

**KARAKTERISTIK PEMANASAN OHMIK, SIFAT FUNGSIONAL DAN  
FISIKOKIMIA PADA TELUR CAIR DAN TEPUNG TELUR**

**OHMIC HEATING CHARACTERISTICS, FUNCTIONAL AND  
PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF LIQUID EGGS AND EGG  
POWDER**



**RISWITA SYAMSURI  
P013202004**



**PROGRAM STUDI ILMU PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**KARAKTERISTIK PEMANASAN OHMIK, SIFAT FUNGSIONAL DAN  
FISIKOKIMIA PADA TELUR CAIR DAN TEPUNG TELUR**

**RISWITA SYAMSURI  
P013202004**



**PROGRAM STUDI ILMU PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**KARAKTERISTIK PEMANASAN OHMIK, SIFAT FUNGSIONAL DAN  
FISIKOKIMIA PADA TELUR CAIR DAN TEPUNG TELUR**

Disertasi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program Studi Ilmu Pertanian

Disusun dan diajukan oleh

RISWITA SYAMSURI  
NIM P013202004

kepada

**PROGRAM STUDI ILMU PERTANIAN  
SEKOLAH PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2024**

**DISERTASI**

**KARAKTERISTIK PEMANASAN OHMIK, SIFAT FUNGSIONAL DAN  
FISIKOKIMIA PADA TELUR CAIR DAN TEPUNG TELUR**

**RISWITA SYAMSURI  
P013202004**

telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Doktor pada 10 Oktober 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Ilmu Pertanian  
Sekolah Pascasarjana  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan:

Promotor,

  
Prof. Dr. Ir. Salengke, M.Sc  
NIP. 19631231 198811 1 005

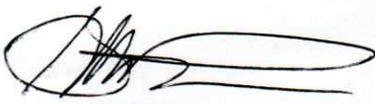
Ko-Promotor,

  
Prof. Dr. Ir. Amran Laga, M.Si  
NIP. 19621231 198803 1 020

Ko-Promotor,

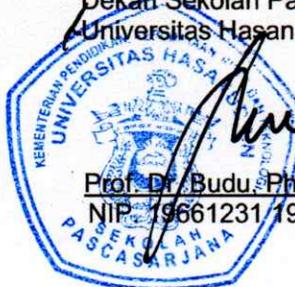
  
Prof. Ir. Andi Dirpan, S.TP, M.Si, Ph.D  
NIP. 19820208 200604 1 003

Ketua Program Studi  
Ilmu Pertanian

  
Prof. Dr. Agr. SC. Ir. Baharuddin  
NIP. 19601224 198601 1 001

Dekan Sekolah Pascasarjana  
Universitas Hasanuddin

  
Prof. Dr. Budu, Ph.D., Sp.M (K), M.MedEd.  
NIP. 19661231 199503 1 009



## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, disertasi berjudul "Karakteristik Pemanasan Ohmik, Sifat Fungsional dan Fisikokimia pada Telur Cair dan Tepung Telur" adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing (Prof. Dr. Ir. Salengke, M.Sc sebagai Promotor, Prof. Dr. Ir. Amran Laga, M.Si. sebagai co-promotor 1 serta Prof. Ir. Andi Dirpan, S.TP, M.Si, Ph.D sebagai co-promotor 2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1230 (2023), <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012128> dengan judul "An Overview of Ohmic Heating Utilization in the Processing of Food" dan artikel kedua pada *Indonesian Food Science and Technology Journal*, 7 (2), 180-187. <https://doi.org/10.22437/lfstj.v7i2.33865> dengan judul "Characteristics of Isothermic Sorption Curves and Determination of the Best Equation Model for Egg Flour". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 22 Oktober 2024



Riswita Syamsuri  
NIM P013202004

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa dengan selesainya disertasi ini. Banyak kendala yang saya hadapi selama masa studi ini, yang hanya berkat bantuan berbagai pihak, maka disertasi ini dapat selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini saya dengan tulus menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya dan ucapan terima kasih kepada yang terhormat Prof. Dr. Ir. Salengke, M.Sc sebagai promotor, Prof. Dr. Ir. Amran Laga, M.Si sebagai ko-promotor 1 dan Prof. Ir. Andi Dirpan, S.TP, M.Si, Ph.D sebagai ko-promotor 2 atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari pengembangan minat terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitian hingga sampai dengan penulisan disertasi ini. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Kepala Balai Penerapan Standar Instrumen Pertanian (BPSIP) Sulawesi Selatan yang telah memberikan saya kesempatan dan ijin untuk mengikuti pendidikan program doktor dan khususnya kepada Badan Standardisasi Instrumen Pertanian (BSIP) Kementerian Pertanian yang telah memberikan beasiswa selama saya menempuh jenjang pendidikan doktor. Terima kasih juga kepada Prof. Dr. Agr. SC. Ir. Baharuddin, selaku ketua Program Studi Ilmu Pertanian dan Prof. Dr. Budu, Ph.D., Sp.M (K)., M.MedEd selaku Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Akhirnya saya ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada Ayahanda (Alm) Syamsuri dan Ibunda Dra. Hj. Nurdaya Tamin atas doa, pengorbanan dan dukungan yang tidak terhitung hingga saya mampu berada pada titik ini. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada suami tercinta, Mayor Inf. Ilham, M.SS yang telah memberikan dukungan, kesabaran, dan motivasi yang tak ternilai sepanjang perjalanan ini. Terima kasih juga saya sampaikan kepada kedua anak saya, Ahmad Faizzaki Mahawiryia Ilham dan Nayla Qunnisa Adzkiya Ilham yang telah sabar dan memahami selama proses ini, serta kepada saudara-saudara saya, Dr. Prayudi Syamsuri, SP,M.Si, Dr. Helmy Syamsuri, SE, M.Si dan Harmi Syamsuri, ST yang telah memberikan dukungan dan semangat. Terima kasih yang mendalam juga saya sampaikan kepada seluruh keluarga besar H. Alimuddin dan keluarga besar Tamin Chairan, teman dan sahabat saya, rekan sejawat S3 Ilmu Pertanian dan khususnya rekan- rekan sejawat BPSIP Sulawesi Selatan.

Semua dukungan dan semangat yang telah diberikan oleh berbagai pihak tersebut menjadi sumber inspirasi dan motivasi yang besar bagi saya dalam menyelesaikan disertasi ini. Saya berharap hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi yang berarti bagi perkembangan ilmu pengetahuan dalam bidang pertanian

Penulis,

Riswita Syamsuri

## ABSTRAK

Riswita Syamsuri. **Karakteristik Pemanasan Ohmik, Sifat Fungsional dan Fisikokimia pada Telur Cair dan Tepung Telur** (dibimbing oleh Salengke, Amran Laga dan Andi Dirpan).

Telur adalah salah satu sumber protein berkualitas tinggi yang sering digunakan dalam industri makanan maupun rumah tangga. Namun telur mudah rusak, terutama akibat pecahnya cangkang selama penanganan di kandang dan pengangkutan. Kerusakan ini menyebabkan menurunnya kualitas telur dan kerugian ekonomi bagi peternak. Telur pecah dijual dengan harga lebih murah dan potensial menimbulkan masalah kesehatan akibat kontaminasi. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pasteurisasi untuk mengatasi masalah tersebut dengan menggunakan teknologi pemanasan ohmik. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengevaluasi kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmik dan sifat reologi telur cair; (2) Mengevaluasi karakteristik pemanasan ohmik selama pasteurisasi telur cair dan pengaruhnya terhadap sifat fungsional dan fisikokimia telur cair; (3) Mengevaluasi karakteristik sifat fungsional dan fisikokimia tepung telur yang dihasilkan dari pengeringan oven dan pengeringan vakum; (4) Mengevaluasi karakteristik kurva sorpsi isoteremis dan menentukan model persamaan yang tepat untuk menggambarkan kurva sorpsi isoteremis pada berbagai jenis tepung telur. Penelitian dilakukan dalam empat tahapan. Tahap pertama telur cair dipasteurisasi menggunakan pemanasan ohmik pada suhu 50°C, 60°C, dan 70°C dengan durasi 3, 5, dan 7 menit pada tegangan 20 V/cm. Tahap kedua dilakukan pemanasan ohmik untuk putih, kuning dan telur utuh pada suhu 60°C selama 5 menit dengan menggunakan tegangan yang berbeda (15 V/cm, 20 V/cm dan 25 V/cm). Tahap ketiga, telur cair yang telah dipasteurisasi dikeringkan menggunakan dua metode pengeringan yaitu pengeringan oven (suhu 45°C selama 10 jam) dan pengeringan vakum (suhu 45°C selama 14 jam) untuk menghasilkan tepung telur. Tahap keempat, penyimpanan tepung telur dalam desikator dengan tingkat kelembaban yang bervariasi (10-80%) pada suhu 30°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanasan ohmik efektif menginaktivasi mikroorganisme, termasuk *Salmonella* dan menyebabkan perubahan sifat reologi telur cair menjadi non-Newtonian *pseudoplastic*. Pemanasan ohmik meningkatkan laju pemanasan, konduktivitas listrik, dan viskositas telur, serta mengurangi waktu koagulasi, menurunkan emulsifikasi kuning telur dan mempertahankan stabilitas busa putih telur. Meskipun kadar protein menurun seiring peningkatan tegangan, kadar lemak tetap stabil. Pemanasan ohmik juga mempengaruhi warna dan pH telur cair. Jenis pengeringan (oven dan vakum) tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap tepung telur yang dihasilkan. Namun, jenis tepung (putih telur, kuning telur, atau telur utuh) lebih mempengaruhi sifat fungsional dan fisikokimia tepung telur. Kurva sorpsi isoteremis tepung telur bertipe adsorpsi sigmoid, dan model Oswin paling tepat menggambarkan pola sorpsi isoteremis pada semua jenis tepung telur. Hasil ini mendukung penggunaan pemanasan ohmik sebagai alternatif pasteurisasi yang efisien dan efektif, serta memberikan kontribusi pada pengetahuan dalam pengolahan dan penyimpanan produk telur untuk memastikan kualitas dan keamanan pangan yang optimal.

Kata kunci : Fisikokimia, pemanasan ohmik, telur cair, tepung telur, sifat fungsional.

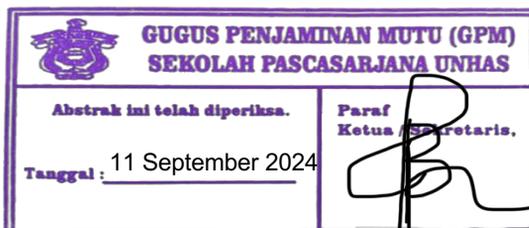


## ABSTRACT

Riswita Syamsuri. **Ohmic Heating Characteristics, Functional and Physicochemical Properties of Liquid Eggs and Egg Powder** (supervised by Salengke, Amran Laga, and Andi Dirpan)

Eggs are a source of high-quality protein often used in the food industry and households. However, eggs are easily damaged, especially due to shell breakage during handling in cages and transportation. This damage leads to reduced egg quality and economic losses for the farmer. Broken eggs are sold at lower prices and have the potential to cause health problems due to contamination. Therefore, pasteurization technology is needed to overcome these problems by using ohmic heating technology. This research aims to (1) evaluate the kinetics of microbial inactivation by ohmic heating and the rheological properties of liquid eggs; (2) Evaluate the characteristics of ohmic heating during pasteurization of liquid eggs and its effect on the functional and physicochemical properties of liquid eggs; (3) Evaluate the characteristics of functional and physicochemical properties of egg powders produced from oven drying and vacuum drying; (4) Evaluate the characteristics of isothermic sorption curves and determine the appropriate equation model to describe isothermic sorption curves in various types of egg powders. The research was conducted in four phases. In the first phase, liquid eggs were pasteurized using ohmic heating at 50°C, 60°C, and 70°C for 3, 5, and 7 minutes at a voltage gradient of 20 V/cm. In the second phase, ohmic heating was carried out for white, yellow, and whole eggs at 60°C for 5 minutes using different voltages (15 V/cm, 20V/cm, and 25 V/cm). In the third phase, pasteurized liquid eggs were dried using two drying methods, namely oven drying (temperature 45°C for 10 hours) and vacuum drying (temperature 45°C for 14 hours) to produce egg powder. In the final phase, egg powder was stored in a desiccator with varying humidity levels (10-80%) at 30°C. The results showed that ohmic heating effectively inactivated microorganisms, including Salmonella, and caused a change in the rheological properties of liquid eggs to non-Newtonian pseudoplastic. Ohmic heating increased eggs' heating rate, electrical conductivity, and viscosity, reduced coagulation time, decreased yolk emulsification, and maintained egg white foam stability. Although protein content decreased as voltage increased, fat content remained stable. Ohmic heating also affects the color and pH of liquid eggs. The drying method (oven and vacuum) did not significantly affect the egg powder produced. However, the powder type (egg white, egg yolk, or whole egg) affected egg flour's functional and physicochemical properties more. The sorption isotherm curves of egg flours were of sigmoid adsorption type, and the Oswin model best described the sorption isotherm patterns of all types of egg powders. These results support the use of ohmic heating as an efficient and effective alternative to pasteurization and contribute to knowledge in the processing and storage of egg products to ensure optimal food quality and safety.

Keywords: Egg powder, functional properties, liquid eggs, ohmic heating, physicochemical.



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGAJUAN.....</b>	<b>ii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....</b>	<b>iv</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xiii</b>

### **BAB I**

<b>PENDAHULUAN UMUM.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	10
1.3. Tujuan Penelitian .....	11
1.4. Kegunaan Penelitian .....	11
1.5. Ruang Lingkup Penelitian .....	11
1.6. Kebaruan Penelitian.....	12
1.7. Kerangka Konseptual.....	13

### **BAB II**

<b>KINETIKA INAKTIVASI MIKROBA DENGAN PEMANASAN OHMIC DAN SIFAT REOLOGI TELUR CAIR .....</b>	<b>14</b>
2.1. Pendahuluan .....	14
2.2. Bahan dan Metode Penelitian .....	16
2.3. Hasil dan Pembahasan .....	19
2.4. Kesimpulan .....	30
2.5. Daftar Pustaka .....	30

### **BAB III**

<b>KARAKTERISTIK SISTEM PEMANASAN OHMIC PADA TELUR .....</b>	<b>35</b>
3.1. Pendahuluan .....	35
3.2. Bahan dan Metode Penelitian .....	37
3.3. Hasil dan Pembahasan .....	43
3.4. Kesimpulan .....	60
3.5. Daftar Pustaka .....	61

<b>BAB IV</b>	
<b>KARAKTERISTIK SIFAT FUNGSIONAL DAN FISIKOKIMIA TEPUNG TELUR</b>	
<b>DENGAN METODE PENDINGINAN OVEN DAN VAKUM.....</b>	<b>65</b>
4.1.    Pendahuluan .....	65
4.2.    Bahan dan Metode Penelitian .....	67
4.3.    Hasil dan Pembahasan .....	71
4.4.    Kesimpulan .....	81
4.5.    Daftar Pustaka .....	82
<b>BAB V</b>	
<b>KARAKTERISTIK KURVA SORPSI ISOTERMIS DAN PENENTUAN MODEL</b>	
<b>PERSAMAAN TERBAIK UNTUK TEPUNG TELUR.....</b>	<b>85</b>
4.1.    Pendahuluan .....	85
4.2.    Bahan dan Metode Penelitian .....	87
4.3.    Hasil dan Pembahasan .....	90
4.4.    Kesimpulan .....	97
4.5.    Daftar Pustaka .....	98
<b>BAB VI</b>	
<b>PEMBAHASAN UMUM.....</b>	<b>100</b>
<b>BAB VII</b>	
<b>KESIMPULAN UMUM.....</b>	<b>107</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>109</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>115</b>

## DAFTAR TABEL

No.Urut		Halaman
1.1.	Komposisi kimia telur ayam	1
2.1.	pH, total mikroba, dan <i>Salmonella</i> telur ayam cair dengan perlakuan suhu dan waktu pemanasan ohmic yang berbeda	19
2.2.	Nilai Parameter estimasi dan koefisien determinasi dari persamaan inaktivasi orde pertama yang dikombinasikan dengan persamaan model arrhenius	21
2.3.	Indeks aliran (n) dan koefisien konsistensi (k) telur cair dengan suhu dan lama pemanasan ohmic berbeda	26
2.4.	Energi aktivasi telur cair dengan suhu dan lama pemanasan ohmic berbeda	29
3.1.	Kombinasi perlakuan pasteurisasi dengan pemanasan ohmik	38
3.2.	Parameter yang digunakan pada perhitungan konsumsi energi	40
3.3.	Model persamaan linear laju pemanasan ohmik dan konduktivitas listrik telur ayam cair	47
3.4.	Koefisien performansi (SPC) dari telur ayam cair	48
4.1.	Syarat mutu tepung telur	66
4.2.	Kombinasi perlakuan penelitian	68
5.1.	Kelembaban relatif dan nilai aktivitas air dari larutan garam jenuh	87
5.2.	Nilai Kadar air kesetimbangan tepung telur pada beberapa nilai $a_w$	90
5.3.	Parameter penentuan model sorpsi isothermis terbaik tepung telur	94

