

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang pirolisis sampah plastik sudah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Wicaksono dan Arijanto (2017) melakukan penelitian tentang pengolahan sampah plastik jenis PET menggunakan metode pirolisis menjadi bahan bakar alternatif. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan bahan baku *Polyethylene Terephthalate* (PET) dengan berat sampah plastik sebesar 2000 gram dengan temperatur 200 °C - 400 °C pemanasan selama 2700 s.

Dari Tabel 2.1. dan Tabel 2.2. dapat dilihat perbandingan volume hasil pirolisis sampah botol aqua bekas jenis PET dengan menggunakan aliran *parallel flow* dan *counter flow*. Dari alat pengolah sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif diperoleh hasil bahwa, temperatur pirolisis pada PET berlangsung efektif pada temperatur 250 °C. Pada penelitian ini minyak yang didapat lebih baik menggunakan aliran *parallel flow* jika dibanding menggunakan *counter flow*. Minyak pirolisis yang dihasilkan paling banyak pada temperatur 260 °C – 350 °C.

Tabel 2.1. Hasil minyak pirolisis *parallel flow* (Wicaksono, 2017)

Suhu Reaktor	Temperatur Uap		W _{gas}		V _{Oil}		Berat PET	Lama Waktu Pemanasan
	T1	T2	WO	WT	Kondensor1	Kondensor2		
398°C	136°C	128°C	23,41kg	23,31kg	190 ml	50 ml	2 kg	2700 s
	34°C	31°C						
	24°C	ΔT	0,1kg	Total	240 ml			

Tabel 2.2. Hasil minyak pirolisis *counter flow* (Wicaksono, 2017)

Suhu Reaktor	Temperatur Uap		W _{gas}		V _{oil}		Berat PET	Lama Waktu Pemanasan
	398°C	T1	143°C	WO	22,61kg	Kondensor1		
T2		131°C						
T3		66°C	WT	22,54kg	Kondensor2	30 ml		
T4		63°C						
T5		45°C	ΔT	0,06kg	Total	180 ml		

Andriyanto (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi sudut orientasi kondensor 0°, 15°, dan 30° dan debit air 6 lpm terhadap hasil pirolisis plastik LDPE. Penelitian ini menggunakan bahan plastik LDPE atau dapat disebut dengan sampah plastik kresek berwarna hitam dengan total 3 kg. Dan setiap percobaan menggunakan 1 kg plastik LDPE yang sudah dipotong dengan ukuran 5 cm x 5 cm. Alat pirolisis tersebut menggunakan debit air pendingin 6 LPM dan menggunakan variasi sudut kemiringan kondensor terhadap reaktor yaitu 0°, 15°, dan 30° dengan pemanas menggunakan kompor gas.

Dari penelitian tersebut hasil yang menunjukkan pada sudut 0° menghasilkan sebanyak 600 ml dengan sisa arang 117 gr, kemudian pada sudut 15° diperoleh hasil minyak sebanyak 560 ml dengan sisa arang 160 gr, dan pada sudut 30° diperoleh minyak sebanyak 500 ml dengan sisa arang 262 gr. Dapat diketahui bahwa laju perpindahan panas terbesar yaitu pada sudut 0° kemudian 15° dan 30°. Pada saat proses pemanasan 1 kg sampah plastik LDPE dibutuhkan waktu 100 menit. Dilihat dari grafik tersebut diketahui bahwa waktu yang paling maksimal menghasilkan minyak terjadi pada menit ke-20 sampai menit ke-40 kemudian setelah menit ke-40 minyak yang dihasilkan semakin menurun. Apabila minyak tersebut diolah lebih lanjut maka setara dengan bahan bakar minyak yang sudah ada yaitu jenis premium, solar dan minyak tanah, dilihat dari karakteristiknya seperti nilai kalor, viskositas, densitas dan *flash point*. Karakteristik hasil minyak dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Data karakteristik hasil minyak (Andriyanto, 2017)

No	Paramater	Minyak Plastik
1	Viskositas (mm ² /s)	3-3,2
2	Nilai Kalor (kal/g)	10.727,6-10.836,8
3	Densitas (g/ml)	0,8
4	<i>Flash Point</i> (°C)	32,2

Dari Tabel 2.3. minyak plastik LDPE mempunyai kekentalan sedang bisa dikategorikan masuk ke dalam karakteristik viskositas solar. Nilai kalor dari plastik LDPE juga berada pada posisi tengah dengan hasil sekitar 10.727,6 – 10.836,8 cal/g sedangkan nilai kalor tertinggi yaitu nilai kalor dari premium. Untuk nilai densitas atau dapat disebut masa jenis minyak dari minyak plastik LDPE mempunyai densitas sama dengan bahan bakar solar dengan nilai 0,8 g/ml nilai tersebut masih dibawah dari nilai densitas minyak tanah dengan nilai 0,9 g/ml namun demikian lebih tinggi dari nilai densitas premium dengan nilai 0,7 g/ml. Untuk nilai *flash point* atau titik nyala api minyak pirolisis paling cepat terbakar karena mempunyai nilai paling rendah yaitu 32,2 °C dibandingkan dengan minyak tanah, premium, dan solar

