

Studi Kinetika Ekstraksi Silika dari Abu Sekam Limbah Penggilingan Padi pada Kabupaten Gowa

Gyan Prameswara¹, Sri Diana¹, dan Rezki Amalia¹

¹ Program Studi Teknik Kimia Mineral, Politeknik ATI Makassar, Jl. Sunu No. 220, Kota Makassar, Sulawesi Selatan, 90211, Indonesia; e-mail: gyan@atim.ac.id

ABSTRAK

Padi merupakan sumber dari pangan utama masyarakat Indonesia. Peningkatan populasi penduduk mengakibatkan peningkatan sumber pangan ini. Namun, produksi padi menimbulkan produk samping seperti sekam padi yang belum dimanfaatkan bahkan dibiarkan menumpuk menjadi limbah padat hasil penggilingan padi. Sekam padi mengandung kadar silika yang tinggi, bervariasi untuk lokasi yang berbeda. Kadar silika yang tinggi ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan utama sintesis produk yang memerlukan bahan utama silika seperti zeolit. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap ekstraksi silika dari abu sekam padi. Preparasi sampel dilakukan dengan proses pengurangan dan pengabuan pada temperatur 750 °C selama 4 jam yang bertujuan untuk mereduksi material organik dan volatil. Abu sekam padi diekstraksi menggunakan larutan NaOH untuk menghasilkan filtrat Na₂SiO₃. Rekoveri silika paling tinggi tercatat sebesar 95.59 % pada NaOH 2 N, rasio S/L 10 gram/100 mL, 90 °C dan 200 rpm selama 120 menit. *Shrinking core model* digunakan untuk mengevaluasi kinetika proses ekstraksi. Didapatkan bahwa model reaksi pada permukaan inti mengontrol proses ekstraksi dengan energi aktivasi sebesar 40.11 kJ/mol. Persamaan kinetika dari proses ekstraksi silika dari abu sekam padi menggunakan NaOH adalah $4907.01 \exp \frac{-40.11 \text{ kJ/mol}}{R.T} t = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}}$.

Kata kunci: Sekam Padi, Silika, Ekstraksi, Kinetika

ABSTRACT

Rice is the Indonesian people's primary food source. As the population grew, so did the demand for this food source. However, rice cultivation generates byproducts such as rice husks, which are not used and are even allowed to collect as solid waste after rice milling. Rice husks contain high quantities of silica, which vary depending on the region. This high silica concentration can be employed as the primary component in the synthesis of products requiring silica as the primary component, such as zeolite. The purpose of this research is to find out how temperature affects the extraction of silica from rice husk ash. The procedure of drying and ashing at a temperature of 750 °C for 4 hours was used to reduce organic and volatile components in the samples. Na₂SiO₃ filtrate was produced by extracting rice husk ash with NaOH solution. In 2 N NaOH, S/L ratio of 10 grams/100 mL, 90 °C, and 200 rpm for 120 minutes, the highest silica recovery was 95.59%. The kinetics of the extraction process was evaluated using the *shrinking core model*. The extraction process was controlled by the reaction model on the surface of the core, which had an activation energy of 40.11 kJ/mol. The kinetic equation of the silica extraction process from rice husk ash using NaOH is $4907.01 \exp \frac{-40.11 \text{ kJ/mol}}{R.T} t = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}}$.

Keywords: Rice Husk, Silica, Extraction, Kinetics

Citation: Prameswara, G., Diana, S., dan Amalia, R. (2023). Studi Kinetika Ekstraksi Silika dari Abu Sekam Limbah Penggilingan Padi pada Kabupaten Gowa. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(4), 974-979, doi:10.14710/jil.21.4.974-979

1. Pendahuluan

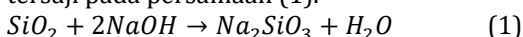
Padi merupakan sumber pangan utama di Indonesia, yang mana memproduksi beras dan juga produk samping sekam padi. Produk samping ini memiliki bobot sekitar 20-30% dari berat padi (Setyawan dkk., 2019). Pada tahun 2021, Produksi padi Indonesia mencapai 54.42 juta ton sedangkan produksi beras sebanyak 40.36 juta ton. Sehingga produksi sekam pada tahun 2021 mencapai 14 juta ton atau sebanyak kurang lebih 25% dari total berat

padi (Badan Pusat Statistik, 2021). Sampai saat ini sekam padi belum terlalu banyak dimanfaatkan untuk produksi produk bernilai tinggi. Aplikasi sederhana seperti untuk *litter* ternak unggas, sedangkan abu sekam padi banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar dalam pembuatan batu bata (Fernandes dkk., 2017; Hossain dkk., 2018; Shelke dkk., 2010; Suka dkk., 2008).