## DAFTAR GAMBAR

No.Urut		Halaman
1.1.	Komponen dalam telur ayam	2
1.2.	Kerangka pikir penelitian	13
2.1.	<i>Fitting</i> data survival ratio ( <i>scatter</i> ) mikroba telur ayam cair pemanasan ohmic terhadap data persamaan model inaktivasi orde pertama dikombinasikan dengan persamaan Arrhenius ( <i>line</i> )	20
2.2.	Kurva aliran telur pada pemanasan suhu reologi 30 <sup>0</sup> C dan 50 <sup>0</sup> C	23
2.3.	Kurva aliran telur pada pemanasan reologi 70 <sup>0</sup> C: (A) pemanasan ohmik suhu 50 <sup>0</sup> C; (B) pemanasan ohmik suhu 60 <sup>0</sup> C; (C) pemanasan ohmik suhu 70 <sup>0</sup> C	24
2.4.	Apparent viskositas pada pemanasan suhu reologi 30 <sup>0</sup> C dan 50 <sup>0</sup> C	27
2.5.	Apparent viskositas pada pemanasan suhu reologi 70 <sup>0</sup> C: (A) suhu pemanasan ohmik 50 <sup>0</sup> C; (B) suhu pemanasan ohmik 60 <sup>0</sup> C; (C) suhu pemanasan ohmik 70 <sup>0</sup> C	28
3.1.	Ilustrasi pemasanan ohmik dan perekaman data	38
3.2.	Diagram alir penelitian	39
3.3.	Laju pemanasan selama pemanasan ohmic : (A) putih telur; (B) kuning telur; (C) telur utuh.	44
3.4.	Konduktivitas listrik telur cair selama pemanasan ohmic: (A) putih telur; (B) kuning telur; (C) telur utuh	46
3.5.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap waktu koagulasi telur cair	49
3.6.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap emulsi	50
3.7.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap daya busa	51
3.8.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap stabilitas busa	52
3.9.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap warna (A) kromasitas L*; (B) kromasitas a*; (C) kromasitas b*	55
3.10.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap viskositas	56

No.Urut		Halaman
3.11.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap nilai pH	57
3.12.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap kadar protein	59
3.13.	Hubungan bagian telur dan tegangan ohmik terhadap kadar lemak	59
4.1.	Diagram alir penelitian	68
4.2.	Hubungan jenis pengeringan dengan jenis tepung terhadap waktu koagulasi	71
4.3.	Hubungan jenis tepung terhadap daya emulsi	73
4.4.	Hubungan jenis pengeringan dengan jenis tepung terhadap daya busa	73
4.5.	Hubungan jenis pengeringan dengan jenis tepung terhadap stabilitas busa	75
4.6.	Hubungan jenis tepung terhadap kadar air	76
4.7.	Hubungan jenis pengeringan dengan jenis tepung terhadap warna (A) kromasitas L*; (B) kromasitas a*; (c) kromasitas b*	79
4.8.	Hubungan jenis pengeringan dengan jenis tepung terhadap protein	80
4.9.	Hubungan jenis pengeringan dengan jenis tepung terhadap lemak	81
5.1.	Desikator yang berisi larutan garam jenuh	88
5.2.	Penyimpanan sampel tepung telur dalam inkubator	88
5.3.	Grafik kadar air kesetimbangan tepung telur (pengeringan oven) pada berbagai nilai aktivitas air	92
5.4.	Grafik kadar air kesetimbangan tepung telur (pengeringan vakum) pada berbagai nilai aktivitas air	92
5.5.	Grafik kurva sorpsi isothermis tepung telur pengeringan oven berdasarkan model terbaik	95
5.6.	Grafik kurva sorpsi isothermis tepung telur pengeringan vakum berdasarkan model terbaik	96

**DAFTAR LAMPIRAN**

No.Urut		Halaman
1.	Data kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmic dan sifat reologi telur cair	115
2.	Data karakteristik sistem pemanasan ohmik pada telur cair	124
3.	Data karakteristik sifat fungsional dan fisikokimia tepung telur dengan metode pengeringan oven dan vakum	146
4.	Data karakteristik kurva sorpsi isothermis dan penentuan model persamaan terbaik untuk tepung telur	161
5	Curriculum Vitae	163

# BAB I

## PENDAHULUAN UMUM

### 1.1. Latar Belakang

Telur merupakan salah satu produk hewani yang memiliki sumber protein bermutu tinggi yang dibutuhkan oleh tubuh manusia. Selain protein, telur mengandung asam lemak tidak jenuh esensial (asam oleat dan asam linoleat), zat besi, fosfat, mineral, dan vitamin yang larut dalam lemak dan semuanya ini dibutuhkan oleh tubuh manusia dalam segala usia (Asghar & Abbas, 2012). Telur mengandung kolesterol namun tidak meningkatkan risiko penyakit jantung. Satu telur ukuran besar mengandung 212 mg kolesterol. Kandungan kolesterol pada telur sebesar ini masih dapat ditoleransi karena tubuh manusia membutuhkan kolesterol antara 1000-1500 mg. Kolesterol ini diperlukan untuk memproduksi vitamin D dan getah lambung, melindungi sel syaraf serta menghasilkan berbagai hormon (Kementerian Pertanian, 2010).

Telur ayam negeri (ras) umumnya besar, berat telur rata-rata 55-65 gram. Cangkang telur ada yang berwarna coklat dan putih. Telur ayam secara umum dikatakan bagus jika berbentuk oval dengan perbandingan panjang dan lebar 5:4. Namun, ada juga berbentuk agak bulat, terlalu lonjong dan kulit telur rata kasar bahkan bergaris (Ora, 2015). Perbedaan warna cangkang pada kulit ayam ras dipengaruhi oleh jenis ayam yang memiliki gen yang berbeda namun pada rasa dan kandungan nutrisinya tidak ada perbedaan (Sharif *et al.*, 2018). Secara terperinci, komposisi kimia telur ayam dapat dilihat pada Tabel 1.1

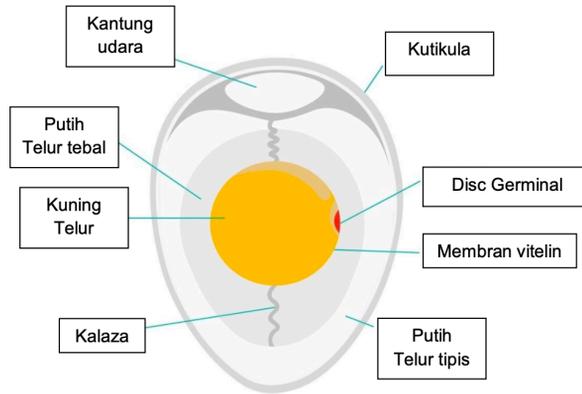
Tabel 1.1. Komposisi kimia telur ayam

	Berat (g)	Air (%)	Protein (%)	Lemak (%)	Karbohidrat (%)
Telur utuh	50	75	12	11	2
Putih telur	33	89	10	-	1
Kuning telur	17	49,5	17	33	0,5

Sumber: Evanuarini *et al.*, (2021)

Banyaknya kandungan gizi dan manfaat yang terdapat pada telur dalam produk makanan serta mudahnya memperoleh telur, membuat telur menjadi makanan favorit bagi semua kalangan. Harga telur yang terjangkau di masyarakat Indonesia, mengakibatkan permintaan telur semakin meningkat tiap tahunnya. Pada tahun 2020, harga terendah terjadi di Sulawesi Selatan yaitu Rp. 20.150/kg. Berdasarkan data susenas tahun 2010-2019, perkembangan konsumsi telur ayam ras berfluktuatif namun cenderung meningkat dengan rata-rata pertumbuhan 0,080% per tahun (Kementerian Pertanian, 2021). Total produksi telur ayam di Sulawesi Selatan pada tahun 2019-2021 mengalami kenaikan. Pada tahun 2021, produksinya mencapai 20.338 ton (BPS, 2022).

Komponen dalam telur ayam terbagi atas tiga yaitu kulit (9-12%), putih telur (60%) dan kuning telur (30-33%). Komponen utama telur dapat dilihat pada Gambar 1. 1



Gambar 1.1. Komponen dalam telur ayam (Ellis, 2014)

Sifat fungsional pada telur (koagulasi, emulsifier dan busa) membuat telur banyak digunakan pada produk makanan. Telur dapat memberikan lebih dari satu fungsi dalam suatu produk makanan karena itu telur susah digantikan (Fuertes *et al.*, 2017). Sifat koagulasi telur dapat berubah bentuk cair menjadi semi padat ataupun padat selama pemanasan sehingga dapat dijadikan bahan pengikat komponen lain pada formulasi makanan dan membentuk tekstur pada makanan (Sudaryani, 2000). Kuning telur bertindak sebagai emulsifier karena mengandung fosfolipid dan lipoprotein. Bagian lesitin pada kuning telur akan membentuk emulsi lemak minyak dalam air dan bagian yang mengandung kolesterol akan membentuk emulsi air dalam minyak (Evanuarini *et al.*, 2021).

### 1.1.1. Sifat Fungsional Telur

Telur utuh cair memberikan kontribusi sifat fisiko-kimiawi pada makanan seperti sifat koagulasi, pengemulsi dan pembusaan (Wang *et al.*, 2023). Karena itu, selain telur mengandung banyak nutrisi, telur juga memiliki sifat fungsional sehingga telur banyak digunakan dalam produk makanan (De Jesús *et al.*, 2013).

#### 1.1.1.1. Koagulasi

Sifat fungsional koagulasi telur mengacu pada kemampuan protein telur untuk mengubah keadaan dari cair menjadi padat atau semi-padat ketika dipanaskan atau diolah dengan cara tertentu. Proses koagulasi ini sangat penting dalam berbagai aplikasi kuliner dan industri. Denaturasi protein merupakan kunci terjadinya koagulasi. Denaturasi adalah proses di mana struktur tiga dimensi protein telur (terutama albumin dalam putih telur) berubah karena pemanasan atau perlakuan kimia. Protein yang terdenaturasi kehilangan fungsinya yang asli tetapi dapat membentuk jaringan yang lebih padat atau semi-padat, yang dikenal sebagai

koagulasi. Ketika telur dipanaskan, protein mulai berdenaturasi dan menggumpal. Pada suhu sekitar 60°C sebagian albumin putih telur mulai mengkoagulasi dan pada suhu sekitar 70°C albumin sepenuhnya mengkoagulasi. Kuning telur mulai mengkoagulasi pada suhu yang lebih tinggi, sekitar 65-70°C. Faktor yang mempengaruhi koagulasi adalah: (Belitz *et al.* 2009; Mine & Zhang, 2013; Stadelman & Cotterill, 1995)

1. pH: pH yang lebih rendah (lebih asam) mempercepat koagulasi
2. Konsentrasi garam: penambahan garam dapat mempercepat atau memperlambat koagulasi tergantung pada jenis garam dan konsentrasinya.
3. Konsentrasi gula: gula dapat meningkatkan suhu koagulasi, sehingga memperlambat proses.

#### 1.1.1.2. Emulsi

Aktivitas pengemulsi terkait dengan kapasitas molekul aktif permukaan untuk menutupi minyak-air yang dibuat oleh homogenisasi mekanis, sehingga mengurangi tegangan permukaan. Biasanya emulsi makanan adalah emulsi minyak dalam air seperti mayonaise, saus, custard, dll (Lechevalier, 2011). Kapasitas pengemulsi adalah kemampuan larutan protein atau suspensi untuk mengemulsi minyak. Sifat pengemulsi adalah karakteristik fungsional yang berguna yang memainkan peran penting dalam pengembangan sumber baru produk protein nabati untuk digunakan sebagai makanan. Protein adalah komponen yang mendominasi sebagian besar emulsi makanan (Zayas, 1997).

Sifat fungsional emulsi telur mengacu pada kemampuan komponen telur, terutama lesitin yang terkandung dalam kuning telur, untuk bertindak sebagai agen pengemulsi. Emulsi adalah campuran dua atau lebih cairan yang biasanya tidak bisa bercampur, seperti minyak dan air. Telur memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi kuliner dan industri makanan karena kemampuannya untuk membentuk dan menstabilkan emulsi. Faktor yang mempengaruhi emulsi yaitu pH (pH optimal untuk stabilitas emulsi kuning telur adalah sekitar 4,5 hingga 5,5); konsentrasi lemak proporsi lemak yang lebih tinggi dalam campuran dapat mempengaruhi stabilitas emulsi) dan penambahan bahan lain (garam, gula, dan bahan lain) dapat mempengaruhi stabilitas emulsi dengan mengubah interaksi antar molekul) (Stadelman & Cotterill, 1995).

#### 1.1.1.3. Busa

Daya buih adalah ukuran kemampuan putih telur untuk membentuk buih jika dilakukan pengocokan. Nilai daya buih biasanya dinyatakan dalam persen terhadap bobot putih telur (Stadelman & Cotterill, 1995). Hasil penelitian Alleoni & Antunes (2004), menunjukkan bahwa salah satu fraksi protein putih telur yang memiliki kemampuan mempermudah terbentuknya buih adalah *globulin*, sementara kompleks *ovomucin-lysozyme*, *ovalbumin* dan *conalbumin* mempunyai kemampuan dalam menstabilkan buih saat dipanaskan.

Kandungan dan jumlah protein dalam putih telur akan mempengaruhi buih yang dihasilkan setelah mengalami proses pengocokan. Fraksi-fraksi protein yang mempengaruhi dalam pembentukan buih adalah *ovalbumin*, *ovomucin*, dan *globulin* (Stadelman & Cotterill, 1995; Linden & Lorient, 1999). *Ovalbumin* mudah mengalami denaturasi dan terkoagulasi akibat adanya pengocokan akan tetapi, *ovalbumin* lebih tahan terhadap proses pemanasan. Pemanasan pada suhu 62°C selama 3,5 menit dengan pH 9 akan menyebabkan denaturasi *ovalbumin* sebanyak 3-5% (Stadelman & Cotterill, 1995).

*Ovomucin* yaitu suatu glikoprotein. *Ovomucin* adalah protein yang tidak larut dalam air akan tetapi dapat larut dalam garam dan pada pH 7 atau lebih. *Ovomucin* mampu membentuk lapisan yang tidak larut dalam air dan dapat menstabilkan buih yang terbentuk pada saat pengocokan. *Ovomucin* dapat menstabilkan buih karena *ovomucin* lebih kental serta mengandung karbohidrat yang tinggi sehingga dapat mengikat air (Linden & Lorient, 1999).

*Globulin* atau *lysozyme* merupakan suatu protein putih telur yang menentukan tingkat kekentalan dan mengurangi pencairan buih. *Globulin* dapat membantu tahapan dalam pembentukan buih. Kurangnya *globulin* dalam putih telur akan membutuhkan waktu pengocokan lebih lama untuk mencapai volume tertentu (Stadelman & Cotterill, 1995). Proses pemanasan akan merusak konsentrasi *globulin*. Proses pemanasan akan mempercepat pecahnya *ovomucin-lysozyme* diikuti dengan terjadinya denaturasi yang dapat menyebabkan menurunnya daya buih yang dihasilkan (Zayas, 1997).

### 1.1.2. Kerusakan pada Telur

Telur memiliki sifat yang mudah rusak (*perishable*) seperti produk pertanian lainnya. Beberapa kerusakan pada telur yang mengakibatkan menurunnya kualitas telur yaitu pecahnya kulit (cangkang) telur, kehilangan gas CO<sub>2</sub> dan tumbuhnya mikroorganisme. Pecahnya cangkang telur diakibatkan kesalahan penanganan di kandang, saat transportasi dan distribusi. Selain itu, kerusakan sering juga terjadi di masyarakat, sehingga menyebabkan telur menjadi busuk karena masuknya mikroorganisme ke dalam telur (Knape *et al.*, 2002; Harahap, 2007). Kerusakan kulit telur merupakan sumber kerugian ekonomi bagi produsen telur. Secara umum, sekitar 3% telur mengalami cangkang yang retak akibat penanganan di kandang (Hamilton & Bryden, 2021). Distribusi telur ke berbagai tempat mengakibatkan telur mengalami kerusakan sebesar 2,5%. Jika semua bentuk kerusakan kulit telur dipertimbangkan saat berpindah dari ayam ke pengecer, kerugian produsen mencapai 20%. Karena itu, perlu diperhatikan untuk mengurangi kerusakan dan menjaga kestabilan harga (Pescatore & Jacob, 2011; Sharif *et al.*, 2018).

Konsumen menganggap telur retak sebagai kualitas yang lebih rendah dan berbahaya bagi keamanan pangan. Bagi peternak telur, telur yang retak merupakan sumber utama kerugian. Kerugian ini telah diperkirakan dari waktu ke waktu dan sangat penting dalam menentukan profitabilitas produksi dan pemasaran telur. Telur retak bernilai sekitar sepertiga dari mutu telur yang bagus karena telur yang cangkangnya pecah tidak memiliki nilai (Hamilton & Bryden, 2021).

