



DINAMIKA REOLOGI DAN MIKROSKOPIS CAMPURAN ES KRIM PADA BERBAGAI TAHAPAN PROSES PRODUKSI

[Rheological And Microscopic Dynamics of Ice Cream Mix at Various Stages of The Production Process]

Hesti Ayuningtyas Pangastuti

Program Studi Teknologi Pangan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan

Email: hesti.pangastuti@tp.itera.ac.id (Telp: +62858-5888-8228)

Diterima tanggal 5 Juni 2025

Disetujui tanggal 15 Juli 2025

ABSTRACT

The quality of ice cream is greatly influenced by its rheological properties and microscopic structure, which evolve during various stages of the production process. This study aimed to analyze the changes in rheological properties (apparent viscosity, consistency coefficient, and flow behavior index) and microscopic structure of the ice cream mix during the following production stages: mixing, homogenization, pasteurization, and aging. Ice cream mix samples were collected at each production stage for rheological and microscopic analysis. The results showed that all ice cream mixes exhibited shear-thinning behavior ($n < 1$). Apparent viscosity and consistency coefficient increased from the mixing stage (201.50 mPa·s) to the aging stage (492.40 mPa·s), with significant increases observed after homogenization and particularly after aging. Microscopic analysis revealed the presence of agglomerates during the mixing stage, which were subsequently dispersed with reduced fat globule size following homogenization. The pasteurization stage improved fat globule dispersion, while the aging stage was characterized by the release of fat globules from their aggregates and their distribution into the serum phase. Each stage of the ice cream production process contributes significantly to the dynamic changes in rheological properties and microstructure, which are critical for controlling the quality of the final product.

Keywords: ice cream, microscopic, production process, viscosity

ABSTRAK

Kualitas es krim sangat dipengaruhi oleh sifat reologi dan struktur mikroskopisnya, yang berkembang selama berbagai tahapan proses produksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan sifat reologi (viskositas semu, koefisien konsistensi, dan indeks sifat alir) serta struktur mikroskopis campuran es krim selama tahap produksi berikut: pencampuran, homogenisasi, pasteurisasi, dan penuaan (*aging*). Sampel campuran es krim diambil pada setiap tahapan produksi untuk dianalisis sifat reologi dan struktur mikroskopisnya. Hasil menunjukkan bahwa semua campuran es krim bersifat *shear-thinning* ($n < 1$). Viskositas semu dan koefisien konsistensi meningkat dari tahap pencampuran (201,50 mPa·s) hingga tahap penuaan (492,40 mPa·s), dengan peningkatan signifikan setelah tahap homogenisasi dan terutama setelah penuaan. Analisis mikroskopis menunjukkan adanya aglomerat pada tahap pencampuran, yang kemudian terdispersi dan diikuti oleh penurunan ukuran globula lemak setelah homogenisasi. Tahap pasteurisasi meningkatkan dispersi globula lemak, sementara tahap penuaan ditandai dengan pelepasan globula lemak dari agregatnya dan penyebarannya ke dalam fase serum. Setiap tahapan proses produksi es krim memberikan kontribusi yang signifikan terhadap perubahan dinamis sifat reologi dan struktur mikro, yang sangat penting dalam mengendalikan kualitas produk akhir.

Kata kunci: es krim, mikroskopis, proses produksi, viskositas



PENDAHULUAN

Es krim merupakan salah satu produk pangan beku yang sangat digemari di seluruh dunia, tidak hanya karena cita rasanya yang menyegarkan tetapi juga karena teksturnya yang unik. Keberhasilan produk es krim di pasaran sangat ditentukan oleh kualitas sensorisnya, seperti kelembutan, kekentalan (*body*), dan sensasi di mulut, serta stabilitasnya selama penyimpanan dan distribusi (Goff & Hartel, 2013; Sofjan & Hartel, 2004). Kualitas ini bergantung pada struktur mikro yang kompleks dan sifat reologi dari campuran es krim.

