BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan pustaka

Sulistyanto (2006) melakukan penelitian menguji karakteristik pembakaran biobriket campuran batubara dengan sabut kelapa perbandingan batubara : biomass : 10% : 90%, 20% : 80%, 30% : 70%.Penelitian awal dilakukan dengan pengujian proximate bahan baku meliputi kadar air, nilai kalor, kadar abu, volatile matter dan kadar karbon selanjutnya dilakukan pembuatan biobriket dengan pencampuran bahan baku batu bara, sabut kelapa, lime stone dengan perekat pati kanji dengan pengepresan tekanan 100 kg/cm^2. Pengujian karakteristik pembakaran dilakukan dengan alat uji untuk mengetahui besarnya laju pengurangan massa dengan kecepatan udara konstan. Berdasarkan percobaan dan parameter yang telah diuji, penambahan biomass menyebabkan naiknya volatile matter sehingga lebih cepat terbakar dan laju pembakaran lebih cepat. Penambahan biomass juga dapat menurunkan emisi polutan yang dihasilkan pada saat pembakaran. Komposisi biobriket terbaik yang dapat digunakan untuk kebutuhan sehari-hari adalah komposisi batubara : biomass = 10% : 90% karena lebih cepat terbakar dan lebih ramah lingkungan, sedangkan untuk kebutuhan industri, komposisi terbaik dengan pencapaian temperatur tertinggi adalah komposisi batubara : biomass = 30% : 70%.

Sari dkk (2010) menganalisa kualiatas briket arang dari campuran kayu akasia daun lebar (*Acacia Mangium Wild*) dengan batubara denagn menggunakan perekat tepung tapioka sebanyak 10% dari serbuk arang yang dibuat. Adapun pengujian yang dilakukan antara lain penetapan kadar air, kadar abu, zat terbang, karbon sisa, kerapatan, dan nilai kalor yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan metode Rancangan Acak Lengkap (RAL) dimana faktor penelitian dengan komposisi campuran arang kayu akasia daun lebar dan batubara dengan ulangan sebanyak 5 kali. Faktor penelitian yakni: A= Arang kayu Akasia Daun

50% + 50%, A4 = 25% + 75%, dan A5 = 0% + 100%. Dari perbedaan komposisi masing-masing perlakuan menghasilkan nilai karbon sisa sebesar 61,2496 – 73,5398 ternyata semua perlakuan memenuhi standar kualitas briket arang buatan Jepang yang berkisar 60 – 80 %. Nilai zat terbang yang dihasilkan ternyata hanya perlakuan A1 (24,5374) dan A2 (27,6669) ini saja yang memenuhi standar Jepang yang berkisar 15 – 30 %. Nilai kalor yang dihasilkan 6243,8778 – 7679,0393 ternyata memenuhi standar briket arang buatan Jepang, Inggris maupun Amerika. Nilai kadar air, kadar abu dan kerapatan dari seluruh perlakuan campuran briket arang yang ada tidak memenuhi standar baik Jepang, Inggris maupun Amerika.

Patabang (2012) melakukan penelitian karateristik termal briket arang sekam padi dengan variasi bahan perekat tepung tapioka pada komposisi 7%, 10%, dan 15%. Selanjutnya dilakukan percetakan dengan tekanan 2.5 Mpa. Pengujian briket dilakukan melalui analisis proksimasi untuk mendapatkan kandungan *Moisture* (M), *Ash* (A), *Volatile Matters* (VM), *Fixed Carbon* (FC) dan Nilai Kalor (HHV). Dari hasil pengujian didapat hasil campuran bahan perekat 7% diperoleh nilai terbaik masing-masing M=2.67%, A=39.06%, VM=42.92%, FC=15.35% dan HHV=2789 cal/g. Dimana pada campuran bahan perekat tersebut mempunyai efisiensi pembakaran yang terbaik. Karena menghasilkan nilai kalor dan *volatile matters* terbesar.

2.2 Dasar Teori

2.2.1. Biomassa

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang mengacu pada bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis. Sumber-sumber biomassa yang paling umum adalah bahan bakar yang berasal dari tumbuhan seperti kayu dan daun, limbah dan alkohol. Pengunaan biomassa sebagai tujuan primer seperti serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan dan sebagainya. Biomassa juga digunakan sebagai bahan energi (bahan bakar). Umumnya yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai

Potensi biomassa di Indonesia yang bisa digunakan sebagai sumber energi jumlahnya sangat melimpah. Limbah yang berasal dari hewan maupun tumbuhan semuanya potensial untuk dikembangkan. Tanaman pangan dan perkebunan menghasilkan limbah yang cukup besar, yang dapat dipergunakan untuk keperluan lain seperti bahan bakar nabati. Pemanfaatan limbah sebagai bahan bakar nabati memberi tiga keuntungan langsung. Pertama, peningkatan efisiensi energi secara keseluruhan karena kandungan energi yang terdapat pada limbah cukup besar dan akan terbuang percuma jika tidak dimanfaatkan. Kedua, penghematan biaya, karena seringkali membuang limbah bisa lebih mahal dari pada memanfaatkannya. Ketiga, mengurangi keperluan akan tempat penimbunan sampah karena penyediaan tempat penimbunan akan menjadi lebih sulit dan mahal, khususnya di daerah perkotaan. (http://web.ipb.ac.id, 2014).

2.2.2 Limbah Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*elaeis*) adalah tumbuhan industri penting penghasil minyak masak, minyak industri, maupun bahan bakar berupa biodiesel (http://id.wikipedia.org, 2014). Dalam pengolahan kelapa sawit pastinya menghasilkan limbah, baik berupa limbah padat ataupun limbah cair. Cangkang, serat *(fibre)* dan tandan kosong kelapa sawit merupakan salah satu limbah padat yang dihasilkan cukup besar dalam pengolahan minyak kelapa sawit yaitu mencapai 60% dari produksi minyak. Cangkang kelapa sawit dapat digunakan sebagai alternatif utama pengganti batubara karena cangkang kelapa sawit mempunyai nilai kalor cukup tinggi mencapai 4.120 kCal/kg. Serat *(fibre)* biasanya hanya memiliki nilai kalor 2.710 kCal/kg biasanya digunakan untuk

2.2.3. Pemanfaatan energi biomassa

Diperlukan teknologi untuk mengkonversi biomassa agar biomassa tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar. Pengkonversian biomassa secara umum dapat dibedakan menjadi tiga macam yaitu:

1. pembakaran langsung

   Pembakaran langsung merupakan teknologi yang paling sederhana karena pada umumnya biomassa telah dapat langsung dibakar. Beberapa biomassa perlu dikeringkan terlebih dahulu dan didensifikasi untuk kepraktisan dalam penggunaan.

