

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

A. Tinjauan Pustaka

Kasmara dan Marausna (2020), terjadinya kehilangan gaya angkat dapat disebabkan oleh perubahan bentuk wings terutama pada bagian leading edge akibat kontaminasi. Kontaminasi terjadi dalam bentuk penumpukan partikel es pada leading edge dan mengubah aliran udara yang melewati wing menjadi aliran turbulen. Diperlukan sebuah perangkat anti icing untuk mengatasi permasalahan kontaminasi tersebut dengan memanfaatkan gas buang engine agar dapat mengurangi konsumsi daya listrik yang digunakan dalam sistem pemanas untuk leading edge. Hasil penelitian menunjukkan perubahan geometri pada rasio diameter coil dapat meningkatkan intensitas aliran sekunder, menciptakan efek turbulensi dan meningkatkan koefisien perpindahan kalor serta mempengaruhi perubahan parameter performa dari heater.

Stephenraj, V., dan Sathishkumar, M. K. (2018), heat exchanger dimana salah satu fluida berfungsi untuk mendinginkan dan fluida lain untuk memanaskan, pengaplikasiannya dalam proses rekayasa ialah intercooler, pre-heater, boiler, dan kondensor di pembangkit listrik. Efisiensi perpindahan panas tergantung pada desain penukar panas seperti rasio pitch, panjang tabung, dan lapisan tabung serta jarak baffle dan propertis fluida panas. Dalam proyek ini efisiensi perpindahan panas ditingkatkan dengan desain baffle penuh dan desain tabung menggunakan metode CFD. Hasil simulasi desain baffle dan tabung sangat optimal untuk laju perpindahan panas. Jenis heat exchanger yang digunakan adalah shell and tube

(straight), untuk mengatasi icing pada karburator tidak menggunakan jenis baffle melainkan jenis compact air.

Zhao, et al. (2017), sistem anti icing harus dihidupkan sebelum menerima perlakuan es. Dengan demikian diharapkan anti icing dapat bekerja dengan baik ketika menerima kondisi es, namun untuk mempercepat kenaikan suhu maka perlu ditambahkan penghambat sehingga aliran didalam sistem anti icing dapat cepat terjadinya kenaikan temperatur.

Li, Haiwang, et al (2017), compact air heat exchanger berjenis snake tube (tubular) dengan aliran menyilang atau cross flow yang dirancang menggunakan Logarithmic Mean Temperature Difference Method (LMTD). Experimental dengan struktur heat exchanger berbahan stainless steel dengan berat 2,04 kg mampu mendinginkan udara bersuhu tinggi dari kompressor dengan tekanan tinggi, didalam gas turbine engine dengan suhu ≤ 200 K dengan ruang terbatas menggunakan udara pendingin dari bypass duct. Hasil experimental menunjukkan bahwa metode desain terbukti akurat dalam memprediksi kinerja heat exchanger compact air untuk jenis struktur yang diteliti, hal ini menunjukkan heat exchanger akan memiliki kemampuan perpindahan panas yang ditingkatkan dengan beban yang lebih rendah dan kepadatan yang lebih tinggi.

Kasmara., J., et al (2016), efektivitas alat penukar kalor (heat exchanger) dengan variasi helical coil tube dimanfaatkan dengan menggunakan panas dari gas buang mesin diesel yang dapat mempengaruhi diameter kumparan helical coil tube, jarak dari kumparan helical coil tube dan putaran mesin diesel. Memanfaatkan gas buang mesin diesel menunjukkan bahwa dari hasil laju perpindahan panas akan

terjadi apabila semakin kecil diameter kumparan dan semakin kecil jarak antar kumparan. Akan tetapi kenaikan temperatur di atas 70 °C akan menurunkan kinerja mesin diesel. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan shell helical coil heat exchanger dapat memaksimalkan pemanfaatan limbah gas untuk memanaskan solar pada berbagai putaran operasional mesin diesel.

