

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Pirolisis sudah banyak digunakan dimana-mana baik di dunia industri maupun masyarakat. Pirolisis juga sudah banyak dilakukan penelitian oleh peneliti pendahulu. Namun dalam penelitian pasti masih ada kekurangan dalam pengerjaan dan praktiknya. Maka dari itu penelitian ini bertujuan untuk mengubah sampah plastik menjadi bahan bakar yang lebih optimal yaitu dengan variasi sudut kemiringan kondensor, dan debit air pendinginan. Dengan seperti ini diharapkan sampah plastik akan semakin berkurang dan minyak pirolisis yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk mengatasi kelangkaan BBM.

Wijaya (2017) melakukan penelitian pirolisis menggunakan bahan baku sampah plastik LDPE (*low density polyethylene*) dengan total 3 kg dimana setiap percobaan menggunakan 1 kg sampah plastic LDPE. Alat pirolisis pada penelitian ini menggunakan variasi kemiringan kondensor terhadap reaktor yaitu 0°, 15°, 30° dan debit air pendingin untuk kondensor 18 LPM. Dalam penelitian ini waktu percobaan dilakukan selama 100 menit. Pengujian dilakukan pada suhu 300°C - 350°C, tiap percobaan menggunakan debit yang sama yaitu 18 LPM. Sudut yang digunakan bervariasi yaitu 0°, 15°, dan 30°. Hasil penelitian menunjukkan produksi minyak tertinggi didapat pada percobaan dengan sudut 15° menghasilkan 590 ml dan perpindahan kalor 876,13 Watt. Sedangkan percobaan dengan sudut 0° menghasilkan minyak 540 ml dan laju perpindahan kalor tertinggi 757,64 Watt, dan percobaan dengan sudut 30° menghasilkan minyak 520 ml dan nilai laju perpindahan kalor tertinggi 490,25 Watt. Karakteristik minyak hasil dari penelitian Wijaya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Karakteristik minyak plastik hasil penelitian (Wijaya, 2017)

No	Parameter	Nilai
1	Densitas	0,774 gr/ml
2	Viskositas	3-3,2 mm ² /s
3	Nilai kalor	10.727,59 Cal/gr
4	Flash point	33-37 ⁰ C

Penelitian Andriyanto (2017) menggunakan bahan baku sampah plastik LDPE (*low density polyethylene*) dengan total 3 kg dimana setiap percobaan menggunakan 1 kg sampah plastik LDPE yang dipotong dengan ukuran 5 x 5 cm. Alat pirolisis pada penelitian ini menggunakan variasi kemiringan kondensor terhadap reaktor yaitu 0°, 15°, 30° dan debit air pendingin untuk kondensor 6 LPM. Dalam penelitian ini waktu percobaan dilakukan selama 100 menit. Dari hasil variasi sudut kemiringan kondensor, diperoleh minyak hasil sebanyak 600 ml dengan sisa abu 117 gr pada sudut kemiringan kondensor 0°, untuk sudut 15° memperoleh minyak sebanyak 560 ml dengan sisa abu 160 gr, dan sudut 30° mendapatkan hasil minyak 500 ml dengan sisa abu 262 gr. Karakteristik minyak hasil dari penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan karakteristik minyak hasil penelitian (Andriyanto, 2017) dengan bahan bakar minyak lain

No	Parameter	Minyak Plastik LDPE	Minyak Tanah	Solar	Premium
1	Viskositas (mPa.s)	3 - 3,2	1,4	2 - 4,5	0,7
2	Nilai Kalor (cal/g)	10727,6 – 10836,8	10.939,1	9240	11245
3	Densitas (g/ml)	0,8	0,9	0,8	0,7
4	Flash Point (°C)	32,2	60,2	52	43

Penelitian Rifai (2018) menggunakan sampah plastik *aluminium foil* dengan total 3 kg aluminium foil dengan masing-masing percobaan sebanyak 1 kg. Pengujian dilakukan pada suhu 300°C - 350°C, tiap percobaan menggunakan debit

yang sama yaitu 6 LPM. Sudut yang digunakan bervariasi yaitu 0°, 15°, dan 30°. Hasil penelitian menunjukkan produksi minyak tertinggi didapat pada percobaan dengan sudut 15° menghasilkan 309 ml dan perpindahan kalor 294,87 Watt. Sedangkan percobaan dengan sudut 0° menghasilkan minyak 292 ml dan laju perpindahan kalor tertinggi 252,34 Watt, dan percobaan dengan sudut 30° menghasilkan minyak 224 ml dan nilai laju perpindahan kalor tertinggi 213,78 Watt. Karakteristik minyak hasil penelitian Rifai dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Karakteristik minyak plastik hasil penelitian (Rifai, 2018)

No	Parameter	Nilai
1	Densitas	0,801 gr/ml
2	Viskositas	4,4 mPa.s
3	Nilai kalor	10.057,89 Cal/gr
4	flash point	45,7 °C

Penelitian Gaurav, dkk (2014) menggunakan bahan baku sampah plastik LDPE dengan suhu pirolisis di atas 300 °C – 500 °C tanpa oksigen dan pemanasan dimulai ketika suhu mencapai 100 °C ketika plastik meleleh menjadi cair. Saat suhu mencapai 270 °C plastik mulai berubah menjadi uap dan mengalir melewati kondensor. Pemanasan akan berlanjut dan stabil sampai suhu 400 °C. Penelitian ini menghasilkan 90% minyak dan 4% abu. Karakteristik minyak plastik Guarav dkk dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Karakteristik Minyak Plastik (Guarav dkk, 2017)

