

Nomor Urut : 179 A/UN.7.F3.6.TL/DL/I/2025

178 A/UN7.F3.6.TL/DL/I/2025

Laporan Tugas Akhir

**PERANCANGAN
ALAT PENGENDALI PENCEMARAN UDARA
PADA SENTRA INDUSTRI TEMPE DESA KROPAK
KECAMATAN WIROSARI KABUPATEN GROBOGAN**



Disusun Oleh :

Diah Ayu Nilamsari	21080121120026
Huwaida Khansa Fikriana	21080121120035

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

2025

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

NAMA : Diah Ayu Nilamsari
 NIM : 21080121120026
 Jurusan/Departemen : Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Undip
 Judul Skripsi : Perancangan Alat Pengendali Pencemaran Udara pada Sentra Industri Tempe Desa Kropak Kecamatan Wirosari Kabupaten Grobogan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

Pembimbing I:

Dr. Ir. Budi Prasetyo Samadikun, S.T., M.Si., IPM., ASEAN Eng.
 197805142005011001



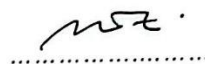
Pembimbing II:

Dr. Eng. Bimastyaji Surya Ramadan, S.T., M.T.
 199203242019031016



Ketua Penguji:

Dr. Ir. Nurandani Hardyanti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
 197301302000032001



Anggota Penguji:

Dr. Ir. Haryono Setiyo Huboyo, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
 197402141999031002



Semarang, 21 Juli 2025

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Undip

Ketua



Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.

NIP. 197208302000031001

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

NAMA : Huwaida Khansa Fikriana
 NIM : 21080121120035
 Jurusan/Departemen : Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Undip
 Judul Skripsi : Perancangan Alat Pengendali Pencemaran Udara pada Sentra Industri Tempe Desa Kropak Kecamatan Wirosari Kabupaten Grobogan

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

Pembimbing I:

Dr. Eng. Bimastyaji Surya Ramadan, S.T., M.T.
 199203242019031016

Pembimbing II:

Dr. Ir. Budi Prasetyo Samadikun, S.T., M.Si., IPM., ASEAN Eng.
 197805142005011001

Ketua Penguji:

Dr. Ir. Haryono Setiyo Huboyo, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
 197402141999031002

Anggota Penguji:

Dr. Ir. Nurandani Hardyanti, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
 197301302000032001

Semarang, 21 Juli 2025

Program Studi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik, Undip

Ketua



Prof. Dr. Ir. Badrus Zaman, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
 NIP. 197208302000031001

ABSTRAK

Industri tempe skala kecil di Indonesia umumnya menggunakan biomassa kayu sebagai bahan bakar dalam proses produksinya. Di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, 68 UMKM menggunakan kayu untuk perebusan kedelai dan belum dilengkapi alat pengendali pencemaran udara. Industri tempe terbesar di desa ini menggunakan 80 kg kayu/jam untuk mengolah 200 kg kedelai/hari. Pembakaran biomassa ini menghasilkan emisi gas buang berupa SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , dan *Total Suspended Particulate* (TSP). Perencanaan ini bertujuan untuk merancang alat pengendali pencemaran udara yang efektif dalam menurunkan emisi tersebut. Berdasarkan perhitungan, parameter yang melebihi baku mutu sumber emisi tidak bergerak pada Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995 adalah TSP dengan konsentrasi 505,25 mg/m^3 dibandingkan dengan 350 mg/m^3 . Pemilihan alternatif alat pengendali dilakukan melalui metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan terpilih *cyclone* sebagai alternatif dengan bobot tertinggi. *Cyclone* yang dirancang memiliki efisiensi removal TSP sebesar 98,95%; PM_{10} sebesar 54,97%; dan $\text{PM}_{2.5}$ sebesar 4,66%; dengan efisiensi pengumpulan total 56,84%. Gas buang kemudian dialirkan melalui cerobong untuk meminimalkan dampak terhadap lingkungan sekitar. Hasil pemodelan dispersi menunjukkan bahwa penggunaan alat pengendali oleh seluruh UMKM mampu menurunkan konsentrasi TSP di udara ambien hingga 62,76% dan berada di bawah baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021.

