

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. ANALISIS KARAKTERISTIK SAMPEL

Salah satu sampel yang digunakan pada eksperimen ini adalah batubara jenis sub bituminus yang berasal dari Kalimantan. Analisis proksimasi maupun ultimasi telah dilakukan oleh pihak luar dan diketahui hasilnya seperti tertera pada tabel dibawah ini:

**Tabel 4.1** Tabel uji proksimasi dan ultimasi batubara sub-bituminus

PROXIMATE ANALYSIS	AS RECEIVED	ADB	DRY	DAF	STD. METHOD
% MOISTURE	21.42	21.26	-	-	ASTM D-3173
% ASH	2.85	2.86	3.57	-	ASTM D-3174
% VOLATILE MATTER	34.89	34.96	44.44	46.07	ASTM D-3175
% FIXED CARBON	40.84	40.92	51.97	53.93	By Difference

ULTIMATE ANALYSIS	AS RECEIVED	ADB	DRY	DAF	STD. METHOD
% CARBON	54.7	54.81	69.61	72.23	ASTM D-5373
%HYDROGEN	3.82	3.83	4.86	5.05	ASTM D-5373
% NITROGEN	0.77	0.77	0.98	1.01	ASTM D-5373
% TOTAL SULFUR	1.35	1.35	1.71	1.78	ASTM D-4239
% OXYGEN	15.09	15.12	19.2	19.93	By Difference

(Sumber : BPPT)

Jika dilihat dari kandungan air, batubara jenis sub bituminus memiliki kadar kandungan air yang cukup tinggi. Hal ini menyebabkan proses pemanasan batubara pada zona *steady state oxidation* berlangsung cukup lama. Hal ini dikarenakan panas yang dihasilkan lebih banyak terpakai untuk menguapkan kandungan air yang terkandung dalam batubara. Sedangkan nilai *volatile matter* tergolong cukup tinggi, yakni 34,89 %, hal ini menunjukkan kereaktifan batubara tersebut tergolong tinggi.

Data hasil uji proksimasi dan ultimasi untuk ketiga jenis batubara bituminus dapat dilihat pada tabel 4.2 dibawah ini.

**Tabel 4.2.** Tabel uji proksimasi dan ultimasi batubara bituminus.

Parameter Kualitas Batubara	Bituminus 1	Bituminus 2	Bituminus 3

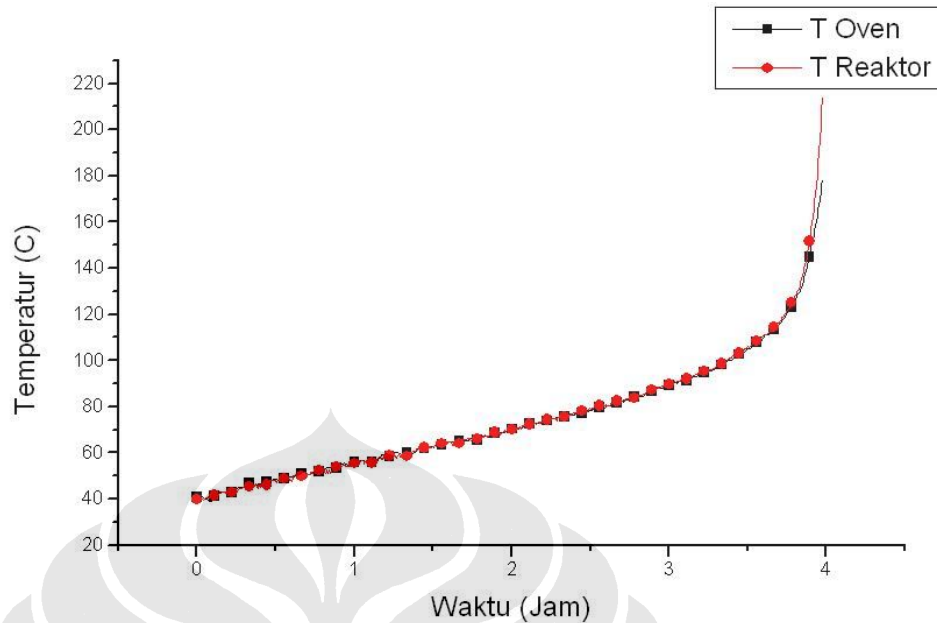
<i>Total Moisture</i> (%Ar)	20appx	17appx	12appx
<i>Inherent Moisture</i> (%Ar)	11	9.5	6.5
<i>Ash Content</i> (%ADB)	<7	<7	<7
<i>Volatile Matter</i> (%ADB)	40	39	38
<i>Fixed Carbon</i> (%ADB)	42.4	44.8	48.8
<i>Gross Calorific Value</i> (%ADB)	6300±50	6650±50	7000±50
<i>Sulphur</i> (%)	0.5 max	0.7 max	0.7 max
HGI	50 appx	50 appx	50 appx

Sumber : PT. BA Tarahan Unit Port

Dari tabel diatas terlihat bahwa batubara yang memiliki nilai kalor lebih tinggi mengandung kandungan air yang lebih banyak, baik kandungan air total maupun kandungan air bawaan. Nilai kandungan zat terbang pun sangat tinggi, yakni sekitar 38 % - 40 %. Hal ini menyebabkan kereaktifan batubara ketiga jenis ini sangat tinggi. Hal ini dapat terlihat dari hasil pengujian dengan metode adiabatik dimana kereaktifan batubara pada bituminus 1 lebih tinggi dari batubara sub bituminus pada suhu dimana kandungan zat terbang memiliki peranan yang signifikan pada tingkat laju pemanasan mandiri.

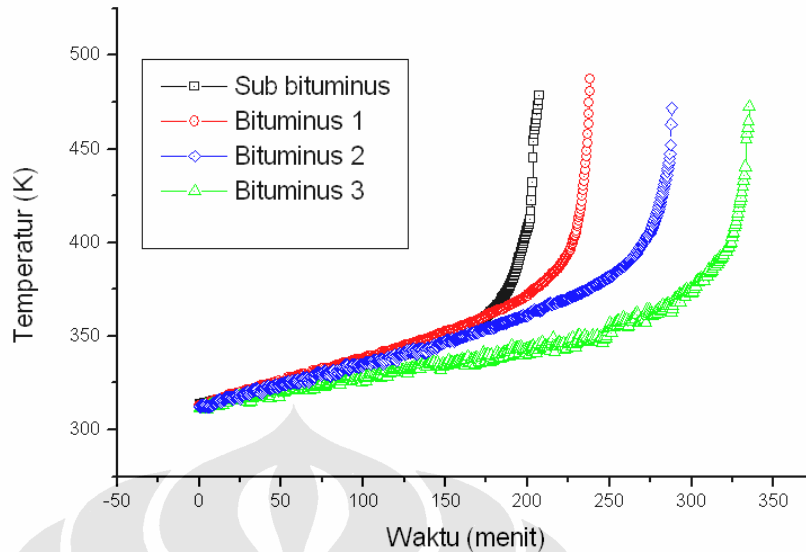
#### 4.2. ANALISIS HASIL OKSIDASI ADIABATIK

Pada eksperimen ini reaksi oksidasi adiabatik diterapkan pada sampel sehingga temperatur sampel sebagai sistem haruslah sama dengan temperatur lingkungan, yaitu oven. Grafik dibawah ini adalah contoh perbandingan temperatur oven dengan sampel jenis bituminus 1 dengan gas Oksigen murni. Pada grafik ditunjukkan bahwa temperatur reaktor dan oven relatif sama yang menunjukkan bahwa eksperimen yang dilakukan adalah adiabatik.