No	Parameter	Nilai
1	Density	702,5 kg/m ³
2	Viscosity	5,27 m. Poise
3	Calorific Value	10.727,59 Cal/gr
4	Flash point	22 °C
5	Fire Point	29 °C

Penelitian Haryadi (2015) menggunakan bahan baku sampah plastik jenis PP (*polypropylene*) dan *High Density Polyethylene (HDPE)*. Pirolisis yang

dilakukan menggunakan suhu 300 °C dengan lama pemanasan 17,5 menit. Pemanasan dilakukan dengan bahan bakar LPG dan dengan 2 arah aliran uap dan air yang berbeda yaitu *parallel flow* dan *counter flow*. Hasilnya pirolisis PP dan HDPE optimal dilakukan dengan arah aliran *counter flow* dengan hasil perpindahan kalor 1.642 Watt dan menghasilkan 360 ml minyak plastik PP. Sedangkan hasil minyak HDPE adalah 400 ml dengan perpindahan kalor tertinggi 1.218 Watt.

Penelitian Kadir (2012) menggunakan bahan plastik jenis PET, HDPE, dan PP yang sudah di bersihkan dan di potong-potong dengan massa bahan baku 500 gram. Parameter yang diamati pada penelitian ini yaitu kekentalan bahan bakar cair dari beberapa jenis plastik dan sifat mampu bakar secara kontinyu (*Combustible*) yang dilakukan secara visual. Untuk hasil pengujian Kadir dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Hasil Pengujian Pirolis (Kadir, 2012)

Bahan (gr)	Suhu maksimal (°C)	Hasil Minyak (ml)
500 (PP)	300	484
500 (HDPE)	415	403
500 (PET)	400	447

Penelitian Nurdianto, dkk (2016) bahan yang digunakan yaitu sampah botol plastic yang sudah dibersihkan dan dicacah sebanyak 1 kg dengan suhu 200 °C. Dalam penelitiannya, Nurdianto dkk melakukan percobaan sebanyak 3 kali dan menghasilkan minyak rata-rata sebanyak 250 ml.

Tabel 2.6 Hasil Pirolisis (Nurdianto dkk, 2016)

Percobaan Ke-	Bahan Baku Plastik (Kg)	Minyak yang dihasilkan (ml)
1	1	250
2	1	270
3	1	230
Rata-rata		250

Tabel 2.7 Karakteristik Minyak Plastik (Nurdianto dkk, 2016)

No	<i>Properties</i>	<i>Value</i>
1	Densitas	0,78 gr/ml
2	Viskositas	1,50 mPa.s
3	<i>Flashpoint</i>	46,50 °C

Penelitian Prasetyo (2015), dkk menggunakan dua jenis bahan baku yang berbeda yaitu botol plastic dan plastic kresek. Percobaan pertama menggunakan botol plastik sebanyak 1 kg dengan suhu pirolisis 200 °C waktu pirolisis selama 25 menit menghasilkan minyak sebanyak 500 ml. Percobaan kedua menggunakan plastik kresek sebanyak 1 kg dengan suhu 300 °C waktu pirolisis selama 30 menit menghasilkan minyak sebanyak 500 ml.

Penelitian Dharma, dkk (2015) menggunakan metode dua kali proses pirolisis. Pada proses pirolisis pertama, suhu reaktor yang digunakan adalah 200 °C dengan bahan baku limbah plastik berupa kantong plastik bekas dan botol plastik kemasan bekas (campuran jenis LDPE dan HDPE) yang telah dicacah sebanyak 5 kg selama 16 jam. Setelah didapat minyak dari proses pertama kemudian dilanjutkan dengan proses pirolisis kedua. Pada proses pirolisis yang kedua, suhu reaktor yang digunakan adalah 150 °C, bahan baku minyak plastik hasil pirolisis pertama sebanyak 3000 ml yang diproses selama 40 menit. Untuk hasil penelitian Dharma dkk dapat dilihat pada Tabel 2.8 dan 2.9.

Tabel 2.8 Minyak Plastik Hasil Proses Pirolisis Pertama (Dharma dkk, 2015)

Pengujian Hari Ke	Bahan Baku Minyak	Massa Plastik (Kg)	Suhu Pirolisis (°C)	Waktu (menit)	Hasil Pengujian (ml)
1	Limbah Plastik	5	200	960	3100
2	Limbah Plastik	5	200	960	3000
3	Limbah Plastik	5	200	960	3200
4	Limbah Plastik	5	200	960	3000
5	Limbah Plastik	5	200	960	3200
	Jumlah	25		4800	15.500

Tabel 2.9 Minyak Plastik Hasil Proses Pirolisis Kedua (Dharma dkk, 2015)

Pengujian Hari Ke	Bahan Baku Minyak	Volume Minyak (ml)	Suhu Pirolisis (°C)	Waktu (menit)	Hasil Pengujian (ml)
1	Limbah Plastik	3000	150	40	1920
2	Limbah Plastik	3000	150	40	1960
3	Limbah Plastik	3000	150	40	1900
4	Limbah Plastik	3000	150	40	1935
5	Limbah Plastik	3000	150	40	1920
	Jumlah	1.500		200	11.555

Surono, dkk (2016) juga melakukan penelitian pirolisis menggunakan bahan baku yaitu plastik jenis PP, PET dan PE. Penelitian pirolisis dilakukan untuk mengetahui proses dan karakteristik bahan bakar minyak yang dihasilkan dari plastik jenis PP, PET dan PE. Proses pengolahan plastik PP, PET, dan PE menjadi bahan bakar minyak dan nilai kalor bahan bakar dari plastik PP, PE, dan bahan bakar lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.10 dan 2.11.

