

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1. KARAKTERISTIK BATUBARA

Sampel batubara yang digunakan dalam eksperimen adalah batubara sub-bituminus. Dengan pengujian proksimasi dan ultimasi yang telah dilakukan oleh pihak luar, diketahui karakteristik sample sebagai berikut

Tabel 4. 1 Tabel uji proksimasi dan ultimasi batubara sub-bituminous

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

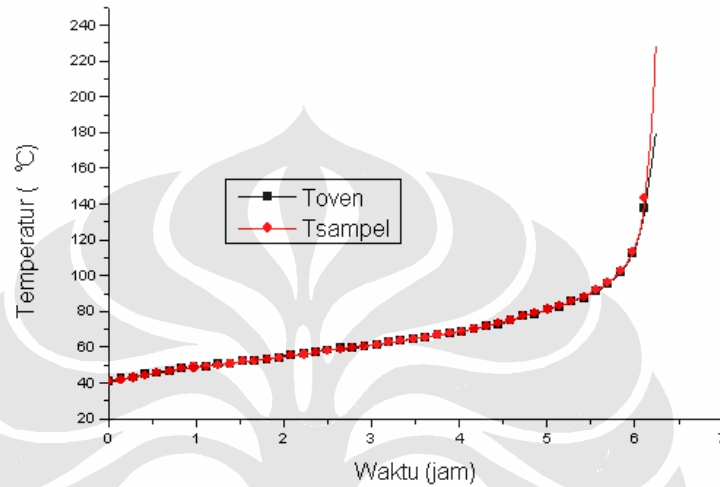
Dilihat dari besarnya volatile matter yang terkandung oleh batubara, yaitu 34,89% maka dapat dikatakan batubara jenis sub-bituminus terbilang reaktif. Volatile matter sendiri adalah zat-zat yang terdapat pada batubara yang mudah menguap, yang menentukan keraktifan suatu batubara.

Pada saat reaksi oksidasi terjadi karena bersifat mudah menguap, zat ini akan lebih mudah teroksidasi daripada bagian-bagian lain dari batubara. Oleh karena itu apabila batubara memiliki kandungan zat terbang yang tinggi maka dapat disimpulkan bahwa batubara reaktif.

IV.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 gas oksigen dengan kadar 71% tanpa penambahan kelembaban udara suplai. Pada grafik ditunjukkan bahwa temperatur reaktor dan oven relatif sama yang menunjukkan bahwa eksperimen yang dilakukan adalah adiabatik.



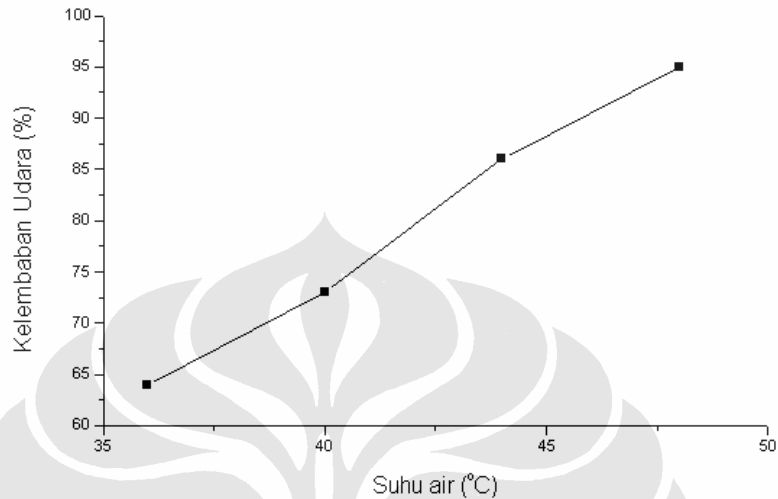
Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Temperatur Sampel Dan Oven

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 4,5 °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).

IV.3. PENGUJIAN KELEMBABAN

Untuk mengetahui nilai dan tingkat kestabilan kelembaban yang akan digunakan dalam penelitian, maka telah dilakukan suatu pengujian kelembaban. Kelembaban aliran gas dikondisikan dengan cara menaikkan temperatur water

batch dan didiamkan selama ± 30 menit, sehingga suhu dan penguapan air dari kolom air menjadi stabil. Pada gambar 4.2. dapat dilihat hasil pengujian kelembaban dengan aliran gas konstan.



