

**ANALISIS SIFAT KIMIA DAN DEKOMPOSISI TERMAL MODEL VYAZOVKIN
SUTRA JAGUNG DENGAN PROSES PIROLISIS PADA LAJU PEMANASAN
40 °C/MENIT****(ANALYSIS OF CHEMICAL PROPERTIES AND THERMAL DECOMPOSITION
OF THE VYAZOVKIN MODEL OF CORN SILK BY PYROLYSIS PROCESS AT A
HEATING RATE OF 40 °C/MINUTE)****Citrakara Upendra Sneha Bandhana Kusuma Himawan¹*, Hadi Rahmad², Ahmad Dony
Mutiar Bahtiar²**¹ Teknik Mesin, Universitas Pwiyatan Daha¹² Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang²

E-mail : Upendra@updkediri.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kadar karbon-dioksida (CO) di atmosfer di negara yang memiliki penduduk sangat banyak, mendorong minat baru dalam mengembangkan penelitian dan teknik untuk mengurangi pemanasan global. Melimpahnya sutra jagung merupakan faktor yang sangat penting dan perlu dipertimbangkan dalam hal pemanfaatannya. Beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait kegunaan rambut jagung yaitu sebagai bahan pembuatan bakso rendah lemak, anti obesitas, antidiabetes yang didapat dari polisakarida sutra jagung. Namun, potensi sutra jagung sebagai bahan baku bahan bakar belum dilakukan penelitian. Karena itu, penting untuk melakukan penelitian dalam memahami potensi sutra jagung sebagai sumber energi baru dan terbarukan yang diharapkan menjadi cadangan energi jangka panjang. Analisa termogravimetri tentang karakteristik dan kinetika dalam rentang suhu normal ruang 900 °C dibawah atmosfer nitrogen pada laju pemanasan 40 °C/menit. Hasilnya menunjukkan bahwa proses pirolisis sutra jagung terbagi menjadi 3 tahap yang terkait dengan proses berkurangnya kadar air pada suhu 65-130 °C, dilanjutkan dengan tahap devolatilisasi pada rentang suhu 216-506 °C dan yang paling akhir yaitu dekomposisi yang relative lambat hingga 900 °C. Energi aktivasi (Ea) pada tahap pirolisis aktif dihitung dengan menggunakan model fitting model isoconvensional menggunakan model Vyazovkin. Energi aktivasi hasil dari perhitungan model Vyazovkin masing-masing pada kisaran sebesar 215.522 kJ/mol.

Kata Kunci : Dekomposisi Termal ; Energi Aktivasi ; Pirolisis ; Sutra Jagung**ABSTRACT**

Increasing levels of carbon dioxide (CO) in the atmosphere in highly populated countries is driving renewed interest in developing research and techniques to reduce global warming. The

abundance of corn silk is a very important factor and needs to be considered when it comes to its utilization. Several studies have been conducted regarding the use of corn silk, namely as an ingredient for making low-fat, anti-obesity, anti-diabetic meatballs which are obtained from corn silk polysaccharides. However, the potential of corn silk as a raw material for fuel has not been studied. Therefore, it is important to conduct research to understand the potential of corn silk as a new and renewable energy source which is expected to become a long-term energy reserve. Thermogravimetric analysis of the characteristics and kinetics in the normal room temperature range of 900 oC under a nitrogen atmosphere at a heating rate of 40 oC/minute. The results show that the pyrolysis process of corn silk is divided into 3 stages related to the process of reducing the water content at a temperature of 65-130 °C, followed by the devolatilization stage at a temperature range of 216-506 oC and the last is a relatively slow decomposition up to 900 oC. The activation energy (E_a) in the active pyrolysis stage was calculated using the isoconventional fitting model using the Vyazovkin model. The resulting activation energy from the calculation of the Vyazovkin model is in the range of 215,522 kJ/mol each.