Es krim merupakan produk pangan emulsi yang kompleks. Es krim terdiri dari beberapa komponen yaitu kristal es, globula lemak, protein, dan udara yang terdispersi di dalam fase serum (Hayes *et al.* 2003; Innocente *et al.* 2009). Interaksi antar komponen utama yaitu air, lemak, protein, penstabil, dan pengemulsi selama proses produksi akan membentuk struktur mikro yang khas. Ukuran dan distribusi kristal es serta gelembung udara, bersama dengan jaringan lemak dan protein, secara langsung memengaruhi tekstur, kelembutan, dan persepsi rasa dingin saat dikonsumsi (Sofjan and Hartel 2004).

Viskositas adalah parameter reologi yang memainkan peran penting baik selama proses produksi maupun dalam menentukan kualitas produk akhir es krim. Viskositas yang tepat dapat mempengaruhi efisiensi perpindahan panas selama pasteurisasi dan pendinginan, kemampuan campuran es krim untuk mengikat udara selama proses pengocokan (*whipping ability*), pembentukan dan stabilitas struktur selama pembekuan, serta distribusi partikel padat seperti kristal es (Goff & Hartel, 2013; Muse & Hartel, 2004). Viskositas yang lebih tinggi pada es krim berkaitan erat dengan pembentukan kristal es yang lebih kecil dan tekstur yang lebih halus pada produk akhir, serta dapat meningkatkan stabilitas fisik dan memperlambat laju pelelehan (Akesowan 2008). Sifat alir ini dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk komposisi bahan (misalnya kandungan dan jenis lemak, protein, serta penstabil), suhu, dan perlakuan mekanis selama proses (Bahramparvar and Mazaheri Tehrani 2011). Sebagai contoh, konsentrasi dan tipe lemak dapat meningkatkan viskositas melalui pembentukan jaringan kompleks setelah homogenisasi dan *aging* (Koxholt *et al.* 2001).

Proses produksi es krim melibatkan serangkaian tahapan yang masing-masing berkontribusi terhadap pembentukan struktur mikro dan pengembangan sifat reologi akhir. Tahapan-tahapan utama seperti pencampuran (*mixing*), pasteurisasi, homogenisasi, penuaan (*aging*), pembekuan (*freezing*), dan pengerasan (*hardening*) dirancang untuk mencapai karakteristik produk yang diinginkan (Bahramparvar & Mazaheri Tehrani, 2011; Goff & Hartel, 2013; Marshall, Goff, & Hartel, 2003). Pasteurisasi tidak hanya bertujuan untuk membunuh mikrobiologis patogen, tetapi juga dapat mempengaruhi hidrasi protein dan penstabil. Homogenisasi berfungsi untuk mereduksi ukuran globula lemak, meningkatkan luas permukaan lemak, dan memfasilitasi adsorpsi protein pada permukaan globula lemak, yang menghasilkan emulsi yang lebih stabil, mempengaruhi viskositas, serta pembentukan jaringan



lemak parsial selama proses *aging*. Tahap *aging* memungkinkan terjadinya kristalisasi lemak parsial, hidrasi protein dan penstabil, serta interaksi antar komponen yang mengarah pada peningkatan viskositas campuran es krim (Marshall *et al.* 2003; Bahramparvar and Tehrani, 2011). Proses pembekuan dan pengerasan adalah tahap penting dimana air diubah menjadi kristal es dan udara dimasukkan untuk membentuk struktur final pada es krim.

Meskipun banyak penelitian telah mengeksplorasi pengaruh bahan atau tahapan proses tertentu terhadap viskositas dan struktur es krim, studi yang secara khusus mengevaluasi dinamika viskositas dan perubahan struktur mikroskopis secara berurutan pada setiap tahap kunci proses produksi masih terbatas. Untuk menjawab hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan viskositas (termasuk viskositas semu, koefisien konsistensi, dan indeks sifat alir) serta struktur mikroskopis es krim pada berbagai tahapan proses produksi. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat memberikan wawasan ilmiah yang lebih detail mengenai hubungan antara parameter proses, sifat reologi, dan pembentukan struktur mikro es krim. Informasi ini akan sangat berguna bagi industri es krim dalam upaya meningkatkan efisiensi produksi, mengontrol kualitas secara lebih konsisten, dan mengembangkan produk dengan karakteristik yang diinginkan.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah susu dengan 0.96% lemak, whipping cream (35,5% lemak), bubuk susu skim, gula pasir, campuran penstabil dan pengemulsi. Bahan kimia yang digunakan untuk analisis bersifat pro-analisis.