Tabel 2.4. Persentase hasil minyak, sisa arang, dan gas (Andriyanto, 2017)

Sudut (°)	Plastik (gr)	Minyak (%)	Arang (%)	Gas (%)
0	1000	44,2	11,7	44,1
15	1000	42,8	16	41,2
30	1000	37,5	26,2	37,3

Dari Tabel 2.4. dapat ditarik kesimpulan terdapat korelasi antara hasil minyak dengan abu sisa pemanasan 1 kg sampah plastik LDPE. Apabila minyak yang dihasilkan dari pemanasan cukup banyak maka abu yang tersisa lebih sedikit, dan sebaliknya jika minyak yang dihasilkan sedikit maka abu yang tersisa cukup banyak. Seperti yang terjadi pada korelasi sudut 0° minyak yang dihasilkan 44,2 % dari pemanasan 1 kg plastik dan menyisakan arang sebanyak 11,7 % dan

membutuhkan bahan bakar gas sebanyak 44,1 %. Sebanding dengan hal tersebut pada sudut 30° minyak yang dihasilkan 37,5 % menyisakan arang sebanyak 26,2 % dan membutuhkan bahan bakar gas sebanyak 36,3 %.

Wasesa (2016) melakukan penelitian mengenai pengolahan sampah plastik menggunakan *fixed-bed* reaktor dua kondensor. Alat pengolah sampah plastik menjadi bahan bakar dibuat menggunakan bahan dasar *stainless steel* dengan prinsip pemanasan pirolisis. Komponen alat yaitu reaktor, kondensor satu dan dua, outlet minyak satu dan dua, termometer, regulator gas serta kompor. Alat pengolah sampah plastik mampu menghasilkan 1.100 ml minyak bening dengan residu padatan sebanyak 178 gr dalam waktu uji coba 180 menit, temperatur pirolisis 200 °C-250 °C, temperatur tungku pemanasan 438 °C dan memerlukan bahan bakar gas LPG 2 kg.

Surono (2016) melakukan penelitian mengenai pengolahan sampah plastik jenis PP, PET, dan PE menjadi bahan bakar minyak. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui proses dan karakteristik bahan bakar minyak yang dihasilkan dari plastik jenis PP, PET, dan PE. Pengujian ini menggunakan bahan plastik 0,5 kg dengan temperatur maksimal 416 °C. Hasil dari proses pirolisis palastik PP, PET, dan PE dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Hasil proses pirolisis palastik PP, PET, dan PE (Surono, 2016)

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

Dari Tabel 2.5. dilihat dari jumlah energi yang dibutuhkan dan jumlah minyak yang dihasilkan, maka jenis plastik PP adalah jenis plastik yang paling baik diolah menjadi bahan bakar minyak. Dilihat dari penggunaan gas LPG plastik jenis PP juga paling sedikit dibandingkan dengan plastik jenis PE, sedangkan plastik jenis PET tidak menghasilkan minyak sama sekali, dari hasil ini jenis plastik PET tidak potensial untuk dapat diolah menjadi bahan bakar minyak.

Ramadhan (2012) melakukan penelitian mengenai pengolahan sampah plastik menjadi minyak menggunakan metode pirolisis. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa banyak minyak yang dihasilkan. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan reaktor berdiameter 20 cm dan tinggi 40 cm. Proses pirolisis menggunakan temperatur 250 °C-420 °C dengan lama waktu pemanasan selama 60 menit.

Tabel 2.6. Perbandingan karakteristik minyak pirolisis dengan jenis minyak lain (Ramadhan, 2012)

Karakteristik	Minyak Tanah	Minyak Solar	Minyak Diesel	Minyak Pirolisis HDPE	Minyak Pirolisis LDPE
Nilai Kalor kal/kg	10.955,7	10.861,35	10.622,7	10.786	10.885
<i>Poor Point</i> °C	-	Max 65	Max 33	29,05	28,1
<i>Flash Point</i> °C	Min 128	Min 128	Min 128	154,2	156,5
Viskositas (mm ² /s)	-	1,6-5,8	1,5-5,8	1,58	1,62

Dari percobaan yang telah dilakukan yang menghasilkan minyak paling banyak yaitu plastik jenis LDPE dengan 400 °C dengan lama waktu pemanasan selama 60 menit menghasilkan produk 445 ml. Hasil dekomposisi dengan efisiensi terbaik dalam menguraikan sampah plastik terjadi pada temperatur 420 °C dengan waktu operasi 60 menit. Minyak pirolisis dari sampah plastik ini memiliki karakteristik yang tidak jauh berbeda dengan karakteristik minyak diesel.