Komponen kualitas telur terbagi atas tiga, yaitu kualitas fisik, kimia, dan biologi. Komponen kualitas fisik terdiri dari keutuhan telur, berat telur, bentuk telur, indeks telur, berat putih telur, berat kuning telur, indeks putih telur, indeks kuning telur, warna kuning telur, haugh unit, berat kerabang, kebersihan telur, dan ketebalan kerabang serta kekuatan kerabang. Kualitas telur secara kimia yaitu kandungan gizi yang terkandung di dalam telur yang meliputi protein, lemak, karbohidrat, asam amino, mineral, vitamin, serta kadar air. Cakupan lain dari kualitas telur secara kimia yakni ada tidaknya zat-zat kimia berbahaya yang terkandung dalam telur akibat deposisi dari pakan seperti hormon, logam berat, dan antibiotik. Cakupan selanjutnya adalah kualitas telur secara biologi yang meliputi aspek cemaran mikrobiologi yang ada di dalam telur yang berasal dari dalam organ reproduksi sebelum telur dikeluarkan ataupun cemaran mikrobiologi ketika telur sudah dikeluarkan (Yuwanta, 2010). Mempertahankan kualitas telur agar tetap segar mulai dari produsen sampai ke konsumen, merupakan masalah utama dalam pemasaran telur agar produsen tidak mengalami kerugian (Brah *et al.*, 1992; Sun *et al.*, 2020)

Berdasarkan penelitian Damayanti (2021), telur dapat dikategorikan retak ketika telur memiliki retakan kecil pada cangkangnya yang masih aman untuk disimpan satu minggu di dalam kulkas. Telur cair dapat dikategorikan dalam 2 jenis yaitu telur retak yang sudah parah sehingga isi dalam telur keluar seperti 'cair' dan telur yang hanya dilapisi selaput kerabang telur dan tanpa cangkang/kerabang. Harga jual telur cair dan telur retak mengikuti harga jual telur saat ini dengan perhitungan harga jual telur cair adalah setengahnya dari harga telur yang baik dan telur retak dijual dengan harga  $\frac{3}{4}$  dari harga jual telur. Hal ini mengakibatkan kerugian pada produsen telur. Mertens *et al.* (2010) berpendapat bahwa telur yang pecah mempengaruhi nilai jual dan kualitas telur. Telur pecah meningkatkan resiko terjadinya kontaminasi bakteri tetapi juga akan mempengaruhi telur utuh lainnya dalam kelompok yang sama jika pecah selama pengemasan atau transportasi. Konsumsi kulit telur yang pecah dapat menyebabkan bahaya kesehatan yang serius. Holt *et al.* (2011), mengatakan bahwa keamanan telur sangat terpengaruh karena kontaminasi mikroba seperti *S. enteritidis* atau patogen lain, logam berat, dan residu pestisida. Kim *et al.* (2018), menyatakan bahwa telur yang telah pecah tidak boleh disimpan lebih dari 72 jam.

### **1.1.3. Pasteurisasi Telur Cair Menggunakan Ohmik**

Berbagai cara dilakukan untuk membuat telur pecah dapat dimanfaatkan kembali yaitu dengan cara pasteurisasi untuk memperpanjang masa simpan telur cair dan menghilangkan bakteri yang terkandung dalam telur cair. Menurut pendapat Foegending & Stanley (2006); Musgrove *et al.* (2009), bahwa pasteurisasi dirancang untuk menonaktifkan *Salmonella* dan memperpanjang umur simpan telur. Produsen makanan sering menggunakan produk telur cair yang dipasteurisasi karena secara mikrobiologis lebih aman dan lebih mudah digunakan (Nemeth *et al.*, 2011). Pasteurisasi ohmik dapat memperpanjang umur simpan pada telur cair dibandingkan dengan telur yang dipasteurisasi secara konvensional. Pemanasan

ohmik lebih efektif dalam inaktivasi *Lactobacillus acidophilus* daripada pemanasan konvensional, kemungkinan besar karena pemanasan sampel yang lebih cepat dan seragam, dan kemungkinan elektroporasi sel (Anderson, 2008).

Perlakuan pasteurisasi yang diberikan ke telur cair, harus yang dapat mematikan bakteri pada telur namun tidak terjadi penurunan kandungan gizi pada telur. Pasteurisasi dapat mempengaruhi sifat fungsional produk telur tergantung pada waktu dan suhu yang digunakan (Froning *et al.*, 2002; Kamotani *et al.*, 2010; Perry *et al.*, 2011 ).

Banyak peneliti saat ini yang berpendapat bahwa teknologi berbasis listrik dan elektromagnetik seperti frekuensi radio, microwave, pemanasan inframerah, iradiasi, pemanasan ohmik, tekanan hidrostatik tinggi, ultrasound dan sterilisasi termal dengan tekanan merupakan teknologi pengolahan dan pengawetan makanan (Fan *et al.*, 2019; Jaeger *et al.*, 2016; Kanjanapongkul, 2017; Muhammad *et al.*, 2018; Termrittikul, *et al.*, 2018). Neetoo dan Chen (2014) berpendapat bahwa teknologi pemanasan dengan ohmik berhasil digunakan dalam pasteurisasi komersial produk telur cair dan pengolahan buah utuh di Inggris dan Jepang.

Ohmik adalah salah satu metode pemanasan yang dapat digunakan pada makanan cair dan padat yang dihasilkan dari tenaga listrik. Dengan metode ini, pemanasan dilakukan dengan daya rendah dan waktu yang singkat sehingga produk tidak mengalami banyak kerusakan dan nilai gizinya dapat dipertahankan. Energi panas yang dihasilkan selama pemanasan ohmik ditransfer langsung ke makanan. Konduktivitas listrik produk makanan linier dengan perbedaan suhu, variasi waktu pemanasan dan struktur makanan. Dengan demikian, pemanasan ohmik dapat diterapkan dalam berbagai proses seperti pengeringan, blansing, fermentasi, ekstraksi, sterilisasi, dan pasteurisasi (Muhammad *et al.*, 2019).

Pemanasan ohmik adalah teknologi baru yang telah menunjukkan potensi besar dalam industri makanan. Konsistensi produk, konsentrasi, dan konduktivitas listrik merupakan faktor penting dalam ohmik (Leite *et al.*, 2018). Ohmik didefinisikan sebagai proses melewati arus listrik melalui makanan atau bahan lain selama paparan panas. Perbedaan pemanasan ohmik dengan metode microwave terletak pada frekuensi dan bentuk gelombang medan listrik. Pada metode microwave, 300 MHz-300 GHz sedangkan pada metode ohmik, frekuensi sekitar 25-30 KHz (Neetoo & Chen, 2014).

Pemanasan ohmik dilakukan dengan menerapkan gradien tegangan (20 V/cm) pada 50 Hz pada telur cair utuh. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya denaturasi protein pada suhu 60°C. Pemanasan ohmik dapat meminimalisir perubahan struktural pada telur cair utuh karena pemanasannya cepat dan seragam sehingga menjaga tekstur dan kualitas protein secara lebih baik (Icier & Bozkurt, 2011). Perilaku pemanasan ohmik skala laboratorium pada kuning telur, putih dan telur utuh diteliti pada gradien tegangan 30 V/m dengan kisaran suhu 19–60°C. Dari semua perlakuan penelitian terhadap telur (kuning telur, putih dan telur utuh) didapatkan hasil bahwa konduktivitas meningkat secara linier dengan suhu. Kuning dan telur utuh kurang konduktif dibandingkan sampel putih telur. Koefisien

kinerja sistem pemanas ohmik berada di kisaran 0,814 hingga 0,857. Pemanasan ohmik memiliki pengaruh yang tinggi terhadap warna sampel telur dibandingkan dengan pemanasan konvensional (Darvishi *et al.*, 2012).

Konduktivitas listrik merupakan parameter kritis dalam penerapan metode pemanasan listrik seperti pemanasan ohmik. Pemanasan ohmik adalah metode pemanasan alternatif yang cepat dan homogen. Hal ini didasarkan pada aliran arus listrik melalui elektroda yang dihubungi oleh produk makanan dan penggunaan bahan makanan sebagai hambatan di sirkuit. Pemanasan terjadi seketika tergantung pada arus yang melewati bahan makanan dan konversi energi listrik menjadi panas (Icier, 2009). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemanasan ohmik dapat diterapkan sebagai metode pemanasan homogen yang efektif, cepat, untuk jus buah dan konsentrat, produk telur cair, sup, susu, dll (Tewari & Maurice, 2000).

Pemanasan ohmik dapat menyebabkan perubahan struktural minimal karena kemampuannya untuk memanaskan seluruh telur cair lebih cepat dan seragam, atau efek listrik pada efek termal pada gradien tegangan yang berbeda dapat mempengaruhi perilaku reologinya secara tak terduga karena jumlah denaturasi protein dan lainnya yang lebih tinggi (Icier & Bozkurt, 2011). Pengetahuan tentang sifat reologi produk makanan sangat penting untuk pengembangan produk, kontrol kualitas, evaluasi sensorik dan desain serta evaluasi peralatan proses (Vélez-Ruiz, 2002).

Perubahan karakteristik reologi dan sifat listrik selama pemanasan ohmik diperlukan untuk optimalisasi sistem pemanasan ohmik pada produk (Ayadi *et al.*, 2004; Icier & Tavman, 2006). Model reologi digunakan untuk menggambarkan sifat reologi dari produk. Berbagai model reologi telah digunakan untuk menggambarkan sifat aliran dari produk, seperti model Newtonian (satu parameter), *Power Law*, *Bingham*, dan *Casson* (dua parameter) serta *Herschel–Bulkey* (tiga parameter) (Quek *et al.*, 2013). Teknik pengukuran sifat-sifat tersebut merupakan alat analisis yang digunakan dalam penentuan perubahan tekstur makanan (Arslan *et al.*, 2005; Patocka *et al.*, 2006).

#### 1.1.4. Tepung Telur

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan dan memperluas pemanfaatan telur cair pasteurisasi adalah dengan cara pengeringan yaitu dengan mengolah telur menjadi produk tepung telur. Menurut Sharif *et al.*, (2018) tepung telur memiliki banyak keuntungan, yang pertama yaitu masa simpan yang lama bila dibandingkan dengan telur mentah. Tepung telur dapat disimpan 5-10 tahun tergantung dari lingkungan penyimpanannya. Keuntungan kedua yaitu tidak adanya kemungkinan kontaminasi dari kerusakan cangkang. Keuntungan ketiga yaitu penyimpanannya tidak membutuhkan tempat. Keuntungan keempat, konsumen atau produsen masih bisa menggunakan telur sebagai bahan produk makanan pada saat harga telur melambung tinggi.

Terdapat tiga jenis tepung telur yaitu tepung putih telur, tepung kuning telur, dan tepung telur utuh. Tepung putih telur digunakan terutama dalam produk yang memerlukan sifat pengikatan dan pengocokan yang baik. Tepung kuning telur

digunakan untuk pengemulsi dalam saus, mayones, dan produk yang memerlukan rasa dan warna kuning telur. Tepung telur utuh, digunakan dalam berbagai aplikasi kuliner yang membutuhkan manfaat fungsional dari kedua komponen telur (Belvayin, 2016). Proses pengeringan telur dilakukan untuk mengeluarkan air dari cairan telur dengan cara penguapan hingga kandungan air menjadi lebih sedikit. Pembuatan tepung telur menggunakan metode pengeringan oven, pengeringan busa, pengeringan beku, pengeringan vakum dan pengeringan semprot (Ndife *et al.*, 2010; Lechevalier & Jeantet, 2013).

Pengeringan vakum mengeluarkan air dari bahan yang dikeringkan dengan menurunkan tekanan parsial uap air dari udara di dalam pengering. Ketika tekanan parsial uap air lebih rendah dari tekanan atmosfer, prosesnya lebih cepat, tetapi suhu yang digunakan lebih rendah daripada suhu yang digunakan saat pengeringan (Arévalo-Pinedo *et al.*, 2004; Madamba & Liboon, 2001). Pengeringan vakum bekerja dengan cara mengurangi tekanan di dalam ruang pengering sehingga memungkinkan pengeringan terjadi pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pengeringan konvensional. Penggunaan suhu rendah dalam pengeringan vakum bertujuan untuk meminimalkan kerusakan nutrisi, aroma, dan komponen volatil (mudah menguap) yang sering terjadi pada pengeringan suhu tinggi. Dengan demikian, pengeringan vakum dapat menghasilkan tepung telur dengan kualitas yang lebih baik, baik dari segi nutrisi maupun sensoris (Reis, 2014). Metode pengeringan vakum memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode pengeringan lainnya. Beberapa keuntungan tersebut antara lain adalah kemampuan untuk mempertahankan kualitas nutrisi dan sensoris bahan, mengurangi risiko reaksi kimia yang merugikan seperti pencoklatan (browning) dan reaksi enzimatik, serta meningkatkan stabilitas produk selama penyimpanan (Mujumdar, 2014).

Metode pengeringan telur menggunakan pengeringan vakum terbukti unggul dalam mempertahankan kualitas nutrisi dan sensoris produk akhir. Meskipun memerlukan investasi peralatan yang lebih tinggi dan biaya operasional yang lebih besar, hasil produk yang berkualitas tinggi menjadikan metode ini layak dipertimbangkan. Pengeringan vakum memungkinkan pengawetan telur dengan kerusakan minimal pada komponen esensial, menghasilkan tepung telur dengan warna, aroma, dan tekstur yang mendekati telur segar. Hasil penelitian Davis *et al.* (2005), suhu pengeringan 40-45°C, tekanan vakum 20-30 kPa selama 5-6 jam menghasilkan tepung telur yang kadar air rendah, warna dan aroma relatif tidak berubah. Hasil penelitian Thompson *et al.* (2012), suhu pengeringan 50°C, tekanan vakum 25 kPa selama 4-5 jam menghasilkan tepung telur yang kerusakan minimal pada protein dan vitamin, stabilitas produk baik. Hasil penelitian Brown *et al.* (2018), suhu Pengeringan 45°C, tekanan vakum 15-20 kPa selama 6-7 jam menghasilkan tepung telur yang warna cerah, sedikit perubahan pada aroma dan rasa.

Pengeringan oven adalah proses pengeringan yang menggunakan udara panas dalam ruang tertutup untuk menguapkan air dari bahan pangan. Proses ini dilakukan pada suhu tinggi yang diatur sesuai kebutuhan, sehingga air dalam telur dapat dihilangkan secara efisien. Metode ini cukup sederhana dan banyak

digunakan karena mudah diterapkan dan tidak memerlukan peralatan khusus yang rumit (Hui, 2007). Keunggulan pengeringan oven antara lain adalah kecepatan proses dan kemampuannya untuk menangani volume bahan yang cukup besar dalam satu waktu. Selain itu, teknologi ini sudah dikenal luas dan biayanya relatif lebih rendah dibandingkan dengan metode pengeringan lainnya seperti pengeringan vakum. Namun, pengeringan oven juga memiliki beberapa kekurangan, seperti risiko kerusakan nutrisi akibat suhu tinggi dan kemungkinan perubahan pada sifat sensoris produk seperti aroma dan rasa. Metode pengeringan oven merupakan suatu metode pengeringan yang sederhana menggunakan oven (Ratti, 2009).

Pengeringan telur menggunakan oven merupakan metode yang telah banyak digunakan untuk memproduksi tepung telur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini memiliki beberapa keunggulan dan kekurangan yang perlu diperhatikan yaitu kerugian terkait kerusakan nutrisi dan perubahan sifat sensoris. Namun metode ini tetap menjadi pilihan yang ekonomis dan mudah diterapkan. Penelitian Sanusi *et al.* (2023), membandingkan empat metode pengeringan, termasuk pengeringan oven. Penelitian ini menemukan bahwa tepung telur yang dihasilkan dengan pengeringan oven menunjukkan perbedaan signifikan dalam sifat fisik dan fungsional dibandingkan dengan metode pengeringan lainnya. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun metode oven mudah diterapkan, ada beberapa keterbatasan dalam hal kualitas produk akhir dibandingkan dengan metode pengeringan udara atau dehidrator. Hasil penelitian Smith *et al.* (2000), suhu pengeringan 55°C dengan lama pengeringan 6-8 jam, mendapatkan hasil kerusakan minimal pada protein dan lemak, namun ada penurunan kandungan vitamin B dan C. Penelitian Thompson *et al.* (2023), suhu pengeringan 40°C hingga 50°C. Hasil yang diperoleh yaitu pada suhu 50°C meningkatkan komposisi alanin, sementara suhu 40°C meningkatkan komposisi histidin dan isoleusin. Penelitian menunjukkan variasi suhu dapat mempengaruhi profil asam amino dari tepung telur.

Tepung telur adalah salah satu produk olahan telur yang telah dikeringkan, sehingga memiliki umur simpan yang lebih lama dan mudah untuk disimpan serta diangkut. Dalam proses penyimpanan, tepung telur sangat rentan terhadap perubahan kadar air yang dapat mempengaruhi kualitas produk. Salah satu metode untuk memahami dan mengendalikan kadar air dalam tepung telur adalah dengan mempelajari kurva sorpsi isoteremis. Kurva sorpsi isoteremis adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar air bahan dengan kelembaban relatif pada suhu tetap. Kurva ini sangat penting dalam menentukan sifat higroskopis bahan, yang merupakan kemampuan bahan untuk menyerap atau melepaskan uap air dari atau ke lingkungan sekitarnya. Dengan mempelajari kurva sorpsi isoteremis, kita dapat mengetahui di mana tepung telur mencapai kesetimbangan kadar air dengan lingkungannya, serta memahami bagaimana perubahan kelembaban relatif dapat mempengaruhi stabilitas dan kualitas tepung telur. Berdasarkan uraian tersebut, maka dilakukan penelitian mulai dari pasteurisasi telur cair dengan menggunakan ohmik, pembuatan tepung telur hingga memprediksi kondisi penyimpanan optimal pada tepung telur.

