

Sintesis dan Karakterisasi Material Komposit Si-Na-C Berbasis Batu Bara dan Dicalite Diatomite melalui Metode Sol-Gel

Bilgis Laily Pratama Putri^{1,2}, Muhammad Garda Nugroho^{1,2}, Srie Muljani^{1,2*}, Atika Nandini^{1,2}

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

²Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: sriemuljani.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 4 Februari 2026

Diterima: 09 Februari 2026

Abstract

The utilization of coal as a conventional energy source poses significant environmental concerns due to carbon emissions and solid waste generation, necessitating more sustainable and value-added alternative approaches. This study aims to synthesize a silica sodium carbon (Si-Na-C) composite material derived from coal and dicalite diatomite via the sol-gel method and to evaluate the effects of precursor ratio (1:1, 1:3, and 1:5) and acidification pH (4, 6, and 8) on the resulting material characteristics. Silica and carbon were extracted using NaOH solution, followed by mixing, gelation, drying, and calcination at 450 °C. The materials were characterized using X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), SEM-EDX, and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). XRF results revealed that the composites were predominantly composed of Si (66-85%), Na (3.5-5.6%), and C (6-20%), with increasing silica content and a linear decrease in carbon fraction as the proportion of dicalite increased. XRD patterns indicated an amorphous silica structure with traces of semi-crystalline graphite. SEM analysis showed improved morphological homogeneity at intermediate ratios, while FTIR confirmed the formation of Si-O-Si and Na-O-Si bonds. The pH 6 condition yielded the most stable elemental distribution and structural integrity. These findings demonstrate that controlling precursor ratio and pH is critical for optimizing the structure and properties of naturally derived Si-Na-C composites.

Keywords: *coal, composite materials, dicalite diatomite, si-na-c, sol-gel*

Abstrak

Pemanfaatan batu bara sebagai sumber energi konvensional menimbulkan permasalahan lingkungan akibat emisi karbon dan limbah padat, sehingga diperlukan pendekatan alternatif yang lebih berkelanjutan dan bernilai tambah. Penelitian ini bertujuan mensintesis material komposit silika natrium karbon (Si-Na-C) berbasis batu bara dan dicalite diatomite melalui metode sol-gel serta mengevaluasi pengaruh rasio prekursor (1:1; 1:3; 1:5) dan pH asidifikasi (4; 6; 8) terhadap karakteristik material. Silika dan karbon diekstraksi menggunakan larutan NaOH, kemudian dicampur, digelasi, dikeringkan, dan dikalsinasi pada 450 °C. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRF, XRD, SEM-EDX, dan FTIR. Hasil XRF menunjukkan dominasi unsur Si (66-85%), Na (3,5-5,6%), dan C (6-20%) dengan kecenderungan peningkatan kandungan silika seiring bertambahnya fraksi dicalite, sementara karbon menurun secara linier. Pola XRD mengindikasikan struktur silika amorf dengan jejak grafit semi-kristalin. Analisis SEM memperlihatkan morfologi yang lebih homogen pada rasio menengah, sedangkan FTIR mengonfirmasi pembentukan ikatan Si-O-Si dan Na-O-Si. Kondisi pH 6 menghasilkan distribusi unsur dan struktur paling stabil. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian rasio dan pH berperan penting dalam optimasi struktur dan sifat komposit Si-Na-C berbasis dari sumber daya alam.

Kata kunci: *batu bara, dicalite diatomite, komposit, si-na-c; sol-gel*

1. Pendahuluan

Berdasarkan data Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tahun 2020, total sumber daya batu bara Indonesia mencapai 143,73 miliar ton dengan cadangan sebesar 38,80 miliar ton. Meskipun demikian, pemanfaatan batu bara sebagai sumber energi konvensional menghadapi tantangan serius, terutama tingginya emisi gas rumah kaca (CO₂) serta produksi limbah abu terbang (*fly ash*) yang berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia [1]. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemanfaatan batu bara secara berkelanjutan tidak dapat lagi hanya berfokus pada pembakaran, melainkan memerlukan pendekatan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan bernilai tambah.

Sejalan dengan arah transisi energi dan *Road Map* Pengembangan dan Pemanfaatan Batu Bara Indonesia 2021-2045, salah satu pendekatan yang berpotensi dikembangkan adalah pemanfaatan batu bara sebagai bahan baku material fungsional, khususnya sebagai sumber karbon dalam material komposit. Batu bara, terutama jenis antrasit, memiliki kandungan karbon tinggi yang berpotensi dikonversi menjadi material berbasis karbon untuk aplikasi energi. Namun, pemanfaatan batu bara sebagai material elektrokimia masih relatif terbatas, khususnya dalam pengembangan material katoda baterai natrium-ion yang menuntut kestabilan struktur, konduktivitas yang baik, dan keberlanjutan sumber daya.

