

Aktivitas Air sebagai Determinan Stabilitas Fisikokimia dan Umur Simpan Susu Bubuk

Calya Fahira Chandra^{1*}, Raden Siti Nurlaela², Siti Nurhalimah³

^{1*}Teknologi Pangan dan Gizi – Universitas Djuanda, calyafahirachandra@gmail.com

²Teknologi Pangan dan Gizi – Universitas Djuanda, r.siti.nurlaela@unida.ac.id

²Teknologi Pangan dan Gizi – Universitas Djuanda, Siti.nurhalimah@unida.ac.id

"

ABSTRAK

Aktivitas air (aw) telah lama dikenal sebagai faktor penting yang memengaruhi stabilitas fisikokimia susu bubuk, namun kajian yang mengintegrasikan dampaknya terhadap mutu dan umur simpan masih terbatas. Ketidakpastian mengenai bagaimana aw berinteraksi dengan kondisi penyimpanan dan komponen susu bubuk menjadi alasan perlunya tinjauan sistematis. Penelitian ini bertujuan merangkum hubungan aw dengan perubahan mutu serta ketahanan simpan susu bubuk berdasarkan berbagai temuan empiris. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan studi pustaka dengan menelaah jurnal terpublikasi yang membahas dinamika aw, kadar air kritis, isoterm sorpsi, perubahan struktur, dan respons fisikokimia selama penyimpanan. Data diekstraksi dan dianalisis secara komparatif untuk mengidentifikasi kesamaan pola dan faktor penyebab perubahan mutu. Hasil telaah menunjukkan bahwa peningkatan aw menurunkan stabilitas matriks, mempercepat transisi fase kaca ke fase plastis, meningkatkan penggumpalan, menurunkan kelarutan, dan mempercepat oksidasi lemak. Nilai aw terbukti lebih sensitif dibanding kadar air total dalam memprediksi ketahanan simpan. Keterbatasan kajian ini adalah ketergantungan pada data sekunder dan variasi metodologi antar studi. Secara keseluruhan, aw merupakan determinan utama mutu susu bubuk, sehingga kontrol kelembapan, jenis kemasan, dan suhu penyimpanan menjadi implikasi penting untuk pengelolaan stabilitas produk.

Kata Kunci: Aktivitas air, Susu bubuk, Mutu produk, Umur simpan, Stabilitas fisikokimia

PENDAHULUAN

Susu bubuk merupakan bentuk produk susu yang banyak dimanfaatkan dalam industri pangan karena memiliki stabilitas penyimpanan yang lebih baik dibandingkan susu cair, serta kemudahan dalam distribusi dan formulasi. Meskipun demikian, kualitas susu bubuk rentan mengalami penurunan selama penyimpanan akibat paparan suhu dan kelembapan yang tidak terkontrol. Faktor-faktor tersebut dapat memicu perubahan fisik maupun kimia yang mengganggu mutu produk,

sehingga diperlukan pemahaman mengenai parameter penyimpanan yang paling berpengaruh. Salah satu indikator yang paling penting adalah aktivitas air (*aw*), karena *aw* berhubungan langsung dengan mobilitas air bebas dalam matriks bubuk yang dapat memicu reaksi oksidatif, perubahan struktur, atau ketidakstabilan lainnya (Clarke *et al.*, 2021)

Seiring dengan berkembangnya teknologi pengolahan dan pengeringan susu, perhatian terhadap pengendalian karakteristik fisik bubuk semakin meningkat. Formulasi dan metode pengolahan terbukti memengaruhi bentuk partikel, tingkat porositas, dan sifat rehidrasi yang menentukan respon bubuk terhadap kondisi penyimpanan (Mcsweeney *et al.*, 2020). Selain itu, pengukuran perilaku sorpsi uap air pada susu bubuk melalui pendekatan isoterm memberikan informasi penting mengenai interaksi antara air dan padatan pada berbagai kondisi suhu, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi kestabilan produk selama penyimpanan (Kadas *et al.*, 2025). Kedua aspek tersebut menegaskan bahwa *aw* berperan sentral dalam mempengaruhi stabilitas fisikokimia susu bubuk.