Azwinur dan Zulkifli (2019), heat exchanger digunakan untuk mengubah temperatur fluida dengan cara pertukaran panas fluida lain. Heat exchanger dalam bidang pengeringan sudah menjadi kebutuhan untuk mengatasi permasalahan produktifitas pengeringan dengan tujuan untuk mengetahui efektifitas penukar panas secara experimental berdasarkan aliran searah (parallel flow) dengan membandingkan konstruksi yang menggunakan baffle dan tanpa menggunakan baffle dalam upaya optimasi sistem pengeringan. Data pengujian yang diperoleh adalah temperatur input dan output aliran fluida pemanas dan aliran fluida pendingin serta kecepatan aliran. Berdasarkan data hasil penelitian awal menunjukkan bahwa penggunaan baffle mempengaruhi peningkatan temperatur pada alat penukar panas, dimana pada aliran outlet fresh air yang tidak menggunakan baffle menghasilkan temperature sebesar 72°C sedangkan yang menggunakan baffle menghasilkan temperature sebesar 88°C dengan nilai Log Mean Temperature Difference (LMTD) penukar panas tanpa menggunakan baffle lebih tinggi dari pada penukar panas yang menggunakan baffle.

Omprakash Yadav, et al (2018), heat exchanger berjenis tube yang digunakan untuk memanaskan atau mendinginkan, penting untuk pembangkit listrik tenaga panas dan sistem pendingin yang mengontrol keefektivannya. Pada aliran counter

lebih baik dari pada aliran paralel, telah dicoba untuk meningkatkan kinerja heat exchanger pada aliran counter dengan menggunakan swirling fluida dingin didalam tabung luar. Pengaturan experimental menggunakan dua tabung konsentrik yaitu tabung luar dengan material baja ringan dan tabung dalam menggunakan tembaga. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kinerja heat exchanger dengan menggunakan swirling lebih baik jika dibandingkan tanpa menggunakan swirling.

Gnanavel et al. (2020), heat exchanger dengan menambahkan twisted tape insert akan meningkatkan bilangan Reynold dan menjadikan heat transfer menjadi lebih baik. Dengan kenaikan bilangan Reynold maka akan menciptakan aliran sekunder atau turbulance sehingga aliran gas buang akan menjadi lebih lambat alirannya sehingga heat transfer dapat maksimal.

Moya-Rico et al. (2020), penambahan heat exchanger pada sistem heat exchanger untuk meningkatkan laju aliran panas dan faktor gesekan. Dengan meningkatnya faktor gesekan juga dapat meningkatkan performa heat transfer didalam sistem anti icing. Kemudian ada faktor lain yang dapat menjadikan sistem anti icing menjadi lebih baik, yaitu dengan menambahkan katalis berupa nanofluid agar mempercepat terjadinya heat transfer.

Naveenkumar et al. (2019), dengan menambahkan twisted tape insert dan juga menambahkan nanofluid berupa Al_2O_3 akan meningkatkan temperatur didalam sistem penukar kalor daripada yang hanya menggunakan twisted tape insert. Katalis lain yang dapat ditambahkan pada sistem anti icing bisa menggunakan nanofluid jenis TiO_2-H_2O .

Ravi et al. (2018), dengan menambahkan nanofluid Fe_3O_4 dan twisted tape insert akan meningkatkan bilangan Nusselt, bilangan Reynolds dan juga friction factor aliran. Dengan demikian penambahan nanofluid akan memberikan dampak yang lebih terhadap heat transfer yang ada dalam sistem anti icing. Untuk lebih lanjut maka perlu dilakukan penelitian menggunakan CFD untuk mengetahui efek yang terjadi di dalam heat exchanger.

Carlos et al. (2020), dengan metode CFD bahwa aliran yang didalam heat exchanger akan dinilai semakin baik apabila memiliki viskositas yang tinggi. Hal lain yang harus diperhatikan adalah terjadinya fouling (penumpukan kerak pada didalam sistem heat exchanger).

Sudarajat (2017), membuktikan bahwa ketika terjadi fouling akan menyebabkan terjadi penurunan kinerja heat exchanger seperti penurunan laju perpindahan panas aktual dan efektivitas sebesar 19,45%. Sehingga dalam sistem heat exchanger harus rutin dilakukan pembersihan agar tidak terjadi fouling.

