

Efektivitas Katalis Fe₂O₃ Terimpregnasi dalam Keramik Berpori Gelcasting Pada Proses Fotodegradasi Fenol

Sumiati Side¹, Suriati Eka Putri², Nita Magfirah
Ilyas³, Abd. Rahman⁴
Universitas Negeri Makassar

Email: ekaputri_chem@unm.ac.id

Abstrak. Penelitian eksperimen ini merupakan penelitian lanjutan yang bertujuan untuk mengetahui efektivitas katalis Fe₂O₃ yang terimpregnasi ke dalam keramik berpori *gelcasting* pada proses fotodegradasi fenol. Keramik berpori disintesis dengan metode *gelcasting* menggunakan clay alam sebagai bahan dasar dan binder pati sagu sebesar 8% dengan karboksimetil selulosa (CMC) sebagai dispersan. Keramik berpori *gelcasting* selanjutnya diimbaskan katalis Fe₂O₃ metode adsorpsi yang kemudian disebut Fe₂O₃-keramik berpori. Material yang dihasilkan selanjutnya digunakan dalam proses degradasi fenol 10 ppm (pH 8) selama 60 menit. Pengukuran konsentrasi hasil degradasi fenol menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 270 nm. Efektivitas katalis Fe₂O₃ dalam mendegradasi fenol meningkat ketika diimbaskan ke dalam keramik berpori. Fotodegradasi tertinggi terjadi pada penambahan Fe₂O₃-keramik berpori dan diiridiasi UV sebesar 58,01%.

Kata Kunci: Keramik Berpori Gelcasting, Fe₂O₃-keramik berpori, Fotodegradasi Fenol

INDONESIAN
JOURNAL OF
FUNDAMENTAL
SCIENCES

E-ISSN: 2621-6728

P-ISSN: 2621-671X

Submitted: August 17th, 2021

Accepted : October, 29th, 2021



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PENDAHULUAN

Air merupakan kebutuhan vital bagi kehidupan sehari-hari. Hampir semua aspek kehidupan membutuhkan air bersih, namun pemenuhan kebutuhan air bersih saat ini mulai berkurang oleh karena menurunnya kualitas dan kuantitas air. Pencemaran air menjadi permasalahan serius yang dapat mengancam kehidupan. Industri tekstil di Indonesia mempunyai andil cukup besar sebagai penyebab pencemaran air. Pembuangan limbah cair industri tekstil dengan kandungan kimia berupa BOD, COD, TSS, fenol, krom, amonia, sulfida, minyak dan lemak serta pH yang tinggi menjadi penyebab pendangkalan, selain itu kekeruhan air menyebabkan sinar matahari terhalang untuk masuk ke dasar air sehingga ekosistem pada perairan menjadi terganggu (Enrico, 2019). Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (EPA) telah membuktikan bahwa fenol merupakan salah satu zat pencemar yang perlu mendapat perhatian khusus karena risikonya yang tinggi terhadap kesehatan manusia bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah (US Environmental Protection Agency, 2000). Berdasarkan standar EPA, konsentrasi fenol dalam air limbah yang diolah tidak boleh melebihi 1ppm. Paparan air limbah yang mengandung konsentrasi fenol antara 9-15 ppm dapat menyebabkan masalah kesehatan yang serius (Keller, 1992).

Biodegradasi, pemisahan fisik, dan proses oksidasi adalah teknik yang telah dilakukan untuk pengolahan air limbah yang menargetkan penghapusan polutan (Fernandes, Makoś, Khan, & Boczkaj, 2019; Ke et al., 2018; Villegas et al., 2016). Di antara teknik yang digunakan untuk pengolahan air limbah yang mengandung senyawa fenolik, proses oksidasi lanjutan telah dilaporkan sebagai strategi yang efisien menggunakan TiO_2 yang didoping dengan besi untuk degradasi fenol dan melaporkan 57% penghilangan fenol dari air limbah (Moradi, Ahmed, Jun, Blackburn, & Herring, 2019). Dalam studi serupa oleh ref. (Y. Zhang et al., 2010) menggunakan fotokatalis Co-Pd/ BiVO_4 untuk degradasi fenol di bawah iradiasi cahaya tampak.