Gambar 4. 2 Hasil Pengujian Kelembaban

Dapat dilihat dari hasil pengujian bahwa aliran gas yang melewati pengaturan kelembaban menghasilkan nilai kelembaban para range tertentu. Faktor yang sangat berpengaruh pada kelembaban adalah suhu dan tekanan, pada pengujian ini diasumsikan tekanan aliran konstan maka pengaruh paling besar adalah fluktuasi temperatur pada water batch. Fluktuasi temperatur pada water batch dipengaruhi temperatur lingkungan, panas yang hilang ke lingkungan, volume water batch dan panas yang dibutuhkan untuk menstabilkan temperatur. RH yang digunakan yaitu $RH \pm 70\%$ dan $> 95\%$ (paling lembab) untuk dibandingkan dengan yang aliran udara kering.

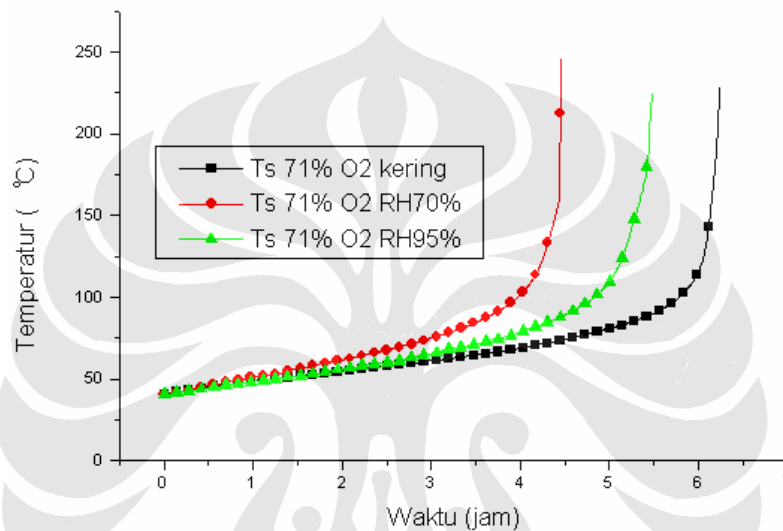
IV.4. PENGARUH KELEMBABAN UDARA

Untuk mengetahui pengaruh kelembaban udara suplai terhadap karakter pembakaran spontan batubara maka dilakukan pengujian dengan cara mengalirkan gas dengan kelembaban udara yang berbeda-beda. Parameter eksperimental yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Parameter Eksperimental

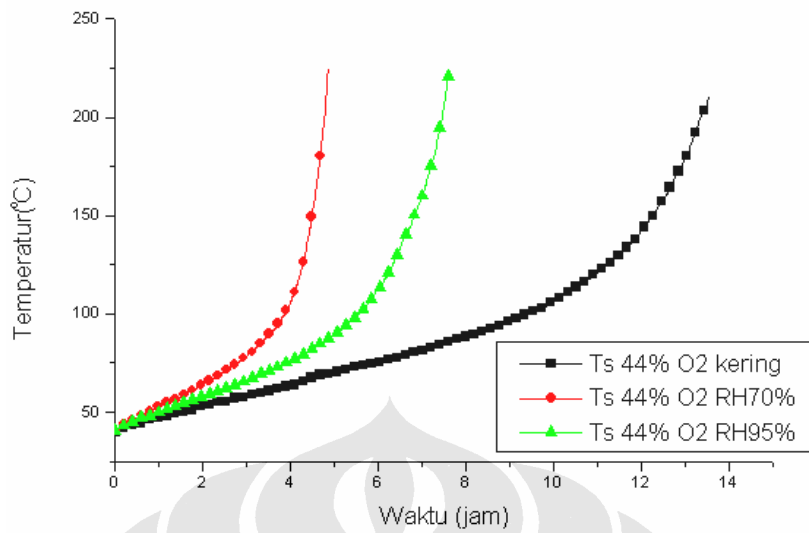
Konsentrasi O ₂	RH (%)		
O ₂ (~96%)	0-6	70	95
O ₂ (~71%)	0-6	70	95
O ₂ (~44%)	0-6	70	95

Salah satu hasil pengujian, yaitu pengujian dengan menggunakan gas oksigen 71% dengan variasi kelembaban dapat dilihat pada gambar 4.3. dalam bentuk grafik temperatur terhadap waktu.



