

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Pemanfaatan limbah sampah salah satunya limbah plastik dengan menggunakan metode pirolisis sudah banyak diteliti oleh peneliti pendahulu. Alat dan variabel yang digunakan dalam penelitiannya juga bervariasi dan beragam pada setiap penelitian. Oleh sebab itu penelitian ini memiliki tujuan yaitu bagaimana cara memanfaatkan limbah plastik agar lebih optimal dengan melakukan variasi pada sudut kemiringan kondensor (pendingin) pada alat pirolisis. Dengan melakukan sedikit modifikasi sudut kemiringan kondensor pada alat pirolisis diharapkan dapat menghasilkan produksi minyak plastik yang lebih optimal dan dapat mengurangi pencemaran lingkungan.

Penelitian sebelumnya yang menjadi bahan pertimbangan yaitu penelitian (Landi dan Arijanto, 2017). Penelitian ini dilakukan dengan bahan baku sampah plastik LDPE. Metode penelitian ini dilakukan pada temperatur 350 °C, 500 °C, dan 700 °C dan waktu reaksi selama 0-60 menit. Dari hasil penelitian di dapatkan volume 140 ml, 210 ml, dan 365 ml. Densitas yang dihasilkan yaitu 0,7291 gr/ml, 0,7563 gr/ml, dan 0,7336 gr/ml. Nilai kalor yang dihasilkan adalah 36,290 J/gr, 28,517 J/gr, dan 40,124 J/gr. Hasil densitas dan nilai kalor yang dihasilkan mendekati densitas dan nilai kalor pada minyak tanah dan bensin. Suhu optimum diantara tiga variasi suhu yang dilakukan yaitu pada suhu 700 °C. Perancangan alat disesuaikan dengan fungsi, karakteristik dan lingkungan dimana proses berlangsung. Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.1. berikut :

Tabel 2.1. Hasil data penelitian (Landi dan Arijanto, 2017)

NO	Suhu (°C)	Volume Minyak (ml)	Densitas (gr/ml)	Nilai Kalor (Kal/gr)	Konsumsi Elpiji (kg)
1.	350	140	0.7291	8667.72	0.07
2.	500	210	0.7563	6811.17	0.09
3.	700	365	0.7336	9583.45	0.12

Penelitian yang dilakukan (Liestiono dkk, 2017) penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik minyak dan gas hasil proses dekomposisi termal (pirolisis) sampah plastik jenis *low density polyethylene* (LDPE). Pada proses ini digunakan reaktor pirolisis kapasitas 2 kg dengan laju kenaikan suhu sebesar 2, 4, dan 6 °C/menit sebagai variabel penelitian. Minyak dan gas yang terbentuk ditampung dalam wadah penampung dan diukur rendemen nya. Minyak yang dihasilkan semakin banyak dan gas semakin sedikit. Rendemen minyak terbesar sebesar 35,83 % dihasilkan pada proses pirolisis dengan laju kenaikan suhu 6 °C /menit, nilai rendemen gas adalah paling kecil sebesar 5,83 %. Sementara hasil identifikasi gas, yang paling dominan adalah gas jenis butena, dimana kadarnya semakin kecil seiring dengan laju kenaikan suhu. Kandungan gas butena terbesar sebesar 98% pada laju kenaikan suhu 2 °C /menit.

Penelitian (Pani dkk, 2017) proses pirolisis menggunakan plastik *Low Density Polyethylene* (LDPE) dilakukan pada suhu reaktor 250 °C dan 300 °C. Jumlah minyak plastik tertinggi didapatkan pada suhu reaktor 300 °C dan terendah pada suhu reaktor 250 °C dengan masing-masing sebesar 260 ml dan 240 ml. Jumlah briket arang yang digunakan dalam proses pirolisis 250 °C adalah sebanyak 3 kg. Jumlah briket arang yang digunakan diawal pembakaran adalah 2 kg dan dilakukan penambahan sebanyak 1 kg setelah proses pirolisis berjalan 30 menit pada suhu 250° C. Sedangkan dalam proses pirolisis 300 °C briket arang yang digunakan adalah sebanyak 4 kg dengan 2 kg diawal pembakaran dan

dilakukan penambahan briket sebanyak dua kali sebanyak masing-masing 1 kg pada saat proses pirolisis berjalan 25 menit pada suhu reaktor 250° C dan 70 menit pada suhu reaktor 270°C. Jumlah padatan atau arang sisa pembakaran plastik LDPE pada suhu reaktor 300 °C adalah seberat 720 gram, sedangkan jumlah padatan atau arang sisa pembakaran pada suhu reaktor 250 °C adalah seberat 800 gram. Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.2. berikut :

Tabel 2.2. Hasil data penelitian (Pani dkk, 2017)

NO	Suhu (°C)	Volume Minyak (ml)	Densitas (gr/ml)	Nilai Kalor (Kal/gr)	Viskositas ( mm <sup>2</sup> /s )	Flash Point (°C)
1.	250	240	0.9984	8764.253	3.218	28.5
2.	300	260	0.9085	9507.779	2.698	28.5