Tahapan Penelitian

Pembuatan es krim

Formulasi dasar es krim yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada penelitian Goff dan Hartel (Goff & Hartel, 2013) dengan modifikasi. Komposisi es krim terdiri atas 26,8% *whip cream*, 50,4% susu cair, 6,1% susu skim bubuk, 0,5% campuran penstabil dan pengemulsi, serta 16,2% gula. Es krim dibuat per batch dengan total bahan sebanyak 800 g tiap batch. Tahapan awal pembuatan meliputi pencampuran bahan cair menggunakan mixer pada suhu ruang. Selanjutnya, bahan kering ditambahkan secara bertahap dan diaduk selama 10 menit. Proses homogenisasi dilakukan menggunakan homogenizer pada 18.000 rpm selama 10 menit. Campuran es krim kemudian dipasteurisasi dalam water bath selama 30 menit pada suhu 63 ± 1 °C. Setelah proses pendinginan, campuran disimpan untuk proses *aging* selama 24 jam pada suhu 4 °C. Tahap pembekuan dilakukan dengan mesin es krim selama ± 30 menit hingga mencapai suhu keluar $-5 \pm 0,1$ °C. Campuran es krim kemudian disimpan



sesaat selesai produksi untuk dianalisis lebih lanjut. Parameter yang dianalisis meliputi viskositas campuran (viskositas semu pada 20 rpm, indeks perilaku alir, dan koefisien konsistensi) serta analisis mikroskopis.

Pengujian Sifat Reologi

Pengujian sifat reologi dilakukan menggunakan metode Muse dan Hartel (2004) dengan modifikasi. Viskometer digunakan untuk mengukur viskositas pada setiap tahapan proses produksi, yaitu setelah pencampuran, homogenisasi, pasteurisasi, dan *aging*. Pengukuran torsi dilakukan dengan menggunakan spindle 254 dan 34 pada 100 hingga 1 rpm dan pengukuran hanya dilakukan pada torsi diantara 10-90%. Analisis viskositas pada 20 rpm, koefisien konsistensi, dan indeks sifat alir dihitung menggunakan model Power Law. Indeks sifat alir menggambarkan sejauh mana campuran es krim mendekati sifat fluida Newtonian, sedangkan koefisien konsistensi menunjukkan karakteristik aliran dari campuran tersebut. Hubungan antara kedua parameter ini dinyatakan dalam rumus (Persamaan (1)).

$$V = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Dimana: k = koefisien konsistensi (m^2/s); $\dot{\gamma}$ = laju regangan geser (s^{-1}); dan n = indeks sifat alir

Analisis Mikroskopis

Analisis mikroskopis dilakukan untuk mengetahui struktur mikro es krim pada setiap tahapan proses produksi. Sampel es krim terlebih dahulu dilelehkan pada suhu $25 \pm 1^\circ\text{C}$, kemudian diencerkan dengan air deionisasi dengan rasio 1:1, dan diaduk selama dua menit. Selanjutnya, sampel ditetaskan pada kaca objek, ditutup dengan kaca penutup, dan diamati menggunakan mikroskop dengan perbesaran 10x. Gambar struktur mikro kemudian diambil menggunakan aplikasi perangkat lunak NIS-Elements D Imaging (versi 4).