Silika (SiO₂) merupakan material dasar, yang memiliki karakteristik unik dan memiliki berbagai

kegunaan termasuk material pengisi (*filler*), penahan panas, aditif pada makanan, pengontrol viskositas dan lain sebagainya (Kamari & Ghorbani, 2021; Martin, 2007). Namun, dari semua kegunaannya, dari karakteristik pori-pori, silika banyak digunakan untuk bahan penjerap (adsorpsi). Produk *adsorben* paling banyak digunakan adalah dalam bentuk zeolit. Silika dalam zeolit merupakan silika yang memiliki sifat kristalin. sehingga dibutuhkan perlakuan khusus untuk mengubah sifat *amorf* yang terdapat pada abu sekam padi (Alfiansyah dkk., 2015; Hossain dkk., 2018; Kamari & Ghorbani, 2021; Mohamed dkk., 2015; Nguyen dkk., 2019; Shelke dkk., 2010; Zhang dkk., 2019). Permintaan terhadap produk-produk silika ini biasanya dipenuhi dari silika sintesis yang diekstrak dari pasir kuarsa atau mineral yang mengandung kadar silika yang tinggi. Proses ekstraksi silika dari mineral membutuhkan *capital cost* yang tinggi dibandingkan dengan sintesis silika dari limbah sekam padi. Studi mengenai ekstraksi silika dari sekam padi sudah banyak dilakukan, namun belum ada yang mengupas analisis kinetika secara detail pada proses ekstraksi silika dari abu sekam padi menggunakan larutan NaOH pada suhu rendah. Memahami kinetika reaksi sangat penting untuk optimasi proses, guna mendapatkan mekanisme kimia yang mengontrol, dan memprediksi perilaku leaching dalam kondisi yang berbeda. Hal ini membantu dalam memastikan transisi yang lancar dari proses skala laboratorium ke produksi, menghindari potensi gangguan atau masalah yang mungkin timbul selama *scale-up*. Peningkatan efisiensi leaching silika juga dapat dilakukan menggunakan suhu tinggi (>100 °C) dan tekanan tinggi. Namun permasalahan kelayakan ekonomi dikarenakan tingginya *capital cost* menjadi masalah utama.

Silika merupakan komponen utama penyusun sekam padi. Terdapat sekitar 85-95 % silika pada abu sekam padi. Keberadaan silika pada produk samping ini memicu penelitian tentang ekstraksi silika menjadi menarik untuk dilakukan. Silika dapat diekstraksi menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi rendah. Terdapat sebanyak 55 % silika dapat diekstraksi menggunakan 0.5 N NaOH, rasio S/L sebesar 1/6 pada 60 °C (Rungrodnimitchai dkk., 2009). Pada penelitian lain, sebanyak 92 % silika dapat direkoveri menggunakan larutan NaOH 1 N, pada 80 °C untuk rasio S/L yang sama (Handayani dkk., 2014). Hal ini membuktikan bahwa kenaikan suhu dan konsentrasi pelarut NaOH sangat mempengaruhi ekstraksi silika. Reaksi ekstraksi silika tersaji pada persamaan (1).



Studi kinetika belum banyak dilakukan terhadap ekstraksi silika dari abu sekam padi. Penggunaan studi kinetika dapat memberikan informasi tentang deskripsi proses ekstraksi yang terjadi. Proses ekstraksi padat cair umumnya dapat di deskripsikan menggunakan *shrinking core model* (SCM). Dijelaskan bahwa ekstraksi dapat dikategorikan menjadi lima

proses utama yaitu (1) difusi pelarut melalui lapisan *film*, (2) difusi pelarut melalui lapisan abu, (3) reaksi pada permukaan inti, (4) difusi produk melalui lapisan abu, dan (5) difusi produk melalui lapisan film dan kembali ke badan pelarut (Levenspiel, 1999; Prameswara dkk., 2021). Model yang mengontrol jalannya ekstraksi menurut SCM merupakan tahapan paling lama atau biasa disebut dengan tahapan yang mengontrol. *Shrinking core model* disajikan pada persamaan (2-4).

