masakan B diputar diputar B menghasilkan gula B dan *stroop* B, gula B dicampur dengan gula A dan diputar diputar SHS.

3) Masakan D

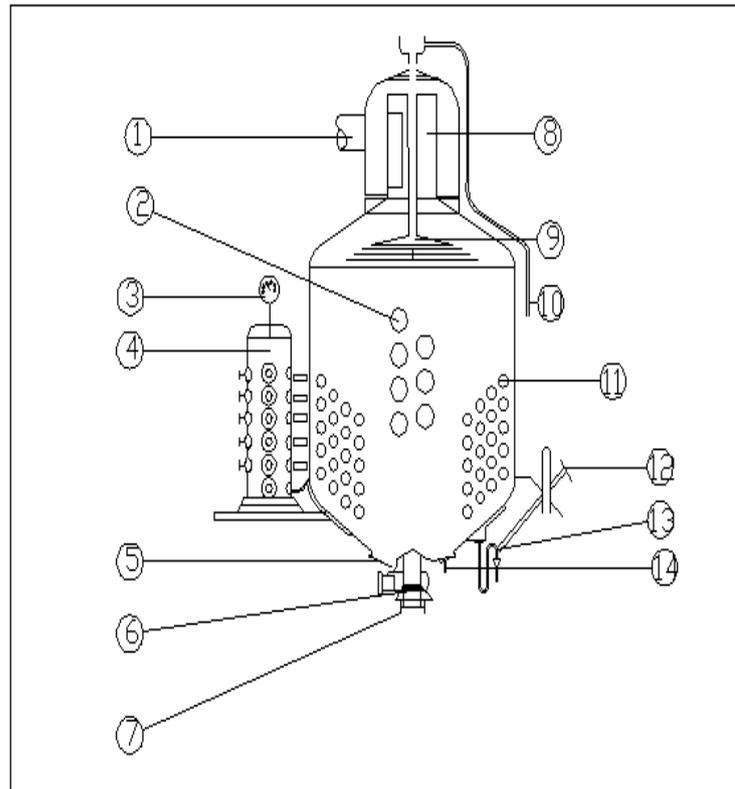
Bahan dasar pada masakan D adalah *stroop* B dan *clare* D, cara kerjanya sama dengan masakan B, hasil dari masakan D diputar diputar D menghasilkan gula D dan tetes. Tetes ditampung pada tangki penampung yang telah tersedia dan gula D diputar pada putaran

D dan menghasilkan *clare* D dan gula D2. Gula D2 sebagian untuk bibit dan sebagian lagi dilebur masuk ke dalam peti sulfitasi sebagai masakan A dan masakan B.

Cara ketiga masakan diatas secara umum hampir sama. Mula-mula tekanan pada badan pan dibuat vakum (65 mmHg). Selanjutnya nira dimasukan secara bersamaan kran uap pemanas dibuka satu persatu. Setelah nira mengental bibit ditarik. Pada saat penarikan bibit harus diperhatikan agar kristal tidak sampai larut kembali. Kemudian masakan ditunggu hingga nilai brix memenuhi syarat terjadinya pengkristalan. Setelah proses pemasakan selesai gula kristal diturunkan ke palung pendingin. Cara menghindari timbulnya kristal-kristal baru dapat dilakukan dengan membuat masa bergerak atau bersirkulasi supaya terjadi pencampuran yang merata dari larutan, disamping terjadinya gerakan dari butir-butir kristal.

Beberapa instrumentasi dalam pengukuran fisik yang tersedia di unit industri sebagai berikut (Lauret dkk, 2001) :

- 1) Suhu *massecuite*
- 2) Tingkat *massecuite* dalam *pan* vakum
- 3) Pengukuran brix bibit melalui proses refraktometer
- 4) Pengukuran brix *massecuite* dengan menggunakan densitas gamma meter (pengukur radiasi)
- 5) Konduktivitas dari *massecuite*
- 6) Intensitas pengadukan
- 7) Tekanan vakum di dalam *pan* masak
- 8) Tekanan uap
- 9) laju aliran sirup



Gambar 2.13 Badan Masakan (Mitsoe, 2012)

Keterangan :

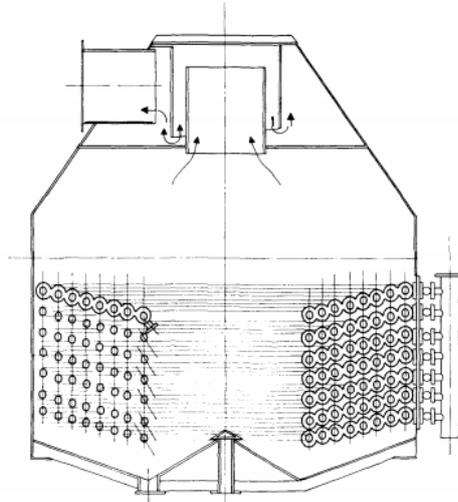
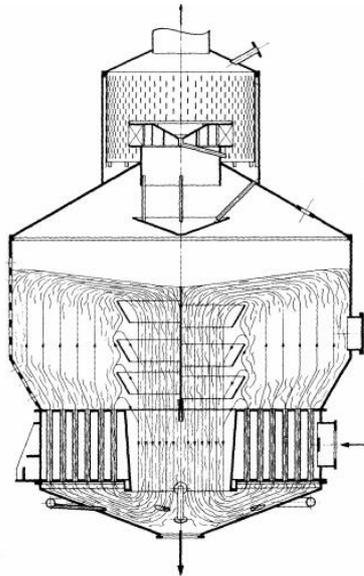
- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1. Pengeluaran uap nira | 8. <i>Dom savanger</i> |
| 2. Kaca penglihat | 9. Payung |
| 3. Manometer | 10. Pipa amoniak |
| 4. <i>Afsluiter</i> uap pemanas | 11. <i>Coil</i> supentin |
| 5. Pemasukan nira | 12. Stang pemuka |
| 6. Klep pengeluaran | 13. Saluran air kondensat |
| 7. Pengeluaran <i>mesquite</i> | 14. Saluran air pencuci |

3. Peralatan yang digunakan adalah :
 - a. Pan masakan berfungsi untuk membentuk kondisi lewat jenuh larutan gula serta membentuk proses kristalisasi, jumlah pan masakan di PG. Madukismo sebanyak 13 buah.

- b. Kondensor berfungsi untuk pendinginan uap yang keluar dari pan masakan dengan jalan menginjeksikan air dan akan menghasilkan air jatuhan.
 - c. Palung pendingin berfungsi sebagai tempat penampungan dan pendinginan masakan sekaligus sebagai tempat terjadinya kristalisasi (kristalisasi lanjut).
 - d. Alat vakum berfungsi untuk pembuatan vakum (hampa udara) didalam pan masakan karena untuk menarik bahan dan sirkulasi uap air yang dihasilkan.
 - e. Peti tunggal berfungsi untuk menampung *clare D*, *stroop A*, nira kental, *clare SHS*, gula D1 dan D2.
4. Alat - alat kelengkapan badan vakum *pan* masakan
- a) Manometer vakum berfungsi untuk mengetahui tinggi dan rendahnya vakum dalam badan masakan.
 - b) Thermometer berfungsi untuk mengetahui temperatur dalam masakan.
 - c) Katup pengaman berfungsi untuk keamanan bila terjadi tekanan uap yang melebihi batas yang telah ditentukan.
 - d) Katup vacuum berfungsi untuk kevakuman dalam badan masakan.
 - e) Katup uap masuk berfungsi untuk memasukan uap bekas.

2.2.3. *Vaccum Pan*

Konsep *vaccum pan* serupa dengan badan evaporator. Akan tetapi, terdapat dua model pemanasan yang digunakan di sini:

(a) Kumparan (*Coils*)**Gambar 2.14** *Coil vacuum pan* (Hugot, 1986)(b) Kalandria (*Calandria*)**Gambar 2.15** *Calandria pan for low-grade type* (Hugot, 1986)

Kalandria amat mirip dengan yang digunakan dalam evaporator efek majemuk (*multiple-effect*). Dalam sejumlah kasus, kalandria dan kumparan sama-sama digunakan dalam satu panci.

Penghilangan gas kondensat dan non-kondensat dilakukan sebagaimana pada evaporator.

2.2.3.1. Panci kumparan (*Coil pans*)

Sebuah *pan* dapat terdiri dari satu, dua kumparan atau lebih. Kumparan tersebut ditahan dengan klip atau braket.