Rancangan Percobaan dan Analisis Data

Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) satu faktor, yaitu tahapan proses (setelah pencampuran, homogenisasi, pasteurisasi, dan penuaan (*aging*)). Setiap perlakuan dilakukan secara triplo. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan perangkat lunak SPSS 28.0. Uji Analysis of Variance (ANOVA) satu arah dilakukan pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Jika terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan, dilanjutkan dengan uji beda nyata Tukey (Tukey's HSD) pada taraf signifikansi yang sama ($\alpha = 0,05$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat reologi campuran es krim selama tahapan proses

Sifat reologi campuran es krim, khususnya viskositas semu, koefisien konsisten, dan indeks sifat alir merupakan parameter penting yang memengaruhi kualitas proses dan produk akhir. **Tabel 1** menyajikan perubahan parameter-parameter reologi ini pada berbagai tahapan kunci dalam proses produksi es krim.



Secara umum, hasil analisis reologi menunjukkan adanya peningkatan bertahap pada viskositas semu dan koefisien konsistensi seiring dengan berjalannya tahapan proses produksi es krim, dengan peningkatan paling signifikan adalah setelah tahap penuaan (*aging*). Indeks sifat alir (n) secara konsisten menunjukkan nilai di bawah 1 ($n < 1$) di semua tahapan, mengindikasikan bahwa campuran es krim bersifat non-Newtonian berupa pseudoplastik (*shear-thinning*). Sifat pseudoplastik ini memberikan keuntungan dalam produksi es krim, karena campuran akan memiliki viskositas yang lebih rendah pada laju geser tinggi (misalnya saat pemompaan atau pengadukan) namun viskositas yang lebih tinggi pada laju geser rendah (saat diam), yang membantu dalam menahan suspensi dan memberikan tekstur yang diinginkan (Goff & Hartel, 2013).

Tabel 1. Viskositas semu, koefisien konsistensi, dan indeks sifat alir campuran es krim pada berbagai tahapan proses

Tahapan Proses	Viskositas semu pada 20 rp (mPa.s)	Koefisien konsistensi (P_t s^n)	Indeks sifat alir (tidak berdimensi)
Pencampuran	201,50 $\pm$ 5,68 ^a	5,74 $\pm$ 0,33	0,65 $\pm$ 0,01 ^a
Homogenisasi	269,15 $\pm$ 5,09 ^b	6,54 $\pm$ 0,34	0,62 $\pm$ 0,00 ^a
Pasteurisasi	269,57 $\pm$ 15,98 ^b	6,78 $\pm$ 0,43	0,60 $\pm$ 0,02 ^a
Penuaan (<i>Aging</i>)	492,40 $\pm$ 63,28 ^c	8,37 $\pm$ 0,89	0,61 $\pm$ 0,02 ^b

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan adanya perbedaan signifikan ($p < 0,05$) antar tahapan proses. Data disajikan sebagai rata-rata $\pm$ standar deviasi.

Setelah tahap pencampuran awal, campuran es krim menunjukkan viskositas semu sebesar 201,50 mPa.s dan koefisien konsistensi 5,74 Pa s^n . Pada tahap ini, viskositas secara umum ditentukan oleh komposisi dasar campuran, seperti konsentrasi padatan total (lemak, protein, gula, padatan susu tanpa lemak) dan hidrasi awal dari beberapa komponen, terutama protein dan penstabil (Marshall *et al.* 2003). Indeks sifat alir ($n=0,65$) menunjukkan bahwa campuran sudah bersifat *shear-thinning* sejak awal.

Setelah proses homogenisasi, terjadi peningkatan signifikan ($p < 0,05$) pada viskositas semu menjadi 269,15 mPa.s, meskipun koefisien konsistensi tidak menunjukkan perbedaan signifikan secara statistik. Peningkatan viskositas ini terutama disebabkan oleh pengecilan ukuran globula lemak. Homogenisasi memecah globula lemak menjadi ukuran yang jauh lebih kecil, sehingga meningkatkan total luas permukaan globula lemak secara drastis (Bai & McClements, 2016; Goff & Hartel, 2013). Permukaan baru yang terbentuk ini kemudian segera dilapisi oleh protein (terutama kasein dan protein whey) yang ada dalam campuran, membentuk lapisan antarmuka protein-lemak yang baru. Menurut Dalgleish, van Mourik, & Corredig (1997) dan Innocente *et al.* (2009), penurunan diameter partikel ini meningkatkan interaksi antar partikel dan pembentukan jaringan yang lebih terstruktur, sehingga meningkatkan sifat viskoelastis dan viskositas campuran. Adsorpsi protein pada permukaan globula



lemak juga dapat mengurangi jumlah protein bebas dalam fase serum, yang secara tidak langsung dapat memengaruhi viskositas fase kontinu. Pada tahap ini, indeks sifat alir ($n=0,62$) juga sedikit menurun yang mengindikasikan campuran menjadi sedikit lebih *shear-thinning*.