Proses fotokatalitik merupakan metode yang sangat menjanjikan untuk mendegradasi polutan organik. Dalam proses ini semikonduktor yang diaktivasi oleh sinar ultraviolet digunakan sebagai katalis untuk mendegradasi kontaminan organik. Untuk meningkatkan aktivitas katalitik fotokatalis, maka diimbangkan ke dalam suatu material berpori, seperti clay (Ma'Ruf & Al Fathoni, 2018) dan zeolite (G. Zhang, Song, Duan, & Zheng, 2018). Tingginya kandungan alumina silika dalam clay mendapat perhatian khusus bagi peneliti sehingga sampai saat ini masih sedang dikembangkan khususnya dalam pembuatan material maju seperti keramik (Alves et al., 2016; Putri & Pratiwi, 2016; Putri, Pratiwi, Tjahjanto, Mardiana, & Subaer, 2018; Putri, Pratiwi, Triandi, Mardiana, & Side, 2018). Salah satu jenis keramik yang sedang dikembangkan adalah sintesis keramik berpori yang berpotensi sebagai pengemban katalis (Coronas & Santamaría, 1999; Liu, Li, Ren, Liu, & Yang, 2017; Putri, Pratiwi, Triandi, et al., 2018).

Keramik berpori disintesis dengan berbagai macam metode, salah satunya adalah dengan metode koloidal. Metode gelcasting merupakan salah satu metode koloidal yang mudah untuk dilakukan karena lama proses pembuatan green body keramik yang cukup singkat (Montanaro, Coppola, Palmero, & Tulliani, 2019). Dengan demikian, pada penelitian ini clay akan disintesis menjadi keramik berpori menggunakan metode gelcasting.

Prinsip dasar metode gelcasting ada polimer didispersikan ke dalam slurry (Tian, Huang, Guo, Gao, & Xiao, 2020). Polimer yang terdispersi akan bertindak sebagai binder dan akan lepas saat proses sintering sehingga juga bertindak sebagai template pori. Polimer yang pada umumnya digunakan adalah poliakrilamid (Putri, 2013). Namun polimer tersebut bersifat toxic, seiring dengan berjalannya waktu, beberapa peneliti telah mengembangkan penggunaan bahan alam sebagai binder seperti kanji (Alag & Zamel, 2018), tepung beras (Wan, Huang, Yang, & Qiu, 2014), dan glutardehid (Lu et al., 2020). Pada penelitian ini akan dikaji penggunaan binder alam berupa sagu.

Penelitian sebelumnya (Side, Putri, & S, n.d.) telah mengkaji efektifitas degradasi fenol menggunakan katalis TiO_2 yang terimpregnasi ke dalam zeolite, menghasilkan persen degradasi sebesar 37,12%. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan mengkaji efektivitas katalis Fe_2O_3 dalam mendegradasi fenol dengan konsentrasi awal 10 ppm. Efektivitas katalis diuji berdasarkan tingkat degradasi fenol berbagai macam material (katalis Fe_2O_3 , keramik berpori dan Fe_2O_3 -keramik berpori) dan kondisi tertentu (ruang gelap atau penyinaran UV).

METODE PENELITIAN

Preparasi Sampel

Sampel tanah liat alam Kabupaten Pangkep Provinsi Sulawesi Selatan diambil secara representatif, kemudian dibersihkan dari kotoran, dikeringkan selama 1-3 hari sampai kering. Setelah itu dihaluskan menggunakan mortar dan diayak dengan ukuran 60 mesh.

Sintesis Keramik Berpori Metode Gelcasting

Sebanyak 5 g tanah liat dan 0,1 g dispersan CMC ditambahkan ke dalam 1,5 mL akuades. Suspensi dicampurkan dan ditambah dengan pati sagu dengan berat 8% dari berat tanah liat. Suspensi dicetak, dianginkan hingga kering dan dipanaskan 70 °C selama 2 jam. Setelah itu, badan keramik disintering dengan tahapan pemasan hingga suhu 100°C dengan laju 50°C/15 menit dan ditahan pada suhu 100°C selama satu jam kemudian dilanjutkan hingga pada suhu 600 °C dengan laju 60 °C / jam dan sampai 1100 °C dengan laju 300 °C / jam.

