

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Kusuma (2014) menganalisis pengaruh tekanan pada limbah kelapa Sawit meliputi tandan kosong, serat Sawit, dan cangkang kelapa Sawit terhadap karakteristik pembakaran briket. Pembriketan dilakukan dengan variasi tekanan sebesar 200 kg/cm², 250 kg/cm², dan 300 kg/cm² dan dipertahankan selama 2 menit. Arang limbah kelapa Sawit dihaluskan menjadi partikel dengan lolos 20 mesh. Perekat yang digunakan pada penelitian ini adalah tepung kanji sebesar 10 gram. Persentase perekat tepung kanji sekitar 10% dari total massa briket, sedangkan total massa briket sebesar ± 3 gram. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan yang diberikan, maka semakin sulit briket untuk terbakar. Hal ini dikarenakan kerapatan partikel briket semakin tinggi yang menyebabkan proses oksidasi sulit masuk dan energi aktivasi menjadi lebih besar. Namun semakin tinggi tekanan pembriketan akan menurunkan kandungan air pada briket dan menaikkan kandungan *fixed carbon*, sehingga nilai ITVM, ITFC, PT, dan BT semakin tinggi.

Surono (2010) melakukan penelitian untuk mempelajari pengaruh temperatur terhadap proses karbonasi dan tekanan saat pembriketan dan mengetahui sifat pembakaran briket dari bahan tongkol jagung dan peningkatan kualitas briket tongkol jagung. Proses karbonasi dilakukan pada temperatur 220⁰C, 300⁰C, dan 380⁰C. Variasi tekanan pada briket arang tongkol jagung yang diberikan sebesar 24,4 MPa, 48,8 MPa, 73,2 MPa, dan 97,6 MPa. Pengujian dilakukan dengan kecepatan udara 0,3 m/s dan temperatur dinding ruang bakar rata-rata 400⁰C. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa proses karbonasi dapat meningkatkan nilai kalor dan kandungan karbon briket tongkol jagung, semakin tinggi temperatur karbonasi semakin tinggi pula nilai kalor yang dihasilkan. Nilai kalor dan kandungan karbon terbaik dihasilkan pada temperatur 380⁰C sebesar 52,6% dan 7128,38 Kkal/kg. Penggunaan proses karbonasi pada pembriketan tongkol jagung mampu meningkatkan nilai kalor sekitar 67% dan kandungan karbon meningkat sekitar 65%. Selain itu, penggunaan proses karbonasi juga dapat menurunkan kadar gas

CO dari pembakaran karena kadar zat menguap yang rendah akibat proses karbonasi.

Subroto dkk (2007) melakukan penelitian untuk menguji karakteristik pembakaran biobriket dari kokas lokal yang terdiri dari kokas *green coke*, *breeze coke* dengan aspal sebagai perekat. Perbandingan komposisi yang digunakan 50% : 50% dan dengan aspal 30%. Tekanan yang dipakai 100 kg/cm², 150 kg/cm², 150 kg/cm², 200 kg/cm², 250 kg/cm². Briket untuk pengujian mekanik dibuat dengan ukuran diameter 4 cm dan tinggi 8 cm sedangkan untuk pengujian pembakaran dibuat diameter 2,8 cm dan berat 5 gram. Sampel diuji Secara *proximate* untuk memperkirakan kinerja bahan bakar pada saat pemanasan dan pembakaran antara lain kadar air, zat terbang (*volatile matter*), kadar kalori, kadar karbon terikat dan kadar abu. Laju pengurangan massa briket paling besar rata-rata terjadi pada menit-menit awal akibat dari lonjakan temperatur briket. Massa briket yang terbakar menandakan kualitas dari briket tersebut. Semakin banyak massa yang terbakar maka briket tersebut akan meninggalkan sedikit abu. Rata-rata abu yang tersisa dari masing briket adalah 1,2 gram. Waktu pembakaran tercepat terjadi pada briket tekanan 250 kg/cm² dan paling lama terjadi pada briket tekanan 150 kg/cm². Penambahan tekanan pembriketan akan menaikkan nilai kekuatan mekanik dan memperlambat waktu pembakaran. Namun kenaikan itu akan mencapai titik maksimal pada tekanan 150 kg/cm² yaitu sebesar 18,939 kg/cm² dan waktu pembakaran selama 53 menit.

Saptoadi dkk (2007) menganalisis nilai kalor dan proksimasi pembakaran briket dengan material cangkang kakao dan kemiri dengan komposisi biomassa dan bahan perekat (gel dari tepung kanji) adalah 70% : 30% untuk cangkang kakao dan 80% : 20% untuk cangkang kemiri. Penelitian dilakukan dengan mengeringkan material selama 3 hari dengan sinar matahari. Pengujian nilai kalor dan analisis proksimat untuk mengetahui komposisi dan kandungan energi. Briket dihaluskan dan disaring dengan ayakan ukuran mesh 18. Arang dicetak berbentuk silinder berdiameter 16 mm seberat 5 gram. Proses pengeringan briket dilakukan dengan menggunakan oven pada suhu 50⁰C selama kurang lebih 5 jam. Briket yang dihasilkan dengan berat rata-rata untuk briket cangkang kakao 3,6 gram dan

cangkang kemiri 4,2 gram. Pengujian pembakaran dilakukan pada laju aliran udara yang bervariasi antara 0,1 - 0,4 m/s dengan temperatur dinding ruang bakar dipertahankan secara konstan sebesar 350⁰C dengan pemanas menggunakan LPG. Hasil pengujian nilai kalor dan analisis proksimat menunjukkan briket cangkang Kemiri memiliki nilai kalor lebih tinggi dibanding cangkang kakao, hal ini dipengaruhi oleh kandungan karbon terikat (*fixed carbon*). Semakin tinggi kandungan karbon terikat maka semakin tinggi pula nilai kalornya. Kandungan abu pada cangkang kakao lebih tinggi dari cangkang kemiri. Kandungan abu yang terlalu tinggi akan menghambat laju pembakaran karena oksigen akan mengalami kesulitan berdifusi menembus briket, namun kadar abu ini juga berfungsi sebagai penyimpan sementara kalor yang dilepaskan briket sehingga kalor dapat tertahan dalam briket untuk mempertahankan pembakaran.