1. Kumparan bagian melingkar (*Coils of circular section*)

Pada jenis panci standar lama, kumparan terdiri dari tabung tembaga yang berawal dari bagian luar panci, yang ditekuk membentuk spiral disekitar kerucut terpenggal (*truncated cone*), dan berakhir pada bagian tengah panci didalam pengering kondensat.

Di Queensland, sudut cakram (*dish*) atau sudut yang terbentuk secara horizontal oleh kerucut terpenggal ini harus sebesar sekitar 45° .

Sementara itu, produsen Prancis lebih menyukai sudut yang jauh lebih kecil. Dalam hal ini perlu dipastikan bahwa kemiringan kumparan dari awal hingga akhir cukup untuk memastikan drainase kondensat bekerja efektif. Untuk tujuan ini, sudut cakram (*dish*) dibuat tidak kurang dari 15° . (Setengah sudut *cone* 75°)

Pitch atau ruang vertikal antara kedua kumparan berdampingan tersebut harus berada pada urutan 25-30 cm (10-12 inci) antar pusatnya. Posisinya diatur sedemikian rupa sehingga belokan kumparan menjadi cenderung vertikal satu sama lain, atau hanya sedikit miring dari posisi vertikal, sehingga tidak menghalangi sirkulasi *massecuite* posisi ini harus mengarah ke atas di bagian kumparan.

Kumparan selalu terbuat dari tembaga. Diameter kumparan adalah sekitar 10-15 cm (4-6 inci), namun terkadang dapat beragam, dengan diameter yang semakin berkurang dari awal hingga akhir kumparan.

Rasio panjang diameter internal umumnya bervariasi dari 75 hingga 250. Rasio ini bergantung terutama pada uap yang digunakan untuk pemanasan. Kumparan pendek adalah yang paling berguna, khususnya untuk uap air bertekanan rendah.

Tromp menyarankan agar rasio dipertahankan pada 200-250 untuk uap tekanan tinggi (untuk uap tekanan rendah, bagian kumparan akhir tidak akan menyalurkan panas sehingga menjadi tidak berguna). *Exhaust steam* disarankan untuk dipertahankan di bawah 100. Untuk *bled vapour*, rasio 75 sudah dianggap sesuai.

Akan lebih bermanfaat jika kumparan dibuat dari tembaga berat (*heavy copper*), karena kumparan cenderung cepat aus. Ketebalannya harus antara 2,5 hingga 3,2 mm ($\frac{3}{32}$ inci dan 5 inci).

2. Kumparan dengan bagian mendatar (*Coils with flattened section*).

Halpin memperkenalkan desain yang telah disempurnakan di Queensland pada tahun 1950, yang akhirnya membuat panci kumparan mulai dapat diterima di negara yang sejak lama menggunakan panci kalandria ini.

Permukaan pemanas (*heating surface*) dibentuk dari tabung tembaga berdiameter mendatar 12,5 cm (5 inci) dengan arah vertikal untuk memberikan dimensi eksternal seluas 7,5 cm (3 inci) dan tinggi 15,5 cm ($6\frac{1}{8}$ inci), atau dengan luas 10 cm (4 inci) dan tinggi 14 cm ($5\frac{9}{16}$ inci) (Gambar 2.3).

Panci ini tidak terdiri dari kumparan tunggal yang digulung menjadi spiral, namun masing-masing kumparan terdiri dari beberapa tabung datar, semi melingkar, dan konsentrik, yang melalui *steam manifold* yang mengikuti *generatrix* kerucut terpenggal ke manifold kondensat yang dipasang di *generatrix* yang berhadapan.

Dengan rancangan ini, sudut cakram (*dish*) kumparan tidak lagi menjadi penting. Sudut dapat dibuat menjadi, misalnya, 15°, untuk memfasilitasi aliran kondensat pada manifoldnya, dan sudut ini dapat dirancang secara sederhana sehingga manifoldnya bisa sedikit lebih rendah daripada *steam manifold*.

Titik pusat yang dibentuk dengan lingkaran superposisi dalam kumparan-kumparan ini harus berdiameter setara dengan 38 atau 40% dari diameter dalam panci.

Kemiringan atau ruang antara dua kumparan berdampingan tersebut harus setidaknya 30 cm (12 inci) dari pusat ke pusat tabung yang berhubungan tersebut, dan disarankan sepanjang 33 cm (13 inci).

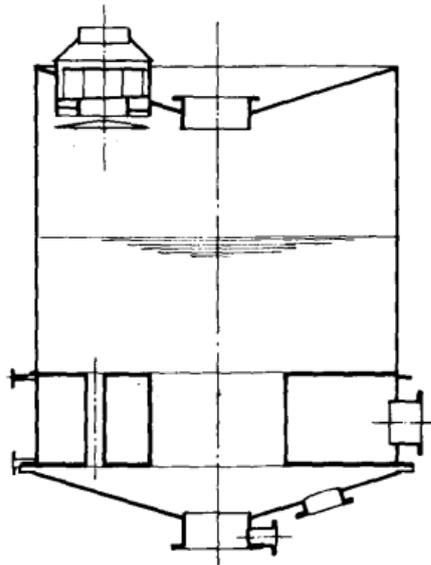
Clearance atau ruang bebas antara masing-masing belokan dari setiap kumparan harus 7,5 - 10 cm (3 - 4 inci), dan lebih baik lagi jika 8,5 - 9 cm ($3\frac{3}{8} - 3\frac{1}{2}$ inci). Kumparan atas diposisikan sedemikian rupa sehingga tabung atas tidak kurang dari 40 cm (16 inci) di bawah tingkat maksimal yang disarankan untuk *massecuite*.

Disarankan agar badan silinder panci yang membawa kumparan memiliki tinggi setara dengan 50 – 60 % diameter dalamnya.

Jika aturan ini diikuti, panci dapat memiliki permukaan pemanas dengan volume kerja 4,5 – 5,25 m²/m³ (1,4 – 1,6 sq.ft./cu.ft.) atau sekitar 5 m²/m³ (1,5 sq.ft./cu.ft), yang lebih tinggi daripada tipe panci kumparan yang lama. Panci kumparan kini tidak lagi diproduksi, bahkan di Australia.

2.2.3.2. Panci Kalandria (*Calandria pans*)

Pada panci kalandria, tabung lebih pendek dan berdiameter lebih besar daripada pada evaporator. Baik pada panci kumparan maupun kalandria, *massecuite* naik melampaui permukaan pemanas, antara belokan kumparan atau melalui tabung kalandria. Jelas harus ada penurunan massa yang sepadan bersamaan dengan peningkatan *massecuite* ini. Dengan materi cair dan *mobile* dalam efek multi, hal ini tidak menjadi masalah. Dengan *massecuite* yang tebal dan kental, cara sirkulasi ini dirancang dan diefektifkan dengan berhasil merupakan karakteristik terpenting dari panci vakum. Pemecahan atas masalah ini akhirnya mendorong penciptaan beberapa jenis panci baru, yaitu :



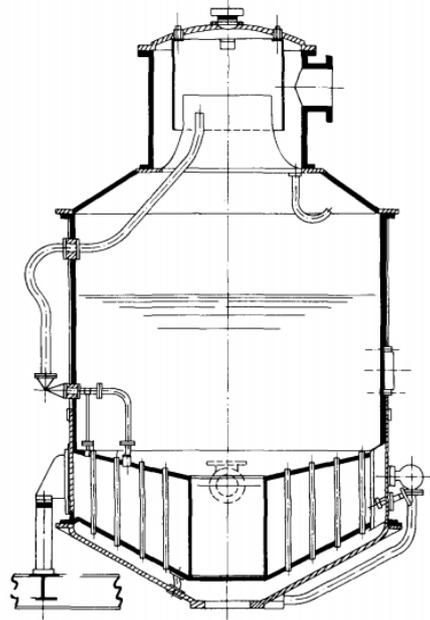
Gambar 2.16 *Fives cail- babcock pan, type C.T.* (Hugot, 1986)

- (a) Kalandria tetap datar, dengan *downtake* sentral (Gambar 2.15)
- (b) Kalandria dengan pelat miring (*inclined-plate*) (Gambar 2.16)
- (c) Kalandria tergantung (“mengambang” atau “*basket*”) (Gambar 2.18)
- (d) Panci horizontal (Gambar 2.23).

(a) Kalandria tetap datar (*Flat fixed calandria*)

Jenis ini merupakan jenis yang sudah dikenal. Sirkulasinya berjalan seperti digambarkan pada skema (Gambar 2.19). Beberapa syarat penting yang harus dipenuhi untuk membuat sirkulasi ini berjalan.