Kata kunci : Sentra industri tempe, pembakaran kayu, alat pengendali pencemaran udara, *cyclone*

ABSTRACT

Small-scale tempe industries in Indonesia generally use wood biomass as fuel in their production processes. At the Tempe Industry Center in Kropak Village, 68 small enterprises use firewood for boiling soybeans, and none of the facilities have implemented air pollution control systems. The largest industry in the area consumes 80 kg of firewood per hour to process 200 kg of soybeans per day. This biomass combustion generates emissions such as SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, and Total Suspended Particulate (TSP). This study aims to design an effective air pollution control device to reduce these emissions. Based on emission calculations, the TSP concentration was found to be 505.25 mg/m³, exceeding the emission limit for stationary sources as regulated in Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 1995, which sets the threshold at 350 mg/m³. The Analytical Hierarchy Process (AHP) method was used to evaluate alternative control technologies, and the cyclone separator was selected as the most suitable option. The designed cyclone achieved removal efficiencies of 98.95% for TSP, 54.97% for PM₁₀, and 4.66% for PM_{2.5}, with a total collection efficiency of 56.84%. The treated flue gas is discharged through a stack to minimize environmental impact. Dispersion modeling shows that widespread adoption of air pollution control systems across all enterprises could reduce ambient TSP concentrations by 62.76%, bringing them below the air quality standards established in Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021.

Keywords: tempe industry, wood combustion, air pollution control, cyclone

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tempe merupakan salah satu bahan pangan fermentasi yang banyak dikonsumsi oleh sebagian besar masyarakat Indonesia. Berdasarkan buletin konsumsi pangan, jumlah konsumsi tempe pada tahun 2025 diperkirakan akan mengalami peningkatan dibandingkan dengan tahun sebelumnya menjadi 7,87 kg/kapita/tahun (Kementerian Pertanian, 2024). Seiring dengan meningkatnya jumlah konsumsi tempe di Indonesia, mendorong terjadinya pertumbuhan industri tempe yang begitu pesat. Di Indonesia, sebagian besar industri tempe merupakan industri kecil skala rumahan yang proses produksi dan distribusinya belum sepenuhnya memperhatikan dampak terhadap lingkungan (Supartono dkk., 2020). Salah satu limbah yang dihasilkan dari proses produksi tempe adalah emisi udara. Sumber penghasil emisi udara dari industri tempe berasal dari penggunaan kayu sebagai bahan bakar untuk perebusan kedelai. Emisi yang dihasilkan dari pembakaran satu kilogram kayu mencapai 1,75 kg CO₂ (Kulsum dkk., 2022).

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Febriani dkk. (2024), jenis bahan bakar yang umumnya digunakan dalam produksi tempe adalah kayu. Hal ini disebabkan karena kayu merupakan bahan bakar biomassa yang paling mudah ditemukan (Santosa & Suci, 2020). Polutan gas utama yang dihasilkan selama proses pembakaran biomassa diantaranya karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), metana (CH₄), oksida nitrogen (NO_x), dan amonia (NH₃) (Levine, 2003). Ketika biomassa dibakar secara terus-menerus pada ruang terbatas, polutan yang dihasilkan akan terakumulasi dan menjadi ancaman kesehatan bagi manusia. Asap dari pembakaran kayu mengandung polutan yang dapat menyebabkan bronkitis, emfisema, kanker, dan penyakit serius lainnya (Pimentel, 2003). Selain itu, emisi dari pembakaran biomassa memberikan dampak signifikan terhadap perubahan iklim melalui kandungan polutan seperti

metana (CH₄), *black carbon* (BC), dan *organic carbon* (OC) (Jiang et al., 2022; Yang et al., 2021).

Desa Kropak merupakan salah satu desa di Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan dengan luas wilayah $\pm 386 \text{ km}^2$ dari total luas Kecamatan Wirosari sebesar $\pm 15.430 \text{ km}^2$. Salah satu komoditas pertanian di Kecamatan Wirosari adalah kedelai yang menyumbang sebesar 75% dari total panen di Kabupaten Grobogan. Pada tahun 2022, luas lahan panen kedelai di Kecamatan Wirosari mencapai $\pm 12,97 \text{ km}^2$ (BPS Grobogan, 2023). Dari potensi yang ada, menjadikan masyarakat mendirikan beberapa industri tempe skala rumahan di Kecamatan Wirosari, salah satunya Desa Kropak yang merupakan sentra industri tempe di wilayah ini.