Keywords: Thermal Decomposition ; Activation Energy; pyrolysis ; Corn Silk

PENDAHULUAN

Peningkatan kadar karbon-dioksida (CO) di atmosfer di negara yang memiliki penduduk sangat banyak, mendorong minat baru dalam mengembangkan penelitian dan teknik untuk mengurangi pemanasan global [1][2]. Bahan bakar fosil menjadi salah satu sumber energi tidak terbarukan dan masih menjadi sumber energi utama di dunia [3]. Penggunaan atau Konsumsi yang terus meningkat dan semakin menipisnya ketersediaan cadangan sumber energi fosil, menjadi alasan penting bagi peneliti dalam mengembangkan energi terbarukan yang diharapkan menjadi solusi untuk menggantikan atau mengganti bahan bakar fosil sehingga dapat mengurangi tingkat pemanasan global. Berbagai sumber energi baru dan terbarukan, biomassa merupakan satu dari banyak sumber energi yang

memiliki potensi sangat baik sebagai pengganti bahan bakar fosil dan dapat berkontribusi atau menjadi contributor penting sebagai sumber energi pada abad kedepan. Bahan bakar biomassa telah dianggap sebagai bahan bakar netral CO_2 dan memberikan manfaat yang substansial dikarenakan biomassa dapat menyerap karbon dioksida (CO_2) selama pertumbuhan dan kemudian mengeluarkan dalam jumlah yang sama pada saat pembakaran sehingga memiliki potensi sebagai bahan bakar yang aman terhadap lingkungan [4][5].

Limbah pertanian di Indonesia menjadi salah satu sumber biomassa yang paling melimpah, terutama tanaman jagung. Tahun 2016 - 2017, luas lahan jagung 5.375.387 hektar [6] , dengan jumlah sutra jagung yang diproduksi sekitar 537 Kg per hektar [7] dan

kelimpahan sutra jagung sekitar 2,88 juta ton per tahunnya [3]. Melimpahnya sutra jagung merupakan faktor yang sangat penting dan perlu dipertimbangkan dalam hal pemanfaatannya. Beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait kegunaan rambut jagung yaitu sebagai bahan pembuatan bakso rendah lemak [8], anti obesitas [9], antidiabetes yang didapat dari polisakarida sutra jagung [10]. Namun, potensi sutra jagung sebagai bahan baku bahan bakar belum dilakukan penelitian. Karena itu, penting untuk melakukan penelitian dalam memahami potensi sutra jagung sebagai sumber energi baru dan terbarukan yang diharapkan menjadi cadangan energi jangka panjang.

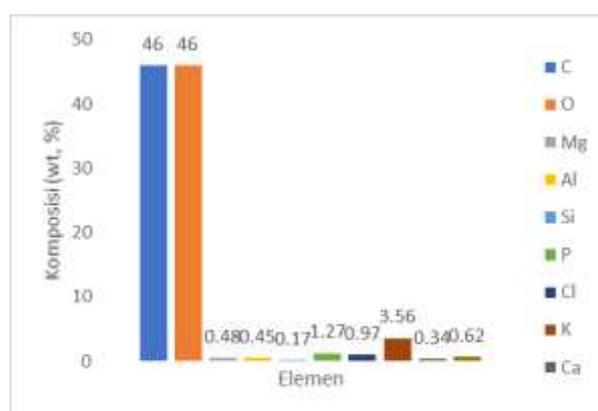
Beberapa mode umum dalam konversi termal biomassa adalah gasifikasi, pembakaran langsung dan pirolisis. Dari beberapa model konversi biomassa, Teknik pirolisis memberikan keuntungan konversi biomassa menjadi biofuel dimana hasil utamanya berupa bahan bakar gas, bahan bakar minyak dan bahan bakar padat sehingga memudahkan terkait penyimpanannya [11]. Produk/hasil pirolisis sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang utama adalah asal mula biomassa dan kondisi operasi seperti suhu reaksi, waktu tinggal dan laju pemanasan. Oleh karena itu, pemahaman dan pengetahuan mendalam tentang sifat termal dan parameter kinetiknya penting sehingga memungkinkan untuk merancang reaktor secara tepat [12].

Tujuan penelitian ini adalah untuk menyajikan karakteristik termal dan parameter kinetik sutra jagung selama

proses pirolisis melalui analisa thermogravimetric (TG). Parameter kinetic dianalisis menggunakan model vyazovkin. Pengembangan hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadikan sutra jagung sebagai salah satu bahan pengganti bahan bakar fosil yang semakin berkurang ketersediaannya, baik dalam bentuk bahan bakar minyak, gas maupun bahan bakar padat.