Penelitian dilakukan oleh (Santoso, 2010) penelitian dilakukan pada dua jenis plastik yaitu Polypropylene (PP) dan *Low Density Polyethylene* (LDPE) yang dipirolisis pada reaktor batch dimana pemanasan berasal dari luar. Temperatur dinding reaktor diatur pada suhu 300°C, 350°C, 400°C dan 450°C. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur dinding reaktor maka minyak pirolisis yang dihasilkan semakin banyak. Hasil minyak terbanyak terjadi pada temperatur dinding 450°C yaitu 66% baik pada plastik PP maupun LDPE. . Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.3. berikut :

Tabel 2.3. Hasil data penelitian (Santoso, 2010)

Jenis	Minyak (%)	Viskositas (cP)	Nilai kalor (MJ/kg)	Massa jenis (kg/L)	Efisiensi kompor (%)
PP	66	0,43	43,33	0,73	42
LDPE	66	0,58	43,34	0,76	46

Penelitian (Haryadi, 2015) menggunakan plastik jenis HDPE dalam penelitiannya. Pirolisis yang dilakukan menggunakan suhu 300°C dengan lama pemanasan 17,5 menit. Bahan yang digunakan adalah PP (*polypropylene*) dan *High Density Polyethylene (HDPE)*. Pemanasan dilakukan dengan bahan bakar LPG dan dengan 2 arah aliran uap dan air yang berbeda yaitu paralel 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 360ml minyak plastik PP. Sedangkan hasil minyak HDPE adalah 400 ml dengan perpindahan kalor tertinggi 1.218 Watt.

Penelitian (Andriyanto, 2017) menggunakan bahan baku sampah plastik LDPE dengan total 3 kg dimana setiap percobaan menggunakan 1 kg sampah plastik LDPE yang dipotong dengan ukuran 5 cm 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 dimana waktu yang paling efisien untuk proses pirolisis sampah plastik LDPE terjadi pada menit ke-20 sampai menit ke-50. 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. Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.4. berikut :

Tabel 2.4. Hasil data penelitian (Andriyanto, 2017)

Sudut (derajat)	Minyak (gr)	Abu (gr)	Plastik (gr)	Persentase Minyak (%)	Persentase Abu (%)	Gas (gr)
0	442	117	1000	44,2	11,7	44,1
15	428	160	1000	42,8	16	41,2
30	375	262	1000	37,5	26,2	36,3

Penelitian (Wijaya, 2017) pada percobaan pirolisis menggunakan plastik LDPE sebanyak 1 kg dengan debit air pendingin 18 LPM dan sudut kondensor 0° dan suhu pirolisis 300 °C-350 °C menghasilkan minyak plastik total 540 ml, percobaan dengan sudut 15° menghasilkan minyak plastik sebanyak 590 ml, dan percobaan dengan sudut 30° menghasilkan minyak plastik sebanyak 520 ml. Persentase hasil minyak tertinggi didapat pada percobaan dengan sudut 15° dengan 45,1% minyak dan 15,4% abu. Sedangkan pada percobaan 0° mendapatkan 41,4% minyak dan 17,3% abu dan pada percobaan 30° mendapatkan 39,2% minyak dan 22,3% abu. Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.5. berikut :

Tabel 2.5. Hasil data penelitian (Wijaya, 2017)

Sudut kondensor	Plastik (gr)	Minyak (gr)	Abu (gr)	Persentase Minyak(%)	Persentase Abu (%)	Persentase gas (%)
0°	1000	414	173	41.4	17.3	41.3
15°	1000	451	154	45.1	15.4	39.5
30°	1000	392	223	39.2	22.3	38.5

Penelitian (Iswadi dkk, 2017) penelitian untuk mengetahui perbandingan hasil volume yang diperoleh dari LDPE dan PET, dan mengetahui hasil kualitas bahan bakar minyak yang dihasilkan dari LDPE dan PET. Proses pirolisis dilakukan pada reaktor selama 2 jam dengan suhu 250°C dan tekanan 2 bar dengan umpan sebanyak 1 kg. Hasil minyak pirolisis dari LDPE diperoleh sebanyak 525 ml sedangkan pada dari PET diperoleh sebanyak 368.47 ml. Densitas minyak hasil pirolisis LDPE dan PET mendekati nilai densitas dari minyak tanah. Viskositas minyak hasil pirolisis dengan bahan LDPE dan PET termasuk ke dalam jenis minyak tanah, Nilai kalor minyak hasil pirolisis dengan bahan LDPE mendekati nilai kalor dari minyak diesel sedangkan nilai kalor minyak hasil pirolisis dengan bahan PET mendekati nilai kalor minyak tanah. Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.6. Berikut :

Tabel 2.6. Hasil data penelitian (Iswadi dkk, 2017)

Jenis	Minyak (ml)	Densitas (kg/liter)	Titik nyala	Nilai kalor (kg/liter)
LDPE	525	0,7673	<-5	44,0533
PET	368,47	0,7976	<-5	42,622

