

Pengaruh Komposisi Susu Cair terhadap Sifat Reologi dan Potensi Risikonya pada Kecukupan Proses Termal

The Effect of Liquid Milk Composition on Its Rheological Properties and Its Potential Risks on Thermal Process Adequacy

Ashari Widhiasmoro¹⁾, Purwiyatno Haryadi^{2,3)*}, Eko Hari Purnomo^{2,3)}

¹⁾ Program Magister Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Bogor

²⁾ Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Bogor

²⁾ South-East Asia Food & Agricultural Science and Technology (SEAFAST) Center, IPB University, Bogor

Abstract. The viscosity and density of liquid milk are influenced by temperature and composition. This study aimed to evaluate the effect of differences in liquid milk composition on rheological properties and assess its potential risk to the adequacy of the thermal process. The liquid milk used in this research included fresh milk from three different regions, full-fat recombinant milk (fat content >3%), partially skimmed recombinant milk (fat content >0.5%), and recombinant milk with cocoa solids (fat content >2%). The results showed that in 2022, fresh milk samples from West Java, Central Java, and East Java had total solids of $11.7 \pm 0.14\%$, $11.5 \pm 0.14\%$, and $12.1 \pm 0.19\%$, respectively; fat content of $3.6 \pm 0.15\%$, $4.0 \pm 0.13\%$, and $4.0 \pm 0.13\%$; and protein content of $2.9 \pm 0.04\%$, $2.9 \pm 0.06\%$, and $3.0 \pm 0.06\%$. All samples exhibited Newtonian fluid behavior, with density and viscosity decreasing as temperature increased. Differences in the density and viscosity of liquid milk affected the maximum flow speed in the holding tube but did not significantly impact the F_0 value. In sterilization practices with F_0 values ranging from 5.2 to 10.9 minutes, variations in maximum flow rates among fresh milk from different regions and different types of recombinant milk did not pose a risk to food safety, as the adequacy of the thermal process was still achieved ($F_0 > 3.0$ minutes).

Keywords: density, milk, rheology, thermal process, viscosity

Abstrak. Nilai viskositas dan densitas susu cair dipengaruhi oleh suhu dan komposisinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan komposisi susu cair terhadap sifat reologi serta potensi risikonya terhadap kecukupan proses termal. Sampel susu cair yang digunakan terdiri dari susu segar dari tiga wilayah, susu rekombinan lemak penuh (kadar lemak >3%), susu rekombinan skim sebagian (kadar lemak >0,5%), dan susu rekombinan dengan padatan kakao (kadar lemak >2%). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sepanjang tahun 2022, sampel susu segar dari Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur memiliki total padatan masing-masing sebesar $11,7 \pm 0,14\%$; $11,5 \pm 0,14\%$; dan $12,1 \pm 0,19\%$, kadar lemak $3,6 \pm 0,15\%$; $4,0 \pm 0,13\%$; dan $4,0 \pm 0,13\%$, serta kadar protein $2,9 \pm 0,04\%$; $2,9 \pm 0,06\%$; dan $3,0 \pm 0,06\%$. Semua sampel menunjukkan sifat reologi sebagai fluida Newtonian, dengan densitas dan viskositas yang menurun seiring dengan peningkatan suhu. Perbedaan densitas dan viskositas susu cair berpengaruh terhadap laju aliran maksimum dalam holding tube, tetapi tidak menyebabkan perbedaan signifikan pada nilai F_0 yang dicapai. Dalam praktik sterilisasi dengan nilai F_0 berkisar antara 5,2–10,9 menit, perbedaan laju aliran maksimum pada susu segar dari tiga wilayah yang berbeda serta tiga jenis susu rekombinan tidak menimbulkan risiko terhadap keamanan pangan, karena kecukupan proses termal tetap terpenuhi ($F_0 > 3,0$ menit).

Kata kunci: densitas, proses termal, reologi, susu, viskositas

Aplikasi Praktis: Hasil dari penelitian ini memberikan gambaran dalam perancangan desain yang tepat terhadap peralatan dan parameter proses termal susu cair sesuai dengan persyaratan keamanan pangan. Data yang diperoleh mengenai pengaruh jenis susu yang digunakan dalam penelitian ini, dapat pula digunakan untuk melakukan optimasi proses termal produk sejenis dengan tetap memastikan tercapainya kecukupan proses termal.

PENDAHULUAN

Susu adalah bahan pangan kaya gizi sehingga dapat menjadi media pertumbuhan yang sangat baik untuk berbagai macam mikroorganisme. Karena kandungan gizinya itu, susu mampu mendukung kehidupan spektrum mikroorganisme yang luas dalam

kondisi pertumbuhan yang optimal (Islam *et al.* 2018). Kualitas susu ditentukan oleh komponen penyusun mutu susu yaitu lemak, protein, dan laktosa (Tançin *et al.* 2020).

Susu segar umumnya mengalami proses lanjutan agar dapat memiliki umur simpan yang lebih panjang dan dapat didistribusikan secara lebih efektif. Bebe-

Korespondensi: phariyadi@apps.ipb.ac.id

rapa metode proses termal umum digunakan untuk menekan ataupun mengeliminasi muatan mikroba susu segar untuk menjamin keamanan pangan produk dan memperpanjang umur simpannya. Metode perlakuan panas yang dimaksud salah satunya adalah pemrosesan dengan suhu sangat tinggi (*ultra high temperature, UHT*) (Dash *et al.* 2022). Di sisi lain, pengetahuan tentang sifat fisik bahan pangan merupakan aspek penting yang menentukan dalam penerapan teknologi proses (Božíková dan Hlaváč 2013).

Pemahaman tentang karakteristik fisikokimia dan mekanik (terutama sifat reologi) bahan diperlukan untuk lebih memahami perubahan yang terjadi selama pemrosesan. Sifat-sifat produk antara dan produk jadi susu yang ditentukan melalui pengukuran dan instrumentasi reologi, menjadi parameter penting pada industri pengolahan susu. Pengetahuan yang tepat terkait dengan sifat reologi dari suatu bahan pangan juga akan memberikan informasi pada desain dan evaluasi peralatan proses dan unit operasi yang akan digunakan pada proses produksi di skala komersial (Khetra *et al.* 2018). Hasil pengukuran reologi dapat diterapkan untuk rekayasa proses pada industri susu seperti dalam proses pemanasan atau sterilisasi susu UHT.

Beberapa studi terdahulu menunjukkan bahwa komposisi susu cair dapat memengaruhi sifat reologinya. Morison *et al.* (2013), menjelaskan bahwa kadar padatan dan protein susu berpengaruh pada viskositas dan indeks laju aliran produk. Sifat reologi susu juga dipengaruhi oleh suhu (Kumbar 2015). Hal ini tentu akan berpengaruh pada proses termal yang berkaitan erat dengan laju aliran produk dalam proses tersebut.