Caroko dkk (2015) menganalisis karakteristik pembakaran briket campuran limbah kelapa Sawit dan perekat kanji dan tar. Komposisi campuran kelapa Sawit ini yaitu cangkang kelapa Sawit : kanji, tar dan campuran kanji dan tar 10%, tandan kosong dan perekat kanji, tar dan campuran kanji dan tar 10% dan serat kelapa Sawit dengan perekat kanji, tar dan campuran kanji dan tar 10%. Arang hasil pembakaran dihaluskan dan disaring dengan ayakan *mesh* 20 seberat 3 gram dengan tekanan pengepresan 200 kg/cm². Pengujian dilakukan dengan metode *heat flux constant* (HFC) dengan mempertahankan suhu pembakaran pada tungku pembakaran sebesar 300⁰C. Hasil pengujian menunjukkan nilai ITVM paling rendah adalah briket dengan perekat tar dibandingkan perekat lainnya, hal ini disebabkan kandungan zat volatil yang tinggi. Semakin tinggi kandungan zat volatil semakin menurunkan nilai ITVM. Pada ITFC diketahui nilai briket tandan kosong memiliki kecenderungan nilai ITFC yang lebih rendah dibandingkan dengan briket bahan baku cangkang dan serat. Nilai ITFC yang rendah pada sampel briket material tandan kosong terjadi karena bahan baku tandan kosong memiliki kadar *volatile matter* yang tinggi, semakin tinggi kadar *volatile matter* maka akan menurunkan nilai ITFC. Pada PT dapat diketahui bahwa briket cangkang Sawit memiliki nilai PT yang tinggi dibandingkan dengan briket arang serat dan tandan kosong. Nilai PT yang tinggi terjadi karena bahan baku cangkang memiliki kadar

fixed carbon yang tinggi, semakin tinggi kadar *fixed carbon* maka nilai PT akan semakin tinggi. Pada BT, nilai tertinggi ditunjukkan pada briket cangkang Sawit, dikarenakan bahan cangkang Sawit memiliki kadar *fixed carbon* yang tinggi. Semakin tinggi *fixed carbon* semakin tinggi pula nilai BT.

Dari peneliti terdahulu diketahui bahwa semakin tinggi variasi tekanan maka semakin rendah kadar air, *fixed carbon*, dan kadar *volatile matter* tinggi. Selain itu, semakin tinggi variasi tekanan semakin memperlambat laju pembakaran briket. Tingginya tekanan pengepresan juga menyebabkan nilai ITVM dan nilai ITFC semakin tinggi, nilai PT dan BT semakin rendah, dan energi aktivasi semakin tinggi. Namun, untuk tekanan 350 kg/cm², 400 kg/cm², dan 450 kg/cm² belum diketahui nilai karakteristik pembakaran briket, sehingga perlu dilakukan penelitian.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Biomassa

Biomassa adalah salah satu jenis bahan bakar padat selain batu bara yang dihasilkan dari bahan organik dari kayu maupun non-kayu yang bersifat *renewable*. Secara umum biomassa merupakan bahan yang dapat diperoleh dari tanaman secara langsung maupun tidak langsung. Selain itu biomassa seringkali disebut “fitomassa” atau *bioresource* atau sumber daya energi yang diperoleh dari hayati. Bahan baku biomassa secara spesifik seperti kayu, serbuk gergaji, jerami, sekam padi, sampah kota, kotoran hewan dan lain-lain. Sedangkan tanaman yang umum dijadikan biomassa meliputi kayu putih, *poplar hibrid*, kelapa Sawit, tebu, rumput gajah dan lain-lain.

Indonesia adalah negara agraris yang mengedepankan sektor pertanian dan perkebunan, artinya sumberdaya yang dihasilkan dari sektor pertanian dan perkebunan sangat melimpah. Melimpahnya sumberdaya tersebut dapat dijadikan sebagai Sumber bahan baku yang potensial apabila dimanfaatkan menjadi energi alternatif seperti biomassa. Merujuk pada laporan terakhir menunjukkan bahwa prediksi potensi energi biomassa untuk masa depan diperkirakan mencapai 42 EJ hingga 350 EJ pada tahun 2100 yang mendekati jumlah produksi energi untuk masa kini.

2.2.2. Limbah Kelapa Sawit

Tanaman kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) berasal dari Afrika Barat, merupakan tanaman penghasil utama minyak nabati yang mempunyai produktivitas lebih tinggi dibandingkan tanaman penghasil minyak nabati lainnya. Kelapa Sawit memiliki tiga bagian utama yaitu inti buah yang bergerombol pada tandan, serat buah (*mesoskarp*) dan cangkang Sawit (*endoskarp*). Dalam pengolahan kelapa Sawit ketiga bagian tersebut menghasilkan limbah padat cukup besar. Diprediksi laju peningkatan produksi kelapa Sawit mencapai 12,3% pertahun. Peningkatan produksi kelapa Sawit ini berimbas pada bertambahnya limbah yang dihasilkan. Limbah kelapa Sawit dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar karena memiliki nilai kalor yang cukup tinggi. Cangkang Sawit memiliki nilai kalor yang tertinggi mencapai 20093 kJ/kg, serat sebesar 19055 kJ/kg dan tandan Sawit sebesar 18795 kJ/kg (*Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses*, 2016).

