

**PENDUGAAN UMUR SIMPAN PRODUK SARI BUAH PALA
DALAM KEMASAN KALENG DENGAN METODE
ACCELERATED SHELF LIFE TESTING (ASLT)
MODEL *ARRHENIUS***

TUGAS AKHIR

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dari
Universitas Pasundan**

**Oleh:
BASSAM SHAUQI MASKATI
NPM: 223020056**



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI PANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2026**

ABSTRAK

PENDUGAAN UMUR SIMPAN PRODUK SARI BUAH PALA DALAM KEMASAN KALENG DENGAN METODE *ACCELERATED SHELF LIFE TESTING* (ASLT) MODEL *ARRHENIUS*

**Oleh:
Bassam Shauqi Maskati
NPM: 223020056
(Program Studi Teknologi Pangan)**

Daging buah pala memiliki potensi gizi dan fungsional yang tinggi namun rentan terhadap kerusakan, sehingga teknologi pengalengan diperlukan. Proses pemanasan komersial berpotensi memicu degradasi mutu, menjadikan penetapan batas waktu kedaluwarsa secara ilmiah sangat esensial. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui umur simpan produk sari buah pala dalam kemasan kaleng pada suhu penyimpanan yang berbeda menggunakan metode *Accelerated Shelf Life Testing* (ASLT) model *Arrhenius*. Penelitian ini dilakukan dengan menginkubasi sampel sari buah pala kaleng pada tiga kondisi suhu ekstrem yaitu 30°C, 40°C, dan 50°C dengan pengamatan dilakukan setiap 7 hari sekali selama 28 hari penyimpanan. Parameter analisis laju penurunan mutu yang digunakan meliputi derajat keasaman (pH), total fenolik, dan total padatan terlarut (°Brix). Hasil penelitian berdasarkan parameter pH menunjukkan bahwa sari buah pala kaleng yang disimpan pada suhu 30°C, 40°C, dan 50°C diduga memiliki umur simpan berturut-turut selama 311 hari, 276 hari, dan 249 hari. Berdasarkan parameter total fenolik, produk diduga memiliki umur simpan berturut-turut selama 110 hari, 71 hari, dan 48 hari. Berdasarkan parameter total padatan terlarut, produk diduga memiliki umur simpan berturut-turut selama 156 hari, 88 hari, dan 51 hari. Suhu dan lama penyimpanan berpengaruh nyata terhadap laju penurunan mutu sari buah pala kaleng, di mana parameter derajat keasaman (pH) terbukti memiliki nilai energi aktivasi terendah sehingga ditetapkan sebagai parameter utama penentu batas kedaluwarsa produk.

Kata kunci: umur simpan, buah pala, pengalengan, ASLT, model *Arrhenius*, parameter kritis, derajat keasaman.

ABSTRACT

SHELF-LIFE ESTIMATION OF CANNED NUTMEG JUICE USING THE ACCELERATED SHELF-LIFE TESTING (ASLT) METHOD ARRHENIUS MODEL

By:

Bassam Shauqi Maskati

NPM: 223020056

(Department of Food Technology)

Nutmeg flesh has high nutritional and functional potential but is highly perishable, necessitating canning technology. Commercial heating processes potentially trigger quality degradation, making scientifically establishing expiration dates essential. This study aims to determine the shelf life of canned nutmeg juice products at different storage temperatures using the Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) method with the Arrhenius model. This research was conducted by incubating canned nutmeg juice samples at three extreme temperature conditions, namely 30°C, 40°C, and 50°C, with observations made every 7 days for 28 days of storage. The quality degradation rate analysis parameters used included the degree of acidity (pH), total phenolics, and total soluble solids (°Brix). The results based on the pH parameter showed that canned nutmeg juice predicted at storage temperatures of 30°C, 40°C, and 50°C has a shelf life of 311 days, 276 days, and 249 days, respectively. Based on the total phenolics parameter, the product is predicted to have a shelf life of 110 days, 71 days, and 48 days, respectively. Based on the total soluble solids parameter, the product is predicted to have a shelf life of 156 days, 88 days, and 51 days, respectively. Temperature and duration of storage significantly affect the quality degradation rate of canned nutmeg juice, where the degree of acidity (pH) parameter possesses the lowest activation energy, thus established as the primary determinant of the product's expiration.

Keywords: shelf life, nutmeg, canning, ASLT, Arrhenius model, critical parameter, degree acidity.

**PENDUGAAN UMUR SIMPAN PRODUK SARI BUAH PALA
DALAM KEMASAN KALENG DENGAN METODE
ACCELERATED SHELF LIFE TESTING (ASLT)
MODEL *ARRHENIUS***

Oleh:
Bassam Shauqi Maskati
NPM: 223020056
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui:
Pembimbing Akademik
Tanggal 12 Agustus 2026



(Jaka Rukmana, S.T., M.T.)

**PENDUGAAN UMUR SIMPAN PRODUK SARI BUAH PALA
DALAM KEMASAN KALENG DENGAN METODE
ACCELERATED SHELF LIFE TESTING (ASLT)
*MODEL ARRHENIUS***

Oleh:
Bassam Shauqi Maskati
NPM: 223020056
(Program Studi Teknologi Pangan)

Fakultas Teknik
Universitas Pasundan

Menyetujui:
Koordinator Pembelajaran, Kemahasiswaan, Alumni, Agama dan Budaya
Program Studi Teknologi Pangan

Tanggal **13-08-2026**

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'R' followed by a horizontal line and a loop.

(Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T.)

PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR

Tugas akhir yang tidak dipublikasikan terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Fakultas dan Universitas, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Universitas Pasundan. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil penelitian Tugas Akhir ini dapat di tulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Maskati, B. S. (2026): *Pendugaan Umur Simpan Produk Sari Buah Pala Dalam Kemasan Kaleng Dengan Metode Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) Model Arrhenius*, Tugas Akhir Program Sarjana, Universitas Pasundan.

dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut:

Maskati, B. S. (2026): *Shelf-Life Estimation Of Canned Nutmeg Juice Using The Accelerated Shelf-Life Testing (Aslt) Method Arrhenius Model*, Bachelor's Thesis, Universitas Pasundan.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh tugas akhir haruslah seizin Dekan Fakultas Teknik Universitas Pasundan.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas akhir dengan Judul Pendugaan Umur Simpan Produk Sari Buah Pala Dalam Kaleng Dengan Metode *Accelerated Shelf Life Testing (ASLT) Model Arrhenius*. Penulis laporan tugas akhir ini merupakan program sarjana di Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan.

Penulisan laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan atas bantuan doa dan dukungan motivasi baik secara langsung maupun tidak langsung dari berbagai pihak, oleh sebab itu penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Dosen Pembimbing sekaligus Ketua Prodi, Jaka Rukmana, S.T., M.T., yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, motivasi, dan juga ilmu selama penulisan laporan tugas akhir.
2. Dosen penguji I, Ir. Yusep Ikrawan, M.Sc., Ph.D. yang telah bersedia untuk menguji dan memberikan saran serta masukan dalam penulisan laporan tugas akhir.
3. Dosen penguji II, Ir. Ina Siti Nurminabari, M.P. yang telah bersedia untuk menguji dan memberikan saran serta masukan dalam penulisan laporan tugas akhir.
4. Sekretaris Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, Dr. Ira Endah Rohima, S.T., M.Si.

5. Koordinator Belmawabud Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, Rizal Maulana Ghaffar, S.T., M.T.
6. Dosen beserta segenap civitas akademik di lingkup Program Studi Teknologi Pangan Universitas Pasundan, Bandung.
7. Kedua orang tua tercinta Nabila Ahmad Syammakh dan Shauqi Husen Maskati serta Adik Khalilah Shauqi Al-Maskati yang selalu memberikan doa serta dukungan secara moril maupun materil dan semangat utama bagi penulis.
8. Kepada Dzakhirah Asma Nurullah, Citra Fiqih Rahmah, Dena Alifia Az-zahra, Fadlan Mohamad Gibran, Jidan Alfarizi, dan Charunnisa Ismail selaku teman, sahabat dan penyemangat bagi penulis.
9. Kepada Nazwa Ismi Nasyita dan Fakhriza Saukan Asshidiqie sebagai teman satu topik mengenai umur simpan yang sudah membantu dan pemberi semangat bagi penulis.
10. Kepada semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu atas kelancaran penulis selama proses penyusunan .

