

CO-PIROLISIS MIKROALGA HIJAU (*Botryococcus braunii*) DAN VICTORIAN BROWN COAL DENGAN VARIASI LAJU PEMANASAN MENGGUNAKAN THERMOGRAVIMETRIC ANALYSER

CO-PYROLYSIS OF GREEN MICROALGA (*Botryococcus braunii*) AND VICTORIAN BROWN COAL WITH THE VARIATIONS OF HEATING RATE BY USING THERMOGRAVIMETRIC ANALYSER

Wardina Masdalifa¹, RR Dirgarini Julia Nurlianti Subagyono^{1*}, Veliyana Londong Allo¹, dan Rudy Agung Nugroho²

¹Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jalan Barong Tongkok No. 4 Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Indonesia

²Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jalan Barong Tongkok No. 4 Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Indonesia

*Corresponding Author: E-mail: dirgarini@fmipa.unmul.ac.id

ABSTRACT

The study on co-pyrolysis of *Botryococcus braunii* and Victorian brown coal using a thermogravimetric analyzer has been carried out. This research aims to study the potential of a mixture of *Botryococcus braunii* and Victorian brown coal as a fuel source. Co-pyrolysis was carried out with four variations of heating rate, namely 10, 15, 20 and 25 C/min using a Thermogravimetric Analyzer (TGA). The temperature of the active co-pyrolysis reaction of *Botryococcus braunii* and Victorian brown coal ranged from 155.79 °C to 545.27 °C, which occurred in three stages. The first stage was the evaporation of water and volatile compounds (20-200 °C), the second stage was the active co-pyrolysis (250-500 °C) and the third stage was the decomposition of lignin and carbon compounds contained in the mixture (500-800 °C).

Keyword: co-pyrolysis, TGA, *Botryococcus braunii*, Victorian brown coal.

ABSTRAK

Studi reaksi co-pirolisis mikroalga *Botryococcus braunii* dan Victorian brown coal dengan thermogravimetric analyser telah dilakukan. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari potensi dari campuran *Botryococcus braunii* dan Victorian brown coal sebagai sumber bahan bakar. Co-pirolisis dilakukan dengan empat variasi laju pemanasan yaitu 10, 15, 20 dan 25 °C/menit menggunakan Thermogravimetric Analyzer (TGA). Rentang suhu reaksi co-pirolisis aktif *Botryococcus braunii* dan Victorian brown coal berkisar antara 155,79 °C hingga 545,27 °C yang terjadi dalam tiga tahapan. Tahapan pertama adalah penguapan air dan senyawa volatil (20-200 °C), tahapan kedua yaitu co-pirolisis aktif (250-500 °C) dan tahapan ketiga yaitu dekomposisi lignin dan senyawa karbon yang terkandung dalam campuran mikroalga dan batubara (500-800 °C).

Kata Kunci: co-pirolisis, TGA, *Botryococcus braunii*, Victorian brown coal.

PENDAHULUAN

Salah satu pendorong utama pada sektor perekonomian yaitu energi. Penggunaan energi kian meningkat seiring permintaan dari berbagai sektor pembangunan khususnya industri, listrik dan transportasi [1]. Pertumbuhan ekonomi sudah pasti akan meningkatkan konsumsi energi secara terus-menerus, dimana sumber energi sebagian besar berasal dari bahan bakar fosil. Tetapi, penggunaan bahan bakar fosil dalam jumlah

banyak dapat menyebabkan permasalahan lingkungan yang serius, seperti hujan asam, kontaminasi air, emisi rumah kaca, dan polusi udara. Fakta-fakta tersebut dapat menjadi ancaman bagi kelangsungan hidup manusia dan kedepannya akan membatasi perkembangan industri energi [2]. Energi fosil tersebut akan sulit diganti sebagai sumber energi utama dan diprediksi akan bertahan paling tidak sekitar 119 tahun. Usaha pencegahan meningkatnya emisi

gas rumah kaca dan pengurangan konsumsi bahan bakar fosil memicu ketertarikan terhadap sistem energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya dengan memanfaatkan energi dari biomassa [1].