Pani (2017) melakukan penelitian mengenai pembuatan *bio fuel* dengan proses pirolisis berbahan bakar baku plastik LDPE pada temperatur 250 °C dan 300 °C. Penelitian ini secara khusus menggunakan plastik LDPE seberat 2 kg yang berasal dari sampah logo dari botol atau gelas minuman kemasan yang dinilai oleh peneliti tidak memiliki nilai ekonomis. Pada proses pirolisis ini temperatur tetap yang digunakan yaitu 250 °C dan 300 °C. Pemanasan pirolisis ini menggunakan briket arang.

Jumlah minyak plastik tertinggi didapatkan pada temperatur 300 °C dengan menghasilkan minyak plastik 260 ml dan terendah pada temperatur 250 °C dengan menghasilkan minyak plastik 240 ml. Pada proses pirolisis dengan temperatur 250

°C menggunakan briket sebanyak 3 kg sedangkan dalam proses pirolisis temperatur 300 °C menggunakan briket arang sebanyak 4 kg. Pengujian hasil dari pirolisis ini meliputi uji berat jenis, nilai kalor, viskositas, dan uji *flash point*.

Tabel 2.7. Berat jenis minyak hasil pirolisis (Pani, 2017)

No	Temperatur (°C)	Berat Jenis (g/ml)
1	250	0,9984
2	300	0,9085

Tabel 2.8. Nilai kalor minyak hasil pirolisis (Pani, 2017)

No	Temperatur (°C)	Ulangan I (kal/g)	Ulangan II (kal/g)
1	250	9.084,101	8.764,253
2	300	9.588,312	9.507,779

Tabel 2.9. Viskositas minyak hasil pirolisis (Pani, 2017)

No	Temperatur (°C)	Viskositas (mm ² /s)
1	250	3,218
2	300	2,698

Tabel 2.10. Nilai titik nyala api minyak hasil pirolisis (Pani, 2017)

No	Temperatur (°C)	Flash Point (°C)
1	250	28,5
2	300	28,5

Landi (2017) melakukan penelitian mengenai perancangan dan uji alat pengolah sampah plastik jenis LDPE menjadi bahan bakar alternatif. Tujuan penelitian ini adalah mengkonversi limbah sampah plastik jenis LDPE menjadi bahan bakar alternatif, mengetahui proses pengolahan limbah sampah plastik, dan mengetahui karakteristik bahan bakar yang dihasilkan dari pengolahan limbah sampah plastik tersebut. Penelitian ini menggunakan metode dengan variasi

temperatur 350 °C, 500 °C, dan 700 °C dengan lama waktu pirolisis selama 60 menit.

Sebelum diproses, sampah plastik dijemur selanjutnya dibersihkan dari kotoran yang menempel kemudian dipotong kecil-kecil. Kemudian ditimbang seberat 1 kg kemudian dimasukkan ke dalam reaktor kemudian pemanas reaktor dijalankan dengan variasi temperatur 350 °C, 500 °C, dan 700 °C. Hasil dari proses pirolisis plastik LDPE dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11. Hasil pirolisis dan perbandingan konsumsi gas LPG (Landi, 2017)

No	Temperatur (°C)	V Minyak	Konsumsi LPG (kg)
1	350	140	0,07
2	500	210	0,09
3	700	365	0,12

Tabel 2.12. Nilai densitas (Landi, 2017)

No	Temperatur (°C)	Densitas (gr/ml)
1	350	0,7291
2	500	0,7563
3	700	0,7336

Tabel 2.13. Nilai kalor Dalam Berbagai Temperatur (Landi, 2017)

No	Temperatur (°C)	Nilai Kalor (kal/gr)
1	350	8.667,72
2	500	6.811,17
3	700	9.583,45

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Plastik

2.2.1.1. Pengertian Plastik

Langkah awal minyak mentah yang baru dipompakan keluar dari dalam tanah dan diangkut ke kilang minyak. Pada kilang minyak mentah tersebut harus melalui sebuah proses pemurnian dengan bersamaan gas alam. Etana, propana, dan beragam produk dari petrokimia lainnya dihasilkan dari proses pemurnian.

Untuk kemudian etana dan propana dipecah dengan menggunakan tungku yang sifatnya memiliki temperatur tinggi, etilena dan propilena akan membentuk pada proses ini.

Dalam reaktor sendiri, etilena dan propilena yang terbentuk akan digabungkan dengan katalis untuk membentuk zat seperti terbentuk sebuah tepung. Zat yang membentuk seperti tepung ini mirip dengan detergen bubuk yang sekarang kita pakai untuk mencuci pakaian. Zat tersebut merupakan sebuah polimer plastik. Sebuah proses pencampuran yang dikerjakan secara terus menerus, beberapa aditif digunakan dengan zat polimer, yang selanjutnya dilakukan proses yang dinamakan dengan ekstrusi, dimana plastik berada dalam bentuk cair.

