

Studi Kinetika dan Energi Aktivasi pada Proses Pirolisis Makroalga *Ulva Lactuca* (Selada Laut)

I Wayan Arya Darma^{1)*}, I Gusti Ngurah Putu Tenaya²⁾

^{1,2)}Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran, Bali 80362

Email: aryadarma@unud.ac.id, ngrtenaya@unud.ac.id

doi: <https://doi.org/10.24843/METTEK.2022.v08.i02.p10>

Abstrak

Energi yang bersumber dari bahan bakar fosil merupakan komoditas penting bagi pembangunan ekonomi dan berkelanjutan. Namun, peningkatan populasi dan industrialisasi telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap inflasi permintaan energi secara global yang mengarah pada konsumsi sumber daya energi yang tidak terkendali. Oleh karena itu dibutuhkan alternatif pengganti bahan bakar fosil yang terbarukan dan berkelanjutan. Sumber bahan bakar alternatif salah satunya adalah biomassa seperti makroalga *Ulva Lactuca* yang memiliki kandungan utama protein, karbohidrat dan triasilgliserol dimana melalui teknik pirolisis dapat diproses menjadi bio-oil. Pada penelitian ini telah dilakukan pengujian proses pirolisis makroalga *Ulva Lactuca* dengan tujuan mengetahui laju kinetika dan besaran energi aktivasinya. Instrumen pada pengujian ini menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA). *Ulva Lactuca* yang sudah kering dicacah menjadi butiran-butiran halus dengan ukuran mesh 60, selanjutnya dikeringkan dalam oven listrik pada temperatur 110°C selama 4 jam kemudian dilakukan pengujian pada TGA pada heating rate berbeda: 10, 20 dan 30 K.menit⁻¹ dengan temperatur maksimum 1224 K. Hasil penelitian menunjukkan dengan metode laju kinetika menggunakan alat uji TGA dapat menentukan besarnya energi aktivasi. Pada pirolisis makroalga *Ulva Lactuca* menunjukkan energi aktivasi terendah dicapai pada heating rate 20 K.menit⁻¹ dengan nilai 5.508,607 [KJ.mol⁻¹].

Kata kunci: Energi aktivasi, laju kinetika, pirolisis, *ulva Lactuca*

Abstract

*Energy sourced from fossil fuels is an important commodity for economic and sustainable development. However, increasing population and industrialization have contributed significantly to global energy demand inflation leading to uncontrolled consumption of energy resources. Therefore, an alternative to renewable and sustainable fossil fuels is needed. One of the alternative fuel sources is the *Ulva Lactuca* macroalgae biomass which has the main protein content, carbohydrates and triacylglycerol which through pyrolysis techniques such as bio-oil. In this study, the pyrolysis process of *Ulva Lactuca* was tested with the aim of knowing the kinetics rate and the amount of activation energy. The instrument in this test uses Thermogravimetric Analysis (TGA). *Ulva Lactuca* was chopped into fine granules with a mesh size of 60, then dried in an oven at 110°C for 4 hours then tested on TGA at different heating rates: 10, 20 and 30 K.min⁻¹ with maximum temperature 1224 K. The results showed the rate kinetics method using the TGA test could determine the amount of activation energy. In the pyrolysis of *Ulva Lactuca*, the lowest activation energy was achieved at a heating rate of 20 K.min⁻¹ with a value of 5.508.607 [KJ.mol⁻¹].*