Fe_2O_3 -Keramik Berpori

Fe_2O_3 -keramik berpori dibuat dengan cara impregnasi katalis Fe_2O_3 ke dalam badan keramik berpori menggunakan prekursor FeCl_3 dengan metode impregnasi adsorpsi. Sebanyak 2,4 gram PVA dilarutkan ke dalam 150 mL akuades suhu 70°C menggunakan magnetik stirer hingga PVA larut sempurna. Penambahan 40 mL FeCl_3 2M, 120 mL etanol 96% dan 6 mL asam asetat 2M. Pengadukan menggunakan magnetik stirer dilakukan selama 3 jam dengan suhu 105 °C. Selanjutnya keramik berpori dimasukkan ke dalam larutan dan dilakukan perendaman selama 17 jam. Kemudian keramik berpori dikalsinasi dengan suhu 550 °C selama 1 jam.

Degradasi Fenol

Disiapkan 8 sampel larutan fenol konsentrasi 10 ppm sebanyak 25 mL pada pH 8. Sampel no. 1 sebagai kontrol, tanpa penambahan katalis dan tanpa diiradiasi UV disimpan pada ruangan gelap. Sampel no. 2 tanpa penambahan katalis, namun

diiradiasi UV. Sampel no. 3 ditambahkan 0,1 gram Fe_2O_3 . Sampel no. 4 ditambahkan 0,1 gram Fe_2O_3 dan diiridiasi UV. Sampel no. 5 ditambahkan keramik berpori. Sampel no. 6 ditambahkan keramik berpori dan diiridiasi UV. Sampel no. 7 ditambahkan Fe_2O_3 -keramik berpori. Dan sampel no. 8 ditambahkan Fe_2O_3 -keramik berpori dan diiridiasi UV. Sampel yang diirradiasi UV dilakukan selama 180 menit. Konsentrasi fenol setelah perlakuan diukur dengan spektrofotometer UV-Vis Shimadzu pada panjang gelombang maksimum 270 nm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Keramik Berpori Metode *Gelcasting*

Sintesis keramik berpori dilakukan dengan metode *gelcasting* dengan penambahan pati sagu 8% dari berat tanah liat yang digunakan. Proses sintering dilakukan secara bertahap dengan penahanan pada suhu 100 °C, 300 °C dan 500 °C selama 60 menit yang bertujuan untuk menghilangkan kandungan air dan mendegradasi pati sagu. Proses sintering kemudian dilanjutkan hingga suhu 1100 °C dan juga dilakukan penahanan selama 60 menit, pada suhu ini terjadi transformasi fasa alumina dalam clay yaitu $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ menjadi $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (korundum) (Ilyas, 2016). Untuk aluminosilikat (Al_2SiO_5) stabil hingga suhu 1250 °C dalam bentuk amorf. Jadi, selain proses degradasi pati sagu juga terjadi perubahan fasa dari aluminasilika clay Sulawesi Selatan. Selain proses degradasi pati sagu dan perubahan fasa aluminasilika juga terjadi proses oksidasi logam Fe yang ada pada clay alam (Zanur, Putra, & Astuti, 2017), hal ini ditunjukkan dengan adanya perubahan warna badan keramik sebelum dan setelah sintering yang ditunjukkan pada Gambar 1.



(a)

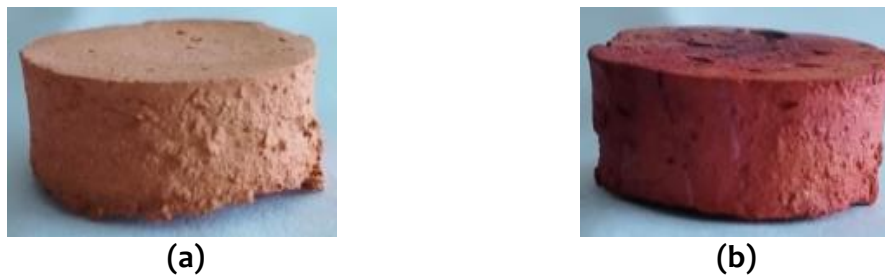


(b)