B. Landasan Teori

Landasan teori ini di gunakan sebagai referensi pada penelitian dengan melihat penelitian terdahulu dan literatur yang terkait dengan judul yang diambil dalam melakukan penelitian. Berikut ini merupakan penjelasan landasan teori yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Pesawat Terbang

Menurut Rahmawan, E dan Jatisukamto, G (2017), pesawat terbang merupakan salah satu alat transportasi yang efektif untuk menempuh jalur lintas antar pulau dengan waktu yang relatif singkat. Pesawat terbang memiliki empat gaya yaitu lift,

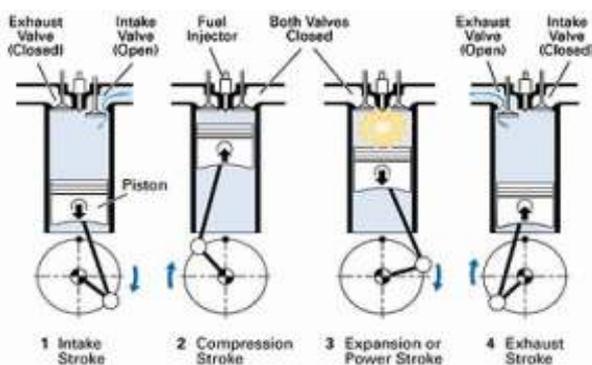
drag, thrust, dan weight. Gaya angkat atau lift terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada bagian atas sayap atau upper wing dan bagian bawah sayap atau lower wing. Gaya angkat atau lift di hasilkan dari udara yang melawati sayap pesawat yang berbentuk airfoil sehingga diperlukan gaya dorong atau thrust yang dihasilkan oleh engine dari pesawat itu sendiri.

2. Mesin Pesawat Terbang

Mesin pesawat terbang adalah komponen dari sistem propulsi yang mempunyai fungsi sebagai penghasil gaya dorong atau thrust yang di hasilkan dari konversi energi kimia dari bahan bakar yang menjadi energi panas. Jenis mesin pesawat terbang ada 2 yaitu piston engine dan gas turbine engine. Pada gas turbine engine terdiri dari turbojet, turbofan, turboprop, turboshaft, ramjet, dan scramjet.

3. Piston Engine

Menurut Kambrany (2014) pada mesin piston engine, fuel sebagai tenaga penggerak akan terbakar setelah bercampur dengan udara. Campuran tersebut dihisap kedalam silinder dan di mampatkan dengan piston untuk memperoleh tenaga panas, yang dimana campuran tersebut meningkatkan suhu dan tekanan.



Gambar 2. 1 Langkah Pembakaran Piston Engine
(Sumber: Tesis, Joni Kasmara, 2016)

Pada mesin pesawat piston engine, pembakaran terjadi didalam sistem itu sendiri. Komponen dari piston engine bergerak secara translasi atau bolak balik dan proses kerjanya secara bertahap sehingga menimbulkan terjadinya getaran atau vibration. Terdapat 4 langkah proses pembakaran dari piston engine yaitu sebagai berikut :

a. Langkah pemasukan atau intake stroke

Piston bergerak dari titik mati atas (TMA) menuju ketitik mati bawah (TMB), dengan posisi intake valve terbuka dan exhaust valve tertutup. Gerakan piston menyebabkan tekanan didalam silinder menjadi rendah sehingga campuran udara dan bahan bakar akan masuk kedalam silinder.

b. Langkah kompresi atau compression stroke

Piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) menuju titik mati atas (TMA) dengan posisi intake dan exshaut valve tertutup, udara didalam ruang bakar di kompresikan sehingga terjadi kenaikan pada temperatur dan tekanan. Pada saat piston mencapai titik mati atas (TMA) busi akan memercikkan bunga api untuk membakar campuran udara dan bahan bakar.