Wicaksono (2017) menyatakan plastik berasal dari minyak bumi, sehingga tinggal dikembalikan ke bentuk semula. Selain itu plastik juga mempunyai nilai kalor cukup tinggi, setara dengan bahan bakar fosil seperti bensin dan solar. Beberapa penelitian seputar konversi sampah plastik menjadi produk cair bahan bakar telah dilakukan dan menunjukkan hasil yang cukup prospektif untuk dikembangkan.

Tidak dapat dipungkiri plastik merupakan sebuah komoditi yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Semua produk yang digunakan masyarakat terbuat dari plastik dan sebagai kemasan bahan baku. Pada kenyataannya, sampah plastik sudah menjadi masalah lingkungan karena plastik membutuhkan waktu yang cukup lama untuk proses mendaur ulang atau untuk dapat terurai. Dari masalah yang ditimbulkan plastik memiliki keunggulan diantaranya ringan, kuat, fleksibel, transparan, kuat, tidak mudah pecah, tahan air, dan ekonomis Abidin (2017).

2.2.1.2. Jenis-Jenis Plastik

Dari penjelasan tersebut jenis-jenis plastik yang paling sering diolah adalah *polyethylena* (PE), *polypropylene* (PP), *polistirena* (PS), *polyethylene terephthalate* (PET) dan *polyvinyl chloride* (PVC). Untuk memudahkan mengidentifikasi jenis plastik tersebut di beri kode seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Nomor Kode Plastik

- a. *Polyethylene terephthalate* (PETE atau PET) jenis plastik tersebut dengan kode 1 biasanya terdapat pada botol plastik minuman air mineral atau minuman sejenisnya. Botol tersebut hanya dapat digunakan sekali pakai, apabila digunakan berulang-ulang dapat menimbulkan beberapa penyakit.
- b. *High density polyethylene* (HDPE) plastik dengan kode 2 tersebut biasanya digunakan pada galon, tupperware dan sebagainya. Plastik tersebut bersifat keras dan kuat dan tahan pada kondisi temperatur yang cukup tinggi.
- c. *Polyvinyl Chloride* (PVC) plastik dengan kode 3 memiliki sifat keras, kuat, bisa jernih, bentuk dapat diubah dengan pelarut, meleleh pada temperatur 80 °C. Plastik tersebut biasanya digunakan sebagai botol (jus, air mineral, minyak sayur, kecap, sambal), pembungkus makanan.
- d. *Low Density Polyethylene* (LDPE) plastik dengan kode 4 tersebut memiliki sifat mudah diproses, kuat, fleksibel, kedap air, permukaan berkilin, tidak jernih tetapi tembus cahaya, melunak pada temperatur 70 °C. Plastik tersebut biasanya digunakan sebagai pot yoghurt, kantong belanja (kresek), kantong roti dan makan segar, botol yang dapat ditekan.
- e. *Polypropylene* (PP) plastik berkode 5 memiliki sifat keras tetapi fleksibel, kuat, permukaan berkilin, tidak jernih tetapi tembus cahaya, tahan terhadap bahan (kimia, panas dan minyak), meleleh pada temperatur 140 °C. jenis plastik tersebut biasanya digunakan sebagai pembungkus biskuit, kantong chips kentang, pita perekat kemasan, krat serella, dan sedotan.
- f. *Polystyrene* (PS) plastik berkode 6 tersebut memiliki sifat jernih seperti kaca, kaku, getas, buram, mudah dibentuk, meleleh pada temperatur 95 °C. Plastik tersebut biasa digunakan pada wadah makan beku, sendok, garpu, cup kopi, wadah makanan siap saji. Plastik berkode 7 terdiri dari (*SAN-styrene acrylonitrile*), (*ABS-acrylonitrile butadienestyrene*), (*PC-poly carbonate*

nylon) yang memiliki sifat keras, jernih, dan tahan panas. Biasa digunakan sebagai galon air mineral, botol susu bayi.

2.2.1.3. Sampah Plastik

Sampah plastik merupakan sampah yang sulit terurai dalam waktu yang cukup lama, bahkan tidak dapat terurai. Sampah plastik akan berdampak negatif terhadap lingkungan karena tidak dapat terurai dengan cepat dan dapat menyebabkan pencemaran tanah. Semakin meningkatnya sampah plastik ini akan menjadi masalah serius jika tidak dicari penyelesaiannya. Penanganan sampah yang populer selama ini adalah 3R (*Reuse, Reduce, Recycle*), dan masing-masing penanganan sampah tersebut di atas mempunyai kelemahan. Kelemahan dari *reuse* adalah bahwa barang-barang tertentu yang terbuat dari plastik seperti kantong plastik jika akan dipakai kembali berkali-kali maka tidak akan layak pakai. Pemanfaatan sampah plastik merupakan upaya menekan pembuangan sampah plastik seminimal mungkin dan dalam batas tertentu menghemat sumber daya dan mengurangi ketergantungan bahan baku impor. Penanganan sampah plastik tidak dapat dilakukan dengan metode *landfill* maupun *open dumping* karena akan sulit terurai. Pemusnahan limbah plastik dengan cara pembakaran (*incineration*) juga kurang efektif dan beresiko menyebabkan munculnya polutan dari emisi gas buang (CO₂, CO, NO_x dan SO_x) dan partikulat pencemar lainnya (Velma, 2015).