Sebagian besar produsen tempe merupakan industri skala kecil dan rumah tangga. Metode yang digunakan dalam proses produksi tempe umumnya masih menggunakan cara-cara tradisional (PUSIDO Badan Standardisasi Nasional, 2012). Salah satunya dalam proses perebusan kedelai, sebagian besar produsen tempe menggunakan kayu sebagai bahan bakar karena lebih menghemat biaya produksi dibandingkan dengan gas tabung. Pembakaran kayu dalam jumlah yang besar dan tidak diikuti dengan upaya pengendalian pencemaran udara menimbulkan potensi turunnya kualitas udara di sekitar wilayah ini.

Salah satu pekerja menyatakan bahwa asap dan abu yang berterbangan saat pembakaran kayu mengganggu aktivitas kerja karena menimbulkan ketidaknyamanan saat terhirup. Pengukuran konsentrasi CO dan PM_{2.5} dari proses pemasakan dengan bahan bakar kayu menunjukkan bahwa kadar CO dapat mencapai 7,6 ppm dan PM_{2.5} sebesar 520 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Bartington et al., 2017). Nilai tersebut telah melebihi standar kualitas udara yang ditetapkan oleh *World Health Organization* (WHO). Selain itu, banyak industri yang berlokasi dekat dengan permukiman penduduk. Hal tersebut meningkatkan potensi bahaya bagi kesehatan pekerja dan masyarakat sekitar, terutama kelompok rentan seperti balita, lansia, dan ibu hamil.

Pengendalian pencemaran udara adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan polutan yang terlepas ke atmosfer sehingga tidak melebihi baku

mutu emisi yang ditetapkan (Mulya dkk., 2023). Strategi dan rencana pengendalian pencemaran udara dirancang dalam peraturan untuk memastikan bahwa program yang diterapkan menggunakan informasi yang akurat dan relevan. Pendekatan yang dilakukan dapat berupa tindakan pemulihan dan penanggulangan mutu udara ambien serta peningkatan dan pertahanan mutu udara ambien. Strategi tersebut dibuat untuk mengatasi dan memulihkan kondisi udara yang sudah tercemar, serta bertujuan untuk memastikan agar kualitas udara tetap dalam keadaan baik (Neltje & Cherya, 2023).

Mengingat potensi bahaya bagi kesehatan manusia dan dampak lingkungan yang ditimbulkan, maka industri tempe yang ada perlu melakukan pengendalian pencemaran udara untuk meminimalkan dampaknya. Melalui perencanaan ini, diharapkan dapat mengatasi potensi pencemaran udara yang timbul dari industri tempe dan meningkatkan kesadaran industri dalam melakukan pengelolaan lingkungan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, didapatkan identifikasi masalah yang digunakan sebagai bahan acuan dalam perencanaan ini yaitu :

1. Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan merupakan desa yang memiliki sentra industri tempe yang proses produksinya masih menggunakan cara tradisional dan menghasilkan emisi udara.
2. Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan belum memiliki alat pengendali pencemaran udara untuk meminimalisir emisi hasil pembakaran.
3. Emisi dari proses produksi tempe diduga menyebabkan menurunnya kualitas udara ambien di sekitar Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam perencanaan ini yaitu :

1. Apa saja emisi dan berapa konsentrasi yang dihasilkan dari proses produksi di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan?
2. Bagaimana perancangan alat pengendali pencemaran udara yang sesuai dengan kondisi eksisting untuk meminimalisir emisi dari proses produksi di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan?
3. Bagaimana persebaran emisi dan prediksi kualitas udara ambien di sekitar Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan?
4. Bagaimana Rencana Anggaran Biaya (RAB) dari perancangan alat pengendalian pencemaran udara?