Gambar 1. (a) sebelum sintering (b) setelah sintering

Fe_2O_3 -Keramik Berpori

Penampakan fisik Fe_2O_3 -keramik berpori dapat dilihat pada Gambar 2, terlihat bahwa impregnasi katalis Fe_2O_3 menggunakan metode adsorpsi menghasilkan Fe_2O_3 -keramik berpori berwarna merah yang terjadi karena proses oksidasi $\text{Fe}(\text{OH})_3$ menjadi kristal Fe_2O_3 di dalam badan keramik. Warna kemerahan pada Fe_2O_3 -keramik berpori menandakan bahwa adsorpsi katalis Fe_2O_3 melalui proses kalsinasi menandakan pertumbuhan kristal katalis di dalam badan keramik berjalan dengan baik dan tidak mengalami oksidasi berlebihan. Hal ini sesuai dengan yang dilaporkan oleh ref. (Zanur et al., 2017) pigmen warna Fe_2O_3 bergantung dari tingkat oksidasinya dengan rentang warna kuning, merah, dan hitam.



Gambar 2. (a) sebelum impregnasi katalis (b) setelah impregnasi katalis

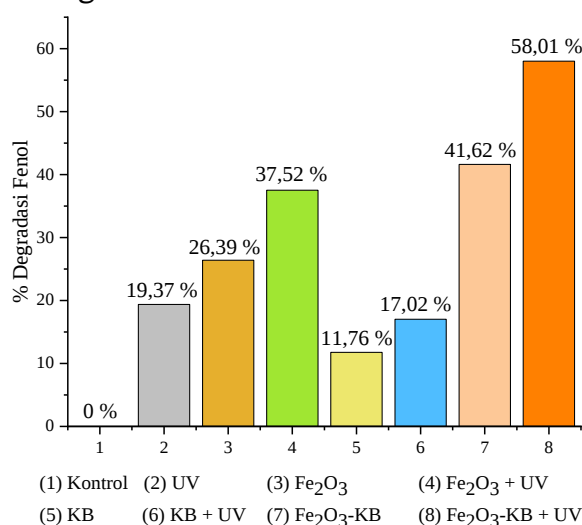
Degradasi fenol

Hasil penelitian degradasi fenol ditunjukkan pada Gambar 3., degradasi fenol tertinggi sebesar 58,01% terjadi pada penambahan Fe_2O_3 -keramik berpori dan diiridiasi UV. Hasil degradasi fenol menggunakan Fe_2O_3 -keramik berpori yang diperoleh lebih efisien dibandingkan menggunakan fotokatalis $\text{TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ yang dilakukan oleh ref. (Moradi et al., 2019) yang melaporkan 57% degradasi fenol dari air limbah. Namun dalam studi serupa oleh ref. (Y. Zhang et al., 2010) menggunakan fotokatalis Co-Pd/BiVO_4 untuk degradasi fenol di bawah iradiasi cahaya tampak melaporkan bahwa degradasi fenol 90% dicapai setelah 180 menit dengan penyinaran sinar tampak. Baru-baru ini, penggunaan fotokatalis nanokomposit, seperti: $\text{AgBr/BiOBr/graphene}$, BiOCl-TiO_2 , $\text{ZnO/Nd-doped BiOBr}$, dan Ag-ZnO untuk fotodegradasi fenol di bawah cahaya tampak selama 180 menit, telah dilaporkan rata-rata degradasi fenol tertinggi sebesar 90% - 97% dengan konsentrasi awal 5 mg/L (Sánchez-Rodríguez, Méndez Medrano, Remita, & Escobar-Barrios, 2018; Sin, Lim, Lam, Mohamed, & Zeng, 2019; Singh et al., 2019; Vaiano et al., 2018).

