

Pirolisis Kilat *Spirulina platensis* dengan Katalis Ni/Al-SBA-15

(Flash Pyrolysis of *Spirulina platensis* with Ni/Al-SBA-15 Catalyst)

Ade Putri Wahyuni^a, RR Dirgarini Julia Nurlianti Subagyo^{a*}, Rahmat Gunawan^a,
Veliyana Londong Allo^a, Maykel Manawan^{b,c}

^aLaboratorium Kimia Fisik, Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Mulawarman

Jalan Barong Tongkok No.4, Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Kalimantan Timur, 75123, Indonesia

^bFakultas Sains dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia

Kawasan IPSC Sentul, Sukahati, Kecamatan Citeureup, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16810, Indonesia

^cPusat Riset Material Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional,

Jalan Raya Puspitpek 60, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314, Indonesia

*Corresponding author: dirgarini@fmipa.unmul.ac.id

DOI: [10.20961/alchemy.21.2.93245.251-263](https://doi.org/10.20961/alchemy.21.2.93245.251-263)

Received 10 September 2024, Revised 13 December 2024, Accepted 11 February 2025, Published 30 September 2025

Kata kunci:

katalis;
Ni/Al-SBA-15;
pirolisis;
Spirulina platensis;
ultrasonic-assisted
sol-gel.

ABSTRAK. Studi ini mempelajari aktivitas katalis Ni/Al-SBA-15 dalam pirolisis kilat mikroalga *Spirulina platensis* dan perannya pada komposisi kimia produk yang dihasilkan. Katalis Ni/Al-SBA-15 yang disintesis dengan metode *ultrasonic-assisted sol-gel* memiliki luas permukaan 522,54 m²/g, diameter pori 6,6 nm, dan volume pori 0,86 cm³/g. Analisis *Fourier transform infrared* (FTIR) katalis mengidentifikasi gugus siloksan, silanol, dan hidroksil, sementara analisis *low-angle* dan *wide-angle X-ray diffraction* (XRD) menunjukkan puncak difraksi khas Al-SBA-15 dan NiO. Pirolisis tanpa katalis Ni/Al-SBA-15 menghasilkan produk turunan karbohidrat (10,7%), lipid (53,8%), protein (6,3%), dan klorofil (6,2%). Setelah inkorporasi katalis Ni/Al-SBA-15, produk turunan karbohidrat meningkat menjadi 35,2%, protein menjadi 10,9%, klorofil menjadi 10,7%, namun produk turunan lipid menurun menjadi 15,5%. Hasil ini menunjukkan aktivitas katalis dalam meningkatkan konversi senyawa penyusun utama mikroalga, khususnya memecah lipid menjadi senyawa dengan berat molekul lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa metode sintesis katalis yang digunakan dapat menghasilkan material yang memiliki distribusi situs aktif yang relatif homogen dan aktivitas katalitik pada pirolisis mikroalga *Spirulina platensis*.

Keywords:

catalyst;
Ni/Al-SBA-15;
pyrolysis;
Spirulina platensis;
ultrasonic-assisted
sol-gel.

ABSTRACT. This study investigates the activity of Ni/Al-SBA-15 catalyst in flash pyrolysis of microalgae *Spirulina platensis* and its role in the chemical composition of the resulting products. The Ni/Al-SBA-15 catalyst synthesized by the ultrasonic-assisted sol-gel method had a surface area of 522.54 m²/g, pore diameter of 6.6 nm, and pore volume of 0.86 cm³/g. Fourier transform infrared (FTIR) analysis of the catalyst identified siloxane, silanol, and hydroxyl groups; meanwhile, low and wide-angle X-ray diffraction (XRD) analysis showed typical diffraction peaks of Al-SBA-15 and NiO. Pyrolysis without Ni/Al-SBA-15 catalyst produced carbohydrate-derived products (10.7%), lipids (53.8%), proteins (6.3%), and chlorophyll (6.2%). After incorporating Ni/Al-SBA-15 catalyst, carbohydrate-derived products increased to 35.2%, protein to 10.9%, and chlorophyll to 10.7%, but lipid-derived products decreased to 15.5%. These results showed the activity of the catalyst in increasing the conversion of the main constituent compounds of microalgae, especially breaking down lipids into smaller molecular weight compounds. This finding indicated that the catalyst synthesis method produced materials with a relatively homogeneous distribution of active sites and catalytic activity in the pyrolysis of microalgae *Spirulina platensis*.

PENDAHULUAN

Biomassa merupakan material hayati berupa tumbuh-tumbuhan, hewan serta produk turunannya maupun berbagai macam limbah, seperti limbah kayu, limbah pertanian, perkebunan, hasil hutan, komponen organik dari industri dan juga rumah tangga. Biomassa bersifat dapat diperbarui secara terus menerus dalam jangka panjang dan juga lebih ramah terhadap lingkungan. Salah satu pemanfaatan biomassa adalah sebagai bahan baku proses konversi temokimia untuk menghasilkan bahan bakar atau produk bernilai tambah lainnya. Studi ini mempelajari konversi termokimia salah satu spesies mikroalga, yaitu *Spirulina platensis*. *Spirulina platensis* memiliki

Cite this as: Wahyuni, A. P., Subagyo, R. D. J. N., Gunawan, R., Allo, V. L., and Manawan M. (2025). Pirolisis Kilat *Spirulina platensis* dengan Katalis Ni/Al-SBA-15. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 21(2), 251-263. <http://dx.doi.org/10.20961/alchemy.21.2.93245.251-263>.

kandungan protein yang sangat tinggi, sehingga mikroalga ini juga dikenal sebagai *single cell protein*. Salah satu metode konversi termokimia biomassa yang sering digunakan adalah pirolisis (Subagyo *et al.*, 2015).

Pirolisis merupakan salah satu metode konversi termokimia yang melibatkan proses penguraian zat pada suhu yang tinggi dan dalam atmosfer minim atau tanpa oksigen. Pada proses pirolisis ini, terjadi pemutusan ikatan pada material umpan membentuk molekul-molekul berukuran dan berstruktur lebih kecil. Secara umum pirolisis biomassa menghasilkan bahan padat yaitu berupa arang aktif, gas, *bio-oil* serta aerosol. Uap yang dihasilkan pada proses pirolisis akan terkondensasi sebagai bahan cair dan stabil pada suhu kamar yang umumnya disebut *bio-oil* (Febriyanti *et al.*, 2019). *Bio-oil* yang berasal dari mikroalga umumnya memiliki kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa lainnya (Anam *et al.*, 2014). Sebagai contoh, *bio-oil* dari mikroalga memiliki *high heating value* dan proporsi senyawa alifatik yang lebih tinggi dibandingkan dengan *bio-oil* dari kayu dan residu pengolahan anggur (Subagyo *et al.*, 2015). *Bio-oil* hasil pirolisis umumnya masih mengandung senyawa oksigenat, seperti asam organik, alkohol, dan aldehida, yang dapat menyebabkan korosi pada mesin, karena keasaman dan reaktivitasnya. Oleh sebab itu, untuk mengurangi kandungan oksigenat pada *bio-oil*, ditambahkan katalis dalam proses pirolisis (Jamilatun *et al.*, 2021). Katalis berbasis Nikel, seperti Ni/Al-SBA-15 pada penelitian ini, memiliki stabilitas, aktivitas, dan ketahanan terhadap pembentukan kokas selama proses pirolisis berlangsung (Trisunaryanti *et al.*, 2019), serta kemampuan dalam mengurangi kandungan oksigen dan nitrogen *bio-oil* dari mikroalga melalui reaksi deoksigenasi dan denitrogenasi (Li *et al.*, 2019).