Hasil viskositas semu pada tahap pasteurisasi tidak menunjukkan perubahan signifikan ($p>0,05$) (269,57 mPa.s) dibandingkan setelah homogenisasi. Indeks sifat alir ($n=0,60$) juga tidak berbeda signifikan dari tahap homogenisasi. Hal ini diduga terjadi karena pengaruh utama peningkatan viskositas sudah dicapai melalui homogenisasi. Namun, secara teoritis, pasteurisasi dapat memberikan kontribusi terhadap viskositas. Proses pemanasan selama pasteurisasi dapat menyebabkan denaturasi parsial protein whey, terutama β -laktoglobulin (Dalgleish *et al.* 1997). Protein yang terdenaturasi parsial ini dapat membuka struktur globular protein serta mengekspos gugus hidrofobik dan sulfhidril yang sebelumnya tersembunyi (Fan *et al.* 2024). Terbukanya ikatan ini memungkinkan terbentuknya interaksi baru, seperti ikatan hidrofobik dan ikatan disulfida antar molekul protein, atau antara protein dengan komponen lain seperti misel kasein atau lapisan antarmuka lemak (Huppertz *et al.* 2020). Interaksi ini dapat membentuk agregat protein atau jaringan yang lebih kompleks dalam campuran, yang berpotensi meningkatkan viskositas.

