



Teknik Menghindari Kerusakan Zat Aktif Akibat Paparan Suhu dan Kelembapan

Helen Fitri Novianti¹, Dini Auliya Azmi², Elisabeth Weya³, Siti Jamilah⁴,
Muhammad Reza Pahlevi⁵, Garnadi Jafar⁶, Novaliana Devianti Sagita⁷
^{1,2,3,4,5,6,7} Universitas Bhakti Kencana, Jawa Barat, Indonesia.

Jl. Soekarno-Hatta No.754, Cipadung Kidul, Kec. Panyileukan,
Kota Bandung, Jawa Barat 40614

Korespondensi penulis: muhamad.rezapahlevi@bku.ac.id

Abstract. *Deterioration of active ingredients due to exposure to temperature and humidity is a challenge in the development and storage of products containing active ingredients in the pharmaceutical industry. Exposure to high temperatures can accelerate the thermal degradation of active ingredients through mechanisms such as oxidation, decomposition, or Maillard reactions, resulting in decreased efficacy of active ingredients and the generation of undesirable degradation products. Meanwhile, high humidity also plays a role in accelerating the hydrolysis reaction of water-sensitive active ingredients, such as esters or amides, which reduces the chemical stability of the active ingredients. The combination of high temperature and high humidity often results in more complex degradation reactions compared to isolated temperature or humidity conditions, which can accelerate the decline in efficacy of active ingredients. Therefore, this article aims to explore various methods to view the stability of active ingredients under certain conditions, as well as provide recommendations for the development of more efficient formulations and storage strategies to maintain the stability and efficacy of active ingredients throughout the product's shelf life.*

Keywords: *Thermal Degradation, Hydrolysis, Damage To Active Substances, Humidity And High Temperatures*

Abstrak. Kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan merupakan tantangan dalam pengembangan dan penyimpanan produk yang mengandung bahan aktif di industri farmasi. Paparan suhu tinggi dapat mempercepat degradasi termal zat aktif melalui mekanisme seperti oksidasi, dekomposisi, atau reaksi Maillard, yang mengakibatkan penurunan efektivitas bahan aktif dan menghasilkan produk degradasi yang tidak diinginkan. Sementara itu, kelembapan yang tinggi juga berperan dalam mempercepat reaksi hidrolisis pada bahan aktif yang sensitif terhadap air, seperti ester atau amida, yang mengurangi stabilitas kimia bahan aktif tersebut. Kombinasi suhu tinggi dan kelembapan yang tinggi sering kali menghasilkan reaksi degradasi yang lebih kompleks dibandingkan dengan kondisi suhu atau kelembapan yang terisolasi, yang dapat mempercepat penurunan efektivitas zat aktif. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai metode dalam melihat stabilitas zat aktif dalam kondisi tertentu, serta memberikan rekomendasi untuk pengembangan formulasi dan strategi penyimpanan yang lebih efisien guna menjaga stabilitas dan efektivitas bahan aktif selama masa simpan produk.

Kata Kunci: Degradasi Termal, Hidrolisis, Kerusakan Zat Aktif, Kelembapan, Dan Suhu Tinggi

1. LATAR BELAKANG

Kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan merupakan salah satu tantangan utama dalam pengembangan dan penyimpanan produk yang berbasis bahan aktif dalam bidang farmasi. Paparan suhu tinggi dapat memicu reaksi degradasi termal yang menghasilkan senyawa baru yang tidak diinginkan, sehingga menurunkan efektivitas zat aktif. Sebagai contoh, mekanisme degradasi termal sering kali melibatkan proses oksidasi, dekomposisi struktur molekul, atau reaksi Maillard pada bahan yang sensitif terhadap panas. Penelitian menunjukkan bahwa degradasi ini dipercepat pada

suhu di atas ambang stabilitas bahan, yang bergantung pada sifat kimia dari zat aktif itu sendiri. (Arifudin et al., 2023)

Selain suhu, kelembapan relatif di lingkungan juga memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas bahan aktif. Kelembapan yang tinggi dapat menyebabkan reaksi hidrolisis pada bahan aktif yang higroskopis atau yang memiliki gugus kimia tertentu seperti ester atau amida. Akibatnya, zat aktif dapat kehilangan stabilitas struktural, mengurangi daya kerjanya, dan berpotensi menghasilkan senyawa toksik sebagai produk degradasi. Sebagai contoh, dalam produk farmasi, banyak bahan aktif yang diketahui mengalami perubahan sifat fisik seperti kekentalan, warna, atau bentuk kristal akibat penyerapan air dari lingkungan. (Ganefati et al., 2023) Kondisi ini tidak hanya mengurangi efektivitas produk tetapi juga dapat membahayakan keamanan pengguna.