Biomassa adalah sumber energi yang cocok sebagai sumber energi terbarukan. Secara umum, biomassa dianggap sebagai sumber energi ramah lingkungan yang tidak akan memperburuk efek rumah kaca di atmosfer. Namun, jika dibandingkan dengan batubara pada umumnya, biomassa memiliki beberapa kekurangan diantaranya seperti kadar oksigen yang lebih tinggi, kadar air yang lebih tinggi, suhu pelelehan abu yang lebih rendah, dan nilai kalor yang lebih rendah [2]. Karena kandungan dari energi biomassa cenderung lebih rendah maka kombinasi antara bahan bakar batubara dan biomassa menjadi salah satu penyelesaian guna mempertahankan kandungan energi sehingga tetap optimal [1] dengan metode seperti co-firing, co-gasifikasi, dan co-pirolisis [3]. Selain itu, kombinasi dari biomassa dan bahan bakar fosil memberikan banyak keuntungan. Menambahkan batubara ke biomassa dapat meningkatkan kepadatan energi dari bahan baku dan mengurangi nilai fluktuasi dalam pasokan biomassa. Kemudian, menambahkan biomassa ke batubara dapat mengurangi pelepasan dari polusi gas (seperti SO_x dan NO_x) serta mengurangi efek rumah kaca (mengurangi emisi fosil CO_2). Telah dijelaskan bahwa biomassa dapat meningkatkan reaktivitas batubara selama proses termal (yaitu dalam pirolisis dan gasifikasi), karena jumlah spesi katalitik aktif dan hidrogen yang lebih banyak terkandung dalam biomassa [2].

Biomassa yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Botryococcus braunii*, yang merupakan mikroalga spesies uniseluler fotosintetik anggota *chlorophyceae* (*chlorophyta*). Koloni mikroalga ini tersebar secara luas di perairan tawar dan perairan payau di seluruh benua. *Botryococcus braunii* dianggap sebagai sumber potensial bahan bakar terbarukan karena dapat menghasilkan hidrokarbon dalam jumlah besar. Hidrokarbon yang dihasilkan *Botryococcus braunii* dapat hingga 75% massa kering alga bergantung pada tekanan dan kondisi pertumbuhannya bila dibandingkan dengan mikroalga yang lain [4], [5]. Sehingga *Botryococcus braunii* menjadi opsi yang baik pada pemanfaatannya sebagai bahan bakar.

Kemudian batubara yang digunakan yaitu *Victorian Brown coal*, merupakan famili dari batubara kualitas rendah dengan sifat fisik dan

sifat kimia yang unik. Hampir setiap aspek sifatnya unik dibandingkan dengan bahan bakar padat lainnya seperti biomassa, gambut, batubara bituminus, dan antrasit. Anorganik non-mineral yang terkandung di dalam VBC yaitu karboksilat dan garam terlarut di lapisan yang lembab. Kemudian, anorganik seperti Na^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+} terikat dengan gugus $-\text{COO}^-$ yang tidak dapat dipisahkan dari karboksilat yang membentuk zat organik dalam batubara. Gugus fungsi utama dalam VBC adalah gugus karboksilat dan gugus fenolik. VBC berada pada tahap awal dari proses koalifikasi geokimia yang merupakan pertengahan gambut sehingga masih mengandung banyak lignin dan selulosa [6]. VBC yang tersusun dari selulosa dan lignin dapat dikonversi menjadi cairan (*bio-oil*) melalui proses pirolisis [7].

Pirolisis adalah metode yang digunakan sejak dimulainya revolusi industri dalam destilasi destruktif batubara skala besar untuk memperoleh arang yang bernilai. Hal ini telah menginspirasi sejumlah studi tentang penggunaan batubara dan biomassa secara bersamaan seperti co-pirolisis [8]. Co-pirolisis merupakan proses dekomposisi kimia yang melibatkan lebih dari satu feedstock dengan pemanasan tanpa melibatkan oksigen, sehingga menghasilkan gas, arang dan tar [9]. Beberapa hasil penelitian membuktikan bahwa interaksi antara batubara dan biomassa selama co-pirolisis menunjukkan efek penghambatan pada dekomposisi termal dan pelepasan zat volatil, sehingga menghasilkan arang yang lebih tinggi dari yang diharapkan [10].