Pada proses pirolisis mikroalga, selain meningkatkan kualitas *bio-oil* yang dihasilkan, penambahan katalis dilakukan untuk meningkatkan laju reaksi dan *yield* produk. Penelitian ini menggunakan pengemban katalis *Santa Barbara Acid-15* (SBA-15), suatu material silika mesopori yang mempunyai luas permukaan yang besar dan stabil pada suhu tinggi dan dapat digunakan sebagai adsorben dan pengemban katalis (Subagyo *et al.*, 2011; Subagyo *et al.*, 2020). Penambahan Ni pada SBA-15 telah digunakan pada pirolisis kilat serbuk kayu meranti (Fitriah, 2023) dan dapat menurunkan energi aktivasi proses pirolisis biomassa (Rachmawanti, 2022; Adha, 2023). Salah satu metode untuk meningkatkan keasaman SBA-15 adalah dengan substitusi Si dengan Al dalam kerangka *Santa Barbara Acid-15* (SBA-15). Penambahan Al pada kerangka silika dapat meningkatkan keasaman, khususnya situs asam Lewis dan Bronsted, untuk aplikasi reaksi katalitik seperti pirolisis dan hidrogenasi. Sifat asam dari Al-SBA-15 sendiri dapat diatur dengan mengubah rasio Si/Al, kondisi sintesis, dan prekursor aluminium. Pemilihan sumber silikon dan aluminium sangat berpengaruh terhadap pembentukan kerangka silika karena keduanya memiliki perbedaan pada reaktivitas dan kelarutan (Rakngam *et al.*, 2021). Pada penelitian ini, pembuatan material silika mesopori teraluminasi (Al-SBA-15) sebagai pengemban katalis dilakukan dengan metode *ultrasonic-assisted sol gel* pada proses pencampuran template dengan sumber silika Tetraetil ortosilikat (TEOS) dan sumber aluminium. Teknik ultrasonik atau metode sonikasi telah terbukti menghasilkan silika mesopori SBA-15 dengan susunan pori heksagonal yang sangat teratur dan luas permukaan yang tinggi dalam jangka waktu jauh lebih pendek (3 jam) dibandingkan dengan metode sol-gel konvensional (24 jam) (Chareonpanich *et al.*, 2007; Sarah *et al.*, 2024). Penggunaan *ultrasonic-assisted sol gel* pada pembuatan pengemban katalis Al-SBA-15 merupakan salah satu unsur kebaruan pada penelitian ini. Selain itu, katalis Ni/Al-SBA-15 yang dihasilkan belum banyak dipelajari pada pirolisis kilat *Spirulina platensis*.

Pada studi ini, *Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectroscopy* (Py/GC-MS) digunakan untuk melakukan pirolisis kilat mikroalga *Spirulina platensis*. Instrumen ini merupakan GC-MS yang dilengkapi dengan piroliser, di mana hasil pirolisis akan secara langsung dianalisis dengan GC-MS. Pirolisis kilat merupakan salah satu jenis pirolisis dengan laju pemanasan >1000 °C, waktu tinggal <0,5 detik dan menghasilkan produk utama berupa *bio-oil*. Pirolisis jenis ini juga memerlukan sampel dengan ukuran partikel yang sangat kecil (sekitar 105 – 250 µm) (Li *et al.*, 2013). Perangkat ini berhasil mengatasi kelemahan analisis GC-MS tradisional. Instrumen tersebut sangat cocok untuk pengujian biomassa karena memiliki sejumlah keunggulan, termasuk sensitivitas yang tinggi, analisis cepat tanpa perlakuan awal, membutuhkan jumlah sampel yang relatif kecil, dan ramah lingkungan (Ismayati *et al.*, 2023). Pirolisis dengan instrumen Py/GC-MS ini termasuk jenis pirolisis kilat, di mana proses pirolisis terjadi hanya dalam hitungan detik. Dalam penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Subagyo *et al.* (2023), pirolisis mikroalga *Botryococcus braunii* menggunakan instrumen Py-GC/MS. Hasil penelitian tersebut mengungkap bahwa komposisi kimia produk pirolisis mikroalga terdiri dari senyawa-senyawa yang merupakan hasil dekomposisi termal lipid, protein, karbohidrat, dan klorofil. Mikroalga *Botryococcus braunii* memiliki kandungan lipid yang lebih besar dibandingkan dengan *Spirulina platensis*, sehingga pada produk pirolisis, persentase produk turunan lipid akan lebih tinggi pada pirolisis *Botryococcus braunii*. Produk pirolisis *Botryococcus*

braunii berpotensi diaplikasikan sebagai bahan bakar, sedangkan produk pirolisis *Spirulina platensis* berpotensi sebagai senyawa aditif maupun prekursor bahan kimia.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis komposisi kimia produk pirolisis kilat mikroalga *Spirulina platensis* sebelum dan sesudah penambahan katalis. Pengembangan katalis pada studi ini adalah silika mesopori Al-SBA-15 yang disintesis dengan metode *ultrasonic-assisted sol gel* dengan waktu reaksi hidrolisis selama 5 jam, sedangkan katalis yang digunakan pada proses pirolisis kilat adalah Ni/Al-SBA-15.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini bahan yang digunakan yaitu Pluronic 123 (*poly (ethylene glycol)-block-poly (propylene glycol) block-poly (propylene glycol)*) (Sigma-Aldrich), HCl 32% (Mallinckrodt), TEOS (tetraortosilikat) *for synthesis* merk KGaA, *aquadest*, *aluminium foil*, kertas saring, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (*Nickel (II) nitrate hexahydrate for analysis* merk KGaA, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ *for analysis* merk KGaA, dan mikroalga hijau serbuk (*Spirulina platensis*) dengan nomor batch SP2192-FG diperoleh dari Fuqing King Dnarmsa Spirulina Co. Ltd, Provinsi Fujian, P.R.Cina.

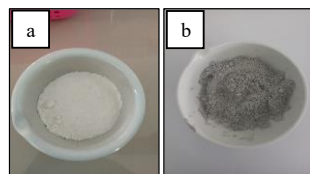
Alat yang digunakan yaitu seperangkat alat gelas, cawan porselen, corong *Buchner*, *magnetic stirrer*, mikropipet, pH meter, pompa vakum, spatula, neraca digital, termometer, oven (Mettler, Jerman), *Electric Furnace* IP-EF01, *Krisbow Ultrasonic Cleaner* 1400 mL dengan *Ultrasonic Frequency* 42 kHz, Vortex V-1 plus, dan *multi-shot pyrolyzer* (EGA/PY-3030D) yang ditandem dengan GC/MS QP-2020 NX.

Karakterisasi *Spirulina platensis*

Analisis kadar air dan kadar abu sampel *Spirulina platensis* dilakukan oleh Laboratorium Tanah, Tanaman, Pupuk, Air Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, Laboratorium Pengujian BPSIP Kalimantan Timur. Metode IKM TN (Juknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk) 02 digunakan untuk analisis kadar air dan metode IKM TN (Juknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk) 09 digunakan untuk analisis kadar abu. Analisis klorofil sampel *Spirulina platensis* dilakukan oleh Laboratorium Mikrobiologi dan Genetika Molekular, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman dengan metode spektrofotometer. Analisis protein sampel *Spirulina platensis* dilakukan oleh Laboratorium UPTD. Balai Pengujian Sertifikasi Mutu dan Barang, Kalimantan Timur dengan metode destruksi. Analisis C-Organik sampel *Spirulina platensis* dilakukan oleh Laboratorium Tanah, Tanaman, Pupuk, Air Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, Laboratorium Pengujian, Kalimantan Timur dengan metode SNI 7763:2018, butir 6.5. Analisis N-Total Kjeldahl sampel *Spirulina platensis* dilakukan oleh Laboratorium Tanah, Tanaman, Pupuk, Air Badan Standardisasi Instrumen Pertanian, Laboratorium Pengujian BPSIP Kalimantan Timur dengan metode IKM TN 03.