Difusi melalui lapisan film

$$k_1 \cdot t = X \quad (2)$$

Difusi melalui lapisan abu

$$k_2 \cdot t = 1 - 3(1 - X)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X) \quad (3)$$

Reaksi pada permukaan inti

$$k_3 \cdot t = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Dengan k_1, k_2, k_3 adalah konstanta kecepatan reaksi untuk difusi melalui lapisan film, difusi melalui lapisan abu dan reaksi pada permukaan inti, t (menit) adalah durasi ekstraksi dan X adalah fraksi silika pada filtrat.

Energi aktivasi (E_A) serta faktor frekuensi (tumbukan) dapat dicari menggunakan persamaan *Arrhenius* (5-6).

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{-E_A}{R \cdot T}\right) \quad (5)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{R} \frac{1}{T} \quad (6)$$

Dimana k adalah konstanta kecepatan reaksi, A adalah faktor frekuensi, E_A adalah energi aktivasi (kJ/mol), R adalah konstanta gas (8.3145 J/(mol.K)) dan T merupakan suhu mutlak (K).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh suhu dan studi kinetika ekstraksi silika dari abu sekam padi menggunakan NaOH.

2. Metodologi

2.1. Material

Sekam padi didapatkan dari kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia. Sekam yang didapatkan merupakan produk samping dari penggilingan padi dari CV Tala Salapang Agro (TSA). NaOH (grade teknis) digunakan dalam penelitian ini. Analisis dilakukan menggunakan *energy dispersive x-ray fluorescence* (EDXRF) Epsilon 1, Panalytical.

2.2. Preparasi Sampel

Proses preparasi sekam padi dimulai dengan pencacahan sekam menjadi serbuk menggunakan chopper. Serbuk sekam kemudian diarsangkan dan diabukan menggunakan muffle furnace pada suhu 750 °C selama 4 jam. Serbuk sekam, arang sekam dan abu

sekam padi kemudian dianalisis komponennya menggunakan EDXRF.

2.3. Proses Ekstraksi Silika

Proses ekstraksi dilakukan di dalam beker glass 200 mL, termometer raksa digunakan untuk pengukuran suhu proses. Proses pemanasan dan pengadukan dijalankan oleh external hotplate yang dilengkapi dengan magnetic stirrer. Larutan NaOH 2 M, dengan rasio S/L sebesar 10 gram/100 mL serta kecepatan putar 200 rpm digunakan untuk mengetahui efek temperatur pada rekoveri silika. Digunakan rentang temperatur 30-90 °C pada proses ekstraksi. Rekoveri kemudian dihitung menggunakan persamaan (7) sedangkan fraksi silika pada filtrat (X) dihitung menggunakan persamaan (8).

$$Rekoveri Si (\%) = \frac{m_0.C_0 - m_i.C_i}{m_0.C_0} 100\% \quad (7)$$

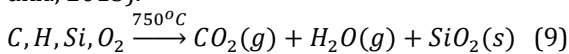
$$X = \frac{Rekoveri Si (\%)}{100} \quad (8)$$

Dimana m_0 dan m_i merupakan massa umpan dan massa residu (gram), sedangkan C_0 dan C_i adalah konsentrasi silika pada umpan dan residu (%).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Material

Komposisi elemen penyusun sekam, arang sekam dan abu sekam padi disajikan pada Tabel 1. Berat silika pada sekam padi mencapai 79.25 %. Komposisi Si meningkat dengan adanya proses *pretreatment* seperti pengarangan dan pengabuan. Terlihat bahwa proses pengarangan dapat menaikkan komposisi Si hingga mencapai 80.68% dan meningkat lagi mencapai 88.06 % pada proses pengabuan. Proses pengabuan meningkatkan komposisi silika pada sekam. Menurut reaksi pada persamaan (9) (Ghorbani dkk., 2015).