Untuk menjawab isu tersebut, penelitian ini disusun menggunakan pendekatan studi pustaka yang berfokus pada peran aktivitas air terhadap mutu dan ketahanan simpan susu bubuk. Pendekatan ini dipilih untuk mengintegrasikan berbagai temuan mengenai hubungan antara *aw*, proses penyimpanan, dan perubahan mutu produk, sehingga dapat diperoleh gambaran pola yang konsisten. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan peran aktivitas air sebagai indikator utama dalam menentukan stabilitas fisikokimia susu bubuk, mengidentifikasi pengaruh kondisi penyimpanan terhadap dinamika *aw*, dan merumuskan rekomendasi penyimpanan yang relevan dalam mempertahankan mutu susu bubuk selama masa simpan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini disusun menggunakan pendekatan studi pustaka yang bertujuan merangkum dan menginterpretasi berbagai hasil penelitian mengenai keterkaitan aktivitas air (aw) dengan perubahan mutu serta ketahanan simpan susu bubuk. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai perubahan fisik, kimia, dan fungsional yang terjadi pada susu bubuk pada berbagai kondisi penyimpanan. Sumber kajian dipilih dari beberapa publikasi yang relevan, yaitu artikel jurnal internasional tentang stabilitas susu bubuk pada berbagai suhu dan kelembapan, artikel nasional mengenai karakteristik penyimpanan susu bubuk edamame, penelitian tentang umur simpan susu kambing etawa kolostrum menggunakan metode ASLT, serta satu karya ilmiah tingkat sarjana yang menelaah pengaruh kemasan terhadap perubahan mutu. Pemilihan keempat referensi tersebut didasarkan pada kesesuaian substansi dengan topik aktivitas air, ketersediaan data kuantitatif, dan kontribusinya dalam menjelaskan fenomena penyimpanan produk susu bubuk.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan membaca secara menyeluruh setiap publikasi, kemudian mengekstraksi informasi penting yang berkaitan dengan variabel penelitian. Variabel yang dikumpulkan mencakup nilai aktivitas air, kadar air dan perubahan selama penyimpanan, parameter mutu seperti kelarutan, penggumpalan, perubahan warna, oksidasi lemak, serta kondisi penyimpanan meliputi suhu, kelembapan relatif, dan jenis kemasan. Semua informasi numerik dan deskriptif tersebut kemudian disusun dalam matriks perbandingan sehingga berbagai hasil dari tiap studi dapat dikaji secara paralel untuk mengidentifikasi kesamaan pola maupun perbedaan antar penelitian.

Analisis data dilakukan dengan dua pendekatan yang saling melengkapi. Pertama, analisis deskriptif-kualitatif, yaitu menginterpretasikan perubahan yang terjadi akibat fluktuasi aktivitas air dan menjelaskan mekanisme ilmiah yang mendasarinya, seperti peningkatan higroskopisitas, penurunan stabilitas struktur amorf, atau percepatan reaksi oksidatif dan pencoklatan non-enzimatis. Kedua, analisis komparatif-kuantitatif, yaitu membandingkan data numerik dari berbagai penelitian untuk melihat korelasi antara nilai aw dengan perubahan mutu atau batas kritis yang menentukan umur simpan. Melalui integrasi kedua analisis tersebut, penelitian ini menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai peran aktivitas air sebagai faktor kunci dalam mempertahankan mutu dan memperpanjang masa simpan susu bubuk, sekaligus mengidentifikasi kondisi penyimpanan yang paling memengaruhi stabilitas produk.



Gambar 1. Proses Analisis Literatur Aktivitas Air pada Susu Bubuk

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas Air sebagai Penentu Stabilitas Susu Bubuk

Telaah terhadap tiga sumber utama menunjukkan bahwa aktivitas air (aw) merupakan parameter paling sensitif dalam menentukan stabilitas mutu dan ketahanan simpan susu bubuk. Studi jangka panjang oleh Ryabova et al. (2023) menunjukkan bahwa meskipun kadar air total susu bubuk cenderung stabil selama 18 bulan penyimpanan, peningkatan mobilitas air pada suhu ruang (25°C) mengakibatkan aglomerasi, peningkatan insolubility index, dan penurunan kelarutan, terutama pada whole milk powder yang lebih higroskopis dibanding skim milk powder. Perubahan ini tampak menonjol setelah bulan ke-15 penyimpanan, menegaskan bahwa aw bukan kadar air total, tetapi merupakan indikator awal deteriorasi susu bubuk. Temuan tersebut konsisten dengan laporan Huda (2020) yang menunjukkan bahwa whey bubuk dengan aw lebih tinggi memiliki tingkat higroskopisitas lebih besar sehingga lebih mudah menggumpal selama penyimpanan.