1.4 Rumusan Tujuan

Tujuan dari perencanaan yang dilakukan adalah

1. Menganalisis jenis dan konsentrasi emisi yang dihasilkan dari proses produksi tempe di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan.
2. Menganalisis persebaran emisi dan prediksi kualitas udara ambien di sekitar sentra industri tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan.
3. Merancang alat pengendali pencemaran udara yang sesuai dengan kondisi eksisting untuk meminimalisir emisi yang dihasilkan dari proses produksi tempe di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan.
4. Menghitung Rencana Anggaran Biaya (RAB) perancangan alat pengendalian pencemaran udara secara keseluruhan.

1.5 Pembatasan Masalah

Terdapat cakupan luas yang perlu dipertimbangkan dan diperhatikan dalam perencanaan ini. Oleh karena itu, batasan masalah yang digunakan dalam perencanaan adalah sebagai berikut :

1. Kajian mengenai kondisi eksisting di wilayah perencanaan yaitu di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan, Provinsi Jawa Tengah.
2. Data yang digunakan merupakan data primer dan sekunder yang didapatkan dari hasil survei, wawancara, dan pengambilan sampel bahan bakar dari Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan, Provinsi Jawa Tengah.
3. Perhitungan stoikiometri menggunakan kondisi pembakaran sempurna sehingga parameter yang dianalisis adalah nitrogen (N_2), oksigen (O_2), uap air (H_2O), sulfur dioksida (SO_2), dan karbon dioksida (CO_2).
4. Perencanaan yang dilakukan hanya memperhitungkan kualitas udara hasil produksi, kapasitas produksi, serta kemampuan ekonomi para produsen tempe.
5. Pemodelan, perhitungan, dan perancangan alat berdasarkan pada pengambilan sampel bahan bakar pada salah satu sentra industri tempe di Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, Kabupaten Grobogan, pada parameter yang melebihi baku mutu.

1.6 Rumusan Manfaat

Perumusan manfaat dari perencanaan ini adalah sebagai berikut :

1. Bagi Penulis
 - Memperoleh pengetahuan dan wawasan yang lebih luas terkait perencanaan pengendalian pencemaran udara khususnya pada kegiatan industri tempe
 - Mampu mengaplikasikan secara langsung ilmu yang telah diperoleh di dunia perkuliahan

2. Bagi IPTEK

- Perencanaan ini dapat memberikan referensi dalam pengendalian pencemaran udara
- Perencanaan ini dapat memberikan informasi pengaruh pencemaran udara khususnya pada kegiatan industri tempe terhadap lingkungan

3. Bagi Sentra Industri Tempe di Desa Kropak

- Memberikan usulan desain alat pengendalian pencemaran udara yang dapat diaplikasikan pada sentra industri tempe yang dijalankan

4. Bagi Masyarakat

- Memberikan informasi kepada masyarakat mengenai kualitas udara yang ada di sekitar Sentra Industri Tempe Desa Kropak
- Dapat meningkatkan kualitas udara di wilayah sekitar Sentra Industri Tempe Desa Kropak