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan tugas akhir ini masih memiliki berbagai kekurangan dan belum sepenuhnya sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun guna perbaikan di masa mendatang. Semoga segala bentuk dukungan dan bantuan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang setimpal dari Allah SWT. Penulis juga berharap laporan ini dapat memberikan manfaat, baik bagi diri sendiri maupun bagi para pembaca, serta turut berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Kerangka Pemikiran	5
1.6 Hipotesis Penelitian	9
1.7 Tempat dan Waktu Penelitian	9
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Pala	10
2.2 Pengalengan dan Sterilisasi Komersial	12
2.2.1 Pengalengan	12
2.2.2 Sterilisasi Komersial	13
2.3 Penentuan Umur Simpan dengan Metode ASLT Model <i>Arrhenius</i>	14
BAB III. METODE PENELITIAN	22
3.1 Bahan dan Alat Penelitian	22
3.1.1 Bahan Penelitian	22

3.1.2	Alat Penelitian.....	22
3.2	Metode Penelitian.....	23
3.2.1	Rancangan Penelitian.....	23
3.2.2	Rancangan Percobaan	23
3.2.3	Rancangan analisis.....	28
3.2.4	Rancangan Respon	32
3.3	Prosedur Penelitian.....	33
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....		36
4.1	Hasil Penentuan Respon pH.....	36
4.1.1	Hasil Penentuan Umur Simpan Berdasarkan Respon pH	39
4.2	Hasil Penentuan Respon Total Fenolik.....	42
4.2.1	Hasil Penentuan Umur Simpan Berdasarkan Respon Total Fenolik.....	46
4.3	Hasil Penentuan Respon Total Padatan Terlarut.....	49
4.3.1	Hasil Penentuan Umur Simpan berdasarkan Respon Total Padatan Terlarut.....	52
4.4	Penetapan Parameter Kritis dan Umur Simpan Akhir Produk.....	56
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN		58
5.1	Kesimpulan	58
5.2	Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA		60
LAMPIRAN.....		64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Hasil Analisis Sari buah pala Kaleng Selama Penyimpanan	25
2. Nilai Slope, Intercept dan Determinan pada reaksi ordo 0 dan ordo 1 Sari buah pala Kaleng Selama Penyimpanan.....	26
3. Persamaan <i>Arrhenius</i> Penurunan Mutu Produk Sari buah pala Kaleng Selama Penyimpanan.....	27
4. Derajat keasaman (pH) Sari Buah Pala Kaleng	36
5. Hasil Penentuan Orde Reaksi Nilai pH.....	40
6. Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan Nilai pH pada Setiap Suhu Penyimpanan.....	40
7. Konstanta Penurunan Mutu dan Umur Simpan Sari Buah Pala Parameter.....	41
8. Total Senyawa Fenolik Sari Buah Pala Kaleng	43
9. Hasil Penentuan Orde Reaksi Nilai Total Fenolik	47
10. Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total senyawa fenolik pada setiap suhu penyimpanan	48
11. Konstanta Penurunan Mutu dan Umur Simpan Sari Buah Pala Parameter Total Fenolik.....	49
12. Total Padatan Terlarut Sari Buah Pala Kaleng.....	50
13. Hasil Penentuan Orde Reaksi Nilai Total Fenolik	54
14. Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total padatan terlarut pada Setiap Suhu Penyimpanan.....	54
15. Konstanta Penurunan Mutu dan Umur Simpan Sari Buah Pala Parameter total padatan terlarut.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Buah Pala	10
2. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu penyimpanan pada reaksi ordo nol	18
3. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu pada reaksi ordo satu	19
4. Grafik Hubungan antara $\ln k$ dengan $1/T$ pada persamaan <i>Arrhenius</i> ..	20
5. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu penyimpanan pada reaksi ordo nol	29
6. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu pada reaksi ordo satu	30
7. Grafik Hubungan antara $\ln k$ dengan $1/T$ pada persamaan <i>Arrhenius</i> ..	31
8. Diagram Alir Prosedur Penelitian	35
9. Grafik perubahan derajat keasaman (pH) pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0	39
10. Grafik perubahan derajat keasaman (pH) pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1	39
11. Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan Nilai pH	41
12. Grafik perubahan total senyawa fenolik pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0	46
13. Grafik perubahan total senyawa fenolik pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1	47
14. Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total senyawa fenolik	48
15. Grafik perubahan total padatan terlarut pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0	53
16. Grafik perubahan total padatan terlarut pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1	53

17. Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total padatan terlarut	
.....	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Prosedur Analisis Penentuan Derajat Keasaman (pH) Metode Potentiometri Menggunakan pH-Meter (Cendrowski et al., 2024).....	64
2. Prosedur Analisis Penentuan Total Fenolik Metode Spektrofotometri Folin-Ciocalteu (Cendrowski et al., 2024).....	64
3. Prosedur Analisis Total Padatan Terlarut Metode Refraktometri Menggunakan Refraktometer (AOAC, 2012)	65
4. Perhitungan Kebutuhan Bahan Baku	66
5. Perhitungan Kebutuhan Jumlah Sampel Analisis Perhitungan Kebutuhan Jumlah Sampel Analisis.....	66
6. Perhitungan Biaya Analisis Penelitian.....	66
7. Perhitungan Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Pala (pH)	66
8. Perhitungan Penentuan Total Fenolik dan Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Pala (Total Fenolik).....	69
9. Perhitungan Penentuan Total Padatan Terlarut dan Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Pala(Total Padatan Terlarut)	80
10. Dokumentasi Penelitian	87

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan terkait: (1.1) Latar Belakang Penelitian, (1.2) Identifikasi Masalah, (1.3) Maksud dan Tujuan Penelitian, (1.4) Manfaat Penelitian, (1.5) Kerangka Pemikiran, (1.6) Hipotesis Penelitian, dan (1.7) Tempat dan Waktu Penelitian.

1.1 Latar Belakang

Keanekaragaman sumber daya alam berbasis kearifan lokal memiliki potensi strategis sebagai komoditas agrowisata unggulan daerah melalui pengembangan produk pangan olahan tradisional. Di tengah dinamika pasar global, pelestarian daya tarik komoditas lokal menuntut adanya sinergi komprehensif antara pemerintah daerah, pelaku agroindustri, dan masyarakat. Optimalisasi kekayaan alam ini berpeluang besar dalam mengakselerasi perekonomian daerah, di mana sektor Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) memegang peranan sentral dalam meningkatkan nilai tambah produk.

Pala (*Myristica fragrans* Houtt.) merupakan salah satu komoditas rempah utama Indonesia yang memberikan kontribusi signifikan terhadap ekspor rempah nasional. Bagian biji (*nutmeg*) dan fuli (*mace*) telah lama dimanfaatkan secara luas sebagai bumbu, bahan parfum, farmasi, dan kosmetik karena kandungan minyak atsiri yang tinggi, khususnya miristisin (*myristicin*), elemisin, dan safrol (Krishnamoorthy & Rema, 2001).

Daging buah pala (*pericarp*) memiliki potensi gizi dan fungsional yang sangat menjanjikan untuk dikembangkan sebagai pangan fungsional. Penelitian

menunjukkan bahwa ekstrak dengan metode metanol pada daging buah pala mengandung total fenolik yang cukup tinggi, yaitu mencapai 388,36 mg GAE/100 g (Assa et al., 2014). Selain itu, daging buah pala juga memiliki kandungan senyawa flavonoid dan tanin yang terbukti berkorelasi kuat dalam memberikan aktivitas antioksidan yang signifikan (Antasionasti et al., 2022; Pathakakula et al., 2024). Komposisi bioaktif dan fungsional ini menjadikan sari buah pala memiliki keunggulan kompetitif yang tidak kalah dari produk minuman buah tropis lainnya.

Di tengah tren global dan nasional minuman *ready-to-drink* (RTD) fungsional yang tumbuh >12 % per tahun (Euromonitor International, 2024), serta meningkatnya kesadaran konsumen terhadap produk “*clean label*, natural, dan tinggi antioksidan (NielsenIQ, 2023). Sari buah pala muncul sebagai kandidat inovasi yang sangat potensial. Diversifikasi produk pala yang sudah berhasil antara lain selai pala, dodol pala, manisan pala kering, sirup pala, dan *wine* pala (Pathakakula et al., 2024). Namun, bentuk minuman RTD dalam kemasan kaleng dengan sterilisasi komersial belum banyak dikembangkan secara ilmiah di Indonesia.

Pengalengan dengan sterilisasi termal (121°C/15–20 menit) merupakan teknologi paling efektif untuk mencapai *commercial sterility* pada produk pangan pH rendah (<4,6), sehingga produk aman disimpan pada suhu ruang selama 18–36 bulan tanpa pengawet kimia (Teixeira, 2018; Robertson, 2016). Namun, proses termal ini dapat menyebabkan degradasi vitamin C hingga 40–60 %, penurunan total fenolik 15–35 %, perubahan °Brix, viskositas, dan potensi *browning* non-enzimatis (Rickman et al., 2007; Burgos, 2022).

Menunggu produk kaleng rusak secara alami (metode *real-time*) dapat memakan waktu bertahun-tahun, sehingga tidak efisien untuk kebutuhan industri atau penelitian. Oleh karena itu, metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) menjadi solusi yang paling efektif (Arif, 2016). Oleh karena umur simpan *real-time* pada produk steril komersial dapat mencapai 2–5 tahun, pengujian konvensional menjadi tidak efisien dan mahal. Metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) menggunakan model *Arrhenius* dengan minimal tiga suhu dipercepat telah terbukti akurat memprediksi umur simpan produk kaleng jus buah (Labuza & Schmidl, 1985; Calligaris et al., 2023).