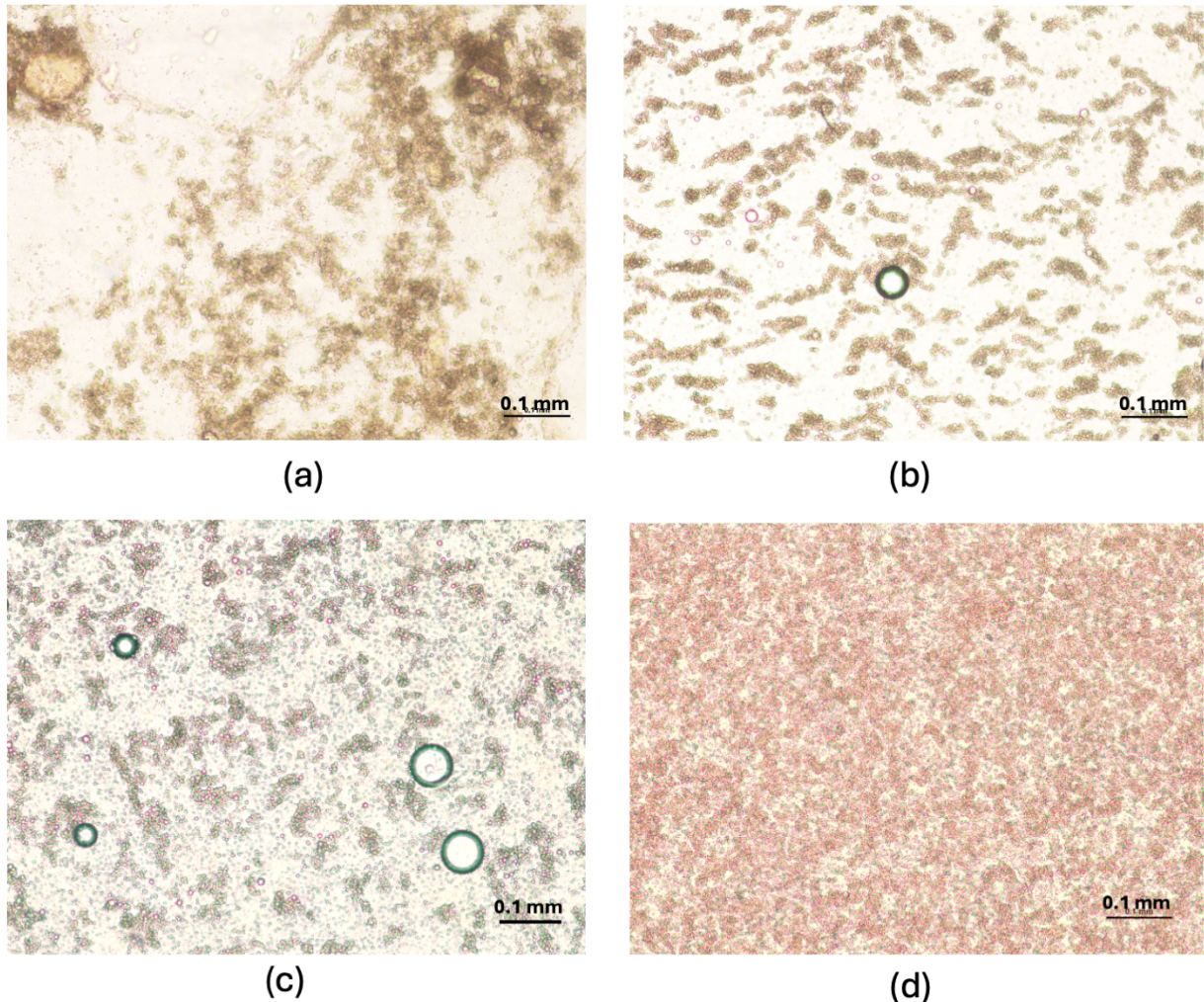
Pada proses penuaan (*aging*), surfaktan akan berkompetisi menggantikan protein untuk menempel pada permukaan globula lemak, sehingga protein akan lepas dari permukaan globula lemak dan larut pada serum. Kelarutan protein pada serum dapat meningkatkan viskositas secara signifikan (Dogan and Kayacier 2007). Hasil viskositas semu menunjukkan peningkatan yang signifikan (492,40 mPa.s). Koefisien konsistensi juga meningkat secara signifikan. Peningkatan ini juga dapat disebabkan oleh mekanisme lain yang terjadi selama proses tersebut, yaitu kristalisasi lemak serta hidrasi antara protein dan penstabil. Pada suhu rendah, lemak dalam globula akan mengalami kristalisasi parsial. Jarum-jarum kristal lemak dapat menembus lapisan antarmuka globula, memungkinkan interaksi antar globula lemak dan pembentukan jaringan tiga dimensi atau flokulasi parsial yang terbatas. Jaringan lemak ini memberikan struktur dan kekakuan pada campuran, sehingga meningkatkan viskositas secara signifikan (Bolliger, Wildmoser, Goff, & Tharp, 2000; Goff & Hartel, 2013).

Hasil Pengujian Mikroskopis

Analisis mikroskopis memberikan Gambaran terhadap struktur campuran es krim selama proses produksi, yang krusial untuk memahami pembentukan atribut kualitas akhir. Di dalam campuran es krim, partikel emulsi individual umumnya berukuran antara 0,5 hingga 3 μm dengan ukuran rata-rata sekitar 0,8 μm (Goff & Hartel, 2013; Muse & Hartel, 2004). Hasil analisis mikroskopis menunjukkan bahwa setiap tahapan proses produksi es krim menghasilkan karakteristik partikel yang berbeda (Gambar 1).



Pada tahap pencampuran bahan, tampak adanya aglomerasi partikel-partikel kecil yang diduga berasal dari bahan bubuk yang belum terlarut sempurna dalam campuran. Aglomerat ini terbentuk akibat gaya tarik antar partikel kering atau interaksi hidrofobik sebelum pembasahan (*wetting*) dan pelarutan yang adekuat. Keberadaan aglomerat dan partikel yang belum terhidrasi sempurna ini berkontribusi pada heterogenitas sistem awal, meskipun tidak terlihat dalam pengamatan secara visual.