c. Langkah kerja atau expansion or power stroke

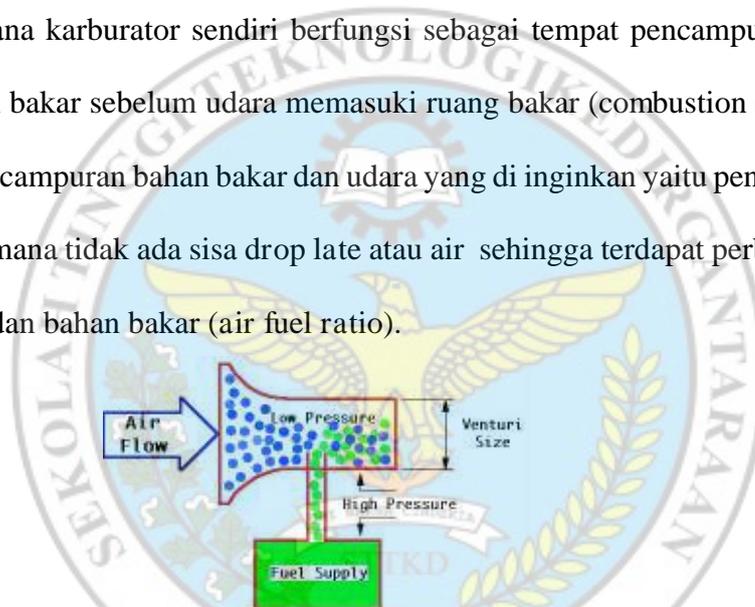
Piston bergerak dari titik mati atas (TMA) menuju titik mati bawah (TMB) dengan posisi intake dan exshaut valve tertutup. Piston dapat bergerak karena tekanan yang meningkat yang dihasilkan dari energi yang berasal dari ruang bakar atau combustion chamber.

d. Langkah pembuangan atau exhaust stroke

Piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) menuju titik mati atas (TMA) dengan posisi exhaust valve terbuka dan intake valve tertutup. Pada tahap ini gas hasil pembakaran akan terdorong keluar oleh piston melalui exhaust valve.

4. Karburator Pesawat Terbang

Karburator merupakan sebuah alat penting pada pesawat terbang berjenis piston engine, di mana karburator sendiri berfungsi sebagai tempat pencampuran udara dengan bahan bakar sebelum udara memasuki ruang bakar (combustion chamber). Hasil dari pencampuran bahan bakar dan udara yang diinginkan yaitu pencampuran sempurna di mana tidak ada sisa drop late atau air sehingga terdapat perbandingan antara udara dan bahan bakar (air fuel ratio).

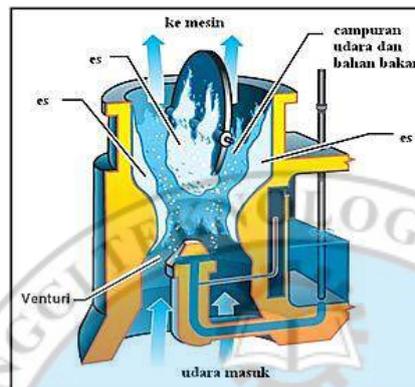


Gambar 2. 2 Cara Kerja Karburator
(Sumber: Kambrany M, 2014)

Menurut Kambrany (2014), prinsip kerja karburator menggunakan prinsip Bernoulli di mana kecepatan ideal suatu gas atau udara akan bertambah seiring dengan turunnya tekanan dengan kata lain semakin cepat aliran udara yang bergerak maka semakin kecil nilai tekanan statis. Sehingga bahan bakar bisa naik ke mangkuk karburator dan tercampur dengan udara kemudian masuk ke ruang bakar. Sebelum masuk ke dalam ruang bakar campuran udara dan bahan bakar tersebut melewati intake manifold yang berfungsi untuk menyalurkan kabut yang berasal

dari hasil pencampuran dari udara dan bahan bakar. Diruang bakar energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar dikonveksikan menjadi energi gerak pada piston dan nilai tekanan dinamis yang dihasilkan lebih besar.

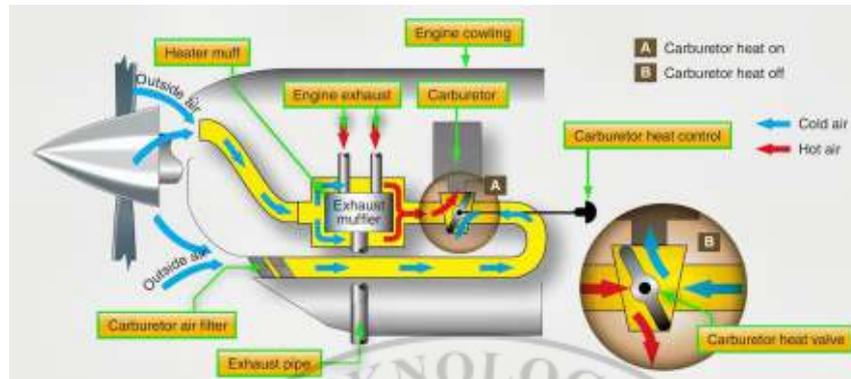
5. Karburator Icing



Gambar 2. 3 Karburator Icing
(Sumber: Fadjar Nugroho, 2008)