Untuk menerjemahkan data dari kondisi dipercepat tersebut ke kondisi penyimpanan normal, digunakan pendekatan kinetika kimia. Model *Arrhenius* adalah model matematis yang paling umum digunakan dalam ASLT untuk produk pangan. Model ini secara akurat menjelaskan hubungan antara laju reaksi kimia (penurunan mutu) dengan suhu penyimpanan (Labuza & Riboh, 1982). Dengan melacak perubahan parameter kritis (misalnya aktivitas antioksidan atau pH) pada berbagai suhu, laju kerusakan pada suhu ruang normal dapat dihitung dan umur simpan dapat diprediksi secara ilmiah.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan melakukan pendugaan umur simpan produk menggunakan metode ASLT dengan pendekatan model *Arrhenius*. Hasil penelitian ini akan memberikan data ilmiah yang esensial bagi produsen untuk memenuhi standar regulasi Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM), menjamin kualitas produk, dan memberikan kepastian keamanan pangan bagi konsumen.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian dalam latar belakang penelitian, maka dapat diidentifikasi masalah yakni bagaimana estimasi umur simpan produk sari buah pala kaleng yang disimpan pada suhu penyimpanan yang berbeda-beda, yang kemudian ditentukan menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) dengan pendekatan model *Arrhenius*?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk melakukan pendugaan umur simpan produk sari buah pala dalam kemasan kaleng melalui pengamatan perubahan mutu selama penyimpanan pada suhu yang berbeda-beda menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) dengan pendekatan model *Arrhenius*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh data laju penurunan mutu dan menetapkan nilai umur simpan (waktu kedaluwarsa) produk sari buah pala kaleng berdasarkan parameter kritis yang terpilih.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan penelitian ini adalah dapat menjadi acuan data ilmiah yang akurat bagi produsen mengenai estimasi umur simpan produk sari buah pala kaleng, yang dapat dijadikan dasar referensi untuk penentuan tanggal kedaluwarsa pada label kemasan serta menambah data dan literatur ilmiah di bidang teknologi pangan, khususnya mengenai aplikasi metode ASLT model *Arrhenius* pada produk minuman tradisional Indonesia yang diproses secara sterilisasi komersial.

1.5 Kerangka Pemikiran

Menurut Utami dan Rahmawati (2024), Sari buah pala adalah salah satu produk yang saat ini banyak dikembangkan menjadi minuman fungsional. Ciri khas sari buah pala sendiri terletak pada rasa asam sepat dan pahit yang disebabkan oleh senyawa tanin yang terdapat pada daging buah pala serta warna yang pucat dan keruh karena adanya senyawa alkaloid dalam sari buah pala.

Untuk meningkatkan nilai ekonomis, jangkauan distribusi, dan masa simpan, diperlukan teknologi pengawetan. Pengalengan yang dikombinasikan dengan sterilisasi komersial adalah salah satu metode pengawetan jangka panjang yang paling efektif. Proses pengemasan hermetis (kedap udara) dan pemanasan suhu tinggi ini bertujuan untuk membunuh mikroorganisme patogen dan pembusuk, sehingga produk menjadi aman dan stabil secara mikrobiologis (Robertson, 2016).

Meskipun sterilisasi sangat penting untuk keamanan, proses termal (panas tinggi) yang diterimanya berpotensi memengaruhi komposisi produk. Menurut Fennema (2017), pemanasan dapat menyebabkan perubahan pada makronutrien, seperti denaturasi protein atau karamelisasi gula, serta degradasi komponen minor seperti vitamin dan senyawa fungsional.

Menurut penelitian Faza, et al., (2024), Ambang pH 4,5 di pilih sebagai batas aman karena di bawah nilai tersebut bakteri *Clostridium botulinum* kehilangan kemampuannya untuk tumbuh. Utami dan Rahmawati (2024), juga mengatakan bahwa nilai pH pada daging buah pala sebesar 3,32. Nilai pH juga berkaitan dengan awetnya bahan pangan itu sendiri dimana produk pangan yang memiliki kadar asam tinggi cenderung lebih awet karena mikroba akan sulit tumbuh

atau berkembang pada suasana asam. Hal ini menjadi tantangan tersendiri bagi produk berasam rendah, sebab kondisi anaerob di dalam kaleng memicu bakteri tersebut untuk berkembang dan memproduksi toksin. Karena *C. botulinum* bersifat termodurik (tahan panas) dan pembentuk spora, maka inaktivasi sporanya menjadi target utama yang harus dicapai dalam proses sterilisasi komersial.

Umur simpan didefinisikan sebagai periode waktu di mana produk pangan tetap aman dan mempertahankan kualitas sensorik, kimia, fisik, dan mikrobiologis yang dapat diterima (Kilcast & Subramaniam, 2011). Pada produk yang telah steril komersial (kaleng), kerusakan utama umumnya bukan lagi disebabkan oleh pertumbuhan mikroba, melainkan oleh reaksi kimia dan fisika yang berjalan lambat, seperti reaksi oksidasi, degradasi senyawa antioksidan, perubahan pH, atau perubahan warna dan aroma (Robertson, 2016).

Produk pangan yang dapat ditentukan umur simpannya dengan model *Arrhenius* diantaranya adalah makanan kaleng steril komersial, susu *Ultra High Temperature* (UHT), susu bubuk/formula, produk chip/snack, jus buah, mie instan, *frozen meat* dan produk lain yang mengandung gula pereduksi dan protein (berpotensi terjadinya reaksi pencoklatan) (Labuza, 1982).

Penentuan umur simpan produk yang sangat awet (seperti produk kaleng) secara *real-time* memakan waktu yang sangat lama, bisa mencapai tahunan, sehingga tidak efisien. Untuk mengatasi hal ini, digunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT). Arif, (2016) menjelaskan bahwa ASLT adalah metode pendugaan umur simpan dengan cara mempercepat laju kerusakan produk

menggunakan kondisi penyimpanan yang "dipercepat" atau lebih ekstrem, umumnya menggunakan suhu yang lebih tinggi dari suhu penyimpanan normal.

Model *Arrhenius* adalah pendekatan kinetika yang paling fundamental dan paling umum digunakan dalam ilmu pangan untuk tujuan ini. Persamaan *Arrhenius* menjelaskan hubungan kuantitatif antara suhu (T) dan konstanta laju reaksi (k). Menurut Labuza & Riboh (1985), dengan mengukur laju penurunan mutu (perubahan parameter kritis) pada setidaknya tiga suhu berbeda, nilai energi aktivasi (E_a) dapat dihitung. Nilai E_a ini kemudian digunakan untuk mengekstrapolasi dan menduga umur simpan produk pada suhu penyimpanan yang diinginkan.

Pendugaan umur simpan dengan metode ASLT model *Arrhenius* mensyaratkan penggunaan minimal tiga titik suhu yang lebih tinggi dari suhu penyimpanan normal. Pada penelitian ini, suhu yang digunakan adalah 30°C, 40°C, dan 50°C. Interval 10°C di pilih karena berlandaskan pada konsep koefisien suhu atau Q_{10} (*Temperature Coefficient*) memberikan perbedaan laju reaksi (k) yang signifikan, sehingga plot *Arrhenius* ($\ln k$ versus $1/T$) tetap linier dengan nilai R^2 tinggi, serta memungkinkan ekstrapolasi yang akurat ke suhu ruang normal (25°C). Menurut Labuza (1982), laju reaksi degradasi mutu produk pangan umumnya akan meningkat secara eksponensial untuk setiap kenaikan suhu sebesar 10°C.

Suhu di atas 60°C tidak digunakan karena berisiko menyebabkan kerusakan total pada vitamin c, antioksidan dan terjadinya *browning* yang tidak terjadi pada kondisi penyimpanan normal. Interval yang lebih kecil (misalnya 5°C) tidak

direkomendasikan karena selisih laju reaksi terlalu kecil, sehingga meningkatkan *error* prediksi dan mengurangi efisiensi pengujian (Labuza & Riboh, 1982).

Untuk menerapkan model *Arrhenius*, perlu ditetapkan parameter kritis, yaitu parameter mutu yang paling cepat berubah, paling mudah diukur, dan paling mewakili penerimaan konsumen. Mengingat sari buah pala adalah produk jus buah, parameter yang diduga titik kritis adalah derajat keasaman atau pH, total padatan terlarut ($^{\circ}$ Brix) dan total fenolik. Parameter ini umum digunakan sebagai indikator utama kerusakan mutu pada sari buah.

Menurut Cendrowski et al. (2024), parameter kritis pH pada sari buah campuran (*rose-apple/strawberry*) berkisar 3.47, dengan nilai di bawah 4.5 dianggap kritis untuk membatasi pertumbuhan mikroba dan menjaga keamanan produk, meskipun pH terlalu rendah dapat memengaruhi rasa. Suhu sterilisasi memengaruhi pH, dan nilai ini harus dipertahankan untuk kualitas optimal selama penyimpanan. Total fenolik pada jus buah campuran berkisar 116.21 mg GAE/100 mL, dengan nilai ini kritis untuk aktivitas antioksidan, dan penurunan akibat pengolahan kaleng menjadi indikator degradasi mutu (Cendrowski et al. 2024). Parameter Total padatan terlarut ($^{\circ}$ Brix) digunakan sebagai titik kritis selama masa penyimpanan pada suhu yang dipercepat. Menurut Swadana & Yuwono (2014), penurunan total padatan terlarut dapat terjadi karena berkurangnya total asam yang disebabkan oleh berkurangnya asam volatil selama penyimpanan. Titik kritis total padatan terlarut ($^{\circ}$ Brix) pada penelitian Utami dan Rahmawati (2024), menunjukkan bahwa nilai total padatan terlarut minuman fungsional sari buah pala dan sari nanas madu yakni 0,38 $^{\circ}$ Brix.

1.6 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan kerangka pemikiran yang telah diuraikan, maka diduga bahwa produk sari buah pala dalam kemasan kaleng dapat diketahui umur simpan pada suhu yang berbeda-beda menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) dengan pendekatan model *Arrhenius*.