Tabel 2.10 Proses Pirolisis Plastik PP, PET, dan PE (Surono dkk, 2016)

Jenis Plastik	Kebutuhan LPG (gram)	BBM yang dihasilkan (ml)	Waktu yang diperlukan (menit)
PP	446	450	35
PET	659	-	75
PE	927	350	82

Tabel 2.11 Nilai Kalor Bahan Bakar dari Plastik PP, PE, dan Bahan Bakar lainnya (Surono dkk, 2016)

Jenis Bahan Bakar	Nilai Kalor (MJ/kg)
Dari Plastik PP	46,5
Dari Plastik PE	44,9
Premium	44,0
Solar	45,8
LPG	45,1
Minyak Tanah	43,4

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Pengertian Pirolisis

Gaurav, dkk (2014) mengatakan bahwa pirolisis adalah dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen atau reagen lainnya. Pirolisis dilakukan di dalam sebuah reaktor pengurangan atmosfer (ruang hampa udara) pada temperatur hingga 300 °C – 500 °C. Limbah plastik melalui proses pirolisis mampu diubah menjadi *feedstock* petrokimia seperti nafta, liquid dan wax seperti hidrokarbon dan gas serta minyak dasar untuk pelumas. Teknik pirolisis telah digunakan sudah lama untuk peningkatan residu hidrogenasi yang diperoleh dari pencairan/pelelehan batubara. Keunggulan nyata dari pirolisis dibandingkan dengan pembakaran (*incineration*), yaitu dapat mereduksi gas

buang hingga 20 kali. Disisi lain, produk pirolisis dapat dimanfaatkan lebih fleksibel dan penanganannya lebih mudah.

Aprian, dkk (2009) mengatakan bahwa pirolisis adalah proses fraksinasi material oleh suhu. Proses pirolisis dimulai pada suhu sekitar 230 °C, ketika komponen yang tidak stabil secara termal, dan volatile matters pada sampah plastik akan pecah dan menguap bersamaan dengan komponen lainnya.

Teknologi pirolisis adalah suatu sistem pemanasan tanpa oksigen, dimana teknologi ini kami gunakan untuk mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak. Proses ini dapat dilakukan karena pada dasarnya plastik adalah polimer atau rantai panjang atom yang mengikat satu sama lain yang berasal dari minyak bumi, sehingga proses ini hanya mengembalikannya ke dalam bentuk asal mulanya. Proses ini umumnya berlangsung pada temperatur antara 400 – 800 °C tergantung dari jenis plastik dan target produknya (Rafli dkk, 2017).

Ilham (2014) mengatakan bahwa pirolisis dapat dibedakan menjadi dua berdasarkan tingkat kecepatan laju reaksinya, yaitu pirolisis primer lambat dan pirolis primer cepat. Pada pirolisis primer cepat (diatas 300 °C), reaksi tersebut menghasilkan uap air, arang, gas, dan 50% - 70% uap minyak pirolisis (PPO = *Primary Pyrolysis Oil*) yang menyusun ratusan senyawa monomer, oligomer, monomer penyusun selulosa dan lignin. Pirolisis primer lambat akan terjadi pada kisaran suhu 150 – 300 °C. Pirolisis primer lambat biasa digunakan untuk proses pembuatan arang. Oleh karena itu, untuk menghasilkan arang dalam jumlah besar dan baik mutunya diperlukan waktu sehari-hari bahkan berminggu-minggu.

2.2.2. Pengertian Plastik

Surono (2013) mengatakan bahwa plastik adalah salah satu jenis makromolekul yang dibentuk dengan proses polimerisasi. Polimerisasi adalah proses penggabungan beberapa molekul sederhana (monomer) melalui proses kimia menjadi molekul besar (makromolekul atau polimer). Plastik merupakan senyawa polimer yang unsur penyusun utamanya adalah karbon dan hidrogen.

Surono (2013) mengatakan bahwa secara umum, kelebihan plastik dibanding dengan material lain, diantaranya adalah kuat, ringan, fleksibel, tahan

karat, tidak mudah pecah, 9 mudah diberi warna, mudah dibentuk, serta isolator panas dan listrik yang baik.

Vasile (2002) mengatakan bahwa sampah plastik merupakan salah satu sampah organik yang diproduksi setiap tahun oleh seluruh dunia. Pada umumnya sampah plastik tersebut memiliki komposisi 46 % *polyethylene* (HDPE dan LDPE), 16 % *polypropylen* (PP), 16 % polystyrene (PS), 7 % *polyvinyl chloride* (PVC), 5 % *polyethylene terephthalate* (PET), 5 % *acrylonitrile-butadiene-styrene* (ABS), dan 5 % polimer-polimer yang lainnya.

