

INTISARI

Kebutuhan energi semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan peningkatan aktivitas ekonomi. Hingga saat ini produksi energi global, termasuk di Indonesia masih bergantung sepenuhnya pada bahan bakar fosil yang tidak terbarukan seperti minyak bumi, yang mana pasokannya semakin menipis di masa depan. Melalui Peraturan Pemerintah No.79 Tahun 2014, pemerintah menargetkan peningkatan penggunaan energi baru dan terbarukan (EBT) dari 4% pada tahun 2014 hingga 23% pada tahun 2025. Salah satu bentuk energi terbarukan yang dapat menjadi bahan bakar masa depan adalah *biofuel*, yang dalam skala industri umumnya diperoleh dalam bentuk awal sebagai *bio-oil*.

Dalam memproduksi *bio-oil* perlunya bahan baku biomassa yang bersifat *renewable* dan *net-zero emission* sangat penting diperhatikan guna mempertahankan ketersediaan bahan bakar secara kontinyu. Salah satu sumber bahan baku yang potensial dalam memproduksi *bio-oil* biomassa makroalga seperti *Sargassum sp.* Makroalga *Sargassum sp.* sebagai bahan baku memiliki kandungan karbohidrat cukup tinggi berkisar antara 46,59–50,98% dan memiliki kadar air yang cukup rendah yaitu kurang dari 20%. Berbeda dengan *Ulva lactuca*, *Sargassum sp.* tidak dimanfaatkan sebagai bahan pangan fungsional sehingga nilai ekonominya lebih rendah. Karena alasan-alasan inilah *Sargassum sp.* menjadi kandidat yang tepat untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi *bio-oil* dengan proses pirolisis.

Pirolisis adalah teknik yang menjanjikan untuk mengubah *Sargassum sp.* menjadi arang, gas dan bio-oil yang bernilai tinggi dengan bahan baku yang memiliki kadar air kurang dari 20%. Untuk produk utama *bio-oil* yang terdiri dari *free fatty acid* (FFA), penggunaan proses lain seperti hydrothermal dapat menyebabkan larutnya *free fatty acid* (FFA) dalam air. Oleh karena itu, proses pirolisis menjadi lebih layak dibandingkan proses hidrotermal. Selain itu, produk yang dihasilkan dari proses pirolisis dapat dimanfaatkan lebih fleksibel dan penanganannya lebih mudah.

Penelitian mengenai pirolisis ini berfokus pada karakterisasi produk *bio-oil* dan pencarian nilai konstanta-konstanta laju reaksi dengan model dua model yang berbeda, yaitu model *Competitive* Blasi dkk (1996) dan model *Competitive* yang telah dimodifikasi oleh Farag dkk. (2014) dengan basis *remaining solid*. Kedua model tersebut dievaluasi pada variasi ukuran partikel 10-40, 40-70, 70-100 dan >100 mesh. Selain itu, pengujian



sensitivitas juga dilakukan untuk mengkonfirmasi kepastian nilai parameter-parameter konstanta laju reaksi yang didapat.