Tidak hanya itu, dengan berkurangnya komponen organik dan volatil akibat pengabuan pada suhu tinggi mengakibatkan komposisi logam seperti Fe mengalami kenaikan.

Tabel 1. Komposisi sekam, arang sekam dan abu sekam padi

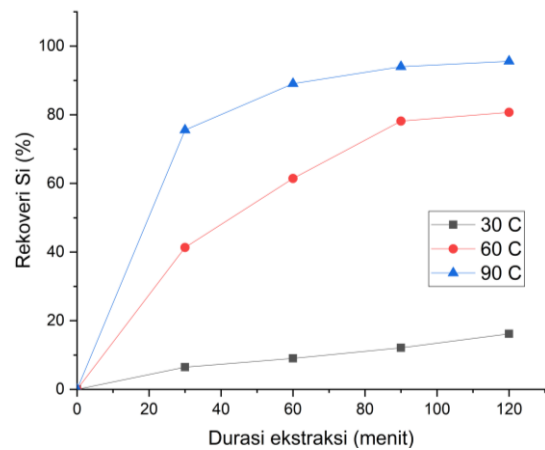
	% massa.		
	Sekam Padi	Arang sekam padi	Abu sekam padi
Si	79.25	80.68	88.06
K	8.91	12.61	6.77
P	6.73	1.98	1.29
Fe	1.34	1.73	2.17
Ca	1.02	2.31	1.11
Mn	0.38	0.504	0.434
LOI*	2.37	0.186	0.166

*Loss on Ignition

3.2. Pengaruh Suhu terhadap Rekoveri Silika

Terlihat pada Gambar 1, rekoveri silika meningkat signifikan ketika adanya kenaikan temperatur ekstraksi. Rekoveri silika tertinggi pada

suhu 30 °C tercatat pada durasi 120 menit sebesar 16 %. Dengan kenaikan suhu menjadi 60 °C (120 menit), rekoveri silika meningkat sebesar 65 %. Kenaikan rekoveri silika signifikan hanya terjadi pada rentang 0-90 menit pada suhu 60 °C. Hal ini menandakan tercapainya titik jenuh pada durasi ekstraksi 90 menit. Rekoveri silika tertinggi mencapai 95.59 % pada suhu 90 °C selama 120 menit. Terjadi kenaikan signifikan pada rekoveri silika hanya pada rentang 0-60 menit, titik jenuh rekoveri tercapai setelahnya. Kenaikan rekoveri silika tidak sebesar dari temperatur 30-60 °C. Pada penelitian lain juga didapatkan bahwa kenaikan suhu dari 25 °C ke >60 °C mengakibatkan kenaikan rekoveri silika secara signifikan (Benke et al., 2006; Park et al., 2021).



Gambar 1 Pengaruh suhu terhadap rekoveri Si (2 M NaOH, S/L = 10 gram/100 mL, 200 rpm)

Peningkatan suhu mengakibatkan mobilitas ion Na^+ dan OH^- meningkat. Hal ini menyebabkan semakin banyak produk Na_2SiO_3 yang terbentuk. Kemudian, Semakin banyak produk yang terbentuk pada durasi yang lama akan meningkatkan viskositas dari larutan produk, sehingga akan menghambat pelarut untuk berdifusi ke dalam inti kemudian bereaksi dengan inti. Peningkatan viskositas larutan yang menghambat mobilisasi ion juga dapat terjadi dikarenakan suhu yang terlalu rendah (Wang et al., 2014). Pada keadaan ini, akan tercapai titik jenuh dimana tingkat rekoveri silika tidak akan bertambah (A. de A. Fernandes, 2006; Fernandes dkk., 2017; Kalapathy dkk., 2001).