2. konversi termokimiawi

   Konversi termokimiawi merupakan teknologi yang memerlukan perlakuan termal untuk memicu terjadinya reaksi kimia dalam menghasilkan bahan bakar.

3. konversi biokimiawi

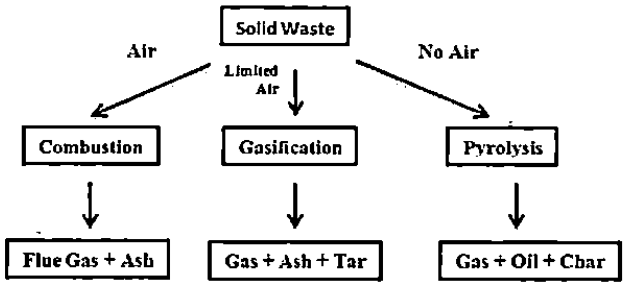
Konversi biokimiawi merupakan teknologi konversi yang menggunakan bantuan mikroba dalam menghasilkan bahan bakar.

2.2.4. Pirolisis

Pirolisis sering disebut juga sebagai destilasi kering secara definisi yaitu proses biomassa yang diberikan aksi pemanasan hingga temperatur yang tinggi tanpa adanya oksigen. Tujuan dilakukan pirolisis untuk memperoleh produk berupa padatan (arang) , cairan (tar) dan *pyrogas* (gas) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Reaksi dekomposisi pirolisis menurut Ryu (2005) adalah sebagai berikut :

Pirolisis : $CxHyOz + Kalor \rightarrow Arang + Minyak + Gas$

Perbedaan utama antara pirolisis, gasifikasi, dan insinerasi adalah jumlah oksigen yang disuplai ke reaktor *thermal*. Skema ketiga teknik pengolahan



Gambar 2.1. Perbedaan produk yang dihasilkan daripirolisis, gasifikasi, dan insinerasi

Proses pirolisis berdasarkan laju pemanasan dan temperatur akhirnya dapat dikatagorikan menjadi dua jenis yaitu *slow pyrolisis* dan *fast pyrolisis* Ryu (2005), yaitu:

a. Pirolisis lambat (*slow pyrolisis*), secara tradisional digunakan untuk memproduksi arang. Waktu pirolisis yang singkat dari biomassa pada temperatur menengah (300^0C - 600^0C) secara umum digunakan memperoleh persentase massa arang yang besar.
b. Pirolisis cepat (*fast pyrolisis*), ditandai dengan laju pemanasan yang tinggi (104 ^{0}C/min) pada temperatur pirolisis sekitar 500 ^{0}C dan pendinginan yang cepat dari produk tar. Kategori ini biasanya digunakan untuk memperoleh persentase massa tar yang besar.

Dalam proses konvensional, pirolisis dilakukan dengan cara melakukan pemanasan secara perlahan-lahan. Proses ini akan dihasilkan produk berupa arang aktif, gas dan produk terkondensasi. Pirolisis dapat digunakan untuk menghasilkan bahan-bahan kimia seperti aseton, metanol, dan asam asetat yang tinggi. Tar yang merupakan produk cair kental dapat diproses menjadi minyak ringan dan berat. Destruksi biomassa menghasilkan produk-produk senyawa organik tergantung pada jenis dan komposisi biomassa, sebagai contoh pada pirolisis biomassa kayu keras, biasanya akan menghasilkan karbon dioksida, karbon monoksida, hidrogen, metana yang lebih banyak dibandingkan pada biomassa kayu lunak. Produk berupa metanol dan asam asetat akan lebih banyak ditemukan pada pirolisis kayu keras. Proses gasifikasi pada umumnya digunakan

secara katalitik untuk keperluan sintesis hidrokarbon melalui mekanisme *Fischer Tropsch* (Fatimah, 2004).

2.2.5. Bahan perekat

Fungsi dari perekat adalah menyatukan antara dua benda agar saling berikatan melalui ikatan permukaan. Bahan perekat pada umumnya dapat dibedakan menjadi 3 jenis (Caroko, 2013) yaitu:

a. Perekat anorganik

   Termasuk dalam jenis ini adalah sodium silikat, magnesium, *cement* dan *sulphite.* Kerugian dari penggunaan bahan perekat ini adalah sifatnya yang banyak meninggalkan abu sekam pada waktu pembakaran.

b. Bahan perekat tumbuh-tumbuhan (organik)

   Jumlah bahan perekat yang dibutuhkan untuk jenis ini jauh lehih sedikit bila dibandingkan dengan bahan perekat *hydrocarbon.* Kerugian yang dapat ditimbulkan adalah arang cetak yang dihasilkan kurang tahan terhadap kelembaban.

c. *Hydrocarbon* dengan berat molekul besar

   Bahan perekat jenis ini sering kali dipergunakan sebagai bahan perekat untuk pembuatan arang cetak ataupun batubara cetak

Tapioka, tepung singkong, tepung kanji, atau aci adalah tepung yang diperoleh dari umbi akar ketela pohon atau dalam bahasa Indonesia yaitu singkong. Tapioka memiliki sifat-sifat yang serupa dengan tepung sagu, sehingga penggunaan keduanya dapat dipertukarkan. Tepung ini sering digunakan untuk membuat makanan dan bahan perekat (http://id.wikipedia.org, 2014)

Berikut keuntungan dan kelemahan penggunaan perekat pati menurut Sulistyanto, (2006) keuntungannya antara lain : harga yang relatif murah, mudah pemakaiannya, dapat menghasilkan kekuatan rekat kering yang tinggi. Sedangkan kelemahanya adalah ketahanan terhadap air yang rendah untuk perekatan awal

2.2.6. Pembriketan arang

Proses pembriketan bertujuan menaikkan nilai densitas biomassa yang rendah menjadi nilai densitas lebih tinggi dengan mengkonversinya menjadi bahan bakar padat berupa briket dengan energi yang terkonsentrasi. Pembriketan suatu bahan bakar padat biomassa dapat dikatakan sebagai proses densifikasi yang bertujuan untuk memperbaiki karakteristik bahan bakar biomassa. Sifat-sifat penting dari briket yang mempengaruhi kualitas bahan bakar adalah sifat fisik dan kimia. Sifat fisik meliputi karakteristik densitas, ukuran briket, kandungan air, nilai kalor dan energi per satuan volume.