Dalam berbagai penelitian, suhu dan kelembapan sering kali dikaji secara bersamaan untuk menilai potensi degradasi bahan aktif dalam simulasi lingkungan yang menyerupai kondisi nyata. Hasil studi menunjukkan bahwa interaksi antara suhu tinggi dan kelembapan tinggi mempercepat reaksi degradasi dengan mekanisme yang lebih kompleks dibandingkan ketika faktor-faktor ini bekerja secara terpisah. Sebagai contoh, kombinasi suhu dan kelembapan dapat menyebabkan bahan aktif lebih rentan terhadap oksidasi dan hidrolisis bersamaan, yang menghasilkan berbagai produk degradasi dengan laju reaksi yang lebih tinggi (Widiana et al., 2023).

Upaya untuk meminimalkan kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan melibatkan berbagai strategi, seperti pengemasan yang kedap udara, penambahan bahan penstabil, serta optimasi formula produk. Dalam konteks industri, pemilihan material kemasan yang tahan terhadap permeasi kelembapan dan panas sangat penting untuk menjaga kualitas produk. Selain itu, penggunaan teknologi seperti penambahan zat aditif antioksidan atau penyerap kelembapan dapat memperpanjang umur simpan zat aktif. (Anwar et al., 2023)

Studi-studi sebelumnya menyoroti perlunya pemahaman mendalam mengenai kinetika degradasi zat aktif pada berbagai kondisi suhu dan kelembapan. Hal ini bertujuan untuk memprediksi umur simpan produk secara lebih akurat dan memastikan bahwa bahan aktif tetap efektif selama penyimpanan hingga penggunaan. Penelitian ini juga memberikan rekomendasi tentang parameter penyimpanan optimal untuk setiap jenis bahan aktif, yang pada akhirnya dapat mendukung peningkatan kualitas dan keamanan produk di berbagai sektor. (Susilowati et al., 2023)

Kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan merupakan salah satu tantangan utama dalam pengembangan dan penyimpanan produk yang berbasis bahan

aktif, baik dalam bidang farmasi, makanan, maupun bahan kimia lainnya. Paparan suhu tinggi dapat memicu reaksi degradasi termal yang menghasilkan senyawa baru yang tidak diinginkan, sehingga menurunkan efektivitas zat aktif. Sebagai contoh, mekanisme degradasi termal sering kali melibatkan proses oksidasi, dekomposisi struktur molekul, atau reaksi Maillard pada bahan yang sensitif terhadap panas. Penelitian menunjukkan bahwa degradasi ini dipercepat pada suhu di atas ambang stabilitas bahan, yang bergantung pada sifat kimia dari zat aktif itu sendiri. (Arifudin et al., 2023)

Selain suhu, kelembapan relatif di lingkungan juga memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas bahan aktif. Kelembapan yang tinggi dapat menyebabkan reaksi hidrolisis pada bahan aktif yang higroskopis atau yang memiliki gugus kimia tertentu seperti ester atau amida. Akibatnya, zat aktif dapat kehilangan stabilitas struktural, mengurangi daya kerjanya, dan berpotensi menghasilkan senyawa toksik sebagai produk degradasi. Sebagai contoh, dalam produk farmasi, banyak bahan aktif yang diketahui mengalami perubahan sifat fisik seperti kekentalan, warna, atau bentuk kristal akibat penyerapan air dari lingkungan. (Ganefati et al., 2023) Kondisi ini tidak hanya mengurangi efektivitas produk tetapi juga dapat membahayakan keamanan pengguna.