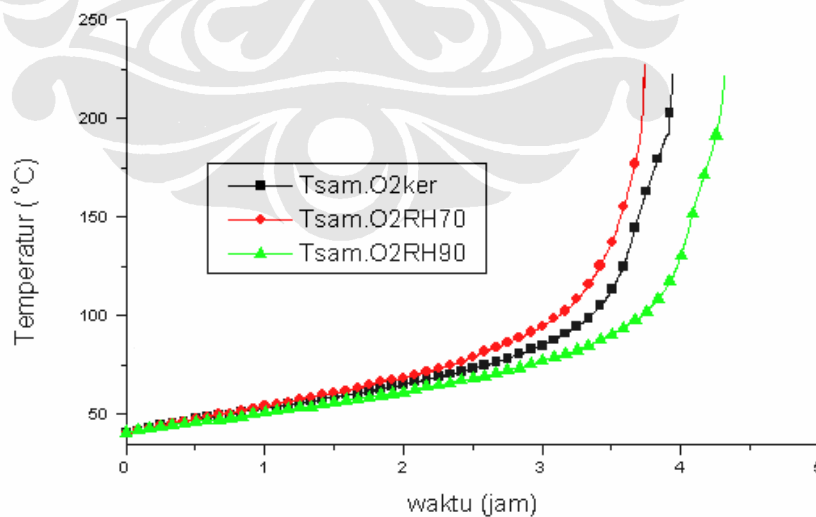
Gambar 4. 3 Grafik temperatur terhadap waktu menggunakan 71% oksigen dengan variasi kelembaban

Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa kelembaban udara suplai sangat berpengaruh terhadap karakteristik pembakaran spontan batubara. Terdapat perbedaan yang signifikan pada laju pembakaran spontan antara aliran gas oksigen 71% kering dengan aliran gas oksigen 71% yang diberikan penambahan kelembaban udara suplai. Terlihat bahwa pada kelembaban 70% laju oksidasi yang terjadi pada batubara lebih cepat dibandingkan dengan penambahan kelembaban 95%. Hal yang sama terjadi pada pengujian dengan menggunakan gas oksigen 44%, yang profilnya dapat dilihat pada gambar 4.4.



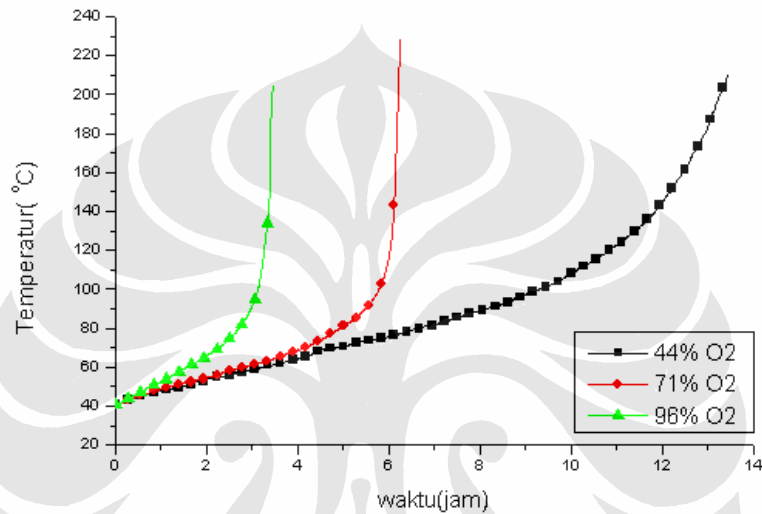
Gambar 4. 4 Grafik temperatur terhadap waktu menggunakan 44% oksigen dengan variasi kelembaban

Akan tetapi pada gambar 4.5, yang menunjukkan profil untuk pengujian menggunakan oksigen murni (96%), terdapat satu perbedaan dengan pengujian menggunakan gas lain. Perbedaan tersebut yaitu pada penambahan kelembaban 90%, laju oksidasi batubara yang terjadi lebih lama dibandingkan dengan menggunakan oksigen tanpa penambahan kelembaban (kering).