5. Bagi Pemerintah

- Perancangan alat pengendali pencemaran ini dapat dijadikan sebagai upaya mitigasi dan dasar atau acuan dalam menyusun strategi teknis pengelolaan kualitas udara khususnya di Sentra Industri Tempe Desa Kropak, Kecamatan Wirosari, sehingga dapat mengurangi atau mencegah permasalahan pencemaran udara serta dapat meningkatkan kualitas lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andreae, M. O. (1991). Biomass Burning: Its History, Use, and Distribution and Its Impact on Environmental Quality and Global Climate. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. <https://doi.org/https://doi.org/10.7551/mitpress/3286.003.0003>
- Arna, Y. D., Mokodongan, R. S., & Rina, W. (2025). *Pencemaran Udara*. Media Pustaka Indo.
- ASHRAE. (2001). *ASHRAE Fundamentals Handbook 2001*.
- Bartington, S. E., Bakolis, I., Devakumar, D., Kurmi, O. P., Gulliver, J., Chaube, G., Manandhar, D. S., Saville, N. M., Costello, A., Osrin, D., Hansell, A. L., & Ayres, J. G. (2017). Patterns of domestic exposure to carbon monoxide and particulate matter in households using biomass fuel in Janakpur, Nepal. *Environmental Pollution*, 220, 38–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.074>
- Bianchini, A., Pellegrini, M., Rossi, J., & Saccani, C. (2018). Theoretical model and preliminary design of an innovative wet scrubber for the separation of fine particulate matter produced by biomass combustion in small size boilers. *Biomass and Bioenergy*, 116, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.05.011>
- Bologa, A., & Rheinheimer, H. P. (2023). Influence of Electrode System Geometry on Efficiency of Particle Collection of a Compact Electrostatic Precipitator for Small Scale Biomass Combustion. *Lecture Notes in Electrical Engineering, 1052 LNEE*, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34526-5_1
- BPS Grobogan. (2023). *Kecamatan Wirosari Dalam Angka 2023*.
- Bruns, E. A., Krapf, M., Orasche, J., Huang, Y., Zimmermann, R., Drinovec, L., Močnik, G., El-Haddad, I., Slowik, J. G., Dommen, J., Baltensperger, U., & Prévôt, A. S. H. (2015). Characterization of primary and secondary wood combustion products generated under different burner loads. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(5), 2825–2841. <https://doi.org/10.5194/acp-15-2825-2015>
- Carroll, J., & Finnan, J. (2017). Use of electrostatic precipitators in small-scale biomass furnaces to reduce particulate emissions from a range of feedstocks. *Biosystems Engineering*, 163, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.021>
- Cheremisnoff, N. P. (2002). *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7499-7.X5000-7>

- Chiang, P.-C., & Gao, X. (2022). *Air Pollution Control and Design* (1 ed.). Springer Singapore. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-13-7488-3>
- Cid, N., Patiño, D., Pérez-Orozco, R., & Porteiro, J. (2022). Performance analysis of a small-scale electrostatic precipitator with biomass combustion. *Biomass and Bioenergy*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106500>
- Cimorelli, A., Perry, S., Venkatram, A., Weil, J., Paine, R., Wilson, R., Lee, R., Peters, W., & Brode, R. (2005). AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. *Journal of Applied Meteorology - J APPL METEOROL*, 44. <https://doi.org/10.1175/JAM2227.1>
- Cincinelli, A., Guerranti, C., Martellini, T., & Scodellini, R. (2019). Residential wood combustion and its impact on urban air quality in Europe. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 8, 10–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.007>
- Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2011). *Air Pollution Control: A Design Approach* (Fourth Edition). Wavelan Press, Inc.
- Damayanti, R., Santoso, P., & Subhiyah, H. (2019). Analisis Perhitungan Ketinggian Cerobong pada Aet 10 Mev dengan Kondisi tanpa Sistem Ventilasi. *Prima: Aplikasi dan Rekayasa dalam Bidang Iptek Nuklir*, 16(1), 11–16.
- Darbandi, T., Risberg, M., & Westerlund, L. (2024). Enhancing particle segregation in stem wood combustion flue gas wet scrubbers: Experimental investigation of operational conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105427>
- Decy Arwini, N. P. (2020). Dampak Pencemaran Udara Terhadap Kualitas Udara Di Provinsi Bali. *Jurnal Ilmiah Vastuwidya*, 2(2), 20–30. <https://doi.org/10.47532/jiv.v2i2.86>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. Dalam *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 30, Nomor 2, hlm. 219–230). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
- Dinas Lingkungan Hidup. (2020). *Laporan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara DKI Jakarta Tahun 2020*. 1–72.
- EPA. (2008). *Particulate Matter*. The IUPAC Compendium of Chemical Terminology. <https://doi.org/10.1351/goldbook.p04434>
- Fadilah, R. N., Armadhan, W. S., & Zain..., I. (2022). *Penerapan Produksi Bersih*. XIV(1), 16–26.