**Gambar 4.1.** Kurva temperatur reaktor terhadap oven pada pengujian batubara bituminus 1

Sesuai dengan grafik diatas dapat diperhatikan bahwa pada temperatur 40 – 130 °C baik sampel maupun oven relatif memiliki temperatur yang sama sehingga ketika sampel mencapai temperatur 140 °C oven mengalami kesulitan mengejar temperatur sampel sampai akhirnya tertinggal  $\pm 5$  °C. Akan tetapi pengujian masih dapat dikatakan berlangsung secara adiabatik selama temperatur oven tidak tertinggal jauh dari temperatur sampel pengujian. Pengujian diselesaikan apabila temperatur oven dirasakan terlalu jauh tertinggal oleh temperatur sampel, yang biasanya terjadi pada saat proses pelepasan *volatile matter* dan *take off* (diatas suhu 180 °C).



**Gambar 4.2.** Grafik temperatur terhadap waktu pada pengujian secara adiabatik

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa batubara jenis sub bituminus lebih cepat teroksidasi dibandingkan jenis batubara bituminus. Salah satu penyebabnya adalah kandungan air yang lebih banyak dibandingkan dengan ketiga jenis bituminus. Dalam keadaan 100 % kering, batubara yang memiliki kandungan air lebih banyak akan memiliki laju oksidasi yang lebih cepat [Hengky, 2005]. Hal ini disebabkan, dalam kondisi kering batubara jenis sub bituminus memiliki luas area permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan batubara bituminus. Oleh karena itu, proses oksidasi lebih cepat terjadi.

Salah satu parameter yang dapat digunakan untuk membandingkan karakteristik pembakaran spontan adalah  $R_{70}$ , yakni nilai pemanasan mandiri antara  $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nilai  $R_{70}$  dapat menggambarkan kecenderungan batubara terhadap pemanasan mandiri, batubara dengan nilai  $R_{70}$  dibawah  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dikategorikan sebagai resiko rendah  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C} - 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  resiko sedang, dan  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  keatas dikatehorikan berisiko tinggi [Beamish, B. B, 2000]. Dari hasil pengujian didapat nilai  $R_{70}$  batubara sub bituminus adalah  $13,3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ , sementara batubara bituminus 1,2, dan 3 masing-masing sebesar  $15,06\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ,  $12,76\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ , dan  $8,93\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ , sementara batubara bituminus 1 sebesar  $15,06\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ . Hasil ini memperlihatkan tingkat oksidasi antara  $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  pada batubara bituminus 1 lebih tinggi. Namun nilai  $R_{70}$  ini bukan merupakan suatu tetapan baku untuk

menunjukkan karakteristik pembakaran spontan batubara karena hanya menunjukkan laju pemanasan untuk suatu batubara spesifik. Beberapa parameter lain dapat digunakan untuk mengetahui tingkat laju pemanasan mandiri.

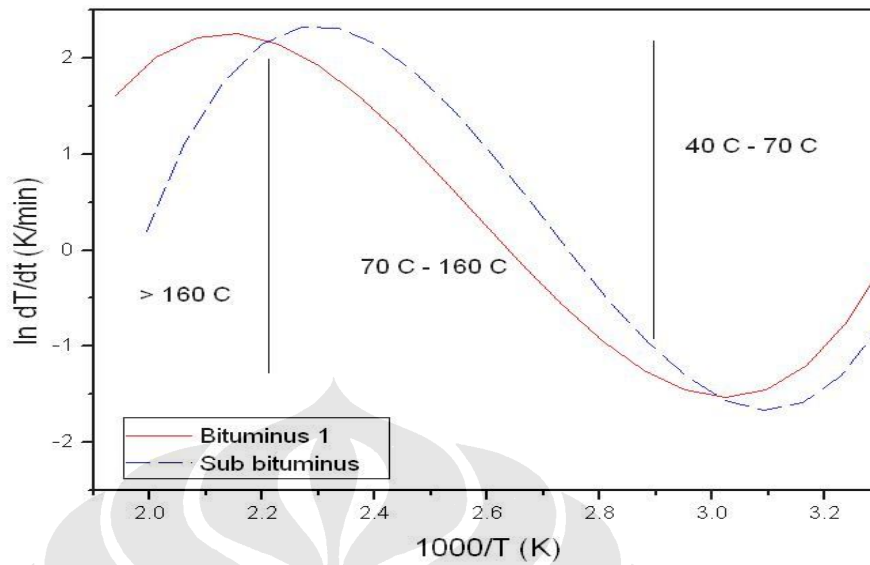
### **4.3. ANALISIS KEREAKTIFAN BATUBARA**

#### **4.3.1. Karakteristik Kereaktifan Batubara**

Menentukan tingkat kereaktifan batubara merupakan suatu hal yang sangat rumit untuk dilakukan karena banyaknya faktor yang berperan. Berdasarkan pada uji proksimasi dan ultimasi pada batubara diketahui bahwa ketiga jenis batubara bituminus memiliki rata-rata nilai kandungan zat terbang sebesar 40 %, lebih besar dibandingkan dengan jenis sub bituminus yang memiliki kandungan zat terbang sebesar 34,89 %. Kandungan zat terbang (*volatile matter*) sendiri merupakan kandungan senyawa organik yang dibebaskan batubara pada suhu tertentu. Tingkat kandungan zat terbang yang lebih tinggi menunjukkan batubara tersebut lebih reaktif. Biasanya pelepasan *volatile matter* sendiri terjadi pada suhu tinggi (*take off*) yang berkisar 180 °C keatas.

Nilai  $R_{70}$  juga dapat memperlihatkan tingkat kereaktifan batubara pada suhu rendah, yakni 40 °C- 70°C. Seperti yang telah dijelaskan diatas, nilai  $R_{70}$  batubara sub bituminus adalah 13,3 °C/h, sementara batubara bituminus 1 sebesar 15,06 °C/h. Hasil ini memperlihatkan tingkat oksidasi antara suhu 40 °C- 70 °C pada batubara bituminus 1 lebih tinggi.

Kandungan mineral pada batubara juga bisa menentukan tingkat kereaktifan batubara tersebut. Beamish B. B, et al [12] telah menguji efek kandungan mineral terhadap laju pemanasan mandiri pada batubara. Hasilnya didapat bahwa batubara yang memiliki kandungan mineral yang lebih besar memiliki tingkat kereaktifan yang lebih rendah.



**Gambar 4.3.** Grafik plot  $\ln(dT/dt)$  versus  $1000/T$  dengan fungsi polinomial orde 3 pada batubara sub bituminus dan bituminus

Grafik diatas merupakan plot  $\ln(dT/dt)$  versus  $1000/T$  dengan fungsi polinomial orde 3 pada batubara sub bituminus dan bituminous 1. Kurva yang berada diatas menunjukkan tingkat kereaktifan batubara tersebut lebih tinggi. Pada suhu-suhu rendah, batubara jenis bituminus 1 lebih reaktif dibandingkan dengan batubara sub bituminus. Hal ini juga terbukti dari nilai  $R_{70}$  yang lebih besar pada batubara sub bituminus.

Namun, pada suhu diatas  $70^{\circ}\text{C} - 160^{\circ}\text{C}$ , kereaktifan batubara sub bituminus terlihat lebih besar. Hal ini dimungkinkan karena kandungan zat-zat mineral pada batubara bituminus 1 lebih besar dibandingkan dengan batubara sub bituminous. Kandungan mineral pada batubara dapat memperlambat laju oksidasi pada batubara, inilah yang menyebabkan proses oksidasi pada batubara bituminus 1 berjalan lambat.