Krisna (2013) mengatakan bahwa plastik dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu *thermoplas* dan *termoset*. *Thermoplas* adalah merupakan plastik yang dapat didaur ulang melalui proses pemanasan. Sedangkan *termoset* adalah plastik yang tidak dapat didaur ulang. Pemanasan akan menyebabkan kerusakan pada maolekul-molekulnya.

2.2.3. Jenis-jenis Plastik

Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik di atas, *thermoplastik* adalah jenis yang memungkinkan untuk didaur ulang. Jenis plastik yang dapat didaur ulang diberi kode berupa nomor untuk memudahkan dalam mengidentifikasi dan penggunaannya. Berikut ini adalah macam-macam plastik dan kegunaannya:

Kode 1: PETE atau PET (*Polyethylene terephthalate*)



PETE atau PET (*polyethylene terephthalate*) biasa dipakai untuk botol plastik yang transparan seperti botol air mineral dan botol minuman lainnya. Botol atau produk dari bahan plastik ini hanya bisa digunakan sekali pakai saja, karena apabila dipakai berulang partikel berbahaya yang ada di bahan ini akan lepas dan mengakibatkan penyakit kanker dalam jangka panjang.

Kode 2: HDPE (*High density polyethylene*)



HDPE (*high density polyethylene*) mempunyai sifat bahan yang kuat, keras, dan mempunyai ketahanan terhadap suhu tinggi. Bahan ini biasanya dipakai untuk botol susu yang berwarna putih, tupperware, galon air mineral dan sebagainya.

Kode 3: V atau PVC (*Polyvinyl chloride*)



V atau PVC (*polyvinyl chloride*) yaitu plastik yang sulit untuk didaur ulang. Plastik ini bisa ditemukan pada plastik pembungkus.

Kode 4: LDPE (*Low density polyethylene*)



LDPE (*low density polyethylene*) biasanya dipakai untuk tempat pembungkus makanan, plastik kemasan, dan botol-botol. Barang-barang dengan kode jenis ini dapat di daur ulang dan baik untuk barang-barang yang fleksibilitasnya besar akan tetapi kuat. Bahan ini bisa dibilang tidak dapat dihancurkan tetapi tetap baik untuk tempat makanan, karena sulit bereaksi secara kimia dengan makanan yang dikemas.

Kode 5: PP (*Polypropylene*)



PP (*polypropylene*) mempunyai karakteristik transparan, berwarna putih tetapi tidak jernih, dan mengkilap. Polypropylen lebih kuat dan ringan dengan daya tembus uap yang rendah, tahan terhadap lemak, stabil terhadap suhu yang tinggi.

Kode 6: PS (*Polystyrene*)



PS (*polystyrene*) biasanya dipakai sebagai bahan tempat makan styrofoam, tempat minum satu kali pakai, dll. Bahan Polystyrene bisa bocor dan bahan styrene masuk ke dalam makanan ketika makanan tersebut terkena. Bahan Styrene berbahaya

untuk otak, mengganggu hormon pada wanita yang berakibat pada reproduksi, dan syaraf.

Kode 7: *OTHER*



Untuk jenis plastik 7 *Other* ini ada 4 jenis, yaitu SAN (*styrene acrylonitrile*), ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), PC (*polycarbonate*) dan Nylon.

2.2.4. Pengertian Bahan Bakar

Suprpto (2004) mengatakan bahwa bahan bakar adalah bahan-bahan yang digunakan dalam proses pembakaran. Tanpa adanya bahan bakar tersebut pembakaran tidak akan mungkin dapat berlangsung. Banyak sekali jenis bahan bakar yang kita kenal dalam kehidupan kita sehari - hari. Penggolongan ini dapat dibagi berdasarkan dari asalnya, bahan bakar dapat dibagi menjadi tiga golongan, yaitu: bahan bakar nabati, bahan bakar mineral dan bahan bakar fosil. Apabila dilihat dari bentuknya, maka bahan bakar dibagi menjadi tiga bentuk, yaitu: bahan bakar padat, bahan bakar cair, dan bahan bakar gas.

2.2.4.1. Bahan Bakar Minyak

Koesoemadinata (1980) mengatakan bahwa bahan bakar minyak adalah bahan bakar mineral cair yang diperoleh dari hasil tambang pengeboran sumur-sumur minyak, dan hasil kasar yang diperoleh disebut dengan minyak mentah atau *crude oil*. Hasil dari pengolahan minyak mentah ini akan menghasilkan bermacam bahan bakar yang memiliki kualitas berbeda-beda.

Kebanyakan senyawa yang ditemukan dalam minyak bumi adalah gabungan dari hidrogen dan karbon. Material-material ini disebut hidrokarbon. Senyawa lain yang ada seperti belerang, oksigen, dan nitrogen. Pengoperasian fisik dari kilang minyak seperti: penguapan, penggesekan, dan pendinginan untuk menentukan jenis hidrokarbon yang besar karena dalam material tersebut

merupakan bagian yang penting dalam minyak, tetapi pengoperasian secara kimiawi, seperti: pengilangan dan penyaringan. (Suprpto, 2004).