Pembriketan atau pendensifikasian bahan bakar padat biomassa memiliki beberapa manfaat (Ahmad, 2010) antara lain :

1. Briket arang biomassa hampir tidak membentuk asap selama proses penyalaan dan pembakaran.
2. Kadar abu yang terbentuk sangat minim (kurang dari 5 % dari massa arang).
3. Meningkatkan nilai kalor per unit volume.
4. Mengurangi timbulnya bau karena briket arang mengandung minimal zat yang mudah menguap.
5. Dengan densifikasi dapat memudahkan dalam hal *transport* dan penjualan.
6. Waktu pembakaran lebih lama.
7. Dapat mengurangi masalah dalam hal pembuangan sampah.
8. Bahan bakar padat dapat seragam dalam hal ukuran dan kualitas.

Pada umumnya, teknik pembriketan dapat dibagi menjadi 3 kelompok yang dikategorikan berdasarkan pada besarnya tekanan (Grover dan Mishra, 1996), yaitu :

1. Pembriketan tekanan tinggi (1000 - 2500 kg/cm^2).
2. Pembriketan tekanan medium (500 - 1000 kg/cm^2) dengan pemanasan.
3. Pembriketan tekanan rendah (250 - 500 kg/cm^2) dengan bahan pengikat.

Pada semua teknik pembriketan, material awal briket adalah berupa partikel-

pada produk akhir pembriketan, jika partikel material tersebut dibriket dengan tekanan tinggi, maka tidak diperlukan bahan pengikat (*binder*). Terdapat beberapa jenis material yang masih memerlukan bahan pengikat meskipun di bawah kondisi tekanan tinggi. Beberapa jenis bahan yang dapat digunakan sebagai bahan pengikat adalah amilum atau tepung kanji, tar, dan aspal.

2.2.7. Pembakaran

Definisi dari pembakaran merupakan reaksi kimia yang berlangsung secara cepat antara bahan bakar *(fuel)* dengan oksigen dengan timbulnya panas yang disertai cahaya dan timbulnya gas. Pelepasan panas pada bahan bakar *(fuel)* ketika reaksi dioksidasi secara umum kandungan unsur-unsur karbon, hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen, akan bereaksi dengan udara dan oksigen.

Taufiq (2008), proses pembakaran akan terjadi jika unsur-unsur bahan bakar teroksidasi. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga akan disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara , dimana udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni $C_m H_m$ dapat ditulis dengan persamaan :

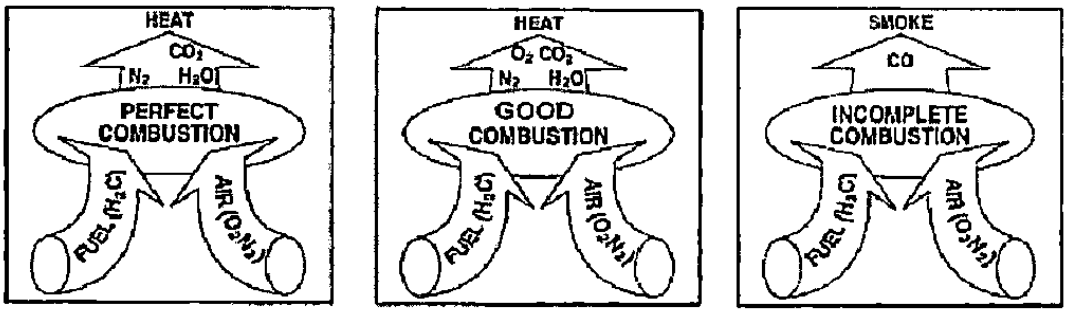
$$C_m H_m + {}_2 + 3{,}76\ {}_2 {}_2 + {}_2O + 3{,}76\ {}_2 \quad \text{.....(2.1)}$$

Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan diatas CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO, CO_2 dan H_2O juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang didapat juga karbon.

2.2.8. Tujuan pembakaran

Tujuan dari pembakaran yang baik adalah melepaskan seluruh panas yang

1) *Temperature/* suhu yang cukup tinggi untuk menyalakan dan menjaga penyalaan bahan bakar,
2) *Turbulence/* Turbulensi atau pencampuran oksigen dan bahan bakar yang baik.
3) *Time/*waktu yang cukup untuk pembakaran yang sempurna.



Gambar 2.3. Pembakaran yang sempurna, yang baik dan tidak sempurna (*Bureau of Energy Efficiency*, 2004)

Pembakaran sempurna (*perfect combustion*) terjadi kalau semua unsur C, H dan S yang terkandung dalam bahan bakar bereaksi membentuk CO_2, H_2O dan SO_2. Pembakaran parsial atau pembakaran tidak sempurna (*incomplete combustion)* terjadi jika proses pembakaran bahan bakar menghasilkan "intermediate combustion product" seperti CO, H_2, aldehid, disamping CO_2 dan H_2O. Kalau oksidatornya udara, gas hasil pembakaran juga mengandung N_2.

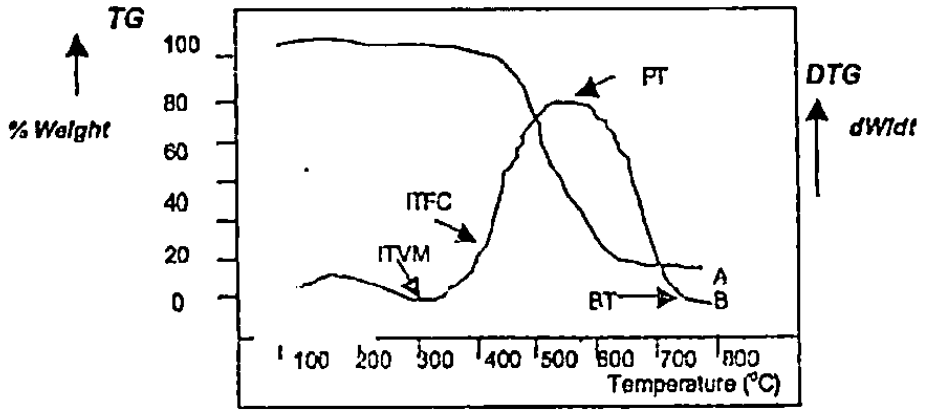
2.2.9. Pembakaran bahan bakar padat.

Pembakaran adalah suatu reaksi kimia eksotermal dengan kalor yang dibangkitkan sangat besar dan menghasilkan nyala, reaksi ini berlangsung spontan dan berkelanjutan karena adanya suplai kalor dari kalor yang dibangkitkan oleh reaksi itu sendiri.