Di sisi lain, diatome diatomite merupakan sumber silika alami dengan kandungan SiO_2 tinggi, mencapai sekitar 80,6% [2]. Silika yang berasal dari fosil ganggang mikroskopis diatom tidak hanya melimpah, tetapi juga memiliki nilai tambah yang signifikan karena perannya dalam berbagai aplikasi industri, seperti adsorben, material isolasi (*insulation material*), serta bahan katoda baterai natrium-ion. Kombinasi batu bara sebagai sumber karbon dan diatome diatomite sebagai sumber silika membuka peluang pengembangan material komposit silika–natrium karbon yang berkelanjutan dan berbasis sumber daya lokal. Silika (SiO_2) memiliki senyawa yang sangat melimpah di alam dan banyak ditemukan di tanah maupun limbah pertanian seperti abu sekam padi. Silika berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman serta dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar berbagai material fungsional. Salah satu pengembangannya adalah silika natrium karbon (Si-Na-C), yaitu material hibrida yang tersusun dari silika, natrium, dan karbon dengan sifat mekanik, termal, dan elektrokimia yang baik [3].

Pengembangan sistem penyimpanan energi, baterai natrium-ion menjadi alternatif yang menjanjikan dibandingkan baterai litium-ion karena ketersediaan natrium yang melimpah dan biaya yang lebih ekonomis. Namun demikian, pengembangan material katoda baterai natrium-ion masih menghadapi tantangan, terutama dalam pengendalian struktur, morfologi, dan kinerja elektrokatalitik material. Proses ekstraksi karbon dari batu bara dan silika dari diatome diatomite sangat dipengaruhi oleh kondisi sintesis, khususnya pH dan konsentrasi larutan, yang berperan penting terhadap efisiensi pembentukan produk dan karakteristik akhir material. Pembentukan silika dapat dilakukan melalui beberapa metode, antara lain polikondensasi, pengendapan, dan sol-gel [3]. Metode sol-gel memiliki keunggulan meliputi suhu proses relatif rendah sehingga lebih hemat energi dan ramah lingkungan. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi rasio filtrat batu bara dan diatome diatomite (1:1; 1:3; 1:5) serta pH asidifikasi (4; 6; 8) untuk menentukan kondisi optimum pembentukan material komposit SI-NA-C, karena kedua parameter tersebut memengaruhi kelarutan silika dan proses polikondensasi. Optimalisasi rasio dan pH diharapkan menghasilkan material berkinerja tinggi dengan dampak lingkungan minimal. Karakterisasi material dilakukan dengan berbagai teknik analisis meliputi, XRF untuk mengetahui kandungan unsur dalam suatu bahan [4], SEM-EDX untuk mengamati struktur morfologi [5], FTIR untuk Analisa gugus fungsional [6].

Kombinasi antara proses kimia dan teknologi material dalam sintesis Si-Na-C berbasis batu bara dan diatome diatomite, penelitian ini dapat meningkatkan nilai ekonomi dari bahan, serta berkontribusi terhadap pengembangan bahan baku alternatif bagi industri. Hasil penelitian dapat memberikan kontribusi bagi peningkatan daya saing industri, sekaligus mendukung pengembangan teknologi ramah lingkungan. . Adanya struktur mesopori dan konduktivitas listrik yang tinggi, material ini berpotensi digunakan dalam berbagai aplikasi, terutama sebagai material katoda pada baterai Na-Air yang menjanjikan untuk sistem penyimpanan energi yang efisien dan ramah lingkungan [7]. Dengan demikian, Si-Na-C diharapkan mampu menunjukkan performa optimal dengan manfaat yang tinggi serta bernilai ekonomis.

2. Metode Penelitian

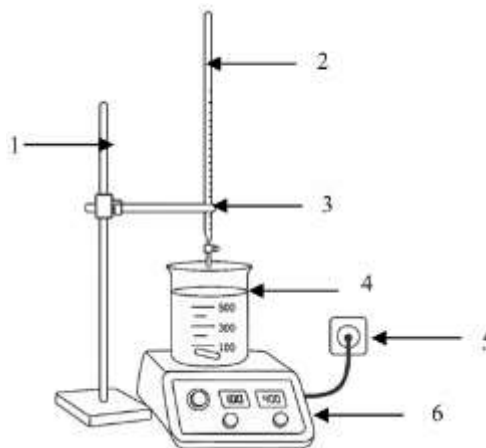
Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk mensintesis dan mengevaluasi material silika natrium karbon berbasis limbah batu bara dan diatome diatomite. Penelitian diawali dengan proses ekstraksi silika dan karbon dari bahan baku batu bara dan diatome diatomite, yang kemudian disintesis menggunakan metode sol-gel. Proses sintesis meliputi tahap asidifikasi, pengadukan, pengeringan, dan kalsinasi untuk memperoleh material dengan karakteristik yang diinginkan.