Sintesis dan Karakterisasi Ni/Al-SBA-15

Tahapan pertama yaitu, sebanyak 16 g *Pluronic* 123 yang ditimbang dengan neraca digital dimasukkan ke dalam labu erlenmeyer kemudian dilarutkan 640 mL HCl 2 M dengan menggunakan *magnetic stirrer* hingga larut sempurna. Sebanyak 6,91 g $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ yang telah dilarutkan dengan sedikit aquades ditambahkan ke dalam campuran. Sebanyak 38,4 mL TEOS dimasukan ke dalam campuran, lalu campuran disonikasi pada suhu 40 – 50 °C selama 5 jam. Kemudian campuran dipanaskan dalam oven pada suhu 100 °C selama 24 jam, setelah itu didinginkan pada suhu ruang lalu disaring. Padatan yang dihasilkan dicuci dengan aquades hingga pH filtrat sama dengan pH dengan aquades. Padatan yang dihasilkan dikalsinasi di suhu 500 °C selama 16 jam. Hasil yang diperoleh diberi nama Al-SBA-15 ([Gambar 1a](#)), di mana padatan ini berfungsi sebagai pengembangan katalis. Selanjutnya 6,60 g padatan Al-SBA-15 dicampur dengan 3,27 g $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ yang telah dilarutkan dengan sedikit aquades. Kemudian campuran diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 12 jam pada suhu kamar dan dipanaskan dalam oven dengan suhu 100 °C selama 5 jam. Kemudian campuran dikalsinasi dengan *furnace* pada suhu 500 °C selama 5 jam. Hasil yang diperoleh berupa serbuk berwarna abu-abu yang diberi nama Ni/Al-SBA-15 ([Gambar 1b](#)).



Gambar 1. (a) Al-SBA-15 dan (b) Ni/Al-SBA-15.

Karakterisasi pengemban katalis Al-SBA-15 dan katalis Ni/Al-SBA-15 dilakukan menggunakan: *Surface Area Analyzer* Nova Touch LX-4 untuk mengetahui luas permukaan, diameter pori dan volume pori; *Fourier Transform Infrared* (FTIR) Bruker Alpha II untuk mengetahui gugus fungsi material yang dihasilkan; *small angle XRD* menggunakan instrumen Bruker Phaser XRD analyzer dengan kondisi analisis 20kV/5mA, *divergence slit* 0,1, *soller slit* 2.5°, dengan detektor LYNXEYE-XET (*opening* 5,8°); dan *wide angle X-Ray Diffraction* (XRD) dengan instrumen D-8 Advance Bruker AXS dengan detektor LYNXEYE XE-T pada 2-90° 2θ dengan *step size* 0,05.

Pirolisis Kilat Mikroalga

Sampel serbuk *Spirulina platensis* tanpa katalis dan dengan katalis Ni/Al-SBA-15 (0,5 mg) dimasukkan ke dalam eco-cup SF PY1-EC50F dan ditutup dengan *glass wool*. Pirolisis dilakukan menggunakan *multi-shot pyrolyzer* (EGA/PY-3030D, suhu *interface* 280 °C) pada suhu 450 °C selama 6 detik. Analisis produk pirolisis menggunakan GC/MS QP-2020 NX (Shidmadzu, Japan), dengan kolom MS SH-Rxi-5Sil (ukuran 30 m × 0,25 mm), dengan *electron impact* sebesar 70 eV. Gas helium sebagai gas pembawa memiliki laju alir 15,9 mL/min, laju alir kolom sebesar 0,61 mL/min, dan tekanan sistem sebesar 20 kPa. Analisis dilakukan dengan suhu awal sistem 50 °C selama 10 menit, dilanjutkan dengan suhu 280 °C dengan kecepatan pemanasan 5 °C/menit. Penentuan produk pirolisis dilakukan melalui perbandingan data waktu retensi dan massa spektrum dengan *database* dari NIST Library 2017. Penentuan senyawa yang terdeteksi pada pirogram juga didasarkan pada nilai *similarity index* (SI), yaitu >80%. Penentuan jenis senyawa juga dikombinasikan dengan justifikasi berdasarkan rangkuman literatur tentang kemungkinan senyawa yang terbentuk selama pirolisis mikroalga pada penelitian sebelumnya (Subagyo *et al.*, 2016). Pendekatan ini memberikan validasi tambahan untuk memastikan keakuratan karakterisasi senyawa. Senyawa yang teridentifikasi pada pirogram selanjutnya dikelompokkan berdasarkan prekursornya dan kelompok senyawa untuk menganalisis perbedaan komposisi kimia produk sebelum dan sesudah penambahan katalis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Mikroalga *Spirulina platensis*

Hasil karakterisasi mikroalga *Spirulina platensis* sebagai informasi pendukung terkait proses pirolisis ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil karakterisasi mikroalga hijau *Spirulina platensis*.

Parameter	Kandungan
Kadar Air (%)	8,34
Kadar Abu (%)	7,18
Klorofil Total (mg/L)	61,96
Klorofil a (mg/L)	19,65 ± 0,00015
Klorofil b (mg/L)	42,60 ± 0,00015
Kadar Protein (%)	69,50
C-Organik (%)	70,31
N-Total Kjeldahl (%)	9,13

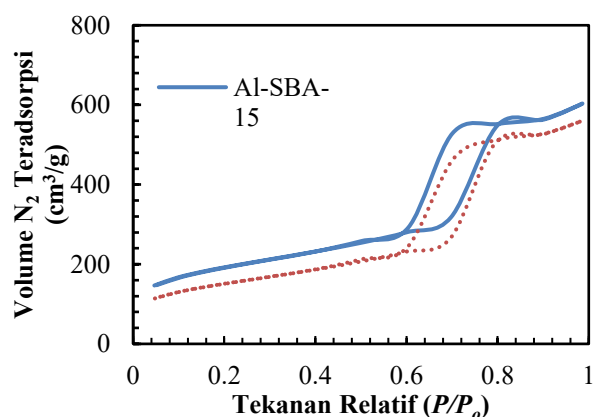
Kadar air dari *Spirulina platensis* sebesar 8,34%. Nilai kadar air sampel ini sesuai dengan SNI 8468-2018 mengenai syarat mutu dan pengolahan *Spirulina platensis* kering yaitu maksimal 10% (Sinulingga *et al.*, 2024). Kadar air sampel merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi jumlah, kualitas dan homogenitas *bio-oil* yang akan dihasilkan. Kadar air pada sampel berpengaruh pada proporsi fase organik dan fase *aqueous* yang dihasilkan (Subagyo *et al.*, 2015). Selain itu semakin tinggi kadar air sampel, maka energi yang diperlukan untuk menguapkan air yang terkandung dalam sampel akan semakin besar. Kadar abu mikroalga hijau *Spirulina platensis* diperoleh sebesar 7,18%. Nilai kadar abu sampel sesuai dengan FAO (2008) mengenai kadar abu *Spirulina*

platensis dengan rentang antara 3 – 11%. Kadar abu mengindikasikan jumlah mineral pada sampel biomassa. Biomassa yang bermutu baik berdasarkan sifat proksimatnya yaitu mempunyai kandungan kadar abu yang rendah (Nawawi *et al.*, 2018). Semakin tinggi kadar abu sampel yang digunakan, maka *yield* pirolisis total akan berkurang.