Kereaktifan batubara bituminus 1 kembali lebih besar dari sub bituminous pada suhu diatas  $160^{\circ}\text{C}$ . Hal ini terjadi karena kandungan zat terbang pada batubara bituminus 1 lebih besar dari jenis sub bituminus. Pada suhu tersebut, kandungan zat terbang pada batubara mulai menguap dan terlepas sehingga batubara yang memiliki lebih besar kandungan zat terbangnya akan menyebabkan kereaktifannya meningkat.

### 4.3.2. Parameter Kinetik Oksidasi

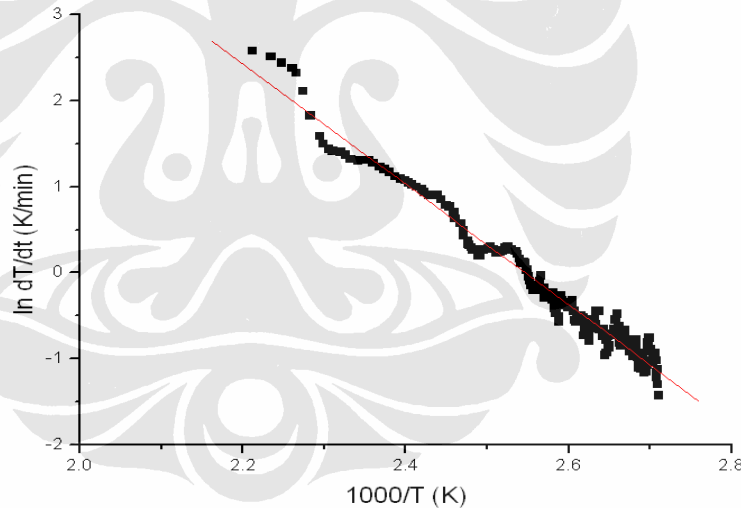
Kesetimbangan energi dalam kondisi *un-steady* untuk pori-pori benda padat (*solid*) yang reaktif dengan tidak memperhitungkan deplesi reaktan dan evaporasi adalah sebagai berikut :

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \rho Q A \exp \left( - \frac{E_a}{RT} \right) \dots \dots \dots (4.1)$$

Persamaan tersebut kemudian diturunkan sehingga didapatkan persamaan baru:

$$\ln \left( \frac{dT}{dt} \right) = \ln \left( \frac{QA}{C_p} \right) + \left( - \frac{E_a}{RT} \right) \dots \dots \dots (4.2)$$

Nilai parameter kinetik batubara dapat diperoleh melalui pengolahan data termal, dimana parameter yang dicari yaitu energi aktivasi ( $E_a$ ) dan pre-eksponensial faktor ( $QA$ ) dihitung dengan menggunakan bantuan plot,  $\ln dT/dt$  vs  $1000/T$ .



**Gambar 4.4.** Plot  $\ln(dT/dt)$  versus  $1000/T$  pada batubara bituminus 2. Nilai energi aktivasi didapat dari kemiringan garis tersebut.

Dari hasil plot ini dapat dilakukan analisis pendekatan persamaan garis lurus sehingga didapat persamaan dengan bentuk  $y = A + B.x$ , sehingga dapat dianalogikan:

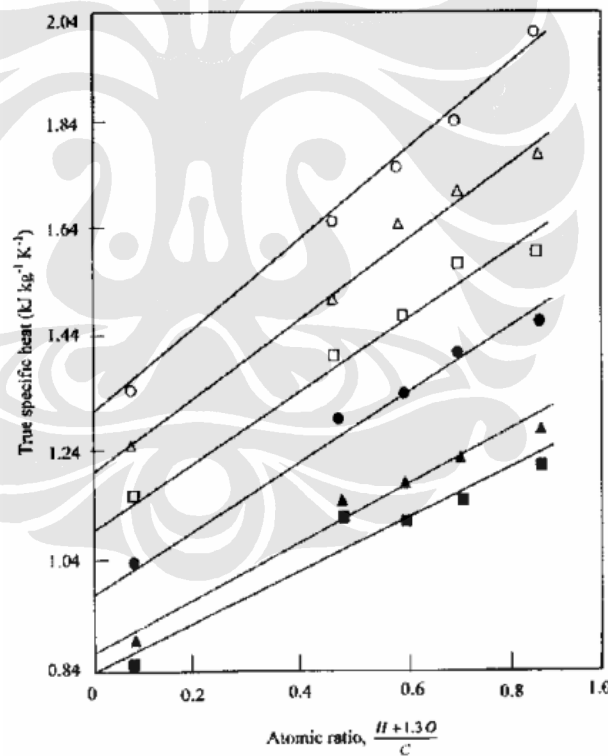
$$\ln \left( \frac{dT}{dt} \right) = \ln \left( \frac{QA}{C_p} \right) + \left( - \frac{E_a}{RT} \right) \frac{1000}{T} \dots \dots \dots (4.3)$$

$$Y = A + B * X \dots \dots \dots (4.4)$$

Dengan demikian nilai Ea dapat diketahui. Dari hasil pengujian didapat nilai Ea untuk batubara bituminus 2 adalah  $58 \pm 1$  kJ/mol. Data lain yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai parameter kinetik batubara adalah nilai kalor spesifik (Cp) dari batubara yang digunakan dalam eksperimen. Nilai kalor spesifik ini dapat ditentukan dari kandungan Karbon, Hidrogen, dan Oksigen dari batubara menurut hasil analisis ultimasi berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Melchior. Nilai kalor spesifik ini dapat dihitung dengan bantuan grafik Cp vs rasio atom [Melchior dalam Nugroho, 2000].

Nilai dari rasio atom batubara dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Rasio atom} = \frac{H + 1,30}{C} \dots \dots \dots (4.5)$$



Gambar 4.5. Grafik atomic ratio vs specific heat

Diatas adalah grafik nilai kalor spesifik (Cp) vs rasio atom. Masing-masing garis menunjukkan berbagai nilai kalor spesifik pada temperatur tertentu sebagai berikut :

250 °C = ○



200 °C =  $\Delta$

150 °C =  $\square$

100 °C =  $\bullet$

50 °C =  $\blacktriangle$

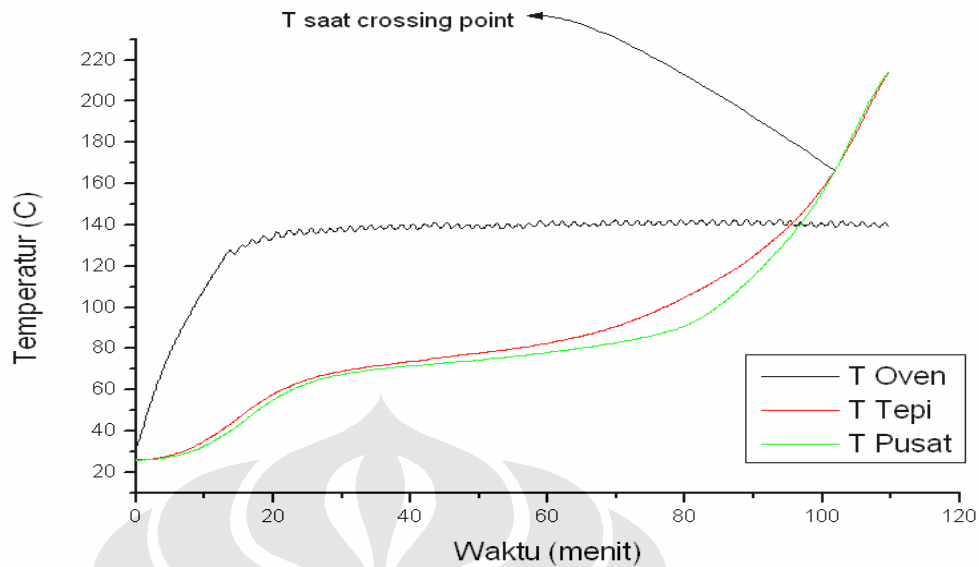
35 °C =  $\blacksquare$

Dengan mengetahui nilai  $C_p$  batubara, maka nilai QA bisa ditentukan dari kemiringan garis linear berdasarkan persamaan 4.3. Pada pengujian secara adiabatik dari batubara bituminous 2 memiliki nilai QA sebesar  $1,23 \times 10^9$  J/kg.s.