Tabel 2.1. Analisis *ultimate* cangkang kelapa Sawit (Diputra, 2010)

<i>Solid Waste</i>	C	H	O	N	S	<i>Non Comb</i>
Daun	52.25	6.11	30.34	6.99	0.16	4.25
Cangkang Sawit	47.62	6.1	0.7	43.38	-	2.1
Ranting Kayu	50.46	5.97	42.37	0.15	0.05	1

Tabel 2.2. Analisis *proximate* cangkang kelapa Sawit (Diputra, 2010)

<i>Solid waste</i>	<i>Moisture</i>	<i>Volatile matter</i>	<i>Fixed carbon</i>
Daun	9.97	66.92	19.29
Cangkang Sawit	7.8	80.8	18.8
Ranting kayu	20	67.89	11.31

2.2.3. Pemanfaatan Energi Biomassa

Ada berbagai teknologi untuk mengkonversi atau merubah kualitas biomassa sesuai dengan tujuan pemanfaatannya. Teknologi untuk mengkonversi biomassa secara umum dibedakan menjadi tiga macam yaitu :

a. Konversi fisika

Konversi fisika merupakan proses untuk mengurai struktur biomassa dengan tujuan meningkatkan luas permukaan sehingga proses selanjutnya yaitu kimia, termal dan biologi dapat dipercepat. Proses ini juga meliputi pemisahan, ekstraksi dan lain-lain untuk mendapatkan bahan berguna dari biomassa, serta proses pemampatan, pengeringan atau kontrol kelembaban dengan tujuan membuat biomassa mudah diangkut dan disimpan. Teknologi konversi fisika sering digunakan sebagai perlakuan awal untuk mempercepat proses utama.

b. Konversi termokimiawi

Konversi termokimiawi meliputi hidrolisis, pembakaran, karbonisasi, pirolisis dan sebagainya untuk penguraian biomassa dengan perlakuan termal untuk memicu reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar .

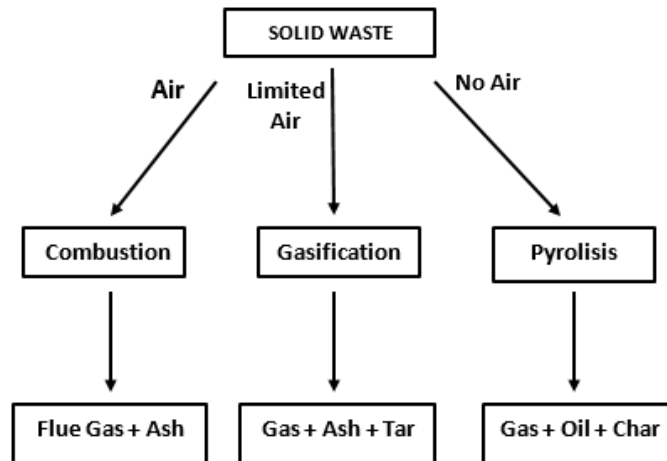
c. Konversi biokimiawi

Konversi biokimiawi merupakan teknologi konversi dengan proses fermentasi atau dengan bantuan mikroba untuk menghasilkan bahan bakar. Biomassa yang mengalami proses konversi biokimiawi, umumnya membutuhkan waktu yang relatif lama karena menunggu kemampuan bakteri pengurai berfungsi dengan baik untuk mengubah biomassa menjadi komponen gas dan limbah padat. Produk yang diperoleh dari proses ini biasanya biogas.

2.2.4. Pirolisis

Pirolisis sering disebut juga sebagai termolisis. Secara definisi pirolisis adalah proses terhadap suatu bahan organik dengan menambahkan temperatur yang tinggi tanpa kehadiran udara khususnya oksigen. Proses pirolisis dilakukan tanpa oksigen, dengan kata lain proses ini menggunakan teknik pembakaran tidak sempurna untuk menghasilkan arang. Kualitas produk tergantung pada beberapa faktor termasuk komposisi bahan baku dan proses parameter. Tujuan pirolisis untuk menghasilkan produk utama berupa padatan (arang) dan juga menghasilkan produk samping berupa cairan (tar) dan *syngas* (gas). Produk-produk tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar. Besarnya produk yang dihasilkan dipengaruhi kondisi proses, terutama temperatur, dan laju pemanasan.

Perbedaan utama antara proses pirolisis, gasifikasi, dan insinerasi terdapat pada jumlah suplai oksigen ke reaktor termal. Hal ini dapat dilihat dari skema ketiga teknik pengolahan limbah tersebut pada gambar 2.1. berikut :



Gambar 2.1. Proses karakterisasi insinerasi, gasifikasi, dan pirolisis

Berdasarkan laju pemanasan dan temperatur, proses pirolisis dapat dikategorikan menjadi tiga jenis yaitu *slow pyrolysis*, *fast pyrolysis*, dan *flast pyrolysis*.

a. Pirolisis lambat (*slow pyrolysis*)

Secara tradisional, pirolisis lambat proses yang umum digunakan untuk menghasilkan produk arang. Waktu pirolisis yang singkat saat proses pembakaran biomassa pada temperatur medium ($300^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$) mampu menghasilkan arang dengan persentase massa yang besar.

b. Pirolisis cepat (*fast pyrolysis*)

Proses pirolisis cepat dilakukan dengan suhu pirolisis adalah sekitar 500°C dan ditandai dengan tingkat pemanasan tinggi (misalnya 1000°C/s). Dalam kondisi tersebut, tar menjadi produk utama yang dihasilkan sekitar 60 - 70% yang dapat dicapai dari bahan baku biomassa, 15 - 25% hasil dari arang dan sisanya 10 - 15% berat adalah *syngas* (gas). Tar sebagai produk utama dalam proses pirolisis cepat dapat digunakan sebagai asap cair atau digunakan sebagai perekat pada bahan bakar padat.

c. Pirolisis kilat (*fast pyrolysis*)

Proses pirolisis ini berlangsung hanya beberapa detik dengan temperatur pemanasan yang sangat tinggi. Pirolisis kilat pada bahan bakar padat membutuhkan pemanasan yang sangat cepat dan ukuran partikel bahan bakar yang kecil sekitar 105 - 150 μm .