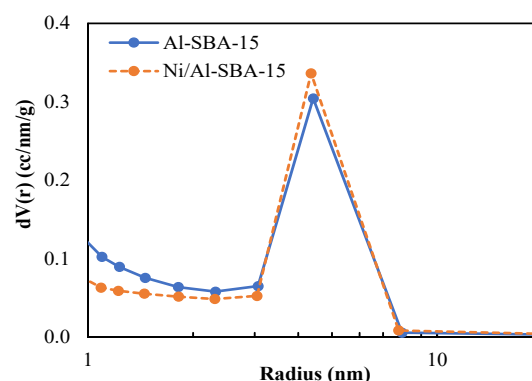
Klorofil total dalam *Spirulina platensis* sebesar 61,96 (mg/L) dengan klorofil a sebesar $19,65 \pm 0,00015$ (mg/L) dan klorofil b sebesar $42,60 \pm 0,00015$ (mg/L). Klorofil tersusun atas berbagai unsur yaitu karbon, nitrogen, hidrogen dan oksigen (Permadi *et al.*, 2022). Klorofil berperan penting pada proses fotosintesis dalam metabolisme pembentukan energi dan oksigen yang dihasilkan pada biomassa, dimana semakin banyak klorofil maka semakin besar pula energi yang dihasilkan (Aryono *et al.*, 2022). Klorofil merupakan prekursor produk turunan *phytol* dan senyawa nitrogen pada produk pirolisis mikroalga (Subagyono *et al.*, 2016). Kadar protein *Spirulina platensis* tergolong cukup tinggi (69,50%), di mana protein mengandung unsur nitrogen (N). Selanjutnya untuk mengetahui kandungan nitrogen total yang terdapat di dalam protein dilakukan analisis N-Total Kjeldahl. Apabila kandungan senyawa nitrogen yang berasal dari degradasi termal klorofil dan protein bernilai tinggi dalam produk pirolisis, khususnya *bio-oil*, maka diperlukan proses *upgrading* (misal: denitrogenasi) untuk menurunkan kadar nitrogen pada *bio-oil*. Kadar C-Organik *Spirulina platensis* sebesar 70,31%. Biomassa yang bermutu baik berdasarkan sifat proksimatnya yaitu mempunyai kandungan kadar C-organik yang tinggi. Apabila kandungan karbon dalam suatu sampel tinggi maka dapat menghasilkan kualitas produk *bio-oil* yang baik (Imam and Capareda, 2012), seperti meningkatkan konsentrasi senyawa alifatik, kandungan karbon pada produk, dan nilai *high heating value*.

Karakterisasi Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15

Material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15 yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan *surface area analyzer* (SAA), *fourier transform infrared* (FTIR), dan *small and wide angle x-ray diffraction*. *Surface Area Analyzer* (SAA) digunakan untuk mengetahui luas permukaan, distribusi pori, diameter pori dan volume pori material didasarkan pada siklus adsorpsi dan desorpsi isoteris gas N₂ oleh sampel serbuk pada suhu N₂ cair dan perhitungan luas permukaan dilakukan dengan metode BET (Putri and Ratnawulan, 2019). Kurva isoterm adsorpsi/desorpsi N₂ material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15 ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva isoterm adsorpsi/desorpsi N₂ material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15.



Gambar 3. Kurva distribusi pori material Al/SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15.

Gambar 2 menunjukkan bahwa isoterm adsorpsi/desorpsi N₂ material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15, grafik isoterm material tersebut tergolong jenis isoterm adsorpsi tipe IV yang mengindikasikan material mesopori (Winanti *et al.*, 2017). Pada isoterm ini terdapat *loop* histeresis akibat adanya perbedaan jumlah gas nitrogen pada proses adsorpsi dan desorpsi. *Loop* histeresis ini terbentuk pada saat proses kondensasi dan besar kecilnya kisaran tekanan relatif daerah histeresis bergantung dengan jumlah gas nitrogen yang teradsorpsi (membentuk *multilayer* atau *monolayer*) di permukaan material (Prestianggi *et al.*, 2019). Tabel 2 menunjukkan kisaran tekanan relatif Al-SBA-15 sebesar 0,50 – 0,90 P/P_0 dengan jumlah N₂ teradsorpsi sebesar 258,30 – 563,22 cm³/g, sedangkan untuk Ni/Al-SBA-15 diperoleh tekanan relatif sebesar 0,59 – 0,89 P/P_0 dengan jumlah N₂ teradsorpsi sebesar 230,86 – 525,90 cm³/g.

Tabel 2. Kisaran tekanan relatif material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15.

Material	Tekanan Relatif (P/P_0)	Volume N ₂ Teradsorpsi (cm ³ /g)
Al-SBA-15	0,50 – 0,90	258,30 – 563,22
Ni/Al-SBA-15	0,59 – 0,89	230,86 – 525,90

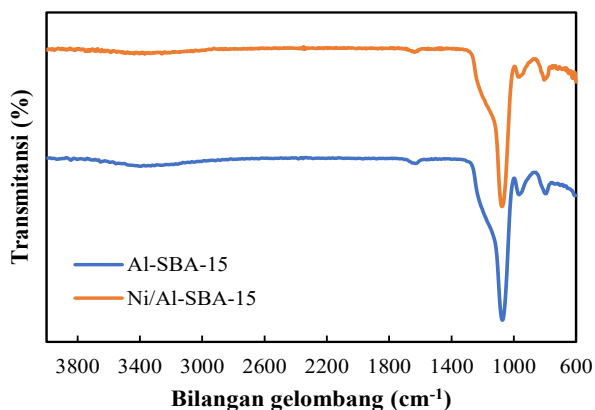
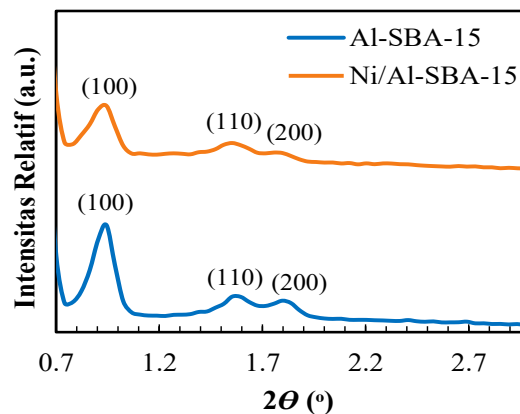
Berdasarkan nilai diameter pori material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15 yang ditunjukkan pada Tabel 3, kedua material yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dikategorikan sebagai material mesopori karena memiliki diameter pori berkisar 2 – 50 nm. Setelah inkorporasi nikel pada kerangka Al-SBA-15, luas permukaan dan volume pori pada Ni/Al-SBA-15 mengalami penurunan dibandingkan dengan Al-SBA-15, hal ini dimungkinkan terjadi karena sebagian logam Ni tidak hanya terdiposisi di permukaan Al-SBA-15, namun juga menutup sebagian pori pengembangan katalis (Iftitah *et al.*, 2013). Secara umum, apabila luas permukaan material menurun, hal ini mengakibatkan berkurangnya area aktif katalis. Namun, perlu diperhatikan bahwa Al-SBA-15 memiliki aktivitas katalitik yang rendah, sehingga penambahan Ni akan meningkatkan aktivitas katalitik dari material yang dihasilkan.

Tabel 3. Luas permukaan, diameter pori, dan volume pori material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15.

Material	Luas Permukaan (m ² /g)	Diameter Pori (nm)	Volume Pori (cm ³ /g)
Al-SBA-15	656,75	5,6	0,93
Ni/Al-SBA-15	522,54	6,6	0,86

Gambar 3 menunjukkan grafik distribusi pori dari material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15. Munculnya satu puncak pada grafik distribusi pori merupakan salah satu indikator bahwa sampel yang dihasilkan cukup homogen. Berdasarkan grafik distribusi pori ini, material yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki rentang ukuran pori 2 – 7 nm. Jika dibandingkan dengan material silika mesopori lain dari limbah yang berkisar 3 – 14 nm (Winanti *et al.*, 2017), maka material Al-SBA-15 yang dihasilkan memiliki tingkat homogenitas pori yang lebih tinggi.