2.2.2 Pirolisis

Menurut Gaurav (2014) pirolisis umumnya didefinisikan sebagai pemanasan bahan tanpa adanya oksigen. Dalam bidang pembuatan pirolisis plastik, struktur yang macromolecular dari polimer dipecah menjadi molekul yang lebih kecil atau oligomers dan unit monomer. kemudian degradasi dari molekul berikutnya ini tergantung pada suatu angka dari berbagai persyaratan dan tidak terbatas termasuk temperatur, waktu, katalis dan kondisi lainnya. Reaksi pirolisis dapat dilakukan dengan atau tanpa menggunakan katalis. Sebagian besar plastik yang digunakan adalah polyolefin, jadi riset ekstensif telah dilakukan pada polimer ini.

Sedangkan menurut pendapat Prabir Basu (2010) mendefinisikan pirolisis yaitu proses yang melibatkan pemanasan biomasa atau bahan lain, tidak adanya udara atau oksigen pada tingkat tertentu dengan nilai temperatur maksimum, yang dikenal sebagai temperatur pirolisis, dan memiliki peran pada proses pirolisis selama waktu yang ditentukan. Sifat produk pirolisis tergantung pada beberapa faktor, termasuk temperatur pirolisis dan tingkat pemanasan. Tidak seperti pembakaran, pirolisis berlangsung sepenuhnya tidak adanya oksigen, kecuali dalam kasus dimana parsial pembakaran diperbolehkan untuk memberikan energi panas yang diperlukan untuk proses ini. Pirolisis adalah sebuah dekomposisi *thermal* menjadi gas, cair, dan padat.

Menurut Wicaksono (2017) pirolisis atau devolatilisasi adalah proses fraksinasi material oleh temperatur. Proses pirolisis untuk plastik dimulai pada temperatur sekitar 230 °C, ketika komponen yang tidak stabil secara thermal, 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 tiga jenis, yaitu gas (H₂, CO, CO₂, H₂O, dan CH₄), tar (*pyrolitic oil*), dan arang. Parameter yang berpengaruh pada kecepatan reaksi pirolisis mempunyai hubungan yang sangat kompleks, sehingga model matematis persamaan kecepatan reaksi pirolisis yang diformulasikan oleh setiap peneliti selalu menunjukkan rumusan empiris yang berbeda.

Hasil produk dari pirolisis dapat dipisahkan menjadi tiga jenis yaitu cair, gas, dan padat. Pirolisis mempunyai dua variasi yaitu :

1. *Slow Pyrolysis*
2. *Fast Pyrolysis*

Slow pyrolysis yaitu proses dimana produk yang dihasilkan adalah gas dan arang, fast pyrolysis hasil produk utamanya adalah bahan bakar cair. Faktor yang mempengaruhi dari produk pirolisis adalah temperatur. Pada proses pirolisis temperatur yang dibutuhkan yaitu pada temperatur 200 °C-500 °C.

2.2.3 Bahan Bakar Cair

Bahan bakar cair yaitu suatu gabungan senyawa hidrokarbon yang berasal dari alam atau buatan. Pada umumnya bahan bakar cair berasal dari minyak bumi. Pada masa yang akan datang, ada kemungkinan bahwa bahan bakar cair yang berasal dari *oil shale*, *tar sands*, batubara dan biomassa penggunaannya akan meningkat. Minyak bumi merupakan campuran hidrokarbon cair dengan sedikit belerang, nitrogen, oksigen, sedikit metal, dan mineral.

Secara teknis bahan bakar cair adalah sumber energi terbaik, mudah ditangani mudah dalam penyimpanan, dan nilai kalor yang konstan. Berikut kelebihan bahan bakar cair dibandingkan bahan bakar padat :

- a) Lebih mudah dalam penanganannya.
- b) Hasil pembakaran bersih.
- c) Penggunaan alat bakar yang lebih kompak.

Kekurangan dari bahan bakar cair tersebut yaitu harus melalui proses pemurnian yang cukup kompleks.

2.2.3.1 Karakteristik Bahan Bakar

Sebelum digunakan pada alat tertentu perlu diketahui terlebih dahulu karakteristik bahan bakar cair tersebut, dengan maksud agar hasil pemanasan tercapai secara maksimal. Berikut karakteristik bahan bakar cair dapat dilihat pada Tabel 2.14

Tabel 2.14. Karakteristik bahan bakar cair (Pertamina 2016)

No	Parameter	Minyak Tanah	Solar	Premium
1	Viskositas (mm ² /s)	1,4	2 - 4,5	0,7
2	Nilai Kalor (cal/g)	10939,1	9240	11245
3	Densitas (g/ml)	0,9	0,8	0,7
4	Flash Point (°C)	60,2	52	43

Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala (*flash point*) adalah titik temperatur terendah dimana bahan bakar dapat menyala pada kondisi tertentu pada tekanan satu atmosfer. Titik nyala (*flash point*) merupakan faktor penting untuk keamanan terhadap kebakaran.