Penelitian (Endang K dkk, 2016) pirolisis sampah plastik ini dilakukan dengan umpan yaitu sampah plastik jenis *Polypropylene* dan sampah plastik jenis *Low Density Polyethylene*. Proses pirolisis dijalankan dalam reaktor semi batch dimana umpan sebanyak 500 gram dimasukkan sekaligus dalam reaktor dan produk. Proses pirolisis dilaksanakan selama 60 menit dengan variasi suhu 250 °C, 300 °C, 350 °C serta 400 °C dengan kondisi vakum. Selain itu di dalam reaktor diisi oleh pasir silika sebagai penahan panas serta zeolit sebagai katalis proses cracking hidrokarbon. Minyak hasil pirolisis terbanyak dari sampah plastik PolyPropylene diperoleh pada suhu operasi 400 °C sebanyak 27,05% sedangkan minyak hasil pirolisis terbanyak dari sampah plastik *Low Density Polyethylene* diperoleh pada suhu operasi 300 °C sebanyak 37,43%. Viskositas minyak hasil pirolisis mendekati nilai viskositas dari bensin. Densitas minyak hasil pirolisis mendekati nilai densitas dari solar dan minyak tanah. Nilai kalor minyak hasil pirolisis mendekati nilai kalor dari solar dan minyak tanah. Hasil penelitian akan ditampilkan pada Tabel 2.7. berikut :

Tabel 2.7. Hasil data penelitian (Endang K dkk, 2016)

Suhu	Minyak (%)		Densitas (gr/ml)		Viskositas (cP)		Nilai kalor (kkal/kg)	
	LDPE	PP	LDPE	PP	LDPE	PP	LDPE	PP
250	20.74	24.52	0.8481	0.8598	0.6	0.66	8719.3	10084.6
300	46.02	39.92	0.7960	0.7905	0.62	0.72	8976.7	10246.4
350	34.52	27	0.8417	0.8349	0.7	0.6	9374.3	10298.6
400	30.84	50.08	0.8429	0.8128	0.52	0.56	9533.1	10570.1

Penelitian (Gaurav dkk, 2014) penelitian ini dilakukan dengan bahan baku sampah plastik LDPE dengan suhu pirolisis diatas 300°C-500°C tanpa oksigen. 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. Minyak yang dihasilkan harus dipisahkan zat pengotor. Karakteristik minyak yang dihasilkan bisa dilihat di Tabel 2.8.

Tabel 2.8. karakteristik minyak plastik hasil penelitian (Gaurav dkk, 2014)

No	Properties	Value
1	Density	702.5 kg/m <sup>3</sup>
2	Viscosity	5.27 m. Poise
3	Flash Point	22°C
4	Fire Point	29°C
5	Calorific Value	43796.02 KJ/kg

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Plastik

#### 2.2.1.1 Pengertian Plastik

Plastik adalah polimer rantai panjang atom mengikat satu sama lain. Rantai ini membentuk banyak unit molekul berulang, atau "monomer". Bahan pembuat plastik pada mulanya adalah minyak dan gas sebagai sumber alami, tetapi di dalam perkembangannya bahan-bahan ini digantikan dengan bahan sintesis sehingga dapat diperoleh sifat-sifat plastik yang diinginkan dengan cara kopolimerisasi, laminasi dan ekstruksi (Landi dan Arijanto, 2017).

Menurut Nasiri (2004) Secara umum plastik mempunyai sifat yaitu densitas yang rendah; isolasi terhadap listrik; mempunyai kekuatan mekanik yang bervariasi; ketahanan terhadap suhu terbatas; ketahanan terhadap bahan kimia bervariasi (Pramiati, 2016).

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 molekul-molekulnya. (Krisna, 2013).

#### 2.2.1.2 Jenis-jenis Plastik

Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik di atas, thermoplas adalah plastic yang dapat 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*)



Jenis plastik ini banyak digunakan untuk botol minuman seperti botol air mineral, botol jus. Botol dari jenis ini hanya direkomendasikan untuk satu kali pemakaian. Penggunaannya sebagai bahan dasar botol kemasan mencapai 30% pemakaian dunia. Selain itu juga digunakan sebagai serat sintetis atau poliester

yang mencapai 60% pemakaian dunia. Karakteristik dari jenis plastik ini adalah berwarna jernih, transparan atau tembus pandang, liat, kuat, dan tahan panas.

Kode 2: HDPE (*High density polyethylene*)



*Polyethylene* densitas tinggi. Merupakan plastik serba guna yang dapat didaur ulang. Dapat didaur ulang menjadi botol, keramik, pipa dan outdoor furniture. Biasanya digunakan untuk botol susu warna putih, Tupperware, galon air minum, dan kursi lipat. Sifat bahannya lebih kuat, buram, tahan terhadap suhu tinggi dan mudah diproses dan dibentuk. Karena kekuatannya, plastik jenis ini aman digunakan.

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



*Polyvinyl chloride*. Merupakan jenis plastik yang paling sulit didaur ulang. Ditemukan pada plastik pembungkus (*cling wrap*), botol detergen, dan bahan spanduk dari *vinyl*. Sifat dari plastik ini serbaguna, mudah dicampur, kuat, tahan minyak, tahan kimia, dan jernih.