Hasil analisis FTIR Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15 ditampilkan pada Gambar 4 dan Tabel 4. Pada spektrum Al-SBA-15, adanya gugus fungsi siloksan ditunjukkan dari pita serapan pada panjang gelombang 795 cm⁻¹ dan 967 cm⁻¹. Serapan pada panjang gelombang 1073 cm⁻¹ mengindikasikan adanya gugus silanol ulur simetris. Selanjutnya, terdapat serapan lemah pada panjang gelombang 3393 cm⁻¹ yang menunjukkan gugus –OH dari Si-OH (silanol). Lebih lanjut, untuk Ni/Al-SBA-15, gugus fungsi siloksan dengan vibrasi ulur simetris dan anti simetris muncul pada panjang gelombang 804 cm⁻¹ dan 967 cm⁻¹. Gugus silanol ulur simetris muncul pada panjang gelombang 1076 cm⁻¹. Indikasi adanya gugus –OH dari Si-OH (silanol) ditunjukkan dari serapan lemah pada panjang gelombang 3260 cm⁻¹. Serapan-serapan yang muncul pada kedua material ini juga diamati pada material Ni/SBA-15 dari penelitian sebelumnya (Fitriah, 2023). Berdasarkan hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa inkorporasi Ni pada kerangka Al-SBA-15 tidak menghasilkan perbedaan berarti pada spektra FTIR material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15, kecuali pada intensitas serapan gugus silanol, yang dimungkinkan karena interaksi Ni dengan permukaan kerangka silika. Kedua material mempunyai gugus fungsi silanol, siloksan, serta –OH dari gugus silanol dan adsorpsi air.

**Gambar 4.** Spektra FTIR Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15**Gambar 5.** Pola difraksi *small angle* XRD Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan [Sarah *et al.* \(2024\)](#), spektrum FTIR material SBA-15 yang disintesis dengan metode sonikasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa inkorporasi Al pada kerangka silika melalui proses sonikasi tidak mengubah pola vibrasi atau sifat struktural dari kedua material tersebut.

Tabel 4. Gugus fungsi material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA 15.

Material	Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)
Al-SBA-15	Si-O-Si (simetris)	795
	Si-OH (silanol ulur simetris)	1073
	Si-O-Si (anti simetris)	967
	-OH (silanol)	3393
Ni/Al-SBA 15	Si-O-Si (simetris)	804
	Si-OH (silanol ulur simetris)	1076
	Si-O-Si (anti simetris)	967
	-OH (adsorpsi air)	1636
	-OH (silanol)	3260
SBA-15 (Sarah <i>et al.</i>, 2024)	Si-O-Si (simetris)	803
	Si-OH (silanol ulur simetris)	966
	Si-O-Si (anti simetris)	1070
	-OH (adsorpsi air)	1631

Small Angle X-Ray Diffraction adalah analisis yang digunakan untuk mengetahui struktur material yang puncak refleksinya muncul pada sudut 2θ antara 1 – 5°. Material Al-SBA-15 menunjukkan tiga puncak khas dari SBA-15 dengan nilai indeks Miller yaitu (100), (110) dan (200), yang mengindikasikan bentuk heksagonal dua dimensi dan group ruang $p6mm$ dari SBA-15 ([Subagyo, 2022](#)) ([Gambar 5](#) dan [Tabel 5](#)). Setelah modifikasi Ni pada Al-SBA-15, puncak dengan indeks miller (100), (110) dan (200) mengalami pergeseran ke kiri yang mengindikasikan menurunnya jarak kisi (d_{100}) material setelah modifikasi. Berdasarkan penelitian mengenai nanostruktur logam oleh [Leão *et al.* \(2023\)](#), jarak kisi yang merupakan perubahan dalam jarak antar atom dalam kristal logam, dapat secara langsung mempengaruhi luas permukaan spesifik material. Hal ini mengindikasikan bahwa jarak kisi tidak hanya memengaruhi struktur internal material, tetapi juga memiliki dampak terhadap sifat permukaannya. Munculnya dua puncak dengan indeks Miller (110) dan (200) setelah inkorporasi nikel mengindikasikan bahwa tidak terjadi perubahan signifikan pada struktur heksagonal dari Al-SBA-15.

Tabel 5. Sudut 2θ puncak khas Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA 15.

Material	2θ		
	[100]	[110]	[200]
Al-SBA-15	0,94°	1,55°	1,79°
Ni/Al-SBA 15	0,90°	1,51°	1,75°

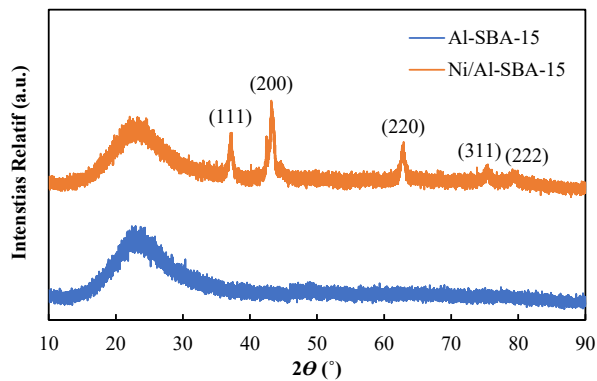
Difraktogram Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15 yang menunjukkan pola difraksi pada rentang sudut 2θ 10 – 90 ditunjukkan pada [Gambar 6](#). Material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15 menunjukkan puncak lebar yang berkisar dari 20 – 30° 2θ yang merupakan puncak dari silika. Difraktogram Ni/Al-SBA-15 menunjukkan lima puncak dengan sudut yaitu 36,95°, 43,30°, 62,89°, 75,51°, dan 80,03° dengan nilai indeks miller secara berurutan yaitu [111], [200], [220], [311], dan [222]. Kelima puncak ini menandakan adanya NiO pada Al-SBA-15 ([Subagyo *et al.*, 2023](#)).

Pirolisis Kilat Mikroalga *Spirulina Platensis* Dengan dan Tanpa Katalis

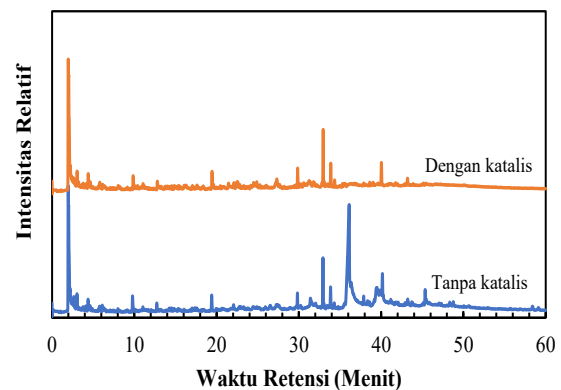
Hasil analisis pirolisis kilat *Spirulina platensis* dengan dan tanpa katalis Ni/Al-SBA-15 menggunakan instrumen Py-GC/MS berupa pirolisis-kromatogram (pirogram). Pada pirogram tersebut sumbu X menunjukkan waktu retensi sedangkan sumbu Y menunjukkan intensitas relatif. Hasil pirolisis *Spirulina platensis* sebelum dan setelah penambahan katalis dapat dilihat pada [Gambar 7](#).

Pirogram hasil pirolisis *Spirulina platensis* sebelum dan setelah penambahan katalis Ni/Al-SBA-15 memiliki pola yang serupa pada waktu retensi 1 – 2 menit yang menunjukkan puncak dari gas CO₂, sedangkan pada menit ke 35 – 45 kedua pirogram memiliki pola yang berbeda (detail pada [Tabel 6](#)). Puncak-puncak yang muncul setelah melalui proses pirolisis ini merupakan puncak dari senyawa-senyawa yang dihasilkan dari dekomposisi termal

karbohidrat, lipid, protein dan klorofil pada mikroalga. Adapun senyawa-senyawa yang dapat diidentifikasi pada pirogram *Spirulina platensis* sebelum dan setelah penambahan katalis dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 8.