Bahan baku utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi diatome diatomite dan batu bara yang diperoleh dari PT. Pabrik Kertas Tjiwi Kimia. Bahan kimia yang digunakan meliputi natrium hidroksida (NaOH), asam sitrat ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), serta air demineralisasi (H_2O) sebagai pelarut. Peralatan yang digunakan terdiri atas beaker glass, hot plate magnetic stirrer, termometer, oven, kertas saring, corong kaca, batang pengaduk, mortar dan alu, wadah penampung, pipet ukur, pipet tetes, pH meter, neraca analitik, gelas ukur, spatula, statif, klem, buret, kaca arloji, dan aluminium foil.

Silika diekstraksi dari diatome diatomite dan batu bara melalui metode sol. Masing-masing bahan sebanyak 40 gr direaksikan dengan 400 mL larutan NaOH 3 N pada suhu 100°C disertai pengadukan

konstan, kemudian disaring menggunakan kertas saring Whatman untuk memperoleh filtrat. Filtrat dicalite diatomite dan batu bara selanjutnya dicampur dengan variasi rasio volume 1:1, 1:3, dan 1:5 (total volume 80 ml) dengan memvariasikan fraksi dicalite. Campuran kemudian diasidifikasi secara bertahap menggunakan larutan asam sitrat 2 N sambil diaduk menggunakan magnetic stirrer hingga mencapai pH 4; 6; 8, sehingga terbentuk gel melalui proses sol-gel. Gel yang dihasilkan di-aging selama 24 jam, dicuci dengan akuades untuk menghilangkan sisa asam dan pengotor, kemudian dikeringkan pada 110°C selama 24 jam. Tahap akhir dilakukan kalsinasi menggunakan furnace pada suhu 450°C selama 3 jam untuk memperoleh material akhir.

Karakterisasi material dilakukan menggunakan XRF untuk menentukan komposisi unsur, XRD untuk analisis struktur kristal, SEM-EDX untuk mengamati morfologi dan distribusi unsur, serta FTIR untuk identifikasi gugus fungsi. Hasil karakterisasi dan pengujian kemudian dianalisis secara komparatif untuk menentukan kondisi sintesis optimum serta hubungan antara struktur material dan performa elektrokimia. Berikut merupakan rangkaian alat ekstraksi yang digunakan.



Gambar 1. Rangkaian Alat Ekstraksi Silika.

Keterangan:

1. Statif
2. Buret
3. Klem
4. Beaker Glass
5. Stopkontak
6. Hot plate magnetic stirrer yang dilengkapi kontrol temperature

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Karakterisasi Si-Na-C dengan Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

Analisis komposisi kimia bahan baku dilakukan sebagai tahap karakterisasi awal untuk memastikan kesesuaian kandungan unsur terhadap kebutuhan sintesis material komposit Si-Na-C. Identifikasi unsur dilakukan menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF) karena teknik ini mampu memberikan informasi kuantitatif mengenai komposisi oksida maupun unsur secara cepat dan non-destruktif. Karakterisasi dilakukan terhadap seluruh bahan awal, meliputi dicalite diatomite, batu bara antrasit, larutan natrium silikat hasil ekstraksi, serta filtrat batu bara. Hasil analisis masing-masing sampel disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Komposisi Dicalite Diatomite dengan Uji X-Ray Fluorescence (XRF)

| Komponen | Kandungan (%) |
|--------------------------------|---------------|
| SiO ₂ | 81,83 |
| K ₂ O | 3,27 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,48 |
| CaO | 1,203 |
| MnO | 0,205 |
| Na ₂ O | 8,51 |
| NiO | 0,118 |
| CuO | 0,138 |
| ZnO | 0,052 |

| Komponen | Kandungan (%) |
|--------------------------------|---------------|
| GeO ₂ | 0,042 |
| As ₂ O ₃ | 0,023 |
| Rb ₂ O | 0,017 |
| SrO | 0,059 |
| BaO | 0,073 |

Sumber: Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada.