Menurut Kumar T (2018), karburator icing ialah pencampuran bahan bakar dan udara yang masuk ke dalam mesin dan terjadi di dalam karburator. Terjadi pendinginan karena bahan bakar menguap menjadi gas, dimana terjadi penurunan temperatur yang menyebabkan terbentuknya lapisan es pada karburator. Menurut laporan FAA tentang sistem pesawat, campuran udara bertemperatur rendah dan bahan bakar menciptakan terjadinya lapisan es pada karburator. Kondisi icing bisanya terjadi pada temperatur dibawah 0°C dan di atas -40°C , terdapat visible moisture atau uap air yang terlihat seperti kabut, awan dll. Pada saat kondisi cuaca berkabut atau hujan, suhu berada dibawah 0°C maka dapat terjadinya icing condition. Kondisi icing ini sangat berbahaya jika terjadi pada karburator pesawat pinton engine. Icing terjadi dikarenakan drop late atau es yang terbentuk di

karburator yang menghambat aliran udara dan bahan bakar yang akan masuk ke silinder sehingga terjadinya blocking dapat mesin akan mati.



Gambar 2. 4 Skema Heater pada Piston Engine
(Sumber: International Virtual Aviation Organisation)

Pada Gambar 2.4, terlihat bahwa udara lingkungan sekitar masuk melalui dua intake duck, dimana udara yang digunakan sebagai pemanas yaitu udara yang masuk dan melewati exhaust muffler. Udara panas tersebut dikontrol oleh carburetor heat valve sehingga tidak semua udara panas masuk ke dalam karburator, apabila semua udara panas masuk kedalam karburator akan mengakibatkan terjadinya penurunan kinerja piston engine karena karburator terlalu panas.

Perbedaan heater pada pesawat piston engine dengan heat exchanger terletak pada arah aliran dan penambahan vortex generator yang digunakan sebagai gangguan pada aliran. Pada heater pesawat piston engine menggunakan aliran menyilang (crossflow) tanpa vortex generator sehingga aliran yang terbentuk di dalam tube yaitu aliran laminar. Sedangkan pada heat exchanger memvariasikan arah aliran yaitu aliran searah (parallel flow) dan aliran berlawanan (counter flow) dan penambahan vortex generator twisted insert type 5 di dalam tube side sehingga

aliran yang terbentuk akibat penambahan vortex generator twisted insert type 5 yaitu aliran turbulen.

6. Vortex Generator

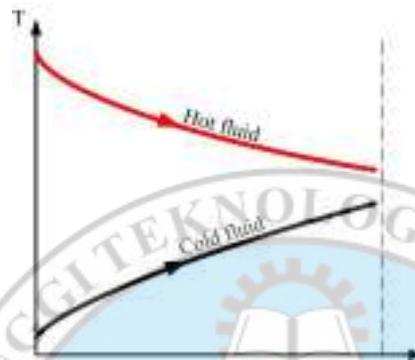
Peningkatan perpindahan panas dengan pembangkitan vortex adalah sebuah metode pasif yang dengan sengaja membangkitkan streamwise untuk meningkatkan perpindahan panas. Vortex memiliki dua fitur yang meningkatkan proses transport, dimana vortex berputar dan menggoyahkan (destabilisasi) medan aliran, sehingga aliran laminar yang normal akan berubah menjadi turbulen.

Menurut T. Istanto (2014) dengan penambahan vortex generator didalam pipa akan meningkatkan perpindahan kalor karena faktor gesekan didalam pipa dengan penambahan twisted type insert. Sistem perpindahan kalor pada pipa dengan penambahan twisted insert type sering digunakan karena ringkas dan tidak membutuhkan biaya yang besar untuk pembuatannya.

Dengan demikian, peningkatan perpindahan panas dikaitkan dengan aliran sekunder dengan penurunan tekanan yang relatif rendah. Prinsipnya, vortex transversal dan vortex longitudinal dapat dibedakan, sumbu vortex transversal terletak tegak lurus terhadap arah aliran dan vortex longitudinal memiliki sumbu sejajar dengan arah aliran utama..