Proses pembakaran briket arang berlangsung secara perambatan dimana partikel arang dibagian terluar akan terbakar terlebih dahulu dan akan menyisakan abu. Ketika lapisan abu pada briket semakin tebal (tidak terurai), abu akan menghambat proses difusi antara udara dengan arang yang belum terbakar di

pembakaran. Secara teoritis, untuk laju pembakaran yang rendah, maka energi kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut juga akan relatif rendah.

Othman dan Shamsuddin (2003) melakukan penelitian tentang pembakaran batubara menggunakan analisa termogravimetri. Batubara yang digunakan adalah Blair Athol (Batubara Australia), Merit Pila (Batubara Malasya), dan Tanito Harum (Batubara Indonesia). Penelitian termogravimetri dimulai dari temperatur ruangan sampai 1000 °C. Data turunan termogravimetri kemudian dianalisa dengan menggunakan persamaan reaksi Arrhenius orde pertama. Data termogravimetri dari sistem *thermobalance* kemudian diplotkan kedalam grafik hubungan antara temperatur dan penurunan massa seperti terlihat pada gambar berikut



Gambar 2.4. Grafik profil pembakaran untuk batubara *bituminous* (Gruescu et al, 2000)

Dari gambar tersebut, titik pada setiap proses dinyatakan dengan :

a. ITVM (*Initiation Temperature of Volatile Matter*) adalah temperatur sampel dimana pertama kali terjadi pengurangan massa.
b. ITFC (*Initiation Temperature of Fixed Carbon*) merupakan temperatur sampel dimana laju pengurangan massa mulai meningkat tajam.
c. PT (*Peak of weight loss Temperature*) merupakan temperatur sampel

d. BT (*Burning out Temperature*) adalah temperatur sampel dimana laju pengurangan massa berlangsung sangat lambat dan cenderung stabil, yang ditandai dengan kurva yang sedikit mendatar.

Mekanisme pembakaran bahan bakar padat terdiri dari tiga tahap yaitu pengeringan (*drying*), devolatilisasi (*devolatilization*) dan pembakaran arang (*char combustion*) (Borman dan Ragland, 1998).

1. Pengeringan

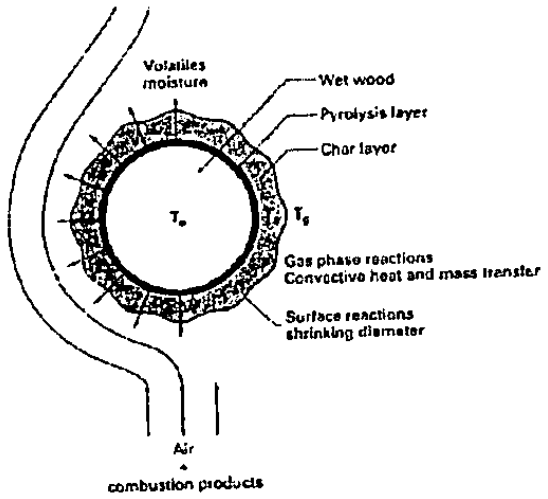
Kandungan air dalam bahan bakar padat mempunyai 2 bentuk yaitu air dalam wujud air bebas yang terkandung dalam pori-pori dan air dalam wujud terikat yang diserap ke struktur permukaan bagian dalam bahan bakar. Tahap pengeringan merupakan tahap awal dalam proses pembakaran bahan bakar padat.

Pada bahan bakar dengan partikel butiran halus (100 μm) air akan menguap dan terdorong keluar secara cepat sebelum volatil terlepas. Waktu pengeringan bahan bakar dengan partikel butiran halus adalah waktu yang diperlukan untuk memanasi partikel sampai titik uap dan melepaskan air. Kesetimbangan energi pada partikel kecil menyatakan bahwa laju waktu perubahan energi pada partikel sama dengan laju kalor untuk menguapkan air ditambah laju perpindahan kalor total ke partikel melalui konveksi dan radiasi.

$$t \sim \frac{(m_{w,i}c_w + m_{df}c_{df})(373 - T_i) + m_{w,i}h_{fg}}{} \qquad (2.2)$$

Untuk butiran dengan ukuran relatif besar persamaan di atas tidak berlaku. Terjadi *gradient* temperatur antar partikel, uap air akan menyebabkan partikel bagian dalam mengembang sementara *volatile* pada bagian kulit terluar partikel akan terlepas. Tekanan pada pori-pori sangat tinggi sewaktu terjadi devolatilisasi pada lapisan terluar partikel, sebagian uap air akan terdorong ke tengah partikel sampai tekanan pada seluruh partikel bertambah. Disini akan terjadi aliran uap air keluar dan ke dalam secara bersamaan tetapi dengan intensitas yang berbeda. Apabila terjadi pelepasan uap air maka transfer kalor dan massa ke permukaan partikel menurun sehingga terjadi penurunan laju reaksi. Kandungan air yang meningkat akan menurunkan laju reaksi.

Untuk bahan bakar dalam bentuk batangan, maka *drying*, *pyrolysis* dan *burning char* berlangsung secara bersamaan sampai sebagian besar massa telah terkonsumsi sehingga hanya tinggal arang. Skema pembakaran disini bisa dilihat dari gambar di bawah dimana lapisan arang akan terbentuk paling luar, berwarna hitam dan berpori-pori, lapisan *pyrolysis* berwarna coklat dan tipis, sedangkan bagian paling dalam berwarna putih dengan temperatur di bawah 100 °C walaupun di luar temperaturnya sangat tinggi.



Cross section of reacting log showing char, pyrolysis, and undisturbed wood regions.