MATERIAL DAN METODELOGI

Pada penelitian ini sampel sutra jagung diperoleh dari desa Badas, kecamatan Kediri, Jawa Timur, Indonesia. Proses pengeringan sampel dilakukan dengan menggunakan oven pada 100 °C selama 90 menit. Sampel kering digiling dan diayak untuk mencapai ukuran mesh 60. Serbuk dari sutera jagung kemudian disimpan dalam botol tertutup rapat. Sebelum uji TG, karakterisasi dalam kaitannya dengan sifat kimia dan fisiknya di tunjukan pada Gambar 1



Gambar 1. Komposisi Kimia Sutra Jagung

Gambar 1 mengungkapkan bahwa nilai kandungan karbon dan oksigen sangat tinggi atau memiliki nilai dominan. Kandungan karbon rambut jagung (*Corn Silk*) adalah 46 wt% dan kandungan

oksigen sebesar 46 wt%. kedua elemen ini secara signifikan akan mempengaruhi kinerja pembakaran biomassa. Karbon adalah kontributor utama pembangkit energi bahan bakar karena akan direaksikan dengan oksigen melalui reaksi eksotermik yang menghasilkan karbon dioksida dan melepaskan sejumlah energi. Sementara itu oksigen yang dilepaskan selama degradasi termal bahan biomassa sebagai pengoksidasi yang mengarah pada peningkatan reaktivitas bahan. Oleh karena itu, kandungan Karbon dan Oksigen yang tinggi dalam biomassa rambut jagung telah menunjukkan potensinya sebagai bahan bakar. Selain itu, dilihat dari unsur anorganik, kandungan kalium (K) yang besar dalam rambut jagung akan berkontribusi pada penurunan titik lebur abu dalam sistem pembakaran biomassa. (Sumarli, 2019).

Analisis Termogravimetri

Analisa termogravimetri dilakukan dengan menggunakan alat METTLER TOLEDO TGA / DSC1 dengan laju pemanasan 40 °C/menit. Laju pemanasan yang tinggi menjadi faktor terjadinya gradien suhu besar pada sampel, sehingga berpengaruh pada kinetika reaksi [4]. Teknik pirolisis dari suhu ruangan hingga 900 °C, nitrogen terus dialirkan ke ruangan dengan laju konstan/tetap 50 ml/menit. Sampel dengan kisaran 10 mg ditimbang dan diletakan dalam wadah untuk mengurangi efek gradien suhu selama konversi termal. Komputer yang bekerja terhubung dengan tungku sehingga akan tercatat hilangnya massa sampel selama konversi termal sebagai fungsi suhu dan waktu.

Selanjutnya, kurva TG didapat, dan kurva diferensial termogravimetri (DTG) akan dihasilkan dari turunan pertama TG. Berdasarkan kedua kurva TG-DTG, maka perilaku termal dan parameter karakteristik dari pirolisis sutra jagung ditentukan.

Model Kinetik

Laju reaksi sifat padat dalam proses konversi dimodelkan dengan persamaan Arrhenius:

$$\frac{da}{dt} = k(T)f(\alpha) = Ae^{\frac{-E}{RT}}f(\alpha) \quad (1)$$

di mana t menunjukkan waktu (menit), $k(T)$ menunjukkan konstanta laju terhadap suhu, $f(\alpha)$ menunjukkan fungsi konversi suhu-independen, A adalah faktor pra-eksponensial (s^{-1}), E menunjukkan energi aktivasi (kJ / mol), dan T adalah suhu reaksi absolut (Kelvin).

Konversi (α), terkait kehilangan massa pada sampel dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$\alpha = 1 - \frac{xt - xf}{xi - xf} = \frac{xi - xt}{xi - xf} \quad (2)$$

Dimana, xi (massa sampel awal), xt (massa sampel yang tersisa pada waktu) (t), dan xf (massa akhir sampel dari proses reaksi).

Reaksi non-isotermal, perubahan suhu berkaitan dengan bertambahnya waktu yang menunjukkan laju pemanasan, $\frac{dT}{dt} = \beta$. Mensubstitusikan Persamaan (1) dengan $dt = \frac{dT}{\beta}$ dan kemudian dengan mendefinisikan model reaksi urutan ke-n menjadi bentuk non isotermal sebagai berikut:

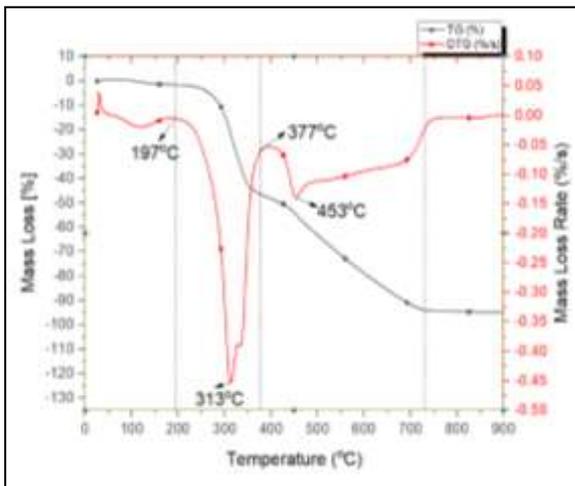
$$\frac{da}{(1-a)^n} = \frac{A}{\beta} e^{\frac{-E}{RT}} dT \quad (3)$$

Sesuai dengan Persamaan (3), selanjutnya, parameter kinetik dari konversi termokimia padat dapat dievaluasi.

Untuk setiap nilai konversi (α), $\ln \frac{\beta}{T^2}$ di plot terhadap $1/T$ diperoleh garis lurus dengan slope $-E/R$. Dengan demikian, E diperoleh sebagai fungsi dari konversi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang didapat dari proses pirolisis sutra jagung dengan variasi laju pemanasan (*heating rate*) 40°C/menit ditunjukkan pada Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2. Kurva TG dan DTG pirolisis sutra jagung dengan laju pemanasan 40°C/menit.

Pada Gambar 2 yang menunjukkan kurva TG-DTG terlihat terjadi tiga tahap degradasi termal yaitu tahap I adalah tahap kehilangan kadar air, tahap II adalah devolatilisasi dan tahap yang terakhir adalah zona dekomposisi lambat. Tahap I diketahui bahwa pada kisaran suhu 90-190°C merupakan hilangnya kadar air yang cepat ditunjukkan dengan adanya puncak pada kurva DTG. Menurunnya garis kurva TG juga menunjukkan proses dehidrasi atau kehilangan kadar air yang cukup banyak sejalan dengan peningkatan suhu. Garis menurun Kurva TG ini kemudian diikuti dengan garis datar pada kisaran suhu 190-200 °C yang menunjukkan bahwa proses penguapan telah selesai.

Tahap kedua yaitu devolatilisasi atau pelepasan volatil ditunjukkan pada kisaran suhu 100-155 °C dengan garis menurun kurva TG. Pada kisaran suhu 250-400 °C terlihat kemiringan yang tajam pada kurva TG dan cekungan yang menonjol pada kurva DTG dapat dikaitkan dengan terjadinya reaksi termokimia kompleks. Pada kurva DTG ditemukan dua puncak cekungan dimana puncak pertama pada kisaran suhu 309°C dan puncak kedua pada kisaran suhu 341°C. puncak pertama

dapat dikaitkan dengan degradasi hemiselulosa dan puncak tertinggi dikaitkan dengan dekomposisi selulosa.

Pada Tahap III terlihat kurva TG yang relatif datar pada kisaran suhu 558-900 °C. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan dekomposisi lignin yang sangat lambat, Karena reaktivitas termal lignin lebih rendah daripada hemiselulosa dan selulosa, karena hal tersebut lignin didekomposisi dalam rentang suhu yang besar (15).

Efek *Heating Rate* (Laju Pemanasan)

Pada Gambar 2 Terlihat temperatur puncak dekomposisi yang ditunjukkan kurva DTG, dimana temperatur puncak pada terjadi pada tahap kedua pada temperatur 313 °C. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan laju kehilangan kandungan air dan proses devolatilisasi dan secara otomatis akan memberikan efek terhadap peningkatan temperatur puncak dekomposisi ke temperatur yang lebih tinggi. [13][14]. Nilai temperature puncak dokomposisi pirolisis ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Pergeseran temperatur puncak pirolisis sutra jagung (CS) dengan heat 40°C/menit

Parameter Kinetik					
β	T_o	T_b	T_m	M_m	Total
	(°C)	(°C)	(°C)	(%/s)	mass loss (%)
40	183	510	331	0.47	71.37

Temperatur puncak dekomposisi pirolisis sutra jagung (CS) berdasarkan variasi heating rate 40°C/menit

Tahap	T puncak dekomposisi (°C)
1	143
2	313

Secara umum pirolisis terbagi menjadi tiga tahap yaitu tahap dehidrasi, tahap devolatilisasi awal dan ketiga devolatilisasi akhir. Pada kurva DTG dan TG tahap pertama terjadi pada rentang temperatur kisaran 65 sampai 130 °C dimana terjadinya pelepasan kadar air yang sangat cepat ditunjukkan oleh garis menurun kurva TG dikarenakan peningkatan yang sejalan dengan penguapan air.