Jenis panci *Fives Cail-Babcock* (Gambar 2.16) mencakup kisaran 120 - 200 hl (425 - 700 cu.ft.) dalam 20 hl, dan 200 - 600 hl (700 - 2120 cu.ft.) dalam 50 hl. Semuanya dilengkapi dengan kalandria datar, dengan tabung sepanjang 860, 1000, atau 1140 mm (34, 39, atau 45 inci). Tabung tersebut berbahan baja anti karat (*stainles steel*), S430, berdiameter 94,4 X 97,4 mm. Rasio permukaan pemanas untuk volumenya pada semua model adalah 6, 7, atau 8 m²/m³ (1,8 , 2,1 , atau 2,4 sq.ft./cu.ft.), untuk tabung dengan panjang 860, 1000, dan 1140 mm.



Gambar 2.17 *Fixed-calandria pan with inclined tube-plates* (Hugot, 1986)

(b) Kalandria pelat miring (*inclined-plate calandria*)

Kalandria jenis ini dapat berbentuk tetap atau tergantung, dan pelatnya dapat berbentuk miring pada sudut yang sama, atau pelat bawah dapat ditempatkan pada sudut yang lebih tajam dari piringan atas. Para insinyur Prancis umumnya menggunakan sudut 25° untuk jenis *fixed* dan $10-25^\circ$ untuk jenis *suspended* (Gambar 2.17). Tujuan rancangan pelat atas (*upper plate*) ini adalah untuk membantu pencucian dan pembersihan *massecuite* yang masih tertinggal diplat setelah digunakan (*each charge*). Sementara untuk pelat bawah, hal ini ditujukan untuk mengkompensasi hilangnya permukaan pemanas dan volume kalandria karena adanya *dish* dipermukaan atas, tanpa meningkatkan volume yang diperlukan untuk *graining*. Pada saat yang sama, hal ini memungkinkan dasar kalandria untuk mengikuti bentuk dasar panci.

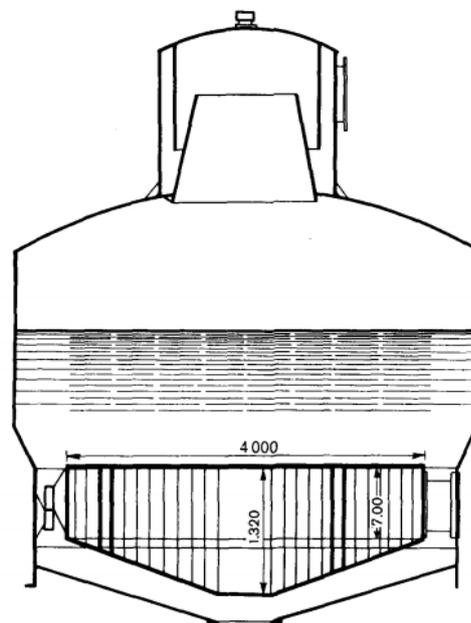
Rancangan ini umumnya digunakan di pabrik-pabrik gula bit. Namun, rancangan tersebut tidak disarankan kerucut negatif *upper plate*. Karena kalandria dengan *flat plate* tidak menguntungkan dari sisi pencucian (biasanya hanya menjadi pertimbangan kedua). Selain itu, kerucut itu menyebabkan hilangnya

permukaan pemanas dan memerlukan kenaikan volume *graining* yang tidak diharapkan.

Kerucut positif pada pelat bawah memungkinkan peningkatan bermanfaat (*useful gain*) pada permukaan pemanas dan penurunan bermanfaat (*useful decrease*) pada volume *graining*.

(c) **Panci kalandria mengambang (*floating*)**

Panci kalandria mengambang dapat dilihat pada Gambar 2.18. Desain ini telah lama ada, namun memiliki kekurangan dibagian tengahnya yang mirip dengan bejana evaporator. Hal ini, dengan ruang melingkarnya (*annular*), membentuk dua lintasan yang mengakibatkan penurunan *massecuite*. Pembagian arus *massecuite* menjadi dua porsi ini menciptakan efek merugikan ketika terjadi zona meragukan *intermediate* ketika arah aliran tidak pasti, dua lintasan tertutup disediakan, yang tidak memungkinkan terjadinya sirkulasi bebas.



Gambar 2.18 *Floating-calandria pan (Fives-Hugot)* (Hugot, 1986)

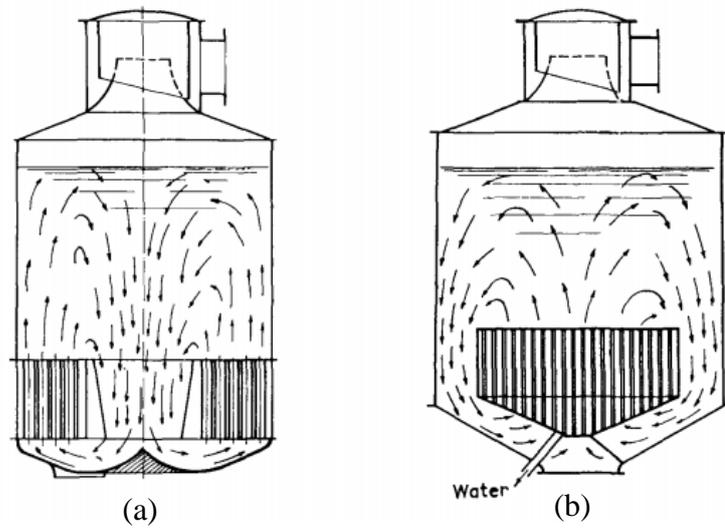
Memandang bahwa justru akan menguntungkan jika keunggulan alami kalandria mengambang justru ditonjolkan, dan kekurangan-kekurangan yang ada

dihilangkan. Untuk itu, dengan bantuan *Fives Lille-Cail*, ia merancang panci *Fives-Hugot* (Gambar 2.18), dimana permukaan pemanas (*heating surface*) ditengah panci dinaikkan dengan mengadopsi kalandria dengan lempengan dasar berbentuk *cone* dan lempengan atas datar. *Massecuite* yang dihasilkan kemudian diberikan ruang lintas bagian berbentuk melingkar (*annular ample cross-section*) yang dirancang dan dihitung secara matematis. *Massecuite* tersebut di tengah panci kemudian menerima input panas maksimal dan daya angkat yang otomatis tercipta, lalu menurun ke seluruh sisi disepanjang dinding luar dingin panci tersebut (Gambar 2.19 a dan b).

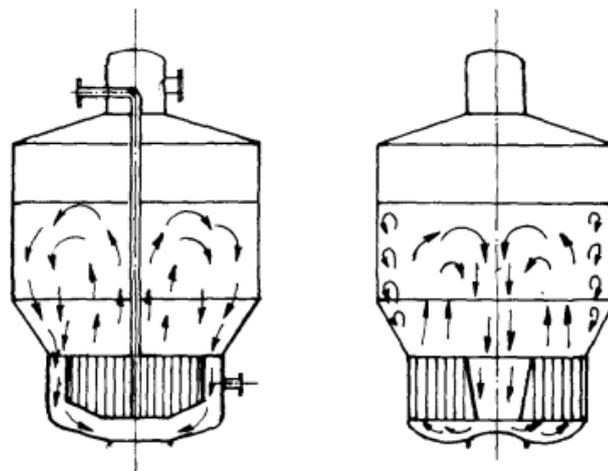
Pengaturan ini berfungsi positif untuk memperbesar badan panci di atas kalandria (Gambar 2.20), selanjutnya *massecuite* turun secara alami dalam ruang melingkar (*annular*), sementara dengan kalandria tetap (*fixed*), *massecuite* cenderung membentuk *eddy* dan *vortex* di dekat dinding panci. Penurunan disepanjang dinding luar adalah faktor yang menguntungkan.

Agar tidak membatasi sirkulasi, uap yang masuk ke dalam panci dihubungkan dengan pipa yang memasuki *save-all* dan menurun secara vertikal ke tengah kalandria. Pengaturan ini amat membantu memfasilitasi distribusi uap kalandria, dan lokasi dari outlet gas non-kondensabel.

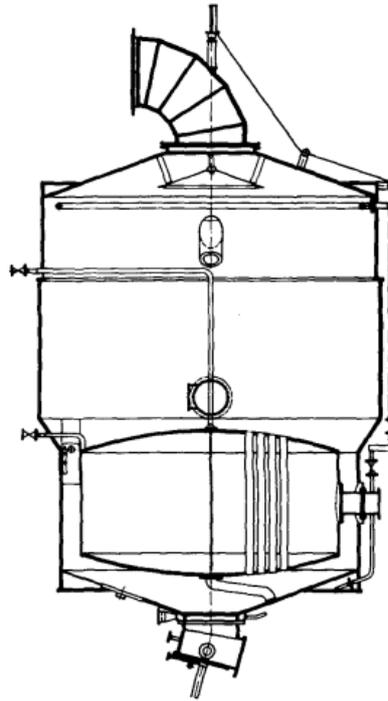
Karena alasan yang sama pula, penyematan kalandria ke dinding panci dipengaruhi pula oleh tiga braket yang sangat sempit.