7. Aliran Paralel

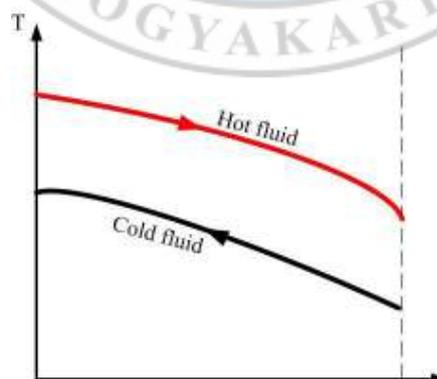
Aliran paralel merupakan dua fluida yang bergerak sejajar atau searah dengan perbedaan temperatur. Menurut Cengel (2015) fluida panas dan dingin masuk ke dalam alat penukar kalor dengan sisi satu dan keluar melalui sisi yang lain.



Gambar 2. 5 Grafik Aliran Paralel
(Sumber: Cengel, 2015)

8. Aliran Counter

Aliran counter merupakan 2 fluida yang bergerak berlawanan dengan perbedaan temperatur. Menurut Cengel (2015) fluida panas dan dingin masuk dari sisi yang berlawanan dan mengalir berlawanan arah, kemudian keluar melalui sisi yang berbeda.



Gambar 2. 6 Grafik Aliran Counter
(Sumber: Cengel, 2015)

9. Jenis Perpindahan Kalor

Peran perpindahan kalor merupakan pelengkap analisis- analisis termodinamika, yang hanya membahas sistem-sistem yang berada dalam keseimbangan, dengan hukum-hukum tambahan untuk mengetahui prediksi laju waktu dalam perpindahan kalor. Menurut Donald Pitts (2011), hukum- hukum pelengkap yang didasarkan pada tiga fundamental dari perpindahan kalor yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

a. Konduksi

Konduksi terjadi karena adanya suatu gradien temperatur didalam sebuah zat homogen yang akan menyebabkan laju perpindahan kalor di dalam medium tersebut.

b. Konveksi

Konveksi merupakan keadaan dimana benda padat terlihat terekspos ke fluida bergerak yang memiliki temperatur berbeda, energi terbawa kedalam benda melalui fluida. Dengan kata lain konveksi merupakan perpindahan kalor yang menyertakan dua fluida yang bergerak yang memiliki temperatur yang berbeda, dimana fluida tersebut bekerja melepas dan menyerap kalor.

c. Radiasi

Radiasi merupakan metode ketiga dari transmisi perpindahan kalor melalui perambatan atau propagasi gelombang elektromagnetik yang dapat terjadi baik didalam vacum total maupun di dalam medium.

10. Alat Penukar Kalor (Heat Exchanger)

Menurut Cengel (2015) alat penukar kalor berjenis shell side and tube side. dapat mengurangi panjang lintasan dari alat penukar kalor, juga dapat meningkatkan efektivitas alat penukar kalor. Hal ini dikarenakan ketika fluida mengalir dalam lintasan pipa yang berbentuk kurva, gaya sentrifugal menyebabkan terjadinya aliran sekunder. Aliran sekunder ini, memiliki kemampuan yang signifikan meningkatkan laju perpindahan kalor.

a. Perpindahan Kalor (Q)

Perpindahan kalor terjadi pada alat penukar kalor berjenis shell side and tube side ini, tergantung pada bentuk geometri dan dimensinya. Analisa perpindahan kalor dalam sisi tube side dilakukan dengan memperhitungkan jumlah kalor yang di serap oleh bahan bakar di dalam tube side. Jumlah kalor yang di serap dan asumsikan sama besar dengan jumlah kalor yang di lepaskan oleh gas buang dalam selongsong (shell side) yang secara konduksi melalui dinding tube side. Analisa ini juga mengasumsikan tidak terdapat kehilangan kalor melalui dinding selongsong (shell side) ke udara luar disekitarnya.