1.7 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian berlangsung di Laboratorium Penelitian Program Studi Teknologi Pangan Fakultas Teknik Universitas Pasundan, Jalan Dr. Setiabudhi No. 193 Bandung, dan dilakukan pada bulan Mei-Juni tahun 2026.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan terkait: (2.1) Buah Pala, (2.2) Sari Buah Pala, (2.3) Pengalengan dan Sterilisasi Komersial, dan (2.4) Penentuan Umur Simpan dengan Metode ASLT Model *Arrhenius*.

2.1 Pala



Gambar 1. Buah Pala
(Sumber: www.koran-sulindo.com)

Pala (*Myristica fragrans* Houtt.) merupakan tanaman rempah yang memiliki nilai ekonomi tinggi, terutama pada bagian biji dan fuli (selaput biji). Selain kedua komponen utama tersebut, bagian lain dari tanaman pala adalah daging buah. Daging buah pala seringkali dianggap sebagai produk samping atau limbah pertanian yang pemanfaatannya belum optimal (Rema & Krishnamoorthy, 2001).

Utami dan Rahmawati (2024) menyatakan bahwa kegiatan pertanian pala menghasilkan limbah buah pala 30-40% yang terdiri dari daging buah pala (*pericarp*) yang mengandung flavonoid (1,37%), asam oksalat (22,14 mg), saponin (49,32%), alkaloid (8,42%), dan asam fitat (16%). Buah pala juga mengandung miristisin, isoeugenol, eugenol, dan memiliki aktivitas antioksidan yang sangat

kuat, yaitu 3,16%. Hal ini sejalan dengan Suloi dan Suloi (2021) yang menyatakan buah pala memiliki sifat antibakteri, antioksidan, antifungi, antiinflamasi.

Daging buah pala (pericarp) memiliki potensi gizi dan fungsional yang sangat menjanjikan untuk dikembangkan sebagai pangan fungsional. Penelitian menunjukkan bahwa ekstrak metanol daging buah pala mengandung total fenolik yang cukup tinggi, yaitu mencapai 388,36 mg GAE/100 g berat ekstrak (Assa et al., 2014). Selain itu, daging buah pala juga memiliki kandungan senyawa flavonoid dan tanin yang terbukti berkorelasi kuat dalam memberikan aktivitas antioksidan yang signifikan (Antasionasti et al., 2022; Pathakakula et al., 2024). Komponen pembentuk gel alami seperti pektin juga teridentifikasi pada daging buah pala dengan kadar berkisar antara 0,2% hingga 1,08% (Raj et al., 2017). Komposisi bioaktif dan fungsional ini menjadikan sari buah pala memiliki keunggulan kompetitif yang tidak kalah dari produk minuman buah tropis lainnya.

Daging buah pala memiliki aktivitas antioksidan yang kuat, dan berdasarkan penelitian sebelumnya senyawa fenolik dan flavonoid memiliki peran dalam meningkatkan aktivitas antioksidan. Senyawa flavonoid yang memiliki ikatan rangkap terkonjugasi atau gugus kromofor diketahui mampu untuk menangkalkan radikal bebas. Sementara itu aktivitas antioksidan pada senyawa fenolik terjadi karena sifat oksidasi dari senyawa fenol itu sendiri yang mampu untuk menetralkan radikal bebas (Antasionasti et al., 2022; Pathakakula et al., 2024).

Pemanfaatan daging buah pala menjadi produk minuman sari buah merupakan salah satu bentuk inovasi dan diversifikasi pangan yang penting. Proses ini tidak hanya memberikan produk minuman dengan cita rasa yang khas campuran antara asam, manis, dan sedikit sepat yang menyegarkan tetapi juga berpotensi

besar untuk meningkatkan nilai ekonomi dari bagian tanaman pala yang sebelumnya terbuang (Pathakakula et al., 2024)

Namun, seperti produk sari buah segar lainnya, sari buah pala segar memiliki umur simpan yang sangat pendek karena rentan terhadap kerusakan mikrobiologis dan reaksi enzimatis (Afrianto, 2008). Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan dan pengawetan lebih lanjut untuk memperpanjang masa simpannya (Robertson, 2016).

2.2 Pengalengan dan Sterilisasi Komersial

2.2.1 Pengalengan

Pengalengan (*canning*) merupakan salah satu metode pengawetan pangan yang paling efektif untuk memperpanjang umur simpan produk secara drastis. Teknologi ini menggabungkan dua prinsip utama: pengemasan secara hermetis (kedap udara) dan proses pemanasan bertekanan (sterilisasi komersial) (Robertson, 2016; Teixeira, 2018).

Pengemasan hermetis bertujuan untuk mencegah masuknya kembali mikroorganisme atau kontaminan lain dari lingkungan luar ke dalam produk yang sudah diproses. Setelah dikemas rapat, produk akan melalui proses sterilisasi komersial, yaitu pemanasan pada suhu tinggi (umumnya 110-120°C) selama waktu tertentu (Teixeira, 2018).

Kemasan kaleng merupakan jenis kemasan yang saat ini mendominasi pasaran karena memiliki keunggulan praktis serta harganya yang relatif terjangkau. Dalam industri minuman ringan dan sari buah, penggunaan kemasan kaleng berfungsi untuk melindungi produk dari kerusakan fisik, kimia, dan mikrobiologi

selama proses distribusi hingga sampai ke tangan konsumen. Salah satu jenis material kaleng yang paling sering digunakan untuk mengemas produk makanan dan minuman adalah *tinplate*. Kaleng *tinplate* terbuat dari lembaran baja yang dilapisi oleh timah putih dan lapisan *lacquer*, di mana pelapisan *lacquer* ini bertujuan untuk mencegah produk tidak bersentuhan langsung dengan kaleng sehingga tidak cepat mengalami korosi atau pengarat (Perdana, 2019).

Penggunaan kemasan kaleng *tinplate* sangat cocok diaplikasikan pada produk minuman komersial yang membutuhkan sterilisasi tingkat tinggi. Meskipun demikian, pemilihan kemasan ini harus disesuaikan dengan karakteristik produk di dalamnya. Kerusakan kimia pada minuman kaleng umumnya terjadi akibat reaksi antara kaleng dengan produk minuman yang memiliki pH rendah (asam), yang dapat memicu terjadinya korosi, pembentukan gas hidrogen yang membuat kaleng kembung, hingga pemudaran warna kaleng. Tingkat korosi pada bagian dalam kaleng ini sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya adalah pH minuman, suhu dan lama penyimpanan, sisa tingkat oksigen di dalam produk, serta jenis kaleng dan ketahanan lapisan penahan korosinya (Perdana, 2019).

2.2.2 Sterilisasi Komersial

Tujuan utama sterilisasi komersial adalah untuk menginaktivasi (membunuh) seluruh mikroorganisme patogen (penyebab penyakit) dan mikroorganisme pembusuk yang dapat tumbuh pada kondisi penyimpanan normal. Keberhasilan proses ini menghasilkan produk yang stabil secara mikrobiologis dan aman dikonsumsi, serta dapat disimpan pada suhu ruang dalam jangka waktu yang sangat lama (bulanan hingga tahunan) (Robertson, 2016; Teixeira, 2018).

Meskipun sangat efektif, penerapan proses termal (panas tinggi) ini memiliki risiko. Panas tinggi dapat memengaruhi karakteristik produk pangan. Pada produk sari buah, tantangan utamanya adalah potensi degradasi komponen gizi yang sensitif terhadap panas, terutama Vitamin C & senyawa antioksidan (Rickman et al., 2007; Burgos, 2022). Selain itu, panas dapat memicu reaksi pencoklatan non-enzimatis (seperti reaksi Maillard atau karamelisasi) yang dapat mengubah warna dan aroma produk (Fennema, 2017).

2.3 Penentuan Umur Simpan dengan Metode ASLT Model Arrhenius

Umur simpan (*shelf life*) merupakan salah satu aspek krusial dalam industri pangan. Berdasarkan Institute of Food Technology (IFT), umur simpan didefinisikan sebagai selang waktu antara saat produksi hingga saat konsumsi, di mana kondisi produk masih memuaskan pada sifat-sifat penampakan, rasa, aroma, tekstur, dan nilai gizi (Kilcast & Subramaniam, 2011).

Penentuan dan pencantuman umur simpan (tanggal kedaluwarsa) pada label bukan hanya penting untuk menjaga kepercayaan konsumen, tetapi juga merupakan kewajiban hukum yang diatur ketat untuk menjamin keamanan pangan di Indonesia. Regulasi ini ditegaskan dalam Peraturan Pemerintah No. 86 Tahun 2019 tentang Keamanan Pangan dan diperkuat oleh Peraturan BPOM No. 13 Tahun 2023, yang menjadikan data pendukung umur simpan sebagai syarat mutlak untuk memperoleh izin edar.

Pada produk yang telah melalui sterilisasi komersial seperti minuman kaleng, faktor utama yang menentukan akhir umur simpan berbeda dengan produk segar. Kerusakan utama umumnya bukan lagi disebabkan oleh pertumbuhan

mikroorganisme. Sebaliknya, penurunan mutu lebih didominasi oleh reaksi kimia dan fisika yang berjalan lambat selama penyimpanan, seperti degradasi senyawa fungsional (misalnya Vitamin C dan antioksidan), reaksi oksidasi yang memengaruhi aroma, perubahan warna (pencoklatan) atau pembentukan endapan serta perubahan pH (Robertson, 2016; Kilcast & Subramaniam, 2011).