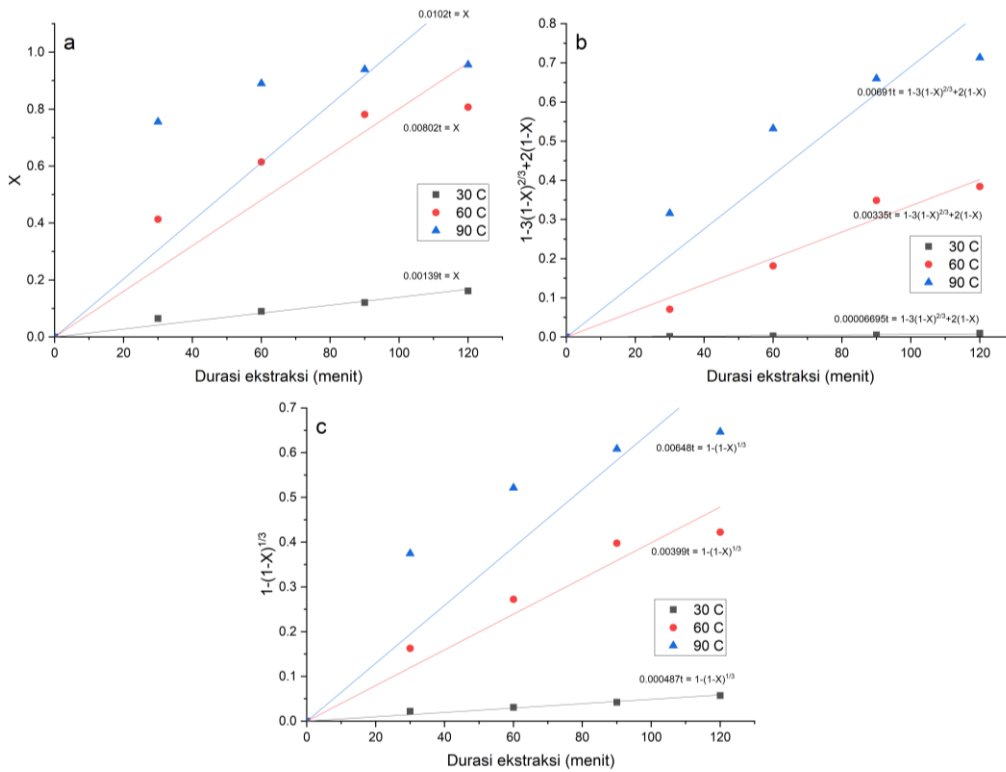
3.3. Analisis Kinetika proses Dekomposisi

Studi kinetika dilakukan untuk mengetahui *rate controlling process* pada ekstraksi silika menggunakan larutan NaOH 2 N. Digunakan shrinking core model untuk mengevaluasi proses ekstraksi silika yang terdiri dari difusi melalui lapisan film (X), difusi melalui lapisan abu $(1-3(1-X)^{1/3}+2(1-X))$ dan reaksi $1-(1-X)^{1/3}$ pada permukaan inti. Model ini diperkenalkan oleh Levenspiel (1999) dengan asumsi bahwa partikel berbentuk *sphere* dan jari-jari partikel tidak berubah selama proses ekstraksi padat-cair hanya jari-jari inti yang bereaksi yang tereduksi. Terlihat pada Gambar 2, plot waktu vs. X, $1-3(1-X)^{1/3}+2(1-X)$ dan $1-(1-X)^{1/3}$. Slope dari masing-masing

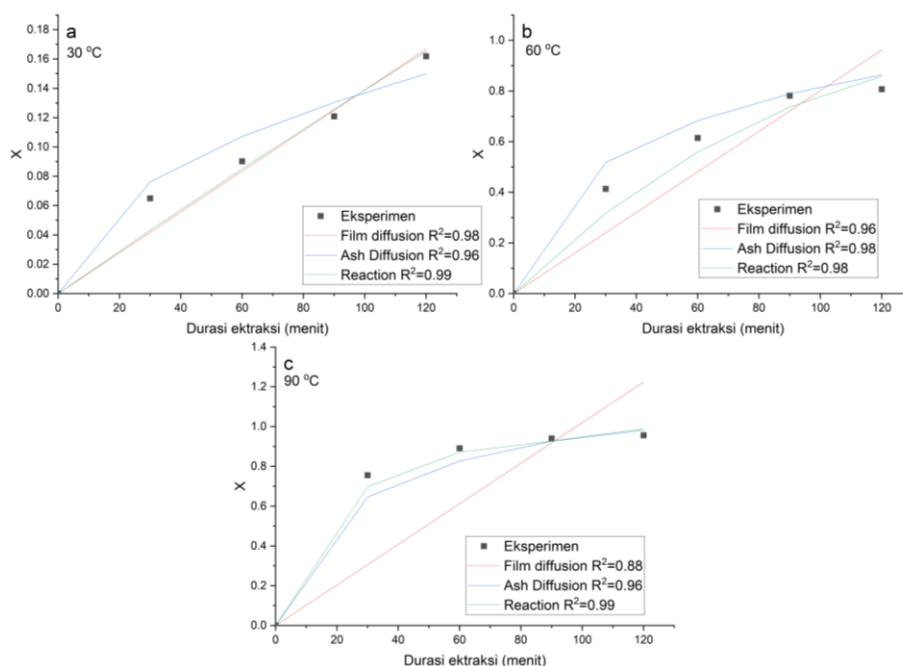
plot, sesuai dengan persamaan (2-4) merupakan nilai konstanta kecepatan reaksi. Konstanta kecepatan reaksi untuk model difusi melalui lapisan film, difusi melalui lapisan abu dan reaksi pada permukaan inti pada masing-masing suhu ditunjukkan pada Gambar 2 (a), (b) dan (c).