- Febriani, A. V., Hanum, F. F., Rahayu, A., Kimia, M. T., Industri, T., Dahlan, A., & Selatan, J. R. (2024). Review: Analisis Potensi dan Tantangan Biomassa Sebagai Bahan Bakar pada PLTU dan PLTBm. *Seminar Nasional Sanis dan Teknologi FT UMJ 2024, April 2024*, 1–11.
- Febrina Laila, Dedy Wahyudi, R. D. H. (2021). Kajian Emisi CO₂ Berdasarkan Jejak Karbon Sekunder di Lingkungan Universitas Sahid Jakarta Study of CO₂ Emissions Based on the Secondary Carbon Footwear in the Environment of Sahid University Jakarta. *Jurnal SEOI*, 3(1), 2021.
- Hasbi Ramadani, A., Ajib Ridlwan, A., & Yunus, Y. (2022). Mesin Pengupas Kulit Ari Kedelai Otomatis untuk Meningkatkan Produktivitas Industri Kecil Tempe di Tulungagung. *Abimanyu: Journal of Community Engagement*, 3(1), 29–39. <https://doi.org/10.26740/abi.v3n1.p29-39>
- Haywood, J., & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 38(4), 513–543. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1999RG000078>
- Himmelblau, D. M., & Riggs, J. B. (2018). *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering* (8 ed.). Pearson.
- Hussein, A. (2022). Essentials of Flow Assurance Solids in Oil and Gas Operations. Dalam A. Hussein (Ed.), *Essentials of Flow Assurance Solids in Oil and Gas Operations*. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2021-0-00361-8>
- Ismahani, R., Anurogo, D. W., & Kunci, K. (2022). Indonesian Journal of Conservation Pemodelan AERMOD Untuk Proyeksi Pola Penyebaran Emisi Heat Recovery Steam Generator PT X dan PT Y. *Indonesian Journal of Conservation*, 11(2), 51–63. <https://doi.org/10.15294/ijc.v11i2.37953>
- Jiang, K., Fu, B., Luo, Z., Xiong, R., Men, Y., Shen, H., Li, B., Shen, G., & Tao, S. (2022). Attributed radiative forcing of air pollutants from biomass and fossil burning emissions. *Environmental Pollution*, 306, 119378. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119378>
- Jiang, K., Xing, R., Luo, Z., Huang, W., Yi, F., Men, Y., Zhao, N., Chang, Z., Zhao, J., Pan, B., & Shen, G. (2024). Pollutant emissions from biomass burning: A review on emission characteristics, environmental impacts, and research perspectives. *Particuology*, 85, 296–309. <https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2023.07.012>
- John A. Danielson. (1967). *Air pollution engineering manual* (2 ed.). U.S. Department of Health, Education, and Welfare (DHEW) / Public Health Service (PHS).

- Kažimírová, V., & Čerešňa, V. (2015). Verification of Conditions for use of Combustion Products' Heat. *Acta Technologica Agriculturae*, 18(2), 49–53. <https://doi.org/10.1515/ata-2015-0011>
- Kementerian Pertanian. (2024). *Buletin Konsumsi Pangan 2024* (Vol. 15).
- Kovacs, H., Szemmelveisz, K., & Koós, T. (2016). Theoretical and experimental metals flow calculations during biomass combustion. *Fuel*, 185, 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.007>
- Kulsum, K., Sutanto, Y., Febianti, E., Trenggonowati, D. L., Wigati, R., Gunawan, A., & Kurniawan, B. (2022). Strategi peningkatan produktivitas dengan pendekatan green productivity pada agroindustri kedelai. *Journal Industrial Servicess*, 8(1), 71. <https://doi.org/10.36055/jiss.v8i1.14445>
- Levine, J. S. (2003). 4.05 - Biomass Burning: The Cycling of Gases and Particulates from the Biosphere to the Atmosphere. Dalam H. D. Holland & K. K. Turekian (Ed.), *Treatise on Geochemistry* (hlm. 143–158). Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/04143-8>
- Li, Q., Jiang, J., Cai, S., Zhou, W., Wang, S., Duan, L., & Hao, J. (2016). Gaseous Ammonia Emissions from Coal and Biomass Combustion in Household Stoves with Different Combustion Efficiencies. *Environmental Science & Technology Letters*, 3(3), 98–103. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00013>
- Maherdyta, N. R., Syafitri, A., Septywantoro, F., Kejora, P. A., Gulo, S. D., & Sulistiyorini, D. (2022). Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Gas Nitrogen Dioksida (NO₂) dan Sulfur Dioksida (SO₂) pada Masyarakat di Wilayah Yogyakarta. *Jurnal Sanitasi Lingkungan*, 2(1), 51–59. <https://doi.org/10.36086/jsl.v2i1.1040>
- Mardhiyah, A., & Feby Aulia Safrin. (2020). Strategi Pemasaran Industri Rumah Tangga Keripik Singkong. *Sketsa Bisnis*, 7(1), 37–44. <https://doi.org/10.35891/jsb.v7i1.2183>
- Mehrpooya, M., Khalili, M., & Sharifzadeh, M. M. M. (2018). Model development and energy and exergy analysis of the biomass gasification process (Based on the various biomass sources). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 869–887. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.076>
- Molchanov, O., Krpec, K., Horák, J., Kuboňová, L., Hopan, F., & Ryšavý, J. (2024). Application and Evaluation of Electrostatic Precipitation for Control PM and NO_x Emissions from Small-Scale Combustions. *Fire*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/fire7100356>
- Mu, E., & Pereyra-Rojas, M. (2018). Understanding the Analytic Hierarchy Process. Dalam E. Mu & M. Pereyra-Rojas (Ed.), *Practical Decision Making using Super*