Menentukan umur simpan produk kaleng yang sangat awet bisa memakan waktu bertahun-tahun jika menggunakan metode konvensional (penyimpanan *real-time*). Metode ini tidak efisien untuk kebutuhan industri dan pengembangan produk yang cepat (Labuza & Schmidl, 1985; Calligaris et al., 2023).

Oleh karena itu, dikembangkan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) atau Uji Umur Simpan Dipercepat. ASLT adalah metode pendugaan umur simpan dengan cara mempercepat laju kerusakan produk. Hal ini dilakukan dengan menyimpan produk pada kondisi lingkungan yang lebih ekstrem atau dipercepat dibandingkan kondisi normal (Labuza & Riboh, 1982).

Dalam studi pendugaan umur simpan menggunakan metode akselerasi (*Accelerated Shelf-Life Testing*), terdapat dua pendekatan fundamental yang dapat diterapkan. Pertama, pendekatan berbasis difusi atau kadar air kritis, yang menjadikan perubahan kadar air serta aktivitas air (a_w) sebagai parameter penentu kedaluwarsa. Kedua, pendekatan semi-empiris yang berlandaskan pada teori kinetika reaksi kimia umumnya ordo nol atau satu dengan menggunakan persamaan *Arrhenius*. Secara spesifik, pada pendekatan kadar air, formulasi matematis yang digunakan merupakan turunan dari Hukum Difusi Fick unidireksional. Dalam literatur, terdapat empat model yang lazim diaplikasikan, yakni model Heiss dan

Eichner (1971), model Rudolf (1986), model Labuza (1982), serta model waktu paruh yang dikembangkan oleh Syarief et al. (1989) (Herawati, 2008).

Faktor percepatan yang paling umum digunakan dalam ASLT untuk produk pangan adalah suhu. Produk akan disimpan pada beberapa (minimal tiga) tingkat suhu yang lebih tinggi dari suhu penyimpanan normal. Selama penyimpanan dipercepat ini, parameter mutu kritis (seperti kadar vitamin, pH, atau perubahan warna) akan dipantau secara berkala untuk mengetahui seberapa cepat produk tersebut mengalami kerusakan pada tiap suhu (Labuza & Schmidl, 1985; Kong & Singh, 2011; Calligaris et al., 2023).

Model *Arrhenius* merupakan pendekatan kinetika kimia yang paling umum digunakan dalam ASLT untuk memprediksi umur simpan produk pangan. Persamaan ini menghubungkan konstanta laju reaksi (k) dengan suhu absolut (T) melalui energi aktivasi (E_a) (Labuza & Riboh, 1982).

Dengan mengukur laju penurunan mutu pada beberapa suhu dipercepat, nilai E_a dapat dihitung, kemudian digunakan untuk mengekstrapolasi laju reaksi pada suhu penyimpanan normal (suhu ruang). Model ini telah terbukti akurat untuk berbagai produk pangan, termasuk minuman jus buah yang disterilisasi (Labuza & Schmidl, 1985; Calligaris et al., 2023).

Dalam upaya mendapatkan prediksi umur simpan dengan akurasi tinggi, model ini digunakan untuk mendeteksi sejauh mana variabel suhu memengaruhi percepatan penurunan mutu produk. Selanjutnya, sesuai dengan Arif (2016), langkah-langkah pendugaan umur simpan dengan metode ASLT sebagai berikut:

Data hasil analisa produk terhadap waktu diplotkan dan dihitung persamaan regresi liniernya. Kemudian diperoleh tiga persamaan regresi untuk tiga kondisi suhu penyimpanan produk dengan menggunakan :

$$Y = a + bx$$

Keterangan:

Y = nilai karakteristik sari buah

a = nilai karakteristik sari buah pada awal penyimpanan

b = laju perubahan nilai karakteristik = k (konstanta penurunan mutu)

x = lama penyimpanan (hari)

Dari masing-masing persamaan tersebut diperoleh nilai slope (b) yang merupakan konstanta laju reaksi perubahan karakteristik produk atau laju penurunan mutu (k).

Untuk menentukan ordo reaksi yang digunakan dibuat grafik ordo nol yaitu hubungan antara nilai k dengan lama penyimpanan dan ordo satu yaitu hubungan antara $\ln k$ dengan lama penyimpanan. Dari kedua persamaan tersebut di pilih ordo reaksi yang mempunyai nilai R^2 (determinasi) terbesar (Arif, 2016).

Penurunan mutu ordo nol adalah merupakan penurunan mutu yang konstan (terhadap waktu) yang dinyatakan sebagai persamaan sebagai berikut:

$$A_t - A_o = -kt$$

Keterangan:

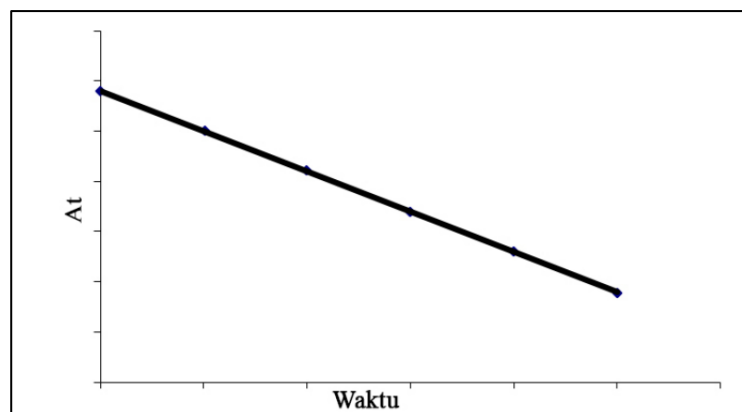
A_t = Nilai mutu pada waktu t

A_0 = Nilai mutu awal

k = Laju perubahan mutu

t = Waktu simpan

Grafik lot hubungan antara penurunan mutu dengan waktu penyimpanan pada reaksi ordo 0 dapat dilihat pada Gambar 2.

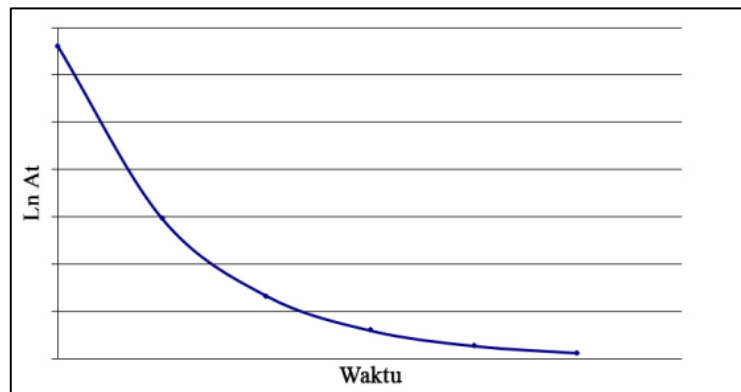


Gambar 2. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu penyimpanan pada reaksi ordo nol

Sebaliknya, untuk reaksi orde satu, penurunan mutu mengikuti persamaan yang menunjukkan bahwa penurunan mutu bergantung pada jumlah mutu yang tersisa dinyatakan sebagai persamaan sebagai berikut:

$$\ln A_t - \ln A_0 = -kt$$

Grafik plot hubungan antara penurunan mutu dengan waktu penyimpanan pada reaksi ordo 1 dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu pada reaksi ordo satu

Untuk pendekatan *Arrhenius*, nilai k diplotkan terhadap $1/T$ (K⁻¹) dan $\ln k$ didapatkan nilai intersep dan slope dari persamaan regresi linier berikut :

$$\ln k = \ln k_0 - (E_a/R)(1/T)$$

Keterangan:

$\ln k_0$ = intersep

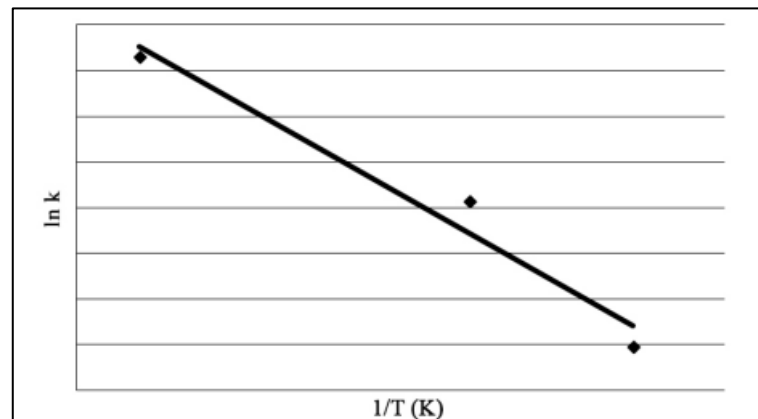
E_a/R = slope

E_a = energi aktivasi

R = konstanta gas (1,986 kal/mol)

T = suhu mutlak (273 + °C)

Selanjutnya nilai $\ln k$ pada masing-masing suhu penyimpanan tersebut diplot dengan $1/T$ seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Hubungan antara $\ln k$ dengan $1/T$ pada persamaan Arrhenius

Dari persamaan pada tahapan sebelumnya diperoleh nilai konstanta k_0 yang merupakan faktor pra-eksponensial dan nilai energi aktivasi reaksi perubahan karakteristik sari buah ($E_a = E$). Dan kemudian ditentukan model persamaan laju reaksi (k) perubahan karakteristik sari buah dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = k_0 \times e^{-(E_a/RT)}$$

Dengan persamaan *Arrhenius* dapat dihitung nilai konstanta *Arrhenius* (k) pada suhu (T) penyimpanan yang ditentukan. Parameter kunci dapat ditentukan dengan melihat parameter yang mempunyai energi aktivasi terendah (Arif, 2016).