Gambar 2.19 (a) *Circulation of massecuite in a fixed-calandria pan,*
 (b) *Circulation of massecuite in a floating-calandria pan.*
 (Hugot, 1986)



Gambar 2.20 *Circulation of massecuite in pan with enlarged body; comparison of floating and fixed calandria* (Hugot, 1986)



Gambar 2.21 *Pan with lenticular calandria (B.M.A)* (Hugot, 1986)

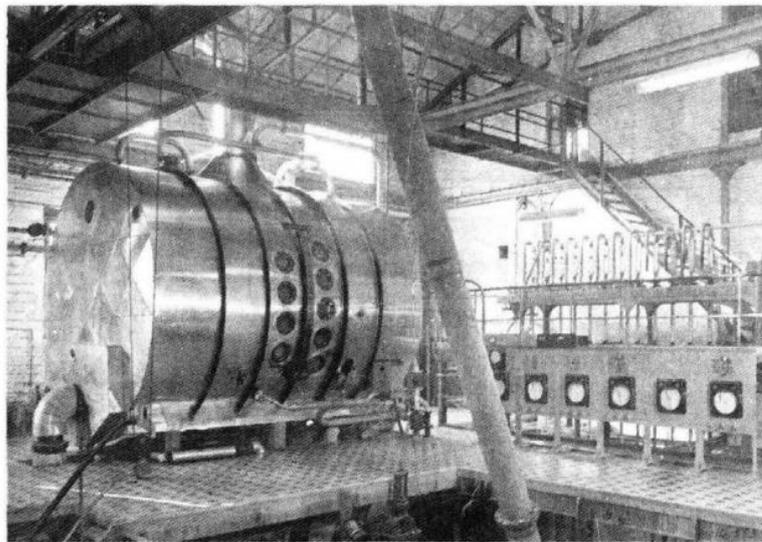
Fives Cail- Babcock kini tidak lagi memproduksi panci kalandria mengambang biasa. Saat ini perusahaan tersebut memproduksi produk dengan kalandria tidak berbentuk silinder dan *cone*, namun berbentuk lentikular (seperti kacang) (Gambar 2.21). Lempengan tabung atas dan bawah kalandria tersebut memiliki suatu objek yang berfungsi memfasilitasi sirkulasi *massecuite*, yang pada bagian atasnya, mengalir lebih bebas menuju *downtake* luar, dan diarahkan lebih baik ke dinding panci; sementara di bawah kalandria, ruang *massecuite* lebih dekat dengan dasar panci, sehingga mengurangi volume *footing*, dan memberikan aliran positif lebih banyak kembali ke tabung kalandria. Tabung yang lebih panjang di bagian tengah mendorong sirkulasi yang lebih aktif di zona tersebut, serta memfasilitasi aliran *massecuite* ke luar.

(d) Panci horizontal (*Horizontal pan*)

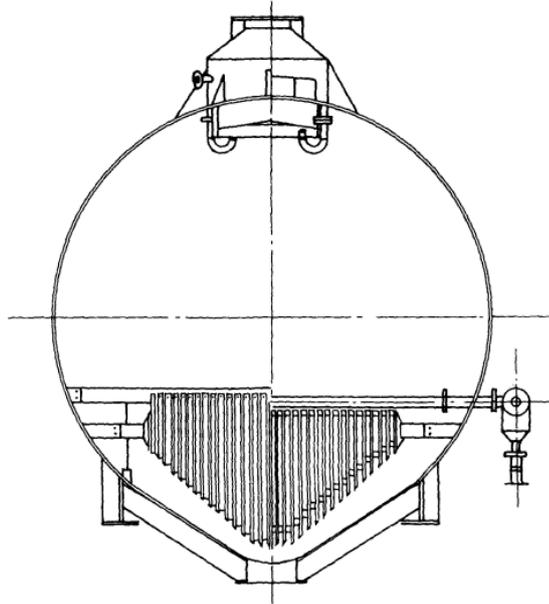
Fives lille-Cail pada 1963 telah memasarkan sebuah panci dengan konsep yang berbeda (Gambar 2.22 dan 2.23). Panci ini tidak lagi berbentuk poros

simetris, namun sebuah bidang simetris (*a plane of symmetry*). Bentuknya memungkinkan volume *graining* yang lebih rendah, yaitu sebesar 26%, tinggi *massecuite* diatas kalandria sekitar 1,5 m (5 kaki), dan sirkulasi yang sangat menguntungkan yang tidak hanya disebabkan oleh bentuknya, namun juga berkat pengaturan kalandria tersebut (Gambar 2.23). Rasio bagian menurun hingga bagian naik, dipuncak kalandria, adalah 0,8. Pelepasan *massecuite* dihasilkan oleh tiga *opening* yang terletak dibidang simetris tadi, yang karenanya dapat berjalan cepat: yaitu sekitar 10 menit. Permukaan pemanas memberikan rasio 6 - 8 m²/m³ (1,8 - 2,4 sq.ft./cu.ft).

Rancangan panci ini harus diletakkan dengan poros berada disudut yang tepat yang sejajar dengan panci lain, karena jika tidak akan memakan tempat terlalu banyak jika diarahkan ke arah lain, dan juga akan memerlukan lebih banyak tempat untuk memindahkan kalandria tersebut. Hal ini mengharuskan adanya lubang (*chutes*) dari *end discharge opening*, untuk mengarahkan *massecuite* ke penerima longitudinal.



Gambar 2.22 *Horizontal pan (Five cail-babcock)* (Hugot, 1986)



Gambar 2.23 *Horizontal pan. Transverse section* (Hugot, 1986)

Panci ini menawarkan keunggulan *ready conversion* ke panci desain *Fives Cail – Babcock*. Akan tetapi, panci ini tidak lagi diproduksi.

2.3. Alat Penukar Kalor

Menurut Bizzy dan Setiadi (2013) bahwa tujuan dari alat penukar kalor terkait kontrol suatu sistem temperatur dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya. Semua alat penukar kalor menggunakan elemen–elemen konduksi termal yang pada umumnya berupa tabung *tube* atau plat untuk memisahkan dua fluida, walaupun ada banyak perbedaan ukuran, tingkat kesempurnaan, dan perbedaan jenis alat penukar kalor. Salah satu dari elemen tersebut dapat memindahkan energi kalor ke elemen yang lainnya.

2.3.1. Klasifikasi Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok sebagai berikut :

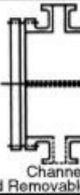
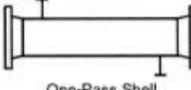
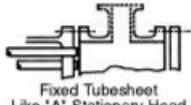
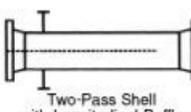
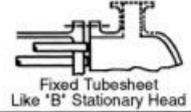
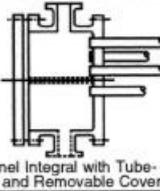
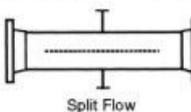
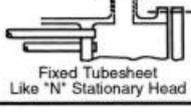
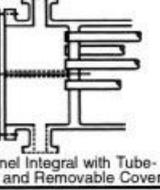
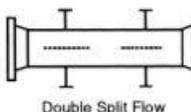
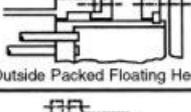
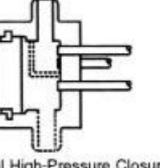
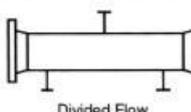
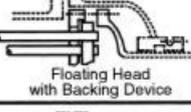
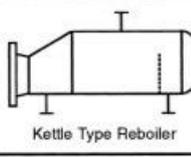
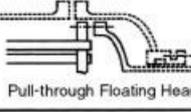
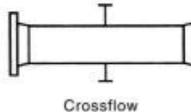
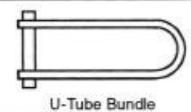
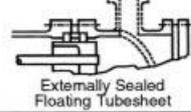
1. Berdasarkan proses perpindahan kalor
 - Perpindahan kalor secara langsung
 - Perpindahan kalor secara tak langsung
2. Berdasarkan konstruksi
 - Konstruksi tabung (tubular)
 - Konstruksi tipe pelat
 - Konstruksi dengan luas permukaan diperluas
 - Konstruksi regeneratif
3. Berdasarkan jenis aliran
 - Alat penukar kalor aliran sejajar (*Parallel Flow*)
 - Alat penukar kalor aliran berlawanan (*Counter Flow*)
 - Alat penukar kalor aliran silang (*Cross Flow*)
4. Berdasarkan pengaturan aliran
 - Aliran dengan *single pass*
 - Aliran dengan *multi pass*
5. Berdasarkan banyaknya fluida yang digunakan
 - Dua jenis fluida
 - Tiga jenis fluida atau lebih
6. Berdasarkan mekanisme perpindahan kalor
 - Konveksi satu fasa
 - Konveksi dua fasa
 - Kombinasi perpindahan kalor secara konveksi dan radiasi

Berdasarkan standar “Tubular Exchanger Manufacturers Association” (TEMA) terdapat 3 (tiga) macam kelas alat penukar kalor :

1. Kelas R, untuk peralatan yang bekerja dengan kondisi berat. Biasa digunakan di industri minyak.
2. Kelas C, dibuat untuk penggunaan secara umum. Didasarkan pada segi ekonomis dan ukuran kecil, digunakan untuk proses – proses umum industri.
3. Kelas B, untuk pelayanan proses kimia.