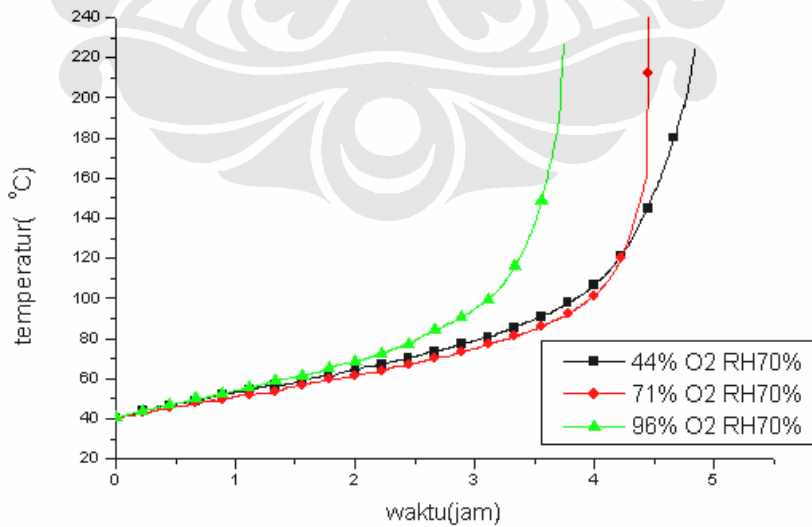


Gambar 4. 5 Grafik temperatur terhadap waktu menggunakan 96% oksigen dengan variasi kelembaban

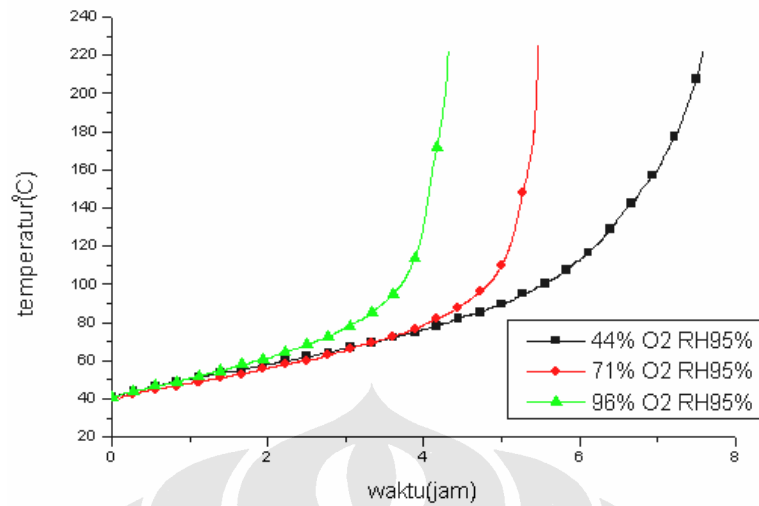
Dari hasil pengujian juga dapat dibandingkan karakteristik pembakaran spontan batubara untuk pengujian dengan menggunakan aliran gas oksigen dengan tingkat kemurnian yang berbeda-beda, yaitu pada 44%; 71% dan 96%. Perbandingan karakteristik ini diberikan pada gambar 4.6 untuk pengujian tanpa penambahan kelembaban; gambar 4.7 untuk pengujian dengan RH 70% dan gambar 4.8 untuk pengujian dengan RH>95%.



Gambar 4. 6 Grafik temperatur terhadap waktu untuk pengujian tanpa penambahan kelembaban



Gambar 4. 7 Grafik temperatur terhadap waktu untuk pengujian dengan RH 70%



Gambar 4. 8 Grafik temperatur terhadap waktu untuk pengujian dengan RH>95%

Dari ketiga gambar diatas dapat dilihat pola yang menyatakan semakin kecil tingkat konsentrasi oksigen cenderung menurunkan kecepatan reaksi *self-heating* pada batubara. Hal ini diakibatkan karena pembakaran spontan pada batubara diawali dengan adanya reaksi oksidasi, sehingga dengan semakin banyaknya jumlah oksigen yang bereaksi dengan batubara tersebut maka akan semakin cepat juga laju oksidasi yang terjadi.

IV.4.1. Kecenderungan Pembakaran Spontan

Dalam bab sebelumnya telah diberikan penjelasan bahwa salah satu parameter untuk melihat karakteristik pembakaran spontan batubara adalah nilai pemanasan mandiri (R_{70}) yang dapat dirumuskan:

$$R_{70} = (70 - 40 \text{ } ^\circ\text{C}) / \Delta t_{40-70} \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana Δt_{40-70} adalah waktu yang dibutuhkan oleh pemanasan mandiri untuk meningkatkan temperaturnya dari 40°C hingga 70°C. Nilai R_{70} untuk setiap hasil pengujian dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. 3 Nilai R_{70} dari 71% Oksigen dengan variasi kelembaban