Tabel 2. Komposisi Batu Bara dengan Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF)

| Komponen | Kandungan (%) |
|----------|---------------|
| C | 96,932 |
| Si | 0,513 |
| S | 1,82 |
| K | 0,105 |
| Ca | 0,114 |
| Ti | 0,044 |
| Fe | 0,446 |
| Ni | 0,006 |
| Cu | 0,005 |
| Zn | 0,002 |
| As | 0,001 |
| Rb | 0,001 |
| Sr | 0,01 |
| Ba | 0,002 |

Sumber: Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada.

Hasil analisis X-Ray Fluorescence (XRF) menunjukkan bahwa larutan natrium silikat didominasi oleh kandungan SiO₂ sebesar 66%, yang menandakan tingginya kadar silika dalam material tersebut. Kandungan Na₂O sebesar 16% mengindikasikan keberadaan natrium yang berperan penting dalam pembentukan natrium silikat. Selain komponen utama tersebut, terdeteksi pula beberapa oksida lain dalam jumlah lebih kecil, seperti CaO (8,9%), Fe₂O₃ (4,9%), dan K₂O (2%), yang diduga berasal dari pengotor alami bahan baku. Oksida logam minor seperti CuO (1,1%) dan NiO (0,47%) juga teridentifikasi, namun keberadaannya relatif kecil sehingga tidak berpengaruh signifikan terhadap karakter utama material. Secara keseluruhan, hasil analisis ini menunjukkan bahwa larutan natrium silikat memiliki kandungan silika yang cukup tinggi untuk dimanfaatkan sebagai sumber silika dalam proses sintesis material. Selain itu, hasil analisis kandungan karbon organik pada filtrat batubara menunjukkan nilai sebesar 26,8%, yang menandakan bahwa material tersebut memiliki kandungan karbon yang cukup tinggi. Kandungan karbon berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber karbon dalam pembuatan material berbasis karbon atau komposit, terutama untuk peningkatan konduktivitas listrik dan stabilitas struktur.

Karakterisasi komposisi kimia produk akhir Si-Na-C dilakukan untuk mengevaluasi keberhasilan proses sintesis serta memastikan keterlibatan unsur utama, yaitu Silika (Si), Natrium (Na), dan Karbon (C), dalam material komposit yang terbentuk. Analisis XRF digunakan untuk mengidentifikasi distribusi unsur dan perubahan komposisi dibandingkan bahan baku awal. Hasil pengujian disajikan di **Tabel 3**.

Tabel 3. Komposisi Unsur Material Si-Na-C dengan Uji *X-Ray Fluorescence* (XRF)

| Rasio Konsentrasi | pH | Si | Na | C | Fe | Ni | Cu | Zn |
|-------------------|----|-------|------|-------|------|------|------|------|
| 1:1 | 4 | 67,84 | 3,91 | 18,42 | 2,39 | 1,98 | 3,41 | 1,95 |
| | 6 | 70,98 | 3,57 | 20,49 | 1,80 | 1,61 | 1,05 | 0,49 |
| | 8 | 66,97 | 4,01 | 17,61 | 3,41 | 2,72 | 2,53 | 2,74 |
| 1:3 | 4 | 77,96 | 5,18 | 13,09 | 1,31 | 0,47 | 1,28 | 0,70 |
| | 6 | 79,66 | 4,51 | 14,49 | 0,67 | 0,22 | 0,04 | 0,40 |
| | 8 | 77,19 | 4,89 | 12,33 | 2,08 | 1,52 | 1,34 | 0,64 |

| Rasio Konsentrasi | pH | Si | Na | C | Fe | Ni | Cu | Zn |
|-------------------|----|-------|------|------|------|------|------|------|
| 1:5 | 4 | 83,22 | 5,44 | 7,04 | 2,19 | 0,86 | 0,75 | 0,49 |
| | 6 | 85,37 | 5,16 | 7,52 | 0,88 | 0,46 | 0,36 | 0,24 |
| | 8 | 82,36 | 5,59 | 6,79 | 2,44 | 1,84 | 0,78 | 0,19 |

Sumber: Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu Universitas Gadjah Mada.

Hasil karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF) pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa seluruh sampel didominasi oleh unsur Si, Na, dan C sebagai komponen utama pembentuk komposit Si-Na-C, sedangkan Fe, Ni, Cu, dan Zn terdeteksi dalam jumlah minor. Variasi pH (4, 6, dan 8) serta rasio konsentrasi filtrat (1:1, 1:3, dan 1:5) memberikan pengaruh nyata terhadap distribusi komposisi unsur, khususnya terhadap fraksi silika (Si) dan karbon (C).