Hasil *fitting* parameter-parameter kinetika menunjukkan untuk ukuran 10-40 mesh, model kedua memiliki kemiripan dengan data yang lebih baik dengan nilai A_L , A_S , A_{G1} , dan A_{G2} adalah 0.1863; 0.0905; 0.0152; dan 0.0766 men^{-1} serta nilai E_{aL} , E_{aS} , E_{aG1} , dan E_{aG2} adalah 2513.589; 2871.491; 3850.804; dan 3204.888 J.mol^{-1} . Untuk ukuran 40-70 mesh, model kedua memiliki kemiripan dengan data yang lebih baik dengan nilai A_L , A_S , A_{G1} , dan A_{G2} adalah 0.1865; 0.0722; 0.0116; dan 0.1153 men^{-1} serta E_{aL} , E_{aS} , E_{aG1} , dan E_{aG2} adalah 1021.5814; 1268.8788; 3855.5467; dan 3251.9996 J.mol^{-1} . Untuk ukuran 70-100 mesh, model kedua memiliki kemiripan dengan data yang lebih baik dengan nilai A_L , A_S , A_{G1} , dan A_{G2} adalah 0.0891; 0.0613; 0.0350; dan 0.0203 men^{-1} serta E_{aL} , E_{aS} , E_{aG1} , dan E_{aG2} adalah 1619.3539; 1558.8463; 3144.9162; dan 2416.0281 J.mol^{-1} . Untuk ukuran >100 mesh, model pertama memiliki kemiripan dengan data yang lebih baik, namun model pertama kurang merepresentasikan *yield remaining solid*. Pada model kedua, nilai A_1 , A_2 , A_3 , dan A_4 adalah 0.0652; 0.0010; 0.0674; dan 0.0003 men^{-1} serta E_{a1} , E_{a2} , E_{a3} , dan E_{a4} adalah 1950.9317; 2413.3001; 3073.3602; dan 2396.8081 J.mol^{-1} . Dari keempat ukuran partikel, ukuran 40-70 mesh memiliki nilai konstanta laju reaksi pembentukan *bio-oil* tertinggi, sedangkan ukuran 70-100 mesh terendah. Dari pengujian sensitivitas, parameter-parameter laju reaksi (A dan E_a) nilainya terkonfirmasi untuk *scaling-up*.

Bio-oil yang diperoleh dikarakterisasi secara fisis (densitas dan nilai kalor) dan kimiawinya (pH dan kandungan senyawa kimia). *Bio-oil* memiliki densitas berkisar 0,9783-0,9853 g/mL. Dari hasil pengujian, semakin tinggi suhu pirolisis, semakin rendah densitas. *Bio-oil* berfase ringan (tar) dan berat memiliki nilai kalor berturut-turut 29,715 dan 2,95 MJ/kg. *Bio-oil* memiliki pH 7,5. Berdasarkan analisis GC-MS, kandungan tertinggi dari *bio-oil* berfase ringan terdiri dari *1,2-Butanediol*, *3-Methoxy-2,2-dimethyloxirane*, *2-Propanol*, *1-ethoxy-*, dan *Fluoro-Acetic Acid Methyl Ester*. Berdasarkan analisis GC-MS, kandungan tertinggi dari *bio-oil* berfase berat terdiri dari asam asetat, asam propanoat, dan asam butanoat. Berdasarkan analisis FTIR, *bio-oil* mengandung gugus alifatik (alkana, alkena, alkuna), hidroksil, karbonil (asam karboksilat, keton, aldehida, ester, eter), dan aromatik. Dalam penelitian ini, kandungan gas juga diidentifikasi menggunakan GC. Hasil menunjukkan bahwa gas pirolisis mengandung CH_4 dan CO_2 berturut-turut sebesar 29,300% dan 12,571%.

ABSTRAK

The escalating demand for energy, paralleled with population growth and economic activities, necessitates a strategic shift in global energy production. Presently, global energy production, including that of Indonesia, predominantly relies on non-renewable fossil fuels such as petroleum, the supply of which is dwindling. Governmental initiatives, exemplified by Regulation No. 79 of 2014, underscore the imperative of transitioning towards increased utilization of new and renewable energy sources (EBT), with a targeted rise from 4% in 2014 to 23% by 2025.

Biofuel emerges as a promising candidate for the future fuel landscape, and in an industrial context, it is commonly obtained in its initial form as bio-oil. The production of bio-oil necessitates renewable and net-zero emission biomass as a raw material to sustain fuel availability continuously. Macroalgae, specifically *Sargassum sp.*, stands out as a potential biomass source for bio-oil production due to its high carbohydrate content ranging from 46.59% to 50.98% and low water content (below 20%). Unlike *Ulva lactuca*, *Sargassum sp.* is not utilized as a functional food source, rendering its economic value lower. Consequently, *Sargassum sp.* emerges as a fitting candidate for bio-oil production through pyrolysis.

