

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

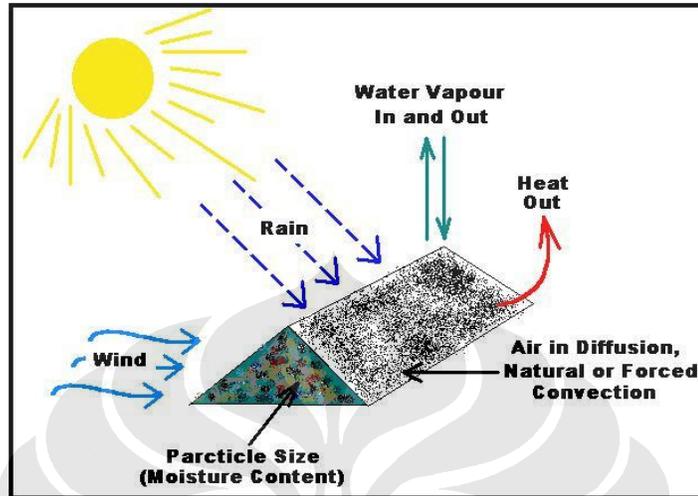
Pembakaran spontan batubara dapat terjadi pada hampir semua tipe batubara tergantung dari kondisi lingkungan dan karakteristik dari batubara itu sendiri. Kedua hal ini akan saling mempengaruhi kemungkinan terjadinya pembakaran spontan batubara. Karena itu bisa saja dua jenis batubara dengan karakteristik yang sama akan mengalami peristiwa pembakaran spontan pada saat yang berbeda karena kondisi lingkungan yang berbeda. Sebaliknya pada kondisi lingkungan yang sama, dua jenis batubara akan mengalami perbedaan dalam kemungkinan terjadinya pembakaran spontan karena mempunyai karakteristik yang berbeda.

II.1. FAKTOR PENYEBAB TERJADINYA PEMBAKARAN SPONTAN

Alasan sulitnya memahami mekanisme pembakaran spontan yaitu karena adanya banyak faktor internal dan eksternal yang mempengaruhi pembentukan dan perkembangan dari fenomena tersebut. Faktor-faktor tersebut menurut Kaymacki yaitu :

1. Faktor intrinsik yang berhubungan dengan karakteristik dari batubara antara lain : kandungan pyrite, kandungan uap air pada batubara, ukuran partikel dan luas permukaan batubara, kelas batubara dan kandungan petrografinya, kandungan kimia, dan senyawa mineral yang ada pada batubara (Volatile Matter (VM), Karbon (C), Hidrogen (H), Extinite (E), Inertinite (I) dan Mineral Matter (MM)).
2. Faktor ekstrinsik yang berhubungan dengan kondisi lingkungan sekitar batubara antara lain : temperatur ambien, kelembaban udara, tekanan Barometrik, konsentrasi oksigen, bakteri di lingkungan, kondisi penambangan, kecepatan aliran udara, dll.

Dari berbagai banyak faktor dalam proses terjadinya pembakaran spontan batubara, dapat ditentukan faktor utama yang umumnya terjadi pada suatu stockpile batubara, seperti yang ditunjukkan gambar 2.1.



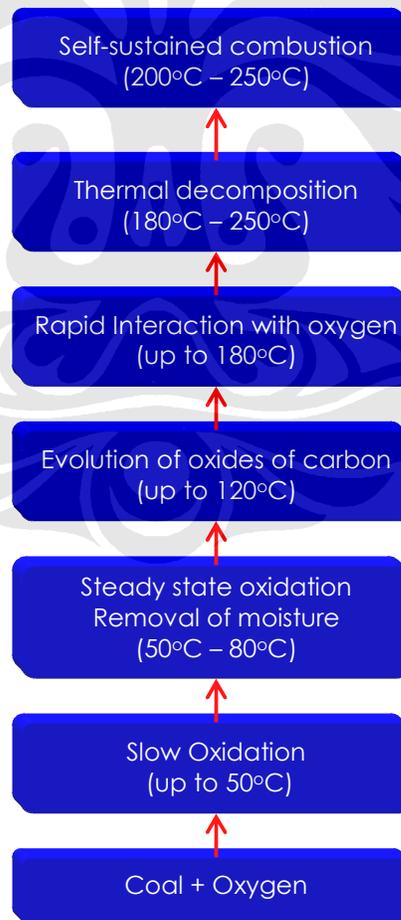
Gambar 2. 1 Diagram skematik stockpile batubara [Carras, J.N. et. Al, 1994]

Gambar 2.1 menunjukkan diagram skematik dari stockpile batubara dan ilustrasi beberapa faktor utama penyebab terjadinya pembakaran spontan. Udara yang mengalir dan masuk kedalam stockpile menyediakan oksigen untuk terjadinya reaksi oksidasi batubara. Panas yang dihasilkan dari reaksi oksidasi ini sebagian akan diserap atau dilepaskan dari stockpile tergantung dari kelembaban relatif (*relative humidity*) udara dan relative kesetimbangan dari batubara pada kandungan moisture tertentu.

