

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI SILIKON DARI SILIKA
ABU SEKAM PADI VIA GARAM LELEH KCl SEBAGAI
ANODA BATERAI ION LITium**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan mata kuliah

Tugas Akhir 2



Oleh:

SOFIA

NIM/TM. 21036121/2021

**PROGRAM STUDI KIMIA
DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2025**

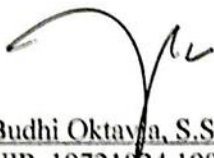
PERSETUJUAN SKRIPSI

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI SILIKON DARI SILIKA ABU SEKAM
PADI P74 GARAM LELEH KCl SEBAGAI ANODA BATERAI ION
LITUM**

Nama : Sofla
NIM : 21036121
Program Studi : Kimia
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, November 2025

Mengetahui :
Kepala Departemen Kimia



Budhi Oktavia, S.Si., M.Si., Ph.D
NIP. 19721024 199803 1 001

Disetujui Oleh :
Dosen Pembimbing



Prof. Drs. Ali Amran, M.Pd., MA., Ph.D
NIP. 19471022 197109 1 001

PENGESAHAN LULUS UJIAN SKRIPSI

Nama : Sofia
TM/NIM : 2021/21036121
Program Studi : Kimia
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

SINTESIS DAN KARAKTERISASI SILIKON DARI SILIKA ABU SEKAM PADI *VIA* GARAM LELEH KCl SEBAGAI ANODA BATERAI ION LITUM

Dinyatakan Lulus Setelah Dipertahankan di Depan Tim Penguji Skripsi
Departemen Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang

Padang, November 2025

Tim Penguji

No	Jabatan	Nama	Tanda Tangan
1	Ketua	Prof. Drs. Ali Amran, M.Pd., MA., Ph.D	1. 
2	Anggota	Dr. rer. nat. Deski Beri, S.Si., M.Si	2. 
3	Anggota	Miftahul Khair, S.Si., M.Sc., Ph.D	3. 

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan dibawah ini

Nama : Sofia
NIM : 21036121
Tempat/Tanggal Lahir : Tanjuang Bungo/ 07 September 2002
Program Studi : Kimia
Departemen : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Judul Skripsi : Sintesis dan Karakterisasi Silikon dari Silika Abu Sekam Padi *via* Garam Leleh KCl sebagai Anoda Baterai Ion Litium

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Karya tulis/skripsi ini adalah hasil karya saya dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik (sarjana) baik di UNP maupun perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain kecuali tim pembimbing.
3. Pada karya tulis/skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain kecuali tertulis dengan jelas dicantumkan pada kepustakaan.
4. Karya tulis/skripsi ini sah apabila telah ditandatangani Asli oleh tim pembimbing dan tim penguji.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran di dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima **Sanksi Akademik** berupa pencabutan gelar akademik yang telah diperoleh karena karya tulis/skripsi ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Padang, November 2025
Yang Menyatakan



Sofia
NIM. 21036121

Sintesis dan Karakterisasi Silikon dari Silika Abu Sekam Padi *via* Garam Leleh KCl sebagai Anoda Baterai Ion Litium