Gambar 2.5. Penampang melintang pembakaran bahan bakar bentuk

2. Devolatilisasi

Setelah proses pengeringan selesai temperatur partikel bahan bakar akan terus meningkat dan bahan bakar mulai terdekomposisi, pada proses ini ikatan kimia partikel bahan bakar akan terpecah secara termal dan melepaskan *volatile matter*. *Volatile metter* tersebut akan mengalir keluar melalui pori-pori bahan bakar dan menghambat oksigen dari luar masuk kedalam partikel. Pada tahap inilah proses devolatilisasi disebut sebagai pirolisis. Laju devolatilisasi sangat berpengaruh pada jenis bahan bakar dan temperatur yang dihasilkan. Produk pirolisis akan menyala dan membentuk api yang menempel pada partikel bahan bakar padat. Selanjutnya api akan memanasi partikel sehingga terjadi peningkatan devolatilisasi dan pirolisis lebih lanjut. Laju devolatilisasi untuk bahan bakar padat dapat dilihat dalam persamaan reaksi orde pertama dengan sebuah konstanta laju Arrhenius, (Borman dan Ragland, 1998) yaitu :

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pyr} \quad \text{.....(2.3)}$$

$$k_{pyr} = -k_{o,pyr}\, e^{\left(-\frac{Epyr}{RTp}\right)} \quad \text{.....(2.4)}$$

$$m_v = m_p - m_c - m_a \quad \text{.....(2.5)}$$

pyr merupakan indeks untuk pirolisis dan mv = mp – mc – ma (massa dari zat volatil sama dengan massa dari partikel kering dikurangi massa *char* dan abu). Harga $k_{0,pyr}$ dan E_{pyr} untuk beberapa bahan dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.1. Harga $k_{0,pyr}$ dan E_{pyr} untuk beberapa bahan

Representative pyrolysis parameters for several solid fuels

Fuel	$k_{0,pyr}$ (s^{-1})	E_{pyr} (kcal/gmol)
Lignite	280	11.3
Bituminous coal	700	11.8
Wood	7×10^7	31.0

Apabila temperatur selama proses devolatilisasi bisa dianggap konstan maka perubahan massa akibat pirolisis :

$$\ln\left[\frac{m_p - m_c - m_a}{m_{p,i} - m_c - m_a}\right] = -k_{pyr}t \quad \text{.....} (2.6)$$

Umumnya untuk bahan bakar dengan butiran halus waktu pemanasan lebih pendek jika dibanding dengan waktu pirolisis, sedangkan untuk bahan bakar dengan partikel besar perubahan panas pada partikel harus dipertimbangkan.

Penyalaan bahan bakar padat terjadi karena penyalaan arang pada permukaan bahan bakar atau penyalaan volatil dalam lapis batas sekitar partikel. Ini akan tergantung kepada laju transfer kalor konveksi dan radiasi. Radiasi besar maka permukaan bahan bakar cepat sekali mencapai temperatur penyalaan. Konveksi besar maka permukaan bahan bakar juga cepat mengalami kenaikan temperatur tetapi akan diikuti oleh tersapunya volatil sehingga tidak bisa terakumulasi. Apabila temperatur permukaan bahan bakar rendah maka volatil akan terlebih dahulu terbakar. Keterlambatan penyalaan akan tergantung pada ukuran partikel, difusivitas termal, laju pemanasan, dan laju *pyrolysis*, dimana untuk butiran halus (*pulverized*) ordenya milidetik, sedangkan untuk butiran besar (±10 mm) ordenya detik.

3. Pembakaran *(char)*.

Pembakaran *char* merupakan tahap terakir dari mekanisme pembakaran bahan bakar padat. Setelah tahap devolatilisasi selesai maka hanya akan tertinggal abu dan arang. Arang sangat berpori dan ketika tidak ada lagi *volatile* yang terlepas maka oksigen dapat berdifusi kedalam partikel arang melewati lapis batas permukaan luar. Laju pembakaran dipengaruhi baik oleh laju reaksi antara karbon dengan oksigen yang terjadi pada permukaan maupun oleh laju difusi oksigen ke lapis batas dan ke dalam partikel.

Laju pembakaran *char* dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen, temperatur gas, bilangan Reynold, ukuran dan porositas arang. Reaksi pada permukaan *char* menghasilkan produk utama berupa CO dimana CO yang terlepas akan berikatan

temperatur meningkat 100 °C – 200 °C diatas temperatur gas luar. Arang akan bereaksi dengan oksigen pada permukaaan membentuk karbon monoksida dan karbon dioksida, tetapi secara umum karbon monoksida merupakan produk utama:

$$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$$

Salah satu hal yang penting dalam reaksi di atas adalah difusi *intraparticle*, hal ini disebabkan oleh permukaan partikel arang yang dalam kenyataannya adalah bersifat *porous*, tetapi untuk memudahkan pemodelan maka diasumsikan bahwa permukaan arang tidak dapat ditembus oleh proses difusi.

Sacara teoritis, laju pengurangan massa pada saat proses pembakaran yang terjadi dapat ditentukan menggunakan rumusan (Borman dan Ragland, 1998) berikut :

$$\frac{dm_c}{dt} = -\pi d^2 \frac{12}{16} k_e \rho_{O_2} \quad \text{.....} (2.7)$$

dimana persamaan diatas bila diintegralkan dengan memakai asumsi seperti di bawah akan menghasilkan waktu yang dibutuhkan untuk pembakaran arang. Model diameter konstan (densitas berkurang).

$$t_c = \frac{\rho_{c,i} d_i}{4{,}5 k_e \rho_{O_2}} \quad \text{.....} (2.8)$$

Model densitas konstan (diameter berkurang) dimana faktor difusi dominan (temperatur tinggi dan partikel besar).

$$t_c = \frac{\rho_c d_i}{6 D_{AB} \rho_{O_2}} \quad \text{.....} (2.9)$$

Model densitas konstan (diameter berkurang) dimana faktor kinetik dominan (temperatur rendah dan partikel kecil).

$$t_c = \frac{\rho_{c,i} d_i}{1{,}5 k_c \rho_{O_2}} \quad \text{.....} (2.10)$$

dimana *ke* adalah konstanta laju reaksi efektif yang dihitung dari :

$$k_e = \frac{\bar{h}_D k_c}{\bar{h}_D + k_c} \quad \text{.....} (2.11)$$

$$k_c = \frac{k_p T_g \hat{R}}{M_{O_2}} \quad \text{.....} \quad (2.12)$$

dengan *kp* bisa dihitung sebagai berikut:

$$k_p = -k_p exp\left(\frac{\hat{E}_c}{\hat{R}T_p}\right) \quad \text{.....} \quad (2.13)$$

dimana harga $k_{p,0}$ dan E untuk beberapa bahan bakar bisa dilihat dari tabel 2.2.

Tabel 2.2 Konstanta laju oksidasi *char* batubara

Representative global coal char oxidation rate constants [Smoot and Smith, by permission of Plenum Publishing Corp.]