Dapat dilihat pentingnya perubahan kandungan air dalam pembakaran spontan batubara. Peran kandungan air dikenal dengan *heat-of-wetting*, yang didefinisikan sebagai faktor yang dihasilkan akibat aksi secara fisik ketika air bersentuhan dengan batubara kering. Batubara kering bersifat endotermis yang menurunkan temperatur batubara. Dengan mengurangi kandungan uap air, batubara kering juga membuka daerah-daerah oksidasi pada batubara. Proses mendapatkan air merupakan proses eksotermis dengan melepas kalor dapat mempercepat pemanasan spontan batubara [Kim,1977].

II.2. MEKANISME PEMBAKARAN SPONTAN

Mekanisme terjadinya pembakaran spontan pada batubara diawali dengan terjadinya oksidasi lambat antara batubara dengan oksigen sampai dengan suhu 50°C. Selanjutnya akan terjadi proses pelepasan uap air pada batubara yang akan terjadi pada suhu 50-80°C. Setelah suhu diatas 80°C laju oksidasi batubara mulai berubah dari kondisi konstan hingga meningkatnya gradien kurva temperatur vs waktu yang menunjukkan semakin cepatnya reaksi antara oksigen dengan karbon pada batubara. Peningkatan tersebut terus berlanjut hingga suhu 180°C kemudian reaksi berlanjut hingga pelepasan *volatile matter* dari batubara tersebut dan dapat terjadi yang disebut *take off* dimana batubara telah dapat menyala dengan sempurna dimana terjadi laju kenaikan temperatur yang sangat tinggi. Untuk lebih jelas mengenai urutan mekanisme dari pembakaran spontan batubara dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Reaksi Laju Pemanasan Batubara

II.3. KELEMBABAN

Kelembaban adalah konsentrasi uap air di udara, kandungan uap air dapat berubah tergantung pada temperatur, tekanan dan iklim. Kandungan uap air dalam 1 kg udara biasa maksimum 20-30 g. Angka konsentrasi dapat ditunjukkan dalam kelembaban absolut, kelembaban spesifik dan kelembaban relatif.

Kelembaban absolut mendefinisikan massa dari uap air pada volume tertentu campuran udara atau gas, dan umumnya dilaporkan dalam gram per meter kubik (g/m^3). Persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$AH = \frac{m_w}{v_a} \dots\dots\dots (2.1)$$

Kelembaban spesifik adalah metode untuk mengukur jumlah uap air di udara dengan rasio terhadap uap air di udara kering. Kelembaban spesifik diekspresikan dalam rasio kilogram uap air, m_w , per kilogram udara, m_a . Rasio tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$SH = \frac{m_w}{m_a} \dots\dots\dots (2.2)$$

Pengaruh lingkungan biasanya dipengaruhi oleh kelembaban relatif. Kelembaban relatif digambarkan sebagai perbandingan dari tegangan sebagian uap air di dalam suatu campuran uap air dan udara berupa gas pada temperatur ditentukan. Itu adalah, suatu perbandingan berapa banyak energi telah digunakan untuk mengubah air dari cair menjadi uap. Kelembaban relatif ditunjukkan dengan persentase dan dihitung dengan cara:

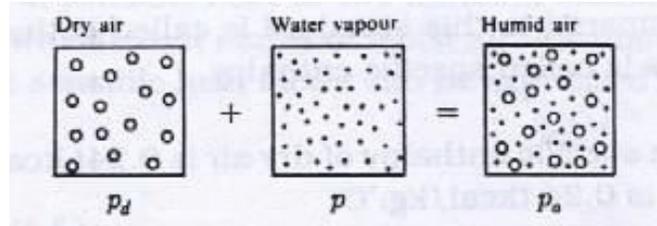
$$RH = \frac{P(H_2O)}{P^*(H_2O)} \times 100\% \dots\dots\dots (2.3)$$

$P(H_2O)$ = tekanan parsial uap air dalam campuran gas

$P^*(H_2O)$ = tekanan uap air saturasi pada temperatur tertentu dalam campuran gas

RH = kelembaban relatif

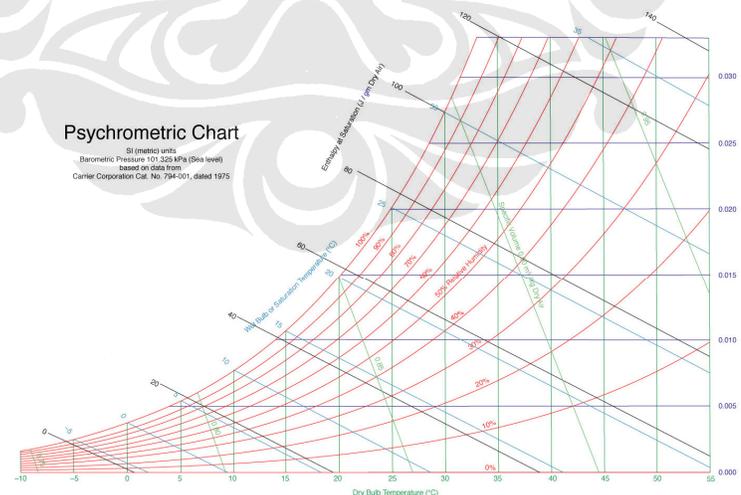
Tekanan parsial uap air merupakan penjumlahan tekanan dari udara kering dan tekanan uap air pada volume tertentu dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Campuran udara kering dan uap air

Dengan menambahkan uap air maka kelembaban akan naik, kenaikan tersebut tergantung dari banyaknya uap air dan tekanan udara pencampurnya.