Standar TEMA juga mengklasifikasikan alat penukar kalor menurut tipe *stationary head*, *shell* dan *rear head* kedalam tiga kode huruf, yaitu :

1. Huruf pertama : A, B, C, N dan D Menunjukkan tipe ujung muka.
2. Huruf kedua : E, F, G, H, J, K dan X Menunjukkan tipe *shell*.
3. Huruf ketiga : L, M, D, U, P, S, T dan W Menunjukkan tipe ujung belakang.

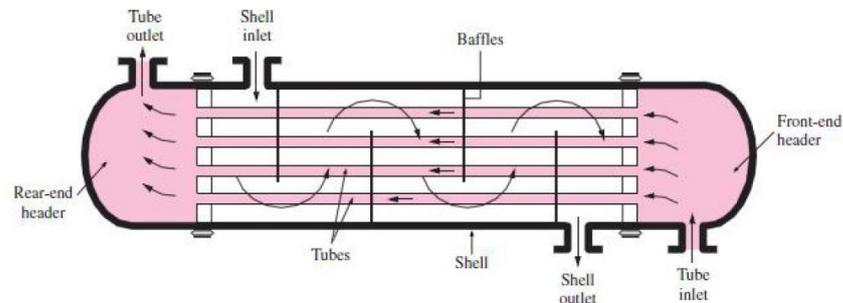
	Front-End Stationary Head Types	Shell Types	Rear-End Head Types
A	 Channel and Removable Cover	E  One-Pass Shell	L  Fixed Tubesheet Like 'A' Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F  Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M  Fixed Tubesheet Like 'B' Stationary Head
C	 Channel Integral with Tube-Sheet 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 2.24 Standar TEMA berdasarkan tipe bagian alat penukar Kalor (Bizzy & Setiadi, 2013)

2.3.2. Alat Penukar Kalor Tipe *Shell and Tube*

Dilihat dari konstruksinya alat penukar kalor tipe *shell* dan *tube* dicirikan dengan adanya sekumpulan *tube* dipasangkan di dalam *shell* yang berbentuk silinder dan fluida mengalir secara terpisah dimasing-masing sisi *shell* dan *tube*

yang mengakibatkan terjadinya pertukaran kalor (Bizzy & Setiadi, 2013). Pada shell dipasang penghalang (*baffle*) agar aliran dalam *shell* turbulen dan untuk memperbesar koefisien perpindahan panas konveksi.



Gambar 2.25 Alat penukar Kalor tipe shell and tube (Bizzy& Setiadi, 2013)

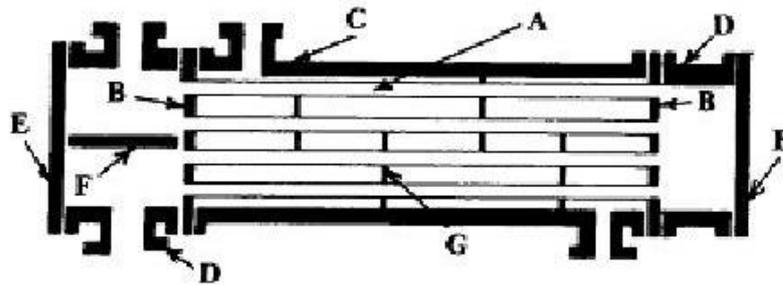
Dalam berbagai macam industri alat penukar kalor jenis *shell* dan *tube* paling banyak digunakan karena alat paling sederhana dibandingkan alat penukar kalor jenis lainnya (Ihsan, 2015), karena :

- a. Terdiri dari sebuah *tube* dan *shell*, dimana *tube* terletak secara konsentrik yang berada di dalam *shell*
- b. Dapat bekerja dalam tekanan dan temperatur yang tinggi
- c. Dapat digunakan pada satu aliran volume yang besar
- d. Dapat bekerja dengan fluida kerja yang mempunyai perbedaan satu aliran volume yang besar
- e. Tersedia dalam berbagai bahan atau material
- f. Kontruksi yang kokoh dan aman
- g. Secara mekanis dapat beroperasi dengan baik dan handal (*reliability* tinggi).

Untuk alat penukar kalor ini fluida panas mengalir di dalam *tube* sedangkan fluida dingin di dalam *shell*. adapun 3 tipe dari alat penukar kalor jenis *shell* dan *tube* di lihat dari alirannya yaitu *single pass* jika kedua aliran fluida melintasi penukar kalor hanya sekali, *parallel flow* jika kedua fluida mengalir dengan arah yang sama, dan *counter flow* jika kedua fluida mengalir dengan arah yang berlawanan.

2.3.3. Komponen – komponen Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor tipe shell and tube memiliki komponen – komponen yang sangat berpengaruh pada konstruksinya. Adapun komponen – komponen dari alat penukar kalor tipe ini adalah :



Gambar 2.26 Komponen alat penukar kalor tipe shell and tube (Bizzy & Setiadi, 2013)

- | | |
|-----------------------------------|-------------------|
| A. Tubes | E. Channel Covers |
| B. Tube sheets | F. Pass divider |
| C. Shell and shell side nozzles | G. Baffles |
| D. Tube side channels and nozzles | |

2.4. Perpindahan Panas

Perpindahan panas disebabkan karena adanya perbedaan suhu pada tempat-tempat tersebut yang mengakibatkan proses berpindahnya energi dari suatu tempat ke tempat lainnya (Indriatama, 2016). Proses perpindahan panas dibedakan menjadi tiga yaitu perpindahan panas radiasi, perpindahan panas konveksi, dan perpindahan panas konduksi. Ketiganya dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Perpindahan panas radiasi

Merupakan proses perpindahan dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah apabila benda-benda tersebut terpisah didalam suatu ruangan, bahkan bila terdapat diruangan hampa diantaranya. Perpindahan panas radiasi sebagaimana tersebut di atas menggunakan rumus (2.1) sebagai berikut:

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.1)$$

Dimana :

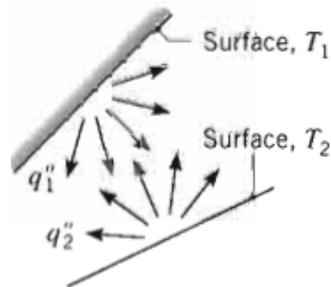
Q_r = laju perpindahan panas radiasi (W)

ε = Emisivitas

σ = konstanta Stefan Boltzman = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A = luas permukaan (m^2)

T = temperatur (K)



Gambar 2.27 Prinsip perpindahan panas radiasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju perpindahan kalor secara radiasi

1. Tetapan Stefan Boltzmann
2. Luas permukaan A , makin besar luas permukaan makin cepat perpindahan kalor.
3. Suhu, makin besar beda suhu makin cepat perpindahan kalor.
4. Emisivitas.