#### 4.4. ANALISIS HASIL *CROSSING POINT*

Pada dasarnya metode *crossing point* adalah meletakkan sampel dalam sebuah wadah kubus dan menempatkan beberapa termokopel dengan variasi posisi pada sampel. 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.

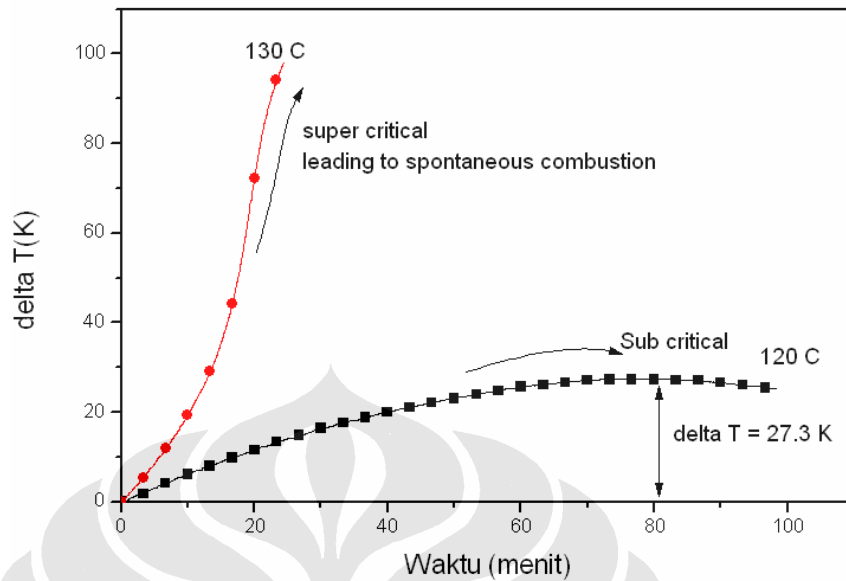
Gambar 4.5 dibawah menunjukkan grafik salah satu pengujian dengan metode *crossing point* pada batubara bituminus 3 dengan temperatur oven 140 °C. Suhu pada titik tepi terlihat lebih tinggi dari titik pusat hingga akhirnya suhu pada pusat menyamai suhu pada titik tepi. Titik perpotongan inilah yang disebut titik *crossing point*. Saat titik *crossing point* terjadi, suhu pada titik pusat perlahan mulai menjauhi suhu pada tepi. Hal ini dimungkinkan karena batubara memiliki konduktifitas termal yang rendah, sehingga panas yang terakumulasi pada daerah pusat batubara lebih besar dibandingkan dengan panas yang dilepaskan ke lingkungan.



**Gambar 4.6.** Grafik hasil pengujian *crossing point* pada temperatur 140 °C pada batubara bituminus 3

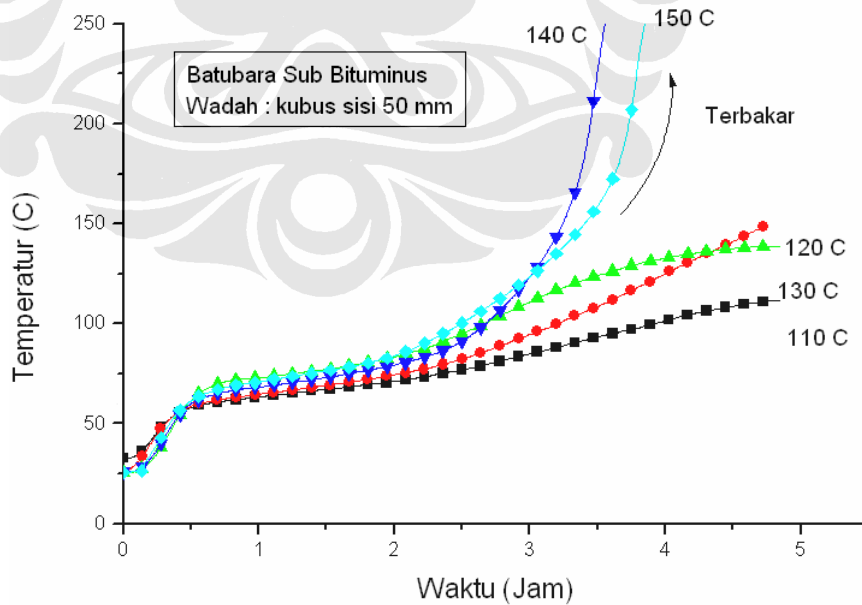
Pengujian dengan menggunakan metode *crossing point* dilakukan sebanyak lima kali dengan variasi temperatur inisial 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C, dan 150 °C. Temperatur titik kritis didefinisikan sebagai temperatur terendah dimana batubara tersebut dapat terbakar. Gambar dibawah merupakan contoh hasil pengujian dari batubara bituminus 1 dengan suhu oven sebesar 120 °C dan 130 °C. Pada suhu 120 °C, terlihat setelah melewati suhu oven, suhu pada pusat batubara hanya mampu bertambah hingga 27,3 °C. Setelah itu, suhu pada pusat cenderung menurun dan akhirnya stabil pada temperatur sekitar suhu oven. Kondisi tersebut dinamakan sub kritis.

Sementara itu, pada pengujian dengan menggunakan suhu oven 130 °C, terlihat suhu pada pusat sangat cepat meningkat setelah melewati suhu oven. Pada kondisi ini, batubara sudah terbakar dan suhu akan meningkat hingga mencapai > 200 °C. Situasi ini dinamakan super kritis. Dengan demikian suhu kritis batubara ini ditaksir sebesar  $\pm 125$  °C.



Gambar 4.7. Grafik contoh kondisi sub kritis dan super kritis pada batubara bituminus 1

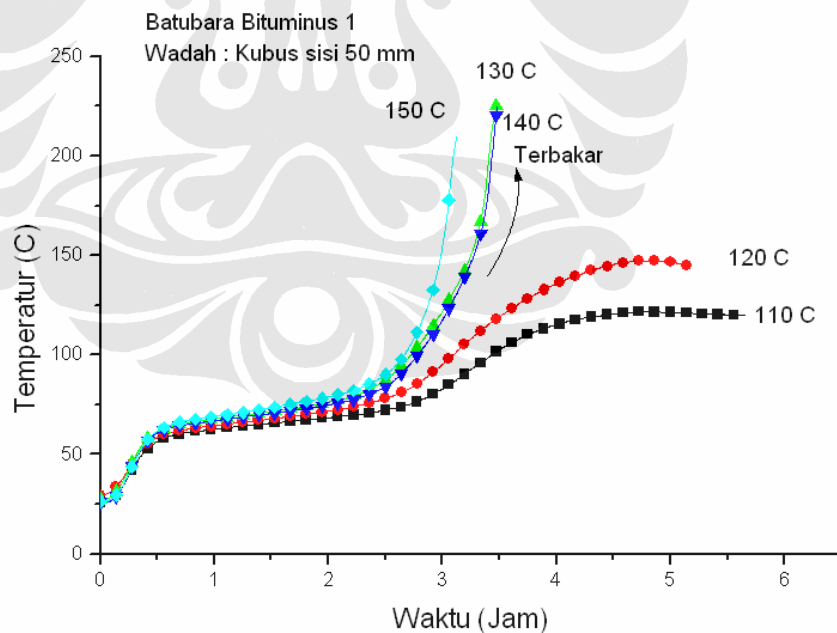
#### 4.4.1. Grafik Hasil Pengujian Batubara