Gas	$R_{70}(^\circ\text{C}/\text{jam})$
71%Oksigen Kering	7.30
71%Oksigen RH 70%	11.15
71%Oksigen RH>95%	8.85

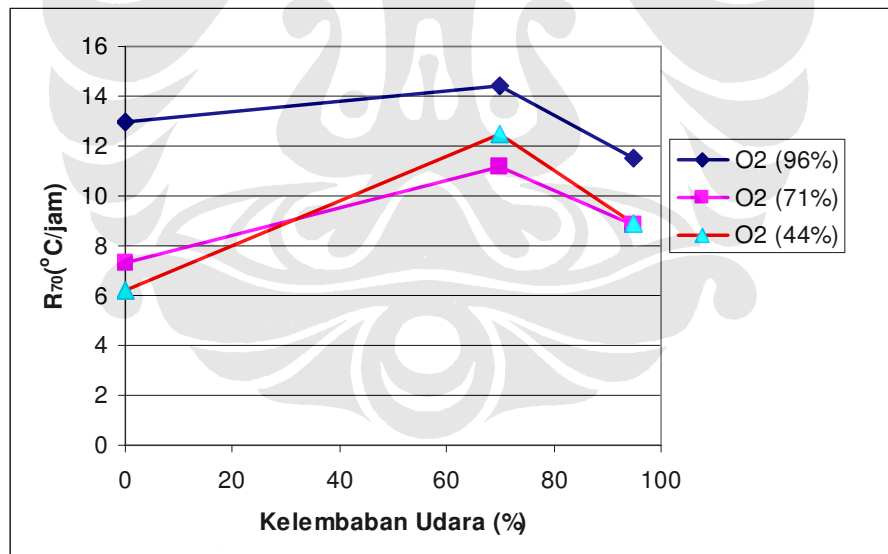
Tabel 4. 4 Nilai R_{70} dari 44% Oksigen dengan variasi kelembaban

Gas	R_{70} ($^{\circ}$ C/jam)
44%Oksigen Kering	6.23
44%Oksigen RH 70%	12.47
44%Oksigen RH>95%	8.90

Tabel 4. 5 Nilai R_{70} dari 96% Oksigen dengan variasi kelembaban

Gas	R_{70} ($^{\circ}$ C/jam)
96%Oksigen Kering	12.98
96%Oksigen RH 70%	14.44
96%Oksigen RH>95%	11.54

Dari data pengujian yang didapatkan menunjukkan bahwa penambahan kelembaban udara 70% pada tiap gas yang diuji akan memberikan efek percepatan laju kenaikan temperatur. Sedangkan pada penambahan kelembaban udara 95% terlihat peningkatan pada gas oksigen 71% dan 44%, dan sebaliknya menunjukkan penurunan untuk gas oksigen 96%. Pada gambar 4.9 dapat dilihat hasil plot kelembaban udara vs nilai R_{70} dari hasil pengujian.



Gambar 4. 9 Plot R_{70} vs kelembaban udara

Dari gambar 4.9 dapat dilihat bahwa terdapat nilai optimum penambahan kelembaban udara suplai untuk peningkatan laju oksidasi batubara. Pada kelembaban 70%, laju oksidasi batubara akan menunjukkan nilai optimum. Setelah titik tersebut laju oksidasi mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kelembaban.

IV.4.2. Parameter Kinetik Oksidasi

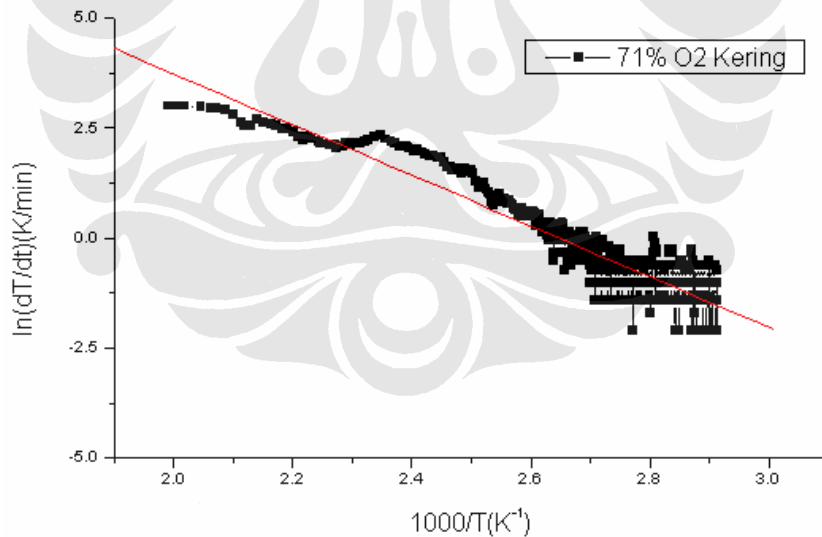
Kesetimbangan energi dalam kondisi *un-steady* untuk pori-pori benda padat (*solid*) yang reaktif dengan tidak memperhitungkan deplesi reaktan dan evaporasi adalah sebagai berikut :