Tabel 2.3. Perbedaan indikator tipe pirolisis (Demirbas, 2004)

INDIKATOR	Pirolisa Konvensional	Pirolisa Cepat	Pirolisa Kilat
Temperatur Pirolisa (Pyrolysis temperature-K)	550 - 950	850 - 1250	1050 - 1300
Laju Pemanasan (Heating rate-K/s)	0.1-1	10-200	>1000
Ukuran partikel (Particle size-mm)	5-50	<1	<0.2
Waktu tinggal (Solid residence time-s)	450-550	0.5-10	<0.5

2.2.5. Bahan Perekat (*Binder*)

Fungsi perekat adalah menyatukan antara dua benda agar saling berikatan melalui ikatan permukaan. Bahan perekat umumnya dapat dibedakan menjadi 3 jenis :

a. Bahan perekat anorganik

Bahan perekat yang termasuk dalam jenis ini adalah sodium silikat, magnesium, *cement*, dan *sulphite*. Kerugian dari penggunaan bahan perekat anorganik adalah sifat bahan perekat yang banyak meninggalkan abu sekam pada proses pembakaran.

b. Bahan perekat organik

Bahan perekat jenis ini, penggunaan jumlah perekat yang dibutuhkan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan bahan perekat *hydrocarbon*. Kerugian penggunaan bahan perekat organik yang ditimbulkan adalah ketahanan arang cetak yang dihasilkan kurang tahan terhadap kelembaban.

c. *Hydrocarbon*

Bahan perekat *hydrocarbon* umum digunakan pada pembuatan arang cetak atau batubara cetak sebagai perekat.

Tapioka, tepung kanji atau tepung singkong adalah tepung yang dihasilkan dari olahan umbi akar ketela pohon yaitu singkong. Tapioka memiliki sifat yang sejenis dengan tepung sagu, sehingga penggunaan keduanya dapat dipertukarkan. Bahan ini umum digunakan untuk pembuatan makan dan bahan perekat. Salah satu penggunaan tapioka sebagai bahan perekat digunakan pada pembuatan briket (<http://id.wikipedi.org>, 2016).



Gambar 2.2. Tepung kanji (<http://www.kerjanya.net>, 2015)

Berikut keuntungan dan kerugian penggunaan bahan perekat tapioka menurut (Sulistyanto, 2006). Keuntungan penggunaan perekat tapioka antara lain : Harga yang relatif murah, mudah didapatkan dan pemakaiannya dan menghasilkan kekuatan rekat kering yang tinggi. Sedangkan kerugiannya antara lain : ketahanan terhadap air yang rendah untuk perekatan awal sehingga bersifat sementara (dalam kayu lapis), mudah berjamur ,mudah diserang bakteri dan binatang pemakan tapioka.

2.2.6. Pembriketan Arang

Pembriketan adalah metode untuk mengubah material dengan densitas rendah menjadi material dengan densitas tinggi dengan mengkonversi bentuk menjadi bahan bakar padat. Tujuan Pembriketan untuk menyeragamkan bentuk bahan bakar padat sehingga memiliki nilai karakteristik yang seragam. Briket memiliki sifat-sifat yang mempengaruhi kualitas bahan bakar. Sifat-sifat briket yaitu sifat fisis dan kimia. Sifat fisis meliputi ukuran briket, karakteristik briket, densitas, kandungan air dan nilai kalor.

Manfaat pembriketan bahan bakar padat biomassa antara lain :

- a. Selama proses penyalaan dan pembakaran, briket sangat sedikit menghasilkan asap.
- b. Minim kadar abu yang terbentuk (kurang dari 5% dari massa briket).
- c. Nilai kalor per unit volume meningkat.
- d. Meminimalisir bau yang ditimbulkan briket karena mengandung zat mudah menguap.
- e. Memudahkan pengangkutan dan penyimpanan.
- f. Briket tidak cepat habis terbakar.
- g. Mampu mengatasi masalah pembuangan limbah padat.

Pada umumnya, teknik pembriketan dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok berdasarkan pada besar tekanan briket (Grover dan Mishra, 1996) yaitu:

- a. Pembriketan tekanan tinggi (1000 - 2500 kg/cm²).
- b. Pembriketan tekanan medium (500 – 1000 kg/cm²) dengan pemanas.
- c. Pembriketan tekanan rendah (250 – 500 kg/cm²) dengan binder atau perekat.

2.2.7. Pembakaran

Pembakaran adalah proses oksidasi yang menghasilkan kalor dan cahaya cepat bahan bakar disertai dengan produksi panas, atau panas dengan cahaya. Pelepasan kalor pada bahan bakar ketika proses oksidasi, kandungan unsur karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, dan nitrogen akan bereaksi dengan udara dan oksigen.