Pyrolysis, a promising technique for converting *Sargassum sp.* into high-value charcoal, gas, and bio-oil, becomes particularly pertinent given the biomass's low water content. In contrast to alternative processes like hydrothermal treatment, pyrolysis proves more economically viable, offering greater flexibility and ease of handling in utilizing the produced products.

The focus of the research lies in characterizing the bio-oil products and determining reaction rate constants using two different models: the Competitive Blasi et al. (1996) model and the modified Competitive model by Farag et al. (2014) based on remaining solid. Both models are evaluated across particle size variations of 10-40, 40-70, 70-100, and >100 mesh. Sensitivity tests are additionally conducted to confirm the certainty of obtained kinetic constant parameters.

The outcomes of the kinetic parameter fitting indicate that for the particle size range of 10-40 mesh, the second model exhibits a better alignment with the data, characterized by values of A_L , A_S , A_{G1} , and A_{G2} at 0.1863, 0.0905, 0.0152, and 0.0766 min^{-1} , respectively. Additionally, the activation energy values (E_{aL} , E_{aS} , E_{aG1} , and E_{aG2}) are determined as 2513.589, 2871.491, 3850.804, and 3204.888 J.mol^{-1} . In the case of the 40-



70 mesh size, the second model also demonstrates superior congruence with the data, presenting values of A_L , A_S , A_{G1} , and A_{G2} at 0.1865, 0.0722, 0.0116, and 0.1153 min^{-1} , along with corresponding activation energy values (E_{aL} , E_{aS} , E_{aG1} , and E_{aG2}) of 1021.5814, 1268.8788, 3855.5467, and 3251.9996 J.mol^{-1} .

Similarly, for the particle size range of 70-100 mesh, the second model exhibits better alignment with the data, revealing values of A_L , A_S , A_{G1} , and A_{G2} at 0.0891, 0.0613, 0.0350, and 0.0203 min^{-1} . The activation energy values (E_{aL} , E_{aS} , E_{aG1} , and E_{aG2}) for this size range are 1619.3539, 1558.8463, 3144.9162, and 2416.0281 J.mol^{-1} . Concerning particle sizes exceeding 100 mesh, the first model demonstrates better congruence with the data, although it inadequately represents the yield of remaining solid. In the second model, the respective values for A_1 , A_2 , A_3 , and A_4 are 0.0652, 0.0010, 0.0674, and 0.0003 min^{-1} , with corresponding activation energy values (E_{a1} , E_{a2} , E_{a3} , and E_{a4}) of 1950.9317, 2413.3001, 3073.3602, and 2396.8081 J.mol^{-1} . Among the four particle sizes considered, the 40-70 mesh size demonstrates the highest reaction rate constant values for bio-oil formation, while the 70-100 mesh size exhibits the lowest values. Sensitivity testing confirms the applicability of the reaction rate parameters (A and E_a) for scaling-up purposes.

Physicochemical characterization of the obtained bio-oil includes density and calorific value determination, pH measurement, and chemical compound analysis using GC-MS and FTIR techniques. Bio-oil exhibits a density range of 0.9783-0.9853 g/mL , inversely proportional to pyrolysis temperature. The calorific values for light (tar) and heavy phases are 29,715 and 2.95 MJ/kg , respectively. The bio-oil has a pH of 7.5. GC-MS analysis identifies 1,2-Butanediol, 3-Methoxy-2,2-dimethyloxirane, 2-Propanol, 1-ethoxy-, and Fluoro-Acetic Acid Methyl Ester as predominant compounds in the light phase, while the heavy phase comprises acetic acid, propanoic acid, and butanoic acid. FTIR analysis reveals the presence of aliphatic, hydroxyl, carbonyl (carboxylic acid, ketone, aldehyde, ester, ether), and aromatic functional groups in the bio-oil. Gas identification through GC indicates the presence of CH_4 and CO_2 at 29.300% and 12.571%, respectively, in the pyrolysis gas.