Laju perpindahan kalor yang dilepaskan fluida panas (gas buang) dalam selongsong (shell side) menurut Cengel (2015) dapat dihitung dengan persamaan;

$$Q_h = \dot{m} c_{p_h} \Delta T_h \quad (2.1)$$

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p_h} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.2)$$

Propertis fluida gas buang dievaluasi pada temperatur gas buang rata-rata yaitu;

$$T_h = \frac{T_{hi} + T_{ho}}{2} \quad (2.3)$$

Besar kalor yang diserap fluida dingin (bahan bakar)

$$Q_c = \dot{m}_c c_p \Delta T_c \quad (2.4)$$

$$Q_c = \dot{m}_c c_p (T_{c0} - T_{ci}) \quad (2.5)$$

Propertis fluida dingin dievaluasi pada temperatur dingin rata rata, yaitu;

$$T_c = \frac{T_{c2} + T_{c1}}{2} \quad (2.6)$$

Perhitungan laju aliran massa gas buang dapat dihitung;

$$Q_h = Q_c \quad (2.7)$$

$$\dot{m}_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_h c_{ph} (T_{h1} - T_{h2})}{c_{pc} (T_{c2} - T_{c1})} \quad (2.9)$$

b. Bilangan Reynolds (Re)

Bilangan Reynolds adalah bilangan yang tidak memiliki satuan atau tidak berdimensi yang di gunakan untuk menunjukkan bentuk aliran. Jika nilai Reynolds number ≤ 2.300 aliran yang terbentuk adalah aliran laminar, nilai Reynolds $2.300 \geq Re \leq 10.000$ aliran yang terbentuk adalah aliran transisi, dan nilai Reynold number ≥ 10.000 aliran yang terbentuk adalah turbulen. Menurut Cengel (2015) bilangan Reynolds memiliki persamaan sebagai berikut :

$$Re_h = \frac{V_h d_{ti}}{\nu_h} \quad (2.10)$$

$$Re_c = \frac{V_c d_{ti}}{\nu_c} \quad (2.11)$$

c. Bilangan Nusselt dalam Tube (Nu_h)

Bilangan Nusselt adalah rasio resistansi termal konduksi terhadap resistansi termal konveksi dari fluida. Menurut Schmidt's (1987), jika alirannya di dalam tube

adalah turbulen maka nilai bilangan Nusselt dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$N_h = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (2.12)$$

$$Pr = \frac{C_p v_h}{k} \quad (2.13)$$

Dimana syaratnya:

$$0.7 \leq Pr \leq 160$$

$$Re > 10000$$

d. Koefisien Perpindahan Kalor Permukaan dalam Tube (h_{hot})

Nilai koefisien perpindahan kalor permukaan dalam tube, menurut Cengel (2015) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Nu_h = [0,023 \times (Re_h^{0,8}) \times (Pr_{hot}^{0,3})] \quad (2.14)$$

$$h_{hot} = \frac{Nu_h k}{d_{ti}} \quad (2.15)$$

e. Bilangan Nusselt luar Tube (Nu_c)

Aliran yang terjadi pada sisi luar tube di bagi menjadi 2 aliran yaitu aliran laminar dan aliran transisi, di mana aliran tersebut di dapatkan karena pembebanan yang di gunakan sehingga menghasilkan bilangan Reynold yang berbeda. Menurut Cengel (2015) nilai bilangan Nusselt pada luar tube dengan aliran laminar dengan nilai ketetapan 4,36.

Dimana syaratnya:

$$Re \leq 3000$$

Bilangan Nusselt luar tube dengan aliran transisi dapat di tentukan dengan persamaan:

$$Nu_c = [0,023 x (Re_c^{0,8}) x (Pr_{cold}^{0,3})] \quad (2.16)$$

$$Pr = \frac{Cp_c v_c}{k} \quad (2.17)$$

Dimana syaratnya:

$$0,5 \leq Pr \leq 2000$$

$$3 \cdot 10^3 \leq Re < 5 \cdot 10^6$$

Friction factor untuk aliran transisi menggunakan persamaan:

$$f = \frac{64}{Re_c} \quad (2.18)$$

f. Koefisien Perpindahan Kalor Permukaan luar Tube (h_{cold})

Nilai koefisien perpindahan kalor permukaan luar tube, menurut Cengel (2015) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$D_h = D_{si} - D_{ti} \quad (2.19)$$

$$Nu_c = \frac{h_{cold} d_h}{k} \quad (2.20)$$

$$h_{cold} = \frac{Nu_c k}{d_h} \quad (2.21)$$

g. Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh (U_o)