Sofia

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi silikon (Si) dari silika (SiO_2) hasil ekstraksi abu sekam padi menggunakan metode reduksi *magnesiothermic via* garam leleh KCl sebagai kandidat material anoda baterai ion litium. Pemanfaatan abu sekam padi sebagai sumber silika dilakukan untuk mendukung pengembangan material energi berbasis biomassa yang ramah lingkungan. Proses ekstraksi silika dilakukan menggunakan metode alkali-presipitasi dengan hasil rendemen sebesar 85% dan kemurnian 94%. Sintesis silikon dilakukan dengan rasio molar $\text{SiO}_2\text{:Mg:KCl} = 1\text{:}2\text{:}10$ pada variasi suhu 750°C , 800°C , dan 850°C serta waktu reaksi 6, 9, dan 12 jam. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa kondisi optimum diperoleh pada suhu 850°C selama 6 jam dengan kemurnian silikon sebesar 83,68%. Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) mengonfirmasi struktur kristal kubik silikon dengan bidang difraksi (111), (220), (311), (400), (331), dan (442) yang sesuai dengan data JCPDS No. 01-077-2109. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan Scherrer, rata-rata ukuran kristal silikon adalah 25,95 nm, menunjukkan bahwa silikon yang dihasilkan berada pada skala nanokristalin. Nilai konduktivitas listrik silikon murni mencapai 0,0016 S/m dan meningkat seiring dengan penambahan grafit sebagai agen konduktif. Berdasarkan hasil tersebut, silikon hasil sintesis dari silika abu sekam padi dikategorikan sebagai material semikonduktor nanokristalin yang berpotensi besar untuk diaplikasikan sebagai anoda baterai ion litium berkapasitas tinggi.

Kata kunci: silikon, silika, abu sekam padi, KCl, baterai ion litium

Synthesis and Characterization of Silicon from Rice Husk Ash Silica via KCl Molten Salt as a Lithium-Ion Battery Anode

Sofia

ABSTRACT

This study aims to synthesize and characterize silicon (Si) derived from silica (SiO_2) extracted from rice husk ash using the magnesiothermic reduction method via KCl molten salt as a candidate material for lithium-ion battery anodes. The utilization of rice husk ash as a silica source supports the development of environmentally friendly, biomass-based energy materials. Silica extraction was carried out using the alkali-precipitation method, yielding 85% recovery with 94% purity. Silicon synthesis was conducted with a molar ratio of $\text{SiO}_2\text{:Mg:KCl} = 1\text{:}2\text{:}10$ at various temperatures of 750°C, 800°C, and 850°C and reaction times of 6, 9, and 12 hours. Characterization results showed that the optimum condition was obtained at 850°C for 6 hours, producing silicon with a purity of 83.68%. XRD analysis confirmed the cubic crystal structure of silicon with diffraction planes (111), (220), (311), (400), (331), and (442), corresponding to JCPDS No. 01-077-2109. Based on the Scherrer equation, the average crystallite size of silicon was 25.95 nm, indicating that the synthesized silicon is within the nanocrystalline scale. The electrical conductivity of pure silicon reached 0.0016 S/m and increased with the addition of graphite as a conductive agent. These results indicate that the synthesized silicon from rice husk ash-derived silica can be categorized as a nanocrystalline semiconductor material with great potential for application as a high-capacity lithium-ion battery anode.

Keywords: silicon, silica, rice husk ash, molten KCl, lithium-ion battery

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas karunia dan rahmat yang telah diberikan oleh Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sintesis dan Karakterisasi Silikon dari Silika Abu Sekam Padi *via* Garam Leleh KCl sebagai Anoda Baterai Ion Litium”. Skripsi ini diajukan untuk melengkapi dan memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang.

Banyak kendala yang penulis hadapi dalam penulisan skripsi ini, akan tetapi dapat dilewati karena adanya bantuan, petunjuk, arahan, dan masukan yang sangat berharga dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Prof. Drs. Ali Amran, M.Pd, M.A, Ph.D selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Tugas Akhir.
2. Bapak Dr.rer.nat. Deski Beri, S.Si., M.Si selaku Dosen pembimbing di Laboratorium.
3. Bapak Dr.rer.nat. Deski Beri, S.Si., M.Si dan Bapak Miftahul Khair, S.Si., M.Sc., Ph.D selaku Dosen Pembahas.
4. Bapak Budhi Oktavia, S.Si, M.Si, Ph.D sebagai Ketua Departemen Kimia FMIPA UNP.
5. Orang tua penulis yang telah memberikan semangat serta dorongan kepada penulis dalam menyelesaikan proposal ini.