Selain itu, komposisi susu segar tidak konstan, dan sebagai produk hewani, kadar protein, lemak dan profil mineral bervariasi mengikuti tahap laktasi, musim, pakan, dan beberapa faktor lainnya (Tançın *et al.* 2020). Komposisi susu seperti lemak, protein, dan sifat fisiko kimia lainnya mungkin bervariasi sepanjang tahun (Chen *et al.* 2014). Untuk susu cair rekombinan komersial, perbedaan komposisi antar produk didesain oleh industri pengolah susu untuk kebutuhan diversifikasi kategori pangan dalam kaitannya dengan tujuan komersial. Dalam hal ini, penelitian yang menunjukkan profil komposisi susu segar di Indonesia dan susu rekombinan komersial, serta pengaruhnya pada sifat reologi dan kecukupan proses termalnya belum pernah dilakukan.

Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian terhadap pengaruh profil komposisi susu segar dan susu rekombinan komersial terhadap sifat reologinya untuk mendapatkan desain yang tepat pada proses termal yang akan dilakukan. Kesesuaian desain proses termal penting dilakukan agar persyaratan proses minimum untuk menjamin keamanan pangan tetap terpenuhi untuk setiap perbedaan komposisi produk yang diproses. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi

pengaruh perbedaan komposisi susu cair terhadap sifat reologinya dan mengevaluasi potensi risikonya terhadap kecukupan proses termal.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan adalah susu segar dari sentra koperasi susu dari tiga wilayah penghasil susu segar di Indonesia, yaitu dari Wilayah A (Jawa Barat), Wilayah B (Jawa Tengah), dan Wilayah C (Jawa Timur). Susu segar dalam penelitian ini tidak standarisasi, dan penelitian dilakukan terhadap susu segar sesuai komposisi asalnya. Pengambilan sampel dilakukan dari truk yang datang ke industri susu pada suhu tidak lebih dari 8 °C dan analisis dilakukan tidak lebih dari 12 jam sejak pengambilan sampel. Selain itu, digunakan 3 sampel susu rekombinan yaitu susu rekombinan lemak penuh, susu rekombinan skim sebagian, dan susu rekombinan dengan padatan kakao, yang ketiganya diperoleh dari PT XYZ. Susu rekombinan yang digunakan adalah susu hasil rekombinasi yang belum mengalami proses termal, yang diharapkan dapat menggambarkan kondisi nyata produk untuk dilakukan evaluasi karena struktur sampel belum berubah akibat proses pengolahan.

Pemilihan sampel

Sampel susu segar diambil dari 3 wilayah utama sentra penghasil susu di Pulau Jawa yaitu dari Wilayah A (Jawa Barat), Wilayah B (Jawa Tengah), dan Wilayah C (Jawa Timur). Pada sampel susu cair komersial, sampel yang dipilih adalah susu cair rekombinan berdasarkan skenario terburuk (*worst case scenario*) dari komposisi susu yang mungkin berpengaruh pada sifat reologi dan berdampak pada kecukupan proses termal. Susu rekombinan yang diamati adalah susu rekombinan lemak penuh yang memiliki komposisi lemak dengan persyaratan tertinggi sesuai dengan Peraturan Kepala Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) No 13 tahun 2023 tentang Kategori Pangan (BPOM 2023). Persyaratan karakteristik dasar untuk susu lemak penuh adalah kadar lemak susu tidak kurang dari 3%. Untuk sampel dengan komposisi lemak rendah, sampel yang dipilih adalah susu rekombinan skim sebagian dengan persyaratan karakteristik dasar minimum kadar lemak susu 0,6% sampai kurang dari 2,9%. Susu rekombinan dengan padatan kakao dipilih karena memiliki nilai total padatan yang lebih tinggi akibat penambahan kakao bubuk.

Analisis komposisi susu

Analisis komposisi susu meliputi kadar lemak, protein, dan total padatan menggunakan instrumen Milkoscan™ FT2 (Denmark) dengan spesifikasi untuk analisis lemak (hingga 60%), protein (hingga 15%),

laktosa (hingga 7%), dan total padatan (hingga 55%) dalam susu. Milkoscan™ adalah instrumen analisis yang paling banyak keberterimaannya untuk analisis susu komersial (Gastélum-Barrios *et al.* 2020). Prinsip kerja Milkoscan™ FT2 didasarkan pada analisis Fourier Transform Infrared (FTIR) dari wilayah panjang gelombang antara 2500 dan 25000 nm. Kalibrasi dilakukan dengan memvalidasi nilai pengukuran terhadap metode primer menggunakan beberapa set sampel yang mewakili (Li *et al.* 2016). Referensi komposisi susu segar yang digunakan adalah komposisi susu segar dari koperasi susu yang digunakan oleh PT XYZ. Data komposisi susu segar sepanjang tahun 2022 dianalisis untuk melihat profil komposisi antar wilayah dan mengetahui signifikansi perbedaannya. Selanjutnya dari masing-masing wilayah, diambil tiga sampel yang dianalisis untuk melihat hubungan komposisi kimia terhadap sifat reologi dan kecukupan proses termalnya. Analisis yang sama juga dilakukan terhadap ketiga sampel susu rekombinan. Sampel yang sudah diketahui nilai komposisinya kemudian dianalisis densitas, viskositas, serta dilakukan evaluasi kecukupan proses termalnya.

Analisis densitas susu

Analisis densitas susu dilakukan menggunakan alat *density hydrometer* (Ludwig Scheiner, Jerman) dengan spesifikasi rentang pengukuran 0.950–1.000 g/cm³ dan 1.000–1.050 g/cm³ mengacu pada metode SNI 3141.1:2011 (BSN 2011). Nilai densitas diukur pada 7 titik pengamatan di suhu 20 sampai 80 °C dengan rentang suhu 10 °C. Kemudian nilai densitas pada suhu sterilisasi didapatkan dari ekstrapolasi data hubungan suhu dan densitas. Analisis densitas dilakukan terhadap masing-masing sampel dengan tiga kali ulangan.

Kompensasi suhu terhadap laju aliran

Peningkatan volume produk karena ekspansi termal seharusnya dikompensasi pada saat penetapan proses terjadwal sistem sterilisasi (BPOM 2019). Nilai laju aliran saat produk berada di suhu sterilisasi pada desain proses termal yang dilakukan diestimasi dengan nilai densitasnya. Telah diketahui bahwa densitas susu menurun seiring peningkatan suhu, yang berarti volumenya bertambah karena peningkatan suhu tersebut, sedangkan massa yang dipindahkan adalah tetap. Dengan pertambahan volume berarti terjadi peningkatan laju aliran, karena laju aliran adalah fungsi dari volume per satuan waktu.

Peningkatan volume akan berpengaruh kepada laju aliran volumetrik produk dan waktu tinggal minimal dalam *holding tube*. Kompensasi pengaruh suhu terhadap laju aliran pada suhu target didapat dari konversi laju aliran volumetrik (*volumetric flow rate*) pompa yang digunakan ke laju aliran massa (*mass flow rate*) pada suhu referensi. Kemudian laju aliran massa di konversi kembali menjadi laju aliran volumetrik (*volumetric*

flow rate) pada suhu target proses termal. Perhitungan dilakukan dengan Persamaan 1, yang densitasnya dapat mengkonversi nilai volume menjadi massa seperti dijelaskan da Silva *et al.* (2021) dan Parmar *et al.* (2021).

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \dots \quad (1)$$

dengan, \dot{m} adalah laju aliran massa (kg/jam), ρ = densitas massa (kg/liter), dan Q adalah debit aliran atau laju aliran volumetrik (L/jam).