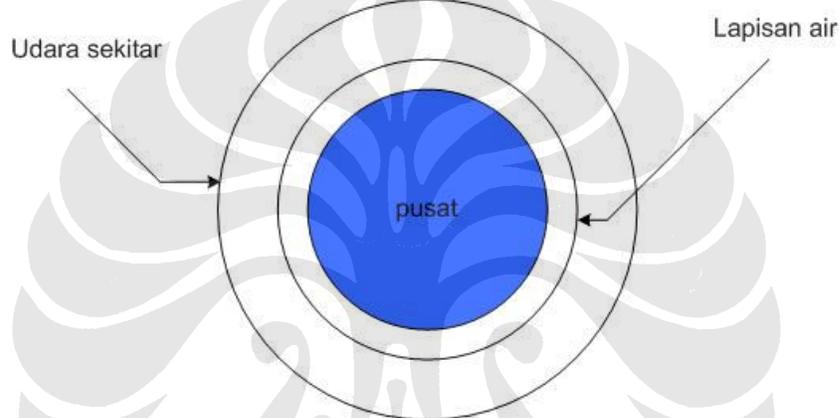
Untuk campuran udara-uap air dalam tekanan normal dan rentang temperatur udara atmosfer, temperatur penjumlahan-adiabatik dapat diperkirakan dengan baik melalui temperatur tabung-basah (T_{wb}). Temperatur tabung basah dapat dibaca dengan menggunakan termometer tabung-basah, yang merupakan termometer cairan-dalam-gelas yang ujung tabungnya diselimuti oleh sumbu yang dibasahi. Temperatur tabung-kering menunjukkan temperatur yang diukur oleh sebuah termometer yang ditempatkan di dalam campuran. Biasanya termometer tabung-kering dipasang berdampingan dengan termometer tabung-basah untuk membentuk sebuah alat yang disebut psikrometer. Hasil penghitungan dengan menggunakan kedua termometer tersebut dapat dimasukkan ke dalam diagram psikrometrik sehingga di dapatkan nilai kelembaban relatif.



Gambar 2. 4 Grafik Psikrometrik

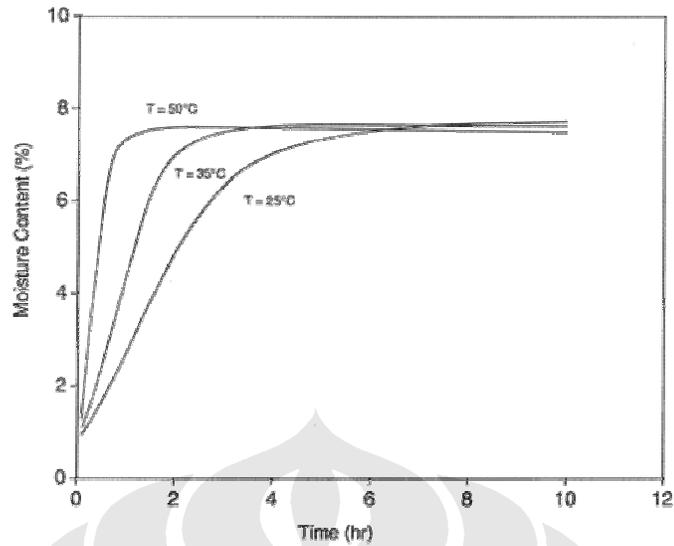
II.4. PENGARUH KELEMBABAN TERHADAP PEMBAKARAN SPONTAN

Pada batubara terdapat dua jenis air yaitu lapisan air (*chemically bound*) dan air bebas. Lapisan air mengaktifkan proses oksidasi, sedangkan air bebas menghambat oksidasi. Pada kandungan air dibawah kritikal lapisan air terbentuk, sedangkan air bebas menguap dari permukaan.(McCutcheon, Alan L and Wilson, Michael. A, 2002)

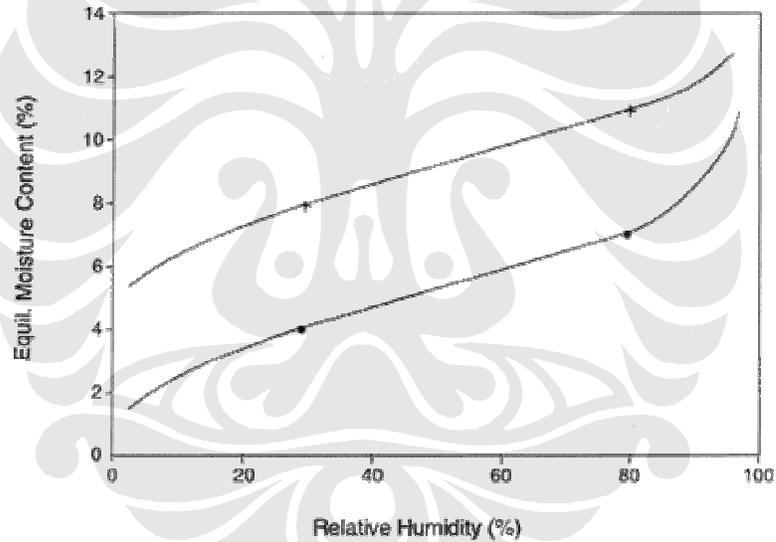


Gambar 2. 5 Lapisan air (Chemically bound)

Selain ke dua jenis air diatas, proses penyerapan dan pelepasan kandungan air pada batubara juga mempengaruhi pembakaran spontan. Kesetimbangan penyerapan dan pelepasan kandungan air dari batubara kering atau basah sangat dipengaruhi oleh temperatur dan kelembaban relatif (Monazam, Esmail R, 1998) bisa dilihat pada gambar2.6 dan 2.7.