## 1.2. Rumusan Masalah

Kerusakan pada telur selama berada di kandang dan dalam proses transportasi sering disebabkan oleh getaran, gesekan, serta guncangan akibat tumpukan dalam kemasan. Telur mengalami perubahan setelah dikeluarkan dari tubuh induk dan selama pengangkutan. Telur memiliki sifat mudah pecah dan kualitasnya cepat menurun setelah dikeluarkan dari induknya. Dalam waktu 5-7 hari, terjadi penurunan kualitas yang ditandai dengan pembesaran rongga udara. Pembesaran ini menyebabkan pori-pori kulit telur semakin membesar, memudahkan keluarnya uap air dari albumen dan hilangnya gas CO<sub>2</sub>, serta masuknya mikroba yang dapat menyebabkan pembusukan (Harahap, 2007).

Persentase telur yang mengalami pecah di kandang rata-rata berkisar antara 2-4%. Karena telur yang pecah tidak dapat dijual dalam bentuk utuh, telur tersebut sering dikumpulkan dan diproses menjadi telur cair untuk dimanfaatkan dalam produk olahan makanan. Telur yang telah retak, harganya akan menurun sehingga dapat merugikan produsen. Namun pada sudut pandang konsumen, telur yang retak menguntungkan karena harganya di bawah dari harga telur utuh. Konsumen berpendapat bahwa telur yang retak masih dapat dikonsumsi padahal pada telur retak sudah terdapat bakteri *Salmonella* yang masuk ke dalam telur sehingga berbahaya untuk dikonsumsi. Oleh karena itu, diperlukan teknologi untuk pemanfaatan telur pecah sehingga dapat memberikan nilai tambah.

Teknologi pasteurisasi menggunakan pemanasan ohmik dapat digunakan untuk menangani telur retak sebelum pengawetan telur cair, dengan tujuan menghilangkan mikroba. Setelah proses pasteurisasi, salah satu metode pengawetan yang efektif adalah dengan membuat tepung telur. Dalam pembuatan tepung telur, berbagai metode pengeringan dapat digunakan, seperti pan drying, foaming drying, vacuum drying dan freeze drying. Pemilihan metode pengeringan yang tepat akan berdampak signifikan pada efisiensi pengeringan dan kualitas akhir tepung telur. Selain itu, penyimpanan tepung telur yang baik sangat penting untuk menghindari kerusakan dan memperpanjang masa simpannya. Oleh sebab itu, penelitian ini dirancang untuk menjawab permasalahan berikut ini:

- a. Bagaimana kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmik dan sifat reologi telur cair?
- b. Bagaimana karakteristik pemanasan ohmik selama pasteurisasi telur dan pengaruhnya terhadap sifat fungsional dan fisikokimia telur cair?
- c. Bagaimana karakteristik sifat fungsional dan fisikokimia tepung telur yang dihasilkan dari pengeringan oven dan pengeringan vakum?
- d. Bagaimana karakteristik kurva sorpsi isoteremis dan model persamaan yang tepat untuk menggambarkan kurva sorpsi isoteremis pada berbagai jenis tepung telur?

### 1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka ditetapkan tujuan penelitian ini yaitu:

- a. Mengevaluasi kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmik dan sifat reologi telur cair.
- b. Mengevaluasi karakteristik pemanasan ohmic selama pasteurisasi telur dan pengaruhnya terhadap sifat fungsional dan fisikokimia telur cair
- c. Mengevaluasi karakteristik sifat fungsional dan fisikokimia tepung telur yang dihasilkan dari pengeringan oven dan pengeringan vakum
- d. Mengevaluasi karakteristik kurva isotermis dan menentukan model persamaan yang tepat untuk menggambarkan kurva sorpsi isotermis dari berbagai jenis tepung telur.

### 1.4. Kegunaan Penelitian

Hasil penelitian ini memberi data dan informasi pasteurisasi telur cair menggunakan ohmic, pembuatan tepung telur hingga memprediksi kondisi penyimpanan optimal pada tepung telur. Data yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam merancang teknologi untuk pengolahan dan pengawetan sehingga dapat memberikan nilai tambah pada telur pecah. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan wawasan ilmiah mengenai proses pengeringan dan sifat tepung telur, tetapi juga menawarkan solusi praktis bagi industri makanan dalam meningkatkan kualitas dan stabilitas produk telur.

### 1.5. Ruang Lingkup Penelitian

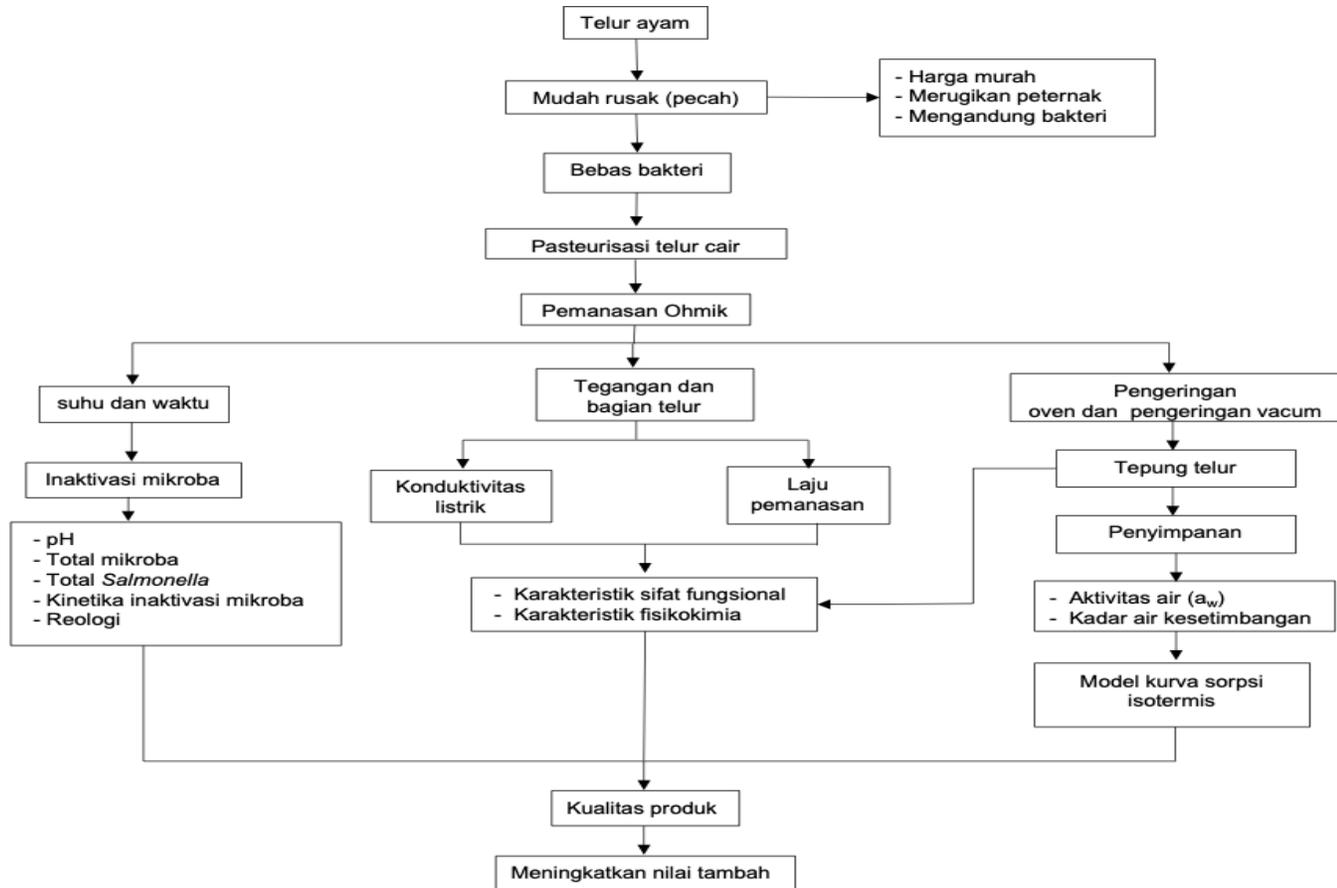
Penelitian mengenai karakteristik pemanasan ohmik dan sifat fungsional produk telur dilakukan dalam empat tahapan. Secara terperinci tahapan penelitian sebagai berikut

1. Tahap 1 (Kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmik dan sifat reologi telur cair). Pada tahap ini dilakukan pemanasan ohmik dengan tiga tahapan suhu dan waktu berbeda.
2. Tahap 2 (Karakteristik sistem pemanasan ohmik pada telur cair). Pada tahap ini dilakukan pemanasan ohmik untuk pasteurisasi. Kondisi pemanasan yang digunakan terdiri atas tiga variasi tegangan dan bagian penyusun telur (putih telur, kuning telur dan telur utuh)
3. Tahap 3 (Karakteristik sifat fungsional dan fisikokimia tepung telur dengan metode pengeringan oven dan vakum). Penelitian tahap ini dilakukan dengan membuat tiga jenis tepung telur berdasarkan bagian penyusun telur yang telah di pasteurisasi menggunakan ohmic kemudian dilanjutkan pengeringan oven dan pengeringan vakum.
4. Tahap 4 (Karakteristik kurva sorpsi isotermis dan penentuan model terbaik pada tepung telur). Penelitian tahap ini dilakukan dengan menyimpan tepung telur pada suhu 30<sup>0</sup> C dengan menggunakan larutan larutan garam jenuh untuk mendapatkan tingkat kelembaban yang berbeda-beda.

### **1.6. Kebaruan Penelitian**

Kebaruan dalam penelitian ini adalah inovasi dalam pemanfaatan telur pecah yang sering dianggap rusak oleh sebagian masyarakat. Dengan memanfaatkan teknologi pemanasan ohmik untuk pasteurisasi, penelitian ini membuka peluang baru untuk meningkatkan nilai tambah telur pecah. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi sifat reologi telur cair saat diproses dengan pemanasan ohmik, memberikan wawasan baru yang dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas produk olahan telur. Melalui pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya memberikan solusi terhadap masalah telur pecah, tetapi juga menawarkan metode pengolahan yang lebih modern dan efektif.

## 1.7. Kerangka Konseptual



Gambar 1.2. Kerangka pikir penelitian

## BAB II

### KINETIKA INAKTIVASI MIKROBA DENGAN PEMANASAN OHMIC DAN SIFAT REOLOGI TELUR CAIR

#### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmic dan sifat reologi telur cair. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan medan listrik 20 V/cm pada suhu yang berbeda yaitu 50°C, 60°C dan 70°C dan lama pemanasan berbeda yaitu 3, 5 dan 7 menit. Konstanta laju inaktivasi mikroorganisme dalam cairan telur berkisar antara 1,40 menit<sup>-1</sup> pada 50°C sampai 2,87 menit<sup>-1</sup> pada suhu 70°C dengan  $k_{Tref}$  2,00 menit<sup>-1</sup> and  $E_a$  33,91 kJ/mol. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa pemanasan ohmic mampu menurunkan populasi mikroorganisme dan menginaktivasi *Salmonella*. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa suhu dan lama pemanasan ohmic mempengaruhi karakteristik reologi telur cair. Indeks aliran ( $n$ ) berkisar dari 0,23 sampai 0,43 dan koefisien konsistensi ( $k$ ) berkisar dari 3,03 (Pa.s <sup>$n$</sup> ) sampai 279,37 (Pa.s <sup>$n$</sup> ) dengan  $E_a$  berkisar dari 27,38 kJ/mol sampai 80,86 kJ/mol. Pemanasan ohmic pada suhu 50°C dan 60°C selama 3 dan 5 menit tidak mempengaruhi indeks aliran dan koefisien konsistensi telur cair. Oleh karena itu, pemanasan ohmic efektif digunakan untuk pengolahan dan pengawetan telur cair.

Kata kunci: Pemanasan ohmic, inaktivasi mikroba, reologi, telur cair.

#### 2.1. Pendahuluan

Produksi telur ayam di Indonesia mengalami peningkatan pada tahun 2017-2022 sebesar 3,80% per tahun dimana pada tahun 2017 produksi telur ayam ras sebanyak 4,63 juta ton dan terus meningkat hingga pada tahun 2022 menjadi 5,57 juta ton (Kementerian Pertanian, 2022). Berdasarkan data susenas dalam waktu 5 tahun terakhir (tahun 2018-2022) konsumsi telur ayam ras mengalami peningkatan sebesar 1,21% (Kementerian Pertanian, 2023). Tingginya peningkatan konsumsi telur dikarenakan telur merupakan bahan pangan berprotein tinggi dan murah. Produksi telur cair meningkat untuk memenuhi kebutuhan industri makanan dan konsumsi rumah tangga (Zhang *et al.*, 2019). Namun di balik peningkatan ini, tantangan seperti mudahnya telur mengalami pecah cangkang menjadi perhatian, karena kerusakan ini dapat menimbulkan kerugian ekonomi bagi peternak. Secara umum, sekitar 3% telur mengalami cangkang yang pecah akibat penanganan di kandang (Hamilton & Bryden, 2021).

Mikroorganisme dengan mudah mencemari telur, terutama ketika cangkang telur mengalami kerusakan atau pecah, sehingga meningkatkan risiko bagi kesehatan konsumen (Hamilton & Bryden, 2021). Masuknya *Salmonella* ke dalam telur dapat terjadi melalui dua jalur utama, yaitu penularan vertikal dan penularan horizontal. Penularan vertikal membawa *Salmonella* langsung dari ayam induk ke bagian dalam telur selama proses pembentukan, sementara penularan horizontal terjadi melalui kontaminasi dari lingkungan luar, terutama jika cangkang telur pecah atau retak. Kedua jalur ini memerlukan pengendalian ketat baik pada kesehatan

ayam maupun pada penanganan telur setelah produksi untuk meminimalkan risiko kontaminasi *Salmonella* (Gantois *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2021). Penelitian Geveke *et al.* (2016), menemukan bahwa *Salmonella* dalam 1 butir telur sekitar 7 log CFU/mL. Bakteri dalam telur dapat menyebabkan telur cepat rusak dan tidak aman untuk dikonsumsi. Untuk mengurangi risiko kerusakan akibat aktivitas mikroba, diperlukan langkah untuk menonaktifkan sel mikroba yang tidak diinginkan sehingga dapat memperpanjang masa simpannya.

Industri telur menggunakan perlakuan panas untuk keamanan guna menghindari kerusakan akibat aktivitas mikroba. Pasteurisasi dirancang untuk menonaktifkan *Salmonella* dalam telur cair dan memperpanjang umur simpan telur. Perlakuan panas merupakan faktor penting yang mempengaruhi kelangsungan hidup patogen dalam makanan. Cara utama untuk memastikan keamanan mikrobiologis produk telur cair adalah dengan menggunakan proses pasteurisasi telur yang tepat (Baba *et al.*, 2018). Parameter waktu dan suhu dilaporkan efektif membunuh sebagian besar *Salmonella* dalam telur yang terkontaminasi. Telur cair utuh dipasteurisasi setidaknya selama 3,5 menit pada suhu minimum 60°C (Tóth *et al.*, 2020). Pemanasan sekitar 70°C dalam waktu singkat umumnya digunakan untuk menonaktifkan *Salmonella* dalam makanan dan tingkat inaktivasinya tinggi (Syamaladevi *et al.*, 2016; Villa-Rojas *et al.*, 2017). Produsen makanan sering menggunakan produk telur cair yang dipasteurisasi karena secara mikrobiologis lebih aman dan lebih mudah digunakan. Perlakuan pasteurisasi yang diberikan ke telur cair, harus yang dapat mematikan bakteri pada telur namun tidak terjadi penurunan kandungan gizi pada telur. Pasteurisasi dapat mempengaruhi sifat fungsional produk telur tergantung pada waktu dan suhu yang digunakan (Liu *et al.*, 2019).

Mikroorganisme yang banyak tumbuh pada telur yaitu *Salmonella*. Mikroorganisme ini menyebabkan keracunan makanan walaupun dalam jumlah yang relatif kecil (Ho *et al.*, 2021). Dengan demikian, mikroorganisme terutama *Salmonella* harus diinaktivasi. Penelitian yang dilakukan oleh Ouyang *et al.*, (2020), perlakuan sinar UV mengurangi jumlah *Salmonella enteridis* dalam putih telur cair sebesar 1,98 log CFU/ml. Penelitian lain yang dilakukan oleh Souza & Fernández (2011) menggunakan UV-C radiasi mampu menurunkan total *Salmonella enteritidis* pada produk telur cair. Penelitian lain yang dilakukan oleh Ribeiro *et al.*, (2023) kombinasi tekanan sedang dan ultrasound dalam pasteurisasi termal juga secara efektif mengurangi *Salmonella* dalam telur cair utuh. Namun perlakuan ini tidak mampu menjamin keamanan dari *Salmonella*. Oleh karena itu, diperlukan perlakuan lain yang mampu menjamin keamanan dan tidak merusak kualitas dari telur.

Saat ini, pemanasan ohmik adalah teknologi alternatif yang banyak digunakan dalam pemrosesan dan pengawetan karena memiliki banyak keunggulan dibandingkan metode pemanasan konvensional (Pires *et al.*, 2021). Pemanasan ohmik dapat menaikkan suhu bahan makanan dengan cepat dan seragam sehingga bahan makanan stabil dan aman (Fadavi *et al.*, 2018). Dibandingkan dengan pemrosesan bertekanan tinggi, metode ohmik menghasilkan produk berkualitas lebih baik dan menghemat lebih banyak energi daripada gelombang mikro (Pires *et al.*,

2020). pemanasan ohmic adalah metode yang menggunakan arus listrik selama pemanasan bahan pangan. Pemanasan ini efisien dapat menginaktivasi mikroorganisme dan enzim (Makroo *et al.*, 2020).