Kode 4: LDPE (*Low density polyethylene*)



*Polyethylene* densitas rendah. Merupakan plastik yang terbuat dari minyak bumi, dengan tipe plastik coklat (termoplastik). Biasa digunakan untuk tempat makanan, plastik kemasan dan botol yang lembek. Sifat mekanis dari plastik ini adalah kuat, agak tembus pandang, fleksibel, tahan panas, kimia dan permukaan agak berlemak. Jenis plastik ini dapat didaur ulang, baik untuk barang-barang yang memerlukan fleksibilitas tetapi kuat dan memiliki resistensi yang baik terhadap reaksi kimia. Plastik jenis ini sulit di hancurkan, tetapi baik digunakan sebagai tempat makanan.

Kode 5: PP (*Polypropylene*)



*Polypropylene* memiliki ciri-ciri transparan yang tidak jernih atau berawan, lebih kuat, ringan dengan daya tahan tembus uap yang rendah. Memiliki ketahanan yang baik terhadap lemak, stabil terhadap suhu tinggi dan cukup mengkilat. Ditemukan dalam tutup botol, botol makanan, sedotan. Memiliki titik lebur yang tinggi dan dapat digunakan untuk tempat cairan panas. *Polypropylene* merupakan bahan plastik terbaik untuk tempat makanan, minuman dan sebagai tempat menyimpan makanan, botol minum dan botol bayi.

Kode 6: PS (*Polystyrene*)



*Polystyrene* dikenal dengan nama komersial *styrofoam* (gabus sintetis). Jenis plastik ini dikhawatirkan dapat melepaskan toksin ke dalam makanan. Memiliki sifat serba guna, jernih, mudah dibentuk menjadi *foam*. Dapat didaur ulang dan digunakan untuk membuat insulasi.

Kode 7: *OTHER*



*Polycarbonate* merupakan jenis plastik selain plastik bersimbol 1-6. Jenis plastik ini banyak digunakan untuk DVD, kacamata hitam, anti peluru, gallon air 5 liter. Memiliki sifat beragam, tergantung kombinasi bahan baku penyusun. Jenis plastik ini tidak mudah untuk didaur ulang, namun bisa dilakukan (Yunida, 2010).

### 2.2.2 Pirolisis

Proses pirolisis telah lama dikenal dan sudah banyak peneliti yang melakukan penelitian pirolisis serta telah dipatenkan. Pada dasarnya proses pirolisis adalah proses perusakan suatu bahan menggunakan panas (*thermal*) (Falaah dan Cifriadi, 2012). Proses pirolisis merupakan metode yang optimal dan ramah lingkungan untuk proses penguraian dengan cara pemanasan tanpa atau dengan sedikit oksigen. Proses ini dapat digunakan untuk merubah komposisi

kimia bahan seperti batubara, sampah organik dan non-organik (kertas, plastik) untuk menghasilkan sesuatu yang berguna seperti gas, arang (material padat), dan material cair (*bio-oil*) yang diharapkan akan menjadi bahan bakar alternatif dari bahan bakar fosil yang ada saat ini (Putra, 2016).

Pirolisis atau devolatilisasi adalah proses fraksinasi material oleh suhu. Pirolisis adalah proses dekomposisi suatu bahan pada suhu tinggi tanpa adanya udara atau dengan udara terbatas. Proses dekomposisi pada pirolisis ini juga sering disebut dengan *devolatilisasi*. (Iswadi dkk, 2017).

Pranata, (2008) meneliti tentang minyak pirolisis dari plastik *polietilena*, hasil penelitian menunjukkan bahwa minyak pirolisis dari plastik *polietilena* mempunyai densitas 939 kg/m<sup>3</sup> atau lebih berat dari minyak tanah. Minyak bakar ini mempunyai *ignition point* 30,4°C sehingga sangat mudah dinyalakan. Komponen utama minyak pirolisis dari plastik *polietilena* adalah *styrene monomer* yang kadarnya hampir 64%. Sedangkan lebih dari 80% minyak pirolisis ini terdiri dari *styrene*. (Santoso, 2010).

Proses pirolisis dimulai pada temperature sekitar 230°C, ketika komponen yang tidak stabil secara termal, dan *volatile matters* pada sampah akan pecah dan menguap bersamaan dengan komponen lainnya. Produk cair yang menguap mengandung tar dan polyaromatic hydrocarbon. Produk pirolisis umumnya terdiri dari gas (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan CH<sub>4</sub>), tar (*pyrolitic oil*), dan arang. (Iswadi dkk., 2017).

Pirolisis sampah plastik merupakan teknologi yang masih perlu dikembangkan. Kendala yang biasa ditemui dalam proses pirolisis adalah proses kondensasi yang kurang optimal. Di dalam reaktor terjadi kontak antar fluida gas dengan limbah plastik. Kontak ini menyebabkan terbawanya material hidrokarbon yang telah mengalami *cracking* atau perengkahan. Sering terjadi penyebaran fluida gas yang tidak merata saat proses kontak berlangsung. Hal ini disebabkan karena adanya penggelembungan, penorakan, dan saluran-saluran fluida yang terpisah. Akibatnya kontak antara fluida dari sampah plastik dengan fluida pendingin menjadi tidak maksimal. Hal ini tentu berpengaruh pada minyak plastik

yang dihasilkan. Gas yang gagal terkondensasi akan terbuang ke lingkungan dan mengurangi kualitas minyak plastik yang dihasilkan (Wijaya, 2017).