Dalam berbagai penelitian, suhu dan kelembapan sering kali dikaji secara bersamaan untuk menilai potensi degradasi bahan aktif dalam simulasi lingkungan yang menyerupai kondisi nyata. Hasil studi menunjukkan bahwa interaksi antara suhu tinggi dan kelembapan tinggi mempercepat reaksi degradasi dengan mekanisme yang lebih kompleks dibandingkan ketika faktor-faktor ini bekerja secara terpisah. Sebagai contoh, kombinasi suhu dan kelembapan dapat menyebabkan bahan aktif lebih rentan terhadap oksidasi dan hidrolisis bersamaan, yang menghasilkan berbagai produk degradasi dengan laju reaksi yang lebih tinggi (Widiana et al., 2023).

Upaya untuk meminimalkan kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan melibatkan berbagai strategi, seperti pengemasan yang kedap udara, penambahan penstabil, serta optimasi formula produk. Dalam konteks industri, pemilihan material kemasan yang tahan terhadap permeasi kelembapan dan panas penting untuk menjaga kualitas produk. Selain itu, penggunaan teknologi seperti penambahan zat aditif antioksidan atau penyerap kelembapan dapat memperpanjang umur simpan zat aktif. (Anwar et al., 2023)

Studi-studi sebelumnya menyoroti perlunya pemahaman mendalam mengenai kinetika degradasi zat aktif pada berbagai kondisi suhu dan kelembapan. Hal ini bertujuan untuk memprediksi umur simpan produk secara lebih akurat dan memastikan bahwa bahan aktif tetap efektif selama penyimpanan hingga penggunaan. Penelitian ini juga

memberikan rekomendasi tentang parameter penyimpanan optimal untuk setiap jenis bahan aktif, yang pada akhirnya dapat mendukung peningkatan kualitas dan keamanan produk di berbagai sektor. (Susilowati et al., 2023).

2. KAJIAN TEORITIS

Kajian teoritis dalam penelitian ini membahas mekanisme kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan dalam produk farmasi. Paparan suhu tinggi dapat mempercepat degradasi termal melalui oksidasi, dekomposisi, atau reaksi Maillard, yang mengakibatkan penurunan efektivitas bahan aktif dan menghasilkan produk degradasi yang tidak diinginkan (Arifudin et al., 2023). Selain itu, kelembapan tinggi dapat mempercepat reaksi hidrolisis pada bahan aktif yang sensitif terhadap air, seperti ester atau amida, yang berpotensi mengurangi stabilitas kimia bahan aktif tersebut (Ganefati et al., 2023). Kombinasi antara suhu dan kelembapan tinggi menghasilkan reaksi degradasi yang lebih kompleks, mempercepat penurunan efektivitas zat aktif, serta meningkatkan risiko terbentuknya senyawa toksik (Widiana et al., 2023). Oleh karena itu, berbagai strategi pengemasan dan formulasi, seperti penggunaan bahan penstabil dan kemasan kedap udara, diperlukan untuk menjaga stabilitas zat aktif selama penyimpanan (Anwar et al., 2023). Selain itu, pemahaman terhadap kinetika degradasi zat aktif di berbagai kondisi lingkungan sangat penting untuk memprediksi umur simpan produk dan memastikan efektivitas bahan aktif dalam jangka waktu yang lebih lama (Susilowati et al., 2023).

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan review sistematis terhadap literatur yang membahas stabilitas zat aktif di bawah pengaruh suhu dan kelembapan. Pencarian dilakukan melalui database terpercaya seperti PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar dengan kata kunci seperti 'degradasi bahan aktif', 'pengaruh suhu tinggi', dan 'stabilitas kelembapan'.

Artikel yang diseleksi adalah yang membahas efek suhu dan kelembapan terhadap stabilitas kimia dan fisik zat aktif, mencakup mekanisme degradasi, kinetika reaksi, serta kondisi lingkungan yang mempercepat kerusakan.

Setiap artikel yang relevan dianalisis secara mendalam untuk mengidentifikasi variabel utama seperti rentang suhu, tingkat kelembapan relatif, waktu paparan, dan hasil kerusakan bahan aktif, baik secara kuantitatif maupun kualitatif.