Gambar 4.8. Grafik hasil pengujian crossing point batubara sub bituminus

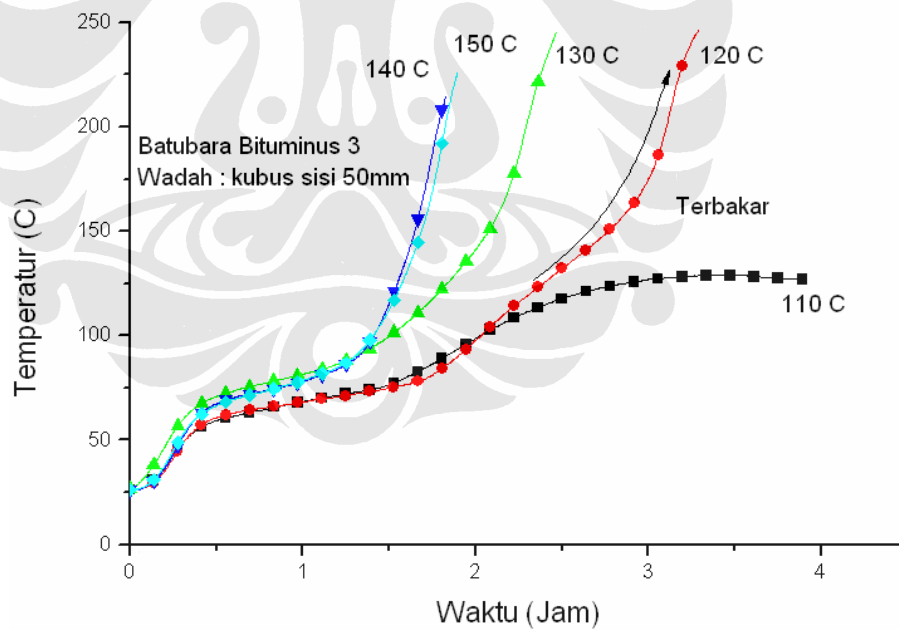
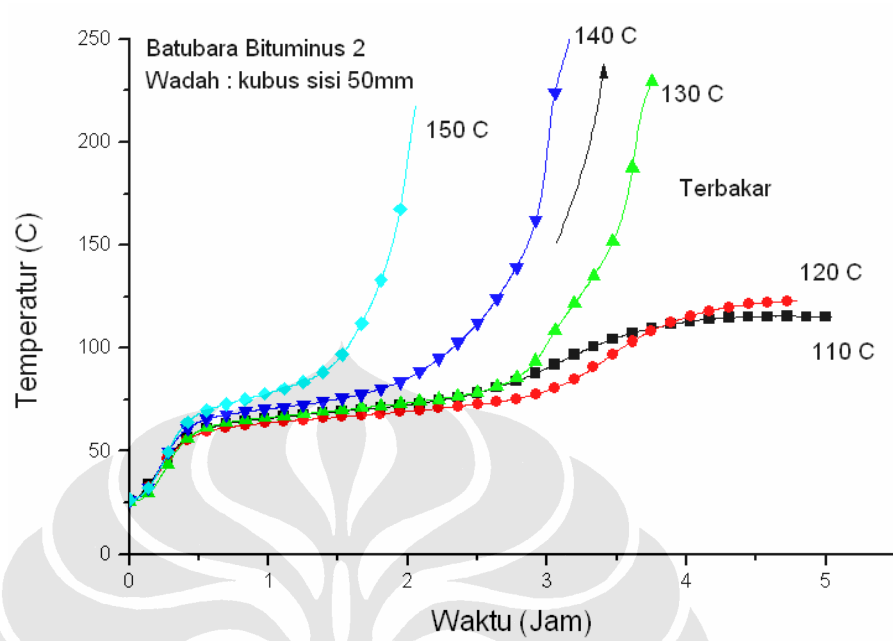
Grafik diatas adalah grafik hasil pengujian pada batubara sub bituminus yang memperlihatkan profil temperatur terhadap waktu pada wadah kubus dengan sisi 5 cm. Sumbu vertikal menunjukkan temperatur sampel yang diukur pada pusat wadah. Batubara ini memiliki kandungan air yang cukup tinggi (21.42 %), oleh karenanya proses oksidasi yang terjadi cukup lama. Hal ini karena panas yang terserap oleh batubara lebih banyak terpakai untuk menghilangkan kandungan air. Pada grafik terlihat pada saat awal pemanasan, suhu meningkat dengan cepat, namun perlahan melambat pada daerah suhu 60 °C – 80 °C. pada suhu ini proses penguapan air berlangsung.

Pada saat suhu oven 130 °C, kondisi yang terjadi masih dalam kondisi aman (sub kritis), akan tetapi ketika suhu oven dinaikkan menjadi 140 °C, kondisi yang terjadi adalah super kritis. Hal ini menunjukkan batubara mulai terbakar dan tidak terkendali. Dengan demikian temperatur ambien kritis untuk sampel batubara sub bituminus dapat ditentukan dengan mencari titik tengah dari kedua kondisi ekstrim tersebut. Pada kondisi ini temperatur kritis oven dapat dikatakan  $135\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 4.9.** Grafik hasil pengujian crossing point batubara bituminus 1

**Gambar 4.10.** Grafik hasil pengujian crossing point batubara bituminus 2



**Gambar 4.11.** Grafik hasil pengujian crossing point batubara bituminus 3

Hasil pengukuran temperatur ambien kritis untuk 3 jenis batubara bituminus terlihat pada tabel 4.3 dibawah. Profil temperatur terhadap waktu

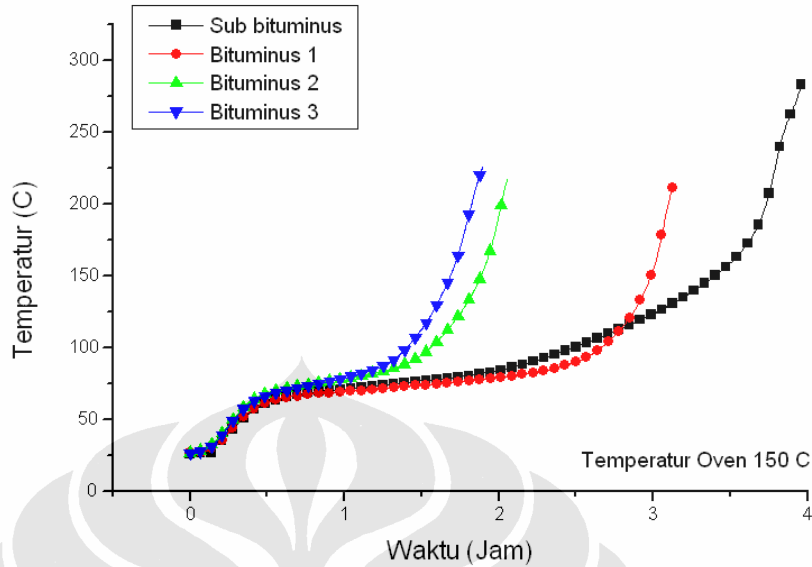
sangat berpengaruh terhadap jumlah kandungan air yang dimiliki. Pada batubara bituminus 3, terlihat bahwa waktu yang dibutuhkan dalam penguapan air lebih singkat dibandingkan dengan sub bituminus dan kedua jenis batubara bituminus yang lain. Hal ini dikarenakan kandungan air pada batubara bituminus 3 paling sedikit.