6. Semua pihak yang turut memberi dukungan dan bantuan kepada penulis dalam membuat proposal ini.

Semoga bantuan yang diberikan mendapat balasan yang setimpal oleh Tuhan Yang Maha Esa. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan dan saran dari pembaca agar proposal ini dapat memberi manfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Padang, November 2025

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah	3
C. Batasan Masalah	3
D. Rumusan Masalah	4
E. Tujuan Penelitian.....	4
F. Manfaat Penelitian	5
BAB II KAJIAN TEORI.....	6
A. Baterai Ion Litium	6
B. Abu Sekam Padi	8
C. Silika (SiO ₂).....	9
D. Silikon (Si).....	10
E. Kalium Klorida (KCl).....	12
F. Metode Sintesis	13
G. Karakterisasi	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	18
A. Waktu dan Tempat Penelitian	18
B. Variabel Penelitian	18
C. Alat dan Bahan	19
D. Prosedur Kerja	19
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	22

A. Ekstraksi Silika (SiO_2) dari Abu Sekam Padi	22
B. Reduksi <i>Magnesiothermic</i> Silikon.....	24
C. Karakterisasi Morfologi Makroskopik Mikrosop Stereo.....	26
D. Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	30
E. Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	31
F. Konduktivitas Listrik.....	32
BAB V PENUTUP.....	35
A. Kesimpulan.....	35
B. Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Abu Sekam Padi	8
Gambar 2. Struktur Silika (Nzereogu et al., 2023).	9
Gambar 3. Struktur Kristal Silikon (Dzurak et al., 2024).	11
Gambar 4. Visualisasi Abu	262
Gambar 5. Uji Mikroskop Stereo	26
Gambar 6. Grafik Distribusi Partikel Silikon.....	27
Gambar 7. Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) Silikon	31
Gambar 8. Grafik Hubungan Rasio Komposisi Si:C terhadap Konduktivitas	33

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi Kimia Abu Sekam Padi (Steven et al., 2021).	9
Tabel 2. Sifat Fisika dan Kimia Silikon (Si) (Tilli & Haapalinna, 2020).	11
Tabel 3. Sifat Fisika dan Kimia KCl (Factors et al., 2012).	12
Tabel 4. Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Silika (SiO ₂)	24
Tabel 5. Interpretasi Grafik Distribusi Partikel Silikon	27
Tabel 6. Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Silikon (Si)	30

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Desain Penelitian	42
Lampiran 2. Prosedur kerja	43
Lampiran 3. Perhitungan Pembuatan Reagen	45
Lampiran 4. Massa Zat untuk Sintesis Silikon	47
Lampiran 5. Persentase Rendeman Silika (SiO_2).....	47
Lampiran 6. Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Silika (SiO_2)	48
Lampiran 7. Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Silikon (Si)	49
Lampiran 8. Data Pengujian Resistansi	50
Lampiran 9. Perhitungan Konduktivitas rata-rata dan ketidakpastian	50
Lampiran 10. Data Konduktivitas Rata-rata dan Ketidakpastian	532
Lampiran 11. Dokumentasi Penelitian	53

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang elektronik dan energi terbarukan semakin pesat (Toan *et al.*, 2025). Teknologi seperti elektronik portabel dan kendaraan listrik memerlukan sistem penyimpanan energi yang efisien (Khan *et al.*, 2025). Baterai ion litium menjadi salah satu teknologi penyimpanan energi yang paling banyak digunakan, karena memiliki kapasitas penyimpanan besar, umur pakai yang panjang dan *self-discharge* rendah (Daulay *et al.*, 2022; Saidi *et al.*, 2025). Secara umum, baterai ion litium terdiri atas empat komponen utama, yaitu anoda, katoda, elektrolit dan separator (Nitta *et al.*, 2015). Untuk komponen anoda, baterai ion litium yang telah dikomersialkan umumnya menggunakan material grafit (C), namun kapasitas penyimpanannya terbatas yaitu 372 mAh/g (Saidi *et al.*, 2025). Hal ini mendorong pencarian material anoda alternatif yang memiliki kapasitas penyimpanan lebih tinggi.