Coal type	$k_{p,0}$ [g/(cm^2·s·atm O_2)]	$\hat{E}$ (cal/gmol)
Anthracite	20.4	19,000
Bituminous (high volatile A)	66	20,360
Bituminous (high volatile C)	60	17,150
Subbituminous (class C)	145	19,970

(Borman dan Ragland, 1998)

Tabel 2.3 *Ignition delay* dan waktu *burnout* untuk beberapa ukuran partikel

Typical ignition delay and total burn times for Douglas fir bark particles

Particle size (μm)	Moisture (%)	Ignition delay (ms)	Burnout time (ms)
36	10	0	30
300	10	5	540
300	28	30	570
612	10	20	655

(Borman dan Regland, 1998)

Sedangkan adalah koefisiean transfer massa yang ditentukan dari *Sherwood number*, yaitu :

$$Sh = \frac{\bar{h}_D d}{D_{AB}} \quad \text{.....} \quad (2.14)$$

Untuk permukaan partikel tanpa adanya oksigen, maka $Sh = 2$, sedangkan untuk *particle Reynolds number* mendekati 1, digunakan korelasi Ranz- Marshall sebagai berikut :

$$Sh = \left(2 + 0{,}6\, Re_d^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}\right)\emptyset \quad \text{.....(2.15)}$$

dengan Sc = *Schmidt number* = 0,73 (umumnya)

$\emptyset$ = faktor koreksi transfer massa yang tergantung pada laju pelepasan *moisture* dan *volatile matter* (0,6 – 1) = 0,9 (untuk arang).

2.2.10. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembakaran bahan bakar padat

Berikut beberapa faktor yang dapat mempengaruhi pembakaran bahan bakar padat (biobriket) yaitu : [illegible]

1. Jenis bahan bakar

   Setiap bahan bakar memiliki karateristik yang berbeda, perbedaan karateristik bahan bakar tersebut dari kandungan *moisture* dan kandungan *voltile metter*. Dimana bahan bakar semakin banyak memiliki kandungan *volatile metter* maka semakin cepat pula bahan bakar tersebut menyala dan terbakar.

2. Ukuran partikel

   Semakin kecil ukuran partikel maka semakin luas penampang permukaan bahan bakar tersebut maka semakin cepat pula bahan bakar tersebut terbakar.

3. Kecepatan aliaran udara

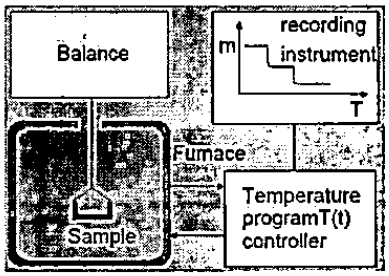
   Terus meningkatnya kecepatan udara akan menimbulkan tekanan aliaran dan jumlah oksigen yang meningkat, sehinggaa laju pembakaran bahan bakar akan naik yang bersamaam dengan naiknya temperatur.

4. Temperatur udara pembakaran

   Semakin tinggi temperatur udara dalam pembakaran mengakibatkan bahan bakar akan semakin cepat terbakar sehingga

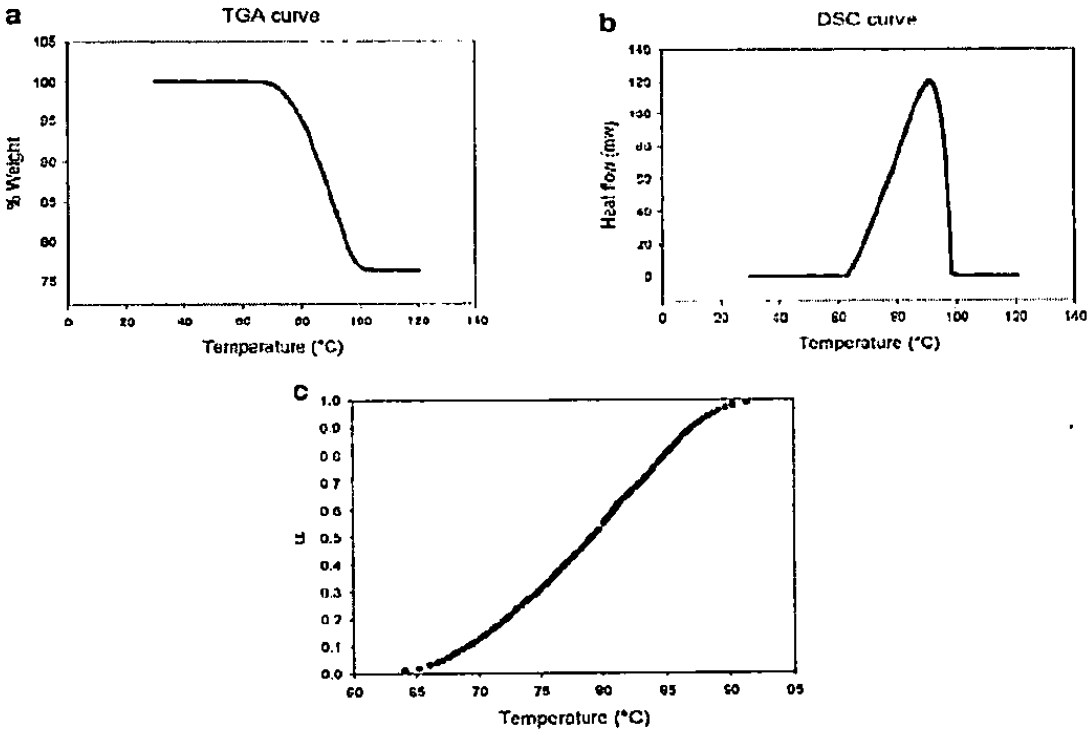
2.2.11. *Thermogravimetri Analysis* (TGA)

Merupakan suatu teknik untuk menganalisa perhitungan stabilitas termal suatu bahan dan fraksi komponen zat volatilnya dengan memonitor perubahan massa selama spesimen diberi perlakuan panas (Ahmad, 2010). Analisis *thermogravimetry* dilakukan dalam lingkungan atmosfer oksidatif (udara atau oksigen dan campuran gas *inert*). Sebuah instrumen yang mengukur penurunan massa pada *biofuel* di dalam sebuah *furnance* dengan *thermocontroller* disebut *thermobalance*, skema *thermobalance* dapat dilihat pada gambar berikut :