- Decisions v3: An Introduction to the Analytic Hierarchy Process* (hlm. 7–22). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68369-0_2
- Mulya, W., Pratama, I., Evert, J., & Liku, A. (2023). Sosialisasi Seminar Teknologi Pengendalian Pencemaran Udara. *EUNOIA*, 2.
- Neltje, J., & Cherya, S. (2023). Kebijakan Pemerintah dalam Pengendalian Polusi Udara. *Jurnal Kewarganegaraan*, 7(2), 1642–1648.
- Nirmala, D. S., & Prasasti, C. I. (2015). Konsentrasi PM2.5 dan Analisis Karakteristik Pekerja Terhadap Keluhan Kesehatan Pekerja Pengasapan Ikan di Kelurahan Tambak Wedi Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 8(1), 57.
- Paraschiv, L. S., Serban, A., & Paraschiv, S. (2020). Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition. *Energy Reports*, 6, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.016>
- Paraschiv, S., Coman, G., & Paraschiv, L. S. (2019). Simulation of plume dispersion emitted from industrial sources based on Gaussian model. *AIP Conference Proceedings*, 2123(1), 020059. <https://doi.org/10.1063/1.5116986>
- Pimentel, D. (2003). Biomass Utilization, Limits of. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 159–171. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00060-0>
- PP Nomor 22 Tahun 2021. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Sekretariat Negara Republik Indonesia*, 1(078487A), 1–483.
- Prieler, R., Mayr, B., Demuth, M., Spoljaric, D., & Hochenauer, C. (2015). Application of the steady flamelet model on a lab-scale and an industrial furnace for different oxygen concentrations. *Energy*, 91, 451–464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.070>
- Prihatin, R. B. (2020). Pengelolaan Sampah di Kota Bertipe Sedang: Studi Kasus di Kota Cirebon dan Kota Surakarta. *Aspirasi: Jurnal Masalah-masalah Sosial*, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.46807/aspirasi.v11i1.1505>
- Pujianto, T., Bunyamin, A., & Wafiyyah, S. (2022). Pengukuran Kinerja Green Manufacturing pada Industri Tahu Sumedang untuk Meningkatkan Kinerja terhadap Lingkungan Menggunakan GSCOR dan LCA. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 16(2), 221–233. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v16i2.10831>
- PUSIDO Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Tempe: Persembahan Indonesia untuk Dunia*. www.bsn.go.id

- Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., & Bula-Silvera, A. (2024). Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. Dalam *Results in Chemistry* (Vol. 12). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886>
- Rosa, A. A., Simon, B. A., & Lieanto, K. S. (2020). Sistem Pendeteksi Pencemaran Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135. *Ultima Computing : Jurnal Sistem Komputer*, 12(1), 23–28. <https://doi.org/10.31937/sk.v12i1.1611>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (Second Edition). Springer New York. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Saidal Siburian, M. M., & Mar, M. (2020). Pencemaran Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca. Kreasi Cendekia Pustaka. Dalam *Buku*.
- Slade, R., Bauen, A., & Gross, R. (2014). Global bioenergy resources. *Nature Climate Change*, 4(2), 99–105. <https://doi.org/10.1038/nclimate2097>
- Smółka-Danielowska, D., & Jabłońska, M. (2022). Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 5359–5372. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03506-9>
- Stofkova, J., Krejnos, M., Stofkova, K. R., Malega, P., & Binasova, V. (2022). Use of the Analytic Hierarchy Process and Selected Methods in the Managerial Decision-Making Process in the Context of Sustainable Development. *Sustainability (Switzerland)*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/su141811546>
- Suhadi, D. R., & Febrina, A. S. (2013). Pedoman Teknis Penyusunan Inventarisasi Emisi Pencemar Udara di Perkotaan. *Pedoman Teknis penyusunan inventarisasi emisi pencemar udara di perkotaan*, 1–153.
- Sun, J., Wang, J., Shen, Z., Huang, Y., Zhang, Y., Niu, X., Cao, J., Zhang, Q., Xu, H., Zhang, N., & Li, X. (2019). Volatile organic compounds from residential solid fuel burning in Guanzhong Plain, China: Source-related profiles and risks. *Chemosphere*, 221, 184–192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.002>
- Supartono, W., Fiwa, A., Sinthia, I., Saptari, K., Farhan, M., & Rizky, M. (2020). Implementation of Life Cycle Assessment on Tempeh Production at “Tempe Ibu Sujati”, Yogyakarta. Dalam *Agroindustrial Journal* (Vol. 7, Nomor 2). <https://doi.org/https://doi.org/10.22146/aij.v7i2.64650>
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). Heating values of wood pellets from different species. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2634–2639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043>

- Telmo, C., Lousada, J., & Moreira, N. (2010). Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood. *Bioresource Technology*, 101(11), 3808 – 3815. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.021>
- Tomlin, A. S. (2021). Air Quality and Climate Impacts of Biomass Use as an Energy Source: A Review. *Energy & Fuels*, 35(18), 14213–14240. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01523>
- Turner, B. D. (1994). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling* (Second Edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780138733704>
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 20 Tahun. (2008). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2008. 1.*
- USEPA. (2013). *Health Effects of Particulate Matter.*
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Dalam *Fuel* (Vol. 89, Nomor 5, hlm. 913–933). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- WBA. (2021). *WBA global bioenergy statistics 2021*. World Bioenergy Association.
- Widodo, S., Amin, M. M., Sutrisman, A., & Putra, A. A. (2017). Rancang Bangun Alat Monitoring Kadar Udara Bersih Dan Gas Berbahaya Co, Co₂, Dan Ch₄ Di Dalam Ruangan Berbasis Mikrokontroler. *Pseudocode*, 4(2), 105–119. <https://doi.org/10.33369/pseudocode.4.2.105-119>
- Yang, J., Ji, Z., Kang, S., & Tripathi, L. (2021). Contribution of South Asian biomass burning to black carbon over the Tibetan Plateau and its climatic impact. *Environmental Pollution*, 270, 116195. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.116195>
- Yasir, M. (2021). Pencemaran Udara Di Perkotaan Berdampak Bahaya Bagi Manusia, Hewan, Tumbuhan dan Bangunan. *jurnal OSF.Oi*, 1–10.
- Zhang, L., Luo, Z., Li, Y., Chen, Y., Du, W., Li, G., Cheng, H., Shen, G., & Tao, S. (2021). Optically Measured Black and Particulate Brown Carbon Emission Factors from Real-World Residential Combustion Predominantly Affected by Fuel Differences. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 169–178. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04784>
- Zhang, Y., Liu, X., Wang, J., Chen, H., & Li, R. (2021). Evaluation of removal efficiency in air pollution control devices: Standards and methodologies. *Environmental Science and Technology*, 55(8), 4105–4116.

Zou, B., Benjamin Zhan, F., Gaines Wilson, J., & Zeng, Y. (2010). Performance of AERMOD at different time scales. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(5), 612–623. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.01.005>