Analisis viskositas sampel

Analisis viskositas dilakukan dengan menggunakan instrumen rheometer (Anton Paar tipe MCR-92, Austria). Spesifikasi alat diperuntukkan untuk analisa viskositas dan karakteristik aliran dengan tipe pengukuran rotasional, torsi maksimum 200 Nm dengan sensor suhu *peltier temperature device*. Referensi pengukuran viskositas mengacu kepada penelitian Bista *et al.* (2020) dengan nilai gradien kecepatan (*shear rate*, τ) dibuat konstan. Pengukuran dilakukan langsung untuk setiap perlakuan suhu pada gradien kecepatan konstan 1000/detik pada 10 titik pengamatan di rentang suhu 20 sampai 80 °C. Nilai viskositas pada suhu target proses termal diestimasi menggunakan persamaan Arrhenius sesuai yang dijelaskan Messaâdi *et al.* (2015) dan Gonçalves *et al.* (2017) pada Persamaan 2.

$$\ln(\eta) = \ln(As) + \frac{Ea}{R.T} \dots \quad (2)$$

dengan, R , E_a , dan As berturut-turut adalah konstanta gas, energi aktivasi, dan faktor pre-eksponensial (entropik) persamaan Arrhenius, sedangkan T adalah suhu (K).

Penentuan indeks tingkah laku aliran dan indeks konsistensi

Sampel diukur nilai tegangan geser yang didapat dari variasi 10 perlakuan gradien kecepatan mulai dari 100–1000/detik. Hubungan gradien kecepatan (*shear rate*, τ) dan tegangan geser (*shear stress*, γ') dengan nilai indeks tingkah laku aliran (n) dan nilai indeks konsistensi (K) dapat dihitung dari Persamaan 3 (Mezger 2018).

$$\tau = K \cdot (\gamma')^n \dots \quad (3)$$

Keterangan: τ adalah gradien kecepatan ($\frac{1}{detik}$), γ' adalah tegangan geser ($\frac{N}{m}$), n adalah indeks tingkah laku aliran (tanpa satuan), dan K adalah nilai indeks konsistensi (satuan Pa.sⁿ)

Data gradien kecepatan dan tegangan geser diubah dalam bentuk Ln dan diplotkan pada kurva gradien

kecepatan terhadap tegangan geser sesuai dengan persamaan model *Power Law* sehingga akan diperoleh hasil regresi sesuai $y = a + bx$. Nilai indeks tingkah laku aliran (n) adalah nilai b dan nilai indeks konsistensi (K) adalah eksponen dari nilai a . Nilai n digunakan untuk mengelompokkan sifat fluida menjadi bersifat Newtonian, non-Newtonian pseudoplastik bila n kurang dari 1, atau non-Newtonian dilatant bila n lebih dari 1.

Bilangan Reynolds

Mezger (2018) menyatakan parameter yang memengaruhi bilangan Reynolds adalah densitas, viskositas, dimensi pipa, kecepatan maksimum fluida pada pipa, kecepatan rata-rata fluida, indeks konsistensi (K), dan indeks tingkah laku aliran (n). Berdasarkan nilai viskositas dan densitas yang diperoleh dapat dihitung bilangan Reynolds untuk menentukan karakteristik aliran fluida susu cair. Terdapat dua metode perhitungan nilai bilangan Reynolds yaitu untuk fluida Newtonian dan fluida non-Newtonian. Maka dari itu penentuan karakteristik reologi harus dilakukan terlebih dahulu. Model aliran laminar atau turbulen dihitung dengan menggunakan bilangan Reynold (Re) sesuai Persamaan 4.

$$Re = \frac{\rho D \tilde{v}}{\mu} \dots \dots \dots \quad (4)$$

Keterangan: Re adalah bilangan Reynold, ρ adalah densitas ($\frac{kg}{m^3}$), D adalah diameter bagian dalam pipa *holding tube* (m), \bar{v} adalah kecepatan rata-rata dalam *holding tube* dengan ($\frac{m}{detik}$), dan μ adalah viskositas dinamis (Pa.s).

Laju aliran ditentukan dengan perhitungan data debit dan luas penampang *holding tube* dengan Persamaan 5, V_{\max} adalah kecepatan maksimum fluida - dalam *holding tube* ($\frac{m}{detik}$), \tilde{v} adalah kecepatan rata-rata fluida ($\frac{m}{detik}$), dan Q adalah laju aliran volumetrik ($\frac{m^3}{detik}$).

$$\tilde{v} = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots \quad (5)$$

Data debit diperoleh dari kapasitas laju aliran pompa yang digunakan pada sistem sterilisasi. Kecepatan maksimum fluida Newtonian dengan aliran laminar dalam pipa dapat dihitung menggunakan Persamaan 6. Untuk aliran turbulen dengan bilangan Reynold di antara 4000 dan 10000, kecepatan maksimum dapat dihitung dengan Persamaan 7. Pada bilangan Reynold lebih dari 10000 kecepatan maksimum adalah sebesar 1,2 kali dari kecepatan rata-rata.

$$V_{\max} = 2 \tilde{v} \dots \quad (6)$$

$$V_{max} = \frac{\tilde{v}}{(0.0336 \log(Re) + 0.662)} \dots\dots\dots (7)$$

Perhitungan kecukupan proses termal

Berdasarkan Peraturan BPOM (2021), nilai kecukupan proses termal dihitung dengan Persamaan 8, LR adalah laju letal (*lethal rate*) yang dapat dihitung melalui Persamaan 9, dengan t_{min} adalah waktu minimal produk berada di dalam *holding tube* (menit), T adalah suhu sterilisasi ($^{\circ}\text{C}$), Tref adalah suhu referensi yaitu $121,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan z adalah perubahan suhu yang menyebabkan reduksi nilai D *Clostridium botulinum* sebesar 1 desimal, yaitu sebesar $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$F_0 \equiv \text{LR.t}_{\min} \dots \quad (8)$$

$$LR = 10^{\left(\frac{T-T_{ref}}{Z}\right)} \dots \dots \dots (9)$$

Analisis data

Aplikasi Minitab 16 *statistical software* digunakan dalam analisis data penelitian ini. Data komposisi lemak, total padatan, dan protein susu segar dari tiga wilayah berbeda dilakukan dengan *Analysis of Variance* (ANOVA) dan uji lanjut Tukey dengan taraf signifikansi 95%. Adanya perbedaan signifikan pada nilai F_0 yang dihasilkan, diketahui melalui uji T antar masing-masing nilai yang didapat dengan taraf signifikansi 95%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil komposisi susu segar