### **2.2.3 Bahan Bakar Cair**

Bahan bakar cair adalah bahan bakar yang strukturnya tidak rapat, jika dibandingkan dengan bahan bakar padat molekulnya dapat bergerak bebas. Bensin/gasolin/premium, minyak solar, minyak tanah adalah contoh bahan bakar cair. Bahan bakar cair yang biasa dipakai dalam industri, transportasi maupun rumah tangga adalah fraksi minyak bumi. Minyak bumi adalah campuran berbagai hidrokarbon yang termasuk dalam kelompok senyawa: parafin, naphtena, olefin, dan aromatik. Kelompok senyawa ini berbeda dari yang lain dalam kandungan hidrogennya. Minyak mentah, jika disuling akan menghasilkan beberapa macam fraksi, seperti: bensin atau premium, kerosen atau minyak tanah, minyak solar, minyak bakar, dan lain-lain. Setiap minyak petroleum mentah mengandung keempat kelompok senyawa tersebut, tetapi perbandingannya berbeda (Kristanto, 2015).

Dari segi penggunaannya yang mudah, efisiensi thermis lebih tinggi, serta penanganan dan pengangkutannya lebih mudah, mengakibatkan penggunaan minyak bumi sebagai penyedia sumber energi yang utama menjadi semakin meningkat. Secara teknis, bahan bakar cair merupakan sumber energi yang terbaik, mudah ditangani, mudah dalam penyimpanan dan nilai kalor pembakarannya cenderung konstan. Ada beberapa kelebihan dari bahan bakar cair dibandingkan dengan bahan bakar padat lainnya diantaranya yaitu :

- a. Kebersihan dan hasil pembakaran.
- b. Menggunakan alat bakar yang lebih kompak.
- c. Penanganannya lebih mudah.

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

## 2.2.4 Karakteristik Bahan Bakar

Bahan bakar yaitu suatu materi apa pun yang dapat di ubah menjadi energi. Umumnya bahan bakar mengandung energi panas yang bisa dilepaskan serta dimanipulasi. Biasanya bahan bakar dipakai manusia lewat sistem pembakaran (reaksi redoks) dimana bahan bakar itu bakal melepaskan panas sesudah direaksikan dengan oksigen di udara. (Nurahman, dkk., 2017). Secara umum karakteristik bahan bakar cair yang perlu diketahui adalah sebagai berikut :

### 2.2.4.1 Titik nyala (*Flash Point*)

Dalam suatu bahan bakar cair yang perlu diperhatikan adalah besarnya *flash point* dan *fire point*. *Flash point* adalah suhu pada uap diatas permukaan bahan bakar minyak yang akan terbakar dengan cepat (meledak/penyalaan api sesaat) apabila nyala api didekatkan padanya, sedangkan *fire point* adalah temperatur pada keadaan dimana uap di atas permukaan bahan bakar minyak terbakar secara kontinyu apabila nyala api didekatkan padanya. (Wiratmaja, 2010). Contoh beberapa titik flash point bisa dilihat pada Tabel 2.9 berikut:

Tabel 2.9. Tabel *Flash Point Biodiesel* (Dermanto, 2014)

Bahan bakar	Flash point (°C)
Bensin	7.2
Solar	51.6
Biodiesel	148.8

### 2.2.3.1 Viskositas (*Viscosity*)

Viskositas atau ukuran kekentalan suatu zat cair adalah sifat dari suatu zat cair (fluida) disebabkan adanya gesekan antara molekul-molekul zat cair dengan gaya kohesi pada zat cair tersebut. Gesekan-gesekan inilah yang menghambat aliran zat cair. Besarnya kekentalan zat cair (viskositas) dinyatakan dengan suatu bilangan yang menentukan kekentalan suatu zat cair. Hukum viskositas Newton menyatakan bahwa untuk laju perubahan bentuk sudut fluida yang tertentu maka tegangan gesek berbanding lurus dengan viskositas. (fitri dkk., 2013)

Kekentalan disebabkan karena kohesi antara partikel zat cair. Zat cair ideal tidak mempunyai kekentalan. Zat cair mempunyai beberapa sifat sebagai berikut: apabila ruangan lebih besar dari volume zat cair akan terbentuk permukaan bebas horizontal yang berhubungan dengan atmosfer, mempunyai rapat massa dan berat jenis, dapat dianggap tidak termampatkan, mempunyai viskositas (kekentalan) dan mempunyai kohesi, adesi dan tegangan permukaan fluida (Atkins, 1997). Faktor – faktor yang mempengaruhi viskositas adalah :

a. Tekanan

Pengaruh viskositas terhadap tekanan yaitu viskositas cairan naik dengan naiknya tekanan, sedangkan viskositas gas tidak dipengaruhi oleh tekanan.

b. Temperatur

Viskositas akan turun dengan naiknya suhu, sedangkan viskositas akan naik dengan turunnya suhu. Pemanasan zat cair menyebabkan molekul – molekulnya memperoleh energi. Molekul – molekul cairan bergerak sehingga gaya interaksi antar molekul melemah. Dengan demikian viskositas cairan akan turun dengan kenaikan temperatur.

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. (Bird, 1994).