Penentuan nilai titik nyala ini juga berkaitan dengan keamanan dalam penyimpanan penanganan bahan bakar (Nasrun, 2016).

Viskositas (*viscosity*)

Viskositas dapat dianggap sebagai gerakan dibagian dalam suatu fluida. Viskositas terdapat pada zat cair maupun gas, viskositas merupakan gaya gesekan antara lapisan-lapisan yang beririsan pada fluida, saat lapisan-lapisan tersebut bergerak diantara lapisan lainnya. Pada zat cair, viskositas terutama disebabkan oleh gaya kohesi antara molekul. Fluida yang berbeda memiliki viskositas yang berbeda, dan zat cair lainnya umumnya jauh lebih kental dibandingkan dengan viskositas gas. Viskositas merupakan sifat yang sangat penting dalam penyimpanan dan penggunaan bahan bakar minyak. Viskositas mempengaruhi temperatur pemanasan awal yang digunakan untuk *handling* dan otomisasi yang maksimal. Apabila minyak terlalu kental, akan menyulitkan pemompaan, sulit untuk menyalakan *burner*, dan sulit untuk dialirkan (Maulida, 2010).

Nilai Kalor (*Calorific Value*)

Nilai kalor rendah (*Lower Heating Value*) adalah jumlah energi yang dilepaskan dalam proses pembakaran suatu bahan bakar dimana kalor laten dari uap air tidak diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas pembakaran dibuat 150 °C. Pada temperatur ini air berada dalam kondisi fasa uap. Jika jumlah kalor laten uap air diperhitungkan atau setelah terbakar temperatur gas hasil pembakaran dibuat 25 °C maka akan diperoleh nilai kaloras *High Heating Value* (HHV). Pada temperatur ini air akan berada dalam kondisi fasa cair.

Nilai kalor bahan bakar dapat diketahui dengan menggunakan *bomb calorimeter*. Bahan bakar yang akan diuji nilai kalornya dibakar menggunakan kumparan kawat yang dialiri arus listrik dalam bilik yang disebut bomb dan ditenamkan di dalam air. Bahan bakar yang bereaksi dengan oksigen akan menghasilkan kalor, hal ini menyebabkan temperatur kalorimeter naik. Untuk menjaga agar panas yang dihasilkan dari reaksi bahan bakar dengan oksigen tidak menyebar ke lingkungan luar maka kalorimeter dilapisi oleh bahan yang bersifat *isolator* (Landi, 2017).

Densitas

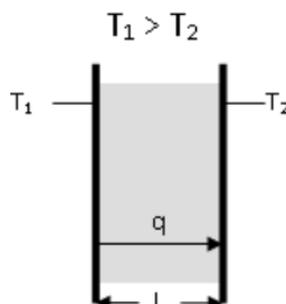
Densitas atau massa jenis adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda. Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya. Massa jenis rata-rata suatu benda adalah total massa dibagi dengan total volumenya. Sebuah benda yang memiliki massa jenis yang lebih tinggi akan memiliki volume yang lebih rendah daripada benda bermassa sama yang memiliki massa jenis lebih rendah (Landi, 2017).

2.2.4 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:

2.2.4.1. Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi adalah ptukaran 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 2.2.



Gambar 2.2. Perpindahan Kalor Konduksi (Kurniawan, 2007)

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

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

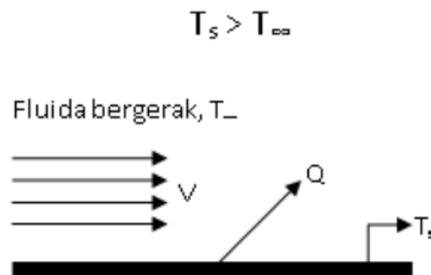
Dimana: k = Konduktivitas termal bahan (W/m°C)

A = Luas penampang perpindahan kalor (m²)

$\frac{\delta T}{\delta x}$ = Perbedaan temperatur yang terjadi pada penampang (°C/m)

2.2.4.2. Perpindahan Kalor Konveksi

Jika benda bersuhu tinggi berada pada lingkungan fluida bertemperatur rendah maka akan terjadi perpindahan kalor secara konveksi dari benda ke lingkungan. Perpindahan kalor konveksi di tunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. 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 °C)

A = luas penampang perpindahan kalor (m²)

T_s = temperatur permukaan (°C)

T_∞ = temperatur fluida (°C)

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

a. Konveksi alami

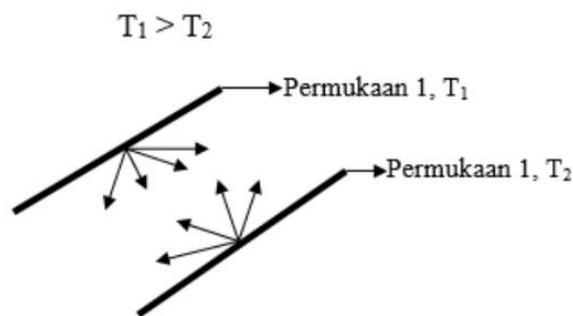
Konveksi ini terjadi karena adanya perbedaan kerapatan fluida yang disebabkan oleh perbedaan temperatur.

b. Konveksi paksa

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

2.2.4.3. 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 2.4.