Data susu segar yang digunakan untuk melihat profil komposisi susu segar diambil pada rentang waktu sepanjang tahun 2022 dari 3 daerah penghasil susu segar di Indonesia, yaitu wilayah A yang berada Jawa Barat ($n=1092$), wilayah B yang berada Jawa Tengah ($n=280$), dan wilayah C yang berada Jawa Timur ($n=748$). Data kandungan lemak, total padatan, dan protein secara berturut-turut dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan data pada Tabel 1, terlihat adanya perbedaan yang nyata pada rata-rata kadar lemak susu yang berasal dari wilayah A dengan wilayah B dan C. Kadar lemak susu dipengaruhi oleh produktivitas atau rendemen dari susu yang dihasilkan oleh sapi. Pemberian pakan adalah salah satu faktor yang menentukan kuantitas dan kualitas susu yang dihasilkan sapi perah (Miarsono 2021). Craig *et al.* (2022) menjelaskan bahwa sapi dengan produksi rendemen yang tinggi menghasilkan susu dengan kadar lemak dan protein yang rendah yang kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi genetika sapi, pola makan, dan 'efek peng-

enceran' dari peningkatan produksi susu. Peningkatan pemberian pakan konsentrat berkaitan dengan penurunan persentase lemak susu (Alatas *et al.* 2015; Ewanckele *et al.* 2020). Pada nilai total padatan susu, terdapat perbedaan nyata antara ketiga wilayah. Wilayah C memiliki nilai rata-rata total padatan terbesar (12,1%), diikuti oleh wilayah A (11,7%) dan C (11,5%). Padatan dalam susu segar terdiri dari kadar lemak dan padatan susu bukan lemak yang meliputi protein, karbohidrat, laktosa, vita-min, dan mineral. Perubahan padatan susu bukan lemak ditentukan oleh kandungan laktosa dan protein di dalam susu. Semakin tinggi kandungan protein dan laktosa di dalam susu, maka dapat meningkatkan nilai padatan susu bukan lemaknya (Christi dan Rohayati 2017).

Terdapat perbedaan nyata antara wilayah C dengan wilayah A dan B untuk kadar protein pada susu. Peningkatan konsentrasi protein susu ditentukan oleh kualitas pakan, terutama kandungan karbohidrat, karena kandungan pati yang tinggi untuk penyediaan energi akan meningkatkan produksi protein susu (Magan *et al.* 2021).

Komposisi susu cair

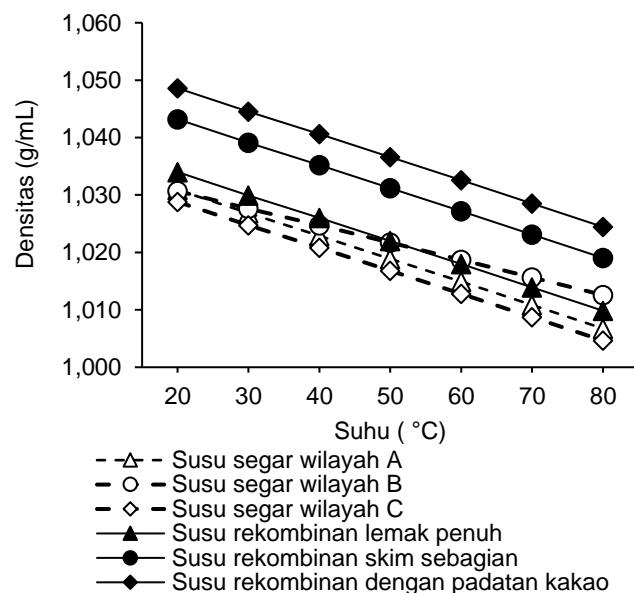
Nilai komposisi dari sampel susu cair yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Tabel 2 dan diketahui bahwa semua sampel susu yang dianalisis sudah memenuhi mutu yang dipersyaratkan, baik untuk susu segar yang telah sesuai SNI 31411:2011 (BSN 2011), dan untuk susu rekombinan yang telah sesuai Peraturan Badan POM 13 tahun 2023 (BPOM 2023). Hasil analisis komposisi sampel susu segar yang didapat memiliki nilai rata-rata yang dekat dengan data komposisi susu segar tahun 2022.

Densitas susu cair

Plot nilai hubungan densitas susu cair dengan suhu dapat dilihat pada Gambar 1, dan diketahui bahwa kadar lemak berbanding terbalik dengan densitas, sehingga semakin tinggi kadar lemaknya maka densitasnya semakin rendah. Faktor utama yang mem-

engaruhi densitas susu adalah komposisi susu. Suhendra *et al.* (2020) melaporkan bahwa peningkatan kadar lemak akan berpengaruh sebesar 70,8% terhadap nilai densitas susu.

Gambar 1 menjelaskan bahwa densitas susu akan semakin rendah seiring dengan meningkatnya suhu, yang sesuai dengan pernyataan Munir *et al.* (2016). Studi oleh Kumbar dan Nedomova (2015), menunjukkan hal yang sama pada hasil uji terhadap susu segar serta susu UHT dengan kadar lemak yang berbeda, yang setiap sampel uji menunjukkan terjadinya kecenderungan penurunan densitas ketika mendapat perlakuan suhu yang semakin tinggi. Nilai densitas susu pada suhu sterilisasi dapat dihitung dengan cara ekstrapolasi dari persamaan yang dihasilkan dari plot hubungan suhu dan densitas. Ekstrapolasi dapat dilakukan dengan pertimbangan bahwa hubungan antar kedua variabel tersebut bersifat linier.



Gambar 1. Plot hubungan suhu dan densitas berbagai sampel susu (susu segar dari wilayah A, B dan C, serta susu rekombinan lemak penuh, susu rekombinan skim sebagian, dan susu rekombinan dengan padatan kakao)

Tabel 1. Nilai kadar lemak, total padatan, dan protein susu segar dari tiga wilayah penghasil susu di Indonesia sepanjang tahun 2022

Sampel	Jumlah Sampel (n)	Lemak (%)	Total Padatan (%)	Protein (%)
Wilayah A	1092	3,6±0,15 ^b	11,7±0,14 ^c	2,9±0,04 ^b
Wilayah B	280	4,0±0,13 ^a	11,5±0,13 ^b	2,9±0,06 ^b
Wilayah C	748	4,0±0,13 ^a	12,1±0,19 ^a	3,0±0,06 ^a

Keterangan: Nilai rata-rata yang diikuti oleh huruf yang sama dalam kolom berarti tidak berbeda nyata satu sama lain ($\alpha=0,05$)

Tabel 2. Komposisi (kadar lemak, total padatan dan protein) sampel susu cair (segar dan hasil rekombinasi)

Sampel	n	Lemak (% b/b)		Total Padatan (% b/b)		Protein (% b/b)	
		Standar	Hasil	Standar	Hasil	Standar	Hasil
Susu segar wilayah A	3	>3,0	3,6±0,12	-	11,7±0,11	>2,8	2,9±0,04
Susu segar wilayah B	3	>3,0	4,1±0,11	-	11,5±0,08	>2,8	2,8±0,04
Susu segar wilayah C	3	>3,0	4,1±0,20	-	12,1±0,25	>2,8	3,0±0,04
Susu rekombinan lemak penuh	3	>3	3,2±0,04	>7,8	12,1±0,04	>2,7	3,0±0,03
Susu rekombinan skim sebagian	3	0,6-2,9	1,4±0,04	-	12,1±0,08	0,6-2,9	2,9±0,07
Susu rekombinan dengan padatan kakao	3	>2	2,2±0,06	>5,2	15,8±0,10	>2	2,4±0,04