Jumlah suplai udara yang dibutuhkan secara ideal setiap bahan bakar berbeda dan memiliki spesifikasi campuran udara yang berbeda pula. Pada kondisi ideal, proses pembakaran dapat terjadi apabila jumlah bahan bakar dan udara pada proporsi tertentu, yang berdasarkan prinsip kimia (stoikiometrik). Namun faktanya, campuran bahan bakar dengan udara di dalam *furnace* (ruang bakar) sangat mustahil untuk mencapai kondisi sempurna. Oleh karena itu, dibutuhkan adanya *excess air* yang disuplai ke dalam proses pembakaran untuk memastikan terjadinya pembakaran yang sempurna. Jumlah dari *excess air* tergantung dari bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran. Proses pembakaran sempurna dapat terlihat pada gambar 2.3. berikut :

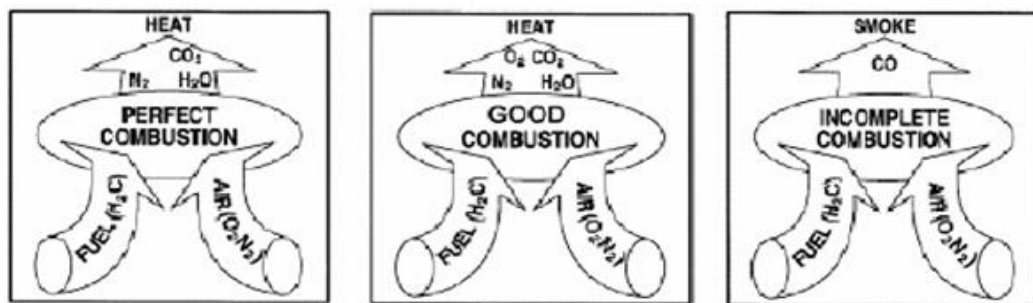


Gambar 2.3. Skema segitiga pembakaran sempurna (<http://fire-training.com.au>, 2016)

2.2.8. Tujuan Pembakaran

Sebagai syarat untuk mendapatkan pembakaran sempurna, tujuan pembakaran untuk melepas seluruh panas yang terdapat dalam bahan bakar. Tujuan pembakaran ini dikenal dengan istilah “3T” yang dilakukan sebagai pengontrol pembakaran. “3T” ini yaitu:

- Temperature* Suhu yang cukup tinggi untuk menyalakan dan menjaga penyalaan bahan bakar.
- Turbulence* pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik.
- Time* waktu yang cukup untuk mendapatkan pembakaran yang sempurna.



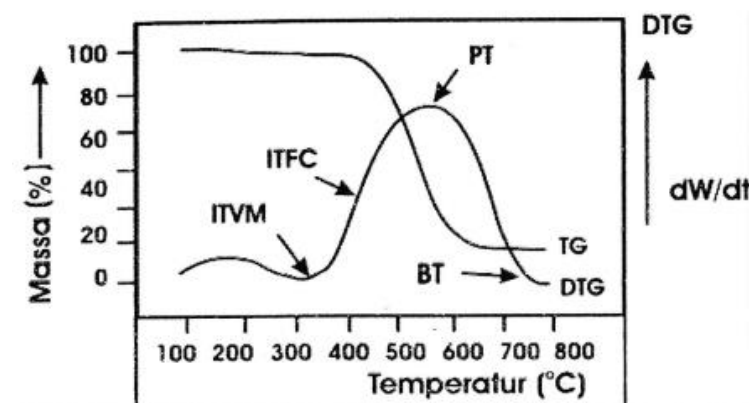
Gambar 2.4. Pembakaran sempurna, baik dan tidak sempurna (Bureau of Energy Efficiency, 2004)

Diketahui dari gambar 2.4. di atas, bahwa pembakaran sempurna dapat terjadi apabila senyawa C, H, dan S yang terdapat dalam bahan bakar membentuk gas CO_2 , H_2O (air), dan SO_4 sehingga tidak ada sisa dari pembakaran. Sedangkan pembakaran tidak sempurna akan lebih banyak menghasilkan gas CO karena kurangnya suplai oksigen saat pembakaran.

2.2.9. Pembakaran bahan bakar padat

Pembakaran adalah urutan reaksi eksotermik antara bahan bakar dan oksidan (senyawa kimia yang mudah mentransfer atom oksigen) disertai dengan produksi panas dan konversi komponen kimia, reaksi ini bertujuan untuk melepas energi dari bahan bakar dengan menghasilkan panas dan cahaya. Proses pembakaran briket berlangsung secara lambat karena kerapatan (*density*) briket. Semakin besar kerapatan (*density*) briket, semakin lambat laju pembakaran dan semakin besar nilai kalor yang dihasilkan. Pembakaran briket berlangsung secara perambatan dimana bagian luar briket akan terbakar lebih awal dan menghasilkan abu. Ketika abu semakin banyak dan tidak terurai, maka abu akan menghambat proses pencampuran antara udara dengan arang yang belum terbakar di bagian dalam briket. Hal ini mempengaruhi laju pembakaran briket, semakin rendah laju pembakaran briket semakin rendah nilai kalor yang dihasilkan.

Othman dan Shamsuddin (2003) melakukan penelitian tentang pembakaran Batubara dengan metode thermogravimetri analisis. Batubara yang digunakan adalah Blair Athol (Batubara Australia), Merit Pila (Batubara Malaysia), dan Tnito Harum (Batubara Indonesia). Penelitian dengan metode *thermogravimetric* diawali dari temperatur ruangan mencapai 1000°C. Data turunan *thermogravimetric* kemudian dianalisis dengan menggunakan persamaan reaksi Arrhenius orde pertama. Data dari sistem *thermobalance* kemudian diplotkan kedalam grafik hubungan temperatur dengan laju penurunan massa seperti terlihat di gambar 2.5. berikut.