Penggunaan mikroalga *Botryococcus braunii* dan VBC dalam proses co-pirolisis belum dieksplorasi secara mendalam sehingga diperlukan studi pendahuluan untuk mengetahui potensi mikroalga *Botryococcus braunii* dan VBC sebagai sumber bahan bakar terbarukan. Pada penelitian ini dilakukan co-pirolisis antara mikroalga *Botryococcus braunii* dan VBC dengan variasi laju pemanasan menggunakan *thermogravimetric analyser*. Data-data yang diperoleh dari TGA kemudian diplot untuk mengetahui kurva TGA dan DTG, menentukan rentang suhu co-pirolisis biomassa dan batubara serta mengetahui tahapan-tahapan pirolisis.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu seperangkat alat gelas, seperangkat alat kultur, *mini Centrifuge*, *vortex*, *freeze dryer*,

oven, *Micro Ball Mill*, dan TAG 16 *Simultaneous Symmetrical Thermo Analyser*.

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu aquades, media cair AF 6, gas Nitrogen dan udara yang diperoleh dari *Air Liquide*. Sampel mikroalga diperoleh dengan diisolasi dari lingkungan air tawar pada Kecamatan Tenggarong, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur dan dikultivasi secara *indoor* di Laboratorium Fisiologi, Perkembangan dan Molekuler Hewan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman dan VBC yang diperoleh dari Alan Chafee's *Research Group*. Adapun jenis VBC yang digunakan adalah Loy Yang Low Ash dengan kadar air 60 wt% (*as received*).

Prosedur Penelitian

Kultivasi Sampel Biomassa

Sampel biomassa berupa mikroalga *Botryococcus braunii* berasal dari air tawar Kecamatan Tenggarong dan diambil menggunakan jaring Plankton dengan ukuran mata jaring 100 μm . Sebagai acuan, *Botryococcus braunii* yang diperoleh dibandingkan dengan strain *Botryococcus braunii* OIT 413 dari *Osaka Institute of Technology*, Osaka, Jepang. Kemudian dilakukan pemurnian dengan melakukan pengenceran bertingkat untuk memurnikan koloni individu *Botryococcus braunii*, dilanjutkan dengan inokulasi ke dalam media cair AF 6 dalam labu Erlenmeyer 150 mL. Inokulum diinkubasi dalam kondisi penyinaran 12 jam terang dan 12 jam gelap dengan intensitas cahaya $1,2 \pm 0,2$ klux pada suhu 25-27 °C. Kultur *Botryococcus braunii* dapat dipanen setelah 90 hari. Terjadinya sekresi lipid dari *Botryococcus braunii* dikonfirmasi dengan metode pewarnaan merah nil dan dievaluasi menggunakan mikroskop fluoresensi (Nikon Corporation, Jepang).

Preparasi Sampel

Kultur *Botryococcus braunii* setelah 90 hari diambil sebanyak 50 mL dan disentrifugasi dengan kecepatan 5000 rpm selama 30 detik kemudian dibuang supernatannya. Pelet yang diperoleh di bagian bawah tabung mikro diambil lalu dihancurkan menggunakan *homogenizer* dengan kecepatan 300 rpm selama 30 detik. Setelah itu di *freeze drying* selama 24 jam. Sampel kering *Botryococcus braunii* yang telah dikeringkan disimpan pada suhu 20 °C [11].

Langkah tersebut dapat diulangi hingga jumlah sampel kering yang diperoleh dapat digunakan untuk karakterisasi dan proses co-pirolisis.