Kompensasi suhu terhadap laju aliran

Pada desain proses termal yang disusun, pompa dan alat ukur laju aliran (*flow meter*) ditempatkan pada sisi produk sebelum sterilisasi dengan suhu produk 15 °C. Oleh karena itu, perlu dilakukan kompensasi pengaruh suhu terhadap laju aliran pada suhu target, yang dihitung dari konversi laju aliran volumetrik (*volumetric flow rate*) pompa yang digunakan ke laju aliran massa (*mass flow rate*) di suhu 15 °C. Laju aliran massa dikonversi menjadi laju aliran volumetrik pada suhu sterilisasi menggunakan Persamaan 1 yang telah dijelaskan sebelumnya. Referensi laju aliran volumetrik yang digunakan pada penelitian ini adalah 12.000 L/jam atau 0,03333 m³/detik. Hasil perhitungan kompensasi kenaikan suhu terhadap laju aliran dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, diketahui bahwa susu rekombinan skim sebagian dengan kadar lemak paling rendah memiliki dampak paling kecil terhadap laju aliran volumetrik, sedangkan susu segar wilayah C dengan kadar lemak terbesar memiliki laju aliran volumetrik terbesar. Hasil

ini sejalan dengan pernyataan Fernández-Martín (1972), bahwa muai panas produk susu dipengaruhi oleh kadar lemaknya, dan pemuaian akan lebih besar ketika proporsi lemak dalam produk lebih tinggi.

Sifat reologi susu dan sifat aliran fluida

Hasil pengukuran viskositas pada berbagai perlakuan gradien kecepatan menunjukkan kenaikan tegangan geser yang relatif linier terhadap gradien kecepatan pada semua suhu pengamatan. Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai indeks konsistensi (K) kurang dari satu dan nilai indeks tingkah laku aliran (n) sama dengan satu yang dapat dilihat pada Tabel 4. Apabila suatu fluida memiliki nilai n sama dengan 1 dan nilai K lebih dari 0 maka fluida tersebut dikelompokkan sebagai fluida Newtonian. Data yang didapat menunjukkan kecenderungan yang serupa dengan yang dilakukan oleh Morison *et al.* (2013) yaitu sampel susu dengan total padatan kurang dari 20% dapat dimodelkan sebagai fluida Newtonian.

Tabel 3. Kompensasi kenaikan suhu terhadap laju aliran

Sampel	Laju Aliran Massa di 15 °C (kg/detik)	Perhitungan Laju Aliran pada Suhu Sterilisasi		
		Suhu (°C)	Densitas (kg/m³)	Laju Aliran Volumetrik (m³/detik)
Susu segar wilayah A	0,003443	139,0	983,3	0,003501
		140,0	982,9	0,003503
		141,0	982,5	0,003504
		142,0	982,1	0,003506
Susu segar wilayah B	0,003441	139,0	995,0	0,003458
		140,0	994,7	0,003459
		141,0	994,4	0,003460
		142,0	994,1	0,003461
Susu segar wilayah C	0,003436	139,0	981,2	0,003502
		140,0	980,8	0,003503
		141,0	980,4	0,003505
		142,0	980,0	0,003506
Susu rekombinan lemak penuh	0,003453	139,0	986,4	0,003501
		140,0	986,0	0,003502
		141,0	985,6	0,003504
		142,0	985,2	0,003505
Susu rekombinan skim sebagian	0,003484	139,0	995,6	0,003499
		140,0	995,2	0,003501
		141,0	994,8	0,003502
		142,0	994,4	0,003504
Susu rekombinan dengan padatan kakao	0,003617	139,0	1001,3	0,003613
		140,0	1000,9	0,003614
		141,0	1000,5	0,003615
		142,0	1000,1	0,003617

Tabel 4. Nilai indeks tingkah laku aliran (n) dan indeks konsistensi (K)

Suhu (°C)	Susu Segar		Susu Rekombinan Lemak Penuh		Susu Rekombinan Skim Sebagian		Susu Rekombinan dengan Padatan Kakao	
	n	K (Pasⁿ)	n	K (Pasⁿ)	N	K (Pasⁿ)	n	K (Pasⁿ)
20	1,0230	0,0018	1,0209	0,0026	1,0133	0,0028	1,1010	0,0051
30	0,9938	0,0017	1,0200	0,0019	1,0124	0,0020	1,0560	0,0026
40	1,0677	0,0017	0,9890	0,0018	0,9740	0,0020	0,9950	0,0029
50	1,0468	0,0008	0,9310	0,0022	1,0020	0,0014	1,0730	0,0014
60	0,9048	0,0019	1,0070	0,0012	0,9140	0,0020	1,0230	0,0017
70	1,0505	0,0007	1,0460	0,0008	1,0040	0,0010	1,0390	0,0013
80	1,0357	0,0007	1,0330	0,0008	1,1250	0,0004	1,0550	0,0010

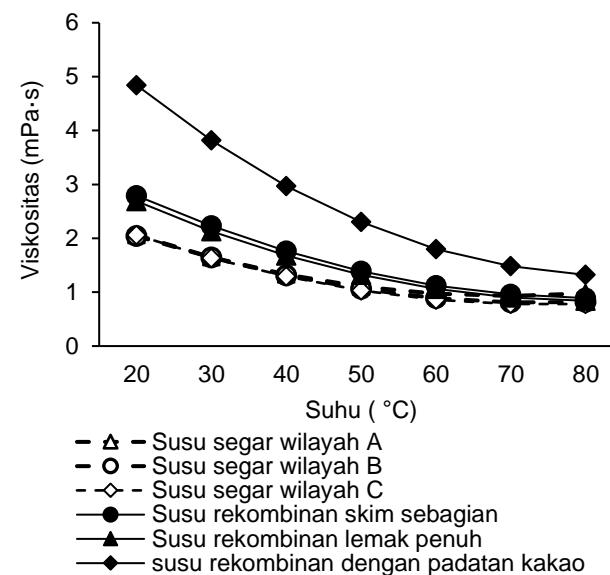
Viskositas susu cair

Nilai plot hubungan viskositas dan suhu dapat dilihat pada Gambar 2. Nilai viskositas lebih besar pada sampel dengan kandungan total padatan yang lebih besar yang terlihat pada hasil penelitian. Susu rekombinan dengan padatan kakao dengan nilai total padatan terbesar memiliki nilai viskositas terbesar yaitu 4,84 mPa.s. Hal ini sejalan dengan pernyataan Kelleher *et al.* (2018) dan Tsermoula *et al.* (2021) yaitu viskositas akan meningkat dengan meningkatnya total padatan. Sutariya *et al.* (2017) menjelaskan bahwa peningkatan viskositas secara linier pada nilai total padatan yang rendah disebabkan oleh jarak antar partikel yang lebih besar, yang memungkinkan lebih banyak ruang bagi partikel untuk bergerak bebas, yang kemudian menghasilkan viskositas yang lebih rendah. Peningkatan eksponensial viskositas pada nilai total padatan yang lebih tinggi dapat dikaitkan dengan kandungan protein yang lebih tinggi, sehingga jarak antar partikel (antar misel) menjadi jauh lebih kecil, karena interaksi misel-misel yang meningkat. Viskositas susu merupakan sifat reologi penting yang dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk suhu. Pengaruh suhu pada viskositas susu dikaitkan dengan penurunan interaksi antara molekul susu dan destabilisasi struktur protein. Penurunan viskositas susu terhadap kenaikan suhu juga ditemukan pada penelitian yang dilakukan oleh Cheng *et al.* (2022) yaitu pada suhu 4, 20, dan 50 °C, susu segar dan susu pasteurisasi mengalami penurunan viskositas seiring dengan peningkatan suhu.