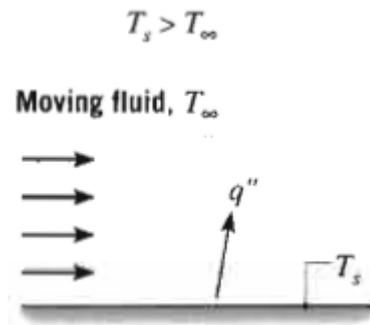
2. Perpindahan panas konveksi

Perpindahan panas konveksi terjadi akibat berpindahnya energy dengan kerja gabungan antara konduksi panas, penyimpanan energy, dan proses mencampur. Proses tersebut bergantung pada viskositas fluida yang terjadi pada permukaan padat, cair, dan gas. karena viskositas dapat mempengaruhi laju perpindahan energi di daerah diding, disamping ketergantungannya pada konduktivitas termal, kalor spesifik, dan densitas. Seperti persamaan 2.2 dibawah ini.

$$Q_{cv} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Dimana :

- Q_{cv} = laju perpindahan panas konveksi (W)
 h = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2.K$)
 A = luas permukaanampang (m^2)
 ΔT = perubahan atau perbedaan suhu (K)



Gambar 2.28 Prinsip perpindahan panas konveksi

Perpindahan panas konveksi diklasifikasikan :

- Konveksi bebas (natural, *free convection*)

Konveksi bebas terjadi akibat adanya gaya apung alami apabila densitas fluida di dekat permukaan perpindahan kalor berkurang sebagai akibat proses pemanasan. Gerakan fluida (baik fluida cair maupun gas) akibat gaya apung tidak akan terjadi jika tidak mengalami gaya dari luar seperti gaya gravitasi.

- Konveksi paksa (*forced convection*)

Konveksi paksa umumnya diterapkan pada industri maupun otomotif digunakan sebagai alat untuk memindahkan panas. Terjadinya konveksi paksa karena adanya gaya paksa yang menyebabkan fluida mempunyai kecepatan dan bergerak.

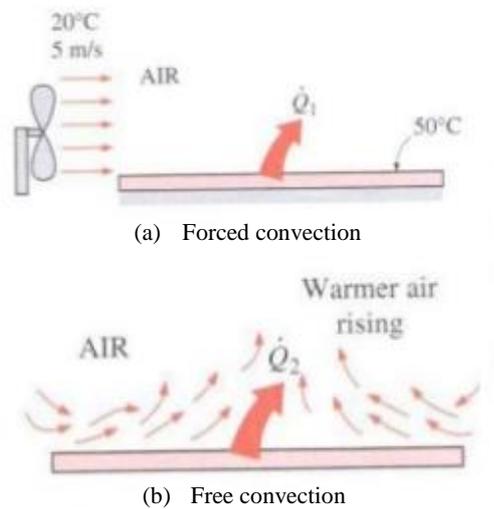
Perpindahan panas konveksi yang terjadi gerakan pencampuran karena pengaruh mekanis.

- Konveksi perubahan paksa

Terjadi perubahan fase pada saat konveksi terjadi.

Pada konveksi ini terdapat 2 jenis :

- ❖ Konveksi perubahan fase bebas.
- ❖ Konveksi perubahan fase paksa.



Gambar 2.29 Klasifikasi konveksi : a) konveksi paksa, b) konveksi bebas

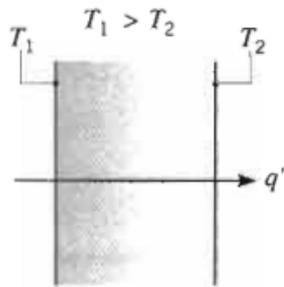
3. Perpindahan panas konduksi

Perpindahan panas konduksi (hantaran konduksi) yaitu perpindahan kalor melalui suatu bahan yang tidak disertai perpindahan bahan tersebut. Proses hantaran kalor ini disebabkan oleh molekul-molekul bahan logam yang suhunya lebih tinggi akan bergetar lebih cepat dan membentur molekul-molekul lain yang suhunya lebih rendah. Seperti persamaan 2.3 dibawah ini.

$$Q_k = -k \cdot A \cdot \Delta T / \Delta x \quad (2.3)$$

Dimana:

- Q_k = laju perpindahan panas (W)
- k = konduktivitas thermal bahan ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- A = luas penampang dimana panas mengalir (m^2)
- $\Delta T / \Delta x$ = gradient suhu pada penampang, atau laju perubahan suhu (T) terhadap jarak dalam arah aliran panas (x)



Gambar 2.30 Prinsip perpindahan panas konduksi

2.5. Cara-cara (modus) dalam perancangan alat penukar kalor (*heat exchanger*) ada 2 cara atau modus dalam melakukan perancangan, yaitu:

1. Modus desain

Pada modus ini pelaksanaan perancangan dilakukan untuk mendapatkan bentuk dari alat yang akan dirancang yang berarti bahwa nilai thermal (Q) telah diketahui untuk mendapatkan luas permukaan thermalnya (A). sehingga menggunakan persamaan yang digunakan rumus 2.4.

$$A = \frac{Q}{U.F.LMTD_{CF}} \quad (2.4)$$

2. Modus simulasi

Pada modus ini berkebalikan dengan modus desain yaitu pada perancangan telah diketahui bentuk dari permukaan thermal (A) sehingga perancang mencari nilai catu kalor (Q) sehingga persamaan yang digunakan rumus 2.5.

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot LMTD_{CF} \quad (2.5)$$

Dimana :

- Q = laju perpindahan panas (W)
- U = koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2.K$)
- A = luas permukaan (m^2)

F = faktor koreksi LMTD
 LMTD = beda temperatur *logarithmic* ($^{\circ}\text{C}$)

2.6. Metode analisa pada alat penukar kalor

Pada penukar kalor metode analisis thermal ada 2, yaitu: metode LTMD dan ϵ -NTU.

2.6.1. Metode LTMD (*Log Mean Temperature Differents*)

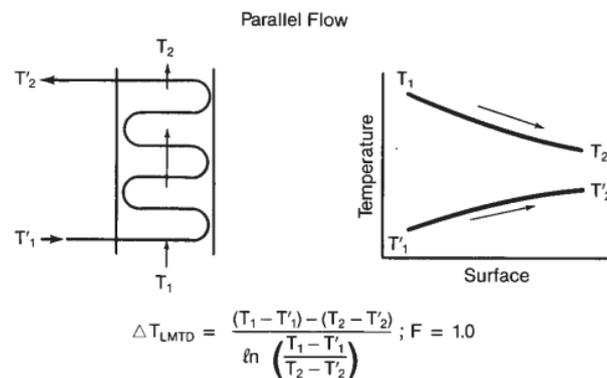
Dilihat dari aliran yang terjadi ada 2 aliran, yaitu: aliran sederhana dan aliran kompleks.

1. Metode LMTD pada aliran sederhana.

Pada aliran ini metode LMTD menggunakan :

➤ Metode LMTD_{PF} (*Parallel Flow*)

Parallel flow adalah dimana aliran fluida panas dan aliran fluida dingin mengalir sejajar atau dengan arah yang sama. Yang dapat dijelaskan dengan gambar 2.31.



Gambar 2.31 LMTD_{PF} (*Parallel Flow*)

Untuk laju perpindahan panasnya menggunakan rumus 2.6.

$$Q = U \cdot A \cdot \text{LMTD}_{\text{PF}} \quad (2.6)$$

Dimana:

Q = laju perpindahan panas (W)

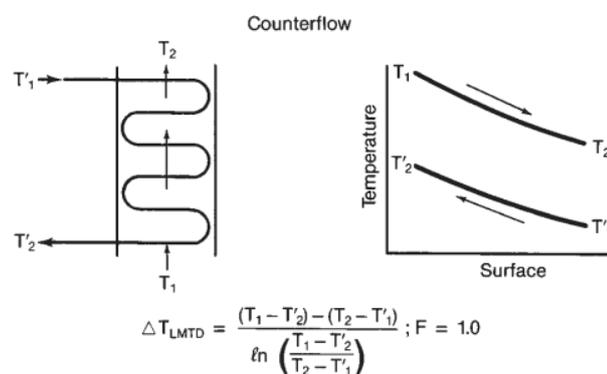
U = koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/m².K)

A = luas permukaan (m²)

LMTD_{PF} = beda temperatur *logarithmic parallel flow* (°C)

➤ Metode LMTD_{CF} (*counter flow*)

Counter flow adalah dimana aliran fluida panas dan aliran fluida dingin mengalir dengan arah yang berlawanan.



Gambar 2.32 LMTD_{CF} (*counter flow*)

Untuk laju perpindahan panasnya menggunakan rumus 2.7.

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD_{CF} \quad (2.7)$$

Dimana:

Q = laju perpindahan panas (W)

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/m².K)

A = luas permukaan (m²)

LMTD_{CF} = beda temperatur *logarithmic counter flow* (°C)

2. Metode LMTD pada aliran kompleks

Metode pada aliran ini diasumsikan menggunakan metode LMTD_{CF} (*cross flow*) karena pada aliran ini sulit untuk menentukan distribusi suhu pada penampang panas. Tetapi metode ini perlu dikoreksi dengan nilai F (faktor koreksi). Persamaan yang digunakan pada metode ini dapat dilihat pada gambar 2.32.