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \rho Q A \exp \left(- \frac{E_a}{RT} \right) \dots \dots \dots (4.2)$$

Persamaan tersebut kemudian diturunkan sehingga didapatkan persamaan baru:

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

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 $1000/T$. Salah satu hasil plot tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4. 10 Plot $\ln(dT/dt)$ vs $(1000/T)$ untuk gas oksigen 71% kering

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

$$\ln\left(\frac{dT}{dt}\right) = \ln\left(\frac{QA}{Cp}\right) + \left(-\frac{Ea}{RT}\right) \frac{1000}{T} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$Y = A + B * X \dots\dots\dots(4.5)$$

Hasil persamaan garis lurus dari gambar 4.10. diperlihatkan sebagai berikut:

Linear Regression for Data1_O2 71%.RH 0%:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error
A	15.27057	0.25857
B	-5.76873	0.09469

R	SD	N	P
-0.92738	0.418	606	<0.0001

Untuk nilai A dan B dari sampel-sampel lainnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 6 Nilai A dan B

Gas	A	B
96%Oksigen Kering	12.292	-4.585
96%Oksigen RH 70%	11.623	-4.386
96%Oksigen RH>95%	12.030	-4.532
71%Oksigen Kering	15.271	-5.769
71%Oksigen RH 70%	13.216	-4.993
71%Oksigen RH>95%	12.156	-4.626
44%Oksigen Kering	12.101	-5.017
44%Oksigen RH 70%	11.523	-4.452
44%Oksigen RH>95%	10.182	-4.167

Nilai energi aktivasi dari reaksi merupakan nilai kemiringan grafik linear, nilai kemiringan tersebut adalah gradien persamaan garis $Y = A + B * X$, maka:

$$B = -(Ea / R) \dots\dots\dots(4.6)$$

atau,

$$Ea = -(B.R) \dots\dots\dots(4.7)$$

Sedangkan QA dapat dicari dengan persamaan,

$$QA = (e^A \cdot Cp) / 60 \dots \dots \dots (4.8)$$

Dari nilai A dan B yang ada maka nilai energi aktivasi, E_a dan nilai faktor pre-eksponensial, QA dapat dicari dengan persamaan diatas. Berikut merupakan perhitungan E_a dan QA untuk gas oksigen 71% kering;

$$\begin{aligned} E_a &= - (R \cdot B) \\ &= - (8,314 \cdot (-5,769)) \\ &= 47,96 \text{ kJ/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} QA &= (e^A \cdot Cp) / 60 \\ &= (e^{15,271} \cdot 1485) / 60 \\ &= 1,060 \times 10^8 \text{ J/kg.s} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama untuk sampel lainnya dapat diketahui nilai energi aktivasi dan faktor pre-eksponensial seperti pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Energi aktivasi dan pre-eksponensial faktor

Gas	E_a (kJ/mol)	QA(J/kg.s)
96%Oksigen Kering	38.12	5.39E+06
96%Oksigen RH 70%	36.46	2.76E+06
96%Oksigen RH>95%	37.68	4.15E+06
71%Oksigen Kering	47.96	1.06E+08
71%Oksigen RH 70%	44.86	4.14E+07
71%Oksigen RH>95%	37.83	3.81E+06
44%Oksigen Kering	41.71	4.46E+06
44%Oksigen RH 70%	32.62	5.98E+05
44%Oksigen RH>95%	34.64	6.54E+05

Dari tabel di atas terlihat bahwa dengan adanya penambahan kelembaban udara maka energi aktivasi yang dibutuhkan akan menurun. Hal ini menunjukkan bahwa kereaktifan batubara akan semakin meningkat. Untuk gas oksigen 96% penurunan energi aktivasinya tidak terlalu signifikan, sebaliknya pada gas oksigen 44% penurunannya sangat berpengaruh.

IV.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.