Umur simpan sari buah diduga dengan menghitung selisih nilai awal produk dan nilai pada saat produk tidak disukai (nilai titik kritis produk) dibagi dengan laju penurunan mutu (k) pada suhu penyimpanan dugaan distribusi yang dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

Persamaan kinetika untuk laju reaksi ordo nol ($n = 0$):

$$ts = (A_0 - A_t) / k$$

Persamaan kinetika untuk laju reaksi ordo satu ($n = 1$):

$$ts = [\ln(A_0/A_t)]/k$$

Keterangan:

ts = Waktu kedaluwarsa

A_0 = Nilai parameter mutu awal

A_t = Nilai parameter mutu akhir (nilai titik kritis produk)

BAB III. METODE PENELITIAN

Bab ini menguraikan terkait: (1) Bahan dan Alat Penelitian, (2) Metode Penelitian, (3) Prosedur Penelitian dan (4) Jadwal Penelitian.

3.1 Bahan dan Alat Penelitian

3.1.1 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah produk minuman sari buah pala khas bogor yang baru diproduksi dan diperoleh secara komersil dari produsen TASARI. komposisi sari buah pala terdiri dari daging buah pala, gula dan air yang kemudian dilakukan pengalengan pada sampel.

Bahan-bahan kimia yang digunakan untuk analisis dikelompokkan berdasarkan jenis pengujian. Untuk analisis kandungan fungsional digunakan reagen *Folin-Ciocalteu*, dan standar asam galat. Untuk analisis parameter mutu digunakan larutan buffer pH 4 dan 7 untuk kalibrasi pengukuran derajat keasaman (pH). Bahan-bahan penunjang lainnya yang digunakan dalam penelitian ini meliputi aquades (untuk pelarut dan kalibrasi refraktometer) serta tisu lensa.

3.1.2 Alat Penelitian

Alat untuk pengujian umur simpan (ASLT), digunakan tiga unit inkubator yang diatur pada suhu berbeda yakni suhu 30°C, 40°C, 50°C.

Alat untuk analisis mutu dan mikrobiologi meliputi pH-meter, spektrofotometer UV-Vis (untuk total fenolik), dan refraktometer untuk pengujian total padatan terlarut.

Alat-alat gelas dan penunjang laboratorium yang digunakan meliputi labu ukur berbagai volume, gelas piala, labu Erlenmeyer, pipet volumetrik, mikropipet beserta tip, kuvet, gelas ukur, corong kaca, batang pengaduk, *vortex mixer*, *water bath*, aluminium foil, dan parafilm.

3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian ini terdiri dari rancangan penelitian, rancangan percobaan, rancangan analisis, dan rancangan respon.

3.2.1 Rancangan Penelitian

Pada rancangan penelitian ini, produk sari buah pala kaleng yang telah disterilisasi komersial akan diuji umur simpannya menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT).

Produk akan disimpan pada tiga kondisi suhu yang berbeda, yaitu suhu 30°C, 40°C, 50°C, selama 28 hari dan dilakukan pengamatan setiap 7 hari sekali (pada hari ke-0, 7, 14, 21, dan 28). Parameter yang diuji selama penyimpanan adalah parameter kritis yaitu derajat keasaman (pH), total fenolik, dan Total padatan terlarut (°Brix).

Data laju penurunan mutu pada berbagai suhu ini kemudian akan digunakan untuk menduga umur simpan produk dengan pendekatan model *Arrhenius*.

3.2.2 Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan yang akan diimplementasikan dalam penelitian ini melibatkan variasi suhu dan durasi lama penyimpanan dengan menerapkan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) melalui pendekatan model *Arrhenius*. Adapun data utama penelitian mengenai parameter mutu sari buah pala kalengan

akan dikumpulkan dan disajikan dalam bentuk tabel untuk dapat dianalisis lebih lanjut.

Setelah itu, berdasarkan data hasil pengamatan terhadap mutu sari buah pala kalengan selama penyimpanan pada berbagai suhu (Tabel 2), akan dianalisis adanya penurunan kualitas seiring berjalannya waktu. Perubahan ini menunjukkan bahwa produk mengalami proses degradasi selama masa simpan.

Untuk mengetahui laju penurunan kualitasnya, dilakukan pendekatan menggunakan model reaksi orde nol dan orde satu terhadap masing-masing parameter mutu. Dari hasil perhitungan tersebut, akan diperoleh nilai slope, intercept, dan koefisien determinasi (R^2) yang dirangkum dalam tabel.

Setelah diketahui model kinetika yang paling sesuai untuk masing-masing parameter mutu berdasarkan nilai R^2 tertinggi pada Tabel 2, langkah selanjutnya adalah menghitung konstanta laju reaksi (k) pada setiap suhu penyimpanan. Nilai k tersebut kemudian digunakan untuk membuat grafik hubungan antara $\ln k$ dan $1/T$ (K^{-1}), sesuai dengan pendekatan persamaan *Arrhenius*.

Dari grafik tersebut, akan diperoleh nilai energi aktivasi (E_a) dan konstanta laju reaksi pada suhu referensi, yang hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 3. Persamaan *Arrhenius* ini digunakan untuk mengestimasi laju penurunan mutu produk, sehingga dapat diaplikasikan untuk menduga umur simpan produk pada berbagai kondisi suhu.

Tabel 1. Hasil Analisis Sari buah pala Kaleng Selama Penyimpanan

Suhu	Hasil Analisis	Lama Penyimpanan				
		Hari Ke-0	Hari Ke-7	Hari Ke-14	Hari Ke-21	Hari Ke-28
30°C	Derajat Keasaman (pH)					
	Total Fenolik					
	Total padatan terlarut (°Brix)					
40°C	Derajat Keasaman (pH)					
	Total Fenolik					
	Total padatan terlarut (°Brix)					
50°C	Derajat Keasaman (pH)					
	Total Fenolik					
	Total padatan terlarut (°Brix)					

Tabel 2. Nilai Slope, Intercept dan Determinan pada reaksi ordo 0 dan ordo 1 Sari buah pala Kaleng Selama Penyimpanan

Suhu	Hasil Analisis	Ordo 0			Ordo 1		
		Kemiringan (Slope) (k)	Intercept	Determinasi (R ²)	Kemiringan (Slope) (k)	Intercept	Determinasi (R ²)
30°C	Derajat Keasaman (pH)						
	Total Fenolik						
	Total padatan terlarut (°Brix)						
40°C	Derajat Keasaman (pH)						
	Total Fenolik						
	Total padatan terlarut (°Brix)						
50°C	Derajat Keasaman (pH)						
	Total Fenolik						
	Total padatan terlarut (°Brix)						

Tabel 3. Persamaan *Arrhenius* Penurunan Mutu Produk Sari buah pala Kaleng Selama Penyimpanan

Suhu	Hasil Analisis	K	ln k	T (°K)	1/T (°K)	Persamaan linier ln k dengan 1/T (°K)	Persamaan <i>Arrhenius</i> $\ln k = \ln k_0 - E_a/R$ (1/T)
30°C	Derajat Keasaman (pH)						
	Total Fenolik						
	Total padatan terlarut (°Brix)						
40°C	Derajat Keasaman (pH)						
	Total Fenolik						
	Total padatan terlarut (°Brix)						
50°C	Derajat Keasaman (pH)						
	Total Fenolik						
	Total padatan terlarut (°Brix)						

3.2.3 Rancangan analisis

Rancangan analisis pada produk sari buah pala kaleng yang akan dilakukan adalah pendugaan umur simpan dengan menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) dengan pendekatan model *Arrhenius*. Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi tingkat penurunan mutu produk serta menentukan suhu penyimpanan optimal yang dapat memperpanjang umur simpan produk.

Data yang terkumpul pada tabel 1 akan dianalisis dengan menggunakan metode regresi linier untuk mengevaluasi pengaruh suhu penyimpanan dan durasi penyimpanan terhadap parameter mutu yang diukur dengan menggunakan metode yang sesuai dengan Arif (2016), langkah-langkah pendugaan umur simpan dengan metode ASLT sebagai berikut:

Data hasil analisa produk terhadap waktu diplotkan dan dihitung persamaan regresi liniernya. Kemudian diperoleh tiga persamaan regresi untuk tiga kondisi suhu penyimpanan produk dengan menggunakan :

$$Y = a + bx$$

Keterangan:

Y = nilai karakteristik sari buah

a = nilai karakteristik sari buah pada awal penyimpanan

b = laju perubahan nilai karakteristik = k (konstanta penurunan mutu)

x = lama penyimpanan (hari)

Dari masing-masing persamaan tersebut diperoleh nilai slope (b) yang merupakan konstanta laju reaksi perubahan karakteristik produk atau laju penurunan mutu (k).