Keywords: Activation energy, kinetic rate, , pyrolysis, *ulva Lactuca*

1. PENDAHULUAN

Energi yang bersumber dari bahan bakar fosil merupakan komoditas penting bagi pembangunan ekonomi dan berkelanjutan. Namun, peningkatan populasi dan industrialisasi telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap inflasi permintaan energi secara global yang mengarah pada konsumsi sumber daya energi yang tidak terkendali [1]. Hal ini telah menyebabkan *irreversibel effects* seperti menipisnya bahan bakar fosil dengan cepat dan juga merusak lingkungan. Oleh karena itu dibutuhkan alternatif pengganti bahan bakar fosil yang terbarukan dan berkelanjutan [2]. Salah satunya adalah biomassa. Energi biomassa menjadi sumber energi terbarukan yang penting dan menunjukkan aplikasi yang menjanjikan untuk memperoleh energi alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil serta dapat memainkan peran penting dalam ekonomi berbasis bio [3]. Energi biomassa dapat menjadi sumber energi ramah lingkungan dengan emisi CO₂ yang rendah, kandungan sulfur rendah serta bisa dikonversi menjadi bahan bakar dalam bentuk cair, padat, dan gas sehingga mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil [4]. Biomassa yang memiliki potensi untuk dijadikan bahan baku pirolisis salah satunya adalah makroalga.

Makroalga semakin diminati sebagai bahan baku biofuel generasi ketiga untuk mengkompensasi kekurangan penggunaan bahan baku biofuel generasi pertama atau kedua. Makroalga adalah sumber biomassa yang menjanjikan karena tingkat pertumbuhannya yang lebih cepat, siklus panen yang lebih cepat dan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan biomassa terestrial. Makroalga dapat tumbuh di air limbah, air laut, dan air tawar. Selain itu, kemampuan makroalga untuk tumbuh di lingkungan perairan mendukung budidaya skala besar di wilayah pesisir [5]. Makroalga termasuk ke dalam kelompok alga multiseluler yang tubuhnya berupa *thallus* yang tidak mempunyai batang, daun sejati dan akar. Kelompok alga ini umumnya hidup di perairan laut yang masih mendapatkan cahaya matahari, dengan cara melekat pada substrat yang keras. Makroalga yang berpotensi untuk dijadikan bahan bakar salah satunya adalah *Ulva Lactuca*. Dari segi bentuk, *Ulva Lactuca* memiliki *thalus* menyerupai lembaran halus dan pinggiran yang ikal berombak. Pada bagian thalusnya memiliki bentuk yang beragam dimana pada cabang pertama serta cabang yang kedua tumbuh seperti rumput yang rimbun. Makroalga memiliki kandungan utama seperti triasilgliserol, karbohidrat dan protein [6]. Salah satu teknologi yang bisa mengkonversi biomassa makroalga menjadi bahan bakar adalah melalui proses konversi termokimia, seperti pirolisis, gasifikasi dan pembakaran [7].

Proses pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia dari biomassa menjadi beberapa produk berguna dan berlangsung tanpa menggunakan oksigen. Pada saat proses pirolisis, ikatan molekul hidrokarbon (HC) yang besar dan kompleks akan terurai menjadi molekul lebih kecil yang berbentuk gas, cair, maupun arang serta reaksi dekomposisi terjadi dengan cepat dan memperpendek rantai dari hidrokarbon panjang agar mudah untuk dikondensasi menjadi bio-oil. Temperatur proses pirolisis biasanya dilakukan dalam kisaran 300^oC -650^oC . Besaran energi yang dibutuhkan untuk reaksi dekomposisi disebut dengan energi aktivasi yang merupakan perkiraan jumlah energi yang diperlukan dalam pirolisis untuk mengubah biomassa menjadi produk biochar, bio-oil dan gas. Pemahaman dan pengetahuan mengenai energi aktivasi sangat penting untuk memprediksi perilaku proses dan desain dari reaktor yang akan digunakan [8]. Energi aktivasi dapat ditentukan dengan melakukan analisis laju kinetika. Laju kinetika adalah laju perubahan energi aktivasi yang terjadi selama proses pirolisis yang merupakan jumlah energi minimum yang dibutuhkan untuk mengaktifkan molekul biomassa agar terjadi dekomposisi termal. Perubahan akibat dekomposisi termal dapat diukur dari perubahan massa biomassa atau volume produk pirolisis yang dihasilkan.