Secara umum, peningkatan rasio konsentrasi dari 1:1 menjadi 1:5 menghasilkan kenaikan kandungan Si yang signifikan. Pada rasio 1:1, kadar Si berada pada kisaran 66–71%, kemudian meningkat menjadi sekitar 77-80% pada rasio 1:3, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 82-85% pada rasio 1:5. Tren ini menunjukkan bahwa semakin besar fraksi dicapit diatomite dalam campuran, semakin dominan pembentukan jaringan silika pada produk akhir. Peningkatan kandungan Si mengindikasikan keberhasilan proses ekstraksi natrium silikat dan polikondensasi silika selama sintesis sol-gel, sehingga menghasilkan struktur matriks silika yang lebih padat dan stabil [9].

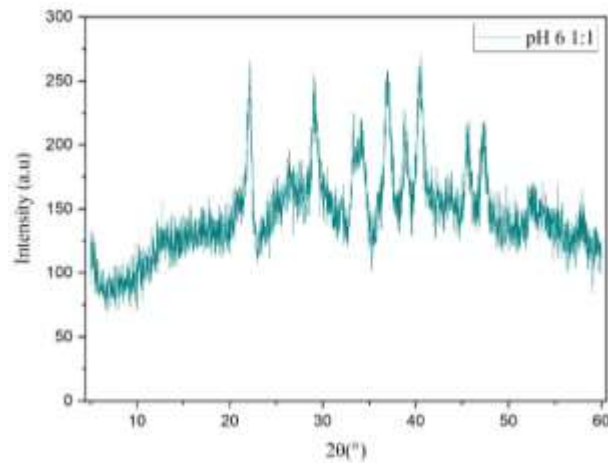
Sebaliknya, kandungan karbon menunjukkan kecenderungan menurun dengan bertambahnya rasio dicapit. Pada rasio 1:1, kandungan C relatif tinggi, kemudian menurun menjadi 12-15% pada rasio 1:3, dan mencapai nilai terendah sekitar 6-8% pada rasio 1:5. Penurunan ini linier dengan berkurangnya proporsi filtrat batu bara dalam campuran, sehingga kontribusi karbon amorf terhadap komposit menjadi lebih kecil [9]. Meskipun demikian, keberadaan karbon tetap penting karena berperan sebagai matriks konduktif yang meningkatkan transport elektron pada material elektroda [10].

Kandungan natrium (Na) relatif stabil pada seluruh variasi, berada pada kisaran 3,5-5,6%. Stabilitas ini menunjukkan bahwa Na tidak hanya berasal dari komposisi awal bahan baku, tetapi juga terikat dalam struktur sebagai spesies natrium silikat atau gugus Si-O-Na selama proses gelasi. Natrium berfungsi sebagai modifikator jaringan (*network modifier*) yang dapat menurunkan derajat polimerisasi silika, meningkatkan porositas, serta membentuk jalur difusi ion, sehingga mendukung kinerja elektrokimia material sebagai elektroda baterai natrium-ion [11].

Pengaruh pH juga terlihat terhadap komposisi akhir. Pada kondisi asam lemah (pH 4-6), kandungan Si cenderung lebih tinggi dan distribusi unsur lebih homogen dibandingkan pH 8. Hal ini menunjukkan bahwa proses hidrolisis dan kondensasi silikat berlangsung lebih efektif pada kondisi asam, sehingga pembentukan gel silika lebih sempurna. Sebaliknya, pada pH basa (pH 8) teramati fluktuasi komposisi serta peningkatan relatif beberapa unsur minor, yang mengindikasikan kemungkinan pelarutan kembali sebagian spesies atau pengendapan yang kurang optimal [12]. Dengan demikian, pH 6 memberikan keseimbangan terbaik antara pembentukan jaringan silika dan stabilitas komposisi.