Zona pirolisis aktif (tahap kedua) ditunjukkan dengan garis yang menurun tajam pada kisaran temperatur 216 sampai 373 °C pada kurva TG. Pada tahap ini terjadi pemecahan melalui reaksi kimia kompleks dan berkurangnya gas yang tidak dapat dikondensasikan. Zona pirolisis pasif (tahap ketiga) ditunjukkan pada kurva TG yang relative datar pada kisaran suhu 525-900 °C. Pada tahap ketiga menunjukkan bahwa dekomposisi sisa zat padat terjadi. [16][17].

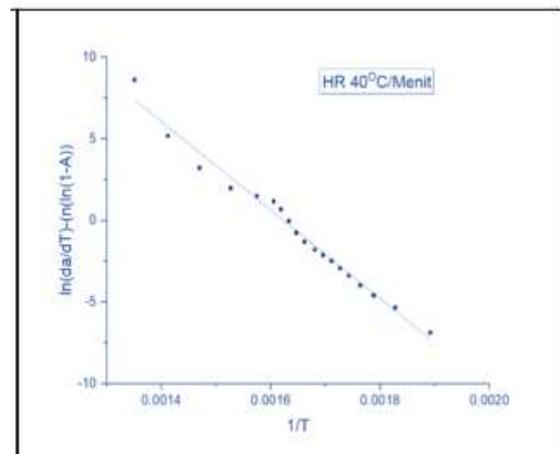
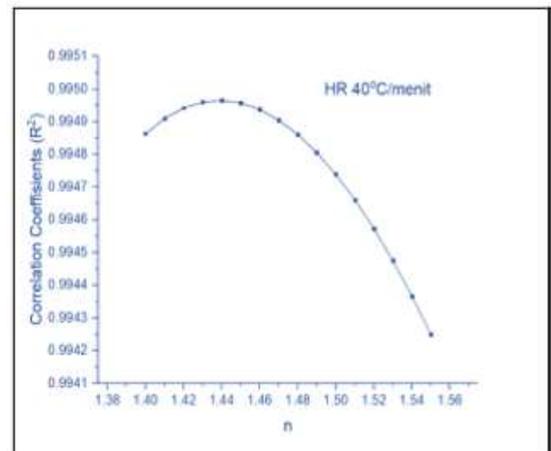
Analisis Parameter Kinetika

Parameter kinetik diimplementasikan pada zona/tahap kedua, di mana degradasi termal material sampel telah terjadi. berdasarkan kurva TG-DTG, dapat ditentukan parameter kinetik untuk pirolisis sutra jagung yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Menentukan model reaksi urutan ke-n. Persamaan laju akhir dari metode Arrhenius dapat diperoleh dengan logaritma Persamaan (3). Persamaan Arrhenius menyatakan laju reaksi menjadi persamaan linear [17] sebagai berikut:

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) - n \ln(1 - \alpha) = \ln\left(\frac{A}{\beta}\right) - \frac{E}{RT} \quad (4)$$

Tabel 3. Parameter kinetik dari pirolisis sutra jagung dengan laju pemanasan 40°C/menit



Gambar 3. Kurva $R^2 - n$ dan Regresi linier dari plot $\ln(d\alpha/dT) - n \ln(1 - \alpha)$ versus $(1/T)$.

Pada Gambar 3 kurva $R^2 - n$ menunjukkan R^2 tertinggi 0.9948 untuk sutra jagung dengan laju pemanasan 40 °C/menit dengan nilai n 4.99 secara berurutan. Gambar diatas juga menunjukkan nilai n yang paling tepat maka plot akhir dari $\ln(d\alpha/dT) - n \ln(1 - \alpha)$ versus $(1/T)$.