Gambar 2.4. Perpindahan kalor Radiasi (Kurniawan, 2007)

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

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(2.3)$$

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

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

T₁ = Temperatur permukaan benda 1 (K)

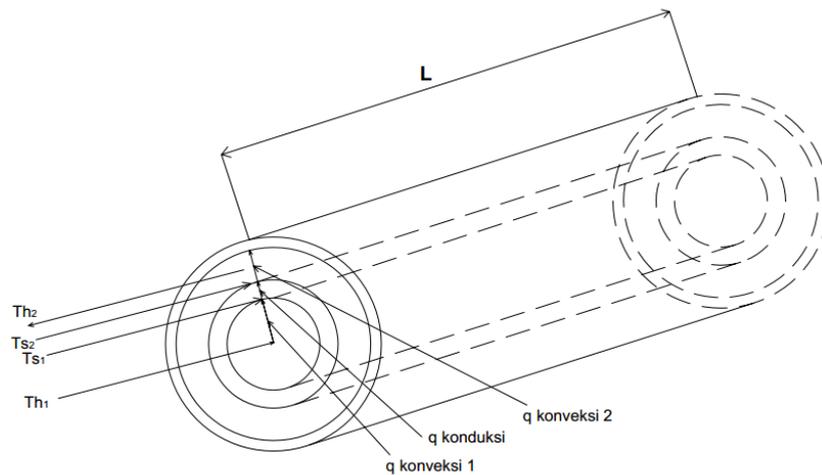
T₂ = Temperatur permukaan benda 2 (K)

A = Luasan perpindahan panas (m²)

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.

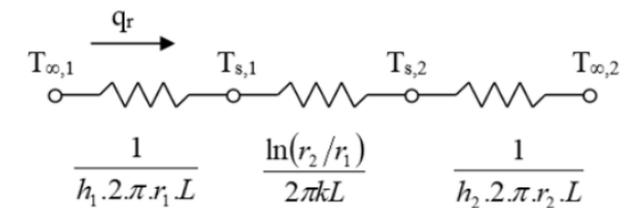
2.2.5 Perpindahan Kalor Pada Kondensor

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 2.5. Perpindahan Kalor Pada Kondensor

Analogi Listrik:



Dimana laju perpindahan kalornya yaitu:

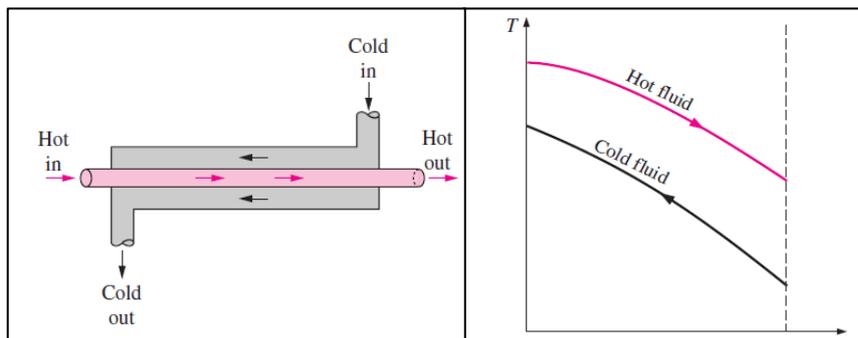
$$Q_{(x)} = \frac{2\pi k L (T_{s1} - T_{s2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana tahanan termal untuk kasus silinder berlubang adalah:

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_2} \dots\dots\dots(2.5)$$

2.2.6 Tipe Penukar Kalor

- a. Tipe aliran yang digunakan pada kondensor menggunakan tipe *counter flow* yaitu penukar kalor dengan fluida panas dan fluida dingin masuk dan keluar pada arah yang berbeda atau berlawanan arah (Chengel, 2003) dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Skema dan grafik rata-rata ΔT *Counter Flow* (Chengel, 2003)

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 6 liter / menit = 0,1 kg/s

c = Kalor jenis air (4180 J / kg °C)

Q = Laju perpindahan panas (W)

U = Koefesien perpindahan panas (W / m². °C)

A = Luas perpindahan panas (m²)

T_2 = Temperatur masuk fluida pendingin (°C)

T_3 = Temperatur keluar fluida pendingin (°C)