Efektivitas proses degradasi dapat diketahui dari besarnya konsentrasi fenol yang terdegradasi yang dinyatakan dalam persen (%) melalui persamaan 1 berikut:

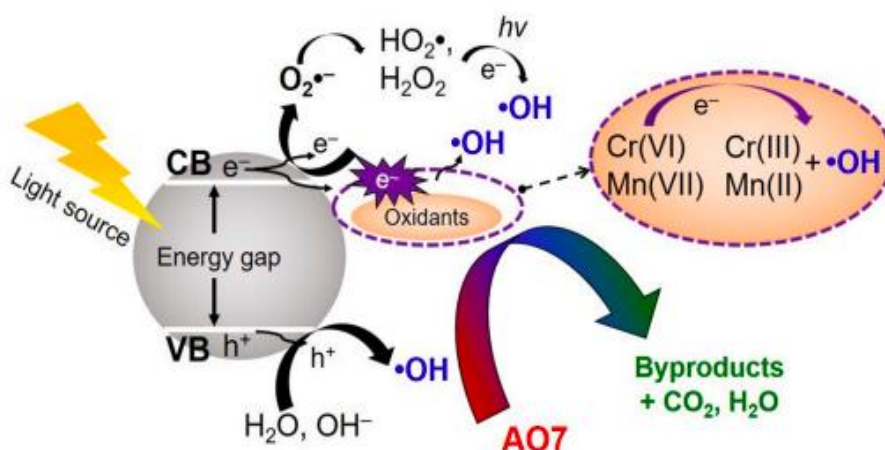
$$\%E = \frac{C_a - C_s}{C_a} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Dimana C_a adalah konsentrasi awal fenol dan C_s adalah konsentrasi akhir fenol setelah dilakukan fotodegradasi.



Gambar 3. Persentase Fotodegradasi Fenol

Proses degradasi fenol yang dilakukan dengan cara penyinaran dengan lampu UV menghasilkan persentase degradasi lebih tinggi. Hal ini terjadi karena lampu UV merupakan sumber foton. Foton akan memicu reaksi fotolisis yang akan menghasilkan radikal $\bullet\text{OH}$ dari hasil pemecahan molekul air yang berfungsi sebagai oksidator kuat pada reaksi fotodegradasi. Sementara itu penambahan material (katalis Fe_2O_3 , keramik berpori dan Fe_2O_3 -keramik berpori) dan penyinaran UV juga akan menghasilkan elektron pada pita konduksi dari material yang akan berinteraksi dengan O_2 menghasilkan O_2^- yang mampu meningkatkan persentase degradasi fenol (Linsebigler, Lu, & Yates, 1995). Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis Fe_2O_3 akan memiliki persentase yang lebih tinggi dalam mendegradasi fenol jika diemban ke dalam keramik berpori. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh ref. (Dedov et al., 2019; Fedotov et al., 2021; Miao et al., 2022) melaporkan bahwa aktivitas katalis akan meningkat bila diemban ke dalam material berpori yang juga dapat berfungsi sebagai support katalis, meningkatkan mobilitas, dan produktibilitas. Skema aktivitas katalis dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema degradasi menggunakan material dan penyinaran UV (Shen et al, 2021)

KESIMPULAN

Penentuan efektivitas katalis Fe_2O_3 pada degradasi fenol dilakukan dengan mengembangkan katalis ke dalam keramik berpori yang disintesis dengan metode *gelcasting*. Pengukuran konsentrasi hasil degradasi fenol menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang maksimum 270 nm. Hasil penelitian menunjukkan efektivitas katalis Fe_2O_3 dalam mendegradasi fenol meningkat bila diemban ke dalam material berpori. Degradasi fenol tertinggi terjadi pada penambahan Fe_2O_3 -keramik berpori dengan diiridiasi UV sebesar 58,01% dan tanpa diiridiasi sebesar 41,62%

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Makassar yang telah mendukung penelitian ini dalam bentuk pendanaan PNPB dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LP2M) Universitas Negeri Makassar yang telah memberikan banyak bantuan demi terlaksananya artikel ilmiah ini.