Silikon (Si) merupakan salah satu bahan anoda yang paling menjanjikan untuk baterai ion litium. Hal ini karena silikon memiliki kapasitas spesifik teoritis yang tinggi hingga 4200 mAh/g, kestabilan kimia yang baik, dapat direkayasa dalam berbagai bentuk struktur serta ketersediaannya yang melimpah di alam (Andriyani *et al.*, 2024; Sudarman *et al.*, 2024). Namun, penggunaan silikon *bulk* sering menghadapi kendala berupa ekspansi volume hingga (300%) yang dapat menyebabkan pulverisasi. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan men

sintesis silikon berukuran nano melalui metode reduksi berbasis silika. Dalam penelitian ini, silikon disintesis dari silika hasil ekstraksi abu sekam padi.

Abu sekam padi menjadi salah satu limbah pertanian yang melimpah. Abu sekam padi sebagian besar terdiri dari senyawa anorganik, oksida logam, dan 85–99% silika yang sangat berpori, ringan dan reaktif (Hamidu *et al.*, 2025; Hirose Carlsen & Saito, 2024). Kandungan silika yang tinggi dan karakteristiknya menjadikan abu sekam padi menarik sebagai prekursor untuk sintesis material silikon. Berbagai metode telah dikembangkan untuk mereduksi silika menjadi silikon, antara lain metode *magnesiothermic*, *calciothermic*, *aluminothermic*, *carbothermic*, dan *hidrothermal* (Andriayani *et al.*, 2024; Islam *et al.*, 2025; Maeng *et al.*, 2020; Sudarman *et al.*, 2024).

Metode reduksi *magnesiothermic* menggunakan magnesium sebagai reduktor. Metode ini dipilih karena memiliki keunggulan diantaranya lebih ramah lingkungan, dapat berjalan pada suhu yang lebih rendah, proses yang lebih cepat dan murah serta kemurnian silikon yang lebih tinggi daripada metode reduksi lainnya (Daulay *et al.*, 2022). Dalam reduksi *magnesiothermic* diperlukan penambahan garam leleh sebagai media reaksi (Andriayani *et al.*, 2024; Daulay *et al.*, 2022). KCl dipilih sebagai garam leleh dikarenakan harganya lebih ekonomis, sifatnya yang inert, efektif dalam menyerap panas berlebih sehingga mencegah *sintering*, produk akhir menghasilkan ukuran partikel yang lebih seragam dan teratur (Miao *et al.*, 2020).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Daulay et al., (2022), telah berhasil mensintesis silikon dari silika abu sekam padi menggunakan metode reduksi *magnesiothermic*. Namun, hasil karakterisasi menunjukkan kondisi reaksi yang digunakan belum optimal (Daulay et al., 2022). Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis silikon dari silika hasil ekstraksi abu sekam padi menggunakan metode reduksi *magnesiothermic via* garam leleh KCl, dengan menggunakan variasi suhu dan waktu untuk menentukan kondisi optimum reaksi. Silikon hasil sintesis dianalisis morfologi, struktur kristal dan fasa, kemurnian dan konduktivitas listrik yang dihasilkan.

B. Identifikasi Masalah

Adapun identifikasi masalah penelitian ini antara lain:

1. Material anoda komersial yaitu grafit memiliki kapasitas penyimpanan yang terbatas.
2. Abu sekam padi termasuk limbah pertanian yang melimpah tetapi kurang dimanfaatkan secara optimal.
3. Metode reduksi *magnesiothermic* terbukti efisien namun kondisi optimum reduksi *via* garam KCl belum banyak diteliti.