Laju perpindahan panas pada metode $LMTD_{CF}$ menggunakan rumus 2.8.

$$Q = U \cdot A \cdot (F \cdot LMTD_{CF}) \quad (2.8)$$

Dimana :

Q = laju perpindahan panas (W)

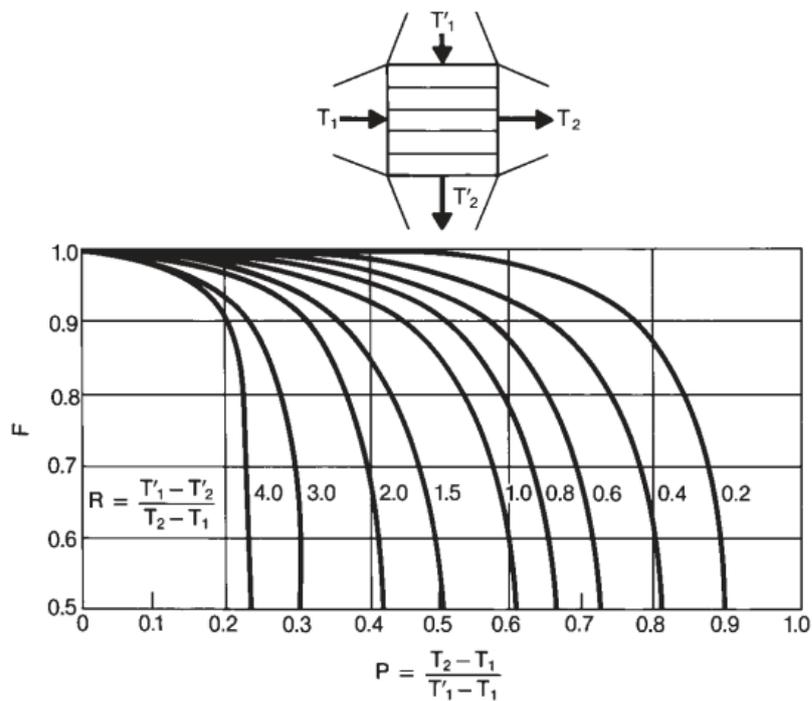
U = koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2.K$)

A = luas permukaan (m^2)

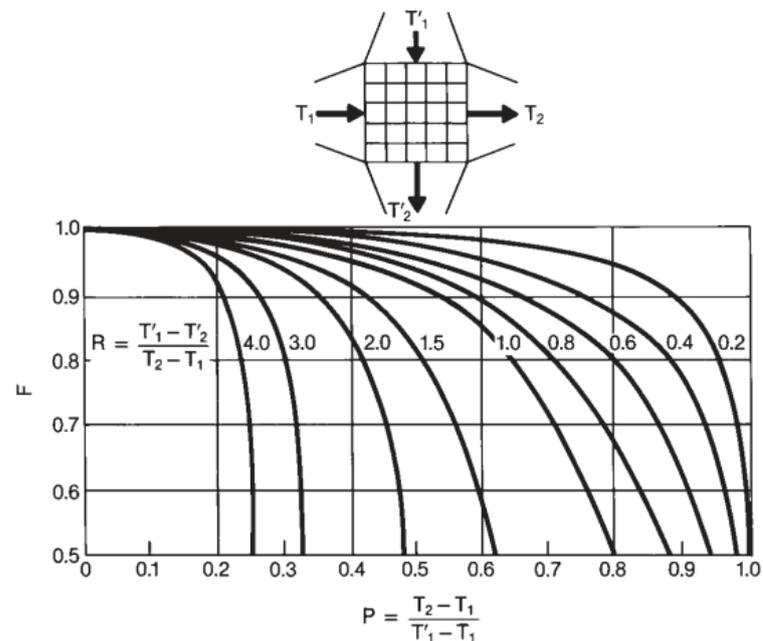
F = faktor koreksi LMTD

$LMTD_{CF}$ = beda temperatur *logarithmic cross flow* ($^{\circ}C$)

Untuk mendapatkan nilai faktor koreksi (F) pada metode $LMTD_{CF}$ ini didapatkan dengan menggunakan grafik pada gambar 2.33 dan 2.34.



Gambar 2.33 Faktor koreksi penukar kalor satu laluan, aliran melintang, salah satu fluida tercampur dan yang lain tidak tercampur.



Gambar 2.34 Faktor koreksi penukar kalor satu laluan, aliran melintang, kedua fluida tidak tercampur.

2.6.2. Metode NTU

Metode dengan perhitungan LMTD dapat digunakan bila keempat suhunya diketahui, yaitu suhu fluida masuk (fluida panas dan dingin) dan suhu fluida keluar (fluida panas dan dingin). Akan tetapi, terdapat beberapa kejadian pada alat penukar kalor dimana salah satu suhu fluida tidak diketahui, maka digunakan metode NTU yang diperkenalkan oleh Nusselt (Tuapetel, dkk, 2018).

Menurut Sudia (2016) bahwa metode NTU didasarkan pada bilangan tak berdimensi yang disebut dengan efektifitas perpindahan panas. Merupakan rasio antara laju perpindahan panas aktual terhadap laju perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi.

Efektifitas (ϵ) adalah perbandingan laju perpindahan panas sebenarnya pada *heat exchanger* dengan laju perpindahan panas maksimum pada *heat exchanger* yang dimungkinkan (Rosady & Bambang, 2014). Atau secara matematis dapat dituliskan pada rumus 2.9.

$$\text{Efektifitas} = \varepsilon = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{maksimum}}} \quad (2.9)$$

Dalam alat penukar kalor aliran sejajar ΔT_{max} tidak pernah tercapai, sedangkan pada aliran berlawanan ΔT_{max} tercapai. Kemudian perkalian antara laju aliran massa dengan panas jenis disebut kapasitas panas yang dinotasikan dengan C.

$$C = m \cdot c_p \quad (2.10)$$

Untuk kapasitas fluida panas dituliskan pada persamaan 2.11.

$$m_h \cdot c_{ph} = C_h \quad (2.11)$$

dan untuk kapasitas fluida dingin dituliskan pada persamaan 2.12.

$$m_c \cdot c_{pc} = C_c \quad (2.12)$$

Perpindahan panas maksimum yang terjadi berdasarkan teori dihitung dengan menggunakan rumus 2.13.

$$Q_{\text{max}} = (m \cdot c_p)_{\text{min}} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.13)$$

Dimana :

Q_{max} = perpindahan panas maksimum (W)

m = massa persatuan waktu (kg/s)

$C_{p_{\text{min}}}$ = panas jenis minimum (J/kg.°C)

T_{hi} = suhu panas masuk (°C)

T_{ci} = suhu dingin masuk (°C)

Maka berdasarkan persamaan yang telah dituliskan keefektifan alat penukar kalor menjadi:

$$\varepsilon = \frac{m_h c_{ph}(T_{hi} - T_{ho})}{(m c_p)_{\text{min}} (T_{hi} - T_{ci})} \text{ dan } \varepsilon = \frac{m_c c_{pc}(T_{co} - T_{ci})}{(m c_p)_{\text{min}} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.14)$$

Bila $(m \cdot c_p)_{\text{min}} = m_h \cdot c_{ph}$, maka keefektifan ε menjadi,

$$\varepsilon = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}} \quad (2.15)$$

Bila $(m \cdot c_p)_{\min} = m_c \cdot c_{pc}$, maka keefektifan ε menjadi,

$$\varepsilon = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ho}} \quad (2.16)$$

$$Q = \varepsilon \cdot c_{\min} (T_{hi} - T_{ci}) \text{ dimana } c_{\min} = (m \cdot c_p)_{\min} \quad (2.17)$$

2.6.3. Keefektifan alat penukar kalor aliran sejajar

Perhitungan alat penukar kalor dengan metode LMTD, didapatkan persamaan 2.18.

$$\ln \left(\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \right) = -U a \left(\frac{1}{m_h c_{ph}} - \frac{1}{m_c c_{pc}} \right) \quad (2.18)$$

Dimana $C_h = m_h \cdot c_{ph}$ dan $C_c = m_c \cdot c_{pc}$ maka didapatkan persamaan 2.20.

$$\ln \left(\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \right) = -U A \left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c} \right) \quad (2.19)$$

$$\left(\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \right) = e^{-U A \left(\frac{1}{C_h} - \frac{1}{C_c} \right)} \quad (2.20)$$

Sebelumnya telah diketahui bahwa,

$$dq = U dA (T_h - T_c) \quad (2.21)$$

Berdasarkan neraca entalpi bahwa dq menggunakan persamaan 2.23.