REFERENSI

- Alag, H. K., & Zamel, R. S. (2018). Studying the Properties of Porous Alumina Using Starch as a Binder. *Journal of Al-Nahrain University of Science*, 21(3), 112–118. <https://doi.org/10.22401/jnus.21.3.13>
- Alves, H. P. A., Silva, J. B., Campos, L. F. A., Torres, S. M., Dutra, R. P. S., & Macedo, D. A. (2016). Preparation of mullite based ceramics from clay-kaolin waste mixtures. *Ceramics International*, 42(16), 19086–19090. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.068>
- Coronas, J., & Santamaría, J. (1999). Catalytic reactors based on porous ceramic membranes. *Catalysis Today*, 51(3–4), 377–389. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00090-5)
- Dedov, A. G., Voloshin, Y. Z., Belov, A. S., Loktev, A. S., Besspalov, A. S., & Buznik, V. M. (2019). New heterogeneous catalytic systems based on highly porous ceramic materials modified with immobilized d-metal cage complexes for H₂ production from CH₄. *Mendeleev Communications*, 29(6), 669–671. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2019.11.022>
- Enrico. (2019). Dampak Limbah Cair Industri Tekstil Terhadap Lingkungan dan Aplikasi Teknik Eco Printing sebagai Usaha Mengurangi Limbah. *Moda*, 1(1), 5–13.
- Fedotov, S., Uvarov, V. I., Tsodikov, M. V., Paul, S., Simon, P., Marinova, M., & Dumeignil, F. (2021). Production of styrene by dehydrogenation of ethylbenzene on a [Re, W]/ γ -Al₂O₃ (K, Ce)/ α -Al₂O₃ porous ceramic catalytic converter. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 160, 108265. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108265>
- Fernandes, A., Makoś, P., Khan, J. A., & Boczkaj, G. (2019). Pilot scale degradation study of 16 selected volatile organic compounds by hydroxyl and sulfate radical based advanced oxidation processes. *Journal of Cleaner Production*, 208, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.081>
- Ilyas, M. A. (2016). Studi Pembuatan Keramik Berpori Dari Lumpur Lapindo Dengan Tanin Sebagai Cetakan Pori. *Jurnal Sangkareang Mataram*, 2(2), 41–48. Retrieved from www.journal.uta45jakarta.ac.id
- Ke, Q., Zhang, Y., Wu, X., Su, X., Wang, Y., Lin, H., ... Chen, J. (2018). Sustainable biodegradation of phenol by immobilized *Bacillus* sp. SAS19 with porous carbonaceous gels as carriers. *Journal of Environmental Management*, 222(February), 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.061>
- Keller, B. P. (1992). A survey of survey evidence. *Litigation*, 42(7), 23–71.
- Linsebigler, A. L., Lu, G., & Yates, J. T. (1995). Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*, 95(3), 735–758. <https://doi.org/10.1021/cr00035a013>
- Liu, H., Li, C., Ren, X., Liu, K., & Yang, J. (2017). Fine platinum nanoparticles supported on a porous ceramic membrane as efficient catalysts for the removal of benzene. *Scientific Reports*, 7(1), 3–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16833-0>
- Lu, Y., Liu, J., Ren, B., Wang, C., Rong, Y., Gan, K., ... Yang, J. L. (2020). Room-temperature gelcasting of alumina with tartaric acid and glutaraldehyde.