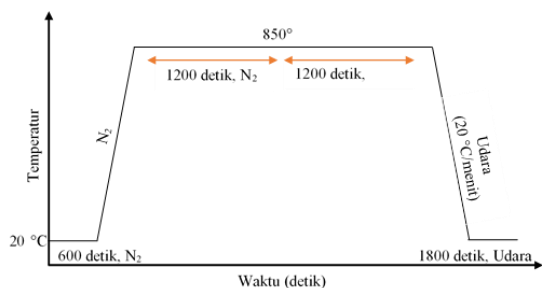
Sampel VBC dengan kadar air 60% dikeringkan di dalam oven pada suhu 105 °C di bawah aliran gas N₂ untuk menurunkan kadar airnya menjadi 7,5%. Setelah itu, sampel batubara dicampur dengan sampel kering mikroalga dengan perbandingan 1:1 (berat:berat) menggunakan *Micro Ball Mill* sebelum pengujian dengan *thermogravimetric analyser*.

Karakterisasi Sampel

Penentuan kadar air dan abu dilakukan menggunakan instrumen TGA Setaram TAG 16 *Simultaneous Symmetrical Thermo Analyser*. Sebanyak 25 mg sampel kering *Botryococcus braunii* dimasukkan ke dalam cangkir alumina. Pada analisis kadar air sampel dialiri oleh gas nitrogen dengan laju alir 140 mL/menit kemudian dipanaskan hingga ± 110 °C selama 15 menit. Lalu pada kadar abu, sampel dialiri oleh udara dengan laju alir 70 mL/menit kemudian dipanaskan hingga ± 800 °C selama 90 menit. Analisis kadar air dan abu dilakukan secara duplo dengan laju pemanasan 20 dan 25 °C/menit. Lalu kadar air dan abu dihitung dari rerata keduanya.

Thermogravimetric analyser

Co-pirolisis biomassa dan batubara dilakukan dengan *thermogravimetric analyser* (TGA) dalam nitrogen dan udara menggunakan alat Setaram TAG 16 *Simultaneous Symmetrical Thermo Analyser*. Prosedur pirolisis dilakukan sesuai dengan metode yang dilakukan oleh Miten [12]. Sejumlah kecil sampel campuran *Botryococcus braunii* dan VBC (10-20 mg) dengan perbandingan 1:1 (berat:berat) dimasukkan ke dalam cangkir alumina. Sampel dialiri oleh nitrogen (140 mL/menit) selama 600 detik kemudian dipanaskan hingga 850 °C dengan laju pemanasan 10, 15, 20 dan 25 °C/menit (laju alir N₂ 140 mL/menit). Suhu dipertahankan selama 1200 detik dalam aliran gas nitrogen, kemudian aliran gas nitrogen diubah menjadi aliran udara (air) dengan laju alir 70 mL/menit pada suhu yang sama selama 1200 detik. Suhu diturunkan hingga 20 °C pada 20 °C/menit dalam aliran udara (70 mL/menit). Suhu dipertahankan selama 1800 detik dalam aliran Udara (70 mL/menit). Profil massa dan suhu eksperimen ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Profil Massa dan Suhu Co-pirolisis Biomassa dan Batubara dengan TGA [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Sampel

Karakterisasi pada tumbuhan adalah proses mencari ciri-ciri tertentu yang dimiliki oleh tumbuhan yang digunakan untuk membedakan antar jenis dan antar individu dalam satu jenis tumbuhan [13]. Karakterisasi bertujuan untuk mengetahui gambaran penyusun pada mikroalga *Botryococcus braunii* yang digunakan sebagai data pendukung untuk menjelaskan proses pirolisis, dimana *Botryococcus braunii* diperoleh dari lingkungan air tawar pada Kecamatan Tenggarong, Kalimantan Timur. Berdasarkan hasil analisis, kadar air pada *Botryococcus braunii* sebesar 5,01% ±0,42 (Tabel 1). Kadar air merupakan salah satu faktor penentu kualitas biomassa sebagai bahan bakar. Kadar air berpengaruh terhadap nilai kalor bersih, efisiensi pembakaran dan temperatur pembakaran karena sebagian energi akan digunakan untuk menguapkan air yang terkandung [14]. Selain itu, kadar air juga dapat mempengaruhi kualitas produk pirolisis yang diperoleh karena dapat mempengaruhi kualitas produk cair dan rendemen yang diperoleh. Semakin tinggi kadar air bahan baku yang digunakan maka semakin rendah kualitas produk cair yang dihasilkan, karena kadar air yang terlalu tinggi akan menurunkan kualitas produk cair sehingga akan menurunkan kadar produk yang dihasilkan [15]. Kadar air yang terkandung dalam biomassa pada kondisi alami sangat bervariasi tergantung pada jenis biomasnya, dimana pada alga umumnya memiliki kadar air yang cukup tinggi (> 90%) sehingga diperlukan proses lebih lanjut seperti pengeringan hingga kadar menjadi < 13% [16].