Pengujian laju kinetika selama proses pirolisis, dapat menggunakan reaktor pirolisis atau menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA) [9]. Analisis laju kinetika dapat ditentukan menggunakan rumusan yang terdapat dalam beberapa macam metode [10].

2. BAHAN DAN METODE

2.1. Bahan

Ulva Lactuca sebagai bahan dalam penelitian ini didapatkan dari pesisir pantai Sanur, Kota Denpasar Provinsi Bali. Ulva Lactuca yang sudah kering dicacah menjadi butiran-butiran halus dengan ukuran mesh 60, selanjutnya dikeringkan dalam oven listrik pada temperatur 110°C selama 4 jam untuk mengurangi moisture-nya. Pengujian Proximate untuk mengetahui kandungan air (*moisture*), *volatiles*, *fixed carbon* dan *ash* menggunakan alat uji TGA-701 (LECO), dengan mengikuti standar ASTM D7582 MVA BIOMASS. Berikut hasil pengujian Proximate Analysis Ulva Lactuca ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Proximate analysis ulva lactuca

Jenis pengujian	Nilai hasil pengujian (%)
<i>Moisture</i>	9,05
<i>Volatile</i>	70,38
<i>Fixed Carbon</i>	7,87
<i>Ash</i>	12,70

2.2. Metode Pengujian dan Laju Kinetika

Pengujian dilakukan menggunakan alat uji TGA-701 LECO yang dialirkan dengan gas nitrogen secara kontiniu pada laju aliran 20 mL.min⁻¹. Pengujian terhadap 1 gram sampel biomassa dilakukan secara dinamis mulai pada suhu kamar sampai 923 K pada heating rate 10, 20 dan 30 K.min⁻¹. Data yang tercatat pada perangkat lunak TGA meliputi data massa, waktu dan temperatur. Penyiapan sampel dan alat uji TGA-701 LECO ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Penyiapan sampel dan alat uji TGA

2.3. Model Kinetika

Salah satu model laju kinetika yang bisa diterapkan dalam proses pirolisis biomassa adalah *One Stage Global Single Reactions*. Proses pirolisis pada model ini dimodelkan seperti reaksi satu langkah dimana diasumsikan bahwa biomassa mengalami dekomposisi secara keseluruhan menjadi produk berupa *volatile* dan *ash*. Analisis laju kinetika dilakukan berdasarkan tingkat perubahan massa yang diukur secara eksperimental dimana laju pirolisis tergantung pada massa biomassa yang tidak terdekomposisi. Model kinetika berdasarkan perubahan massa biomassa dirumuskan dengan persamaan 1.

$$k = \left(\frac{m_0 - m}{m_0 - m_f} \right) \quad (1)$$

dimana k adalah *rate constant* (s^{-1}), m_0 adalah nilai dari massa awal, m_f adalah nilai dari massa akhir dan m adalah perubahan massa yang terjadi setiap saat pengukuran. Kemudian, dilakukan penggantian k yang mirip dengan persamaan *Arrhenius* sehingga k dapat dinyatakan dengan persamaan 2.

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

dimana A merupakan pre-exponential factor (menit^{-1}), E_a menunjukkan energi aktivasi ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), R menunjukkan konstanta gas ($8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) dan T menunjukkan Temperatur (K). Untuk mendapatkan nilai energi aktivasi dan pre exponential factor maka persamaan 2 diatas dirubah dalam bentuk logaritma natural (\ln) sehingga menjadi persamaan garis lurus yang ditunjukkan pada persamaan 3.