Korelasi dari tiga model ini dievaluasi menggunakan nilai R^2 . Nilai R^2 menggambarkan kesesuaian model terhadap data eksperimen. Terlihat bahwa tiga model kinetika ini dapat menunjukkan kecocokan yang baik (Gambar 3). Namun, model

reaksi pada permukaan inti menunjukkan nilai R^2 paling tinggi yang mengindikasikan model ini cocok untuk mendeskripsikan proses yang mengontrol pada ekstraksi silika. Terlihat pada Gambar 3, perhitungan balik setelah diterapkan nilai konstanta kecepatan reaksi yang didapat pada masing-masing model menunjukkan bahwa hasil kalkulasi fraksi untuk model reaksi pada permukaan inti sangat cocok pada data eksperimen. Nilai R^2 pada suhu 30, 60 dan 90 °C untuk model ini sebesar 0.99, 0.98 dan 0.99, secara berurutan.

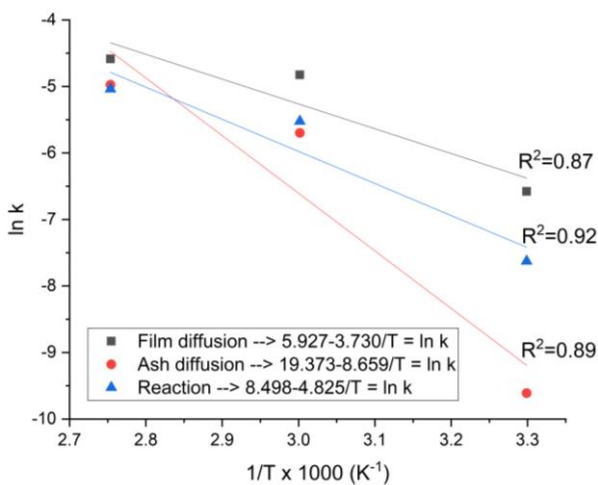


Gambar 2 Plot durasi ekstraksi (t) vs. (a) X, (b) $1-3(1-X)^{2/3}+2(1-X)$, dan (c) $1-(1-X)^{1/3}$



Gambar 3 Koefisien determinasi (R^2) untuk model kinetika difusi melalui lapisan *film*, difusi melalui lapisan abu, dan reaksi pada permukaan inti pada (a) 30 °C, (a) 60 °C, dan (a) 90 °C

Evaluasi kinetika dilanjutkan untuk mengetahui nilai energi aktivasi (E_A) untuk masing-masing model. *Slope* dari plot $1/T$ vs $\ln k$ pada Gambar 4 menunjukkan nilai $-E_A/R$. Sedangkan *intercept* nya menunjukkan nilai $\ln A$. Energi aktivasi untuk model reaksi pada permukaan inti didapatkan sebesar 40.11 kJ/mol. Hal ini mengkonfirmasi bahwa model reaksi pada permukaan inti memang mengontrol proses ekstraksi. Dilaporkan pada penelitian lain bahwa nilai $E_A > 40$ kJ/mol merupakan ciri-ciri bahwa proses ekstraksi padat-cair (*leaching*) dikontrol oleh aktivitas reaksi pada permukaan inti untuk model *shrinking core model* (SCM) (Panda dkk., 2014; Prameswara dkk., 2020, 2021). Pada penelitian sebelumnya, dilaporkan bahwa nilai E_A untuk ekstraksi silika menggunakan NaOH 0.5 N berada pada rentang 41.75-51.25 kJ/mol (Benke dkk., 2006).