. Gambar 1. Hasil analisis mikroskopis produk es krim pada tahapan proses: (a) pencampuran, (b) homogenisasi, (c) pasteurisasi, dan (d) aging

Selanjutnya, partikel-partikel ini mengalami pelarutan lebih lanjut setelah melalui proses homogenisasi akibat agitasi dan dispersi. Proses homogenisasi diketahui mampu mereduksi ukuran globula lemak karena adanya gaya mekanis yang memecah agregat globula menjadi partikel yang lebih kecil (Ruger *et al.* 2002; Innocente *et al.* 2009). Reduksi ukuran ini menyebabkan peningkatan luas permukaan antarmuka lemak-air. Permukaan baru yang terbentuk ini kemudian dilapisi oleh molekul protein yang ada dalam campuran (terutama misel kasein dan protein whey), yang bermigrasi ke antarmuka dan membentuk lapisan pelindung baru di sekeliling globula lemak yang lebih kecil, sehingga menstabilkan emulsi es krim yang terbentuk (Dickinson 1999).



Pada tahap pasteurisasi, analisis mikroskopis menunjukkan adanya pelepasan globula lemak dari agregatnya dan penyebarannya ke dalam fase serum. Selanjutnya, pada tahap aging, terjadi penataan ulang membran globula lemak (membrane rearrangement) serta substitusi sebagian protein dengan emulsifier di permukaan globula lemak, yang memengaruhi stabilitas emulsi dan struktur mikroskopis dari campuran es krim. Fenomena ini didorong oleh kristalisasi parsial trigliserida di dalam globula lemak (Goff & Spagnuolo, 2001; Wu, Freire, & Hartel, 2019). Kristal lemak yang terbentuk dapat tumbuh dan menembus atau lapisan protein-emulsifier yang mengelilingi globula, kemudian menciptakan permukaan yang lebih hidrofobik dan reaktif. Dalam proses ini, emulsifier (atau surfaktan) juga akan berkompetisi dengan protein untuk menempati ruang di antarmuka lemak-air. Pengemulsi, karena sifat amfifiliknya yang kuat, cenderung menggantikan sebagian protein dari permukaan globula lemak (Koxholt *et al.* 2001). Proses ini akan melemahkan lapisan antarmuka secara terkontrol, membuat partikel lebih rentan terhadap koalesensi sebagian selama proses pembekuan.

KESIMPULAN

Setiap tahapan dalam proses produksi es krim mulai dari pencampuran, homogenisasi, pasteurisasi, hingga penuaan (aging) mempengaruhi sifat reologi dan struktur mikro campuran es krim. Secara reologis, campuran es krim menunjukkan perilaku *shear-thinning* (pseudoplastik) di semua tahapan. Viskositas semu dan koefisien konsistensi meningkat secara bertahap, dengan peningkatan paling substansial teramati setelah tahap homogenisasi yang mereduksi ukuran globula lemak dan terutama setelah tahap penuaan yang memfasilitasi pengembangan struktur internal.

Perubahan reologis ini juga terkait kuat dengan mikrostruktur yang diamati. Homogenisasi dapat mengurangi ukuran globula lemak secara efektif, meningkatkan luas permukaan antarmuka, dan mendorong adsorpsi protein. Tahap penuaan (*aging*) krusial dalam pengembangan struktur lebih lanjut, ditandai dengan pelepasan globula lemak dari agregatnya dan penyebarannya ke dalam fase serum.

Pemahaman dinamika reologi dan karakteristik mikroskopis pada setiap tahapan proses es krim menjadi hal dasar yang penting. Pengendalian yang cermat pada setiap tahapan proses yang didasarkan perubahan viskositas dan mikrostruktur sangat penting untuk mencapai kualitas es krim akhir yang diinginkan, termasuk tekstur, kelembutan, stabilitas, dan kemampuan mengikat udara.

DAFTAR PUSTAKA

Akesowan A. 2008. Effect of Combined Stabilizers Containing Konjac Flour and κ -Carrageenan on Ice Cream . AU JT. 12(2):81–85.