- Ceramics International, 46(8), 11432–11435.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.119>
- Ma'Ruf, A., & Al Fathoni, M. A. S. (2018). Development of porous ceramic membrane from natural zeolite - Clay for microfiltration. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 403(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/403/1/012006>
- Miao, L., Wu, X., Ji, Z., Zhao, Z., Chang, C., Liu, Z., & Chen, F. (2022). Microwave-assisted preparation of porous fibrous ceramic-based catalytic filter elements for the simultaneous removal of NO_x and dust from high-temperature gases. Separation and Purification Technology, 278(August 2021), 119549. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119549>
- Montanaro, L., Coppola, B., Palmero, P., & Tulliani, J. M. (2019). A review on aqueous gelcasting: A versatile and low-toxic technique to shape ceramics. Ceramics International, 45(7), 9653–9673. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.079>
- Moradi, V., Ahmed, F., Jun, M. B. G., Blackburn, A., & Herring, R. A. (2019). Acid-treated Fe-doped TiO₂ as a high performance photocatalyst used for degradation of phenol under visible light irradiation. Journal of Environmental Sciences (China), 83, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.002>
- Putri, S. E. (2013). Pengaruh Perbandingan monomer AM dan Crosslinker MBAM pada Pembuatan Keramik Berpori Secara Gelcasting Dengan Bahan Dasar Lumpur Lapindo The Influence of Ratio AM Monomer and MBAM Crosslinker on Synthesis of Porous Ceramic by Gelcasting Method Using Lapin. 38–45.
- Putri, S. E., & Pratiwi, D. E. (2016). The Effect of Mole Ratio of Acrylamide (AM) Monomer and Methylene-bis-acrylamide (MBAM) Crosslinker Toward the Hardness of Gelcasting Porous Ceramics. Proceeding International Conference on Mathematic, Science, Technology, Education and Their Applications, 1(1), 412–415.
- Putri, S. E., Pratiwi, D. E., Tjahjanto, R. T., Mardiana, D., & Subaer. (2018). On the effect of acrylamide and methylenebisacrylamide ratio on gelcasted ceramic pore character. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 53(5), 841–844.
- Putri, S. E., Pratiwi, D. E., Triandi, R., Mardiana, D., & Side, S. (2018). Performance Test of Gelcasted Porous Ceramic as Adsorbent of Azo Dyes. Journal of Physics: Conference Series, 1028(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012039>
- Sánchez-Rodríguez, D., Méndez Medrano, M. G., Remita, H., & Escobar-Barrios, V. (2018). Photocatalytic properties of BiOCl-TiO₂ composites for phenol photodegradation. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(2), 1601–1612. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.061>
- Side, S., Putri, S. E., & S, N. I. (n.d.). Determination of the Effectiveness of Phenol Degradation Types Using Zeolite / TiO₂ Composites. (51), 1358–1363.
- Sin, J. C., Lim, C. A., Lam, S. M., Mohamed, A. R., & Zeng, H. (2019). Facile synthesis of novel ZnO/Nd-doped BiOBr composites with boosted visible light photocatalytic degradation of phenol. Materials Letters, 248, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.129>
- Singh, P., Sonu, Raizada, P., Sudhaik, A., Shandilya, P., Thakur, P., ... Gupta, V. K. (2019). Enhanced photocatalytic activity and stability of AgBr/BiOBr/graphene

- heterojunction for phenol degradation under visible light. *Journal of Saudi Chemical Society*, 23(5), 586–599. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.10.005>
- Tian, C., Huang, X., Guo, W., Gao, P., & Xiao, H. (2020). Preparation of SiC porous ceramics by a novel gelcasting method assisted with surface modification. *Ceramics International*, 46(10), 16047–16055. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.155>
- US Environmental Protection Agency. (2000). Phenol Hazard Summary. *Phenol*, 1(1), 95–108.
- Vaiano, V., Matarangolo, M., Murcia, J. J., Rojas, H., Navío, J. A., & Hidalgo, M. C. (2018). Enhanced photocatalytic removal of phenol from aqueous solutions using ZnO modified with Ag. *Applied Catalysis B: Environmental*, 225(November 2017), 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.11.075>
- Villegas, L. G. C., Mashhadi, N., Chen, M., Mukherjee, D., Taylor, K. E., & Biswas, N. (2016). A Short Review of Techniques for Phenol Removal from Wastewater. *Current Pollution Reports*, 2(3), 157–167. <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0035-3>
- Wan, W., Huang, C. e., Yang, J., & Qiu, T. (2014). Study on Gelcasting of Fused Silica Glass Using Glutinous Rice Flour as Binder. *International Journal of Applied Glass Science*, 5(4), 401–409. <https://doi.org/10.1111/ijag.12060>
- Zanur, H., Putra, A., & Astuti, A. (2017). Sintesis Dan Karakterisasi Pigmen Hematit (α -Fe₂O₃) Dari Bijih Besi Di Jorong Kepalo Bukik Kabupaten Solok Selatan Menggunakan Metode Presipitasi. *Jurnal Fisika Unand*, 6(2), 149–155. <https://doi.org/10.25077/jfu.6.2.149-155.2017>
- Zhang, G., Song, A., Duan, Y., & Zheng, S. (2018). Enhanced photocatalytic activity of TiO₂/zeolite composite for abatement of pollutants. *Microporous and Mesoporous Materials*, 255, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.07.028>
- Zhang, Y., Gao, B., Lu, L., Yue, Q., Wang, Q., & Jia, Y. (2010). Treatment of produced water from polymer flooding in oil production by the combined method of hydrolysis acidification-dynamic membrane bioreactor-coagulation process. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 74(1–2), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.08.001>