Kadar abu yang diperoleh pada *Botryococcus braunii* sebesar 27,44% ±1,11. Abu merupakan oksida logam dalam arang, dimana abu mengandung mineral-mineral yang tidak dapat diuapkan pada proses karbonisasi. Kualitas arang yang diperoleh sangat berpengaruh

terhadap kadar abu. Adanya abu yang berlebih dapat menyumbat pori-pori pada arang sehingga luas permukaan arang menjadi berkurang [17]. Selain itu, menurut Obernberger dan Thek [14] kadar abu yang tinggi akan mengakibatkan pencemaran lingkungan yang parah karena meningkatnya emisi debu, meningkatkan bahaya pembentukan terak dan endapan pada tungku. Sehingga semakin tinggi kadar abu yang diperoleh maka dapat menurunkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar.

Tabel 1. Hasil Analisis Kandungan Senyawa Mikroalga *Botryococcus braunii*.

Parameter	Nilai	
	Biomassa	Batubara*
Kadar Air (%)	5,01 ±0,42	7,5
Kadar Abu (%)	27,44 ±1,11	3,25

* [18]

Co-pirolisis *Botryococcus braunii* dan VBC Dengan Variasi Laju Pemanasan Menggunakan Metode *Thermogravimetric Analyser*

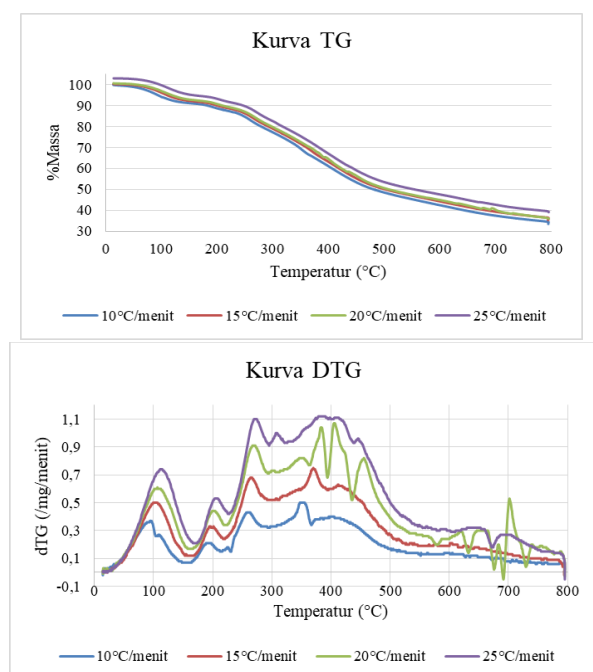
Co-pirolisis *Botryococcus braunii* dan VBC dengan perbandingan 1:1 (berat:berat) dilakukan dengan menggunakan metode *thermogravimetric analyser* dengan variasi laju pemanasan sebesar 10, 15, 20, dan 25 °C/menit. Pada penelitian ini digunakan perbandingan massa 1:1 pada campuran, untuk mempelajari pengaruh penambahan *Botryococcus braunii* pada pirolisis VBC. Pada penelitian ini tidak dilakukan variasi perbandingan karena terdapat keterbatasan sampel yang digunakan.