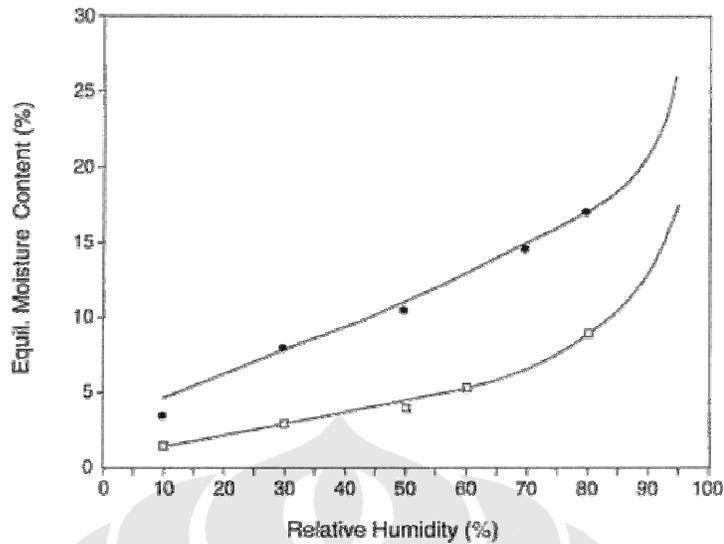


Gambar 2. 6 Pengaruh temperatur terhadap kesetimbangan kandungan air pada satu partikel batubara (Monazam, 1998)



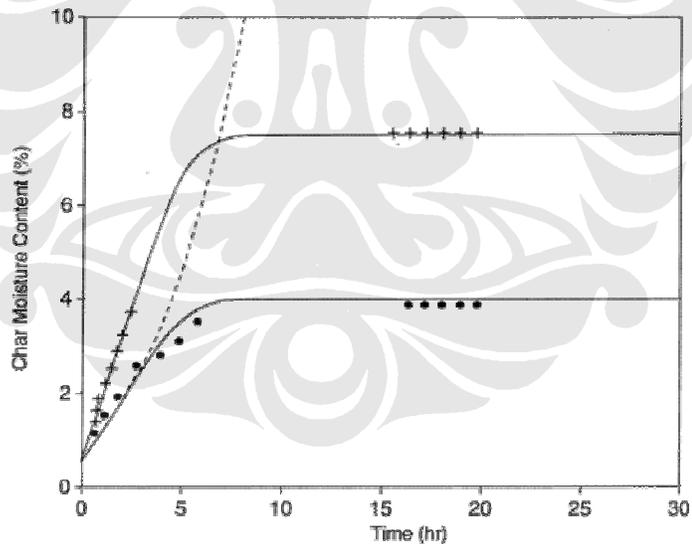
Gambar 2. 7 Pengaruh kelembaban relative terhadap kesetimbangan kandungan air (.) kering dan (+) basah pada 25°C (Monazam, 1998)

Gambar 2.6 dan 2.7 menunjukkan kondisi apabila batubara diberikan aliran udara dengan kelembaban tertentu maka akan terjadi proses penyerapan dan penguapan air sampai mencapai kesetimbangan kadar air pada batubara. Bertambah besarnya kelembaban maka bertambah tinggi kesetimbangan kandungan airnya ini telah dibuktikan oleh Glanville, Nordon and Bainbrige seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Hasil penelitian kesetimbangan kandungan air dengan variasi kelembaban (.) glanville; (o) Nordon dan Bainbrige pada 25°C (Monazam, 1998)

Sedangkan waktu untuk mencapai kesetimbangan kandungan air pada kelembaban yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.9.

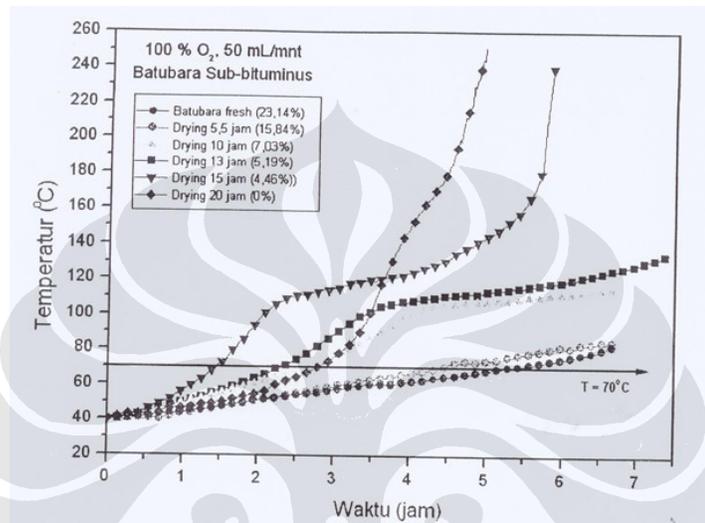


Gambar 2. 9 Kesetimbangan kandungan air pada parikel batubara wyoming dengan beda kelembaban; [.] 30 % dan [+] 80 % kelembaban(Monazam, 1998)