Gambar 6. Difraktogram material Al-SBA-15 dan Ni/Al-SBA-15.



Gambar 7. Pirogram hasil pirolisis *Spirulina platensis*

Tabel 6. Hasil pirolisis *Spirulina platensis* berdasarkan analisis pirogram.

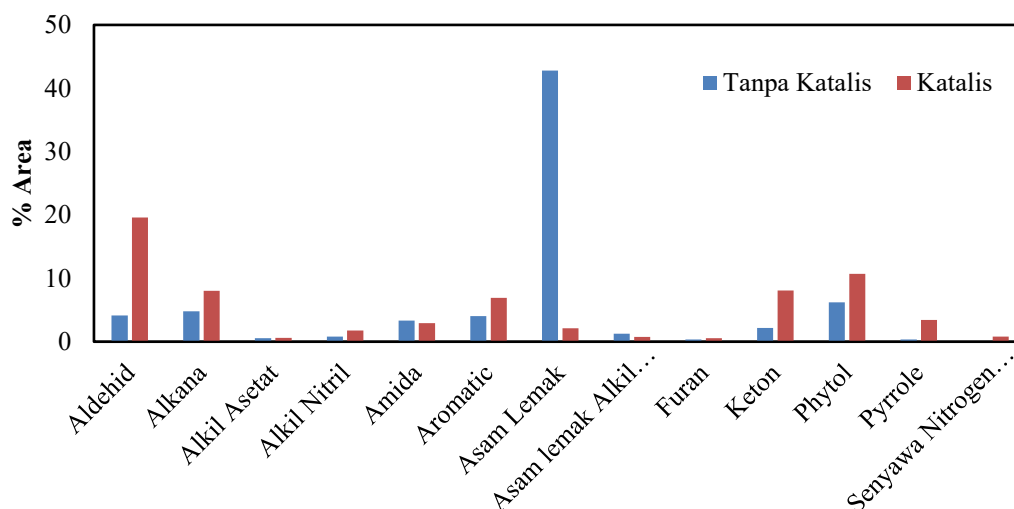
Nama Senyawa	Katalis		Tanpa Katalis		Prekursor	m/z	SI
	Waktu Retensi (menit)	% Area	Waktu Retensi (menit)	% Area			
Karbon dioksida	1,976	17,16	1,969	21,03	Kombinasi	44	94
Asetaldehida	2,031	17,73			Karbohidrat	29	85
2-metil-propanal	2,412	1,87	2,198	3,91	Karbohidrat	43,05	94
Isobutana	2,216	5,17			Lipid	43	84
2-Vinil etil asetat			2,509	0,57	Karbohidrat	43	79
Asetil sianida	2,524	1,87			Lipid	43	81
Asam asetat	2,641	2,14	2,645	1,01	Karbohidrat	45	96
Siklobutanon	2,749	1,45			Karbohidrat	42	84
3-metil-butanal	2,982	1,17	2,968	0,33	Karbohidrat	44	95
1-Hidroksi-2-propanon	3,052	2,72	3,036	1,37	Karbohidrat	43	90
1-Etenil-aziridin	3,231	0,81			Protein	41	88
2-Oksepanon	3,645	0,45			Karbohidrat	42,5	81
3-Metil-butanenitril	3,794	0,48	3,777	0,18	Lipid	43,05	95
Pirol	4,136	0,55	4,103	0,36	Protein	67	91
Toluen	4,403	2,8	4,384	1,6	Protein	91,05	95
Asam propanoat 2-okso-, metil ester			4,631	0,34	Lipid	43	91
1,2-Epoksi-3-propil asetat	4,658	0,6			Karbohidrat	43	87
4,4-dimetil-1,2-pentadiena			5,725	0,22	Lipid	57,05	80
2-Bromo-butana,	5,755	0,3			Lipid	57,05	83
Isoamil sianida	5,807	0,56	5,781	0,3	Lipid	55,05	95
2-Furan metanol	6,162	0,58	6,113	0,37	Karbohidrat	98,05	96
1,2- Siklopentanedion			8,022	0,17	Karbohidrat	98,05	89
Fenol	9,86	2,56	9,787	1,77	Karbohidrat	94,05	97
3-Metil-1,2- siklopentanedion	11,067	0,68	11,047	0,31	Karbohidrat	112,05	89
p-Kresol	12,8	1,58	12,732	0,69	Karbohidrat	107,05	96
Nitril benzil	14,551	0,5	14,516	0,16	Protein	117,05	92
2-Metil-1-heptana			17,025	0,22	Lipid	56	82

Nama Senyawa	Katalis		Tanpa Katalis		Prekursor	m/z	SI
	Waktu Retensi (menit)	% Area	Waktu Retensi (menit)	% Area			
Indol	19,453	2,6	19,408	1,6	Protein	117,05	97
1,3- Siklopentanedion	19,621	0,9			Karbohidrat	98,05	85
2-metil-1,3- siklopentanedion	21,458	0,72			Karbohidrat	112,05	83
3-Metil-indol	22,013	0,74	22,07	0,34	Protein	130,05	97
2- Asam tiofenasetat, ester 4-tetradekil	24,882	0,77			Lipid	140,1	81
Heptadekana	29,853	2,57	29,827	1,00	Lipid	57,05	98
Asam tetradekanoat			31,41	1,00	Lipid	73	94
Heksahidro-pirol[1,2-a]pirazin-1,4-dion	31,796	1,45			Protein	83,05	83
3,7,11,15-Tetrametil-2-heksadekena	32,813	0,53			Klorofil	70,05	85
Neofitadina	32,958	9,28	32,934	5,39	Klorofil	68,05	96
3,7,11,15-Tetrametilheksadek-2-ena	33,076	0,51	33,054	0,35	Klorofil	70,05	95
Heptadekananitril	34,342	0,81	34,311	0,46	Lipid	43,05	94
Heksahidro-3-(2-metilpropil)-pirrolo[1,2-a]pirazin-1,4-dion,	35,303	1,45			Protein	154,05	88
Asam heksadekanoat			36,123	31,05	Lipid	73	94
Tetrakosana			36,367	1,95	Lipid	57,05	88
Asam oktadekanoat, ester 2-propenil			37,887	0,64	Lipid	43,05	91
Heneikosana			38,354	1,13	Lipid	57,05	93
Fitol	38,611	0,38	38,607	0,46	Klorofil	71,05	95
Tetrahidro-6-nonil-2H-piran-2-on			39,155	0,26	Protein	99,05	80
Asam oleat			39,495	6,06	Lipid	55,05	94
Asam oktadekanoat			39,86	3,68	Lipid	43,05	95
Heksadekanamida	40,035	2,93	40,16	3,03	Lipid	59,05	96
Palmitoil klorida			41,179	1,95	Protein	43,05	83
2-Metilen sikloheptanol			42,913	0,2	Karbohidrat	83,05	80
Nonadekanamida			43,731	0,28	Lipid	59,05	86
Asam oktadekanoat, 3-oks-, etil ester			45,117	0,29	Lipid	130,05	80
1-Iodo- tetrakosana,			45,485	0,72	Lipid	57,05	88
Oleoil klorida			48,338	0,63	Lipid	55,05	92
2-Oktil-1-dekanol			48,776	0,57	Lipid	57,05	84
(3.beta)-Stigmasta-5,22-dien-3-ol, asetat			58,403	0,59	Sterol	135,1	80