$$\ln k = \left(\frac{-E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln A\right) \quad (3)$$

$$y = mx + c \quad (4)$$

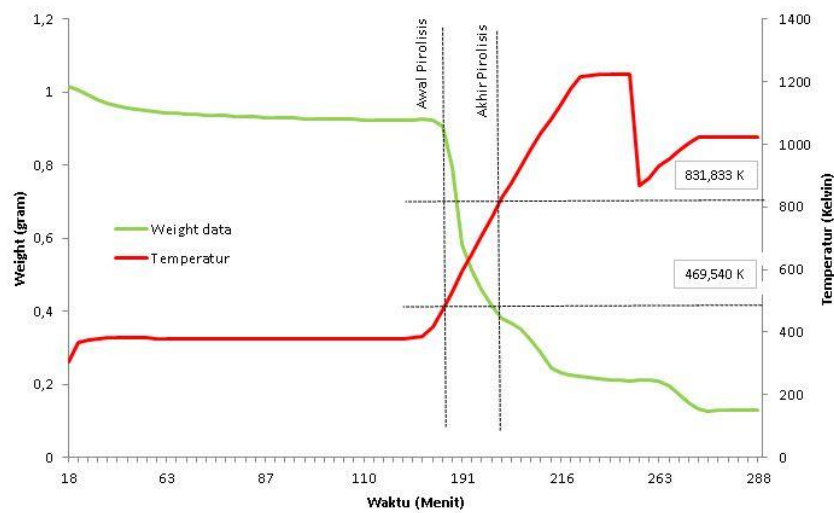
Persamaan 4 diatas merupakan persamaan garis lurus hasil konversi persamaan 3. Nilai energi aktivasi dapat dihitung berdasarkan slope/gradien (m) persamaan tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Thermogravimetric Analysis

Perubahan wujud makroalga *ulva lactuca* dari fase solid menjadi fase gas disebabkan karena dekomposisi termal yang terjadi pada proses pirolisis. Gas yang dihasilkan selanjutnya didinginkan sehingga menjadi produk dalam bentuk cair atau lebih dikenal dengan bio-oil. Selama proses pirolisis berlangsung terjadi penurunan massa dikarenakan ada perubahan dari fase padat menjadi fase gas. Perbandingan perubahan massa makroalga *ulva lactuca* setiap saat terhadap massa awalnya menjadi dasar penghitungan laju kinetika. Dekomposisi termal dari makroalga *ulva lactuca* terjadi melalui beberapa tahapan yaitu pemanasan, torefaksi, pirolisis, dan gasifikasi dimana tahapan tersebut tergantung pada temperatur proses. Untuk menentukan nilai temperatur proses pirolisis maka dapat dilakukan dengan menganalisis data pengujian proximate menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA).

Grafik dari hasil pengujian proximate menggunakan TGA ditunjukkan pada gambar 2. Pada grafik terlihat penurunan massa secara drastis terjadi pada rentang waktu antara 180 sampai 200 menit. Jika ditarik garis lurus vertikal lalu menyinggung titik kritis penurunan massa pada kurva *weight* maka garis tersebut akan memotong kurva temperatur. Selanjutnya pada titik perpotongan antara garis vertikal dengan kurva temperatur tersebut ditarik garis horizontal ke arah sumbu temperatur sehingga mendapatkan nilai temperaturnya. Dengan menggunakan cara tersebut dapat ditentukan nilai temperatur pada titik awal dan titik akhir perubahan massa. Hasil analisis menunjukkan bahwa proses pirolisis terjadi dalam waktu yang singkat pada rentang temperatur 469,540 K sampai 831,833 K. Hal ini dikarenakan *ulva lactuca* merupakan biomassa yang memiliki kandungan *volatile* cukup besar sehingga reaksi dekomposisi menjadi uap dapat terjadi dengan mudah. Hasil uji proximate makroalga *ulva lactuca*, pada Tabel 1, menunjukkan nilai kandungan *volatile* sebesar 70.38% sangat berpengaruh terhadap perilaku pirolisis. Pada grafik tersebut terlihat proses pengurangan kadar air (*moisture*) terjadi pada rentang waktu yang relatif lama, hal ini dikarenakan kandungan kadar airnya juga cukup tinggi yakni sebesar 9.05%.