Berdasarkan data yang diperoleh dalam penelitian ini, juga diketahui bahwa terdapat kecenderungan peningkatan nilai viskositas pada suhu 80 °C untuk beberapa sampel. Menurut Ranvir *et al.* (2021), denaturasi protein whey menjadi faktor penyebab peningkatan viskositas ketika susu mengalami proses perlakuan pasteurisasi atau UHT akibat pembentukan ikatan silang atau agregat. Ketika protein-protein mengalami denaturasi, daerah-daerah reaktif pada permukaan protein dapat terbuka. Interaksi ini dapat menghasilkan struktur yang lebih besar dan kompleks, yang menghambat pergerakan molekul dalam fluida dan menyebabkan peningkatan viskositas.

Komposisi total padatan memiliki pengaruh terhadap sifat reologi, dimana semakin banyak jumlah partikel maka tingkat interaksi partikel akan lebih tinggi (Arzuaga *et al.* 2021). Buggy *et al.* (2017) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa pada susu dengan

nilai total padatan yang tinggi, jarak antar molekul berkurang dan interaksi antara protein yang teradsorpsi dan yang tidak teradsorpsi pada permukaan droplet lemak akan meningkat. Interaksi ini dapat menyebabkan pembentukan droplet lemak dan emulsi yang lebih besar sehingga meningkatkan viskositas.



Gambar 2. Plot hubungan suhu dan viskositas berbagai sampel susu (susu segar dari wilayah A, B dan C, serta susu rekombinan lemak penuh, susu rekombinan skim sebagian, dan susu rekombinan dengan padatan kakao)

Nilai viskositas pada suhu sterilisasi kemudian diprediksi dengan persamaan Arrhenius (Tabel 5). Nilai R^2 yang lebih besar dari 0,90 menunjukkan bahwa hubungan suhu dan viskositas dapat dimodelkan dengan baik dengan persamaan Arrhenius. Penggunaan persamaan Arrhenius untuk menggambarkan perilaku reologi produk susu juga digunakan oleh Gonçalves *et al.* (2017). Ho *et al.* (2018) juga menunjukkan bahwa pemodelan Arrhenius terhadap perubahan viskositas larutan konsentrasi protein susu sebagai fungsi suhu memungkinkan untuk memprediksi denaturasi protein yang diinduksi secara termal, dan memprediksi viskositas berdasarkan kandungan protein selama perlakuan panas.

Bilangan Reynolds

Sifat aliran fluida pada suhu sterilisasi dihitung dari perkalian nilai densitas, diameter pipa, dan kecepatan fluida, yang kemudian dibagi dengan viskositas dinamisnya.

Tabel 5. Persamaan Arrhenius dari fungsi hubungan viskositas susu cair dan suhu

Sampel	Persamaan Arrhenius	R^2
Susu segar wilayah A	$\ln \eta = -11.001 + (1384,8) T^{-1}$	0,9034
Susu segar wilayah B	$\ln \eta = -12.025 + (1693,0) T^{-1}$	0,9604
Susu segar wilayah C	$\ln \eta = -12.338 + (1787,0) T^{-1}$	0,9631
Susu rekombinan lemak penuh	$\ln \eta = -13.126 + (2107,5) T^{-1}$	0,9904
Susu rekombinan skim sebagian	$\ln \eta = -12.964 + (2071,0) T^{-1}$	0,9918
Susu rekombinan dengan padatan kakao	$\ln \eta = -13.291 + (2334,1) T^{-1}$	0,9959

Pada fluida Newtonian, karena nilai viskositasnya tidak dipengaruhi gaya yang mengenainya, maka nilai indeks tingkah laku aliran (n) dan nilai konsistensi (K) tidak diperhitungkan secara matematis dalam perhitungan bilangan Reynolds. Oleh karena itu, pada perhitungan yang dilakukan untuk simulasi sistem UHT dengan diameter pipa 5,3 cm, panjang pipa 10 meter, dan setelan laju aliran pada pompa 12000 L/jam (3,33 L/detik), didapatkan hasil bahwa seluruh sampel pada semua perlakuan suhu memiliki sifat aliran turbulen dengan bilangan Reynolds lebih dari 10000 (Tabel 6).

Kecukupan proses termal susu cair

Sistem UHT yang digunakan dalam evaluasi kecukupan proses termal adalah dengan laju aliran tetap 12000 L/jam, diameter bagian dalam *holding tube* 5,3 cm dan panjang *holding tube* 10 m. Pengaturan suhu operasional berada dalam rentang suhu 139 hingga 142 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan komposisi sampel dan perlakuan suhu memiliki pengaruh pada densitas dan viskositas susu cair. Namun, dari perhitungan kecukupan proses UHT pada Tabel 7, dapat dilihat bahwa proses termal yang didesain secara umum sudah memenuhi persyaratan BPOM untuk tiap jenis produk yang dievaluasi dengan nilai F_0 lebih dari 3,0 menit untuk setiap suhu operasional. Selain persyaratan minimum nilai F_0 setara 3,0 menit, untuk mendapatkan susu steril komersial dari susu segar berkualitas baik, dalam praktiknya peralatan UHT

dirancang untuk mencapai nilai F_0 minimal 5 menit sebagai batas aman dari *botulinum cook* (Wells-Bennik *et al.* 2011). Nilai yang didapat dari desain proses UHT yang dilakukan sudah memenuhi nilai F_0 yang direkomendasikan tersebut. Nilai F_0 yang lebih tinggi dari yang dipersyaratkan ditujukan untuk memitigasi risiko spora tahan panas yang berada pada susu segar atau bahan baku lainnya.

KESIMPULAN

Susu segar dari Wilayah A (Jawa Barat), Wilayah B (Jawa Tengah) dan Wilayah C (Jawa Timur) memiliki profil komposisi lemak, protein yang berbeda. Nilai densitas, viskositas dan sifat reologi susu dipengaruhi oleh suhu dan persentase komposisi lemak dan total padatan. Semakin tinggi suhu, maka densitas dan viskositas susu akan semakin rendah. Perbedaan komposisi susu berpengaruh pada parameter reologi dan waktu tinggal minimum di dalam *holding tube*. Pada praktik sterilisasi dengan nilai F_0 berkisar antara 5,2–10,9 menit, komposisi susu segar dari wilayah A, B dan C, serta ketiga sampel susu rekombinan yang diteliti (yaitu susu rekombinan lemak penuh, susu rekombinan skim sebagian, dan susu rekombinan dengan padatan kakao), tidak berimplikasi pada keamanan pangan karena kecukupan proses termal tetap tercapai dengan nilai F_0 lebih dari 3,0 menit.