Efek kelembaban udara pada temperatur lingkungan mengindikasikan temperatur batubara naik dengan cepat pada waktu tertentu. Tergantung pada

kandungan air, kenaikan temperatur batubara akan stabil atau menaik dengan cepat sampai status menyala

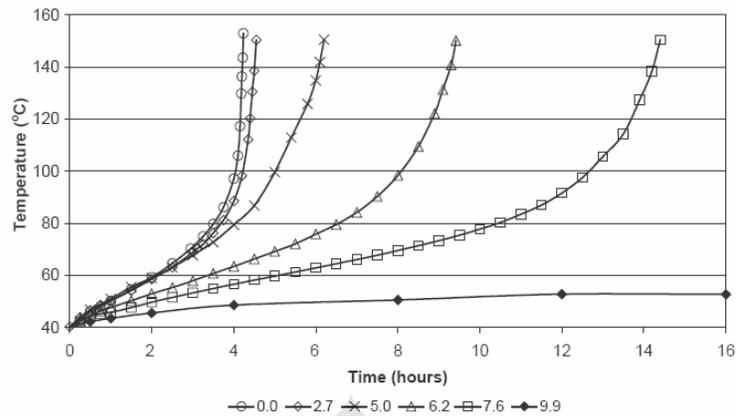
Penelitian sebelumnya yang dilakukan Nugroho & Muksin (2006) mengkaji pengaruh kandungan air batubara terhadap pembakaran spontan batubara, dengan hasil yang dapat dilihat pada gambar 2.4.



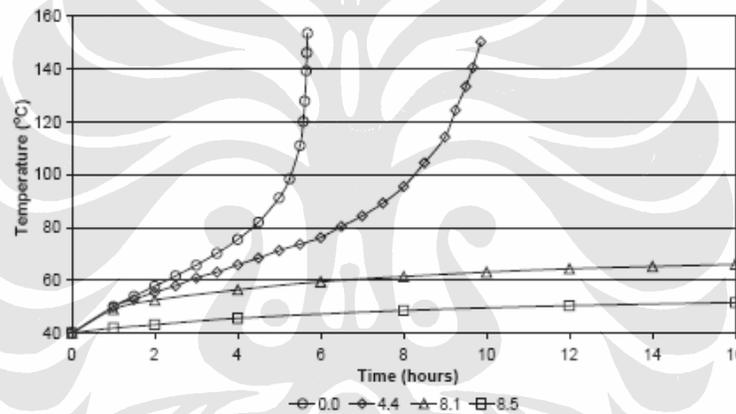
Gambar 2. 10_Grafik oksidasi sub-bituminus dengan kandungan air berbeda (Nugroho,Muksin,2006)

Dari gambar 2.5 menunjukkan bahwa kandungan air di batubara berpengaruh dalam laju kenaikan temperatur. Secara umum untuk batubara sub-bituminus yang diuji semakin rendah kandungan air maka semakin cepat laju kenaikan temperatur. Setelah mencapai suhu 100 °C (titik didih air) laju kenaikan temperatur pada batubara yang masih mengandung air akan mengalami perlambatan yang disebabkan oleh proses penguapan kandungan air dalam batubara. Hal ini akan memperlambat tercapainya titik percepatan kenaikan temperatur (160°C) pada batubara yang masih mengandung air. Dapat disimpulkan bahwa semakin rendah kandungan batubara sub-bituminus yang diuji maka semakin cepat pula tercapainya titik penyalan.(Nugroho&Muksin,2006)

Hal ini sejalan dengan hasil pengujian yang dilakukan oleh Beamish dan Hamilton yang ditunjukkan dalam gambar 2.6 dan gambar 2.7.

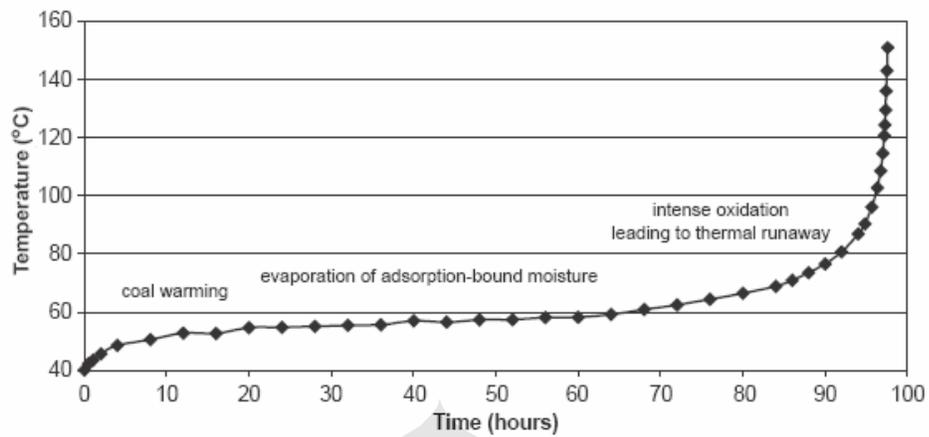


Gambar 2. 11 Grafik temperatur terhadap waktu dengan variasi kandungan air pada batubara BH9 (Boundary Hill-9), (Beamish,2005)