C. Batasan Masalah

Untuk batasan masalah penelitian ini antara lain

1. Silika yang digunakan berasal dari ekstraksi abu sekam padi.

2. Metode yang digunakan untuk sintesis silikon adalah metode reduksi *magnesiothermic via* garam leleh KCl dengan variasi suhu (750°C, 800 °C, 850 °C) dan waktu (6 jam, 9 jam, 12 jam).
3. Karakterisasi menggunakan mikroskop stereo, *X-ray Fluorescence* (XRF), dan *X-Ray Diffraction* (XRD).
4. Pengujian konduktivitas silikon menggunakan metode *two-probe* dengan multimeter digital.

D. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah penelitian ini antara lain:

1. Bagaimana mengekstraksi silika dari abu sekam padi?
2. Bagaimana pengaruh suhu dan waktu reduksi *magnesiothermic via* garam leleh KCl terhadap silikon yang dihasilkan?
3. Bagaimana konduktivitas listrik silikon yang dihasilkan dari reduksi *magnesiothermic via* garam leleh KCl?

E. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Untuk memahami bagaimana mengekstraksi silika dari abu sekam padi.
2. Untuk menganalisis pengaruh suhu dan waktu reduksi *magnesiothermic via* garam leleh KCl terhadap silikon yang dihasilkan

3. Untuk memperoleh pemahaman konduktivitas listrik silikon yang dihasilkan dari reduksi *magnesiothermic* via garam leleh KCl.

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material silikon berbasis biomassa (abu sekam padi) melalui pendekatan reduksi *magnesiothermic* berbantuan garam leleh, yang berpotensi menghasilkan material silikon untuk aplikasi anoda baterai ion litium, serta mendukung pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber material berteknologi tinggi secara berkelanjutan.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Ekstraksi silika dari abu sekam padi terjadi secara efisien menggunakan metode alkali-presipitasi menghasilkan kemurnian silika sekitar 94% dengan sedikit impurites lainnya dan rendeman sekitar 85%.
2. Pada semua variasi kondisi reaksi (suhu dan waktu), diperoleh bahwa kondisi optimum terjadi pada suhu 850°C selama 6 jam yang menghasilkan morfologi partikel silikon paling homogen. Hal ini mengindikasikan proses reduksi berlangsung baik. Kemudian untuk kemurnian dari kondisi reaksi tersebut mencapai 83,68% dengan pengotor seperti kalium dan magnesium dalam jumlah yang relatif kecil, artinya pengotor tersebut tidak sepenuhnya tereliminasi selama proses pemurnian silikon. Struktur silikon memiliki pola difraktogram terlihat puncak pada 2θ : 28,62°; 47,38°; 56,21°; 69,40°; 76,39°; 88,05°. Setiap sudut ini berhubungan dengan bidang kristal (111), (220), (311), (400), (331), (442) sesuai dengan data referensi JCPDS No. 01-077-2109. Munculnya puncak-puncak ini menandakan terdeteksi silikon dengan struktur kristal *cubik*. Berdasarkan rumus Debye–Scherrer rata-rata ukuran silikon hasil sintesis adalah 25,95 nm mengindikasikan silikon yang disintesis tergolong pada nanopartikel.

3. Konduktivitas listrik silikon hasil sintesis sekitar 0.0016 S/m, meningkat seiring dengan penambahan grafit dengan penambahan 20%, 40%, 50% 60% dan 80%.

B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan uji elektrokimia seperti uji *charge–discharge*, voltametri siklik (CV), dan impedansi elektrokimia (EIS) untuk mengevaluasi kinerja silikon sebagai material anoda baterai ion litium. Melalui pengujian tersebut dapat diketahui kapasitas spesifik, efisiensi siklus, serta stabilitas konduktivitas selama proses siklus, sehingga dapat memastikan silikon hasil sintesis berpotensi digunakan secara efektif sebagai anoda baterai.