Gambar 2. Grafik hasil uji TGA *ulva lactuca*

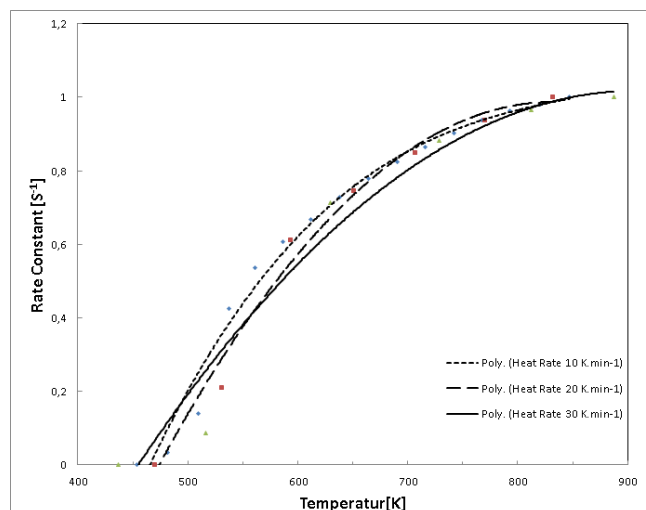
3.2. Rate Constant (*k*)

Dari nilai hasil uji data massa sampel *ulva lactuca* menggunakan TGA selanjutnya analisis laju kinetika dapat ditentukan dengan menghitung *rate constan* (*k*) dalam rentang temperatur pirolisis di atas. Nilai *rate constan* (*k*) dihitung menggunakan persamaan 1, berdasarkan data nilai perubahan massa terhadap temperatur selama proses pirolisis. Berikut contoh tabulasi data untuk menghitung rate constant yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabulasi data untuk menghitung *rate constant* pada *heating rate* 10 K.min⁻¹

Weight (data)	m ₀ -m	m ₀ -m _f	rate constan (k) k=(m ₀ -m)/(m ₀ -m _f)	Temperatur (Kelvin)
0,927442	0,000000	0,45710	0	453,94
0,912455	0,014987	0,45710	0,032786778	481,919
0,863964	0,063478	0,45710	0,138869625	509,642
0,732950	0,194492	0,45710	0,425486486	537,071
0,682014	0,245428	0,45710	0,536918214	560,874
0,649925	0,277517	0,45710	0,607118715	586,51
0,621815	0,305627	0,45710	0,668614432	612,022
0,594626	0,332816	0,45710	0,728095295	638,388
0,571588	0,355854	0,45710	0,778495094	664,455
0,551100	0,376342	0,45710	0,823316306	690,219
0,532107	0,395335	0,45710	0,864866934	715,718
0,514263	0,413179	0,45710	0,903903917	742,08
0,498974	0,428468	0,45710	0,937351374	767,643
0,48703	0,440412	0,45710	0,963481038	793,154
0,478523	0,448919	0,45710	0,982091642	820,619
0,470337	0,457105	0,45710	1	847,235

Pada penelitian ini pengujian dilakukan pada *heating rate* yang berbeda yaitu 10, 20 dan 30 K.min⁻¹. Hasil dari pengolahan data disajikan dalam bentuk grafik dengan pendekatan menggunakan regresi linier. Hasilnya diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik korelasi antara *rate constant* (k) berdasarkan perubahan massa terhadap temperatur selama pirolisis

Pada grafik terlihat kurva yang tersusun dari nilai *heating rate* 10, 20 dan paling atas 30 K.min⁻¹. Profil dari ketiga kurva memiliki bentuk yang mirip, pada *heating rate* 30 K.min⁻¹ memiliki nilai *rate constant* (k) yang rendah, ini bisa disebabkan karena perpindahan panas ke biomassa terjadi dalam waktu yang singkat sehingga panas tersebut belum cukup untuk memutuskan ikatan antar molekul pada biomassa sampai mencapai temperatur yang tinggi. Pada *heating rate* yang lebih rendah, pemanasan partikel biomassa makroalga *ulva lactuca* terjadi lebih bertahap dan menyebabkan perpindahan panas yang lebih baik ke bagian dalam komponen biomassa dan menyebabkan nilai *rate constant* (k) yang tinggi.