Variasi laju pemanasan digunakan berdasarkan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan laju pemanasan dapat mempengaruhi suhu aktif pirolisis [10], [19], [20]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan laju pemanasan pada proses pirolisis meningkatkan rentang suhu aktif pirolisis. Peningkatan suhu aktif pirolisis terjadi karena perbedaan suhu antara permukaan dengan inti partikel meningkat dengan cepat sehingga menghasilkan gradien yang mendukung perpindahan panas [20]. Efek lain dari peningkatan laju pemanasan yaitu suhu lingkungan akan melewati interval yang lebih luas per satuan waktu. Sehingga pada suhu awal yang sama, suhu rata-rata sampel per satuan waktu meningkat menghasilkan laju dekomposisi

maksimum dengan peningkatan laju pemanasan [10]. Suhu aktif pirolisis adalah rentang suhu awal dan suhu akhir dari proses pirolisis, dimana suhu tersebut dapat ditentukan dengan melihat data DTG. Tabel 2 menunjukkan peningkatan suhu pirolisis seiring dengan meningkatnya laju pemanasan.

Tabel 2. Rentang Suhu Co-pirolisis *Botryococcus braunii* dan VBC Aktif pada Laju Pemanasan yang Bervariasi

Laju Pemanasan	T _{awal}	T _{akhir}
10 °C/menit	155,79 °C	521,21 °C
15 °C/menit	160,94 °C	533,53 °C
20 °C/menit	161,70 °C	537,96 °C
25 °C/menit	169,99 °C	545,27 °C



Gambar 2. Kurva TG dan DTG Co-pirolisis *Botryococcus braunii* dan VBC pada laju pemanasan 10, 15, 20 dan 25 °C/menit.

Kurva TG dan DTG untuk co-pirolisis *Botryococcus braunii* dan VBC dalam keadaan atmosfer nitrogen pada laju pemanasan 10, 15, 20 dan 25 °C/menit ditunjukkan pada Gambar 2. Area penurunan massa pada kurva tersebut dapat menjelaskan tahapan yang terjadi pada proses degradasi komponen-komponen yang terkandung dalam biomassa dan batubara.

Selama degradasi termal campuran *Botryococcus Braunii* dan VBC, terdapat 3 tahapan utama yang dapat diidentifikasi pada

termogram (kurva TG) dan dari data DTG (Gambar 2). Tahap pertama yaitu proses penguapan air atau *moisture* dan senyawa volatil ringan yang terkandung dalam campuran *Botryococcus Braunii* dan VBC. Tahap ini juga disebut sebagai tahap pengeringan. Pada penelitian ini tahap pertama terjadi dari suhu 20 °C hingga ± 200 °C, dimana penguapan air dan penguapan senyawa volatil ringan terjadi pada rentang suhu 180-200 °C. Rentang suhu tersebut sesuai dengan penelitian Chen *et al* [21], dimana proses volatilisasi serupa terjadi pada suhu 25 °C hingga mencapai 168-178 °C. [22] juga menyatakan suhu < 200 °C merupakan suhu penguapan air dan volatil ringan. Selain itu pada tahap ini juga terjadi dekomposisi klorofil pada rentang suhu 80-110 °C karena klorofil merupakan senyawa yang tidak stabil sehingga mudah terdegradasi pada rentang 80-145 °C [23], [24]. Dekomposisi klorofil terjadi pada rentang suhu ini akan tetapi tidak menghasilkan senyawa volatil sebagai produk pirolisis. Pada tahap pertama terjadi pengurangan massa sebanyak 10% hingga tersisa 90%.

Tahap kedua merupakan co-pirolisis aktif yang melibatkan pengurangan massa terbanyak yaitu sebesar 40% karena proses dekomposisi protein dan lipid dari mikroalga serta selulosa dan lignin dari VBC, dimana senyawa-senyawa tersebut mengalami proses depolimerisasi, dekarboksilasi dan *cracking*. Tahap ini terjadi pada rentang suhu 250–500 °C. Pada penelitian ini dekomposisi protein terjadi pada suhu 250-280 °C, selulosa terdekomposisi pada suhu 310-400 °C, lipid terdekomposisi pada suhu 380-480, serta lignin mulai terdekomposisi pada suhu 200-275 °C melepaskan molekul volatil, H₂O, CO₂ dan CO [8], [10], [20], [22], [25], [26].