DAFTAR PUSTAKA

- Almutlaqah, A., Maddalena, R., & Kulasegaram, S. (2025). Optimising thermo-mechanical treatments of residual rice husk ash for cement blending. *Case Studies in Construction Materials*, 22(June 2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04103>
- Andriayani, Lumban Raja, S., Hamzah Siregar, A., Daulay, A., & Sudarman, S. (2024). Synthesis of silicon nanoparticles with various additions of inert salt as scavenger agent during reduction by the magnesiothermic method as anode lithium-ion batteries. *Materials Science for Energy Technologies*, 7(September 2023), 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.09.003>
- Azat, S., Korobeinyk, A. V., Moustakas, K., & Inglezakis, V. J. (2019). Sustainable production of pure silica from rice husk waste in Kazakhstan. *Journal of Cleaner Production*, 217, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.142>
- Book, F., & Backhaus, T. (2022). Aquatic ecotoxicity of manufactured silica nanoparticles: A systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 806, 150893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150893>
- Daulay, A., Andriayani, Marpongahtun, & Gea, S. (2022a). Synthesis and application of silicon nanoparticles prepared from rice husk for lithium-ion batteries. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6(July), 100256. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100256>
- Daulay, A., Andriayani, Marpongahtun, & Gea, S. (2022b). Synthesis Si nanoparticles from rice husk as material active electrode on secondary cell battery with X-Ray diffraction analysis. *South African Journal of Chemical Engineering*, 42(April), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.07.004>
- Daulay, A., Andriayani, Marpongahtun, Gea, S., & Tamrin. (2022). Scalable synthesis of porous silicon nanoparticles from rice husk with the addition of KBr as a scavenger agent during reduction by the magnesiothermic method as anode lithium-ion batteries with sodium alginate as the binder. *South African Journal of Chemical Engineering*, 41(June), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.06.005>
- El-Shafey, S. S., Sayed Ahmed, S. A., Aboelenin, R. M., & Fathy, N. A. (2024). Synthesis of SBA-16 mesoporous silica from rice husk ash for removal of Rhodamine B cationic dye: Effect of hydrothermal treatment time. *Desalination and Water Treatment*, 317(January), 100179. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100179>
- Epp, J. (2016). X-Ray Diffraction (XRD) Techniques for Materials Characterization. In *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100040-3.00004-3>
- Etesami, H., & Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants.

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147(September 2017), 881–896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>
- Factors, C., Data, C., Transfer, M., Dynamics, P., Kinetics, R., Control, P., Economics, P., Equipment, H., Cooling, E., Drying, S., Absorption, G., Operations, L. E., Operations, G., Operations, L., Operations, S., Reduction, S., Enlargement, S., Processes, A. S., Reactors, C., ... Resources, E. (2012). *Perry 's Chemical Engineers ' Handbook*.
- Fan, S., Wykes, M. S. D., Lin, W. E., Jones, R. L., Robins, A. G., & Linden, P. F. (2020). Jo ur l P re of. *Building and Environment*, 107386. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25108>
- Gao, P., Huang, X., Zhao, Y., Hu, X., Cen, D., Gao, G., Bao, Z., Mei, Y., Di, Z., & Wu, G. (2018). Formation of Si Hollow Structures as Promising Anode Materials through Reduction of Silica in AlCl₃-NaCl Molten Salt [Research-article]. *ACS Nano*, 12(11), 11481–11490. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b06528>
- Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D. A. (2025). Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon*, 11(4), e42491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491>
- Hirose Carlsen, M. M., & Saito, Y. (2024). Phase diagram of SiO₂ crystallization upon rice husk combustion to control silica ash quality. *Waste Management*, 182(April), 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.009>
- Houck, M. M. (2013). Analytical Light Microscopy. In *Encyclopedia of Forensic Sciences: Second Edition* (2nd ed.). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382165-2.00251-8>
- Islam, T., Hossen, F., Asraf, A., Zakaria, C. M., & Rana, S. (2025). Chemistry of Inorganic Materials Effect of temperature and time on purity , morphology and phase transformations of silica from rice husk. *Chemistry of Inorganic Materials*, 5(February), 100092. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2025.100092>
- Jamaludin, A., & Adiantoro, D. (2012). Analisis Kerusakan X-Ray Fluoresence (XRF). *Batan*, 5(9–10), 19–28. <http://jurnal.batan.go.id/index.php/pin/article/view/1130>
- Kapadnis, P. S., Kim, K., Nam, K., Kim, Y., Park, H. H., & Hwang, H. (2025). Development of Porous Silicon(Si) Anode Through Magnesiothermic Reduction of Mesoporous Silica(SiO₂) Aerogel for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries. *Gels*, 11(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/gels11040304>
- Kaviyarasu, K., Manikandan, E., Kennedy, J., Jayachandran, M., & Maaza, M. (2016). Rice husks as a sustainable source of high quality nanostructured silica for high performance Li-ion battery requital by sol-gel method - a review. *Advanced Materials Letters*, 7(9), 684–696. <https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6192>
- Khan, N., Ooi, C. A., Khairunaz, M., Desa, M., Ishak, M. K., & Ammar, K.