Jelas sekali bahwa proses pengeringan sampel telah menghambat laju kecepatan peningkatan temperatur sampel secara signifikan. Gambar dibawah memperlihatkan profil temperatur terhadap waktu pada suhu oven 140 °C untuk keempat jenis batubara. Batubara sub bituminus yang memiliki kadar kandungan air tertinggi membutuhkan waktu penguapan yang lebih panjang. Terdapat perbedaan waktu sekitar hampir 1,5 jam lebih lama dari jenis bituminus 3 yang memiliki kandungan air  $\pm 12\%$ .

Terdapat sesuatu yang menarik yang bisa diamati mengenai kondisi temperatur kritis oven. Dari hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa temperatur kritis oven akan berkurang seiring dengan semakin sedikitnya kandungan air. Batubara bituminus 3 memiliki temperatur kritis yang paling rendah, yaitu  $115 \pm 5$  °C. Ketika laju produksi kalor telah melampaui laju pelepasan kalor konveksi ke lingkungan, maka temperatur sampel akan terus meningkat hingga terjadi pembakaran spontan. Namun, apabila laju produksi kalor tidak lebih besar dari laju pelepasan kalor, maka temperatur sampel akan mencapai titik maksimum dan secara perlahan akan kembali turun. Pada pengujian sampel bituminus 3 ini, kedua kondisi ekstrim tersebut terjadi pada suhu 120 °C (super kritis) dan 110 °C (sub kritis).

**Tabel 4.3.** Hasil pengukuran temperatur oven kritis untuk masing-masing sampel batubara

Sampel	Ukuran Sisi	$T_{crit}$ (°C)
Sub bituminus	5x5x5 cm	$135 \pm 5$ °C
Bituminus 1	5x5x5 cm	$125 \pm 5$ °C
Bituminus 2	5x5x5 cm	$125 \pm 5$ °C
Bituminus 3	5x5x5 cm	$115 \pm 5$ °C



**Gambar 4.12.** Grafik hasil pengujian semua sampel batubara pada T Oven 150 °C. Pada grafik terlihat batubara yang memiliki kandungan air yang lebih sedikit relative mengalami proses oksidasi yang lebih cepat

#### 4.4.2 Analisis Nilai Energi Aktivasi

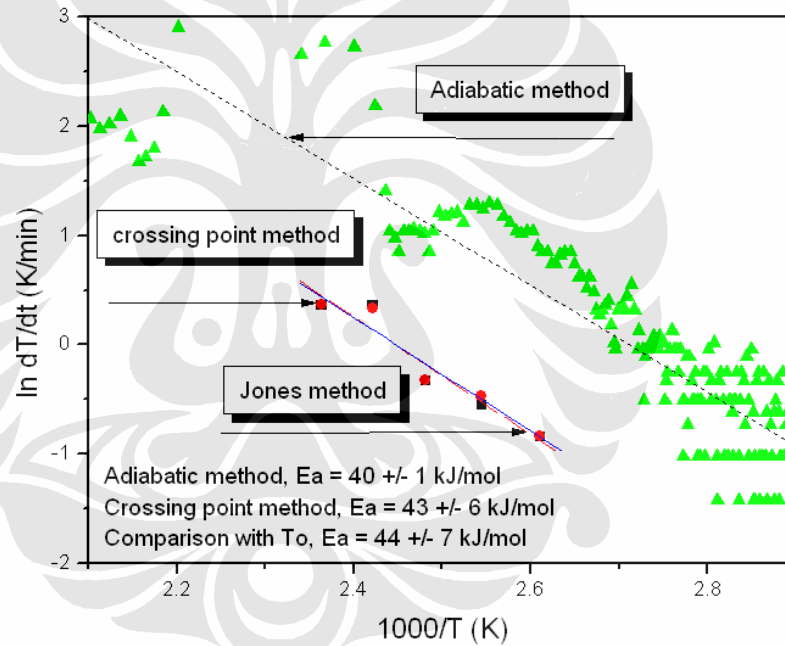
Pada penelitian ini parameter kinetik oksidasi sampel ditentukan dengan metode titik potong menggunakan persamaan 4.3. Gambar dibawah memperlihatkan kurva *arhenius* tipikal yang diperoleh dengan memplot nilai  $\ln dT/dt$  terhadap terhadap  $1/T_{cp}$ . Nilai energi aktivasi ( $E_a$ ) dapat diperoleh dari kemiringan garis regresi, sementara itu nilai faktor frekuensi ( $QA$ ) didapat dari perpotongan garis regresi dengan sumbu vertikal.

Sebagai perbandingan, digunakan metode kedua seperti yang dikembangkan oleh Jones dkk, 1996. Pendekatan ini menggunakan temperatur oven sebagai acuan untuk menentukan titik plot. Jadi titik *crossing* yang digunakan adalah saat temperatur pusat melewati temperatur set oven. Hasil plot grafik  $\ln dT/dt$  terhadap  $1000/T_{cp}$  sampel sub bituminus dan bituminus 1 dapat dilihat pada gambar dibawah.

Hasil dari pengujian adiabatik juga bisa dibandingkan dengan kedua metode tersebut. Sampel batubara sub bituminous dan bituminus 1 telah dilakukan uji adiabatik untuk menganalisa sifat pembakaran spontannya. Grafik

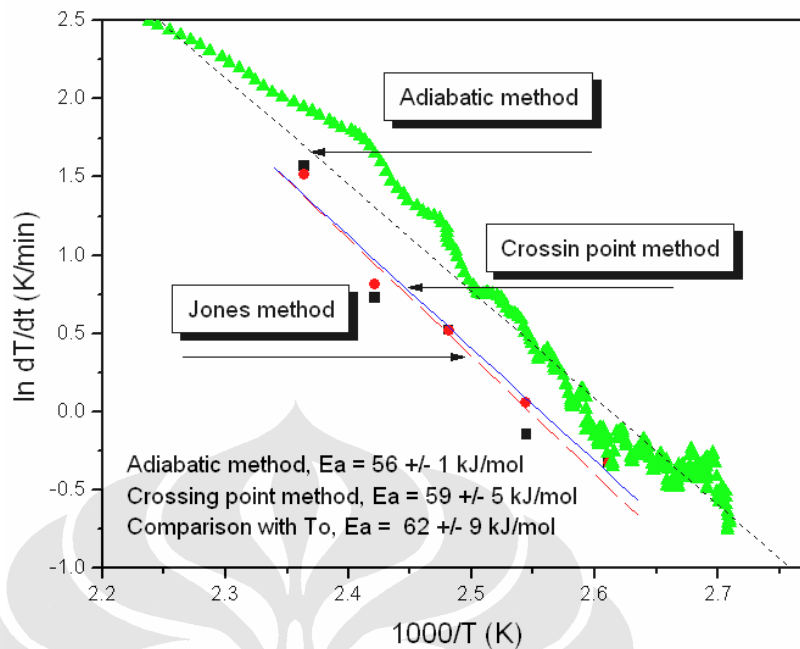
dibawah memperlihatkan plot  $\ln dT/dt$  terhadap  $1000/T$  dari ketiga metode yang berbeda. Terlihat perbedaan hasil pada ketiga metode tersebut.

Untuk batubara sub bituminus, nilai  $E_a$  dengan metode *crossing point* sebesar  $43 \pm 6$  kJ/mol, sangat dekat dengan nilai  $E_a$  dengan pendekatan Jones sebesar  $44 \pm 7$  kJ/mol. Dengan metode adiabatik, hasil  $E_a$  yang didapat justru lebih kecil yakni  $40 \pm 1$  kJ/mol. Hasil metode adiabatik pada batubara bituminus 1 juga terlihat lebih kecil dibandingkan kedua pendekatan yang lain. Dengan metode adiabatik, nilai  $E_a$  adalah  $56 \pm 1$  kJ/mol, sementara pada pendekatan *crossing point* dan Jones masing-masing sebesar  $59 \pm 5$  kJ/mol dan  $62 \pm 9$  kJ/mol. Terdapat perbedaan yang signifikan antara metode adiabatik dan Jones.