Sebagai pemetaan awal mengenai perbedaan karakteristik ketiga studi, ringkasan temuan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Temuan Tiga Studi Utama tentang Pengaruh Aktivitas Air (aw) terhadap Mutu Susu Bubuk

| Studi | Produk | Inti Perubahan Aw | Perubahan | Dampak pada Mutu | Utama | Implikasi Umur Simpan |
|------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|---|---------------------|--|
| Ryabova et al., 2023 | Skim & whole milk powder | Mobilitas air meningkat pada suhu ruang aw stabil | air pada meski aw stabil | Caking meningkat, kelarutan menurun, partikel beraglomerasi | meningkat, partikel | Penurunan mutu tampak setelah bulan ke-15 |
| Setyani et al., 2022 | Susu bubuk edamame | Aw pada suhu 55°C | naik cepat 45-55°C | Oksidasi meningkat, menggumpal terbentuk | warna | Mutu menurun cepat pada suhu $\geq 45^{\circ}\text{C}$ |
| Putri & Juwitaningtyas, 2025 | Kolostrum kambing bubuk | Me (Kadar air kesetimbangan) meningkat melewati nilai kritis pada RH tinggi | (Kadar air dan nilai RH | Stabilitas menurun, lebih higroskopis | fisik bubuk | Umur simpan berkurang dari 66 hari menjadi 20 hari |

Perubahan Aktivitas Air pada Susu Bubuk Nabati (Edamame Powder)

Pada susu bubuk edamame, penelitian Setyani *et al.*, (2022) memperlihatkan peningkatan aw yang lebih cepat dibanding produk susu sapi, terutama saat disimpan pada 45–55°C selama 35 hari. Peningkatan aw tersebut sejalan dengan kenaikan nilai TBA (indikator oksidasi), penggumpalan, dan perubahan warna secara progresif akibat reaksi Maillard. Fenomena ini konsisten dengan temuan Nurhidajah *et al.* (2021), yang menemukan bahwa RH tinggi menyebabkan peningkatan kadar air dan aw produk bubuk, terlepas dari jenis kemasan, dan nilai aw berperan penting dalam menentukan *cut-off point* penurunan mutu produk. Kesamaan pola antara edamame powder dan produk pangan bubuk lokal lain menunjukkan bahwa efek aw terhadap stabilitas fisik dan kimia bersifat lintas-matriks.

Aktivitas Air dan Ketahanan Simpan Kolostrum Kambing Bubuk

Pada produk berbasis susu kambing, Putri & Juwitaningtyas (2025) mengestimasi umur simpan kolostrum bubuk berdasarkan kadar air kritis menggunakan model ASLT. Produk menunjukkan umur simpan 66 hari pada RH 15% dan hanya 20 hari pada RH 83%, menegaskan bahwa semakin tinggi RH lingkungan, semakin tinggi Me (kadar air kesetimbangan), sehingga lebih cepat melampaui Mc (kadar air kritis). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Fatimah *et al.* (2021) yang melaporkan bahwa susu bubuk kambing dengan aw lebih tinggi mengalami perubahan tekstur dan kualitas sensori lebih cepat, menegaskan peran aw dalam menentukan stabilitas fisik bubuk berbasis susu kambing.

Dampak Aktivitas Air terhadap Mutu Fisik dan Kimia Susu Bubuk

Selain efek fisik, aw juga memengaruhi stabilitas kimia susu bubuk. Sebagaimana dilaporkan Adine *et al.* (2023), peningkatan aw pada produk susu menyebabkan peningkatan aktivitas mikrobiologis dan perubahan kimia, yang kemudian berdampak pada kestabilan mutu selama penyimpanan. Temuan ini memperkuat pola yang juga tercatat pada susu bubuk edamame serta whey bubuk, yaitu bahwa aw berperan dalam meningkatkan mobilitas molekul air, mempercepat oksidasi lemak, dan memicu reaksi pencoklatan non-enzimatis.

Jika seluruh temuan diintegrasikan, terlihat pola bahwa:

1. Peningkatan aw menurunkan glass transition temperature (Tg)

2. Matriks bubuk berubah dari kaca (glass-like) menjadi semi-plastik (*rubbery*)
3. Struktur menjadi lebih lengket dan mudah beraglomerasi
4. Kelarutan menurun
5. Oksidasi meningkat
6. Umur simpan memendek secara signifikan.