Analisis energi aktivasi (Ea) model Vyazovkin

Tabel 4. Parameter kinetika pada tahap kedua sutra jagung dengan metode Arrhenius

β (°C/ min)	Trendline equation	R^2	Parameter Kinetik		
			Ea (kJ/ mol)	$\log A$ (1/ min)	n
40	$y = -25685.7 + 41.400x$	0.9948	222.72	19.55	4.99

Tabel 4 menunjukkan nilai parameter kinetika rambut jagung menggunakan model perhitungan fitting Arrhenius. Pada perhitungan model Arrhenius diketahui nilai energi aktivasi pada pembakaran rambut jagung dengan laju pemanasan 40 °C/menit sebesar 222,72 kJ/mol. Nilai energi aktivasi pada pirolisis rambut jagung dengan laju pemanasan 40 °C/menit sebesar 222,72 yang menunjukkan bahwa energi aktivasi (Ea) tinggi pada laju pemanasan tersebut. Hal tersebut mendukung pemahaman bahwa nilai (Ea) energi aktivasi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu laju pemanasan (*heating rate*), jenis dari biomassa, ukuran partikel pada sampel, jenis TGA dan model kinetika yang dipakai/digunakan.

Model Vyazovkin

Pada model Vyazovkin ini dalam menghitung energi aktivasi ditunjukkan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\ln \frac{\beta}{T^2} = \ln \left[\frac{RA}{Eg(a)} \right] - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

Tabel 5. Energi aktivasi berdasarkan perhitungan model Vyazovkin

Konve rsi/%	Vyazovskin		
	Slope	Ea (KJ/mol)	R^2
10	-17.5582	145.978	0.9999
20	-20.4605	170.108	0.9981
30	-21.1526	175.862	0.9992
40	-24.9003	207.021	0.9929
50	-23.6638	196.741	0.9976
60	-25.2194	209.673	0.9921
70	-26.8685	223.384	0.9949
80	-36.4908	303.384	0.9657
90	-36.9888	307.524	0.9892
Rata- Rata		215.522	

Pada Tabel 5 Nilai energi aktivasi menggunakan perhitungan model bebas isoconvensional FWO dan Vyazovkin menunjukkan peningkatan nilai energi aktivasi seiring meningkatnya nilai konversi dimulai dari nilai konversi 10 sampai 90 dimana energi aktivasi meningkat 145,978 KJ sampai kisaran 307,524 KJ/mol dengan rata-rata nilai energi aktivasi sebesar 215.522 KJ/mol untuk perhitungan model Vyazovkin. Hal ini dapat dikaitkan pada proses terjadinya degradasi lignin dimana lignin terdiri dari benzena-propana yang memiliki stabilitas termal sangat tinggi, yang akan memberikan efek terhadap laju reaksi dan mengakibatkan energi aktivasi semakin meningkat [18][19] [20].

KESIMPULAN

Hasil Penelitian menunjukkan bahwa pada grafik sifat kimia sutra jagung mengungkapkan bahwa nilai kandungan karbon dan oksigen sangat tinggi atau memiliki nilai dominan. Kandungan karbon rambut jagung (*Corn Silk*) adalah 46 wt% dan kandungan oksigen sebesar 46 wt%. kedua elemen ini secara signifikan akan mempengaruhi kinerja pembakaran biomassa. Karbon adalah kontributor utama pembangkit energi bahan bakar