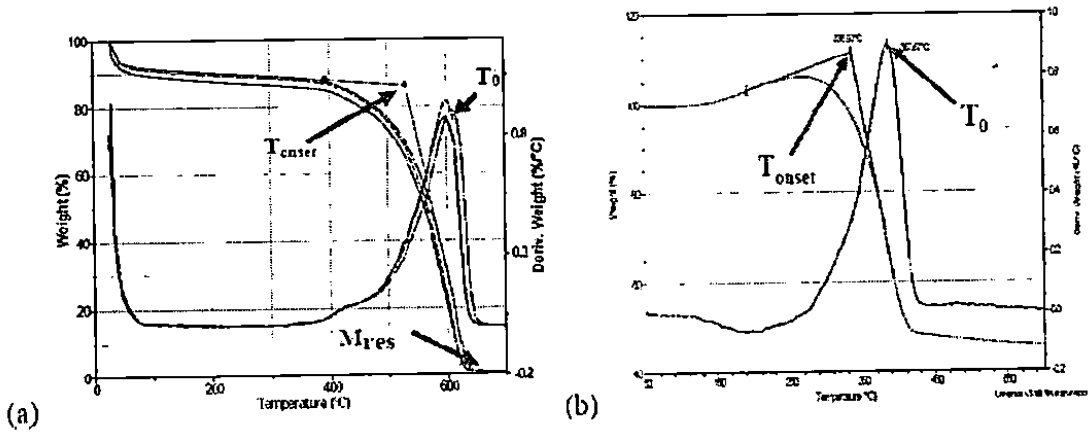
Gambar 2.6. Skema *thermobalance*

Grafik perubahan massa ditampilkan sebagai fungsi terhadap kenaikan temperatur seperti terlihat pada gambar berikut :



Gambar 2.7. Profil grafik pembakaran : (a) grafik penurunan massa, (b) grafik laju

Dari artikel *Practice Guide Section* TGA diperoleh penjelasan, temperatur akhir ditentukan hingga massa bahan stabil yang secara tidak langsung menunjukan bahwa reaksi sudah selesai secara keseluruhan (dalam hal pembakaran dapat diprediksi bahwa seluruh karbon telah terbakar). Pendekatan ini akan menghasilkan 2 informasi penting, kadar abu (M_{res}) yang ditunjukan oleh massa sisa dan temperatur oksidasi (T_O), seperti terlihat pada gambar berikut :

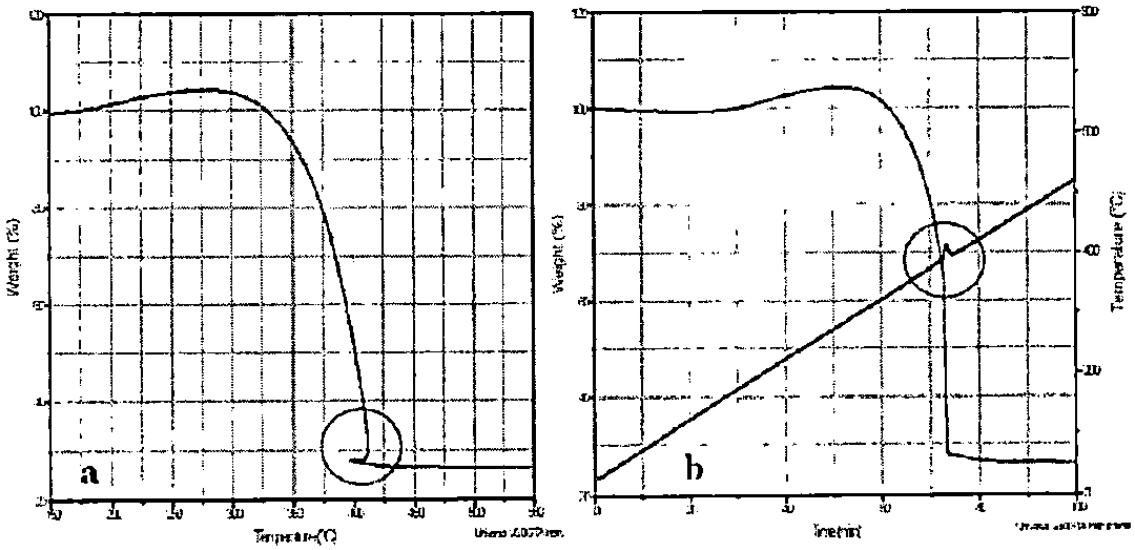


Gambar 2.8.(a) grafik TGA dan (b) keambiguan dalam penentuan T_{onset} (Practice Guide Section TGA)

Penentuan temperatur oksidasi dapat diperoleh dari beberapa cara, antara lain temperatur dimana laju pengarangan massa maksimal (dm/dT_{max}) dan temperatur ketika massa mulai berkurang (T_{onset}). Temperatur dimana laju pengurangan massa maksimal menunjukan bahwa pada temperatur tersebut oksidasi berlangsung secara maksimal sedangkan teperatur ketika massa mulai berkurang menunjukan bahwa pada temperatur tersebut proses oksidasi dimulai. Penggunaan definisi pertama $T_o = dm/dT_{max}$ lebih disukai dengan dua alasan. Alasan pertama berkaitan dengan permulaan penuruan massa yang bertahap (biasanya diatas temperatur 100 °C) membuat sulitnya menentukan T_{onset} secara tepat. Permulaan yang bertahap diyakini karena *nanotubes* terkontaminasi oleh *amorpous* karbon atau zat yang mengandung karbon yang teroksidasi pada temperatur yang lebih rendah dari bahan yang terdapat pada *nanotubes*. Pada kasus ini T_{onset} cenderung menampilkan sifat ketidakmurnian tersebut dari pada bahan yang terdapat pada *nanotubes*. Alasan kedua adalah pengurangan massa

oksidasi pada temperatur rendah, pada beberapa kasus hal ini menyebabkan kurva penurunan massa pada TGA berayun naik dan menyebabkan penentuan T_{onset} lebih sulit dan ambigu. Lain halnya dengan penentuan T_{onset} penentuan dm/dT_{max} lebih jelas, oleh sebab itu temperatur oksidasi didefinisikan $T_o = dm/dT_{max}$.