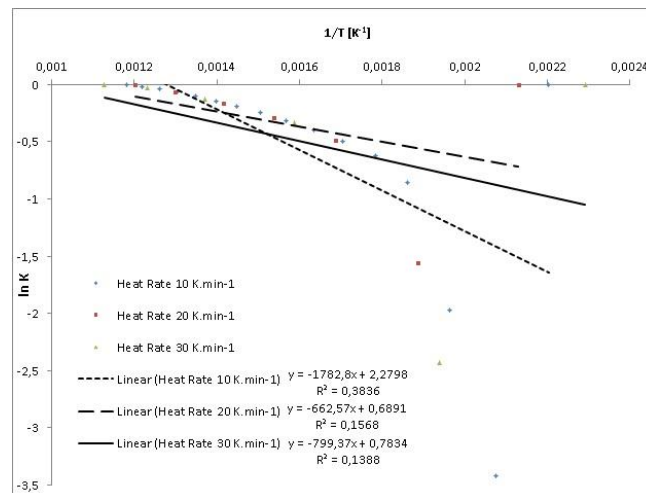
3.3. Energi Aktivasi (E_a)

Energi aktivasi dihitung menggunakan rumusan pada persamaan 4. Setelah melakukan penghitungan nilai k, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, maka dilakukan plotting grafik laju kinetika, dimana pada sumbu x menunjukkan nilai $1/T$ dan pada sumbu y menunjukkan nilai $\ln k$. Berikut contoh tabulasi data untuk menghitung $\ln k$ yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Tabulasi data untuk menghitung $\ln k$ pada heating rate 10 K.min⁻¹

$\ln k$	$1/T$
#NUM!	0,002202934
-3,417729965	0,002075038
-1,974219735	0,001962162
-0,854522093	0,001861951
-0,621909499	0,001782932
-0,499030931	0,001705001
-0,402547720	0,001633928
-0,317323339	0,001566445
-0,250392589	0,001504993
-0,194414819	0,001448816
-0,145179617	0,001397198
-0,101032211	0,001347564
-0,064697068	0,001302689
-0,037202471	0,001260789
-0,018070653	0,001218592
0,000000000	0,001180310

Grafik korelasi antara $\ln k$ dengan $1/T$ disajikan menggunakan regresi linier. Pada plotting data ditampilkan persamaan garis dan nilai korelasinya yang ditunjukkan pada grafik di Gambar 4.



Gambar 4. Laju kinetika menggunakan metode *One-Stage Global Single Reactions* pada pirolisis *ulva lactuca*

Pada grafik tersebut terdapat tiga garis lurus untuk masing-masing heating rate dengan gradien ke arah negatif yang merupakan suatu persamaan garis lurus. Adapun persamaannya yaitu $y = -1782,8 x + 2,2798$ untuk nilai *heating rate* 10 K.min^{-1} , $y = -662,57 x + 0,6891$ untuk nilai *heating rate* 20 K.min^{-1} dan $y = -799,37 x + 0,7834$ untuk nilai *heating rate* 30 K.min^{-1} .

Gradien (slope) dari persamaan diatas menunjukkan nilai dari komponen $-E_a/R$ pada persamaan 3, sehingga untuk memperoleh nilai besaran energi aktivasi maka nilai gradien (slope) dikali dengan R (konstanta gas $8,314 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$). Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan energi aktivasi (E_a)

Heating Rate [K.menit ⁻¹]	Slope	Energi aktivasi (E_a) [KJ.mol ⁻¹]	R ²
10	-1782,8	14.822,199	0,3836
20	-662,57	5.508,607	0,1568
30	-799,37	6.645,9622	0,1388
Rata-rata		8.992,2561	