Salah satu karakteristik penting yang perlu diperhatikan selain mikroorganisme dalam pasteurisasi telur cair adalah sifat reologi. Menurut Kumbár *et al.*, (2015) dan Leite *et al.*, (2018), reologi penting untuk pengembangan produk dan evaluasi kualitas produk. Reologi telur cair telah diteliti sebelumnya oleh Singh *et al.* (2015) menggunakan tekanan tinggi (281,8-618,2 MPa dengan suhu 8,2-41,8°C; waktu penahanan tekanan 1,6-18,4 menit). Selain itu Atilgan & Unluturk (2008) juga meneliti hal serupa dengan variasi suhu berbeda yaitu pada suhu refrigerator (4°C), suhu ruang (25°C) dan suhu pasteurisasi (60°C) menunjukkan bahwa suhu kamar tidak mempengaruhi sifat reologi produk telur cair dan tidak bersifat tiksotropi. Sifat reologi telur utuh cair selama pemanasan ohmik pada suhu 4-60°C adalah non Newtonian dengan model power law dan diperoleh nilai energi aktivasi sebesar  $11,30 \pm 0,16$  kJ/mol (Icier & Bozkurt, 2011).

Penelitian ini menganalisis total mikroba, total *Salmonella* dan reologi telur cair menggunakan pemanasan ohmik dengan suhu dan lama pemanasan yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinetika inaktivasi mikroba dengan pemanasan ohmic dan sifat reologi telur cair. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam pengolahan dan pengawetan telur.

## **2.2. Bahan dan Metode Penelitian**

### **2.2.1. Bahan**

Telur yang digunakan adalah telur yang sudah retak/pecah cangkangnya di dalam kandang (satu hari setelah panen) dari Kabupaten Sidrap, Sulawesi Selatan sebanyak 90 butir.

### **2.2.2. Metode Penelitian**

#### *Persiapan Sampel*

Telur cair dikumpulkan dalam wadah dan dihomogenkan dengan menggunakan mixer tangan mixer (Hand mixer Philips HR 1552) dengan kecepatan minimum selama 1 menit.

#### *Pemanasan Ohmik*

Sampel 150 ml telur cair dimasukkan ke dalam tabung ohmik. Pemanasan dilakukan pada kekuatan medan listrik 20 V/cm dengan suhu yang berbeda (50°C, 60°C, dan 70°C) dan durasi pemanasan (3, 5, dan 7 menit).

### **2.2.3. Parameter Pengamatan**

#### *pH*

pH diukur dengan menggunakan pH meter (bench top meter PL-700, Taiwan), menstandarkannya dengan larutan buffer pH 4 dan pH 7. Pengukur pH dicelupkan

ke dalam telur cair dan kemudian dibiarkan sampai angkanya stabil. Nilai yang ditunjukkan pada layar monitor pH meter adalah nilai pH dari telur cair.

#### Total Mikroba

Perhitungan total mikroba menggunakan metode Total Plate Count (TPC). Telur cair (25 g) dimasukkan kedalam Erlenmeyer yang berisi BPW 225 mL (pengenceran  $10^{-1}$ ). Pengenceran dilakukan dengan memindahkan suspensi 1 mL ke dalam tabung reaksi yang berisi 9 mL larutan BPW. Larutan diencerkan hingga  $10^{-7}$ . 1 mL larutan dari pengenceran  $10^{-6}$  dan  $10^{-7}$  dimasukkan kedalam cawan petri yang berisi media PCA (15-20 mL). Dilakukan inkubasi menggunakan incubator pada suhu 34-36°C selama 24-48 jam dengan posisi cawan terbalik. Perhitungan jumlah mikroorganisme dengan rumus perhitungan sebagai berikut :

$$N = \frac{\sum c}{[(1 \times n_1) + (0,1 \times n_2) \times (d)]} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana N = jumlah koloni per ml produk;  $\sum c$  = jumlah total koloni pada semua plate (25-250);  $n_1$  = jumlah plate yang dapat dihitung pada pengenceran pertama;  $n_2$  = Jumlah plate yang dapat dihitung pada pengenceran kedua; dan d = pengenceran pertama yang dihitung/ memenuhi ketentuan (25-250).

#### Total Salmonella

Pengujian *Salmonella* dilakukan dengan cara sampel telur cair dipipet sebanyak 1 ml dan diencerkan menggunakan 9 mL NaCl fisiologi hingga  $10^{-7}$ . Tiga seri dari pengenceran terakhir ( $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  dan  $10^{-7}$ ) diambil masing-masing 1 ml dan diinokulasikan ke dalam cawan petri dan dituangkan media SSA (*Salmonella Shigella Agar*). Kemudian diinkubasi selama 24-48 jam pada suhu 37°C. Pertumbuhan Bakteri *Salmonella* ditandai dengan koloni yg khas berwarna hitam. Perhitungan jumlah mikroorganisme menggunakan rumus perhitungan sebagai berikut:

$$Cell\ count = v \times n \times 1/f \dots\dots\dots (2.2)$$

#### Kinetika Inaktivasi Mikroba

Parameter kinetik seperti waktu reduksi desimal (D) atau nilai D, konstanta laju inaktivasi (k), nilai-z (z) dan energi aktivasi (Ea) menggambarkan inaktivasi mikroba selama pemrosesan termal. Kinetika inaktivasi orde pertama (persamaan 2.3-2.5) digunakan untuk menggambarkan kinetika kelangsungan hidup mikroba berdasarkan penelitian. Pengaruh suhu terhadap reduksi mikroba diturunkan dari persamaan Arrhenius seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.6 (Makroo *et al.*, 2020).

$$\frac{N}{N_0} = e^{-k_T \times t} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = \log e^{-k_T \times t} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$D = \frac{\ln 10}{k_T} = \frac{2.303}{k_T} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$k_T = k_0 \exp\left[\frac{-Ea}{RT}\right] \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana N= jumlah atau konsentrasi sel mikroba pada waktu t (min),  $k_T$  adalah laju reaksi (menit<sup>-1</sup>), dan D adalah waktu reduksi decimal (waktu yang dibutuhkan mengurangi jumlah mikroba per satu log CFU/mL) (menit), t adalah suhu,  $E_a$ = energi aktivasi (kJ/mol); R= konstanta gas universal ( $8,314 \times 10^{-3}$  kJ/mol).

### *Pengukuran Reologi*

Pengukuran reologi dari telur cair dilakukan dengan menggunakan menggunakan viskometer tipe *concentric cylinder* (LV DV-I Prime, Brookfield Engineering, USA) dengan menggunakan *set spindle* LV dan RV dengan kecepatan 0 sampai 100% dengan suhu 30°C, 50°C dan 70°C. Nilai % torsi dan kecepatan putar yang diperoleh dari hasil pengukuran dikonversi menjadi nilai shear stress dan *shear rate* berdasarkan pada jenis spindle yang digunakan. Penggunaan *spindle* RV dihitung menggunakan metode Mitschka (Mitschka, 1982) sedangkan penggunaan *spindle* LV dihitung menggunakan metode yang diuraikan dalam pedoman penggunaan viscometer Brookfield AMETEK. Parameter reologi telur cair diprediksi dengan menggunakan dua model reologi, yaitu model *Power Law* (persamaan 2.7) dan model *Herschel-Bulkle* (persamaan 2.8) (Hardinasinta *et al.*, 2021)

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (2.8)$$

di mana  $\sigma$  = *shear stress* (Pa),  $\dot{\gamma}$  = *shear rate* (s<sup>-1</sup>), K = koefisien konsistensi (Pa.s<sup>n</sup>), n = indeks aliran, dan  $\sigma_0$  = yield stress (Pa).

Pengaruh suhu terhadap viskositas telur cair dievaluasi berdasarkan pada perubahan nilai koefisien konsistensi pada setiap perlakuan suhu yang secara matematis dapat ditentukan dengan persamaan Arrhenius di bawah ini (Kobus *et al.*, 2019):

$$K = K_0 \exp \frac{E_a}{RT} \dots\dots\dots (2.9)$$

di mana K = koefisien konsistensi,  $E_a$  = energi aktivasi, R = konstanta gas universal ( $8,314 \times 10^{-3}$  kJ/mol.K) dan T = suhu absolut (Kelvin).

### **2.2.4. Analisis Data**

Analisis data reologi untuk menentukan model reologi yang paling sesuai untuk pasteurisasi telur cair. Model yang paling sesuai ditentukan berdasarkan kriteria statistik, yaitu koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang paling tinggi. Data koefisien konsistensi reologi dan indeks aliran serta pH, total mikroba, dan total *Salmonella* yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan ANOVA dan dilanjutkan dengan uji Duncan ( $P < 0,05$ ) menggunakan software XLSTAT Student 2021.4.1.1196 (Addinsoft, New York) untuk mengetahui pengaruh masing-masing perlakuan suhu dan waktu pemanasan ohmik terhadap telur cair pasteurisasi.

## 2.3. Hasil dan Pembahasan

### 2.3.1. Nilai pH, Inaktivasi Mikroorganisme dan *Salmonella* pada Telur Cair

Salah satu faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme pada bahan makanan adalah pH. Berdasarkan Tabel 2.1, suhu dan waktu pemanasan berpengaruh nyata ( $p < 0,05$ ) terhadap pH telur ayam ras. pH telur cair mengalami penurunan setelah pemanasan, yaitu dari pH 7,60 menjadi 6,93. Hal ini disebabkan oleh komposisi kimia dan mobilitas ion dalam makanan cair bergantung pada suhu (Amiali *et al.*, 2006). Semakin tinggi suhu, mobilitas ion meningkat dan menurunkan pH (Atilgan & Unluturk, 2008). Menurut Souza & Fernández (2011) pH produk telur cair dipengaruhi oleh suhu.

Tabel 2.1. pH, total mikroba, dan *Salmonella* telur ayam cair dengan perlakuan suhu dan waktu pemanasan ohmic yang berbeda

Perlakuan	pH	Total mikroba (log CFU/ml)	Total <i>Salmonella</i> (log CFU/ml)
Kontrol	7,60±0.10 <sup>a</sup>	7,80±0.06 <sup>a</sup>	1,92±0.06 <sup>a</sup>
Pemanasan 50 <sup>0</sup> C selama 3 menit	6,97±0.06 <sup>b</sup>	5,86±0.05 <sup>b</sup>	1,1±0.17 <sup>b</sup>
Pemanasan 50 <sup>0</sup> C selama 5 menit	7,03±0.12 <sup>b</sup>	4,69±0.09 <sup>c</sup>	nd
Pemanasan 50 <sup>0</sup> C selama 7 menit	7,10±0.10 <sup>b</sup>	3,68±0.01 <sup>e</sup>	nd
Pemanasan 60 <sup>0</sup> C selama 3 menit	6,93±0.21 <sup>b</sup>	4,36±0.04 <sup>d</sup>	nd
Pemanasan 60 <sup>0</sup> C selama 5 menit	7,13±0.06 <sup>b</sup>	3,37±0.05 <sup>f</sup>	nd
Pemanasan 60 <sup>0</sup> C selama 7 menit	7,03±0.21 <sup>b</sup>	2,32±0.01 <sup>h</sup>	nd
Pemanasan 70 <sup>0</sup> C selama 3 menit	7,17±0.21 <sup>b</sup>	3,09±0.06 <sup>g</sup>	nd
Pemanasan 70 <sup>0</sup> C selama 5 menit	7,17±0.40 <sup>b</sup>	2,15±0.02 <sup>i</sup>	nd
Pemanasan 70 <sup>0</sup> C selama 7 menit	7,20±0.26 <sup>b</sup>	1,18±0.04 <sup>j</sup>	nd

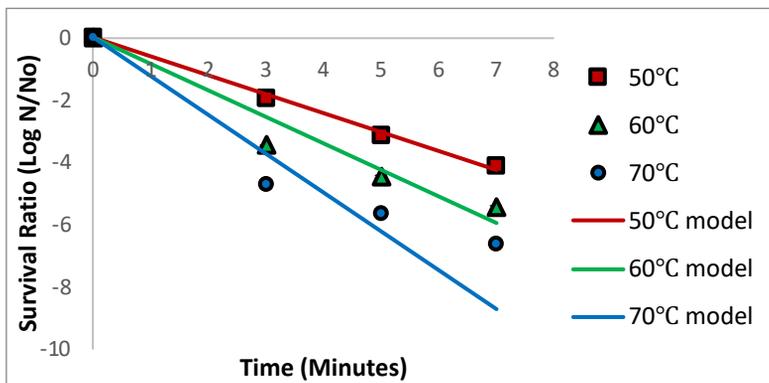
Keterangan: Angka yang diikuti oleh superscript yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ). Nilai adalah rata-rata dari 3 ulangan dan standar deviasi. nd : tidak terdeteksi

Tabel 2.1 menunjukkan semakin lama dan semakin tinggi suhu pemanasan ohmic yang digunakan semakin rendah total mikroba dan total *Salmonella* tidak terdeteksi pada telur cair. Hal ini disebabkan medan listrik pada pemanasan ohmic menyebabkan kematian sel dan eksudasi dengan meningkatnya laju elektroporasi (Camargo *et al.*, 2010). Pemanasan ohmic mampu menginaktivasi mikroorganisme karena adanya panas. Adanya medan listrik menyebabkan kerusakan sel (Science *et al.*, 2008). Elektroporasi membrane sel yang terjadi pada pemanasan ohmic karena adanya medan listrik. Proses ini berpotensi untuk menginduksi transmembrane dan pembentukan pori-pori. Pemanasan ohmic menginduksi efek termal yang dapat merusak sel dan berkontribusi terhadap kematian mikroorganisme (Siguemoto *et al.*, 2020).

Mikroorganisme patogen yang ada pada telur terdiri dari *Salmonella typhimurium*, *Salmonella spp*, *Salmonella enteridis* and *Listeria monocytogenes*. Rentannya produk telur ditumbuhi mikroorganisme pembusuk yang bersifat patogen dikarenakan kandungan gizi yang tinggi (Unluturk *et al.*, 2010). Penerapan pemanasan ohmic pada telur cair mampu menurunkan total mikroba walaupun suhu pemanasan rendah yaitu 50°C (Tabel 2.1). Inaktivasi mikroba pada pemanasan

ohmic disebabkan oleh elektroporasi akibat efek non-thermal yaitu adanya medan listrik yang diinduksi (Makroo *et al.*, 2020). Menurut Pires *et al.* (2021) efek non-thermal dapat membunuh mikroorganisme pada suhu yang lebih rendah. Hal ini disebabkan karena terjadi pembentukan pori pada membrane yang menyebabkan permeabilitas sel dan dapat menyebabkan kematian (Schottro *et al.*, 2020).

Produk telur harus bebas *Salmonella* dan mengandung  $<2$  log *Enterobacteriaceae* (Jin *et al.*, 2009). Tabel 2.1 menunjukkan terjadi penurunan populasi *Salmonella* setelah pemanasan ohmic suhu  $50^{\circ}\text{C}$  selama 3 menit dan tidak terdeteksi pada pemanasan selama 5 dan 7 menit. Pada suhu  $60^{\circ}\text{C}$  dan  $70^{\circ}\text{C}$  populasi *Salmonella* tidak terdeteksi. Hal ini menunjukkan bahwa pemanasan ohmic efektif dalam menginaktivasi *Salmonella*. Menurut Park & Kang (2013) pemanasan menggunakan ohmic lebih baik dalam menurunkan populasi *Salmonella typhimurium* dibandingkan dengan pemanasan konvensional. Perlakuan ohmic pada suhu  $50^{\circ}\text{C}$  (30 detik) sudah dapat mengurangi populasi *S. typhimurium*. Hasil penelitian Pires *et al.* (2021) pemanasan ohmic mengurangi *Salmonella sp.* sekitar 5 log CFU per mL pada suhu  $60^{\circ}\text{C}$  hanya dalam waktu 2,91 menit.



Gambar 2.1. *Fitting* data survival ratio (*scatter*) mikroba telur ayam cair pemanasan ohmic terhadap data persamaan model inaktivasi orde pertama dikombinasikan dengan persamaan Arrhenius (*line*).

Gambar 2.1 menunjukkan inaktivasi mikroba pada telur yang ditunjukkan dengan survival ratio total mikroba sangat bergantung pada suhu dan waktu proses pemanasan ohmic. Peningkatan suhu dan waktu menyebabkan semakin banyak mikroba mengalami inaktivasi. Dalam 7 menit, penggunaan suhu ohmic  $50-70^{\circ}\text{C}$  mampu menurunkan survival rasion mencapai 4-6 log N/No. Inaktivasi mikroba ini dapat digambarkan dengan menggunakan persamaan inaktivasi orde pertama yang telah dilinierkan dikombinasikan dengan persamaan Arrhenius. Pencocokan (*fitting*) data eksperimen survival ratio ( $\log N/N_0$ ) dengan data persamaan divalidasi menggunakan koefisien determinasi (*R-squared* atau  $R^2$ ). Nilai koefisien determinasi untuk ketiga variable suhu ( $50-70^{\circ}\text{C}$ ) melebihi 0,90 (Tabel 2.2), yang menunjukkan model tersebut valid. Namun, peningkatan suhu menyebabkan nilai dari  $R^2$  bernilai

mengalami penurunan, yang menunjukkan kesesuaian antara data eksperimen dan data hasil permodelan semakin menurun karena total mikroba yang diinaktivasi terbatas pada total mikroba sebanyak 7,80 log CFU/mL (Tabel 2.1). Ini menunjukkan bahwa prediksi data eksperimen dengan persamaan inaktivasi orde pertama hanya terbatas pada nilai maksimum total mikroba tersebut. Hal ini sesuai dengan Somavat *et al.* (2012), juga telah melakukan prediksi inaktivasi mikroba dengan persamaan inaktivasi orde pertama dengan variasi suhu ohmic 121°C, 125 °C dan 130 °C dengan waktu *holding* 0-120 detik, yang mengkonfirmasi pola yang sama dalam menginaktivasi mikroba dengan peningkatan suhu pemanasan ohmic. Prediksi inaktivasi mikroba dengan model ini juga telah digunakan riset sebelumnya dengan tingkat validasi yang cukup baik ( $R^2 > 0.90$ ) (Bahmid *et al.*, 2020; Makroo *et al.*, 2017). Model inaktivasi ini memberikan gambaran efektifitas penggunaan suhu dan waktu pemanasan ohmic dalam menginaktivasi mikroorganisme patogen (Pires *et al.*, 2021).