karena akan direaksikan dengan oksigen melalui reaksi eksotermik yang menghasilkan karbon dioksida dan melepaskan sejumlah energi. Sementara itu oksigen yang dilepaskan selama degradasi termal bahan biomassa sebagai pengoksidasi yang mengarah pada peningkatan reaktivitas bahan. Oleh karena itu, kandungan Karbon dan Oksigen yang tinggi dalam biomassa rambut jagung telah menunjukkan potensinya sebagai bahan bakar. Selain itu, dilihat dari unsur anorganik, kandungan kalium (K) yang besar dalam rambut jagung akan berkontribusi pada penurunan titik lebur abu dalam sistem pembakaran biomassa. Kurva TG dan DTG menunjukkan proses pirolisis terbagi menjadi tiga tahap. Tahap pertama proses dehidrasi/saat sampel kehilangan kandungan air, kedua terjadinya reaksi kimia kompleks (zona aktif) dan ketiga dekomposisi sisa zat padat yang terjadi (zona pasif). Hasil Analisis kinetika dengan perhitungan model Vyazovkin nilai energi aktivasinya sebesar 215.522 KJ/mol.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Khan, W. De Jong, P. J. Jansens, and H. Spliethoff, "Biomass combustion in fluidized bed boilers : Potential problems and remedies," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 1, pp. 21–50, 2008.
- [2] M. Gopiraman, D. Deng, B. S. Kim, I. M. Chung, and I. S. Kim, "Three-dimensional cheese-like carbon nanoarchitecture with tremendous surface area and pore construction derived from corn as superior electrode materials for supercapacitors," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 409, pp. 52–59, 2017.
- [3] S. Sumarli, C. U. S. B. K. Himawan, R. Wulandari, and S. Sukarni, "Physicochemical characteristics of corn silk as biomass fuel feedstock," in *Proceeding of International Conference on Condensed Matters and Advanced Materials*, 2018.
- [4] X. Lopez, R., Fernandez, C., Gomez, "Thermogravimetric analysis of lignocellulosic and microalgae biomasses and their blends during combustion," *J Therm Anal Calorim*, no. 10.1007/s10973-012-2843-z, 2012.
- [5] S. Sudjito and N. Hamidi, "Potential and properties of marine microalgae *Nannochloropsis oculata* as biomass fuel feedstock," pp. 279–290, 2014.
- [6] BPS, Luas Panen Jagung Menurut Provinsi, 2013 - 2017, (2017). http://www1.pertanian.go.id/ap_pages/mod/datatp.
- [7] K. L. E. Sarepoua, R. Tangwongchai, B. Suriharn, "Relationships between phytochemicals and antioxidant activity in corn silk," vol. 20, no. 5, pp. 2073–2079, 2013.
- [8] N. Aukkanit, T. Kemngoen, and N. Pohnarn, "Utilization of Corn Silk in Low Fat Meatballs and Its Characteristics," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 197, no. February, pp. 1403–1410, 2015.
- [9] R. Chaiittianan, P. Chayopas, A. Rattanathongkom, P. Tippayawat, and K. Sutthanut, "Anti-obesity potential of corn silks : Relationships of phytochemicals and antioxidation , anti-pre-adipocyte proliferation , anti-adipogenesis , and lipolysis induction," *J. Funct. Foods*, vol. 23, pp. 497–510, 2016.
- [10] Y. Pan, C. Wang, Z. Chen, W. Li, G. Yuan, and H. Chen, "Physicochemical properties and antidiabetic effects of a polysaccharide from corn silk in high-fat diet and streptozotocin-induced diabetic mice," *Carbohydr. Polym.*, vol. 164, pp. 370–378, 2017.
- [11] I. Ali, H. Bahaitham, and R. Naibulharam, "A comprehensive kinetics study of coconut shell waste pyrolysis," *Bioresour. Technol.*, no. March, 2017.
- [12] S. Sumarli, C. U. S. B. K. Himawan, R. Wulandari, and S. Sukarni, "Thermogravimetric analysis and the fitting model kinetic evaluation of corn silk thermal decomposition under an inert atmosphere," in *Proceeding of International Conference Mechanical Engineering Research and Application*, 2018.
- [13] T. Damartzis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis, and A. Zabaniotou, "Bioresource Technology Thermal

- degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA),” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 10, pp. 6230–6238, 2011.
- [14] F. Collard and J. Blin, “A review on pyrolysis of biomass constituents : Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose , hemicelluloses and lignin,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 594–608, 2014.
- [15] M. Muthuraman, T. Namioka, K. Yoshikawa, A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste, *Bioresour. Technol.* 101 (2010) 2477–2482.
doi:10.1016/j.biortech.2009.11.060.
- [16] A. Zabaniotou, O. Ioannidou, E. Antonakou, and A. Lappas, “Experimental study of pyrolysis for potential energy , hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass,” *Int J Hydrog. Energy*, vol. 33, pp. 2433–2444, 2008.
- [17] K. Açıkalın, “Pyrolytic characteristics and kinetics of pistachio shell by thermogravimetric analysis,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 227–235, 2012.
- [18] Z. Ma, D. Chen, J. Gu, B. Bao, and Q. Zhang, “Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA – FTIR and model-free integral methods,” *ENERGY Convers. Manag.*, vol. 89, pp. 251–259, 2015.
- [19] H. Yang, R. Yan, T. Chin, D. T. Liang, H. Chen, and C. Zheng, “Thermogravimetric Analysis - Fourier Transform Infrared Analysis of Palm Oil Waste Pyrolysis,” *Energy Fuels*, vol. 11, no. December 1996, pp. 1814–1821, 2004.
- [20] D. Vamvuka, E. Kakaras, E. Kastanaki, and P. Grammelis, “Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite q,” *Fuel*, vol. 82, pp. 1949–1960, 2003.