Nilai koefisien perpindahan kalor menyeluruh dipengaruhi oleh faktor pengotoran (fouling factor) yang merupakan resistan atau tahanan. Menurut Cengel (2015) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{cold}}} + \frac{1}{h_{\text{hot}}}} \quad (2.22)$$

h. Beda Temperatur Rata – Rata Logaritma (LMTD)

Karena temperatur fluida sisi shell dan tube sudah diketahui maka dapat ditentukan nilai dari LMTD (Log Mean Temperature Difference). Hal ini berdasarkan selisih temperatur dari fluida yang masuk dan keluar dari alat penukar kalor. Menurut Cengel (2015) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2.23)$$

Untuk aliran counter adalah sebagai berikut:

$$\Delta T_1 = T_{\text{hi}} - T_{\text{co}} \quad (2.24)$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{ho}} - T_{\text{ci}} \quad (2.25)$$

Untuk aliran paralel adalah sebagai berikut:

$$\Delta T_1 = T_{\text{hi}} - T_{\text{ci}} \quad (2.26)$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{ho}} - T_{\text{co}} \quad (2.27)$$

i. Luas Permukaan Perpindahan Kalor Menyeluruh (A_o)

Parameter yang menyatakan nilai keseluruhan dari luas geometri dalam proses perpindahan kalor atau luas permukaan perpindahan kalor menyeluruh (A_o). Menurut Cengel (2015) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$Q = U_o A_o \Delta T_{\text{lm}} \quad (2.28)$$

$$A_o = \frac{Q}{U_o \Delta T_{\text{lm}}} \quad (2.29)$$

j. Metode NTU (Number of Transfer Unit)

Menurut Cengel (2015), parameter yang menunjukkan ukuran dari suatu alat penukar kalor adalah NTU (number of transfer units) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$NTU = \frac{U_o A_o}{C_{\min}} \quad (2.30)$$

Nilai dari C_{\min} didapatkan dengan melihat hasil terkecil yang didapatkan antara rumus perhitungan dibawah ini:

$$\text{Untuk cold fluid} : C_c = \dot{m}_c C_{p_c} \quad (2.31)$$

$$\text{Untuk hot fluid} : C_h = \dot{m}_h C_{p_h} \quad (2.32)$$

k. Efektivitas alat penukar kalor

Menurut Cengel (2015), analisis lebih mudah dilakukan dengan menggunakan metode yang berdasarkan efektivitas penukar kalor dalam memindahkan sejumlah kalor. Metode ini memiliki keuntungan untuk menganalisa persoalan, dimana membandingkan berbagai jenis penukar kalor untuk memilih jenis yang terbaik dalam melakukan pemindahan kalor tertentu.

Jadi parameter yang menunjukkan performa dari suatu alat penukar kalor adalah efektivitas. Nilai efektivitas (ε) dari alat penukar kalor dengan aliran fluida kerjanya berlawanan (counter flow) dapat ditentukan dengan persamaan;

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c \exp[-NTU(1-c)]} \times 100 \% \quad (2.33)$$

Nilai efektivitas (ε) dari alat penukar kalor dengan aliran fluida kerjanya searah (parallel flow) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+c)]}{1+c} \times 100 \quad (2.34)$$

$$c = C_{\min} / C_{\max} \quad (2.35)$$

Nilai C_{\min} merupakan nilai terkecil dan C_{\max} merupakan nilai terbesar yang didapatkan dengan melihat hasil perhitungan dari rumus dibawah ini:

$$\text{Untuk fluida cold} : C_c = \dot{m}_c C_{p_c} \quad (2.36)$$

$$\text{Untuk fluida hot} : C_h = \dot{m}_h C_{p_h} \quad (2.37)$$

1. Penurunan tekanan (ΔP)

Menurut Srinivasan (1970), faktor gesekan yang terjadi pada tube side dengan aliran turbulen dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$f = (0,79 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (2.38)$$

Dimana syaratnya:

$$10^4 < Re < 10^6$$

Pressure drop atau penurunan tekanan yang terjadi pada tube karena faktor gesekan yang terjadi pada aliran, menurut Sidik Kakac (2002) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\Delta P = f \frac{L}{D_t} \rho \frac{V_h^2}{2} \quad (2.39)$$