Tabel 2.2 Nilai Parameter estimasi dan koefisien determinasi dari persamaan inaktivasi orde pertama yang dikombinasikan dengan persamaan model arrhenius

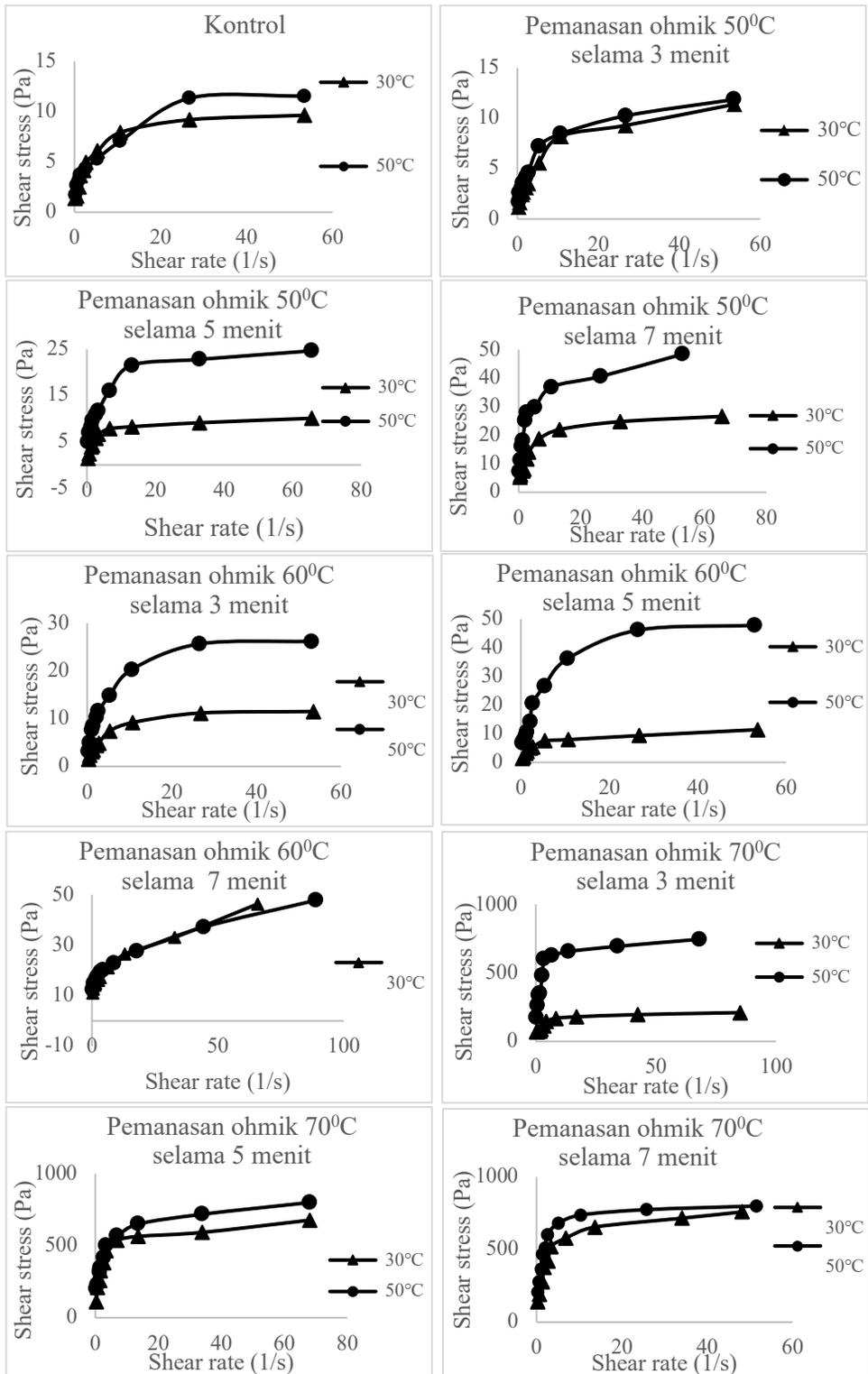
Suhu (°C)	1 <sup>st</sup> order kinetic model	$k_T$ (menit <sup>-1</sup> )	D (menit)	$R^2$	$k_{Tref}$ (menit <sup>-1</sup> )	$E_a$ (kJ/mol)
50	$y=1,43e^{-1,40t}$	1,40	1,65	1,00		
60	$y=1,90e^{-1,96t}$	1,96	1,18	0,95	2,00	33,91
70	$y=2,48e^{-2,87t}$	2,87	0,80	0,91		

Persamaan inaktivasi order pertama ini yang dilanjutkan dengan persamaan arrhenius dapat mengestimasi laju konstanta inaktivasi ( $k_T$ ), waktu yang dibutuhkan untuk mengurangi jumlah mikroba per satu log CFU/mL (D), laju konstanta inaktivasi pada suhu referensi ( $k_{Tref}$ ), dan energi aktivasi ( $E_a$ ). Tabel 2.2. menunjukkan peningkatan suhu menyebabkan laju inaktivasi semakin cepat dan waktu yang dibutuhkan mengurangi pertumbuhan mikroba semakin singkat. Peningkatan suhu 20°C (dari 50°C ke 70°C) mempercepat laju inaktivasi mencapai 1,47 per menit dan menghemat waktu penurunan mikroba 0,85 menit. Estimasi waktu penurunan mikroba untuk setiap 1 log CFU/mL tercepat pada suhu pemanasan 70°C (0,80 menit) dengan estimasi laju inaktivasi konstan mencapai 2,87 per menit. Nilai D tersebut sebanding dengan nilai D pada ohmic heating dalam menginaktivasi *Geobacillus stearothermophilus* pada suhu 121°C dan frekuensi 10 kHz, yang mencapai 0,88 menit (Somavat *et al.*, 2012). Penelitian Kahraman & Gacar (2023) menggunakan metode pemanasan ohmik pada telur cair utuh untuk menginaktivasi *Salmonella enteritidis*. Pada tegangan 20 V/cm, populasi mikroba berkurang sebanyak 4 log dalam 4 menit. Selain itu, persamaan tersebut juga mengestimasi laju inaktivasi pada suhu referensi mencapai 2 per menit dengan estimasi energi aktivasi mencapai 33,91 kJ/mol. Menurut pendapat Tian *et al.* (2018) energi aktivasi ( $E_a$ ) untuk inaktivasi mikroorganisme, khususnya spora *Bacillus subtilis* dengan pemanasan ohmik dilaporkan berada pada kisaran 19,06-29,39 kJ/mol.

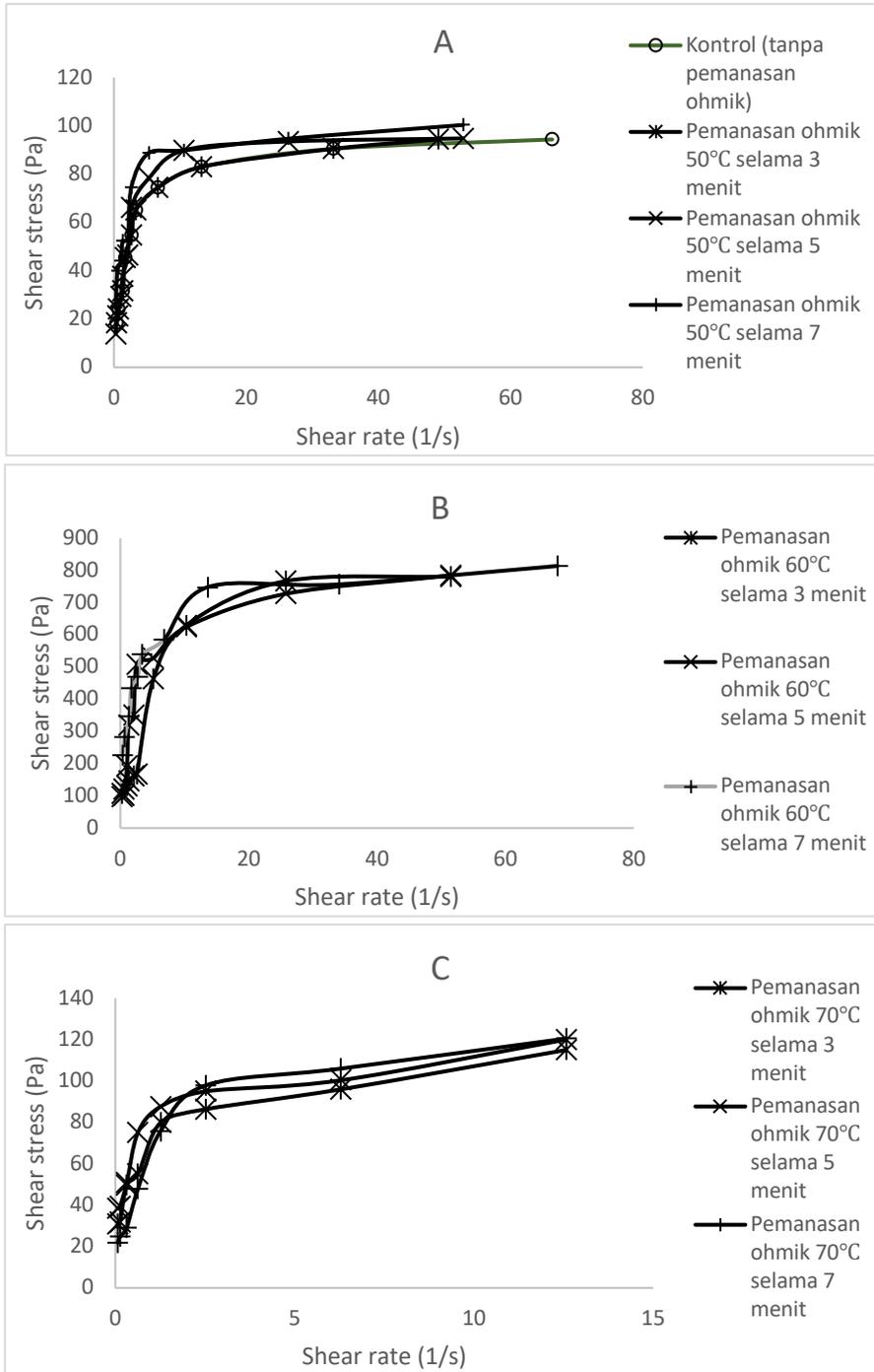
### 2.3.2. Reologi Telur Cair

Reologi merupakan aspek penting dalam mendesain pengolahan produk makanan, termasuk telur cair. Memahami sifat aliran suatu produk, seperti perubahan viskositas saat dipanaskan, memungkinkan optimalisasi proses produksi dan memastikan kualitas produk tetap terjaga. Pada telur cair yang sering digunakan dalam industri makanan, pengetahuan tentang perilaku alirannya sangat penting, terutama ketika produk ini dipasteurisasi atau dipanaskan dengan metode pemanasan ohmik. Salah satu tantangan dalam pengolahan produk cair seperti telur adalah memastikan bahwa metode pemanasan tidak merusak tekstur dan stabilitasnya. Oleh karena itu, pemilihan model reologi yang tepat sangat penting untuk memahami bagaimana produk ini berperilaku dalam berbagai kondisi pengolahan. Pendapat ini sejalan dengan penelitian Kumbár *et al.* (2015) yang menyatakan bahwa reologi dapat memberikan informasi untuk mendesain pengolahan optimal pada produk makanan (Kumbár *et al.*, 2015). Model reologi yang berbeda yaitu Herschel-Bulkley dan Power law telah diuji dalam penelitian ini untuk memastikan perilaku aliran dari telur cair. Hasil menunjukkan model reologi *Power-Law* menghasilkan tingkat akurasi yang cukup tinggi dengan nilai  $R^2 \geq 0,83$  dibandingkan dengan *Herschel-Bulkley* nilai  $R^2 \geq 0,65$  (nilai tidak ditampilkan). Hal yang sama pernah dilaporkan oleh (Mahroug *et al.*, 2024) perilaku shear-thinning telur cair yang diberikan perlakuan pasteurisasi dapat dijelaskan dengan menggunakan model *Power-Law*. Menurut Severa *et al.* (2010) produk telur cair merupakan cairan shear-thinning dengan *Power-law* indeks  $0 < n < 1$ .

Berdasarkan Gambar 2.2 dan Gambar 2.3 menunjukkan bahwa kurva atau perilaku aliran telur cair yang dipanaskan dengan teknologi ohmic menunjukkan karakteristik non-newtonian *pseudoplastic* dimana tegangan geser (*shear stress*) meningkat secara non-linear seiring peningkatan laju geser (*shear rate*). Pada fluida *pseudoplastic*, viskositas menurun seiring peningkatan laju geser, yang berarti bahwa bahan menjadi lebih mudah mengalir pada *shear rate* yang lebih tinggi. Pengaruh suhu dan lama pemanasan dalam pemanasan ohmic secara langsung mempengaruhi sifat reologi telur cair. Peningkatan suhu dan durasi pemanasan cenderung menurunkan nilai indeks aliran  $n < 1$  sebagaimana tercantum pada Tabel 2.3 yang menunjukkan karakteristik *pseudoplastic*. Menurut pendapat Mahroug *et al.* (2024); Abbasnezhad *et al.* (2015); Kumbár *et al.* (2021) menyatakan bahwa telur utuh cair menunjukkan perilaku aliran *pseudoplastic* dengan nilai  $n < 1$ . Pendapat Kumbár *et al.* (2015) bahwa karakteristik reologi telur cair dengan menggunakan hukum *Herschel–Bulkley* dan *Ostwald–DeWaele* (*power law*) menunjukkan kurva *pseudoplastic*. Sifat *pseudoplastic* dari *biopolymer* terutama protein digunakan untuk menentukan kondisi pencampuran dan pemrosesan. Hal ini dapat menunjukkan viskositas rendah pada *shear rate* yang tinggi dan sifat suspense pada *shear rate* yang rendah (Singh & Ramaswamy, 2015). Icier & Bozkurt (2011), karakteristik reologi telur cair dengan pemanasan ohmic menggunakan hukum *power law* menunjukkan kurva non-newtonian yaitu karakteristik *thixotropy* di mana viskositas berkurang seiring waktu saat diberi tegangan geser (*shear stress*)



Gambar 2.2. Kurva aliran telur pada pemanasan suhu reologi 30°C dan 50°C



Gambar 2.3. Kurva aliran telur pada pemanasan reologi 70°C: (A) pemanasan ohmik suhu 50°C; (B) pemanasan ohmik suhu 60°C; (C) pemanasan ohmik suhu 70°C

Suhu dan lama pemanasan ohmic berpengaruh signifikan terhadap nilai indeks aliran dan koefisien konsistensi. Indeks aliran ( $n$ ) telur cair bervariasi antara 0,230-0,437 dan koefisien konsistensi ( $k$ ) bervariasi antara 3,03-279,37 (Tabel 2.3). Pada suhu yang lebih tinggi dan durasi pemanasan yang lebih lama, nilai konsistensi ( $k$ ) meningkat signifikan, menunjukkan peningkatan viskositas. Nilai eksponen indeks aliran ( $n$ ) menunjukkan bahwa telur cair cenderung menunjukkan karakteristik *pseudoplastic* (nilainya  $<1$ ), yang berarti bahwa viskositas berkurang seiring peningkatan laju geser. Menurut Abbasnezhad *et al.* (2015) dengan meningkatnya suhu, koefisien konsistensi ( $k$ ) telur cair meningkat sementara indeks perilaku aliran ( $n$ ) menunjukkan penurunan. Peningkatan viskositas yang disebabkan oleh suhu ini dapat dikaitkan dengan protein yang peka terhadap panas. Hal ini didukung oleh Icier & Bozkurt (2011), suhu dan waktu pemanasan mempengaruhi nilai indeks aliran dan koefisien konsistensi dalam telur cair. Bervariasinya nilai indeks aliran dan koefisien konsistensi ini disebabkan karena tingginya presentase kandungan protein yang mengalami denaturasi.