- Bahramparvar M, Mazaheri Tehrani M. 2011. Application and Functions of Stabilizers in Ice Cream. *Food Reviews International*. 27(4):389–407. doi:10.1080/87559129.2011.563399.
- Bai L, McClements D. 2016. Extending Emulsion Functionality: Post-Homogenization Modification of Droplet Properties. *Processes*. 4(2):17. doi:10.3390/pr4020017.
- Bolliger S, Wildmoser H, Goff HD, Tharp BW. 2000. Relationships between ice cream mix viscoelasticity and ice crystal growth in ice cream. *Int Dairy J*. 10(11):791–797. doi:10.1016/S0958-6946(00)00108-4.
- Dagleish DG, van Mourik L, Corredig M. 1997. Heat-Induced Interactions of Whey Proteins and Casein Micelles with Different Concentrations of α - Lactalbumin and β -Lactoglobulin. *J Agric Food Chem*. 45(12):4806–4813. doi:10.1021/jf970524r.
- Dickinson E. 1999. Adsorbed protein layers at fluid interfaces: interactions, structure and surface rheology. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 15(2):161–176. doi:10.1016/S0927-7765(99)00042-9.
- Dogan M, Kayacier A. 2007. The Effect of Ageing at a Low Temperature on the Rheological Properties of Kahramanmaraş-Type Ice Cream Mix. *Int J Food Prop*. 10(1):19–24. doi:10.1080/10942910600610729.
- Fan X, Wang Q, Jin H, Zhang Y, Yang Y, Li Z, Jin G, Sheng L. 2024. Protein aggregation caused by pasteurization processing affects the foam performance of liquid egg white. *Food Chem*. 446:138881. doi:10.1016/j.foodchem.2024.138881.
- Goff H, Spagnuolo P. 2001. Effect of stabilizers on fat destabilization measurements in ice cream. *Milchwissenschaft*. 56:450–453.
- Goff HD, Hartel RW. 2013. *Ice Cream 7th Edition*. New York: Springer.
- Hayes MG, Lefrancois AC, Waldron DS, Goff HD, Kelly AL. 2003. Influence of high pressure homogenisation on some characteristics of ice cream. *Milchwissenschaft*. 58(9–10):519–523.
- Huppertz T, Uniacke-Lowe T, Kelly AL. 2020. Physical Chemistry of Milk Fat Globules. In: *Advanced Dairy Chemistry, Volume 2*. Cham: Springer International Publishing. p. 133–167.
- Innocente N, Biasutti M, Venir E, Spaziani M, Marchesini G. 2009. Effect of high-pressure homogenization on droplet size distribution and rheological properties of ice cream mixes. *J Dairy Sci*. 92(5):1864–1875. doi:10.3168/jds.2008-1797.
- Koxholt MMR, Eisenmann B, Hinrichs J. 2001. Effect of the Fat Globule Sizes on the Meltdown of Ice Cream. *J Dairy Sci*. 84(1):31–37. doi:10.3168/jds.S0022-0302(01)74448-7.
- Marshall RT, Goff HD, Hartel RW. 2003. *Ice Cream*. Boston, MA: Springer US.
- Muse MR, Hartel RW. 2004. Ice Cream Structural Elements that Affect Melting Rate and Hardness. *J Dairy Sci*. 87(1):1–10. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)73135-5.
- Ruger PR, Baer RJ, Kasperson KM. 2002. Effect of Double Homogenization and Whey Protein Concentrate on the Texture of Ice Cream. *J Dairy Sci*. 85(7):1684–1692. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74241-0.
- Sofjan RP, Hartel RW. 2004. Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *Int Dairy J*. 14(3):255–262. doi:10.1016/J.IDAIRYJ.2003.08.005.
- Wu B, Freire DO, Hartel RW. 2019. The Effect of Overrun, Fat Destabilization, and Ice Cream Mix Viscosity on Entire Meltdown Behavior. *J Food Sci*. 84(9):2562–2571. doi:10.1111/1750-3841.14743.