Gambar 4 Plot Arrhenius untuk model film diffusion, ash diffusion, dan reaction control

Proses ekstraksi silika sangat dipengaruhi suhu, yang juga menandakan proses reaksi merupakan proses yang mengontrol. Sedangkan nilai E_A untuk model difusi melalui lapisan *film* dan difusi melalui lapisan abu sebesar 31.01 dan 72 kJ/mol, secara berurutan. Persamaan kinetika akhir menggunakan model reaksi pada permukaan inti adalah $4907.01 \exp \frac{-40.11 \text{ kJ/mol}}{R.T} t = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}}$. Dengan adanya data tersebut, dapat memberikan gambaran jelas mengenai kinetika proses ekstraksi silika dari abu sekam padi menggunakan larutan NaOH.

4. Kesimpulan

Pengaruh temperatur ekstraksi silika dari abu sekam padi menggunakan NaOH 2 N telah didapatkan pada penelitian ini. Terlihat bahwa temperatur sangat berpengaruh pada rekoveri silika dari abu sekam padi. Semakin tinggi suhu ekstraksi, semakin tinggi pula rekoveri silika hingga mencapai titik jenuh nya. Rekoveri silika tertinggi dari penelitian ini mencapai 95.59 % pada konsentrasi NaOH 2 N, rasio S/L 10 gram/100 mL, 90 °C dan 200 rpm selama 120 menit.

Model kinetika *shrinking core* dapat menggambarkan proses ekstraksi dengan sangat baik. Model kinetika reaksi pada permukaan inti dipilih

sebagai model kinetika paling baik untuk mendeskripsikan proses ekstraksi. Nilai energi aktivasi (E_A) untuk model reaksi pada permukaan inti didapatkan sebesar 40.11 kJ/mol. Sedangkan persamaan kinetika dari proses ekstraksi silika dari abu sekam padi menggunakan NaOH adalah $4907.01 \exp \frac{-40.11 \text{ kJ/mol}}{R.T} t = 1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}}$.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfiansyah, Arnelli, & Astuti, Y. (2015). Synthesis of rice husk-based zeolit using hydrothermal method and its detergent builder properties. 5th International Seminar on New Paradigm and Innovation on Natural Sciences and Its Application (5th ISNPINSA) , 7-8 October 2015, ICT Centre Diponegoro University., 148-153.
- Badan Pusat Statistik. (2021). Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia 2021 (Angka Sementara). In Berita Resmi Statistik (Vol. 2021, Issue March). <https://www.bps.go.id/publication/2022/07/12/>
- Benke, D. J., Wainwright, M. S., Nigam, K. D. P., & Rao, T. R. (2006). Kinetics of silica dissolution from rice husk char. Canadian Journal of Chemical Engineering, 84(6), 688-692. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450840607>
- Fernandes, A. de A. (2006). "Síntese de Zeólitas e Wolastonita à partir da cinza da casca do arroz" [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.85.2006.tde-08062007-145111>
- Fernandes, I. J., Calheiro, D., Sánchez, F. A. L., Camacho, A. L. D., De Campos Rocha, T. L. A., Moraes, C. A. M., & De Sousa, V. C. (2017). Characterization of silica produced from rice husk ash: Comparison of purification and processing methods. Materials Research, 20, 519-525. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-1043>
- Ghorbani, F., Sanati, A. M., & Maleki, M. (2015). Production of Silica Nanoparticles from Rice Husk as Agricultural Waste by Environmental Friendly Technique. Environmental Studies of Persian Gulf, 2(1), 56-65.
- Handayani, P. A., Nurjanah, E., & Rengga, W. D. P. (2014). Pemanfaatan Limbah Sekam Padi Menjadi Silika Gel. Jurnal Bahan Alam Terbarukan, 3(2), 55-59. <https://doi.org/10.15294/jbat.v3i2.3698>
- Hossain, S. K. S., Mathur, L., & Roy, P. K. (2018). Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review. Journal of Asian Ceramic Societies, 6(4), 299-313. <https://doi.org/10.1080/21870764.2018.1539210>
- Kalpathy, U., Proctor, A., & Shultz, J. (2001). A simple method for production of pure silica from rice hull ash. Fuel and Energy Abstracts, 42(1), 45. [https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(01\)80487-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(01)80487-2)
- Kamari, S., & Ghorbani, F. (2021). Extraction of highly pure silica from rice husk as an agricultural by-product and its application in the production of magnetic mesoporous silica MCM-41. Biomass Conversion and Biorefinery, 11(6), 3001-3009. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00637-w>
- Levenspiel, O. (1999). Chemical Reaction Engineering. In W. Anderson (Ed.), Albright's Chemical Engineering Handbook (3rd ed.). John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1201/9781420014389.ch11>
- Martin, K. R. (2007). The chemistry of silica and its potential health benefits. The Journal of Nutrition, Health & Aging, 11(2), 94-97.