Hasil dari setiap studi dibandingkan untuk mengidentifikasi pola degradasi, faktor-faktor penyebab utama, dan rekomendasi penanganan atau penyimpanan untuk meminimalkan kerusakan zat aktif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang mengkaji kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan menunjukkan bahwa kondisi lingkungan ini memiliki dampak signifikan terhadap stabilitas dan efektivitas bahan aktif. Berdasarkan data yang diperoleh, suhu tinggi mempercepat proses degradasi termal pada berbagai bahan aktif kimia. Sebagai contoh, zat aktif farmasi yang terpapar pada suhu di atas 40°C mengalami penurunan efektivitas yang signifikan, dengan laju degradasi yang meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Hasil ini sejalan dengan temuan dari beberapa studi yang menunjukkan bahwa reaksi oksidasi dan dekomposisi molekuler sering kali dipercepat pada suhu tinggi, menyebabkan perubahan struktur dan penurunan potensi terapeutik bahan aktif. Disisi lain, kelembapan juga memainkan peran penting dalam kerusakan zat aktif, terutama pada bahan yang bersifat higroskopis. Data dari penelitian menunjukkan bahwa zat aktif yang sensitif terhadap air, seperti senyawa ester, mengalami hidrolisis ketika terpapar kelembapan lebih dari 60% RH, yang mengakibatkan penurunan kualitas dan kemurnian produk akhir.

Kombinasi antara suhu tinggi dan kelembapan yang tinggi menghasilkan degradasi yang lebih kompleks dibandingkan jika masing-masing faktor bekerja terpisah. Misalnya, dalam kondisi suhu 50°C dan dengan kelembapan 70%, bahan aktif yang semula stabil pada suhu dan kelembapan rendah, mengalami penurunan substansial dalam aktivitas biologisnya, yang dapat mengurangi efektivitas terapi atau aplikasi produk. Penurunan ini terjadi karena peningkatan laju reaksi kimia yang melibatkan oksidasi dan hidrolisis yang simultan. Selain itu, data menunjukkan bahwa pada kondisi kelembapan tinggi, terutama di atas 80% RH, bahan aktif yang terpapar lebih dari 24 jam menunjukkan perubahan fisik yang mencolok, seperti perubahan warna atau tekstur, yang menandakan kerusakan kimia dan fisik.

Upaya untuk mengatasi kerusakan akibat suhu dan kelembapan ini sering melibatkan penggunaan bahan penstabil atau teknik pengemasan yang dapat mengontrol kedua faktor tersebut. Dalam penelitian ini, penggunaan pengemasan kedap udara dan bahan penstabil seperti antioksidan terbukti memperlambat laju degradasi zat aktif. Data menunjukkan bahwa pengemasan dengan material yang memiliki rendahnya permeabilitas terhadap kelembapan dapat mempertahankan stabilitas zat aktif dalam

jangka waktu yang lebih lama, bahkan dalam kondisi kelembapan yang tinggi. Di samping itu, penggunaan bahan kimia penstabil seperti ascorbic acid atau vitamin E dalam formulasi juga dapat mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh oksidasi pada suhu tinggi, memperpanjang umur simpan produk, dan mempertahankan efikasi bahan aktif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pengelolaan suhu dan kelembapan dalam menjaga stabilitas zat aktif pada produk yang memerlukan penyimpanan jangka panjang. Dengan pengemasan yang tepat dan penambahan bahan penstabil, kerusakan akibat suhu dan kelembapan dapat diminimalkan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan umur simpan dan efektivitas produk di pasar. Penelitian yang mengkaji kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan menunjukkan kondisi lingkungan ini memiliki dampak signifikan terhadap stabilitas dan efektivitas bahan aktif. Berdasarkan data yang diperoleh, suhu tinggi dapat mempercepat proses degradasi termal pada bahan aktif kimia. Sebagai contoh, zat aktif yang terpapar pada suhu $>40^{\circ}\text{C}$ mengalami penurunan efektivitas yang signifikan, dengan laju degradasi yang meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Hasil ini sejalan dengan temuan beberapa studi yang menunjukkan bahwa reaksi oksidasi dan dekomposisi molekuler sering kali dipercepat pada suhu tinggi, menyebabkan perubahan struktur dan penurunan potensi terapeutik bahan aktif.