Gambar 2.5. Grafik hubungan temperatur dengan laju penurunan massa
(Othman, N. F., 2003)

Dari gambar 2.5. di atas tersebut, tiap tahap pembakaran dinotasikan dengan titik untuk mengetahui proses pembakaran. Titik ini dinyatakan dengan:

- a. ITVM (*Initiation Tempertaure of Volatile Matter*) adalah temperatur dimana *volatile matter* mulai keluar atau terlepas yang ditandai dengan penurunan massa yang meningkat. ITVM ditandai pada zona dimana laju pengurangan massa sedikit turun kemudian meningkat dengan cepat.
- b. ITFC (*Initiation Temperature of Fixed Carbon*) adalah adalah temperatur dimana terjadi pengurangan massa terbesar yang ditandai titik tertinggi dari grafik penurunan massa.
- c. PT (*Peak of weight loss Temperature*) adalah temperatur bahan bakar dimana laju pengurangan massa dari sampel mencapai nilai tertinggi yang ditandai dengan puncak dari kurva.
- d. BT (*Burning out Temperature*) adalah temperatur sampel dimana laju pengurangan massa berlangsung lambat dan cenderung stabil, yang ditandai dengan kurva yang sedikit mendatar.

Menurut Himawanto (2005), mekanisme pembakaran biomassa terdiri dari tiga tahap yaitu pengeringan (*drying*), devolatilisasi (*devolatilization*), dan pembakaran arang (*char combustion*).

- a. Pengeringan (*drying*)

Pengeringan adalah proses dimana bahan bakar mengalami kenaikan temperatur yang menyebabkan kadar air yang terkandung pada bagian luar sampel menguap, sedangkan kadar air yang berada di bagian dalam sampel akan menguap melalui celah kecil atau pori-pori dari sampel tersebut.

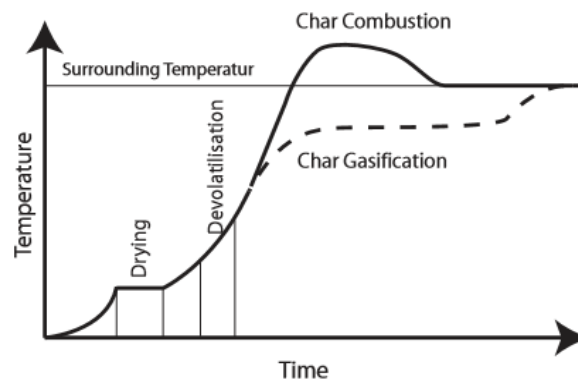
- b. Devolatilisasi (*devolatilization*)

Devolatilisasi adalah tahapan saat sampel mulai terurai atau terdekomposisi, yaitu terpisahnya ikatan kimia secara termal dan zat *volatile matter* akan keluar dari partikel. Proses devolatilisasi ini akan menghasilkan zat *volatile matter*.

- c. Pembakaran arang (*char combustion*)

Pada proses ini, sampel akan menghasilkan sisa dari pembakaran berupa arang (*fixed carbon*) dan abu, lalu partikel pada sampel akan melewati proses oksidasi yang membutuhkan 70% - 80% dari total waktu pembakaran. Laju

pembakaran arang tergantung pada konsentrasi oksigen, temperatur gas, bilangan Reynolds, ukuran, dan porositas arang. Arang mempunyai porositas yang tinggi. Laju reaksi global dirumuskan dengan istilah laju reaksi massa arang per satuan luas permukaan luar dan per satuan konsentrasi oksigen di luar lapisan batas partikel. Reaksi global ini dapat dituliskan sebagai berikut : $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ (a) dimana permukaan karbon juga bereaksi dengan karbondioksida dan uap air dengan reaksi reduksi sebagai berikut : $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ (b) $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ (c) Reaksi reduksi (b) dan (c) secara umum lebih lambat daripada reaksi oksidasi (a), dan untuk pembakaran biasanya hanya reaksi (a) yang diperhitungkan.



Gambar 2.6. Grafik mekanisme pembakaran (Thunman dan Leckner, 2007)

2.2.10. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembakaran bahan bakar padat

Berikut beberapa faktor yang dapat mempengaruhi pembakaran bahan bakar padat (briket) yaitu:

a. Ukuran partikel

Semakin kecil ukuran partikel semakin cepat pula bahan bakar tersebut terbakar, karena ukuran partikel yang kecil menyebabkan luas permukaan bahan bakar yang besar.

b. Kecepatan aliran udara

Terus meningkatnya kecepatan udara akan menimbulkan tekanan aliran dan jumlah oksigen meningkat, sehingga laju pembakaran briket akan naik bersamaan dengan naiknya kecepatan aliran udara dan kenaikan temperatur.

c. Jenis bahan bakar

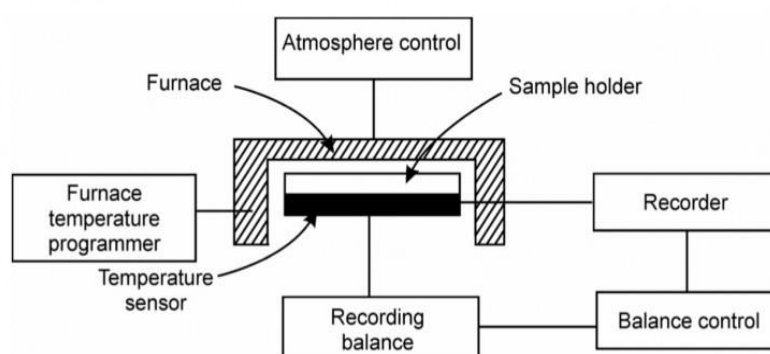
Setiap jenis bahan bakar memiliki karakteristik yang berbeda. Karakteristik bahan bakar antara lain: kandungan *volatile matter* dan *moisture*. Semakin banyak bahan bakar mengandung *volatile matter* semakin cepat bahan bakar tersebut menyala.

d. Temperatur udara pembakaran

Semakin tinggi temperatur udara dalam pembakaran semakin cepat bahan bakar tersebut terbakar. Kenaikan temperatur udara pembakaran menyebabkan semakin pendek waktu pembakaran.