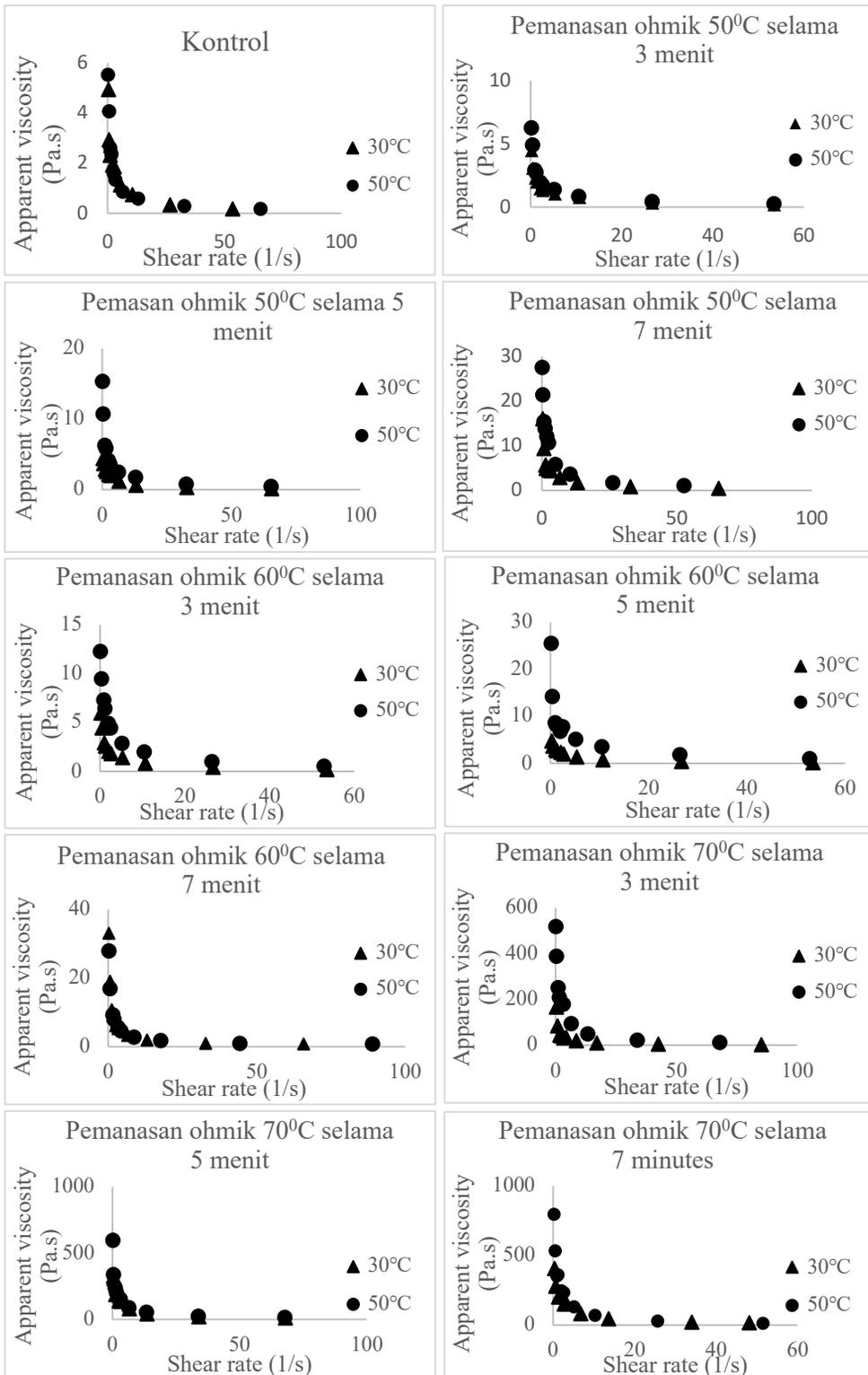
Peningkatan suhu dan lama pemanasan menyebabkan peningkatan koefisien konsistensi yang signifikan yaitu pada suhu 70°C selama 7 menit. Hasil temuan ini sesuai dengan Icier & Bozkurt (2011) yang menyatakan peningkatan koefisien konsistensi yang signifikan pada telur cair yang telah mengalami pemanasan ohmic pada suhu 60°C disebabkan karena adanya perubahan struktur protein. Hal ini juga didukung oleh Atilgan & Unluturk (2008) yang menyatakan bahwa telur cair mengandung protein yang tinggi sehingga pada suhu 60°C struktur kimia yang sensitif terhadap panas mengalami kerusakan (koagulasi protein). Selain itu telur mengandung lipid pada bagian kuning telur. Lipid pada kuning telur yaitu lipoprotein yang dapat diklasifikasi menjadi tiga yaitu densitas sangat rendah, densitas rendah, dan densitas tinggi. Lipid merupakan polimer dengan berat molekul tinggi yang dapat meningkatkan viskositas baik pada konsentrasi yang sangat kecil.

Pengaruh pemanasan ohmic dengan suhu dan lama pemanasan berbeda terhadap apparent viscosity dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. Viskositas telur cair semakin meningkat dengan meningkatnya suhu dan lama pemanasan. Peningkatan viskositas telur cair ini dapat dikaitkan dengan perubahan struktur protein, di mana protein yang ada dalam telur mulai mengalami denaturasi akibat suhu tinggi. Proses denaturasi ini mengubah interaksi molekular dalam telur cair, menghasilkan tekstur yang lebih kental dan perubahan karakteristik alirannya. Menurut Marco-mol *et al.* (2011), viskositas telur cair meningkat ketika perlakuan thermal diaplikasikan. Peningkatan viskositas pada telur cair disebabkan terjadinya denaturasi ovotransferrin yang sensitive terhadap panas. Dan didukung oleh Atilgan & Unluturk, (2008), viskositas telur cair mengalami perubahan akibat terjadinya koagulasi protein. Viskositas telur cair memiliki ketergantungan terhadap shear rate. Efek ini disebabkan karena kerusakan lemak dan protein yang dikandung oleh telur cair. Jika terjadi kerusakan struktur maka apparent viscosity akan menurun dan akan terjadi sheartinning (Souza & Fernández, 2013).

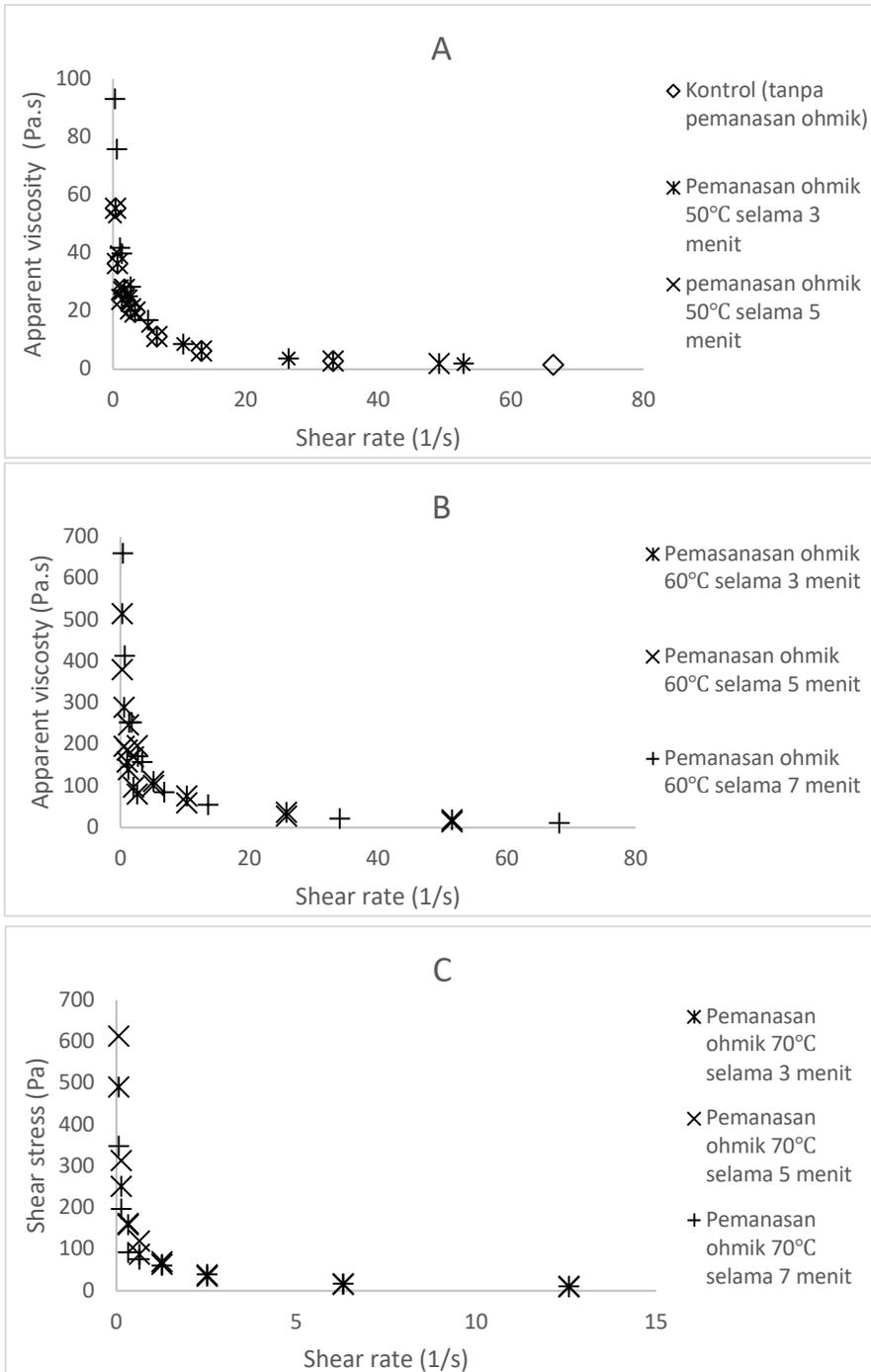
Tabel 2.3. Indeks aliran (n) dan koefisien konsistensi (k) telur cair dengan suhu dan lama pemanasan ohmic berbeda

Perlakuan	Suhu pemanasan reologi (°C)	n	k (Pa.s <sup>n</sup> )	R <sup>2</sup>	Model reologi power law
Kontrol	30	0,354±0,04 <sup>cdef</sup>	3,026±0,34 <sup>g</sup>	0,94	$\sigma=3,026\gamma^{0,354}$
	50	0,349±0,01 <sup>cdef</sup>	3,149±0,09 <sup>g</sup>	0,98	$\sigma=3,149\gamma^{0,349}$
	70	0,312±0,02 <sup>efgh</sup>	76,637±5,17 <sup>ef</sup>	0,87	$\sigma=76,637\gamma^{0,312}$
Pemanasan ohmik 50°C selama 3 menit	30	0,304±0,12 <sup>efghi</sup>	3,183±0,80 <sup>g</sup>	0,96	$\sigma=3,183\gamma^{0,304}$
	50	0,312±0,03 <sup>efgh</sup>	3,460±0,57 <sup>g</sup>	0,97	$\sigma=3,460\gamma^{0,312}$
	70	0,339±0,02 <sup>cdef</sup>	145,645±13,20 <sup>cd</sup>	0,90	$\sigma=145,645\gamma^{0,339}$
Pemanasan ohmik 50°C selama 5 menit	30	0,329±0,01 <sup>cdefg</sup>	3,368±0,33 <sup>g</sup>	0,85	$\sigma=3,368\gamma^{0,329}$
	50	0,317±0,00 <sup>defgh</sup>	6,872±0,04 <sup>g</sup>	0,97	$\sigma=6,872\gamma^{0,317}$
	70	0,260±0,03 <sup>ghi</sup>	164,153±50,76 <sup>c</sup>	0,91	$\sigma=164,153\gamma^{0,260}$
Pemanasan ohmik 50°C selama 7 menit	30	0,354±0,01 <sup>cdef</sup>	7,641±0,27 <sup>g</sup>	0,94	$\sigma=7,641\gamma^{0,354}$
	50	0,923±0,02 <sup>a</sup>	9,770±7,43 <sup>g</sup>	0,92	$\sigma=9,770\gamma^{0,923}$
	70	0,296±0,01 <sup>efghi</sup>	207,559±45,80 <sup>b</sup>	0,90	$\sigma=207,559\gamma^{0,296}$
Pemanasan ohmik 60°C selama 3 menit	30	0,390±0,00 <sup>bcd</sup>	5,140±0,05 <sup>g</sup>	0,96	$\sigma=5,140\gamma^{0,390}$
	50	0,392±0,01 <sup>bcd</sup>	7,090±0,10 <sup>g</sup>	0,96	$\sigma=7,090\gamma^{0,392}$
	70	0,437±0,02 <sup>b</sup>	226,290±64,85 <sup>b</sup>	0,90	$\sigma=226,290\gamma^{0,437}$
Pemanasan ohmik 60°C selama 5 menit	30	0,399±0,00 <sup>bc</sup>	6,304±0,57 <sup>g</sup>	0,92	$\sigma=6,304\gamma^{0,399}$
	50	0,327±0,09 <sup>cdefg</sup>	15,291±4,08 <sup>g</sup>	0,95	$\sigma=15,291\gamma^{0,327}$
	70	0,430±0,05 <sup>b</sup>	209,823±14,04 <sup>b</sup>	0,88	$\sigma=209,823\gamma^{0,430}$
Pemanasan ohmik 60°C selama 7 menit	30	0,367±0,01 <sup>bcde</sup>	7,316±0,10 <sup>g</sup>	0,97	$\sigma=7,316\gamma^{0,367}$
	50	0,260±0,02 <sup>ghi</sup>	14,682±2,24 <sup>g</sup>	0,98	$\sigma=14,682\gamma^{0,260}$
	70	0,247±0,01 <sup>hi</sup>	220,737±14,18 <sup>b</sup>	0,83	$\sigma=220,737\gamma^{0,247}$
Pemanasan ohmik 70°C selama 3 menit	30	0,230±0,06 <sup>i</sup>	63,164±1,74 <sup>f</sup>	0,91	$\sigma=63,164\gamma^{0,230}$
	50	0,295±0,03 <sup>efghi</sup>	75,837±10,78 <sup>ef</sup>	0,85	$\sigma=75,837\gamma^{0,295}$
	70	0,280±0,02 <sup>fghi</sup>	246,493±57,76 <sup>ab</sup>	0,96	$\sigma=246,493\gamma^{0,280}$
Pemanasan ohmik 70°C selama 5 menit	30	0,235±0,01 <sup>i</sup>	74,053±5,48 <sup>ef</sup>	0,90	$\sigma=74,053\gamma^{0,235}$
	50	0,250±0,04 <sup>hi</sup>	112,389±1,74 <sup>cd</sup>	0,95	$\sigma=112,389\gamma^{0,250}$
	70	0,287±0,06 <sup>fghi</sup>	269,729±27,24 <sup>a</sup>	0,93	$\sigma=269,729\gamma^{0,287}$
Pemanasan ohmik 70°C selama 7 menit	30	0,349±0,01 <sup>cdef</sup>	78,007±7,95 <sup>ef</sup>	0,89	$\sigma=78,007\gamma^{0,349}$
	50	0,356±0,02 <sup>cdef</sup>	125,298±49,43 <sup>cd</sup>	0,98	$\sigma=125,298\gamma^{0,356}$
	70	0,392±0,05 <sup>bcd</sup>	279,370±13,63 <sup>a</sup>	0,96	$\sigma=279,370\gamma^{0,392}$

Keterangan: Angka yang diikuti oleh superscript yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan signifikan ( $p < 0,05$ ). Nilai adalah rata-rata dari 3 ulangan dan standar deviasi.



Gambar 2.4. Apparent viskositas pada pemanasan suhu reologi 30°C dan 50°C



Gambar 2.5. Apparent viskositas pada pemanasan suhu reologi 70°C: (A) suhu pemanasan ohmik 50°C; (B) suhu pemanasan ohmik 60°C; (C) suhu pemanasan ohmik 70°C

Energi aktivasi telur cair dapat dilihat pada tabel 2.4. Energi aktivasi cenderung meningkat dengan meningkatnya suhu dan durasi pemanasan ohmik pada suhu 50°C dan 60°C. Namun, efek ini tidak sepenuhnya linier, dan ada penurunan pada beberapa durasi pemanasan. Pada suhu 70°C, terjadi penurunan energi aktivasi yang signifikan dibandingkan dengan kontrol dan pemanasan pada suhu yang lebih rendah. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) menunjukkan variasi dalam keakuratan data, dengan nilai yang lebih tinggi pada beberapa kondisi pemanasan yang lebih lama. Data ini menunjukkan bahwa pemanasan ohmik pada suhu yang lebih tinggi dan durasi yang lebih lama dapat secara signifikan menurunkan energi aktivasi yang disebabkan oleh perubahan struktural pada fluida akibat pemanasan. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa pemanasan ohmik dapat memodifikasi sifat reologi cairan telur, dengan kontrol suhu dan durasi pemanasan yang tepat untuk mencapai sifat aliran yang diinginkan.

Energi aktivasi menurun seiring dengan kenaikan suhu dan durasi pemanasan karena proses denaturasi protein yang terjadi dalam telur. Pada awalnya, diperlukan energi yang lebih tinggi untuk memulai pemutusan ikatan dalam protein dan memulai denaturasi. Namun, setelah protein mulai terdenaturasi pada suhu tinggi, perubahan lebih lanjut memerlukan energi yang lebih rendah karena struktur protein sudah tidak stabil. Ini menyebabkan penurunan energi aktivasi yang signifikan seiring waktu dan suhu pemanasan yang meningkat. Hal ini didukung oleh Icier & Bozkurt (2011) bahwa pemanasan ohmik telah terbukti lebih efisien dalam mengurangi energi aktivasi dibandingkan dengan pemanasan konvensional. Hal ini disebabkan oleh kemampuan pemanasan ohmik untuk mendistribusikan panas lebih merata dan lebih cepat, sehingga reaksi kimia seperti denaturasi protein terjadi dengan energi yang lebih rendah. Pernyataan ini juga sesuai dengan Abbasnezhad et al. (2015) menegaskan bahwa energi aktivasi memang dipengaruhi oleh suhu. Peningkatan suhu akan menurunkan energi aktivasi, karena molekul memiliki lebih banyak energi kinetik pada suhu yang lebih tinggi, yang memungkinkan reaksi kimia terjadi dengan lebih sedikit hambatan energi.