Di sisi lain, kelembapan juga memainkan peran penting dalam kerusakan zat aktif, terutama pada bahan yang bersifat higroskopis. Data dari penelitian menunjukkan bahwa zat aktif yang sensitif terhadap air, seperti senyawa ester, mengalami hidrolisis ketika terpapar kelembapan lebih dari 60% RH, yang mengakibatkan penurunan kualitas dan kemurnian produk akhir. Kombinasi antara suhu tinggi dan kelembapan yang tinggi menghasilkan degradasi yang lebih kompleks dibandingkan jika masing-masing faktor bekerja terpisah. Misalnya, dalam kondisi suhu 50°C dan dengan kelembapan 70%, bahan aktif yang semula stabil pada suhu dan kelembapan rendah, mengalami penurunan substansial dalam aktivitas biologisnya, yang dapat mengurangi efektivitas terapi atau aplikasi produk.

Penurunan ini terjadi karena peningkatan laju reaksi kimia yang melibatkan oksidasi dan hidrolisis yang simultan. Selain itu, data menunjukkan bahwa pada kondisi kelembapan tinggi, terutama di atas 80% RH, bahan aktif yang terpapar lebih dari 24 jam menunjukkan perubahan fisik yang mencolok, seperti perubahan warna atau tekstur, yang menandakan kerusakan kimia dan fisik. Upaya untuk mengatasi kerusakan akibat suhu

dan kelembapan ini sering melibatkan penggunaan bahan penstabil atau teknik pengemasan yang dapat mengontrol kedua faktor tersebut.

Dalam penelitian ini, penggunaan pengemasan kedap udara dan bahan penstabil seperti antioksidan terbukti memperlambat laju degradasi zat aktif. Data menunjukkan bahwa pengemasan dengan material yang memiliki rendahnya permeabilitas terhadap kelembapan dapat mempertahankan stabilitas zat aktif dalam jangka waktu yang lebih lama, bahkan dalam kondisi kelembapan yang tinggi. Di samping itu, penggunaan bahan kimia penstabil seperti ascorbic acid atau vitamin E dalam formulasi juga dapat mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh oksidasi pada suhu tinggi, memperpanjang umur simpan produk, dan mempertahankan efikasi bahan aktif.

Selain pengemasan, teknik penyimpanan yang memperhatikan suhu dan kelembapan juga memberikan pengaruh besar terhadap stabilitas bahan aktif. Sebagai contoh, bahan aktif yang disimpan dalam ruang dengan kontrol suhu dan kelembapan dapat mempertahankan efektivitasnya hingga dua kali lebih lama dibandingkan dengan bahan yang disimpan di kondisi lingkungan terbuka. Oleh karena itu, pengaturan kondisi penyimpanan menjadi langkah preventif yang esensial untuk menghindari kerugian yang disebabkan oleh degradasi bahan aktif.

Mekanisme degradasi yang melibatkan oksidasi sering dikaitkan dengan keberadaan oksigen dan radikal bebas yang terbentuk pada suhu tinggi. Dalam beberapa penelitian, ditunjukkan bahwa keberadaan antioksidan dapat menangkap radikal bebas ini, sehingga memperlambat proses degradasi. Selain itu, bahan aktif yang sensitif terhadap kelembapan seperti amida menunjukkan hasil yang lebih baik jika disimpan dengan desikan untuk mengurangi kadar air di sekitar bahan aktif tersebut.

Suhu tinggi tidak hanya memengaruhi stabilitas kimia bahan aktif, tetapi juga dapat menyebabkan perubahan fisik seperti penggumpalan atau pencairan pada bahan tertentu. Misalnya, beberapa senyawa mengalami transisi fase pada suhu tinggi, yang dapat memengaruhi cara kerja bahan aktif dalam produk akhir. Hal ini menjadi perhatian utama dalam formulasi produk, terutama pada sediaan farmasi seperti tablet atau kapsul.

Interaksi antara suhu tinggi dan kelembapan sering kali menghasilkan produk degradasi yang berbeda dibandingkan dengan paparan satu faktor saja. Sebagai contoh, reaksi hidrolisis yang dipercepat oleh kelembapan dapat menghasilkan senyawa intermediet yang kemudian terdegradasi lebih lanjut akibat suhu tinggi. Produk degradasi ini tidak hanya mengurangi kualitas bahan aktif tetapi juga dapat berpotensi toksik.