3.2 Analisis Karakterisasi Si-Na-C dengan Uji X-Ray Diffraction (XRD)

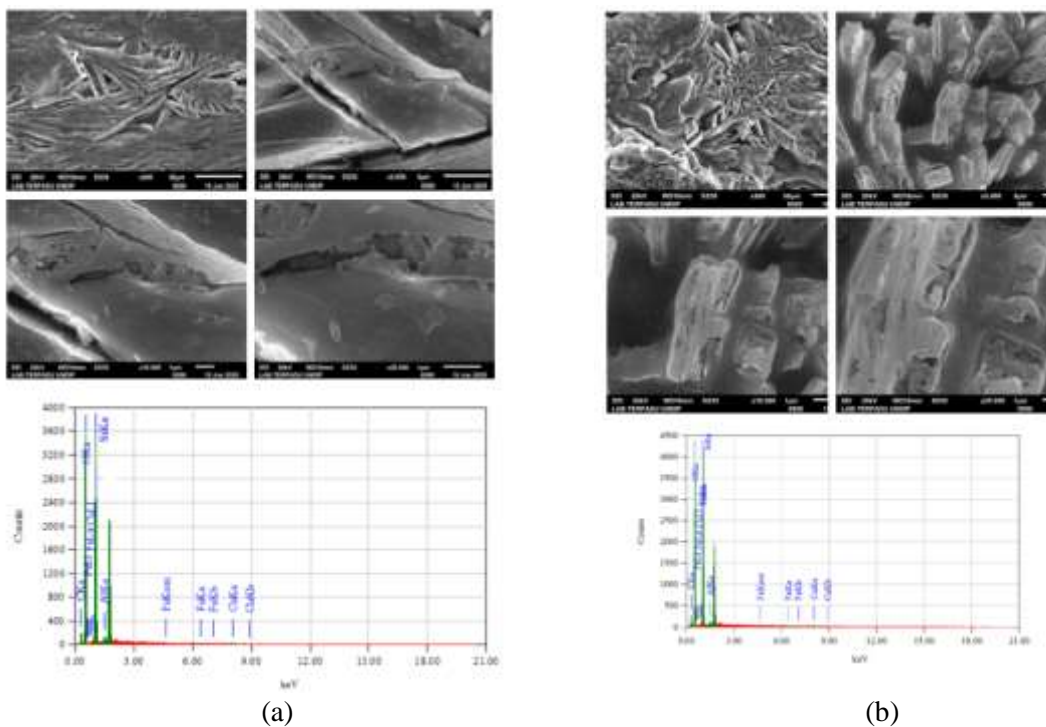
Pola XRD (X-Ray Diffraction) menunjukkan bahwa material silika carbon memiliki struktur silika amorphus. Terlihat bahwa pola puncak difraksi tidak ada perubahan secara signifikan antara kedua sampel tersebut. Menurut JCPDS no.33-1161 pada sudut 17-40° menandakan adanya gugus silika [13]. Pada gambar 3. puncak silika amorphus pada rasio konsentrasi 1:1 dapat dilihat sudut 22.01°, 23.05°, 30.93°, 34.12°, 37.12°, 40.62°. Akan tetapi, menurut JCPDS no. 85-1330 menandakan adanya sampel yang mengandung carbon graphite dalam bentuk sebagian kristalin pada sudut 2θ 43.7° [14]. Hal ini dapat ditinjau gambar 3. ditandai dengan konsentrasi 1:1 saat 42-44.5° dengan jenis semi kristalin yang mengandung carbon graphite. Distribusi intensitas yang lebih tinggi pada rasio sampel 1:1 menandakan bahwa rasio prekursor memiliki pengaruh terhadap derajat pembentukan struktur karbon dan jaringan silika. Meskipun sebagian besar struktur masih berupa amorphous, pembentukan fase kristalin dapat dicapai melalui perlakuan termal pada temperatur yang lebih tinggi, proses hidrotermal yang terkontrol, maupun penambahan agen templating yang dapat mengarahkan pertumbuhan kristal silika secara lebih teratur.



Gambar 2. Hasil Karakterisasi *X-Ray Diffraction (XRD)* pada SI-NA-C
Sumber: Laboratorium Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember, (2025)

3.3 Analisis Karakterisasi Si-Na-C dengan Uji *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)*

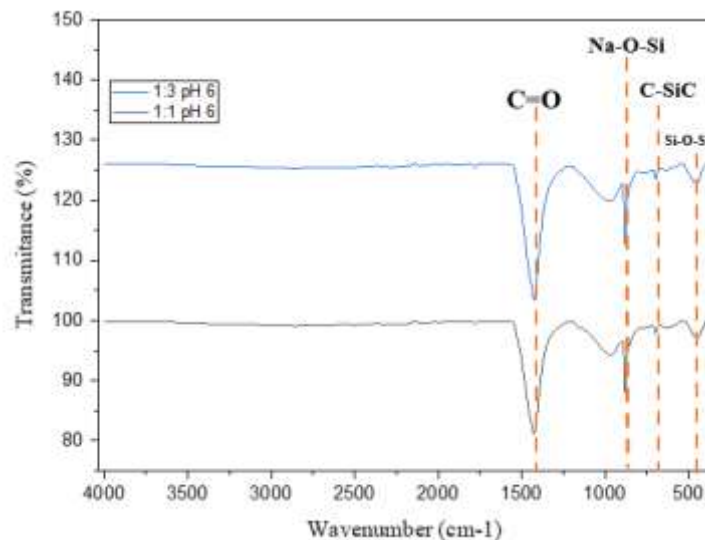
Hasil pengujian SEM-EDX menunjukkan perbedaan morfologi permukaan komposit silika natrium karbon pada rasio 1:1 dan 1:3 dengan perbesaran 500x hingga 20.000x. Pada rasio 1:1, permukaan material tampak tidak rata dan didominasi oleh partikel bulat tidak beraturan dengan pori-pori kasar yang tersebar, mengindikasikan terjadinya aglomerasi partikel silika amorf yang masih cukup dominan. Warna abu-abu terang menunjukkan keberadaan silika dan natrium, sedangkan area yang lebih gelap menandakan distribusi karbon yang belum homogen. Sebaliknya, pada rasio 1:3, struktur permukaan terlihat lebih padat dan seragam, dengan partikel yang lebih kecil serta saling menyatu, menunjukkan interaksi yang lebih kuat antara silika, natrium, dan karbon. Peningkatan homogenitas ini mengindikasikan dispersi karbon yang lebih baik ke dalam matriks silika, sehingga berpotensi meningkatkan porositas yang terkontrol dan kestabilan struktur material.