Kadang terdapat keanehan dalam pengamatan hasil TGA seperti terlihat pada gambar 2.9, dimana grefik massa tiba-tiba berbalik pada absis dan kemudian kembali lagi seperti yang biasanya. Prilaku tersebut sebenarnya akan dengan mudah dijelaskan jika grafik pengurangan massa dan temperatur diplotkan terhadap waktu. Pada grafik ini terlihat jelas bahwa meskipun mengalami penguarangan massa secara tajam pada saat bersamaan terjadi kenaikan temperatur 10 °C – 20 °C secara tiba-tiba dan kemudian turun lagi dan naik secara linear seperti biasanya. Hal tersebut menunjukan kemungkianan adanya pembakaran yang terjadi pada sampel, kemungkinan sampel terbakar dan melepaskan sejumlah besar kalor secara mendadak dan menyebabkan kenaikan temperatur secara tajam diikuti menghilangnya kalor dan turunya temperatur



Gambar 2.9. Keambiguan dalam TGA a) grafik yang berbalik pada absis

2.1.1. Energi aktivasi.

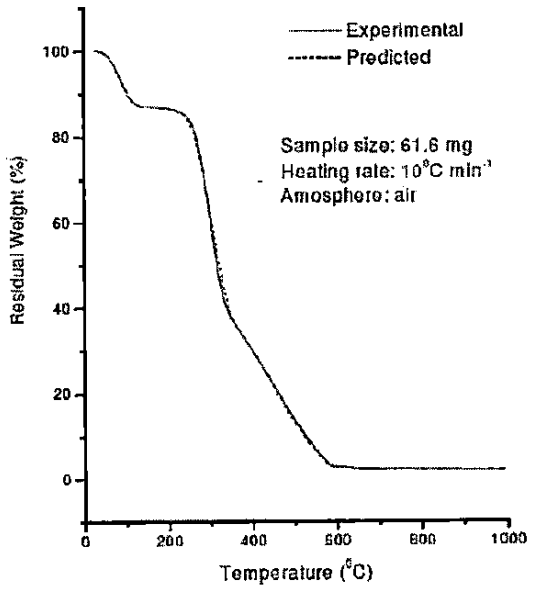
Othman et al., (2003) menyatakan bahwa energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan sehingga reaksi dapat terjadi. Energi aktivasi dibutuhkan untuk menggerakkan energi reaktan sehingga reaksi dapat dimulai. Energi aktivasi biasanya menghasilkan panas yang dilepaskan akibat proses reaksi. Svante Arrhenius (1859 – 1927) menyatakan bahwa hanya molekul yang memiliki energi lebih besar dari energi aktivasi yang akan bereaksi, dengan adanya energi yang tinggi ini maka molekul aktif dapat diproduksi.

Kalita et al., (2009) membandingkan hasil dengan menggunakan penelitian dan perhitungan untuk parameter kinetik dari bahan bakar biomassa densitas rendah. Perhitungan parameter kinetik dari data termogravimetri menggunakan persamaan Arrhenius berikut :

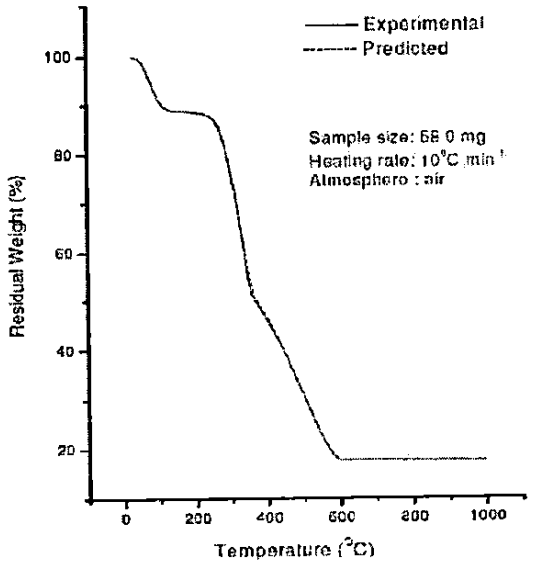
$$\frac{dX}{dt} = -A_e^{-(E/RT)} X^n \quad \text{.....(2.16)}$$

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

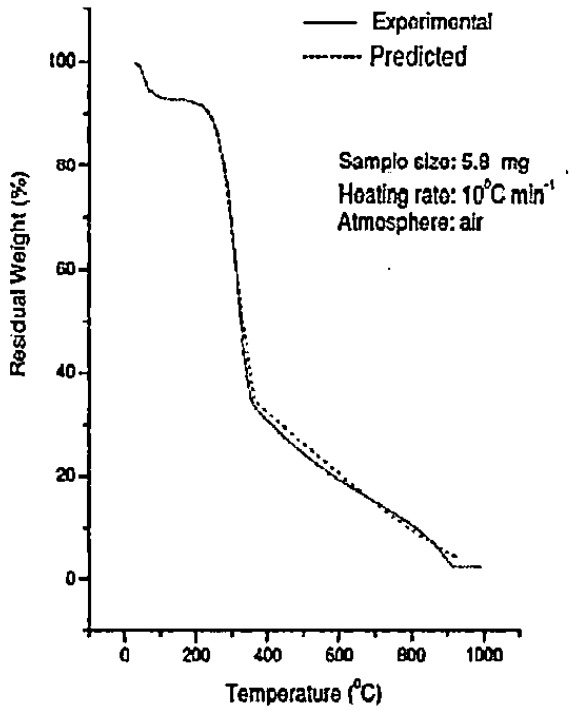
Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah metode perhitungan dengan *liner multiple regression method* adalah sangat akurat dan mempunyai tingkat presisi 10-2 jika dibandingkan dengan hasil penelitian. Hal ini dapat dilihat pada


Experimental
Predicted
Sample size: 61.6 mg
Heating rate: 10°C min⁻¹
Amosphere: air
Residual Weight (%)
Temperature (°C)
0
20
40
60
80
100
0
200
400
600
800
1000

(a)


Experimental
Predicted
Sample size: 58.0 mg
Heating rate: 10°C min⁻¹
Atmosphere : air
Residual Weight (%)
Temperature (°C)
20
40
60
80
100
0
200
400
600
800
1000

(b)



(c)

Gambar 2.10.Hasil prediksi dan eksperimen dari (a) serbuk gergaji, (b) sekam padi, dan (c) serbuk bambu (Kalita et al, 2009)

Seperti pada persamaan 2.16 diatas, perhitungan energi aktivasi pada proses pembakaran bahan bakar padat dapat dianalisa menggunakan persamaan Arrhenius berikut :

$$k = A^{-E/RT} \qquad (2.17)$$

$$In\,k = In\,A - \left(\frac{E}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right)$$

Dimana $y = m.x$

$$y = In\,k\;dan\;x = \frac{1}{T}$$

Sehingga :

$$y = \left(-\frac{E}{R}x\right) + C$$

Dengan mengeplotkan grafik antara ln k dengan 1/T dari data eksperimental, akan didapatkan harga energi aktivasi, dimana plot kemiringan (*slope*) *trendline* linier yang terbentuk adalah –Ea/R (Turns, S.R., 1996).