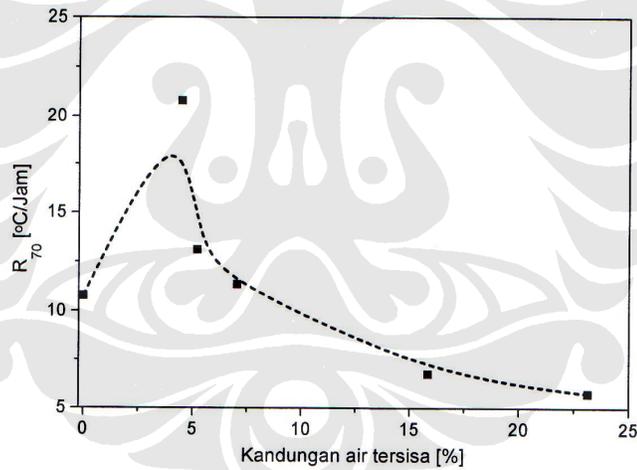
Gambar 2. 12 Grafik temperatur terhadap waktu dengan variasi kandungan air pada batubara BH1 (Boundary Hill-1), (Beamish,2005)

Dalam pengujian dengan menggunakan dua jenis batubara yang berbeda kapasitas kandungannya, yaitu BH1(17%) dan BH9(18,6%), terdapat hasil pengujian yang sama-sama menunjukkan terjadinya penurunan laju oksidasi seiring dengan bertambahnya kandungan air pada batubara. Batubara BH9 dengan kandungan air sebesar 9,9% akan mencapai suhu 150°C setelah 96,7 jam. Hasil ini ditunjukkan dalam gambar 2.13, yang juga menunjukkan tahapan dalam proses pemanasan mandiri batubara.

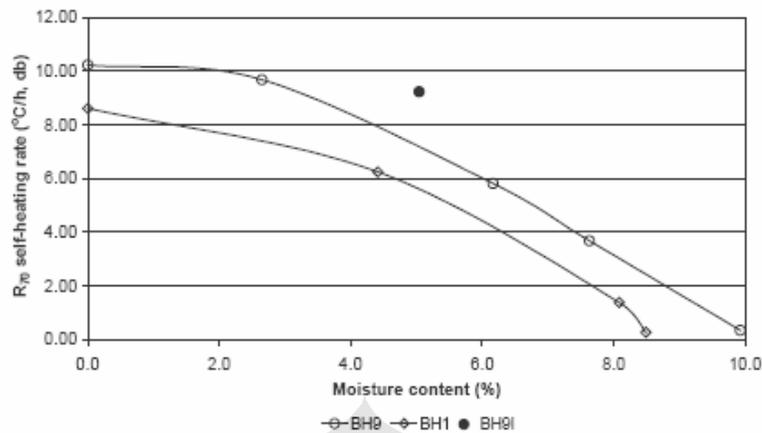


Gambar 2. 13 Kurva pemanasan mandiri untuk sampel BH9 dengan kandungan air 9,9% (Beamish,2005)

Pada gambar 2.14 dan 2.15 dapat dilihat pengaruh kandungan air terhadap nilai R_{70} untuk masing-masing pengujian.



Gambar 2. 14 Pengaruh persentase kandungan air terhadap R_{70} (Nugroho, Muksin, 2006)



Gambar 2. 15 Pengaruh persentasi kandungan air terhadap R_{70} (Beamish, 2005)

Dari kedua grafik pengaruh kandungan air terhadap R_{70} dapat dilihat bahwa terdapat tren penurunan nilai R_{70} seiring dengan penambahan kandungan air pada batubara. Akan tetapi pada hasil pengujian Nugroho dan Muksin (2006) laju oksidasi terjadi peningkatan nilai R_{70} pada kandungan air 4-7% sebelum akhirnya mengalami penurunan. Hal ini akan terus terjadi sampai akhirnya nilai R_{70} -nya mendekati nol. Keadaan ini diakibatkan karena panas yang dihasilkan dari proses oksidasi tidak cukup untuk melewati jumlah panas yang hilang akibat penguapan kandungan air batubara. Pada saat kandungan air batubara dikeringkan sampai sebesar 40-50% dari jumlah total kandungan air batubara, nilai pemanasan mandiri akan meningkat secara signifikan.

Setelah memperhatikan hasil yang didapatkan mengenai pengaruh kandungan air yang ada batubara terhadap pembakaran spontan, akan dilakukan hal sebaliknya yaitu akan coba diuji pengaruh kandungan air pada udara terhadap pembakaran spontan.