Tabel 2.4. Energi aktivasi telur cair dengan suhu dan lama pemanasan ohmic berbeda

Sampel	Energi aktivasi ( kJ/mol)	$R^2$
Kontrol	68,32	0,73
Pemanasan ohmik 50°C selama 3 menit	80,86	0,73
Pemanasan ohmik 50°C selama 5 menit	72,75	0,86
Pemanasan ohmik 50°C selama 7 menit	69,98	0,78
Pemanasan ohmik 60°C selama 3 menit	80,25	0,78
Pemanasan ohmik 60°C selama 5 menit	74,85	0,90
Pemanasan ohmik 60°C selama 7 menit	72,60	0,88
Pemanasan ohmik 70°C selama 3 menit	28,93	0,82
Pemanasan ohmik 70°C selama 5 menit	27,68	0,94
Pemanasan ohmik 70°C selama 7 menit	27,38	0,97

Berdasarkan hasil penelitian, perlakuan terbaik yang direkomendasikan untuk pasteurisasi telur cair menggunakan pemanasan ohmic adalah pada suhu 60°C selama 5 menit. Perlakuan ini terbukti efektif dalam menurunkan total mikroba hingga 3,37 log CFU/ml, dengan hasil yang lebih baik dibandingkan pemanasan selama 3 menit pada suhu yang sama. Hal yang terpenting, *Salmonella* tidak terdeteksi setelah pemanasan selama 5 menit, sehingga menjamin produk lebih aman dari risiko kontaminasi mikrobiologis. Dari sisi kualitas, perubahan reologi yang terjadi relatif minimal, dengan viskositas dan tekstur telur cair tetap terjaga. Perlakuan ini juga memberikan keseimbangan optimal antara waktu pemrosesan dan hasil yang efektif, tanpa memerlukan energi berlebih yang biasanya dibutuhkan oleh metode pemanasan pada suhu yang lebih tinggi. Dengan demikian, pemanasan ohmic pada suhu 60°C selama 5 menit merupakan metode yang efisien, aman, dan cocok untuk diterapkan dalam pengolahan industri makanan, khususnya pada produk berbasis telur cair yang membutuhkan keamanan tinggi dan kualitas yang stabil. Selain itu, perlakuan ini juga sudah sesuai dengan standar SNI (Standar Nasional Indonesia), di mana batas maksimum total mikroba adalah 5 log CFU/ml dan *Salmonella* negatif. Hal ini memastikan bahwa produk yang dihasilkan tidak hanya aman tetapi juga memenuhi standar nasional yang berlaku.

#### 2.4. Kesimpulan

Suhu 50°C total mikroba berkurang dari 7,80 log CFU/ml menjadi 3,68 log CFU/ml setelah 7 menit pemanasan, dengan laju inaktivasi sebesar 0,140 menit<sup>-1</sup>, *Salmonella* tidak terdeteksi setelah 5 dan 7 menit pemanasan. Pada suhu 60°C, total mikroba berkurang dari 7,80 log CFU/ml menjadi 2,32 log CFU/ml setelah 7 menit pemanasan, dengan laju inaktivasi sebesar 0,196 menit<sup>-1</sup>, dan *Salmonella* tidak terdeteksi pada semua durasi pemanasan. Pada suhu 70°C, total mikroba berkurang dari 7,80 log CFU/ml menjadi 1,18 log CFU/ml setelah 7 menit pemanasan, dengan laju inaktivasi sebesar 0,287 menit<sup>-1</sup>, dan *Salmonella* tidak terdeteksi pada semua durasi pemanasan. Energi aktivasi inaktivasi mikroba sebesar 33,91 kJ/mol. Pemanasan ohmic juga mempengaruhi sifat reologi telur cair, dengan peningkatan viskositas seiring dengan peningkatan suhu dan durasi pemanasan. Indeks aliran ( $n$ ) bervariasi antara 0,230-0,437 dan koefisien konsistensi ( $k$ ) antara 3,03-279,370 Pa.s <sup>$n$</sup> , tergantung pada suhu dan durasi pemanasan. Energi aktivasi reologi sebesar 80,86 kJ/mol pada suhu 50°C selama 3 menit dan menurun menjadi 27,38 kJ/mol pada suhu 70°C selama 7 menit. Secara keseluruhan, pemanasan ohmic terbukti sebagai metode yang efektif dan efisien untuk pengolahan dan pengawetan telur cair karena menghasilkan produk yang lebih aman dari cemaran mikroba.

#### Daftar Pustaka

Abbasnezhad, B., Hamdami, N., & Khodaei, D. (2015). Modeling of rheological characteristics of liquid egg white and yolk at different pasteurization temperatures. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 9(3), 359–368. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9243-6>

- Amiali, M., Ngadi, M. O., Raghavan, V. G. S., & Nguyen, D. H. (2006). Electrical Conductivities of Liquid Egg Products and Fruit Juices Exposed to High Pulsed Electric Fields. *International Journal of Food Properties*, 9(3), 533–540. <https://doi.org/10.1080/10942910600596456>
- Atilgan, M. R., & Unluturk, S. (2008). Rheological Properties of Liquid Egg Products (LEPS). *International Journal of Food Properties*, 296–309. <https://doi.org/10.1080/10942910701329658>
- Baba, K., Kajiwara, T., Watanabe, S., Katsuki, S., Sasahara, R., & Inoue, K. (2018). Low-Temperature Pasteurization of Liquid Whole Egg using Intense Pulsed Electric Fields. *Electronics and Communications in Japan*, 101(2), 87–94. <https://doi.org/10.1002/ecj.12053>
- Bahmid, N. A., Heising, J., Fogliano, V., & Dekker, M. (2020). Packaging Design Using Mustard Seeds as a Natural Antimicrobial: A Study on Inhibition of *Pseudomonas fragi* in Liquid Medium. *Foods*, 9(6), 789. <https://doi.org/10.3390/foods9060789>
- Camargo, M., Alves, C., De, A. M., & Vessoni, T. C. (2010). Ohmic heating e a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 436–441. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.06.003>
- Fadavi, A., Yousefi, S., Darvishi, H., & Mirsaedghazi, H. (2018). Comparative study of ohmic vacuum, ohmic, and conventional-vacuum heating methods on the quality of tomato concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.004>
- Gantois, I., Ducatelle, R., Pasmans, F., Haesebrouck, F., Gast, R., Humphrey, T. J., and Van Immerseel, F. (2009). Mechanisms of egg contamination by *Salmonella Enteritidis*. *FEMS Microbiology Reviews*, 33, 718–738. doi:10.1111/j.1574-6976.2008.00161.x.
- Geveke, D. J., Gurtler, J. B., Jones, D. R., & Bigley, A. B. W. (2016). Inactivation of Salmonella in Shell Eggs by Hot Water Immersion and Its Effect on Quality. *Journal of Food Science*, 81(3). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13233>
- Gurtler, J. B., Rivera, R. B., Zhang, H. Q., & Sommers, C. H. (2010). Behaviour of avirulent *Yersinia Pestis* in liquid whole egg as affected by storage temperature, antimicrobials and thermal pasteurization. *Journal of Food Safety*, 30(3), 537–557. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.2010.00224.x>
- Hamilton, R. M. G., & Bryden, W. L. (2021). Relationship between egg shell breakage and laying hen housing systems – an overview. *World's Poultry Science Journal*, 77(2), 249–266. <https://doi.org/10.1080/00439339.2021.1878480>
- Hardinasinta, G., Salengke, S., Mursalim, M., & Muhidong, J. (2021). Effect of Ohmic Heating on the Rheological Characteristics and Electrical Conductivity of Mulberry (*Morus nigra*) Puree. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 289–297. <https://doi.org/10.31883/pjfn/140151>
- Ho, H.-Y., Ciou, J.-Y., Qiu, Y.-T., Hsieh, S.-L., Shih, M.-K., Chen, M.-H., Tu, C.-W., Hsieh, C.-W., & Hou, C.-Y. (2021). Improvement of Foaming Characteristics and Stability of Sterilized Liquid Egg with Egg White Hydrolysate (EWH). *Foods*, 10(6), 1326. <https://doi.org/10.3390/foods10061326>
- Icier, F., & Bozkurt, H. (2011). Ohmic Heating of Liquid Whole Egg: Rheological Behaviour and Fluid Dynamics. *Food and Bioprocess Technology*, 4(7), 1253–1263. <https://doi.org/10.1007/s11947-009-0229-4>
- Jin, T., Zhang, H., Hermawan, N., & Dantzer, W. (2009). Effects of pH and temperature on inactivation of *Salmonella typhimurium* DT104 in liquid whole egg by pulsed electric fields. *International Journal of Food Science and*

- Technology*, 44, 367–372. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01759.x>
- Kahraman, H., & Gacar, A. (2023). Effect of ohmic heating application on *Salmonella* Enteritidis in liquid whole egg. *Journal of Advances in VetBio Science and Techniques*. <https://doi.org/10.31797/vetbio.1283407>.
- Kementerian Pertanian. (2022). *Outlook komoditas peternakan telur ayam ras petelur*. Kementerian Pertanian. Jakarta.
- Kementerian Pertanian. (2023). *Analisis komoditas pangan strategis tahun 2023*. Kementerian Pertanian. Jakarta.
- Kobus, Z., Nadulski, R., Wilczyński, K., Starek, A., Zawiślak, K., Rydzak, L., & Andrejko, D. (2019). Modeling of rheological properties of cloudy apple juice using master curve. *CyTA - Journal of Food*, 17(1), 648–655. <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1630484>
- Kumbár, V., Nedomová, Š., Strnková, J., & Buchar, J. (2015). Effect of egg storage duration on the rheology of liquid egg products. *Journal of Food Engineering*, 156, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.02.011>
- Kumbár, V., Ondrušíková, S., Trost, D., Polcar, A., & Nedomová, Š. (2021). Rheological and Flow Behaviour of Yolk, Albumen and Liquid Whole Egg from Eggs of Six Different Poultry Species. *Foods*, 10(12), 3130. <https://doi.org/10.3390/foods10123130>
- Leite, T. S., Sastry, S. K., & Cristianini, M. (2018). Effect of concentration and consistency on ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12883>
- Li, Y., Xie, C., Zhang, H., Zhao, X., Jin, Z., Liu, Z., and Guo, J. (2021). Global spread and epidemic potential of multidrug-resistant *Salmonella* Enteritidis ST11 in poultry. *Nature Communications*, 12, 1–11. doi:10.1038/s41467-021-25131-w.
- Liu, Y., Oey, I., Bremer, P., Carne, A., & Silcock, P. (2019). Modifying the Functional Properties of Egg Proteins Using Novel Processing Techniques: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 986–1002. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12464>
- Mahroug, H., Mouellef, A., Bourekoua, H., Djeghim, F., Chenchouni, H., Benbelkacem, A., El Okki, M. H., Fetouhi, A., Silini, N., & De La Barca, A. M. C. (2024). Breadmaking and protein characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes tolerant against drought and heat in Algeria. *AIMS Agriculture and Food*, 9(2), 531–550. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2024030>
- Makroo, H. A., Rastogi, N. K., & Srivastava, B. (2020). Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 97(January), 451–465. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.015>
- Makroo, H. A., Saxena, J., Rastogi, N. K., & Srivastava, B. (2017). Ohmic heating assisted polyphenol oxidase inactivation of watermelon juice: Effects of the treatment on pH, lycopene, total phenolic content, and color of the juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), e13271. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13271>
- Marco-mol, R., Hernando, I., Isabel, P., Soliva-fortuny, R., & Mart, O. (2011). *Physical and Structural Changes in Liquid Whole Egg Treated with High-Intensity Pulsed Electric Fields*. 76(2), 257–264. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.02016.x>

- Müller, W. A., Damasceno, L., Marczak, F., & Sarkis, J. R. (2020). Microbial inactivation by ohmic heating: Literature review and influence of different process variables. *Trends in Food Science & Technology*, 99(May 2019), 650–659. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.021>
- Ouyang, B., Demirci, A., & Patterson, P. H. (2020). Inactivation of Escherichia coli and Salmonella in liquid egg white by pulsed UV light and its effects on quality. *Journal of Food Process Engineering*, 43(5). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13243>
- Park, I., & Kang, D. (2013). Effect of Electroporation by Ohmic Heating for Inactivation of Escherichia coli O157: H7, Salmonella enterica Serovar Typhimurium, Juice. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(23), 7122–7129. <https://doi.org/10.1128/AEM.01818-13>
- Pires, R. P. S., Cappato, L. P., Guimarães, J. T., Rocha, R. S., Silva, R., Balthazar, C. F., Freitas, M. Q., Silva, P. H. F., Neto, R. P. C., Tavares, M. I. B., Granato, D., Raices, R. S. L., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2020). Ohmic heating for infant formula processing: Evaluating the effect of different voltage gradient. *Journal of Food Engineering*, 280, 109989. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109989>
- Pires, R. P. S., Guimarães, J. T., Barros, C. P., Balthazar, C. F., Chinha, A. I. A., Freitas, M. Q., Duarte, M. C. K. H., Silva, P. H. F., Pimentel, T. C., Abud, Y. K. D., Sant'Anna, C., Sant'Ana, A. S., Silva, M. C., Nascimento, J. S., & Cruz, A. G. (2021). Ohmic heating increases inactivation and morphological changes of Salmonella sp. And the formation of bioactive compounds in infant formula. *Food Microbiology*, 97, 103737. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103737>
- Ribeiro, A. C., Casal, S., Lopes Da Silva, J. A., & Saraiva, J. A. (2023). Effects of Sequential Combination of Moderate Pressure and Ultrasound on Subsequent Thermal Pasteurization of Liquid Whole Egg. *Foods*, 12(13), 2459. <https://doi.org/10.3390/foods12132459>
- Schottro, F., Biebl, D., Gruber, M., Burghardt, N., Schelling, J., Gratz, M., Schoenher, C., & Jaeger, H. (2020). Inactivation of vegetative microorganisms by ohmic heating in the kilohertz range – Evaluation of experimental setups and non-thermal effects. 63(March). <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102372>
- Science, F., Kawamura, S., Himoto, J., & Growth, F. (2008). Effects of Ohmic Heating on Microbial Counts and Denaturation of Proteins in Instructions for use. December 2013. <https://doi.org/10.3136/fstr.14.117>
- Severa, L., Nedomová, Š., & Buchar, J. (2010). Influence of storing time and temperature on the viscosity of an egg yolk. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 266–269. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.020>
- Siguemoto, S., Funcia, E. S., Ed, P., Kubo, M. T. K., Boillereaux, L., Sastry, S. K., & Gut, J. A. W. (2020). Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: A critical review. *Current Opinion in Food Science*, 35(January), 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.004>
- Singh, A., & Ramaswamy, H. S. (2015). High pressure modification of egg components: Exploration of calorimetric, structural and functional characteristics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.09.010>
- Singh, A., Sharma, M., & Ramaswamy, H. S. (2015). Effect of High Pressure Treatment on Rheological Characteristics of Egg Components. *International*

- Journal of Food Properties*, 18(3), 558–571.  
<https://doi.org/10.1080/10942912.2013.837063>
- Somavat, R., Mohamed, H. M. H., Chung, Y.-K., Yousef, A. E., & Sastry, S. K. (2012). Accelerated inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores by ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 69–76.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.028>
- Souza, P. M. De, & Fernández, A. (2011). Effects of UV-C on physicochemical quality attributes and *Salmonella enteritidis* inactivation in liquid egg products. *Food Control*, 22(8), 1385–1392. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.02.017>
- Souza, P. M. De, & Fernández, A. (2013). Rheological properties and protein quality of UV-C processed liquid egg products. *Food Hydrocolloids*, 31(1), 127–134.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.013>
- Syamaladevi, R. M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Sablani, S., Carter, B., & Campbell, G. (2016). Influence of Water Activity on Thermal Resistance of Microorganisms in Low-Moisture Foods: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(2), 353–370. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12190>
- Tian, X., Yu, Q., Wu, W., & Dai, R. (2018). Inactivation of Microorganisms in Foods by Ohmic Heating: A Review. *Journal of Food Protection*, 81(7), 1093–1107.  
<https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-343>
- Tóth, A., Németh, C., Zeke I, Barkoi, A.A., Hidas, K., & Friedrich, L. (2020) Effects of combined HHP and heat treatment on viscosity attributes and microbiological condition of liquid egg yolk. *Progress* 16: 67–74.  
<http://dx.doi.org/10.1556/446.2020.10007>
- Unluturk, S., At, M. R., Baysal, A. H., & Unluturk, M. S. (2010). Modeling inactivation kinetics of liquid egg white exposed to UV-C irradiation. *International Journal of Food Microbiology*, 142, 341–347.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.07.013>
- Villa-Rojas, R., Zhu, M.-J., Paul, N. C., Gray, P., Xu, J., Shah, D. H., & Tang, J. (2017). Biofilm forming *Salmonella* strains exhibit enhanced thermal resistance in wheat flour. *Food Control*, 73, 689–695.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.021>
- Zhang, M., Li, J., Chang, C., Wang, C., Li, X., & Su, Y. (2019). Effect of egg yolk on the textural , rheology and structural properties of egg gels. *Journal of Food Engineering*, 246(October 2018), 1–6.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.024>