2.2.11. Thermogravimetric Analysis (TGA)

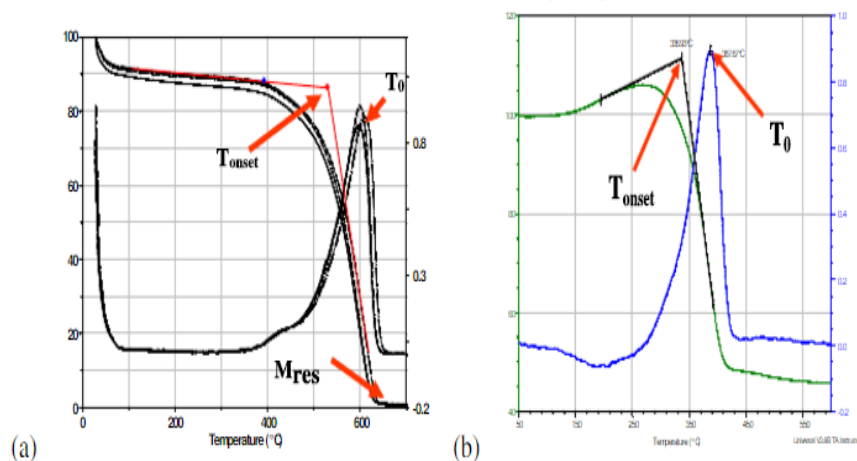
Thermogravimetric analysis (TGA) adalah metode untuk menganalisis stabilitas termal dan komponen zat *volatile matter* dengan merekam laju penurunan massa selama sampel diberi perlakuan panas. Metode ini biasa dilakukan dalam lingkungan oksidatif (udara atau oksigen bercampur dengan gas inert seperti helium dan argon). Laju penurunan massa dicatat sebagai fungsi dari meningkatnya suhu. Selain itu, TGA juga digunakan untuk memantau energi yang dilepas atau diserap saat proses pemanasan. Instrumentasi yang mengukur laju penurunan massa pada sampel di dalam sebuah ruang bakar dengan *thermocontroller* disebut *thermobalance*. Skema *thermobalance* dapat dilihat pada gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7. Skema *thermobalance* (<http://nptel.ac.in>, 2016)

Dalam beberapa kasus, analisis TGA dilakukan dalam kondisi oksidatif (oksigen dan campuran gas inert). Pemilihan temperatur maksimum bertujuan untuk menstabilkan berat sampel pada akhir pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa

reaksi kimia selesai atau karbon telah terbakar habis. Pendekatan ini memberikan 2 indikasi yaitu kadar abu atau massa residu (M_{res}) dan suhu oksidasi (T_o). Definisi keambiguan dari kadar abu (M_{res}) dan suhu oksidasi (T_o) dapat dilihat gambar 2.8 berikut:

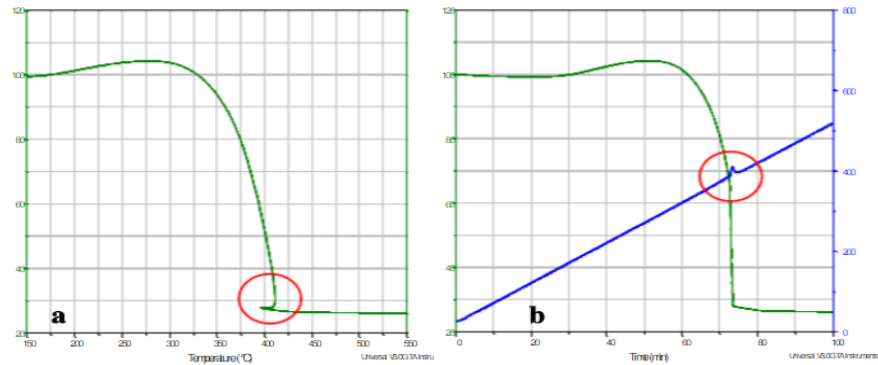


Gambar 2.8. (a) Grafik TGA murni dan (b) Grafik ilustrasi keambiguan penentuan T_{onset} (*Practice Guide Section TGA*)

Penentuan temperatur oksidasi dapat ditentukan dengan beberapa cara. Salah satu dengan penggunaan laju penurunan massa maksimum (dm/dT_{max}) dan temperatur oksidasi saat massa mulai berkurang (T_{onset}). Temperatur laju penurunan massa maksimum menandakan bahwa pada temperatur tersebut oksidasi berlangsung secara maksimum dan temperatur saat massa mulai berkurang menandakan bahwa oksidasi dimulai. Ada dua alasan penggunaan model $T_o = dm/dT_{max}$ banyak diminati, pertama karena inisiasi laju penurunan massa berjalan secara bertahap (di atas temperatur 100 °C) menjadikan sulit dalam menentukan T_{onset} secara tepat. Inisiasi yang bertahap dipercaya karena zat yang mengandung karbon teroksidasi pada temperatur lebih rendah dari bahan yang terdapat pada *nanotubes*. Kedua, laju penurunan massa akibat oksidasi karbon tertutup oleh kenaikan massa akibat katalisator oksidasi pada temperatur rendah.

Terdapat keanehan dari hasil pengamatan TGA, dimana grafik penurunan massa berbalik pada absis dan kembali seperti semula. Fenomena tersebut akan mudah dijelaskan apabila grafik penurunan massa dan temperatur diplotkan

terhadap waktu. Pada grafik terlihat jelas meskipun mengalami penurunan massa yang tajam namun secara bersamaan terjadi fluktuasi dan kembali linier. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan terjadinya pembakaran pada sampel dan melepaskan sebagian besar kalor secara tiba-tiba dan mengakibatkan kenaikan temperatur secara tajam diiringi hilangnya kalor dan turunnya temperatur.