II.5. METODE PENGUJIAN PEMBAKARAN SPONTAN BATUBARA

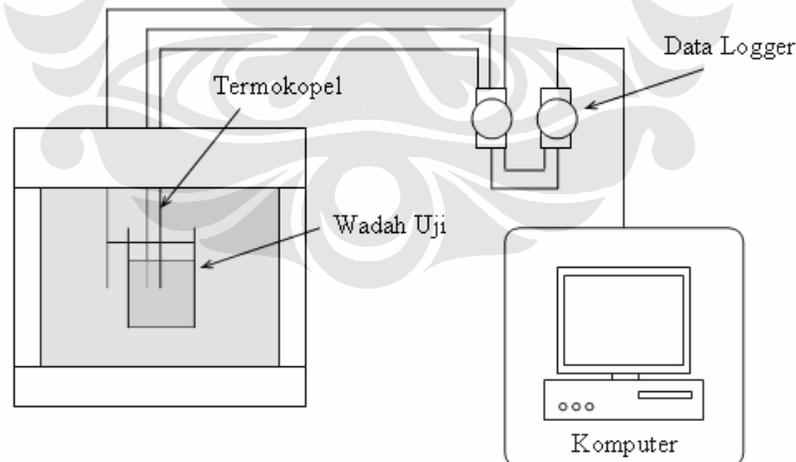
Pengujian untuk memahami potensi terjadinya pembakaran spontan batubara memiliki berbagai macam metode. Semua metode yang ada saat ini memiliki tujuan yang sama yaitu untuk mengetahui karakteristik dari pembakaran spontan yang terjadi. Beberapa metode pengujian yang ada saat ini adalah :

1. Metode *Crossing Point*

Pada dasarnya metode *crossing point* adalah meletakkan sampel dalam sebuah wadah kubus dan menempatkan beberapa termokopel dengan variasi posisi pada sampel. Jumlah termokopel dapat bervariasi dalam tiap pengujian, satu termokopel pada bagian tengah sampel merupakan keharusan. Setiap sampel batubara yang diuji dipanaskan pada temperatur oven yang konstan sampai temperatur di bagian tengah sampel menjadi lebih tinggi dari temperatur lokal sampel dan temperatur oven.

Besar temperatur *crossing point*, didefinisikan sebagai temperatur pada saat suhu di bagian tengah sampel besarnya sama dengan temperatur lokal dari sampel dengan jarak tertentu dari titik tengah sampel. Pengujian selesai apabila telah diketahui karakter dari grafik temperatur vs waktu apakah terjadi pembakaran spontan atau tidak pada sampel yang diuji.

Pengujian tersebut dilakukan beberapa kali dengan menggunakan wadah uji yang sama namun dengan temperatur oven yang bervariasi.



Gambar 2. 16 Skema alat uji metode *Crossing Point*

2. *Basket Methods*

Metode ini dikembangkan oleh Bowes dan Cameron dengan dasar teori Frank-Kamenetskii. Dalam metode ini sebuah wadah dengan ukuran dan bentuk tertentu diisi dengan sample batubara yang telah dipersiapkan diletakan dalam sebuah oven yang temperaturnya dapat meningkat hingga sebuah titik tertentu. Sebuah termokopel yang diletakan dalam batubara mengindikasikan apakah pembakaran terjadi. Jika tidak terbakar maka eksperimen tersebut diulang dengan menaikkan temperatur oven lebih tinggi.

Keseluruhan prosedur ini kemudian diulang dengan memvariasikan ukuran wadah namun memiliki bentuk yang serupa. Hasil dari eksperimen ini akan memperlihatkan nilai temperatur kritis sebagai fungsi dari ukuran wadah.

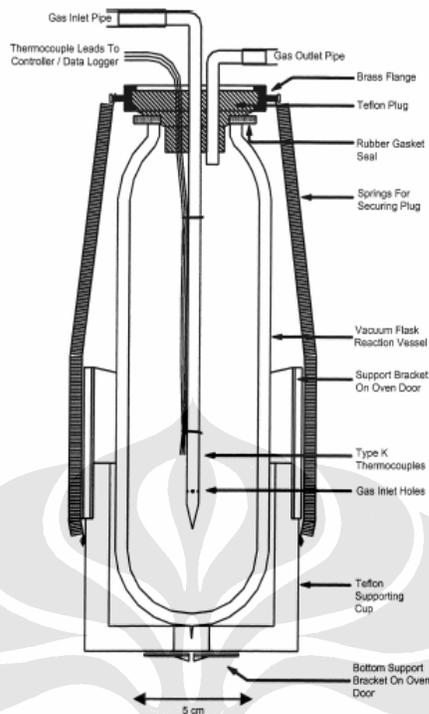
Pada dasarnya metode basket dengan metode crossing point adalah sama, perbedaanya cara pengaturan temperatur oven nya, pada metode crossing point temperatur oven diatur pada suatu nilai tetap. Sedangkan metode basket nilai temperatur ovennya dengan menaikkan temperatur konstan hingga sample tersebut menyala [Kusumah,2006]

3. *Metode Static Isothermal*

Metode ini disebut juga sebagai metode absorpsi oksigen, dimana kecenderungan suatu batubara terhadap pemanasan mandiri dapat diketahui dari laju konsumsi oksigen ataupun dari laju peningkatan panas pada temperatur konstan.

4. *Adiabatic Calorimetry*

Prinsip dasarnya adalah mengoksidasi batubara pada temperatur rendah untuk mencari sebuah nilai panas yang disebut R_{70} dimana didefinisikan sebagai kenaikan temperatur akibat pemanasan mandiri dari 40°C – 70°C berbanding waktu yang dibutuhkan untuk meningkatkan temperatur tersebut.