### 2.2.3.2 Nilai Kalor (*Calorific Value*)

Pada umumnya bahan bakar minyak mempunyai nilai kalori antara 18.300 – 19.800 B.T.U./lb atau 10.160 – 11.000 kkal/kg. nilai kalori kotor ini adalah besarnya panas yang diperoleh dari pembakaran suatu jumlah tertentu minyak didalam zat asam. Makin tinggi berat jenis suatu minyak makin rendah nilai kalori kotornya, atau lebih jelasnya minyak solar mempunyai nilai kalori kotor lebih besar dari pada minyak diesel. Selain itu, sering juga digunakan satuan nilai kalori bersih yang besarnya adalah lebih rendah dari pada nilai kalori kotor dan rata-rata besarnya perbedaan antara nilai kalori kotor dengan nilai kalori bersih adalah sebagai berikut:

- a. Untuk minyak solar 1.200 B.T.U./lb atau 667 kcal/kg
- b. Untuk minyak diesel 1.100 B.T.U./lb atau 612 kcal/kg
- c. Untuk minyak bakar 1.000 B.T.U./lb atau 556 kcal/kg

Beragam sistem pada kalorimeter telah dikembangkan, seperti yang telah diaplikasikan oleh Wadsö dr. (2001). *Calorific value* (H, juga disebut *heat value*) menunjukkan jumlah energi yang dihasilkan oleh suatu bahan per satuan massa setelah terbakar sempurna. Semakin tinggi *calorific value* (nilai kalor) suatu bahan bakar maka energi yang dihasilkan pun akan semakin efisien, karena menghasilkan panas yang lebih besar dengan massa yang sedikit. (Irzon, 2012).

## 2.2.5 Perpindahan Panas

Perpindahan panas dapat di definisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah-daerah tersebut dari temperatur fluida yang lebih tinggi ke fluida lain yang memiliki temperatur lebih rendah. Perpindahan panas pada umumnya dibedakan menjadi tiga cara perpindahan panas yang berbeda yaitu konduksi (*conduction*; juga dikenal dengan istilah hantaran), radiasi (*radiation*; juga dikenal dengan istilah pancaran), dan konveksi (*convection*; juga dikenal dengan istilah aliran) (Yunus, 2009).

### 2.2.5.1 Konduksi

Konduksi adalah proses dimana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung (Ambarita, 2012). Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Konduksi adalah satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya. Konduksi penting pula dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya bergabung dengan konveksi, dan dalam beberapa hal juga dengan radiasi. Persamaan dasar untuk konduksi satu dimensi dalam keadaan studi dapat ditulis:

$$q_k = -k.A \frac{\Delta T}{x}$$

Keterangan:

$q_k$  = laju perpindahan panas dengan cara konduksi (Watt)

$A$  = luas perpindahan panas ( $m^2$ )

$\Delta T$  = gradien suhu pada penampang (K)

$x$  = jarak dalam arah aliran panas (m)

$k$  = konduktivitas thermal bahan (W/m.K) (Incropera, 1982).

### 2.2.5.2 Radiasi

Radiasi adalah proses panas yang mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan bila terdapat ruang hampa di antara benda-benda tersebut. Semua benda

memancarkan panas radiasi secara terus-menerus. Intensitas pancaran tergantung pada suhu dan sifat permukaan. Energi radiasi bergerak dengan kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s) dan gejala-gejalanya menyerupai radiasi cahaya. Memang menurut teori elektromagnetik, radiasi cahaya dan radiasi thermal hanya berbeda dalam panjang gelombang masing-masing (Holman, 2002).

Untuk mengitung besarnya panas yang dipancarkan dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$q_r = e.A.\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

Keterangan:

$q_r$  = laju perpindahan panas dengan cara radiasi (Watt)

$e$  = emitansi permukaan kelabu

$A$  = luas permukaan ( $m^2$ )

$\sigma$  = konstanta dimensional ( $0,174 \cdot 10^{-8}$  BTU/h  $ft^2$  °C)

$T_1$  = Temperatur Benda kelabu (K)

$T_2$  = Temperatur Benda hitam yang mengelilinginya (K) (Incropera, 1982).

### 2.2.5.3 Konveksi

Konveksi adalah proses transport energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan dan gerakan mencampur. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas. Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida ini. Kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu rendah didalam fluida di mana mereka akan bercampur dengan, dan memindahkan sebagian energinya pada partikel-partikel fluida lainnya. Dalam hal ini alirannya adalah aliran fluida maupun energi (Ambarita, 2011).

Energi sebenarnya disimpan di dalam partikel-partikel fluida dan diangkut sebagai akibat gerakan massa partikel-partikel tersebut. Mekanisme ini untuk operasinya tidak tergantung hanya pada beda suhu dan oleh karena itu tidak secara

tepat memenuhi definisi perpindahan panas. Tetapi hasil bersihnya adalah angkutan energi, dan karena terjadinya dalam arah gradien suhu, maka juga digolongkan dalam suatu cara perpindahan panas dan ditunjuk dengan sebutan aliran panas dengan cara konveksi (Ambarita, 2011).