Energi aktivasi pada masing-masing *heating rate* menunjukkan nilai yang berbeda. Nilai terbesar terjadi pada *heating rate* 10 K.menit^{-1} sebesar $14.822,199 \text{ KJ.mol}^{-1}$ sedangkan nilai terkecil pada *heating rate* 20 K.menit^{-1} sebesar $5.508,607 \text{ K.menit}^{-1}$. Rata-rata energi aktivasi pada pirolisis *ulva lactuca* sebesar $8.992,2561 \text{ KJ.mol}^{-1}$. Nilai energi aktivasi yang besar terjadi pada nilai *heating rate* 10 K.menit^{-1} , ini dikarenakan reaksi dekomposisi pirolisis dan proses perpindahan panas dari permukaan sampel *ulva lactuca* ke bagian dalam sampel *ulva lactuca* terjadi lebih lambat untuk memutuskan ikatan antar molekul pada sampel akibatnya membutuhkan waktu lebih lama untuk perubahan fase padat menjadi gas sehingga energi yang diperlukan untuk memulai reaksi juga semakin besar.

4. SIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis laju kinetika melalui eksperimen pada *heating rate* berbeda: 10, 20 dan 30 K.menit⁻¹ yang bertujuan untuk mengetahui besaran energi aktivasi yang terjadi pada proses pirolisis makroalga *Ulva Lactuca*. Adapun hasil yang diperoleh yaitu:

1. Kandungan *volatile* pada makroalga *ulva lactuca* cukup tinggi sehingga berpotensi untuk diproduksi menjadi bio-oil.
2. Analisis laju kinetika untuk mengetahui energi aktivasi dapat dilakukan dengan pengolahan data hasil pengujian menggunakan Thermogravimetric Analysis (TGA)
3. Data kinetika yang diperoleh pada pengujian ini berguna di dalam pemodelan, perancangan, dan pengembangan sistem pirolisis untuk pengolahan makroalga *ulva lactuca* menjadi bio-oil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada penyandang dana DIPA PNBP LPPM Universitas Udayana TA-2022

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, and N. Aghili, "The scenario of greenhouse gases reduction in Malaysia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, no. December 1997, pp. 400–409, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.045.
- [2] X. Ku, H. Jin, and J. Lin, "Comparison of gasification performances between raw and torrefied biomasses in an air-blown fluidized-bed gasifier," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 168, pp. 235–249, 2017, doi: 10.1016/j.ces.2017.04.050.
- [3] D. Pant *et al.*, "Towards the development of a biobased economy in Europe and India," *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 39, no. 6, pp. 779–799, 2019, doi: 10.1080/07388551.2019.1618787.
- [4] R. K. Mishra and K. Mohanty, "Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 251, no. October 2017, pp. 63–74, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.12.029.
- [5] Uffenorde and Much, "Eine kriegsepidemiologische Beobachtung. I. Klinischer Teil," *Dtsch. Medizinische Wochenschrift*, vol. 44, no. 3, pp. 57–59, 1918, doi: 10.1055/s-0028-1134195.
- [6] X. J. Lee, H. C. Ong, Y. Y. Gan, W. H. Chen, and T. M. I. Mahlia, "State of art review on conventional and advanced pyrolysis of macroalgae and microalgae for biochar, bio-oil and bio-syngas production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 210, no. December 2019, p. 112707, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112707.
- [7] M. Patel, X. Zhang, and A. Kumar, "Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 1486–1499, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.070.
- [8] H. Yang *et al.*, "Estimation of enthalpy of bio-oil vapor and heat required for pyrolysis of biomass," *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 5, pp. 2675–2686, 2013, doi: 10.1021/ef400199z.
- [9] C. Quan, N. Gao, and Q. Song, "Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and product characterization," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 121, pp. 84–92, 2016, doi: 10.1016/j.jaap.2016.07.005.
- [10] R. M. R. Wellen and E. L. Canedo, "On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET," *Polym. Test.*, vol. 40, pp. 33–38, 2014, doi: 10.1016/j.polymertesting.2014.08.008.