Tahap ketiga dikenal sebagai dekomposisi endotermik lignin dan bahan berkarbon, dimana residu karbon terurai secara perlahan [21], [27]. Tahap ini terjadi pada rentang suhu 500-800 °C yang menyebabkan pengurangan massa sebesar 10-15% hingga tersisa 40-35% massa yang merupakan char yang diperoleh. Pada tahap ini terjadi dekomposisi lignin yang terkandung dalam VBC. Dekomposisi lignin diselesaikan pada rentang suhu yang luas antara 240–900 °C yang memberikan puncak landai pada kurva DTG [10]. Lignin terdekomposisi secara termal pada rentang suhu yang luas, karena berbagai gugus fungsi yang terkandung dari strukturnya memiliki stabilitas termal yang berbeda-beda sehingga pemotongannya terjadi pada suhu yang berbeda, dimana proses dekomposisi utama

terjadi pada suhu > 400 °C yang menghasilkan senyawa hidrokarbon aromatik yang sebagian besar memiliki gugus fenolik –OH [26].

KESIMPULAN

Co-pirolisis antara mikroalga *Botryococcus braunii* dan *Victorian Brown coal* dengan *thermogravimetric analyser* memberikan kurva TGA dan DTG yang menunjukkan rentang suhu aktif co-pirolisis pada laju pemanasan yang bervariasi berkisar antara 155,79 °C hingga 545,27 °C dengan tahapan co-pirolisis yang terdiri atas tiga tahap. Tahap pertama yaitu penguapan air dan senyawa volatil (20-200 °C), kedua yaitu tahap co-pirolisis aktif (250-500 °C) dan ketiga yaitu tahap dekomposisi lignin dan senyawa karbon yang terkandung dalam batubara dan mikroalga (500-800 °C).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Fisiologi, Perkembangan dan Molekuler Hewan FMIPA Unmul dan *School of Chemistry, Monash University*, Australia yang telah berkontribusi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suganal, S., dan Hudaya, G. K. (2019). Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (Skala laboratorium). *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 15(1), 31–48. <https://doi.org/10.30556/jtmb.vol15.no1.2019.971>.
- [2] Zhou, L., Zhang, G., Reinmüller, M., dan Meyer, B. (2019). Effect of inherent mineral matter on the co-pyrolysis of highly reactive brown coal and wheat straw. *Fuel*, 239(November 2018), 1194–1203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.114>.
- [3] Lu, K. M., Lee, W. J., Chen, W. H., dan Lin, T. C. (2013). Thermogravimetric analysis and kinetics of co-pyrolysis of raw/torrefied wood and coal blends. *Applied Energy*, 105, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.050>.
- [4] Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y., dan Banerjee, U. C. (2002). *Botryococcus braunii*: A renewable source of hydrocarbons and other chemicals. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(3), 245–279. <https://doi.org/10.1080/07388550290789513>.
- [5] Gouveia, L., dan Oliveira, A. C. (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 36(2), 269–274. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0495-6>.
- [6] Hayashi, J. ichiro, dan Li, C. Z. (2004). Structure and Properties of Victorian Brown Coal. *Advances in the Science of Victorian Brown Coal*. <https://doi.org/10.1016/B978-008044269-3/50003-0>.
- [7] Amin, R. R., Sova, R. R., Laily, D. I., dan Maharani, D. K. (2020). Artikel Review Studi Potensi Limbah Tembakau Menjadi Bio-oil Menggunakan Metode Fast-Pyrolysis Sebagai Energi Terbarukan. *Jurnal Kimia Riset*, 5(2), 151–165.
- [8] Nyoni, B., Duma, S., Bolo, L., Shabangu, S., dan Hlangothi, S. P. (2020). Co-pyrolysis of South African bituminous coal and *Scenedesmus* microalgae: Kinetics and synergistic effects study. *International Journal of Coal Science and Technology*, 7(4), 807–815. <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00310-7>.
- [9] Fikri, M., Prakasa, B., Rachimoallah, H. M., dan Zullaikah, S. (2013). Co-Pirolisis Batubara Kualitas Rendah (Low Rank) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit. *JURNAL TEKNIK POMITS*, 1–6.
- [10] Chen, X., Liu, L., Zhang, L., Zhao, Y., dan Qiu, P. (2019). Pyrolysis Characteristics and Kinetics of Coal–Biomass Blends during Co-Pyrolysis. *Energy danamp; Fuels*, 33(2), 1267–1278. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00398>.
- [11] Nugroho, R. A., Subagyono, R. D. J. N., Arung, E. T., Rudianto, R., dan Prahastika, W. (n.d.). *Fatty Acid Profile, Antioxidant Properties And Tyrosinase Inhibition Assay Of Botryococcus Braunii Isolated From Freshwater Environment, Tenggara, East Kalimantan, Indonesia*.
- [12] Miten, P. D. (2019). *Studi Kinetika Pirolisis Beberapa Biomassa dengan Metode Analisis Termogravimetri*. (Tesis). Universitas Mulawarman.
- [13] Miswanti, Tati, N., dan Anas. (2014). Karakterisasi dan Kekekabatan 42 Aksesori Tanaman Jawawut (*Setaria italica* L. Beauv). *Jurnal Pangan*, 23(2), 166–177.