**Gambar 4.13.** Hasil plot grafik  $\ln dT/dt$  terhadap  $1000/T_{cp}$  sampel sub bituminus dengan ketiga metode pendekatan





**Gambar 4.14.** Hasil plot grafik  $\ln dT/dt$  terhadap  $1000/T_{cp}$  sampel bituminus 1 dengan ketiga metode pendekatan

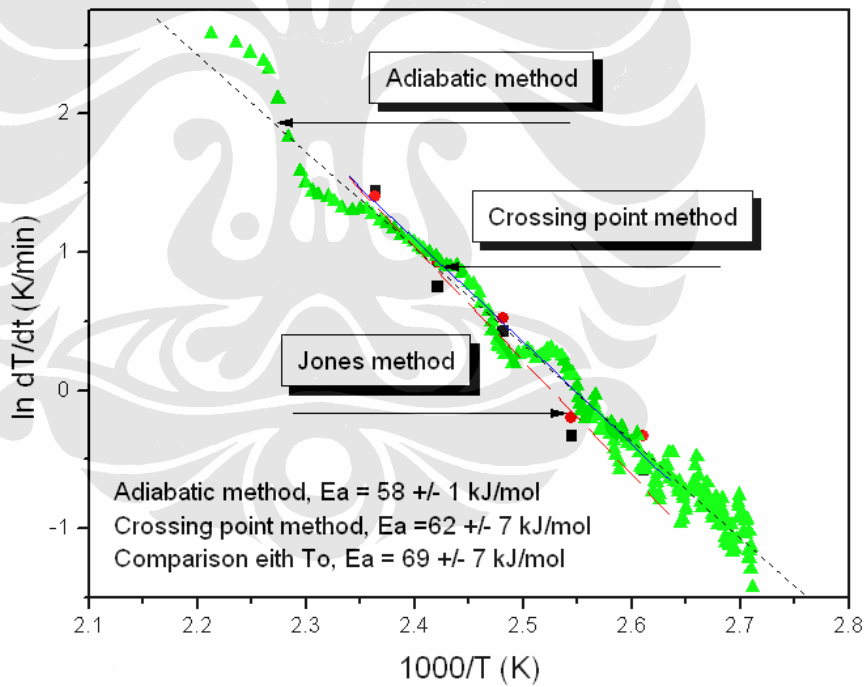
**Tabel 4.4.** Daftar hasil nilai  $E_a$ ,  $Q_A$ , dan temperature kritis oven pada semua sampel dengan ketiga metode.

Sample size : 0,25 mm	Methods	Activation Energy (kJ/mol)	Pre eksponensial faktor $Q_A$ (J/kg.s)	T. Oven kritis ( $^{\circ}C$ )
Sub bituminus	CPT	$43 \pm 6$	$8,45 \times 10^6$	$135 \pm 5 \text{ }^{\circ}C$
Sub bituminus	Jones	$44 \pm 7$	$1,32 \times 10^7$	
Sub bituminus	Adiabatik	$40 \pm 1$	$1,42 \times 10^7$	
Bituminus 1	CPT	$59 \pm 5$	$2,13 \times 10^9$	$125 \pm 5 \text{ }^{\circ}C$
Bituminus 1	Jones	$62 \pm 9$	$4,63 \times 10^9$	
Bituminus 1	Adiabatik	$56 \pm 1$	$1,22 \times 10^9$	
Bituminus 2	CPT	$62 \pm 7$	$3,82 \times 10^9$	$125 \pm 5 \text{ }^{\circ}C$
Bituminus 2	Jones	$68 \pm 7$	$2,62 \times 10^{10}$	
Bituminus 2	Adiabatik	$58 \pm 1$	$1,23 \times 10^9$	
Bituminus 3	CPT	$70 \pm 6$	$5,37 \times 10^{10}$	$115 \pm 5^{\circ}C$
Bituminus 3	Jones	$67 \pm 5$	$2,11 \times 10^{10}$	
Bituminus 3	Adiabatik	$59 \pm 2$	$3,02 \times 10^9$	

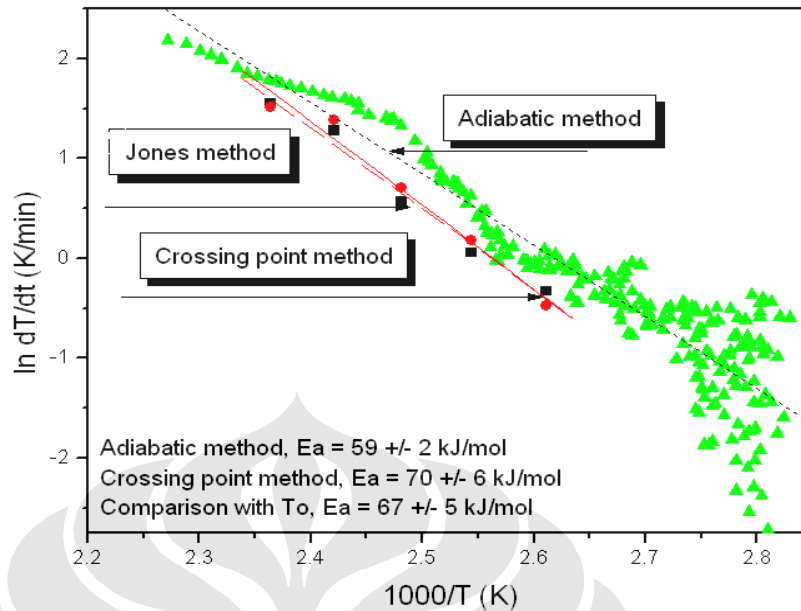
Pada gambar 4.13 diatas terlihat perbedaan kemiringan garis linear antara kedua metode baik metode adiabatik, *crossing point* maupun perbandingan

dengan temperatur oven (*Jones method*). Pada batubara bituminus 2, nilai energi aktivasi yang didapat dari metode adiabatik adalah  $58 \pm 1$  kJ/mol, dengan metode *crossing point* adalah  $62 \pm 7$  kJ/mol sedangkan dengan *Jones method* sebesar  $68 \pm 7$  kJ/mol. Terdapat perbedaan hasil yang cukup dekat antara metode *crossing point* dan adiabatik. Namun, hal tersebut tidak berlaku ketika sampel bituminus 3 didapat hasil yang cukup jauh. Untuk metode *crossing point*, nilai  $E_a$  sebesar  $70 \pm 6$  kJ/mol, lebih besar dari nilai  $E_a$  yang didapat dari metode adiabatik yang sebesar  $59 \pm 1$  kJ/mol.

Salah satu nilai parameter oksidasi yang bisa didapat dari hasil pengujian adalah nilai pre eksponensial faktor QA. Nilai ini menunjukkan laju peningkatan panas batubara. Dengan menggunakan persamaan 4.3, kita dapat menentukan nilai QA dari berbagai metode dan jenis batubara. Adapun hasil lengkap pengujian bisa dilihat pada tabel diatas.