$$dT_h = -\frac{dQ}{m_h c_{ph}} ; \quad dT_c = -\frac{dQ}{m_c c_{pc}} \quad (2.22)$$

$$Q = m_h c_{ph} (T_{ho} - T_{hi}) = m_c c_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \quad (2.23)$$

Dengan mensubstitusikan C_h dan C_c maka didapatkan persamaan 2.25.

$$C_h(T_{hi} - T_{ho}) = C_c(T_{co} - T_{ci}) \quad (2.24)$$

$$T_{co} = T_{ci} + \frac{C_h}{C_c} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.25)$$

Persamaan di atas diselesaikan menggunakan manipulasi matematika, dimana pada ruas kiri dan kanan masing-masing ditambahkan $T_{ho}-T_{ho}$ dan $T_{hi}-T_{hi}$ maka didapatkan persamaan 2.26.

$$T_{co} + T_{ho} - T_{ho} = T_{ci} + T_{hi} - T_{hi} + \frac{C_h}{C_c} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.26)$$

Dengan membagi persamaan diatas dengan $-(T_{hi} - T_{ci})$ maka didapatkan persamaan 2.27 dan 2.28.

$$-(T_{ho} - T_{co}) + T_{ho} = -(T_{hi} + T_{ci}) + T_{hi} + \frac{C_h}{C_c} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.27)$$

$$-(T_{ho} - T_{co}) = -(T_{hi} + T_{ci}) + T_{hi} - T_{ho} + \frac{C_h}{C_c} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.28)$$

Dengan membagi persamaan diatas dengan $-(T_{hi} - T_{ci})$ maka didapatkan persamaan 2.29.

$$\frac{(T_{ho}-T_{co})}{(T_{hi}-T_{ci})} = 1 - \frac{(T_{hi}-T_{ho})}{(T_{hi}-T_{ci})} - \frac{C_h}{C_c} \frac{(T_{hi}-T_{ho})}{(T_{hi}-T_{ci})} \quad (2.29)$$

$$\text{Diketahui bahwa : } C_h = C_{\min} = \frac{(T_{hi}-T_{ho})}{(T_{hi}-T_{ci})} \quad (2.30)$$

Maka didapatkan persamaan 2.31 dan 2.32

$$\text{Exp} \left[-\frac{UA}{C_h} \left(1 + \frac{C_h}{C_c} \right) \right] = 1 - \varepsilon - \frac{C_h}{C_c} (\varepsilon) \quad (2.31)$$

$$\text{Exp} \left[-\frac{UA}{C_h} \left(1 + \frac{C_h}{C_c} \right) \right] = 1 - \varepsilon \left(1 + \frac{C_h}{C_c} \right) \quad (2.32)$$

Sehingga nilai ε (efektivitas) didapatkan dengan rumus 2.33.

$$\varepsilon = \frac{1 - \text{exp} \left[-\frac{UA}{C_h} \left(1 + \frac{C_h}{C_c} \right) \right]}{1 + \frac{C_h}{C_c}} \quad (2.33)$$

Sedangkan untuk $C_c = C_{\min}$

Maka nilai ε didapatkan persamaan 2.34.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA}{C_h}\left(1 + \frac{C_c}{C_h}\right)\right]}{1 + \frac{C_c}{C_h}} \quad (2.34)$$

Maka dapat disimpulkan untuk nilai ε dari aliran sejajar menggunakan rumus 2.37.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA}{C_h}\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right]}{1 + \frac{\min}{C_{\max}}} \quad (2.35)$$

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (2.36)$$

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.37)$$

Dimana:

ε = Efektifitas

U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas permukaan (m^2)

C_h = Kapasitas panas pada fluida panas ($J/kg \cdot ^\circ C$)

C_{\min} = Kapasitas panas minimum ($J/kg \cdot ^\circ C$)

C_{\max} = Kapasitas panas maksimum ($J/kg \cdot ^\circ C$)

Keefektifan dari sebuah alat penukar kalor memiliki hubungan dengan bilangan tanpa dimensi yaitu $U.A/C_{\min}$ dapat disebut dengan NTU (*Number of Transfer Unit*), bilangan ini dituliskan pada persamaan 2.38.

$$NTU = \frac{U.A}{C_{\min}} = \frac{U.A}{(mC_p)_{\min}} \quad (2.38)$$

Perbandingan dari kapasitas panas atau C_{\min}/C_{\max} juga memiliki hubungan dalam penentuan nilai efektifitas dari sebuah alat penukar kalor dapat menggunakan rumus 2.39.

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2.39)$$

Dapat dituliskan pada persamaan 2.40 bahwa efektifitas dari sebuah alat penukar kalor merupakan fungsi NTU dan C.

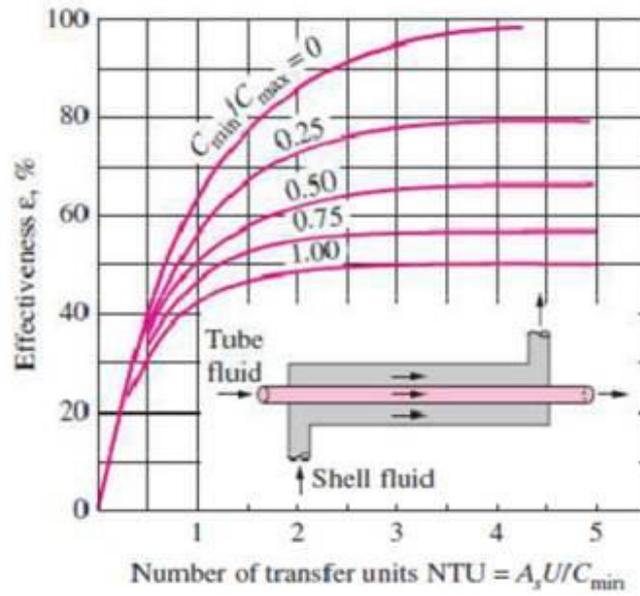
$$\varepsilon = \text{fungsi} \left(\frac{U.A}{(m c_p)_{\min}}, \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) = \text{fungsi}(NTU, C) \quad (2.40)$$

Adapun hubungan antara alat efektifitas, alat penukar kalor dengan fungsi NTU dan C dapat dilihat pada tabel 2.1.

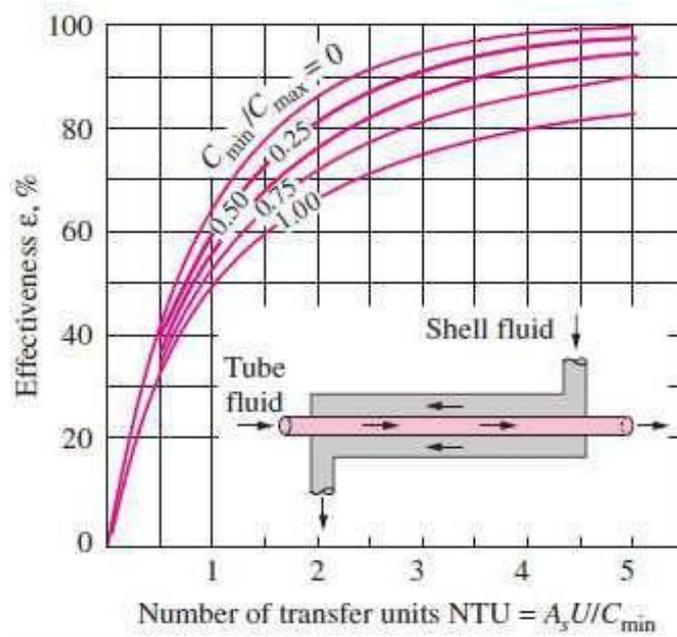
Tabel 2.1 Hubungan efektifitas dengan NTU dan C

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 <i>Double pipe:</i> Parallel-flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$
2 <i>Shell and tube:</i> One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1}$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i> Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1] \right\}$
C_{\max} mixed, C_{\min} unmixed	$\varepsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp[-c(1 - \exp(-NTU))])$
C_{\min} mixed, C_{\max} unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c NTU)] \right\}$
4 <i>All heat exchangers with c = 0</i>	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Dengan melihat hubungan antara efektifitas sebagai fungsi dari NTU dan C, nilai dari efektifitas dapat ditentukan melalui grafik yang menunjukkan hubungan tersebut. Beberapa grafik efektifitas dari beberapa alat penukar kalor dapat dilihat pada gambar 2.35 dan 2.36.



Gambar 2.35 Grafik efektifitas untuk aliran sejajar



Gambar 2.36 Grafik efektifitas untuk aliran berlawanan