Perpindahan panas secara konveksi antara batas benda padat dan fluida terjadi dengan adanya suatu gabungan dari konduksi dan angkutan (transport) massa. Jika batas tersebut bertemperatur lebih tinggi dari fluida, maka panas terlebih dahulu mengalir secara konduksi dari benda padat ke partikel-partikel fluida di dekat dinding. Energi yang di pindahkan secara konduksi ini meningkatkan energi di dalam fluida dan terangkut oleh gerakan fluida. Bila partikel-partikel fluida yang terpanaskan itu mencapai daerah yang temperaturnya lebih rendah, maka panas berpindah lagi secara konduksi dari fluida yang lebih panas ke fluida yang lebih dingin (Buchori, 2011).

Laju perpindahan panas dengan cara konveksi antara suatu permukaan dan suatu fluida dapat dihitung dengan hubungan:

$$q = h.A.(T_w - T_f)$$

Keterangan:

$q$  = laju perpindahan panas dengan cara konveksi (Watt)

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

$T_w$  = Temperatur dinding (K)

$T_f$  = Temperatur fluida (K)

$h$  = koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2.K$ ) (Incroperara, 1982)

Koefisien perpindahan panas konveksi  $h$  bervariasi terhadap jenis aliran (aliran laminar atau turbulen), sifat-sifat fisik fluida, temperatur rata-rata, juga dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas konveksi (Stoecker, 1982).

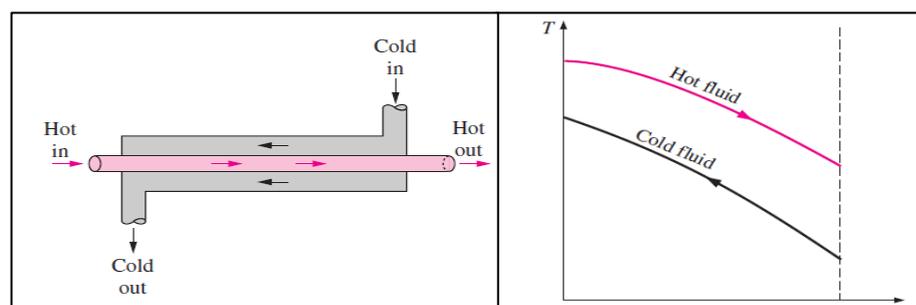
Banyak parameter yang mempengaruhi perpindahan panas konveksi di dalam sebuah geometri khusus. Parameter-parameter ini termasuk skala panjang sistem ( $L$ ), konduktivitas termal fluida ( $k$ ), biasanya kecepatan fluida ( $V$ ), kerapatan ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), panas jenis ( $C_p$ ), dan kadang-kadang faktor lain yang berhubungan dengan cara-cara pemanasan (temperatur dinding uniform atau temperatur dinding berubah-ubah). Fluks kalor dari permukaan padat akan bergantung juga pada

temperatur permukaan ( $T_w$ ) dan temperatur fluida ( $T_f$ ), tetapi biasanya dianggap bahwa ( $\Delta T = T_w - T_f$ ) yang penting. Akan tetapi, jika sifat-sifat fluida berubah dengan nyata pada daerah pengkonveksi (convection region), maka temperatur-temperatur absolute  $T_w$  dan  $T_f$  dapat juga merupakan faktor-faktor penting didalam korelasi (Supu dkk, 2016).

## 2.2.6 Tipe Aliran Penukar Kalor

### 2.2.6.1 Aliran berlawanan (*counter flow*)

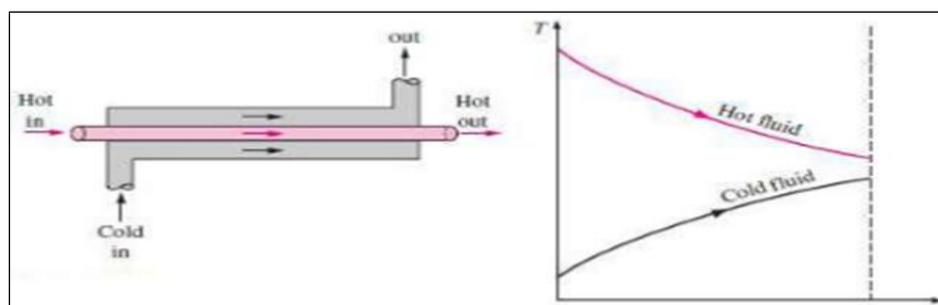
Penukar kalor tipe aliran berlawanan arah atau *counter flow* adalah penukar kalor yang fluida panas dan fluida dinginnya masuk dan keluar pada arah yang berlawanan arah (Cengel, 2003). Skema dan grafik rata-rata  $\Delta T$  dalam aliran *counter flow* dapat dilihat pada Gambar 2.1. berikut :



Gambar 2.1. Skema dan grafik rata-rata  $\Delta T$  *counter flow*

### 2.2.6.2 Aliran sejajar (*parallel flow*)

Penukar kalor tipe aliran sejajar atau sering disebut dengan parallel flow yaitu penukar kalor dengan fluida panas dan fluida dingin masuk dan keluar pada arah yang sama (Cengel, 2003). Skema dan grafik rata-rata  $\Delta T$  dalam aliran *parallel flow* dapat dilihat pada Gambar 2.2. berikut :



Gambar 2.2. Skema *parallel flow* (Cengel, 2003).