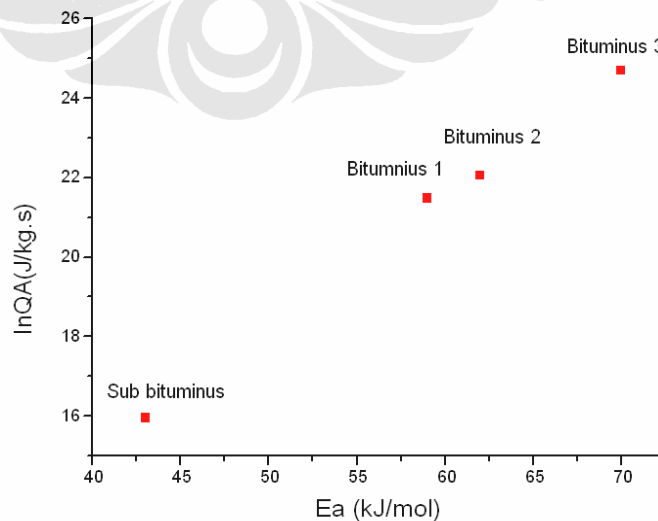


**Gambar 4.15.** Hasil plot grafik  $\ln dT/dt$  terhadap  $1000/T_{cp}$  sampel bituminus 2 dengan ketiga metode pendekatan

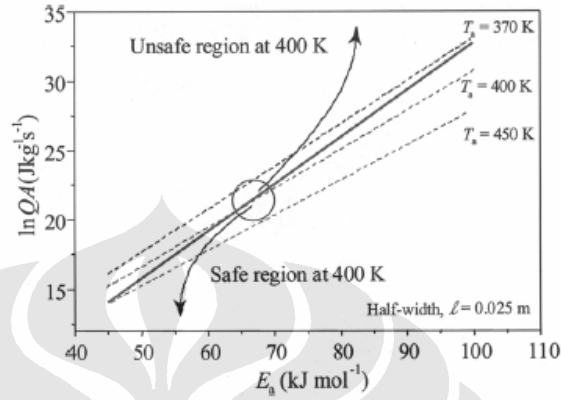


**Gambar 4.16.** Hasil plot grafik  $\ln dT/dt$  terhadap  $1000/T_{cp}$  sampel bituminus 3 dengan ketiga metode pendekatan

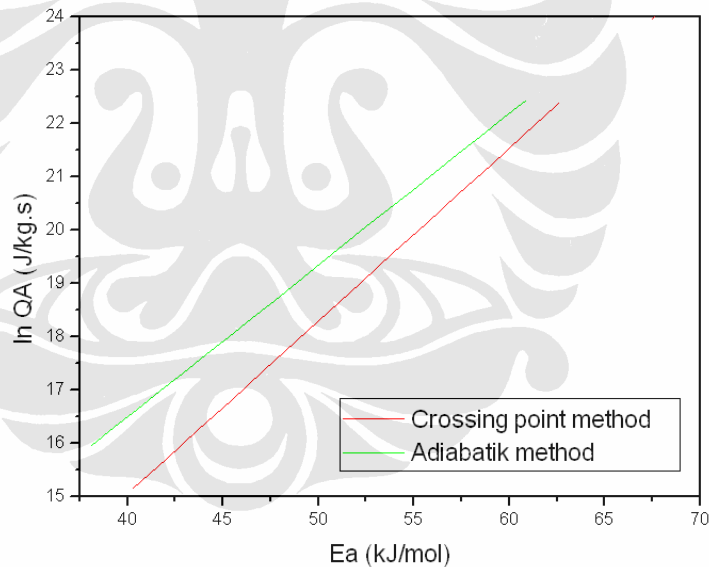
Grafik dibawah menunjukkan plot  $\ln QA$  vs  $E_a$ , dapat dilihat bahwa batubara yang memiliki nilai  $E_a$  lebih tinggi memiliki nilai  $QA$  yang tinggi pula. Y.S. Nugroho, et al. [13] menemukan fakta menarik bahwa plot  $\ln QA$  vs  $E_a$  membentuk garis linear yang diambil dari berbagai ukuran partikel dan jenis batubara. Korelasi antara  $E_a$  dan  $QA$  merupakan pendekatan baru untuk menduga kelakukan termal yang tak terkendali pada *stockpile* berdasarkan pada eksperimen skala kecil.



**Gambar 4.17.** Grafik  $\ln QA$  vs  $E_a$  yang didapat dari eksperimen keempat sampel batubara dengan metode *crossing point*



**Gambar 4.18.** Garis putus-putus merupakan plot secara teoritis, sementara garis solid merupakan plot secara eksperimental dengan berbagai jenis dan ukuran partikel batubara. [Y.S. Nugroho., et al, 2000]



**Gambar 4.19.** Grafik  $\ln QA$  vs  $E_a$  yang didapat dari eksperimen keempat sampel batubara dengan metode *crossing point* dan *adiabatic*.

Gambar diatas menunjukkan grafik  $\ln QA$  vs  $E_a$  yang didapat dari eksperimen keempat sampel batubara dengan menggunakan metode *crossing point* dan *adiabatik*. Terlihat bahwa hasil plot dari kedua metode menunjukkan garis linier dimana pada percobaan *adiabatik* garis plot selalu berada di atas garis dari metode *crossing point*. Hal ini dikarenakan pada metode *crossing point* suhu

kritis berkisar antara 120 °C, sementara pada metode adiabatic suhu kritis hanya berkisar 70 °C – 80 °C.

#### 4.5. ANALISIS KETIDAKPASTIAN

Berdasarkan hasil eksperimen di atas maka diperlukan analisis ketidakpastian untuk menentukan tingkat kepercayaan dari data atau hasil yang didapatkan pada eksperimen. Berdasarkan penjelasan sebelumnya, data yang didapat dipengaruhi oleh dua alat yaitu Termokopel dan ADAM Module. Dengan menggunakan tingkat akurasi yang dimiliki tiap-tiap alat maka dapat diperhitungkan tingkat kepercayaan dari data yang didapat.

##### Termokopel

Pada termokopel tipe K memiliki tingkat kesalahan hingga 0,75 % sehingga dapat ditentukan batas atas dan batas bawah :

$$BA = 70 + (70 * 0,75\%) = 70,525^{\circ}\text{C}$$

$$BB = 70 - (70 * 0,75\%) = 69,475^{\circ}\text{C}$$

Tingkat Ketidakpastian :

$$TK = \sqrt{\frac{\left(\frac{BA - 70}{BA}\right)^2 + \left(\frac{70 - BB}{70}\right)^2}{2}}$$

$$TK = \sqrt{\frac{\left(\frac{70,525 - 70}{70,525}\right)^2 + \left(\frac{70 - 69,475}{70}\right)^2}{2}} = 0,007472 = 0,7472\%$$

##### ADAM Module

Sesuai dengan tingkat kesalahan dari ADAM 4018M (0,1%) maka dapat ditentukan batas atas dan batas bawah :

$$BA = 70 + (70 * 0,1\%) = 70,07^{\circ}\text{C}$$

$$BB = 70 - (70 * 0,1\%) = 69,93^{\circ}\text{C}$$

Tingkat Ketidakpastian :

$$TK = \sqrt{\frac{\left(\frac{BA - 70}{BA}\right)^2 + \left(\frac{70 - BB}{70}\right)^2}{2}}$$

$$TK = \sqrt{\frac{\left(\frac{70,07 - 70}{70,07}\right)^2 + \left(\frac{70 - 69,93}{70}\right)^2}{2}} = 0,0009995 = 0,0995\%$$

Dengan demikian dapat ditentukan tingkat ketidakpastian total dari kedua alat tersebut diatas :

$$TK_{total} = \sqrt{\frac{(TK_{termokopel})^2 + (TK_{ADAM})^2}{2}}$$

$$TK_{total} = \sqrt{\frac{(0,0995\%)^2 + (0,7472\%)^2}{2}} = 0,533\%$$

Dapat disimpulkan bahwa dari analisis ketidakpastian yang telah dilakukan menghasilkan tingkat ketidakpastian sebesar **0,533 %** untuk setiap data yang dihasilkan pada tiap eksperiman.