- (2025). A New Active Cell Equalizer for series connected Lithium-ion Battery Pack in Electric Vehicle. *Energy Conversion and Management: X*, 101149. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101149>
- Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M. I., & Ahmadikhah, A. (2024). Rice Husk at a Glance: From Agro-Industrial to Modern Applications. In *Rice Science* (Vol. 31, Issue 1, pp. 14–32). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005>
- Maeng, S. H., Lee, H., Park, M. S., Park, S., Jeong, J., & Kim, S. (2020). Ultrafast carbothermal reduction of silica to silicon using a CO₂ laser beam. *Scientific Reports*, 10(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78562-1>
- Marguí, E., Queralt, I., & de Almeida, E. (2022). X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: Basic principles, instrumentation, applications and recent trends. *Chemosphere*, 303(P1), 135006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135006>
- Miao, R., Kang, S., Liao, W., Wang, Y., Liu, J., Zhong, G., Wu, H., & Zhang, J. (2020). Heat-regulating effects of inert salts on magnesiothermic reduction preparation of silicon nanopowder for lithium storage. *Ionics*, 26(3), 1249–1259. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-03256-2>
- Miller, J., & Miller, J. C. (2010). Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry. In *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*.
- Miroshnichenko, D., Shmeltser, K., Kormer, M., Soloviov, Y., Pyshyev, S., Korchak, B., Shved, M., & Prysiashnyi, Y. (2024). Electrical Resistance as an Aggregate Characteristic of Coke Properties for Electrochemical and Coke Production. *Electrochem*, 5(2), 258–273. <https://doi.org/10.3390/electrochem5020016>
- Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: Present and future. *Materials Today*, 18(5), 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2023). Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 4(October), 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>
- Ojovan, M. I., & Tournier, R. F. (2021). On structural rearrangements near the glass transition temperature in amorphous silica. *Materials*, 14(18), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma14185235>
- Oyedotun, T. D. T. (2018). X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 148–154. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>
- Perdana, F. A. (2021). Baterai Lithium. *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*, 9(2), 113. <https://doi.org/10.20961/inkuiri.v9i2.50082>