Gambar 3. Hasil Karakterisasi *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)* pada Si-Na-C
Konsentrasi (a) 1:1 pH 6 dan (b) 1:3 pH 6.
Sumber: Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro, (2025)

3.4 Analisis Karakterisasi Si-Na-C dengan Uji *Fourier Transform Infra Red* (FTIR)

Spektra FTIR dari material Silika Natrium Carbon (Si-Na-C) menunjukkan karakteristik pita serapan dalam beberapa bilangan gelombang yang mengindikasikan keberadaan gugus fungsional utama. Pada bilangan gelombang 470 cm^{-1} menunjukkan vibrasi dari ikatan Si-O-Si, menandakan keberadaan kerangka silika amorphous [15]. Bilangan gelombang 950 cm^{-1} mengindikasikan terbentuknya ikatan Na-O-Si, yang menunjukkan bahwa natrium berinteraksi dengan jaringan silika, kemungkinan berasal dari prekursor sodium silikat [16]. Sementara itu, pada bilangan gelombang 785 cm^{-1} dikaitkan dengan ikatan C-SiC [17], menunjukkan keberadaan karbon dalam struktur. Adanya bilangan gelombang 1431 cm^{-1} mengarah pada gugus C=O, yang dapat berasal dari senyawa karbon sisa atau hasil dekomposisi termal [16]. Variasi spektra pada ketiga sampel menunjukkan adanya perbedaan intensitas pita serapan, mengindikasikan bahwa rasio prekursor memengaruhi jumlah ikatan yang terbentuk. Dalam hal ini, pH 6 berperan dalam menjaga stabilitas spesies silikat dan karbonat dalam larutan yang mendukung terbentuknya ikatan Na-O-Si dan struktur karbon termodifikasi.



Gambar 4. Hasil Karakterisasi *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) pada Si-Na-C.
 Sumber: Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro, (2025)

4. Kesimpulan

Material Si-Na-C berhasil disintesis dengan komposisi utama berupa silika (SiO_2) sebesar 79,66%, natrium (Na) sebesar 4,51%, dan karbon (C) sebesar 14,49% berdasarkan hasil uji XRF. Analisis XRD menunjukkan bahwa struktur material didominasi oleh fase amorf, sedangkan hasil SEM-EDX memperlihatkan morfologi permukaan yang tidak rata dengan struktur yang relatif padat serta pori-pori halus yang terdistribusi lebih merata. Keberadaan gugus fungsi C=O, Na-O-Si, C-Si-C, dan Si-O-Si yang teridentifikasi melalui uji FTIR menegaskan terbentuknya ikatan kimia yang mendukung kestabilan struktur material. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kondisi sintesis pada rasio konsentrasi 1:3 dan pH 6 merupakan kondisi optimum, ditandai dengan kesesuaian komposisi silika, natrium, dan karbon terhadap standar material katoda baterai, di mana pH berperan penting dalam mengatur transisi fase dari larutan ke padatan yang memengaruhi morfologi, struktur pori, dan komposisi akhir Si-Na-C. Selain itu, karakteristik elektrokimia material menunjukkan kecenderungan yang sesuai sebagai material katoda, ditunjukkan oleh terbentuknya puncak potensial katodik serta adanya aktivitas elektrokatalitik yang menandakan kemampuan material dalam mendukung reaksi elektrokimia pada sistem baterai.