Tabel 6. Perhitungan bilangan Reynolds

Sampel	Suhu (°C)	Densitas (kg/m³)	Viskositas Dinamis (Pa.s)	Laju Aliran (m³/detik)	Kecepatan Aliran Rata-Rata (m/detik)	Bilangan Reynolds
Susu segar wilayah A	139,0	983,3	0,000481	0,003501	1,5879	172,080
	140,0	982,9	0,000477	0,003503	1,5886	173,486
	141,0	982,5	0,000473	0,003504	1,5892	174,897
	142,0	982,1	0,000469	0,003506	1,5899	176,312
Susu segar wilayah B	139,0	995,0	0,000365	0,003458	1,5682	226,608
	140,0	994,7	0,000361	0,003459	1,5687	228,874
	141,0	994,4	0,000358	0,003460	1,5691	231,151
	142,0	994,1	0,000354	0,003461	1,5696	233,440
Susu segar wilayah C	139,0	981,2	0,000335	0,003502	1,5881	246,339
	140,0	980,8	0,000332	0,003503	1,5887	248,940
	141,0	980,4	0,000328	0,003505	1,5894	251,555
	142,0	980,0	0,000325	0,003506	1,5900	254,185
Susu rekombinan lemak penuh	139,0	986,4	0,000332	0,003501	1,5829	249,344
	140,0	986,0	0,000328	0,003502	1,5836	252,451
	141,0	985,6	0,000324	0,003504	1,5842	255,582
	142,0	985,2	0,000320	0,003505	1,5849	258,736
Susu rekombinan skim sebagian	139,0	995,6	0,000357	0,003499	1,5870	234,455
	140,0	995,2	0,000353	0,003501	1,5876	237,326
	141,0	994,8	0,000349	0,003502	1,5883	240,218
	142,0	994,4	0,000344	0,003504	1,5889	243,131
Susu rekombinan dengan padatan kakao	139,0	1001,3	0,000488	0,003613	1,6383	178,254
	140,0	1000,9	0,000481	0,003614	1,6390	180,716
	141,0	1000,5	0,000475	0,003615	1,6396	183,200
	142,0	1000,1	0,000468	0,003617	1,6403	185,706

Tabel 7. Perhitungan kecukupan proses termal

Sampel	Suhu (°C)	Kecepatan Maksimum (m/detik)	Waktu Tinggal Minimum (detik)	F_0 (menit)	Kecukupan Proses Termal
Susu segar wilayah A	139,0	1,9055	5,248	5,4	Cukup
	140,0	1,9063	5,246	6,8	Cukup
	141,0	1,9071	5,244	8,5	Cukup
	142,0	1,9078	5,242	10,7	Cukup
Susu segar wilayah B	139,0	1,8818	5,314	5,5	Cukup
	140,0	1,8824	5,312	6,9	Cukup
	141,0	1,8830	5,311	8,6	Cukup
	142,0	1,8835	5,309	10,9	Cukup
Susu segar wilayah C	139,0	1,9057	5,247	5,4	Cukup
	140,0	1,9065	5,245	6,8	Cukup
	141,0	1,9073	5,243	8,5	Cukup
	142,0	1,9080	5,241	10,7	Cukup
Susu rekombinan lemak penuh	139,0	1,9052	5,249	5,4	Cukup
	140,0	1,9060	5,247	6,8	Cukup
	141,0	1,9068	5,244	8,5	Cukup
	142,0	1,9075	5,242	10,7	Cukup
Susu rekombinan skim sebagian	139,0	1,9044	5,251	5,4	Cukup
	140,0	1,9051	5,249	6,8	Cukup
	141,0	1,9059	5,247	8,5	Cukup
	142,0	1,9067	5,245	10,8	Cukup
Susu rekombinan dengan padatan kakao	139,0	1,9660	5,087	5,2	Cukup
	140,0	1,9668	5,084	6,6	Cukup
	141,0	1,9675	5,082	8,3	Cukup
	142,0	1,9683	5,080	10,4	Cukup

DAFTAR PUSTAKA

- Alatas MS, Citil OB, Kahraman O, Ozbilgin A. 2015. Causes of milk fat depression in dairy cows. *Anim Sci.* 58: 80–85.
- Arzuaga MR, Aalaei K, da Silva DF, Barjon S, Añón MC, Abraham AG, Ahrné L. 2021. Infant milk formulae processing: effect of wet-mix total solids and heat treatment temperature on rheological, emulsifying and nutritional properties. *J Food Eng.* 290: 110194. doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.110194
- Bista A, Tobin JT, O'Donnell CP, O'Shea N. 2020. Monitoring viscosity and total solids content of milk protein concentrate using an inline acoustic flowmeter at laboratory scale. *Foods.* 9(9): 1310. doi:10.3390/foods9091310
- Božíková M, Hlaváč P. 2013. Temperature and storing time influence on selected physical properties of milk and acidophilus milk. *Acta Univ Agric Fac Agron.* 61 (6): 1589–1595. doi:10.11118/actaun201361061589
- [BPOM] Badan Pengawas Obat dan Makanan. 2023. Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Nomor 13 Tahun 2023 tentang Kategori Pangan. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan.
- [BPOM] Badan Pengawas Obat dan Makanan. 2019. Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Nomor 19 Tahun 2019 Tentang Pedoman Cara Produksi yang Baik untuk Pangan Steril Komersial yang Diolah dan Dikemas secara Aseptik. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan.
- [BPOM] Badan Pengawas Obat dan Makanan. 2016. 2021. Peraturan Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2021 Tentang Persyaratan Pangan Olahan Berasam Rendah Dikemas Hermetis. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2011. SNI 3141. 1:2-11. Susu Segar–Bagian 1: Sapi. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Buggy AK, McManus JJ, Brodkorb A, Mc Carthy N, Fenelon MA. 2017. Stabilising effect of α -lactalbumin on concentrated infant milk formula emulsions heat treated pre- or post-homogenisation. *Dairy Sci Technol.* 96: 845–859. doi:10.1007/s13594-016-0306-1
- Chen B, Lewis MJ, Grandison AS. 2014. Effect of seasonal variation on the composition and properties of raw milk destined for processing in the UK. *Food Chem.* 158: 216–223. doi:10.1016/j.foodchem.2014.02.118
- Cheng N, Barbano DM, Drake MA. 2022. Effect of pasteurization and fat, protein, casein to serum protein ratio, and milk temperature on milk beverage color and viscosity. *J Dairy Sci.* 102 (3): 2022–2043. doi:10.3168/jds.2018-15739