Keterangan: SI= *Similarity Index*

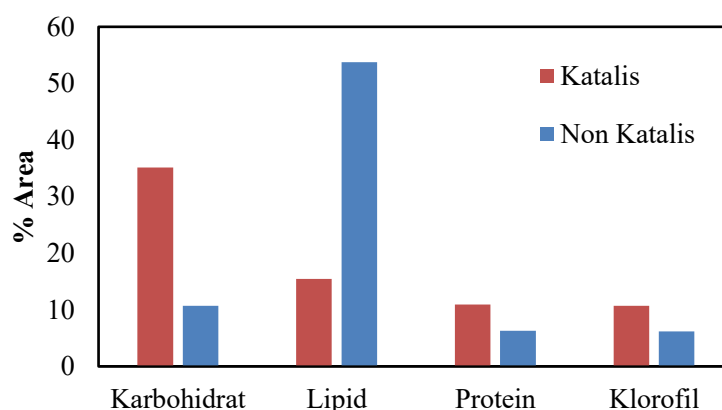
Tabel 6 menunjukkan bahwa jumlah senyawa yang berhasil diidentifikasi dari pirolisis *Spirulina platensis* sebelum dan sesudah penambahan katalis. Senyawa golongan aldehid, furan, aromatik, alkil asetat dan keton yang teridentifikasi pada pirogram merupakan produk dekomposisi termal dari karbohidrat. Senyawa pyrrole, alkil nitril, dan senyawa mengandung nitrogen lainnya merupakan hasil dekomposisi termal dari protein, sedangkan alkana, alkil nitril, asam lemak, asam lemak alkil ester dan amida adalah hasil dekomposisi termal dari lipid. Senyawa phytol merupakan dekomposisi termal dari klorofil (Subagyo *et al.*, 2023). Kemudian, analisis komposisi produk pirolisis *Spirulina platensis* sebelum dan setelah penambahan katalis dilanjutkan dengan pengelompokan jenis prekursor dan dihitung persen area senyawa produk pirolisis yang diperoleh. Hasil

komposisi produk pirolisis *Spirulina platensis* sebelum dan setelah penambahan katalis dapat dilihat pada [Gambar 8](#).



Gambar 8. Produk pirolisis *Spirulina platensis* berdasarkan penggolongan kelompok senyawa.

[Gambar 9](#) menunjukkan komposisi produk pirolisis *Spirulina platensis* sebelum penambahan katalis terdiri dari produk turunan dekomposisi termal karbohidrat (10,7%), produk turunan dekomposisi termal lipid (53,8%), produk turunan dekomposisi termal protein (6,3%), dan produk turunan dekomposisi termal klorofil (6,2%). Komposisi produk pirolisis *Spirulina platensis* setelah penambahan katalis adalah produk turunan dekomposisi termal karbohidrat sebesar 35,2%, produk turunan dekomposisi termal lipid sebesar 15,5%, produk turunan dekomposisi termal protein sebesar 10,9%, dan produk turunan dekomposisi termal klorofil sebesar 10,7%. Setelah penambahan katalis terjadi peningkatan persen area senyawa turunan dekomposisi termal dari karbohidrat seperti aldehid, furan, aromatik, alkil asetat dan keton, produk turunan protein seperti alkil nitril, dan produk turunan klorofil seperti phytol. Hal tersebut dimungkinkan terjadi karena penambahan katalis memfasilitasi tumbukan efektif antar molekul reaktan sehingga meningkatkan probabilitas pembentukan produk. Pada reaksi tanpa katalis, mekanisme reaksi yang terjadi adalah melalui pemutusan ikatan secara termal (*thermal cracking*), tetapi dengan adanya katalis, reaksi yang terjadi adalah kombinasi *thermal cracking* dan *catalytic cracking* ([Subagyono et al., 2020](#)).



Gambar 9. Komposisi produk pirolisis *Spirulina platensis* berdasarkan prekursor.

Selain itu, terjadi penurunan persen area senyawa turunan dekomposisi termal dari lipid (khususnya asam heksadekanoat) yang dapat mengindikasikan peningkatan kualitas produk pirolisis (penurunan keasamaan dan kandungan oksigen produk pirolisis). Pada reaksi terkatalisis, reaksi hidrideoksigenasi yang mengubah senyawa yang mengandung oksigen menjadi senyawa hidroksil atau hidrokarbon dimungkinkan terjadi. Akan tetapi, hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan katalis meningkatkan konsentrasi senyawa yang mengandung nitrogen,

seperti alkil nitril, yang berpotensi untuk menghambat kerja katalis dalam proses upgrading. Senyawa yang mengandung nitrogen tersebut berasal dari hasil dekomposisi turunan protein. Oleh karena itu, diperlukan studi lebih lanjut untuk mencari kondisi pirolisis optimum, termasuk konsentrasi katalis, suhu pirolisis, desain reaktor, dll, agar dihasilkan produk pirolisis dengan kualitas terbaik yang dapat digunakan pada berbagai aplikasi.

KESIMPULAN

Sintesis pengemban katalis Al-SBA-15 dengan teknik *ultrasonic-assisted sol gel* menghasilkan material mesopori yang memiliki luas permukaan yang cukup tinggi. Setelah modifikasi dengan Ni, material yang dihasilkan memiliki karakteristik dasar untuk digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis *Spirulina platensis*. Produk pirolisis kilat *Spirulina platensis* sebelum dan setelah penambahan katalis Ni/Al-SBA-15, dengan menggunakan instrumen Py-GC/MS yaitu senyawa hasil dekomposisi termal karbohidrat, lipid, protein, dan klorofil. Katalis Ni/Al-SBA-15 menunjukkan aktivitas dalam meningkatkan produk turunan karbohidrat, protein dan klorofil, dan dapat meningkatkan aktivitas pemutusan ikatan pada lipid menjadi senyawa dengan berat molekul yang lebih kecil. Akan tetapi, penggunaan katalis meningkatkan pembentukan senyawa mengandung nitrogen yang perlu mendapat perhatian jika produk yang dihasilkan akan digunakan untuk aplikasi lebih lanjut.

KONFLIK KEPENTINGAN

Tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

KONTRIBUSI PENULIS

APW: Analisis Data, Penyelidikan, Visualisasi, Penulisan Draf Manuskrip; RRDJN: Konseptualisasi, Akuisisi Pendanaan, Metodologi, Administrasi Proyek, Visualisasi, Supervisi, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip; RG: Akuisisi Pendanaan, Supervisi, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip; VLA: Supervisi, Telaah dan Penyuntingan Manuskrip; MM: Analisis Data, Penyelidikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi atas bantuan dana dalam pelaksanaan penelitian penulis melalui hibah World Class Profesor dengan nomor kontrak 031/E5/PG/02.00.PL/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Adha, D.N., 2023. Studi Kinetika Pirolisis Serbuk Kayu Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dan Serbuk Kayu Meranti (*Shorea spp*) dengan Katalis Ni/SBA-15 Menggunakan Analisis Termogravimetri. *Skripsi*. Universitas Mulawarman, Samarinda.
- Anam, C., Agustini, T.W., and Romadhon, 2014. Pengaruh Pelarut yang Berbeda pada Ekstraksi *Spirulina Platensis* Serbuk sebagai Antioksidan dengan Metode Soxhletasi. *Jurnal Pengolahan dan Bioteknologi*, 3.
- Aryono, B., Zainuddin, M., and Fithria, R.F., 2022. Pertumbuhan, Kadar Pigmen dan Aktivitas Antioksidan *Spirulina Platensis* pada Kultur dengan Perbedaan Warna Pencapaian Leds. *Journal of Marine Research*, 11, 805–818. <https://doi.org/10.14710/jmr.v11i4.35310>.
- Chareonpanich, M., Nanta-ngern, A., and Limtrakul, J., 2007. Short-Period Synthesis of Ordered Mesoporous Silica SBA-15 Using Ultrasonic Technique. *Materials Letters*, 61, 5153–5156. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.019>.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A.S., Bindar, Y., and Irawan, A., 2019. Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit menjadi Bio-Char, Bio-Oil dan Gas dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*, 3, 12. <https://doi.org/10.30872/cmg.v3i2.3578>.
- Fitriah, N.A., 2023. Pirolisis Serbuk Kayu Meranti (*Shorea spp*) dengan Katalis Ni/SBA-15 Menggunakan Instrumen Pyrolysis Gas-Chromatography-Mass Spectrometry (Py-GC/MS). *Skripsi*. Universitas Mulawarman, Samarinda.
- Iftitah, E.D., Muchalal, Trisunaryanti, W., and Armunanto, R., 2013. Karakterisasi dan Aktivitas Katalitik Berbagai Variasi Komposisi Katalis Ni dan ZnBr₂ dalam γ -Al₂O₃ untuk Isomerisasi dan Hidrogenasi (R)-(+)-Sitronelal. *Jurnal MIPA*, 36, 60–69.
- Imam, T., and Capareda, S., 2012. Characterization of Bio-Oil, Syn-Gas and Bio-Char from Switchgrass Pyrolysis at Various Temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.010>.