- Rao, M. N., Sultana, R., Kota, S. H., Rao, M. N., Sultana, R., & Kota, S. H. (2017). Chapter 5 – Hazardous Waste. In *Solid and Hazardous Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809734-2.00005-5>
- Ratnawulan, Rahmadhani, D., Zulkifli, Yuliani, K. D., Frida, E., & Taufiq, A. (2024). Hydrophobic and antibacterial properties of textiles using nanocomposite chitosan and SiO₂ from rice husk ash as-coating. *South African Journal of Chemical Engineering*, 48(July 2023), 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.03.010>
- Saidi, N. M., Abdah, M. A. A. M., Mustafa, M. N., Walvekar, R., Khalid, M., & Khosla, A. (2025). Advancements in Silicon Anodes for Enhanced Lithium-Ion Batteries Performance: Innovations Toward Next-Gen Superbatteries. *Battery Energy*. <https://doi.org/10.1002/bte2.20240048>
- Sakr, M., & Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.061>
- Silviana, S., & Bayu, W. J. (2018). Silicon Conversion from Bamboo Leaf Silica by Magnesiothermic Reduction for Development of Li-ion Battery Anode. *MATEC Web of Conferences*, 156, 0–3. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815605021>
- Solanki, S., Fitzpatrick, D., Jones, M. R., & Lee, H. (2020). Journal Pre of. *Educational Research Review*, 100359. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2025.100092>
- Steven, S., Restiawaty, E., & Bindar, Y. (2021). Routes for energy and bio-silica production from rice husk: A comprehensive review and emerging prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149(May 2020), 111329. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111329>
- Steven, S., Restiawaty, E., Pasymi, P., & Bindar, Y. (2021). An appropriate acid leaching sequence in rice husk ash extraction to enhance the produced green silica quality for sustainable industrial silica gel purpose. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 122, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.053>
- Sudarman, S., Andriyani, Tamrin, & Taufik, M. (2024). Synthesis and application of nano-silicon prepared from rice husk with the hydrothermal method and its use for anode lithium-ion batteries. *Materials Science for Energy Technologies*, 7(May 2023), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.07.003>
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). Physics of Semiconductor Devices: Third Edition. In *Physics of Semiconductor Devices: Third Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470068328>
- Tan, Y., Jiang, T., & Chen, G. Z. (2021). Mechanisms and Product Options of Magnesiothermic Reduction of Silica to Silicon for Lithium-Ion Battery Applications. *Frontiers in Energy Research*, 9(March), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fenr.2021.03.001>

oi.org/10.3389/fenrg.2021.651386

- Techniques, S. (2015). Techniques for Oral Microbiology. *Atlas of Oral Microbiology*, 15–40. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802234-4.00002-1>
- Tilli, M., & Haapalinna, A. (2020). Properties of silicon. In *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. INC. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817786-0.00001-3>
- Toan, N. Van, Li, Y., Tuoi, T. T. K., Sabran, N. S., Kiat, J. H., Voiculescu, I., & Ono, T. (2025). Thermoelectric generator using nanoporous silicon formed by metal-assisted chemical etching method. *Energy Conversion and Management*, 323(PA), 119268. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119268>
- Usgodaarachchi, L., Thambiliyagodage, C., Wijesekera, R., & Bakker, M. G. (2021). Synthesis of mesoporous silica nanoparticles derived from rice husk and surface-controlled amine functionalization for efficient adsorption of methylene blue from aqueous solution. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4(March), 100116. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100116>
- Victoria, A., Barasa, D., Wambugu, S., Adesoji, A., Oluwatosin, M., Fabuyide, A., & Ajanaku, C. (2024). Heliyon Advances in silicon – carbon composites anodes derived from agro wastes for applications in lithium-ion battery : A review. *Heliyon*, 10(11), e31482. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31482>
- Wählich, A., Wansleben, M., Unterumsberger, R., Kayser, Y., & Beckhoff, B. (2023). Reference-free X-ray fluorescence analysis using well-known polychromatic synchrotron radiation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 38(9), 1865–1873. <https://doi.org/10.1039/d3ja00109a>
- Ziegler, D., Boschetto, F., Marin, E., Palmero, P., Pezzotti, G., & Tulliani, J. M. (2021). Rice husk ash as a new humidity sensing material and its aging behavior. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 328(June 2020), 129049. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129049>