Gambar 2.9. Keambiguan TGA (a) Grafik “backward” pada TGA (b) Kenaikan temperatur akibat pembakaran (*Practice Guide Section TGA*)

2.2.12. Nilai Kalor

Nilai kalor bahan bakar adalah besarnya panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar padat. Nilai kalor terdiri dari *Gross Heating Value* (GHV) atau nilai kalor atas dan *Nett Heating Value* (NHV) atau nilai kalor bawah. Nilai kalor atas atau *Higher Heating Value* (HHV) adalah panas yang dihasilkan oleh pembakaran sempurna satu satuan berat bahan bakar padat atau cair, atau satu satuan volume bahan bakar gas, pada tekanan tetap. Nilai bakar bawah atau *Nett Heating Value* (NHV) atau *Lower Heating Value* (LHV) adalah panas yang besarnya sama dengan nilai panas atas dikurangi panas yang diperlukan oleh air yang terkandung dalam bahan bakar dan air yang terbentuk dari pembakaran bahan bakar. Besarnya nilai kalor dapat dirumuskan pada persamaan 2.9 berikut ini :

$$HHV = \frac{(EE \times \Delta T) - (Acid) - (Fulse)}{Massa \ Bahan} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

$$HHV = Highest \ Heating \ Value \ (kal/gram)$$

Acid	= Sisa abu 10 kal/gram
Fulse	= Panjang kawat yang terbakar = 1 cm =1 kal/gram
ΔT	= Selisih Suhu ($^{\circ}\text{C}$)
EE	= 2401,459 kal/gram

2.2.13. Energi aktivasi (E_a)

Definisi energi aktivasi adalah energi yang harus dilampaui agar reaksi kimia (pembakaran) dapat terjadi. Energi aktivasi juga dapat diartikan energi minimum yang dibutuhkan agar reaksi kimia (pembakaran) dapat terjadi.

Arrhenius (1859-1927) menyatakan bahwa hanya molekul memiliki energi yang lebih besar dari energi aktivasi yang akan bereaksi, adanya energi yang tinggi maka molekul aktif dapat diproduksi. Energi aktivasi dapat diketahui dari persamaan berikut:

$$\frac{dx}{dt} = -A e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} X^n \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan X adalah berat dari sampel yang bereaksi, t adalah waktu (menit), A adalah pra-exponensial atau faktor frekuensi (menit^{-1}), E adalah energi aktivasi dari dekomposisi (kJ/mol), R adalah konstanta gas universal (kJ/mol.K), T adalah temperatur absolut (K), dan n adalah orde reaksi (-).

Perhitungan energi aktivasi pada pembakaran bahan bakar padat juga dapat menggunakan persamaan Arrhenius berikut:

$$k = -A e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

K : konstanta laju reaksi

A : faktor pra-exponensial

E_a : energi aktivasi

R : konstanta gas universal (kJ/mol.K)

T : temperatur (K)

Secara matematis persamaan Arrhenius di atas dapat diturunkan dengan Ln sehingga menjadi persamaan berikut:

$$\ln k = \ln A - \left(\frac{E}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana $y = m \cdot x$

$$y = \ln k \text{ dan } x = \frac{1}{T}$$

sehingga diperoleh persamaan berikut :

$$y = \left(-\frac{E}{R}X\right) + c \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan memasukkan grafik antara $\ln k$ dengan $1/T$ dari data eksperimen akan didapat harga energi aktivasi, dimana kemiringan (*slope*) *trendline* linier yang terbentuk adalah $-E_a/R$ dan dikalikan dengan konstanta gas universal (R).

2.2.14. Karakteristik pembakaran bahan bakar padat

Karakteristik pembakaran bahan bakar padat memiliki tiga tahapan utama yang terdiri dari: pengeringan (*drying*) yaitu zona dimana kandungan air (*moisture*) mulai terlepas, devolatilisasi yaitu zona dimana zat *volatil matter* terlepas dan pembakaran arang (*char combustion*). Karakteristik pembakaran dapat didefinisikan melalui titik-titik berikut:

- Titik A adalah temperatur dimana zat volatil mulai keluar ditandai dengan penurunan massa.
- Titik B adalah temperatur dimana terjadi pengurangan massa terbesar ditandai dengan titik puncak grafik laju penurunan massa.
- Titik C adalah temperatur dimana *fixed carbon* mulai terbakar yang ditandai penurunan massa bergerak lambat.
- Titik D adalah temperatur dimana pembakaran dapat dikatakan selesai yang ditandai penurunan massa konstan.

Persentase bahan bakar padat seperti kadar air, zat volatil, kadar karbon terikat dan abu mengangkut pada astm D 1762-84 diketahui dari persamaan berikut :

- Kadar air (*moisture*)

$$\text{Moisture \%} = [(A - B)/A] \times 100 \dots\dots\dots (2.6)$$

A = gram sampel udara kering yang digunakan

B = gram sampel setelah pengeringan pada 105 °C

- Kadar zat *volatile matter*

$$\text{Volatile matter \%} = [(B - C)/B] \times 100 \dots\dots\dots (2.7)$$

C = gram sampel setelah pengeringan pada 950 °C

c. Kadar Abu (*Ash*)

$$\text{Ash \%} = (D - B) \times 100 \dots\dots\dots (2.8)$$

D = gram residu

d. Kadar Karbon Terikat (*Fixed Carbon*)

$$\text{Fixed carbon \%} = [100 - (\text{moisture} + \text{volatile matter} + \text{ash})] \dots (2.9)$$