5. Referensi

- [1] R. Permatasari, A. Sodri, and H. A. Gustina, "Utilization of Fly Ash Waste in the Cement Industry and its Environmental Impact: A Review," *J. Penelit. Pendidik. IPA*, vol. 9, no. 9, pp. 569–579, 2023, doi: 10.29303/jppipa.v9i9.4504.
- [2] A. Guatame-Garcia and M. Buxton, "The use of infrared spectroscopy to determine the quality of carbonate-rich diatomite ores," *Minerals*, vol. 8, no. 3, 2018, doi: 10.3390/min8030120.
- [3] Y. Liu, Q. Sun, W. Li, K. R. Adair, J. Li, and X. Sun, "A comprehensive review on recent progress in aluminum–air batteries," *Green Energy Environ.*, vol. 2, no. 3, pp. 246–277, 2017, doi:

- 10.1016/j.gee.2017.06.006.
- [4] A. Frydrych and K. Jurowski, "Portable X-ray fluorescence (pXRF) as a powerful and trending analytical tool for in situ food samples analysis: A comprehensive review of application - State of the art," *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 166, p. 117165, 2023, doi: 10.1016/j.trac.2023.117165.
- [5] J. Rausch, D. Jaramillo-Vogel, S. Perseguers, N. Schnidrig, B. Grob ty, and P. Yajan, "Automated identification and quantification of tire wear particles (TWP) in airborne dust: SEM/EDX single particle analysis coupled to a machine learning classifier," *Sci. Total Environ.*, vol. 803, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149832.
- [6] X. Yan, Z. Cao, A. Murphy, and Y. Qiao, "An ensemble machine learning method for microplastics identification with FTIR spectrum," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 4, p. 108130, 2022, doi: 10.1016/j.jece.2022.108130.
- [7] B. Abolpour and R. Shamsoddini, "Mechanism of reaction of silica and carbon for producing silicon carbide," *Prog. React. Kinet. Mech.*, vol. 45, 2019, doi: 10.1177/1468678319891416.
- [8] Y. Zhang *et al.*, "A facile, one-step synthesis of Silicon/Silicon carbide/carbon nanotube nanocomposite as a cycling-stable anode for lithium ion batteries," *Nanomaterials*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: 10.3390/nano9111624.
- [9] Z. Zhu, W. Zhang, H. Huang, W. Li, H. Ling, and H. Zhang, "A Review of High-Temperature Resistant Silica Aerogels: Structural Evolution and Thermal Stability Optimization," *Gels*, vol. 11, no. 5, 2025, doi: 10.3390/gels11050357.
- [10] K. Schulz, L. K. Thomasarrigo, R. Kaegi, and R. Kretzschmar, "Stabilization of Ferrihydrite and Lepidocrocite by Silicate during Fe(II)-Catalyzed Mineral Transformation: Impact on Particle Morphology and Silicate Distribution," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 9, pp. 5929–5938, 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c08789.
- [11] F. Kamutzki, M. F. Bekheet, S. Schneider, A. Gurlo, and D. A. H. Hanaor, "A comparison of syntheses approaches towards functional polycrystalline silicate ceramics," *Open Ceram.*, vol. 9, no. February, 2022, doi: 10.1016/j.oceram.2022.100241.
- [12] N. Minju, B. N. Nair, and S. Savithri, "Sodium silicate-derived aerogels: Effect of processing parameters on their applications," *RSC Adv.*, vol. 11, no. 25, pp. 15301–15322, 2021, doi: 10.1039/d0ra09793d.
- [13] J. Kamalakkannan and S. Senthilvelan, "Synthesis of AC-Bi@SiO₂ Nanocomposite Sphere for Superior Photocatalytic Activity Towards the Photodegradation of Malachite Green," *Can. Chem. Trans.*, no. November, pp. 410–429, 2016, doi: 10.13179/canchemtrans.2015.03.04.0235.
- [14] M. R. Buga *et al.*, "Carbon-coated sio₂ composites as promising anode material for li-ion batteries," *Molecules*, vol. 26, no. 15, pp. 1–15, 2021, doi: 10.3390/molecules26154531.
- [15] R. H. Ellerbrock, M. Stein, and J. Schaller, "Comparing silicon mineral species of different crystallinity using Fourier transform infrared spectroscopy," *Front. Environ. Chem.*, vol. 5, no. October, pp. 1–9, 2024, doi: 10.3389/fenvc.2024.1462678.
- [16] J. A. Pérez-Casas *et al.*, "Sugarcane Bagasse Ash as an Alternative Source of Silicon Dioxide in Sodium Silicate Synthesis," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 18, 2023, doi: 10.3390/ma16186327.
- [17] G. Wen, J. Fan, X. Li, and Y. Liu, "The influence of local Si[σ]C bonding density on the photoluminescence of Si-QDs upon thermal annealing the hydrogenated amorphous Si-rich silicon carbide thin films," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 463, pp. 50–55, 2017, doi: 10.1016/j.jnoncrystol.2017.02.016.