Penelitian ini juga menyoroti pentingnya studi kinetika degradasi untuk memprediksi umur simpan bahan aktif. Dengan memahami pola degradasi, produsen

dapat menentukan parameter optimal untuk penyimpanan dan pengemasan. Sebagai contoh, studi kinetika pada suhu 30°C dan kelembapan 50% menunjukkan bahwa bahan aktif tertentu memiliki umur simpan hingga 24 bulan, sedangkan pada suhu 40°C dan kelembapan 70%, umur simpan ini menurun menjadi hanya 6 bulan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pengelolaan suhu dan kelembapan dalam menjaga stabilitas zat aktif pada produk yang memerlukan penyimpanan jangka panjang. Dengan pengemasan yang tepat dan penambahan bahan penstabil, kerusakan akibat suhu dan kelembapan dapat diminimalkan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan umur simpan dan efektivitas produk di pasar.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini secara komprehensif mengidentifikasi pengaruh paparan suhu dan kelembapan terhadap degradasi stabilitas zat aktif, serta dampaknya terhadap kualitas dan efikasi produk yang mengandung bahan aktif. Berdasarkan hasil yang diperoleh, suhu tinggi secara signifikan meningkatkan laju reaksi degradasi termal pada zat aktif, terutama melalui mekanisme oksidasi dan dekomposisi molekuler, yang menyebabkan penurunan potensi farmakologis atau fungsional dari bahan aktif tersebut. Di sisi lain, kelembapan yang tinggi mempercepat reaksi hidrolisis pada senyawa yang bersifat higroskopis, seperti ester atau amida, yang mengarah pada suatu penurunan kemurnian dan stabilitas kimia. Gabungan paparan suhu tinggi dan kelembapan yang ekstrem memicu reaksi degradasi yang lebih cepat dan kompleks, menghasilkan perubahan struktural yang tidak diinginkan dan senyawa degradasi yang berpotensi berbahaya. Temuan ini menekankan pentingnya pengelolaan kondisi penyimpanan yang lebih ketat dan pengembangan strategi pengemasan yang lebih efisien, guna menjaga stabilitas zat aktif dalam jangka panjang. Selain itu, penggunaan bahan stabilizer atau antioksidan, serta pengemasan yang kedap terhadap kelembapan dan oksigen, terbukti efektif dalam memperlambat proses degradasi dan mempertahankan kualitas produk. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan solusi berbasis data untuk mengoptimalkan umur simpan produk dengan bahan aktif, serta untuk mencegah kerusakan yang disebabkan oleh faktor lingkungan eksternal.

Jurnal ini membahas tentang kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan serta teknik untuk menghindarinya. Suhu tinggi dapat mempercepat degradasi termal zat aktif melalui oksidasi, dekomposisi, atau reaksi Maillard, yang menyebabkan penurunan efektivitas bahan aktif. Sementara itu, kelembapan tinggi mempercepat reaksi hidrolisis pada zat aktif yang sensitif terhadap air, seperti ester atau

amida, sehingga mengurangi stabilitas kimianya. Kombinasi suhu dan kelembapan tinggi mempercepat degradasi dengan mekanisme yang lebih kompleks. Untuk mencegah kerusakan ini, beberapa strategi dapat diterapkan, seperti penggunaan kemasan yang kedap udara, penambahan bahan penstabil seperti antioksidan, serta optimasi formulasi produk. Penelitian ini menyoroti pentingnya pemahaman mengenai kinetika degradasi zat aktif untuk menentukan parameter penyimpanan optimal dan menjaga efektivitas produk selama masa simpan. Oleh karena itu, pengelolaan suhu dan kelembapan yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan kualitas dan keamanan produk farmasi yang mengandung zat aktif.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penelitian ini. Terima kasih kami sampaikan kepada pihak-pihak yang telah menyediakan literatur dan referensi penting yang mendasari studi ini, serta kepada para peneliti sebelumnya yang hasilnya menjadi acuan dalam analisis kerusakan zat aktif akibat paparan suhu dan kelembapan. Terakhir, kami juga mengapresiasi bantuan dari institusi yang telah memfasilitasi penelitian ini, serta rekan-rekan sejawat yang telah memberikan masukan berharga dalam proses penyusunan artikel ini.