Berdasarkan persamaan 2.6 (Chengel, 2003), dengan aliran yang berkerja pada aliran berlawanan (*counter flow*), maka nilai LMTD di tunjukkan Gambar 2.6 adalah:

$$LMTD_{CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln\left(\frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,out} - T_{c,in}}\right)} \dots\dots\dots(2.6)$$

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

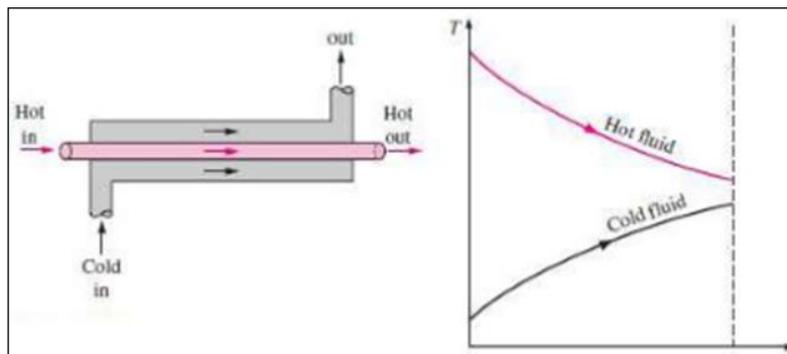
$$Q = U \times A \times LMTD_{CF} \dots\dots\dots(2.7)$$

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

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

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

- b. 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 (Chengel, 2003) dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema *Parralel Flow* (Chengel, 2003)

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

$$Q = U \times A \times \Delta T \dots\dots\dots(2.8)$$

Berdasarkan asumsi di bawah ini dapat dibuktikan bahwa harga beda temperatur (ΔT) dalam persamaan 2.8 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:

$$Q = U \times A \times \text{LMTD} \dots \dots \dots (2.9)$$

Berdasar jenis aliran yang terjadi pada aliran sejajar (*Parallel Flow*), maka persamaan LMTD ditunjukkan persamaan 2.13 (Chengel, 2003).

$$\text{LMTD}_{\text{PF}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}}) - (T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{out}})}{\ln\left(\frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{in}})}{(T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{out}})}\right)} \dots \dots \dots (2.10)$$

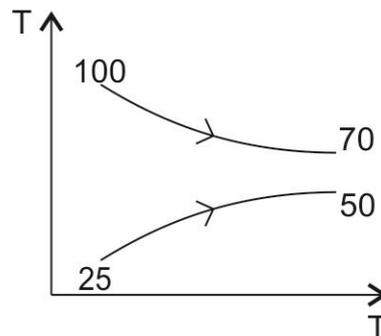
Maka persamaan nilai catu kalor (Q) *parallel flow* (Chengel, 2003) adalah:

$$Q = U \times A \times \text{LMTD}_{\text{PF}} \dots \dots \dots (2.11)$$

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

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

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



Gambar 2.8. Grafik Distribusi Temperatur *Parallel Flow*

Temperatur fluida panas masuk = 100 °C

Temperatur fluida panas keluar = 70 °C

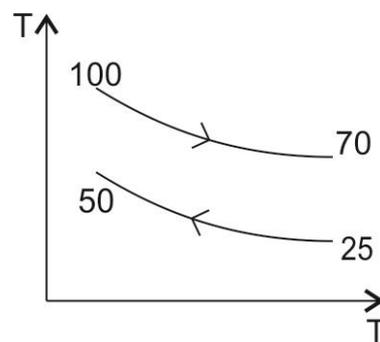
Temperatur fluida dingin masuk = 25 °C

Temperatur fluida dingin keluar = 50 °C

Untuk parralel flow = $\Delta T_1 = 100 - 25 = 75$

$$\Delta T_2 = 70 - 50 = 20$$

$$\begin{aligned} \text{LMTD}_{\text{PF}} &= \frac{(100-25)-(70-50)}{\ln\left(\frac{100-25}{70-50}\right)} \\ &= \frac{(75-20)}{\ln\left(\frac{75}{20}\right)} \\ &= 41,61 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$



Gambar 2.9. Grafik Distribusi Temperatur *Counter Flow*

Temperatur fluida panas masuk = 100 °C

Temperatur fluida panas keluar = 70 °C

Temperatur fluida dingin masuk = 25 °C

Temperatur fluida dingin keluar = 50 °C

Untuk *counter flow* = $\Delta T_1 = 100 - 50 = 50$

$$\Delta T_2 = 70 - 25 = 45$$

$$\begin{aligned} \text{LMTD}_{\text{CF}} &= \frac{(100-50)-(70-25)}{\ln\left(\frac{100-50}{70-25}\right)} \\ &= \frac{(50-45)}{\ln\left(\frac{50}{45}\right)} \\ &= 47,45 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Dapat diketahui bahwa nilai LMTD *counter flow* lebih besar dari nilai LMTD *parallel flow*, maka untuk laju perpindahan kalor yang baik yaitu menggunakan jenis aliran *counter flow*.