Gambar 2. 17. Skema reaktor metode *Adiabatic Calorimetry* [Beamish, B.B. 2000]

Dari berbagai metode yang telah dibahas diatas, pada dasarnya perilaku pemanasan mandiri merupakan suatu hal yang sangat sulit untuk diprediksi karena sangat bergantung pada berbagai faktor, sehingga tidak ada sebuah metode pengukuran untuk karakteristik sebuah batubara dimana hasilnya dapat digunakan langsung untuk memprediksi karakteristik dari pembakaran spontan batubara.

Ketika sebuah metode digunakan pada satu jenis batubara, maka dapat dihasilkan sebuah tingkatan relatif dari kecenderungan batubara terhadap pemanasan mandiri walaupun dengan berbagai batasan [Carras, 1994]. Kebutuhan akan sebuah pengujian yang relatif cepat dan terjangkau telah menghasilkan beberapa pendekatan. Terkait dengan aktivitas ini telah ada beberapa usaha untuk membuat usaha pengujian seperti tersebut di atas secara komersial.

Pada saat ini hanya satu peralatan pengujian yang ada di pasaran dan itu menggunakan metode kalorimeter adiabatik [Carras, J. N., and Young, B. C, 1994]. Data hasil pengujian tersebut tetap merupakan interpretasi dari peneliti terhadap memprediksikan pemanasan mandiri dari batubara.

II.6. KECENDERUNGAN PEMBAKARAN SPONTAN

Pengujian menggunakan metode adiabatik ini dilakukan untuk mengetahui beberapa nilai yang dapat dibandingkan untuk melihat karakteristik pembakaran spontan batubara, yaitu nilai pemanasan mandiri antara 40°C sampai dengan 70°C (R_{70}); energi aktivasi, dimana nilai energi aktivasi yang semakin besar menunjukkan semakin reaktif batubara tersebut, dan nilai faktor eksponensial yang menunjukkan laju peningkatan panas batubara.

Nilai R_{70} dapat menggambarkan kecenderungan batubara terhadap pemanasan mandiri, batubara dengan nilai R_{70} dibawah 0.5 °C/h dikategorikan sebagai resiko rendah, 0.5 – 0.8 °C/h resiko sedang, 0.8 °C/h dikategorikan beresiko tinggi [Beamish, B. B, 2000]. Namun nilai R_{70} ini bukan merupakan suatu tetapan baku untuk menunjukkan karakteristik pembakaran batubara namun nilai R_{70} ini hanya menunjukkan laju pemanasan untuk suatu batubara spesifik, namun selain nilai R_{70} sebuah nilai yang dapat dibandingkan adalah nilai kereaktifan dari batubara yang disebut energi aktivasi

II.7. THERMAL IGNITION THEORY

Konsep dasar terjadinya suatu *ignition* (pemantikan) dalam suatu sistem yang mengalami pemanasan mandiri menurut van't Hoff pada tahun 1884 (Griffith, J.F. dan Barnard, J.A., 1995) yaitu reaksi pemicu untuk pemantikan dapat timbul dari pemanasan mandiri yang dihasilkan suatu reaksi eksotermis karena laju reaksi kimia meningkat pesat seiring peningkatan temperatur. Karena itu, kriteria untuk terjadinya pemantikan harus dihubungkan dengan laju pembentukan kalor atau kehilangan kalor dalam volume tertentu suatu sistem reaksi. Suatu distribusi temperatur stabil dapat dipertahankan jika laju pembentukan kalor tetap seimbang dengan laju kehilangan kalor akibat konduksi, konveksi, dan radiasi. Akan tetapi, jika kalor yang dihasilkan tidak dapat dikeluarkan dalam jumlah yang sebanding maka kondisi pemantikan akan terjadi.

Persamaan untuk laju pembentukan kalor per unit volume (q_+) dapat ditulis sebagai berikut :

$$q_+ = \rho Q c_o A \exp(-Ea / RT) \dots\dots\dots(2.4)$$

- Dimana
- ρ = densitas reaktan (kg.m^{-3}),
 - c_o = konsentrasi reaktan,
 - Q = panas yang dihasilkan (J.kg^{-1}),
 - Ea = energi aktivasi reaksi (J.mol^{-1}),
 - R = konstanta gas universal = $8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Untuk partikel dengan ukuran kecil, selama perbedaan temperaturnya ($T - Ta$) tidak terlalu besar, laju kehilangan kalor q_- per unit volume dapat ditulis sebagai berikut :

$$q_- = \frac{hS}{V}(T - Ta) \dots\dots\dots(2.5)$$

- Dimana
- h = koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$),
 - S = luas permukaan reaktor (m^2),
 - V = volume (m^3),
 - Ta = temperatur reaktor (K).

Kedua persamaan diatas dapat dimasukkan dalam persamaan kesetimbangan kalor untuk suatu sistem reaksi sebagai berikut (pendekatan Semenov) :

$$[Laju akumulasi kalor] = [Laju Pembentukan kalor] - [Laju Kehilangan Kalor]$$

$$= (q_+) - (q_-)$$

Sehingga didapatkan persamaan :

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} = \rho Q c_o A \exp(-Ea / RT) - \frac{hS}{V}(T - Ta) \dots\dots\dots(2.6)$$

c_p = kapasitas kalor spesifik ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Plot pembentukkan kalor dan kehilangan kalor terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 2.12.