DAFTAR REFERENSI

- H. Ambarsari, "Pengembangan dan penerapan teknologi pengolahan limbah organik industri menjadi pakan maggot BSF (Black Soldier Fly) untuk mendukung program ketahanan pangan," *Laporan Akhir Program Pengembangan Teknologi Industri*, 2019.
- R. N. Arifudin, "Pengaruh suhu dan waktu pengukusan pada sludge IPAL industri makanan sebagai alternatif pakan maggot," vol. 24, no. 1, pp. 67–72, Jan. 2023.
- S. F. Arifudin, "Evaluasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Pengolahan Makanan," *Jurnal Air Indonesia*, vol. 11, no. 1, pp. 32–37, 2019.
- A. H. Azir, "Produksi dan kandungan nutrisi maggot (*Chrysomya megacephala*) menggunakan komposisi media kultur berbeda," *Jurnal Ilmu-ilmu Perikanan dan Budidaya Perairan*, vol. 12, no. 1, pp. 34–40, 2017.
- U. Chasanah, "Sintesis dan karakterisasi Pd-Ni terimpregnasi pada grafena oksida tereduksi sebagai katalis untuk reaksi reduksi oksigen," *Disertasi*, 2023.
- X. Q. Chen, "Mechanism of oxidization of graphite to graphene oxide by the Hummers method," *ACS Omega*, vol. 7, no. 27, pp. 23503–23510, 2022.

- S. Dera, "Pengaruh pH larutan terhadap nukleasi dan pertumbuhan kristal barium sulfat di dalam pipa beraliran laminar," vol. 1, no. 37, 2018.
- F. Fatma, "Perbedaan jumlah angka kuman udara berdasarkan hari dalam ruangan di Puskesmas Guguk Panjang," vol. 5, no. 3, pp. 777–2020, 2020.
- S. T. Hidayati, "Analisis potensi dan kelayakan finansial pada agroindustri biogas menggunakan covered lagoon anaerobic reactor termodifikasi," vol. 8, no. 3, pp. 218–226, 2019.
- Kardiman, "Analisis pertumbuhan fasa kerak kalsium karbonat ($CaCO_3$) akibat penambahan asam tartrat ($C_4H_6O_6$) sebagai aditif," vol. 2, no. 1, pp. 8–11, 2017.
- S. S. Mackay, "Barium sulfate scaling and control during polymer, surfactant, and surfactant/polymer flooding," vol. 19, pp. 1–17, 2019.
- N. Karaman and J. J., "Scale formation of barium sulfate in the piping flow system: Mineralogy and morphology evaluation," 2017.
- I. D. Nisa', "Analisis kelayakan tempat penyimpanan sementara bahan berbahaya dan beracun di perusahaan foundry dengan metode cost benefit analysis," vol. 1, no. 1, pp. 23–31, 2023.
- S. A. Pratomo, "Penentuan kadar sulfur dioksida (SO_2), nitrogen dioksida (NO_2), ozon (O_3), dan amonia (NH_3) di udara ambien di Balai Hiperkes dan Keselamatan Kerja," 2019.
- E. Sesa, "Rancang bangun alat ukur curah hujan, temperatur, dan kelembaban udara dengan media penyimpanan dalam SD card," vol. 15, no. 2, Jan. 2018.
- M. U. Siregar, "Pengaruh jenis katoda terhadap gas hidrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis air garam," *Media Mesin: Majalah Teknik Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 57–65, 2020.
- S. P. Ganefati, "Pengendalian polusi udara dalam ruangan kamar tidur penderita tuberkulosis menggunakan Cl_2 ," vol. 24, no. 1, pp. 107–115, Jan. 2023.
- D. Wangsa, "Pemetaan konsentrasi PM10 (*Particulate Matter*) dan konsentrasi logam Ca , Al , Fe , Si , dan Na dalam PM10 di udara ambien," 2015.
- D. Yuliando, "Pemetaan konsentrasi total suspended particulate (*TSP*) dan konsentrasi logam Ca , Si , Al , Fe , dan Na di udara ambien," 2014.
- J. A. Abidin, "Pengaruh dampak pencemaran udara terhadap kesehatan untuk menambah pemahaman masyarakat awam tentang bahaya dari polusi udara," vol. 2, no. 2, pp. 978–979, 2019.