2.2.4.2. Bahan Bakar Cair

Wiratmaja (2010) mengatakan bahwa bahan bakar cair merupakan gabungan senyawa hidrokarbon yang diperoleh dari alam maupun secara buatan. Bahan bakar cair umumnya berasal dari minyak bumi. Dimasa yang akan datang, kemungkinan bahan bakar cair yang berasal dari oil shale, tar sands, batubara dan biomassa akan meningkat. Minyak bumi merupakan campuran alami hidrokarbon cair dengan sedikit belerang, nitrogen, oksigen, sedikit sekali metal, dan mineral.

Dengan kemudahan penggunaan, ditambah dengan efisiensi thermis yang lebih tinggi, serta penanganan dan pengangkutan yang lebih mudah, menyebabkan penggunaan minyak bumi sebagai sumber utama penyedia energi semakin meningkat. Secara teknis, bahan bakar cair merupakan sumber energi yang terbaik, mudah ditangani, mudah dalam penyimpanan dan nilai kalor pembakarannya cenderung konstan.

Beberapa kelebihan bahan bakar cair dibandingkan dengan bahan bakar padat antara lain:

1. Kebersihan dari hasil pembakaran
2. Menggunakan alat bakar yang lebih kompak
3. Penanganannya lebih mudah

Salah satu kekurangan bahan bakar cair ini adalah harus menggunakan proses pemurnian yang cukup kompleks.

2.2.5. Karakteristik Bahan Bakar

Karakteristik bahan bakar cair yang akan dipakai pada penggunaan tertentu untuk mesin atau peralatan lainnya perlu diketahui terlebih dahulu, dengan maksud agar hasil pembakaran dapat tercapai secara optimal. Secara umum karakteristik bahan bakar cair yang perlu diketahui adalah sebagai berikut:

2.2.5.1. Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala adalah suatu angka yang menyatakan suhu terendah dari bahan bakar minyak dimana akan timbul penyalaan api sesaat apabila pada permukaan minyak didekatkan pada nyala api. Titik nyala ini diperlukan sehubungan dengan adanya pertimbangan-pertimbangan mengenai keamanan dari penimbunan dan pengangkutan bahan bakar minyak terhadap bahaya kebakaran. Titik nyala tidak mempunyai pengaruh yang besar dalam persyaratan pemakaian bahan bakar minyak untuk mesin diesel atau ketel uap. Contoh beberapa titik flash point bisa dilihat pada Tabel 2.12.berikut:

Tabel 2.12 *Flash Point Biodiesel* (Dermanto, 2014)

Bahan Bakar	Flash point (°C)
Bensin	7,2
Solar	51,6
Biodiesel	148,8

2.2.5.2. Nilai Kalor (*Calorific Value*)

Wiratmaja, (2010) mengatakan bahwa nilai kalor adalah suatu angka yang menyatakan jumlah panas / kalori yang dihasilkan dari proses pembakaran sejumlah tertentu bahan bakar dengan udara/ oksigen. Nilai kalor dari bahan bakar minyak umumnya berkisar antara 18,300 – 19,800 Btu/lb atau 10,160 - 11,000 kkal/kg. Nilai kalor untuk bahan bakar cair ditentukan dengan pembakaran dengan oksigen bertekanan pada bomb calorimeter. Peralatan ini terdiri dari container stainless steel yang dikelilingi bak air yang besar. Bak air tersebut bertujuan meyakinkan bahwa temperatur akhir produk akan berada sedikit diatas temperatur awal reaktan, yaitu 25 °C. Nilai kalori dari bensin yang memiliki angka oktan 90 - 96 adalah sebesar $\pm 10,500$ kkal/kg. Nilai kalori diperlukan untuk menghitung jumlah konsumsi bahan bakar minyak yang dibutuhkan untuk suatu mesin dalam suatu periode. Nilai kalori umumnya dinyatakan dalam satuan Kcal/kg atau Btu/lb (satuan british).

2.2.5.3. Densitas

Densitas atau massa jenis adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda. Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya. Massa jenis rata-rata suatu benda adalah total massa dibagi dengan total volumenya. Sebuah benda yang memiliki massa jenis yang lebih tinggi akan memiliki volume yang lebih rendah daripada benda bermassa sama yang memiliki massa jenis lebih rendah.

2.2.5.4. Viskositas (*Viscosity*)

Viskositas merupakan ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida. Makin besar viskositas suatu fluida, maka makin sulit suatu fluida mengalir dan makin sulit suatu benda bergerak. Di dalam zat cair, viskositas dihasilkan oleh gaya kohesi antara molekul zat cair. Sedangkan dalam gas, viskositas timbul sebagai akibat tumbukan antara molekul gas. Cara mengukur besar viskositas adalah tergantung pada viscometer yang digunakan, dan hasil (besarnya viskositas) yang dapat harus disebutkan nama viscometer yang digunakan serta temperatur minyak pada saat pengukuran.