- Ismayati, M., Pramasari, D. A., Dwianto, W., Adi, D. S., Muliawati, N. T., Damayanti, R., Pramesti, N. A. P., Ramadhan, S., Hardianto, A., & Kamaluddin, N. N. 2023. A Study of Chemical Constituents in Platinum Fast-Grown Teak Wood (*Tectona grandis*) with Age Differences Using Py-GCMS Coupled with Interdependence Multivariate Analysis. *HAYATI Journal of Biosciences*, 30, 380–391. <https://doi.org/10.4308/hjb.30.2.380-391>.
- Jamilatun, S., Kurniawan, T.A., Purnama, A.C., and Putra, I.M., 2021. Pyrolysis of Spirulina Platensis Residue: Effect of Temperature without and with Fe-Oxide Catalyst. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 7, 127. <https://doi.org/10.26555/chemica.v7i2.18077>.
- Leão, M.B., Bordin, J.R., and de Matos, C.F., 2023. Specific Surface Area Versus Adsorptive Capacity: An Application View of 3D Graphene-Based Materials for the Removal of Emerging Water Pollutants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234, 136. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06146-6>.
- Li, F., Srivatsa, S.C., and Bhattacharya, S., 2019. A Review on Catalytic Pyrolysis of Microalgae to High-Quality Bio-Oil with Low Oxygenous and Nitrogenous Compounds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 481–497. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.026>.
- Li, L., Rowbotham, J.S., Christopher Greenwell, H., and Dyer, P.W., 2013. An Introduction to Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis: Versatile Techniques for Biomass Conversion, in: *New and Future Developments in Catalysis*. Elsevier, pp. 173–208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53878-9.00009-6>.
- Marsella, Y., Subagyo, R.R.J.N., and Gunawan, R., 2023. Pirolisis Serbuk Kayu Meranti (*Shorea spp*) dengan Katalis Ni/SBA-15 menggunakan instrumen Pyrolysis Gas-Chromatography-Mass Spectrometry (Py-GC/MS). *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, Universitas Mulawarman, Samarinda, pp. 125–131.
- Nawawi, D.S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., Gusvina, S.L., Wistara, N.J., Sari, R.K., and Syafii, W., 2018. Karakteristik Kimia Biomassa Untuk Energi. *Ilmu Teknologi Kayu Tropis*, 16.
- Permadi, A., Suhendra, Ahda, M., Zufar, A.F., Padya, S.A., Anugrah, N., Hadi, S., and Suharto, T.E., 2022. Perbandingan Kandungan Klorofil dan Antioksidan Spirulina dengan Beberapa Jenis Sayuran. In: *Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ*, 26 October 2022, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Yogyakarta, pp. 1–7.
- Prestianggi, Y., Maylisa, N., N Subagyo, R.D.J., Sitorus, S., and Daniel, 2019. Adsorption of Toluene and Xylene from Aqueous Solution on SBA-15 from Rice Husk. *Journal of Physics: Conference Series*, 1277, 24 October 2018, Novotel Balikpapan Hotel, Balikpapan, Indonesia, p. 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1277/1/012002>.
- Putri, A.Z., and Ratnawulan, 2019. Analisis Teoristik Nanopartikel Zirkonium Dioksida (ZrO₂). *Pillar of Physics*, 12, 70–76.
- Rachmawati, O., 2023. Studi Kinetika Pirolisis Sabut Kelapa dan Ampas Tebu dengan Katalis Ni/SBA-15 Menggunakan Analisis Termogravimetri. *Skripsi*. Universitas Mulawarman, Samarinda.
- Rakngam, I., Osakoo, N., Wittayakun, J., Chanlek, N., Pengsawang, A., Sosa, N., Butburee, T., Faungnawakij, K., and Khemthong, P., 2021. Properties of Mesoporous Al-SBA-15 from One-Pot Hydrothermal Synthesis with Different Aluminium Precursors and Catalytic Performances in Xylose Conversion to Furfural. *Microporous and Mesoporous Materials*, 317, 110999. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.110999>.
- Sarah, S., Subagyo, R.R.D.J.N., Allo, V.L., and Gunawan, R., 2024. Synthesis and Characterization of Mesoporous Silica SBA-15 Prepared by the Ultrasonic Assisted-Sol Gel Method. In: *AIP Conference Proceedings, The 4th International Conference on Mathematics and Sciences*. ICMSC, 10–11 October 2022, Samarinda, Indonesia, p. 030003. <https://doi.org/10.1063/5.0204746>.
- Sinulingga, F., Trilaksani, W., and Setyaningsih, I., 2024. Karakteristik Fisikokimia Tablet Berbasis Mikrokapsul Minyak Mata Tuna dan Spirulina. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 27, 1–15. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v27i1.49473>.
- Subagyo, D.J.N., Liang, Z., Knowles, G.P., and Chaffee, A.L., 2011. Amine Modified Mesocellular Siliceous Foam (MCF) as a Sorbent for CO₂. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 1647–1657. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.02.019>.
- Subagyo, D.J.N., Marshall, M., Fei, Y., Jackson, W.R., and Chaffee, A.L., 2015. Thermo-Chemical Reactions of Algae, Grape Marc and Wood Chips Using a Semi-Continuous/Flow-through System. *Fuel*, 158, 927–936. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.026>.
- Subagyo, R.R.D.J.N., Marshall, M., Jackson, W.R., Auxilio, A.R., Fei, Y., and Chaffee, A.L., 2020. Upgrading Microalgal Biocrude Using NiMo/Al-SBA-15 as a Catalyst. *Energy & Fuels*, 34, 4618–4631. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04171>.

- Subagyono, R.R.D.J.N., Putri, S.A., Manawan, M., Mollah, M., Nugroho, R.A., and Gunawan, R., 2023. Catalytic Pyrolysis of the Green Microalgae *Botryococcus Braunii* over Ni/SBA-15 Prepared by the Ultrasonic-Assisted Sol-Gel Method. *ACS Omega*, 8, 8582–8595. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07748>.
- Subagyono, R.R.D.J.N., Qi, Y., Jackson, W.R., and Chaffee, A.L., 2016. Pyrolysis-GC/MS Analysis of Biomass and the Bio-Oils Produced from CO/H₂O Reactions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 120, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.05.001>.
- Trisunaryanti, W., Suarsih, E., Triyono, T., and Falah, I.I., 2019. Well-Dispersed Nickel Nanoparticles on the External and Internal Surfaces of SBA-15 for Hydrocracking of Pyrolyzed α -Cellulose. *RSC Advances*, 9, 1230–1237. <https://doi.org/10.1039/C8RA09034C>.