- [14] Obernberger, I., dan Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), 653–669. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>.
- [15] Ayudiarti, D. L., dan Sari, R. N. (2010). Asap cair dan aplikasinya pada produk perikanan. *Squalen*, 5(3), 101–108.
- [16] Sánchez, J., Curt, M. D., Robert, N., dan Fernández, J. (2018). Biomass resources. In *The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy: Resources, Technologies, Sustainability and Policy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00002-9>.
- [17] Ridhuan, K., Irawan, D., Zanaria, Y., & Adi, N. (2018). Pengaruh Cara Pembakaran Pirolisis Terhadap Karakteristik Dan Efisiensi Arang Dan Asap Cair Yang Dihasilkan. *PROSIDING SNTT-VI (SEMINAR NASIONAL TEKNOLOGI TERAPAN)*, 141–150.
- [18] Mollah, M. M., Marshall, M., Jackson, W. R., dan Chaffee, A. L. (2016). Attempts to produce blast furnace coke from Victorian brown coal. 2. Hot briquetting, air curing and higher carbonization temperature. *Fuel*, 173, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.053>.
- [19] Ali, I., Naqvi, S. R., dan Bahadar, A. (2018). Kinetic analysis of *Botryococcus braunii* pyrolysis using model-free and model fitting methods. *Fuel*, 214(October 2017), 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.046>.
- [20] Arbeláez, A. A., Giraldo, N. D., Pérez, J. F., dan Atehortúa, L. (2019). Pyrolysis Kinetics Using TGA and Simulation of Gasification of the Microalga *Botryococcus braunii*. *Bioenergy Research*, 12(4), 1077–1089. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10037-2>.
- [21] Chen, C., Ma, X., dan He, Y. (2012). Co-pyrolysis characteristics of microalgae *Chlorella vulgaris* and coal through TGA. *Bioresource Technology*, 117, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.007>.
- [22] Gouws, S. M., Carrier, M., Bunt, J. R., dan Neomagus, H. W. J. P. (2021). Co-pyrolysis of coal and raw/torrefied biomass: A review on chemistry, kinetics and implementation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110189>.
- [23] Hutajulu, T. F., Hartanto, E. S., dan Subagja. (2008). Proses Ekstraksi Zat Warna Hijau Khlorofil Alami Untuk Pangan dan Karakterisasinya. *Jurnal Riset Industri*, 2(1), 44–55.
- [24] Rudra, S. G., Singh, H., Basu, S., dan Shivhare, U. S. (2008). Enthalpy entropy compensation during thermal degradation of chlorophyll in mint and coriander puree. *Journal of Food Engineering*, 86(3), 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.020>
- [25] Wu, Z., Yang, W., Tian, X., dan Yang, B. (2017). Synergistic effects from co-pyrolysis of low-rank coal and model components of microalgae biomass. *Energy Conversion and Management*, 135, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.060>.
- [26] Brebu, M., dan Vasile, C. (2010). Thermal degradation of lignin - A review. *Cellulose Chemistry and Technology*, 44(9), 353–363.
- Mishra, R. K., dan Mohanty, K. (2018). Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 251, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.029>.