Viskositas merupakan sifat yang penting dalam penyimpanan dan penggunaan bahan bakar minyak. Viskositas mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk handling, penyimpanan dan atomisasi yang optimal. Jika minyak terlalu kental, maka akan menyulitkan dalam pemompaan, sulit untuk menyalakan burner, dan sulit dialirkan. Atomisasi yang jelek akan mengakibatkan terjadinya pembentukan endapan karbon pada ujung atau dinding burner. Oleh karena itu pemanasan awal penting untuk atomisasi yang tepat. Faktor - faktor yang mempengaruhi viskositas adalah sebagai berikut (Rana, 2015):

a. Tekanan

Viskositas suatu zat cair akan naik jika dipengaruhi oleh tekanan, sedangkan viskositas gas tidak dipengaruhi oleh tekanan.

b. Temperatur

Viskositas zat cair akan turun dengan naiknya suhu, sedangkan viskositas gas akan naik dengan naiknya suhu. Pemanasan zat cair menyebabkan molekul - molekulnya memperoleh energi. Molekul - molekul cairan bergerak sehingga menimbulkan gaya interaksi antar molekul menjadi melemah.

c. Kehadiran zat lain

Penambahan gula tebu dapat mengakibatkan meningkatkan viskositas air. Adanya bahan tambah seperti bahan suspensi akan menaikkan viskositas air. Pada minyak ataupun *gliserin*, adanya penambahan air akan menyebabkan viskositasnya menurun karena gliserin maupun minyak akan semakin encer pada waktu alirannya cepat.

d. Ukuran dan berat molekul

Viskositas akan naik bersamaan dengan naiknya berat molekul. Misalnya laju aliran alkohol cepat, larutan minyak laju alirannya lambat dan kekentalannya tinggi sehingga viskositasnya juga tinggi.

e. Berat molekul

Viskositas akan naik jika ikatan rangkap antar molekul semakin banyak.

f. Kekuatan antar molekul

Viskositas air akan naik dengan adanya ikatan molekul hidrogen, viskositas molekul CPO dengan gugus OH pada trigliserida naik dalam keadaan sama.

g. Konsentrasi larutan

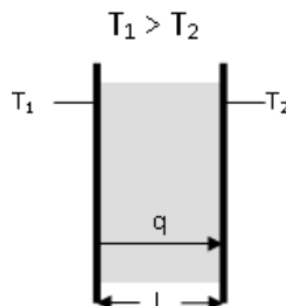
Viskositas berbanding lurus dengan konsentrasi larutan. Suatu larutan dengan konsentrasi tinggi akan memiliki viskositas yang tinggi pula, karena konsentrasi larutan menyatakan bahwa banyaknya partikel zat yang terlarut tiap satuan volume. Semakin banyak pula partikel yang terlarut, gesekan antar partikel semakin tinggi dan viskositasnya semakin tinggi pula.

2.2.6. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor/panas adalah ilmu yang mempelajari berpindahnya suatu energi (berupa panas/kalor) dari suatu sistem ke sistem lain karena adanya perbedaan temperatur. Perpindahan kalor tidak akan terjadi pada sistem yang memiliki temperatur sama. Perbedaan temperatur menjadi daya penggerak untuk terjadinya perpindahan kalor. Sama dengan perbedaan tegangan sebagai penggerak arus listrik. Proses perpindahan kalor terjadi dari suatu sistem yang memiliki temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Keseimbangan pada masing-masing sistem terjadi ketika sistem memiliki temperatur yang sama. Perpindahan kalor dapat berlangsung dengan 3 cara, yaitu:

2.2.6.1. Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi adalah pertukaran panas yang terjadi melalui perambatan molekul-molekul pada suatu media padat dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Perpindahan kalor konduksi di tunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perpindahan Kalor Konduksi (Kurniawan, 2007)

Persamaan perpindahan kalor suatu media dengan cara konduksi satu dimensi, *steady state* dinyatakan dengan Hukum *Fourier* (Haryanto, 2015), yaitu:

$$q = k \cdot A \frac{\delta T}{\delta x} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana: k = Konduktivitas termal bahan (W/m°C)

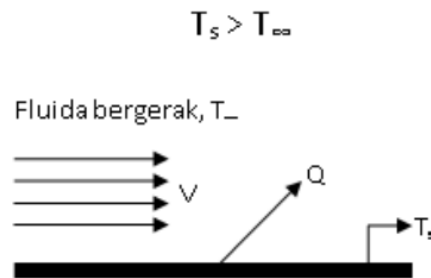
A = Luas penampang perpindahan kalor (m²)

$\frac{\delta T}{\delta x}$ = Perbedaan temperatur yang terjadi pada penampang

(°C/m)

2.2.6.2. Perpindahan Kalor Konveksi

Jika benda bersuhu tinggi berada pada lingkungan fluida bersuhu rendah maka akan terjadi perpindahan kalor secara konveksi dari benda ke lingkungan. Perpindahan kalor konveksi di tunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perpindahan Kalor Konveksi (Kurniawan, 2007)

Perpindahan suatu kalor konveksi dinyatakan dengan Hukum *Newton* (Haryanto, 2015) yaitu:

$$q = h.A.(T_s - T_\infty) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana: h = koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

A = luas penampang perpindahan kalor (m^2)

T_s = temperatur permukaan ($^\circ C$)

T_∞ = temperatur fluida ($^\circ C$)

Bedasarkan penyebab terjadinya, perpindahan kalor konveksi dapat diklarifikasikan menjadi dua, yaitu:

a. Konveksi alami

Konveksi ini terjadi karena adanya perbedaan kerapatan fluida yang disebabkan oleh perbedaan temperatur.