### 2.2.7 Penukar Perpindahan Kalor

Faktor perhitungan pada alat penukar kalor adalah masalah perpindahan panasnya. Apabila panas yang dilepaskan besarnya sama dengan Q persatuan waktu, maka panas itu diterima fluida yang dingin sebesar Q tersebut dengan persamaan :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lmtd}$$

di mana :

Q = Kalor yang dilepaskan/diterima (W)

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

A = Luas perpindahan panas ( $m^2$ )

$\Delta T_{lmtd}$  = Selisih temperatur rata-rata ( $^\circ C$ )

Sebelum menentukan luas permukaan kalor (A), maka terlebih dahulu ditentukan nilai dari LMTD (*Log Mean Temperature Different*). Hal ini berdasarkan selisih temperatur dari fluida yang masuk dan keluar dari kalor.

Persamaan selisih temperatur rata-rata logaritma (LMTD) :

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Untuk jenis aliran *Parallel flow* :

$$\Delta T_1 = Th_{in} - Tc_{in}$$

$$\Delta T_2 = Th_{out} - Tc_{out}$$

Untuk jenis aliran *Counter flow* :

$$\Delta T_1 = Th_{in} - Tc_{out}$$

$$\Delta T_2 = Th_{out} - Tc_{in}$$

dimana :

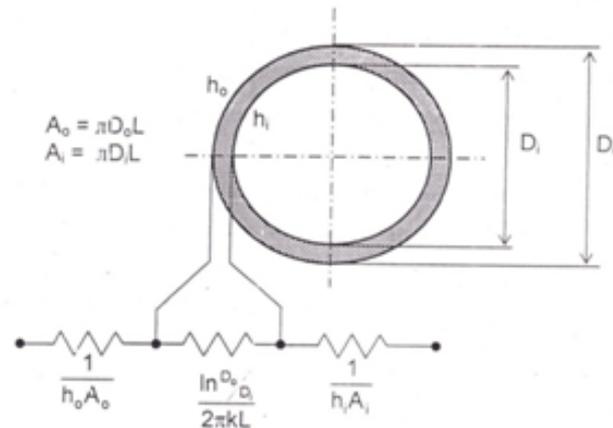
$Th_{in}$  = Temperatur fluida panas masuk ( $^\circ C$ )

$Tc_{in}$  = Temperatur fluida dingin masuk ( $^\circ C$ )

$h_{out}$  = Temperatur fluida panas keluar ( $^\circ C$ )

$Tc_{out}$  = Temperatur fluida dingin keluar ( $^\circ C$ )

Koefisien perpindahan panas total didefinisikan sebagai koefisien hambatan termal total menuju perpindahan panas diantara dua fluida. Koefisien perpindahan panas total juga didefinisikan sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi dengan memperhitungkan hambatan diantara fluida yang dipisahkan oleh lapisan komposit dan dinding silinder.



Gambar 2.3. Koefisien perpindahan kalor total

Dalam melakukan analisis untuk menentukan seberapa tinggi koefisien perpindahan panas total saat proses maka dapat diperoleh melalui persamaan berikut :

Analogi hambatan listrik

$$R_{tot} = \frac{1}{h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o}$$

Luas perpindahan panas

$$A = \frac{1}{R_{tot}}$$

Koefisien perpindahan panas total

$$U = \frac{1}{A.R_{tot}}$$

Dimana :

$U$  = Koefisien perpindahan panas total ( $W/m^2.K$ )

$A$  = Luas perpindahan panas

$h_i$  = Koefisien konveksi didalam pipa ( $KJ/kg$ )

$h_o$  = Koefisien konveksi diluar pipa ( $KJ/kg$ )

- $r^3$  = Jari-jari luar (m)  
 $r^2$  = Jari-jari dalam (m)  
 $k$  = Koefisien konveksi (W/m.K)

### 2.2.8 Klasifikasi Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor dapat diklasifikasikan dalam beberapa kelompok sebagai berikut :

1. Berdasarkan proses perpindahan kalor :
  - a. Perpindahan kalor secara langsung
  - b. Perpindahan kalor secara tak langsung
2. Berdasarkan konstruksi :
  - a. Konstruksi tabung (*tubular*)
  - b. Konstruksi tipe pelat
  - c. Konstruksi dengan luas permukaan diperluas
  - d. Konstruksi regeneratif
3. Berdasarkan jenis aliran :
  - a. Alat penukar kalor aliran sejajar (*Parallel Flow*)
  - b. Alat penukar kalor aliran berlawanan (*Counter Flow*)
  - c. Alat penukar kalor aliran silang (*Cross Flow*)
4. Berdasarkan pengaturan aliran :
  - a. Aliran dengan satu pass
  - b. Aliran dengan multi pass
5. Berdasarkan banyaknya fluida yang digunakan :
  - a. Dua jenis fluida
  - b. Tiga jenis fluida atau lebih
6. Berdasarkan mekanisme perpindahan kalor :
  - a. Konveksi satu fasa
  - b. Konveksi dua fasa
  - c. Kombinasi perpindahan kalor secara konveksi dan radiasi (Bizzy dan Setiadi, 2013).