Pola ini konsisten pada susu bubuk sapi (Ryabova et al., 2023), edamame (Setyani et al., 2022), whey bubuk (Huda, 2020), serta susu bubuk kambing (Fatinah et al., 2021). Dengan demikian, aktivitas air merupakan indikator paling universal dalam menentukan stabilitas susu bubuk, bahkan lebih kuat daripada kadar air total. Pengendalian RH penyimpanan, pemilihan kemasan berbarrier tinggi, serta penyimpanan pada suhu rendah menjadi kunci untuk menjaga stabilitas fisikokimia dan memperpanjang umur simpan produk susu bubuk

KESIMPULAN

Kesimpulan dari kajian ini menunjukkan bahwa aktivitas air (*aw*) merupakan parameter paling kritis dalam menentukan stabilitas fisikokimia dan umur simpan susu bubuk, karena peningkatan *aw* secara konsisten mempercepat perubahan struktur matriks dari fase kaca menjadi *rubbery*, meningkatkan higroskopisitas, memicu aglomerasi, menurunkan kelarutan, serta mempercepat reaksi oksidasi dan pencoklatan non-enzimatis pada berbagai jenis produk, termasuk susu bubuk sapi, edamame bubuk, whey bubuk, dan kolostrum kambing. Meskipun kajian ini memiliki keterbatasan berupa perbedaan kondisi penyimpanan, desain penelitian, serta parameter yang dilaporkan antar studi, telaah ini berkontribusi dalam mengintegrasikan pola umum bahwa *aw* adalah indikator paling sensitif bagi penurunan mutu susu bubuk dan dapat menjadi dasar pengendalian mutu selama penyimpanan. Oleh karena itu, pengendalian RH lingkungan, pemilihan kemasan berbarrier tinggi, dan penyimpanan pada suhu rendah direkomendasikan untuk memperpanjang umur simpan produk. Penelitian lanjutan perlu dilakukan menggunakan desain terstandar yang mampu memodelkan hubungan *aw*, *T_g*, dan umur simpan secara lebih presisi, serta mengevaluasi potensi teknologi kemasan aktif untuk mempertahankan *aw* pada tingkat stabil selama penyimpanan.

REFERENSI

- Adine, A. A., Wulandari, E., & Utama, D. T. (2023). Karakteristik Mikrobiologi (Total Bakteri, Total Yeast) dan pH of Date Produk Susu Kurma Selama Penyimpanan Suhu Rendah (4-6°C). *Jurnal Teknologi Hasil Peternakan*, 4(1), 33–43. <https://doi.org/10.24198/jthp.v4i1.46258>
- Clarke, H. J., Mccarthy, W. P., Sullivan, M. G. O., Kerry, J. P., & Kilcawley, K. N. (2021). Oxidative Quality of Dairy Powders: Influencing Factors and Analysis. *Foods*.
- Fatinah, D. S., Mudawaroch, R. E., & Rinawidiastuti. (2021). Pengaruh Penambahan Sukrosa Terhadap Kualitas Susu Bubuk Kambing Peranakan Ettawa (PE). *JRAP (Jurnal Riset Agribisnis Dan Peternakan)*, 6(2), 37–50.
- Huda, S. (2020). Efek Evaporasi dan Suhu Pengeringan Spraydrying terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Whey Bubuk. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, 13(2), 84–93.
- Kadas, E., Oduola, A., Rubinelli, P. M., Atungulu, G. G., & Acuff, J. C. (2025). Modeling moisture sorption isotherms of milk powders at ambient and elevated temperatures using the dynamic dewpoint isotherm (DDI) method. *JDS Communications*, 6(5), 629–634. <https://doi.org/10.3168/jdsc.2024-0683>
- Mcsweeney, D. J., Maidannyk, V., Montgomery, S., Mahony, J. A. O., & Mccarthy, N. A. (2020). The Influence of Composition and Manufacturing Approach on the Physical and Rehydration Properties of Milk Protein Concentrate Powders. *Foods*.
- Nurhidajah, Pranata, B., & Yonata, D. (2021). Pemodelan Persamaan Arrhenius untuk Memprediksi Umur Simpan Penyedap Rasa Cangkang Rajungan. *AGROINTEK: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 15, 566–573.
- Putri, D. A., & Juwitaningtyas, T. (2025). Pendugaan Umur Simpan Susu Kambing Etawa Kolostrum Bubuk Menggunakan Metode Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) dengan Pendekatan Kadar Air Kr itis Shelf Life Estimation of Etawa Goat Milk Colostrum Powder Using the Accelerated Shelf Life Testing (Aslt) Method with a Critical Moisture Content Approach. 13(2), 201–213.

- Ryabova, A. E., Semipyatny, V. K., & Galstyan, A. G. (2023). Effects of storage conditions on milk powder properties. *Journal of Dairy Science*, 106(10), 6741–6758. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23094>
- Setyani, Z. C., Widyaningsih, T. D., & Ali, D. Y. (2022). Pengaruh Suhu dan Lama Penyimpanan terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Susu Bubuk Edamame. *Jurnal Teknologi Pangan*, 16(2), 18–30.