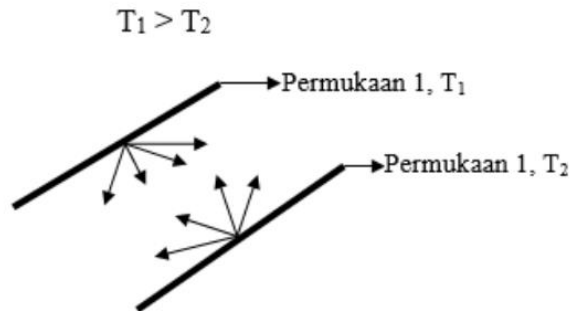
b. Konveksi paksa

Konveksi paksa terjadi karena adanya gerakan pertukaran temperatur yang disebabkan pengaruh mekanis (energi dari luar) seperti kompresor, blower, pompa.

2.2.6.3. Perpindahan Kalor Radiasi

Perpindahan kalor radiasi adalah perpindahan kalor antar benda melalui media udara/gas atau hampa (vakum). Dengan kata lain dapat memindahkan

energi tanpa tergantung pada media perantara. Mekanisme perpindahan kalornya adalah dengan pancaran atau gelombang elektromagnetik seperti digambarkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Perpindahan kalor Radiasi (Kurniawan, 2007)

Perpindahan kalor radiasi dinyatakan dengan Hukum *Stefan Boltzman* (Haryanto, 2015) ditunjukkan pada persamaan 2.3.

$$q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana: ϵ = Emisivitas, $0 \leq \epsilon \leq 1$ ($\epsilon = 1$ untuk benda hitam sempurna)

σ = Konstanta Stefan Boltzman ($5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$)

T_1 = Temperatur permukaan benda 1 (K)

T_2 = Temperatur permukaan benda 2 (K)

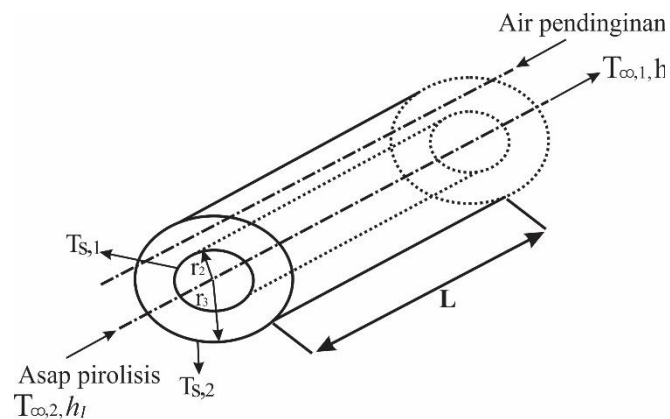
A = Luasan perpindahan panas (m^2)

Perpindahan kalor yang terjadi pada sebuah alat kalor meliputi konveksi pada tiap fluida dan aliran konduksi pada dinding pemisah antar dua fluida tersebut. Sedangkan perpindahan kalor secara radiasi diabaikan karena tidak ada pengaruh yang signifikan. Dalam menganalisis alat penukar kalor diperlukan koefisien perpindahan kalor menyeluruh (U) yang mengganti koefisien konveksi dan koefisien konduksi untuk menghitung catu kalor (Q) yang terjadi.

2.2.6.4. Perpindahan Kalor pada Kondensor

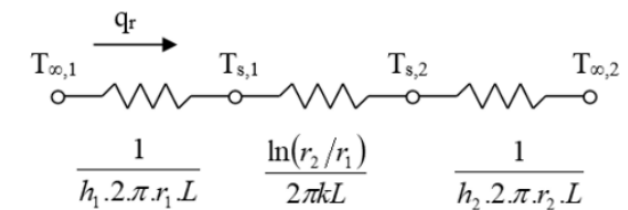
Sebuah silinder berlubang dengan jari-jari dalam r_1 dan jari-jari luar r_2 yang panjangnya L memiliki konduktivitas termal k . Temperatur permukaan dalam dan luar dijaga konstan pada $T_{s,1}$ dan $T_{s,2}$ dengan $T_{s,1} > T_{s,2}$ di tunjukkan pada gambar 2.5. Aliran panas yang terjadi dalam arah radial dan koordinat yang

diperlukan dalam menyatakan sistem adalah r . Luas permukaan aliran dalam sistem silindris adalah $A = 2\pi.r.L$ sehingga laju perpindahan kalor dapat ditentukan.



Gambar 2.4 Perpindahan Palor Pada Kondensor

Analogi Listrik:



Dimana laju perpindahan kalornya yaitu:

$$Q_{(x)} = \frac{2\pi k L (T_{s1} - T_{s2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

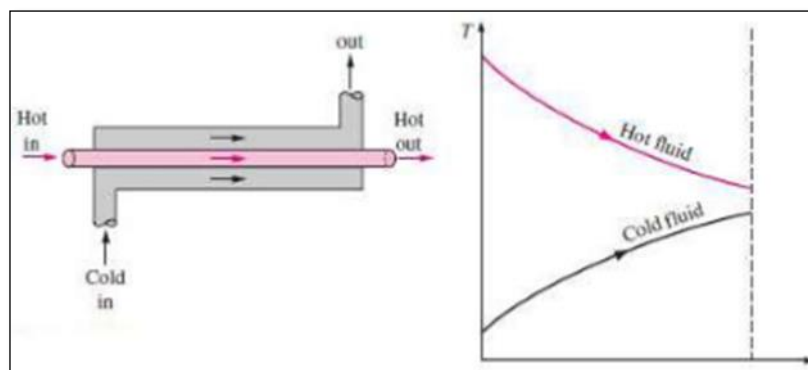
Dimana tahanan termal untuk kasus silinder berlubang adalah:

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_2}$$

2.2.7. Tipe Penukar Kalor

2.2.7.1 Aliran Sejajar (*Parallel flow*)

Penukar Panas Tipe Aliran Sejajar (*Parallel Flow*) Alat penukar kalor tipe sejajar, memiliki arah aliran dari dua fluida yang bergerak secara sejajar. Kedua fluida masuk dan keluar sisi penukar panas yang sama. Temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang menerima sejak memasuki alat penukar kalor hingga keluar. Temperatur fluida yang menerima kalor tidak akan pernah mencapai temperatur fluida yang memberikan kalor. Profil temperatur alat penukar panas aliran sejajar di tunjukkan pada gambar dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Skema *Parallel Flow* (Cengel, 2003)

Perpindahan panas dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Newton tentang pendinginan yang menghubungkan Q dengan ΔT (Cengel, 2003), yaitu:

$$Q = U \times A \times \Delta T \dots \dots \dots (2.11)$$

Berdasarkan asumsi di bawah ini dapat dibuktikan bahwa harga beda temperatur (ΔT) dalam persamaan 2.11 adalah beda temperatur rata-rata logaritmik. Asumsi yang dimaksud sebagai berikut:

- 1) Harga U konstan pada seluruh panjang pipa.
- 2) Laju aliran fluida konstan, memenuhi ketentuan aliran tunak.
- 3) Kerugian kalor diabaikan.
- 4) Kalor jenis (C_p) dianggap konstan.
- 5) Konduksi aksial memanjang pipa diabaikan.

Jika ketentuan di atas terpenuhi, maka persamaan berubah menjadi:

$$Q = U \times A \times \text{LMTD} \dots \dots \dots (2.12)$$

Berdasar jenis aliran yang terjadi pada aliran sejajar (*Parallel Flow*), maka persamaan LMTD di tunjukkan persamaan 2.13 (Cengel, 2003).

$$\text{LMTD}_{\text{PF}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}}) - (T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{out}})}{\ln\left(\frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})}{(T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{out}})}\right)} \dots \dots \dots (2.13)$$

Maka persamaan nilai catu kalor (Q) *parallel flow* (Cengel, 2003) adalah:

$$Q = U \times A \times \text{LMTD}_{\text{PF}} \dots \dots \dots (2.14)$$

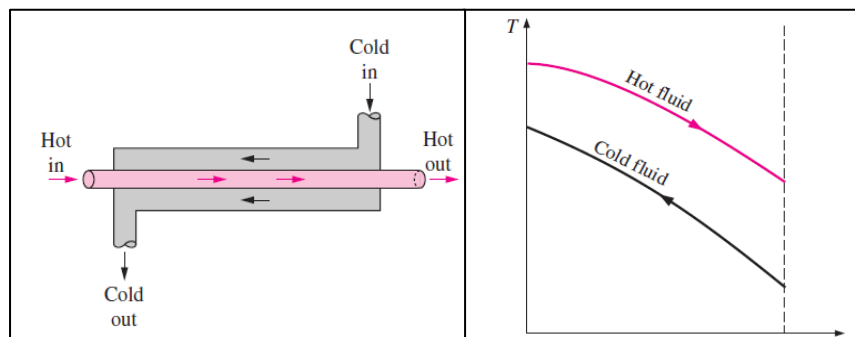
$$UA = \frac{1}{R_{\text{tot}}}$$

$$U = \frac{1}{A \cdot R_{\text{tot}}}$$

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_2}$$

2.2.8. Aliran Berlawanan (*counter flow*)

Penukar Panas Tipe Aliran Berlawanan (*Counter Flow*) yaitu bila kedua fluida mengalir dengan arah yang saling berlawanan dan keluar pada sisi yang berlawanan. Pada tipe ini masih mungkin terjadi bahwa temperatur fluida yang menerima panas (temperatur fluida dingin) saat keluar penukar kalor lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan kalor (temperatur fluida panas) saat meninggalkan penukar kalor. Profil temperatur alat penukar panas aliran berlawanan di tunjukkan pada Gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.2 Skema dan grafik rata-rata ΔT *Counter Flow*

Laju perpindahan panas *parallel flow* :

$$Q_c = m.c (T_3 - T_2)$$

Laju perpindahan panas *counter flow* :

$$Q_c = m.c (T_2 - T_3)$$

Dimana : m = Laju masa fluida (kg/s) untuk debit 18 liter / menit = 0,3 kg/s

c = Kalor jenis air (4180 J / kg °C)

T_2 = Suhu masuk fluida pendingin

T_3 = Suhu keluar fluida pendingin

Berdasarkan persamaan 2.15 (Cengel, 2003), dengan aliran yang berkerja pada aliran berlawanan (*counter flow*), maka nilai LMTD di tunjukkan gambar 2.2 adalah

$$\text{LMTD}_{\text{CF}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}}) - (T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}})}{\ln\left(\frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}})}{(T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}})}\right)} \dots\dots\dots (2.15)$$

Maka persamaan nilai catu kalor (Q) *conter flow* adalah:

$$Q = U \times A \times \text{LMTD}_{\text{CF}} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$UA = \frac{1}{R_{\text{tot}}}$$

$$U = \frac{1}{A \cdot R_{\text{tot}}}$$

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_2}$$