- Christi RF, Rohayati T. 2017. Kadar protein, laktosa, dan bahan kering tanpa lemak susu kambing peranakan etawa yang diberi konsentrat terfermentasi. *JANHUS: J Ilmu Peternakan (J Anim Husbandry Sci)*. 1 (2): 19–27. doi:10.52434/janhus.v1i2.243
- Craig A-L, Gordon AW, Hamill G, Ferris CP. 2022. Milk composition and production efficiency within feed-to-yield systems on commercial dairy farms in Northern Ireland. *Animals*. 12 (14): 1771. doi:10.3390/ani12141771
- da Silva KP, dos Santos EC, Gonçalves RFS, Beirão ATM, Carvalho FIM, da Rocha HO, da Silva Barbosa SB, Pamplona VMS, Rodrigues AE, da Silva Lobato F. 2021. Development of a low-cost prototype: Pitot tube designed to measure the mass and the volumetric flow rates of fluids. *Int J Innov Educ Res.* 9 (8): 328–337. doi:10.31686/ijier.vol9.iss8.3302
- Dash KK, Fayaz U, Dar AH, Shams R, Manzoor S, Sundarsingh A, Deka P, Khan SA. 2022. A comprehensive review on heat treatments and related impact on the quality and microbial safety of milk and milk-based products. *Food Chem Advances*. 1: 100041. doi:10.1016/j.focha.2022.100041
- Dewanckele L, Toral PG, Vlaeminck V, Fievez V. 2020. *Invited review: Role of rumen biohydrogenation intermediates and rumen microbes in diet-induced milk fat depression: An update*. *J Dairy Sci*. 103 (9): 7655–7681. doi:10.3168/jds.2019-17662
- Fernández-Martín F. 1972. Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrates. *J Dairy Res*. 39 (1): 75–82. doi:10.1017/S0022029900013868
- Gastélum-Barrios A, Soto-Zarazúa GM, Escamilla-García A, Toledano-Ayala M, Macías-Bobadilla G, Jauregui-Vazquez D. 2020. Optical methods based on ultraviolet, visible, and near-infrared spectra to estimate fat and protein in raw milk: a review. *Sensors*. 20 (12): 33–56. doi:10.3390/s20123356
- Gonçalves BJ, Pereira CG, Lago AMT, Gonçalves CS, Giarola TMO, Abreu LR, Resende JV. 2017. Thermal conductivity as influenced by the temperature and apparent viscosity of dairy products. *J Dairy Sci*. 100 (5): 3513–3525. doi:10.3168/jds.2016-12051
- Ho QT, Murphy KM, Drapala KP, O'Callaghan TF, Fenelon MA, O'Mahony JA, McCarthy NA. 2018. Effect of pH and heat treatment on viscosity and heat coagulation properties of milk protein concentrate. *Int Dairy J*. 85: 219–224. doi:10.1016/j.idairyj.2018.05.012
- Islam MA, Roy S, Nabi A, Solaiman S, Rahman, M, Huq M, Siddiquee NA, Ahmed N. 2018. Microbiological quality assessment of milk at different stages of the dairy value chain in a developing country setting. *Int J Food Microbiol*. 278: 11–19. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.028
- Kelleher CM, O'Mahony JA, Kelly AL, O'Callaghan DJ, McCarthy NA. 2018. Evaluation of models for temperature-dependent viscosity changes in dairy protein beverage formulations during thermal processing. *J Food Sci*. 83 (4): 937–945. doi:10.1111/1750-3841.14097
- Khetra Y, Kisan BS, Ganguly S, Hussain, SA. 2018. *Rheology of Dairy Products. Compendium of Lectures*. Center of Advanced Faculty Training on Nano-Technological and Biochemical Techniques for Assessing the Quality and Safety of Milk and Milk Products. Gandhi K, Seth, R, Sharma R, editors. *Dairy Chemistry Division, ICAR-National Dairy Research Institut, Haryana, India*. India: hlm 99.
- Kumbar V, Nedomova S. 2015. Viscosity and analytical differences between raw milk and UHT milk of Czech cows. *Sci Agric Biochem*. 46 (2): 78–83. doi:10.1515/sab-2015-0020
- Li X, Huo G, Wang Y, Sun H, Kong Q. 2016. Research on rapid detection method of protein and fat in raw milk based on mid-infrared spectrum. *Int J Multimed Ubiquitous*. 11 (10): 131–142. doi:10.14257/ijmue.2016.11.10.12
- Magan JB, O'Calaghan TF, Kelly AL, McCarthy NA. 2021. Compositional and functional properties of milk and dairy products derived from cows fed pasture or concentrate-based diets. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 20 (3): 2769–2800. doi:10.1111/1541-4337.12751
- Messaâdi A, Dhouibi N, Hamda H, Belgacem FBN, Adbelkader YH, Ouerfelli N, Hamzaoui AH. 2015. A new equation relating the viscosity arrhenius temperature and the activation energy for some newtonian classical solvents. *J Chem*. 2015 (1): 163262. doi:10.1155/2015/163262
- Mezger T. 2018. *The Rheology Handbook 4th Edition*, hal 31. Graz: Anton Paar GmbH.
- Miarsono S, Putri WR, Pratama JWA. 2021. Perbandingan kadar lemak, protein dan bahan kering tanpa lemak (BKTL) pada susu sapi segar di Kota Kediri dan Kabupaten Kediri. *J Ilmiah Fillia Cendekia*. 6 (1): 31–35. doi:10.32503/fillia.v6i1.1401
- Morison KR, Phelan JP, Bloore CG. 2013. Viscosity and non-newtonian behaviour of concentrated milk and cream. *Int J Food Prop*. 16 (4): 882–894. doi:10.1080/10942912.2011.573113

- Munir MT, Zhang Y, Yu W, Wilson DI, Young BR. 2016. Virtual milk for modelling and simulation of dairy processes. *J Dairy Sci.* 99 (5): 3380–3395. doi:10.3168/jds.2015-10449
- Parmar P, Lopez-Villalobos N, Tobin JT, Murphy E, Buckley F, Crowley SV, Kelly AL, Shalloo L. 2021. Effect of temperature on raw whole milk density and its potential impact on milk payment in the dairy industry. *Int J Food Sci Technol.* 56 (5): 2415–2422. doi:10.1111/ijfs.14869
- Ranvir S, Sharma R, Gandhi K, Nikam P, Mann B. 2021. Physico-chemical changes during processing and storage of UHT milk. *Indian J Dairy Sci.* 74 (1): 39–47. doi:10.33785/IJDS.2021. v74i01.005
- Suhendra D, Nugraha WT, Nugraheni YLRE, Hartati L. 2020. Korelasi kadar lemak dan laktosa dengan berat jenis susu sapi friesian holstein di Kecamatan Ngablak Kabupaten Magelang. *Agrinimal.* 8 (2): 88–91. doi:10.30598/ajitt.2020.8.2.88-91
- Sutariya SG, Huppertz T, Patel HA. 2017. Influence of milk pre-heating conditions on casein-whey protein interactions and skim milk concentrate viscosity. *Int Dairy J.* 69: 19–22. doi:10.1016/j.idairyj.2017.01.007
- Tančin V, Miklás S, Čobirka B, Uhrinča M, Mačuhová L. 2020. Factors affecting raw milk quality of dairy cows under practical conditions. *Potravnarstvo Slovak J Food Sci.* 14: 744–749. doi:10.5219/1336
- Tsermoula P, Drapala KP, Joyce AM, Hoare K, Crowley SV, O'Mahony JA. 2021. The impact of protein standardisation with liquid or powdered milk permeate on the rheological properties of skim milk concentrate. *Int Dairy J.* 119: 1–7. doi:10.1016/j.idairyj.2021.104982
- Wells-Bennik MHJ, Janssen PWM, Klaus V, Yang C, Zwietering MH, Den Besten HMW. 2019. Heat resistance of spores of 18 strains of *Geobacillus stearothermophilus* and impact of culturing conditions. *Int J Food Microbiol.* 291: 161–172. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.11.005

JMP-07-23-17-Naskah diterima untuk ditelaah pada 12 Juli 2023. Revisi makalah disetujui untuk dipublikasi pada 20 November 2024. Versi Online: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jmpi>