- Mohamed, R. M., Mkhaliid, I. A., & Barakat, M. A. (2015). Rice husk ash as a renewable source for the production of zeolite NaY and its characterization. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(1), 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.12.013>
- Nguyen, T. T., Ma, H. T., Avti, P., Bashir, M. J. K., Ng, C. A., Wong, L. Y., Jun, H. K., Ngo, Q. M., & Tran, N. Q. (2019). Adsorptive removal of iron using SiO₂ nanoparticles extracted from rice husk ash. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6210240>
- Panda, R., Kumari, A., Jha, M. K., Hait, J., Kumar, V., Rajesh Kumar, J., & Lee, J. Y. (2014). Leaching of rare earth metals (REMs) from Korean monazite concentrate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 2035-2042. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.09.028>
- Park, J. Y., Gu, Y. M., Park, S. Y., Hwang, E. T., Sang, B. I., Chun, J., & Lee, J. H. (2021). Two-stage continuous process for the extraction of silica from rice husk using attrition ball milling and alkaline leaching methods. *Sustainability (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/su13137350>
- Prameswara, G., Trisnawati, I., Mulyono, P., Prasetya, A., & Petrus, H. T. B. M. (2021). Leaching Behaviour and Kinetic of Light and Heavy Rare Earth Elements (REE) from Zircon Tailings in Indonesia. *JOM*, 73(4), 988-998. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04584-3>
- Prameswara, G., Trisnawati, I., Poernomo, H., Mulyono, P., Prasetya, A., & Petrus, H. T. B. M. (2020). Kinetics of Yttrium Dissolution from Alkaline Fusion on Zircon Tailings. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(4), 1297-1305. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00220-x>
- Rungrodnimitchai, S., Phokhanusai, W., & Sungkhaho, N. (2009). Preparation of Silica Gel from Rice Husk Ash Using Microwave Heating. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 19(2), 45-50.
- Setyawan, N., Hoerudin, & Wulanawati, A. (2019). Simple extraction of silica nanoparticles from rice husk using technical grade solvent: Effect of volume and concentration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 309(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/309/1/012032>
- Shelke, V. R., Bhagade, S. S., & Mandavgane, S. A. (2010). Mesoporous silica from Rice Husk ash. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 5(2), 63-67. <https://doi.org/10.9767/bcrec.5.2.793.63-67>
- Suka, I. G., Simanjuntak, W., Sembiring, S., & Trisnawati, E. (2008). Karakteristik Keasaman Katalis berbasis Silika Sekam Padi yang Diperoleh dengan Teknik Sol-Gel. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi II*, 37, 342-456.
- Wang, R. C., Zhai, Y. C., Ning, Z. Q., & Ma, P. H. (2014). Kinetics of SiO₂ leaching from Al₂O₃ extracted slag of fly ash with sodium hydroxide solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 24(6), 1928-1936. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63273-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63273-8)
- Zhang, C., Li, S., & Bao, S. (2019). Sustainable Synthesis of ZSM-5 Zeolite from Rice Husk Ash Without Addition of Solvents. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 2825-2835. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0356-0>