Untuk menentukan ordo reaksi yang digunakan dibuat grafik ordo nol yaitu hubungan antara nilai k dengan lama penyimpanan dan ordo satu yaitu hubungan antara $\ln k$ dengan lama penyimpanan. Dari kedua persamaan tersebut di pilih ordo reaksi yang mempunyai nilai R2 (determinasi) terbesar (Arif, 2016).

Penurunan mutu ordo nol adalah merupakan penurunan mutu yang konstan (terhadap waktu) yang dinyatakan sebagai persamaan sebagai berikut:

$$A_t - A_o = -kt$$

Keterangan:

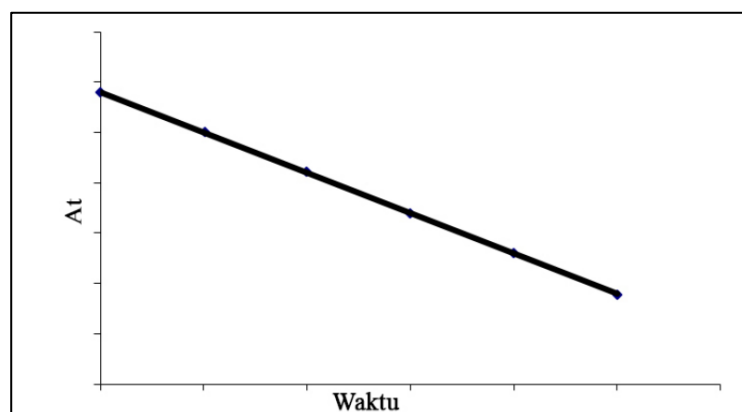
A_t = Nilai mutu pada waktu t

A_o = Nilai mutu awal

k = Laju perubahan mutu

t = Waktu simpan

Grafik plot hubungan antara penurunan mutu dengan waktu penyimpanan pada reaksi ordo 0 dapat dilihat pada Gambar 5.

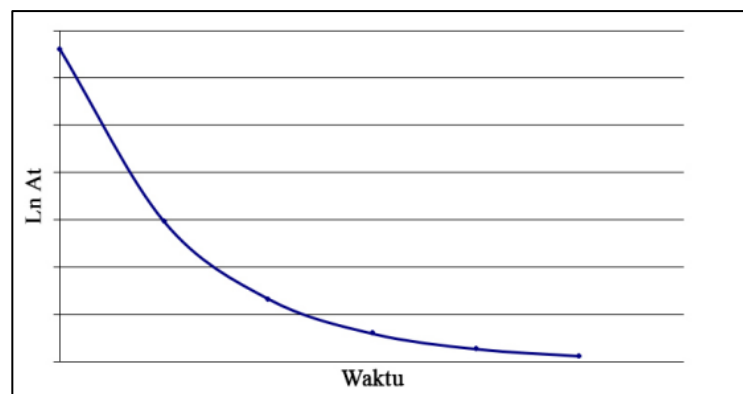


Gambar 5. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu penyimpanan pada reaksi ordo nol

Sebaliknya, untuk reaksi orde satu, penurunan mutu mengikuti persamaan yang menunjukkan bahwa penurunan mutu bergantung pada jumlah mutu yang tersisa dinyatakan sebagai persamaan sebagai berikut:

$$\ln A_t - \ln A_o = -kt$$

Grafik plot hubungan antara penurunan mutu dengan waktu penyimpanan pada reaksi ordo satu dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Hubungan antara mutu dan waktu pada reaksi ordo satu

Untuk pendekatan *Arrhenius*, nilai k diplotkan terhadap $1/T$ (K⁻¹) dan $\ln k$ didapatkan nilai intersep dan slope dari persamaan regresi linier berikut :

$$\ln k = \ln k_0 - (E_a/R)(1/T)$$

Keterangan:

$\ln k_0$ = intersep

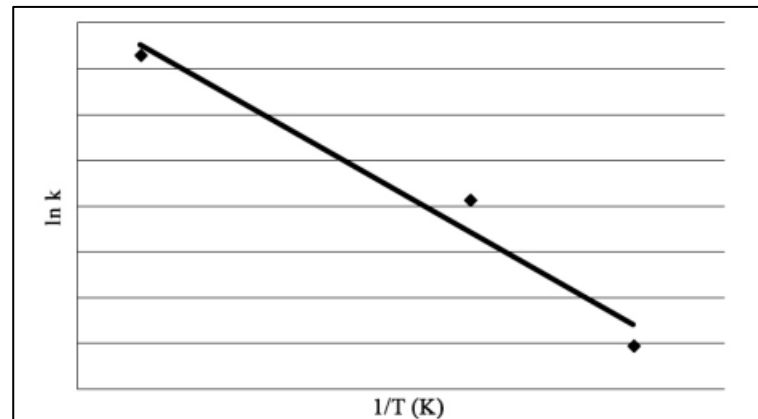
E_a/R = slope

E_a = energi aktivasi

R = konstanta gas (1,986 kal/mol)

T = suhu mutlak (273 + °C)

Selanjutnya nilai $\ln k$ pada masing-masing suhu penyimpanan tersebut diplot dengan $1/T$ seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Hubungan antara $\ln k$ dengan $1/T$ pada persamaan Arrhenius

Dari persamaan pada tahapan sebelumnya diperoleh nilai konstanta k_0 yang merupakan faktor pra-eksponensial dan nilai energi aktivasi reaksi perubahan karakteristik sari buah ($E_a = E$). Dan kemudian ditentukan model persamaan laju reaksi (k) perubahan karakteristik sari buah dengan persamaan sebagai berikut:

$$k = k_0 \times e^{-(E_a/RT)}$$

Dengan persamaan *Arrhenius* dapat dihitung nilai konstanta *Arrhenius* (k) pada suhu (T) penyimpanan yang ditentukan. Parameter kunci dapat ditentukan dengan melihat parameter yang mempunyai energi aktivasi terendah (Arif, 2016).

Umur simpan sari buah diduga dengan menghitung selisih nilai awal produk dan nilai pada saat produk tidak disukai (nilai titik kritis produk) dibagi dengan laju

penurunan mutu (k) pada suhu penyimpanan dugaan distribusi yang dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut:

Persamaan kinetika untuk laju reaksi ordo nol ($n = 0$):

$$ts = (A_0 - A_t) / k$$

Persamaan kinetika untuk laju reaksi ordo satu ($n = 1$):

$$ts = [\ln(A_0/A_t)]/k$$

Keterangan:

ts = Waktu kedaluwarsa

A_0 = Nilai parameter mutu awal

A_t = Nilai parameter mutu akhir (nilai titik kritis produk)

3.2.4 Rancangan Respon

Rancangan respon yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah analisis mutu produk sari buah pala kalengan selama penyimpanan, yang meliputi respon kimia yang diamati dalam penelitian ini terbagi menjadi pengukuran pH, analisis total fenolik dan analisis total padatan terlarut.

3.2.4.1 Respon Kimia

Analisis kimia yang dilakukan terhadap produk minuman sari buah pala kalengan yaitu pengukuran derajat keasaman (pH) menggunakan pH-meter yang telah dikalibrasi dengan buffer pH 4 dan pH 7 (Cendrowski et al., 2024), analisis total fenolik dengan metode spektrofotometri Folin-Ciocalteu yang hasilnya dinyatakan sebagai mg ekivalen asam galat (GAE) per 100 mL sampel (Cendrowski

et al., 2024), serta analisis total padatan terlarut yang dinyatakan dalam satuan °Brix menggunakan alat refraktometer berdasarkan prosedur standar AOAC (2012).

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan laju penurunan mutu dan menduga umur simpan produk sari buah pala kalengan menggunakan metode Accelerated Shelf-Life Testing (ASLT).

Proses pembuatan sari buah pala pada penelitian ini mengacu pada metode Utami dan Rahmawati (2024) yang telah dimodifikasi. Modifikasi yang dilakukan meliputi penyesuaian bahan pemanis menggunakan gula pasir (sukrosa) serta penyesuaian suhu formulasi akhir. Adapun tahapan pembuatannya adalah sebagai berikut:

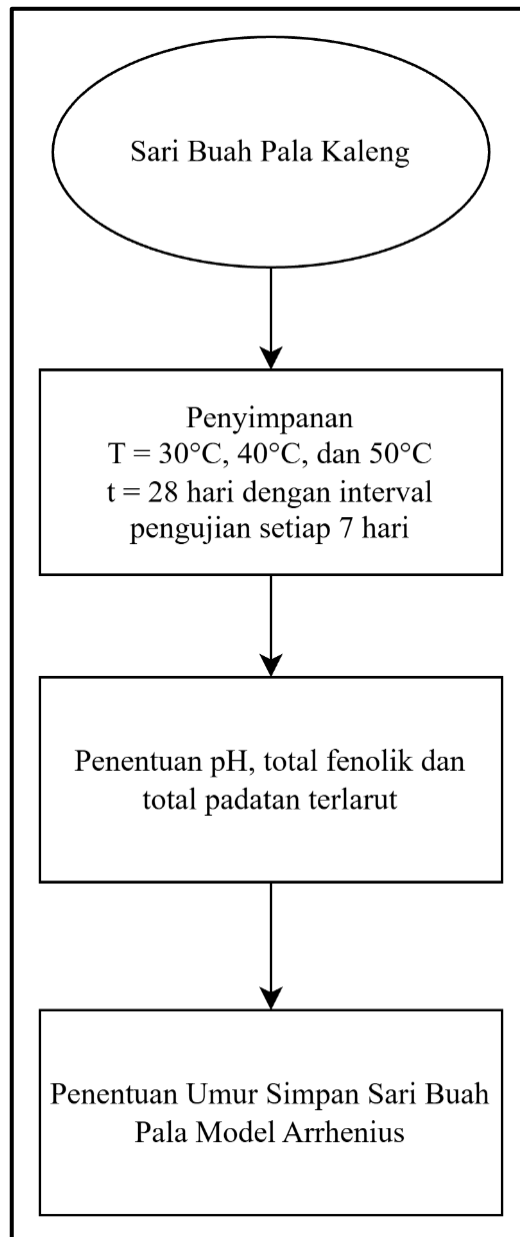
1. Buah pala segar disortasi terlebih dahulu, kemudian dilakukan proses pengupasan kulit luar dan pemisahan biji dari daging buahnya. Daging buah pala dicuci hingga bersih menggunakan air mengalir, lalu dipotong menjadi ukuran yang lebih kecil untuk mempermudah proses penghancuran.
2. Potongan daging buah pala dihancurkan menggunakan blender selama 1 menit pada kecepatan 1, dengan penambahan air menggunakan rasio perbandingan 1:3. Bubur daging buah pala yang telah hancur kemudian disaring menggunakan kain saring yang bersih untuk memisahkan sari buah dari ampas kasarnya.
3. Sari buah hasil saringan dibiarkan dan diendapkan selama 1 jam dengan tujuan untuk memisahkan kandungan patinya. Sari buah pala yang telah bebas dari endapan pati dipindahkan ke dalam wadah panci stainless steel.

4. Pada tahap ini, dilakukan penambahan gula pasir murni sesuai dengan formulasi yang telah ditetapkan untuk menyeimbangkan rasa asam dan sepat khas dari buah pala.
5. Campuran sari buah dan gula kemudian dimasak dan dipanaskan secara perlahan sambil terus diaduk hingga mencapai suhu 100°C dan dipertahankan selama 5 detik. Setelah itu, suhu api segera diturunkan hingga larutan berada pada kisaran suhu 80–85°C dan proses pemasakan dilanjutkan selama ± 10 menit
6. Minuman sari buah pala yang telah selesai dimasak kemudian didinginkan sejenak hingga mencapai suhu $\pm 40^\circ\text{C}$. Sari buah pala kemudian dituang dan dikemas secara aseptis ke dalam wadah plastik PET 250ml.

Produk sari buah pala dalam wadah plastik kemudian dikalengkan menggunakan kaleng *tinplate* dan dilakukan proses sterilisasi komersial pada suhu 121 °C selama 15 menit. Produk kemudian disimpan pada tiga kondisi suhu berbeda, yaitu suhu 30°C, 40°C, 50°C selama 28 hari. Pada hari ke-0, 7, 14, 21, dan 28 dilakukan pengambilan sampel sebanyak tiga kaleng untuk setiap suhu (interval pengambilan sampel setiap 7 hari).

Sampel dibuka kemudian dianalisis semua parameter mutu kritis yakni respon kimia yang terbagi menjadi pengukuran derajat keasaman (pH), total padatan terlarut, dan total fenolik sesuai prosedur yang telah dijelaskan pada bagian rancangan respon.

Data laju penurunan mutu (perubahan parameter terhadap waktu) pada ketiga suhu tersebut kemudian akan diolah menggunakan model *Arrhenius* untuk menduga umur simpan produk sari buah pala kalengan.



Gambar 8. Diagram Alir Prosedur Penelitian

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan menguraikan mengenai hasil laju penurunan mutu dan menduga umur simpan produk sari buah pala kalengan menggunakan metode Accelerated Shelf-Life Testing (ASLT).

4.1 Hasil Penentuan Respon pH

derajat keasaman mengindikasikan tingkat konsentrasi ion hidrogen (H^+) yang terdapat pada suatu bahan. Selama kurun waktu tertentu, nilai pH suatu produk pangan dapat mengalami fluktuasi yang dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, di mana salah satu faktor utamanya adalah paparan suhu selama penyimpanan (Azizah, et al., 2024).

Analisis derajat keasaman diukur secara kuantitatif menggunakan instrumen pH-meter. Rekapitulasi hasil analisis nilai pH pada produk sari buah pala kalengan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Derajat keasaman (pH) Sari Buah Pala Kaleng

Lama Penyimpanan (Hari)	Suhu Penyimpanan		
	30°C	40°C	50°C
	pH	pH	pH
0	4.45	4.45	4.45
7	4.45	4.46	4.49
14	4.48	4.49	4.52
21	4.51	4.53	4.55
28	4.55	4.56	4.58

Berdasarkan hasil penelitian pada Tabel 4. diketahui bahwa pH pada sari buah pala yang disimpan pada suhu 30°C, 40°C, dan 50°C mengalami peningkatan

pada hari ke-7 hingga ke-28. Kenaikan nilai pH sari buah pala kalengan selama pengujian suhu akselerasi (ASLT) sangat berkaitan erat dengan fenomena degradasi komponen asam akibat paparan energi termal. Proses pemanasan dengan durasi yang lama maupun pengkondisian pada suhu penyimpanan yang tinggi memiliki kecenderungan kuat untuk menaikkan nilai pH akibat hilangnya konsentrasi asam-asam organik bebas di dalam larutan, seperti asam sitrat, asam askorbat, serta asam-asam volatil lainnya (Dari & Junita, 2020).

Pada buah pala (*Myristica fragrans* Houtt.), cita rasa asam yang khas pada bagian daging buahnya didukung oleh melimpahnya kandungan komponen asam organik, salah satunya adalah asam askorbat (Vitamin C). Hal tersebut diperkuat oleh pernyataan Utami dan Rahmawati (2024), yang menyatakan bahwa karakteristik rasa asam pada daging buah pala disebabkan oleh adanya kandungan asam askorbat alami dengan konsentrasi mencapai 22 mg per 100 gram daging buah pala.

Pada penelitian sejenis oleh Arif et al., (2016) mengenai pendugaan umur simpan buah sirsak., dijelaskan secara spesifik bahwa peningkatan nilai pH yang bergerak menjadi kurang asam pada sari buah sirsak terjadi karena adanya proses degradasi asam askorbat secara anaerob (di dalam kemasan tertutup) melalui mekanisme reaksi delaktonisasi. Reaksi pembukaan cincin lakton ini menghasilkan pembentukan senyawa baru berupa asam 2,3-diketogulonat, gas karbon dioksida (CO_2), serta molekul air (H_2O). Terbentuknya produk sampingan berupa molekul H_2O serta berkurangnya gugus karboksil aktif dari asam bebas inilah yang secara kumulatif menurunkan densitas ion hidrogen murni dalam larutan, sehingga

menyebabkan nilai pembacaan pH pada produk sari buah sirsak mengalami kenaikan secara progresif selama penyimpanan.

Dalam penelitian Basak et al. (2023) mengatakan laju degradasi asam askorbat di dalam produk sari buah terbukti berbanding lurus dengan nilai pH. Pada awal penyimpanan dengan kondisi pH produk yang masih rendah (asam) dan berada dalam kemasan kedap udara (anaerob). Basak et al. (2023) juga mengatakan seiring dengan terdegradasinya asam-asam organik tersebut, densitas ion hidrogen (H^+) di dalam matriks sari buah akan menyusut sehingga memicu pergeseran nilai pH produk yang bergerak naik menjadi kurang asam. Kenaikan pH ini menciptakan siklus kerusakan struktural yang bersifat sinergis sehingga dalam penelitian ini dikatakan bahwa jalur anaerobik adalah mekanisme degradasi dominan pada kondisi pH rendah.

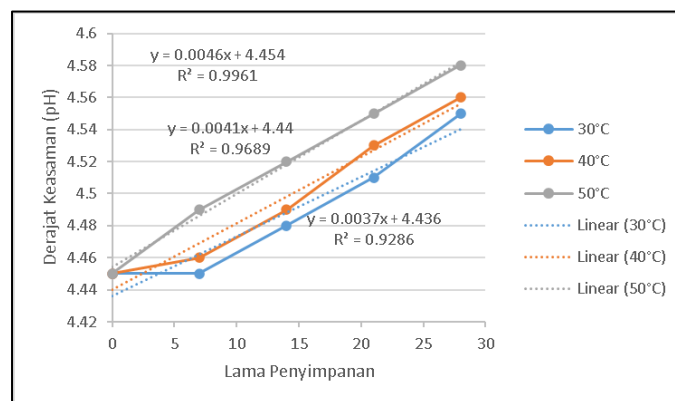
Fluktuasi nilai pH selama penyimpanan berkaitan erat dengan efek suhu yang mempercepat reaksi kimia di dalam produk. Menurut Kumar et al. (2024), pergeseran nilai pH pada sari buah sangat dipengaruhi oleh terbentuknya asam-asam organik sekunder akibat proses degradasi matriks jus. Dalam penelitiannya menjelaskan bahwa suhu tinggi bertindak sebagai akselerator yang mempercepat laju proses biokimia tersebut. Percepatan reaksi ini berujung pada penumpukan senyawa turunan baru, seperti aldehida, keton, dan asam organik, yang pada akhirnya menggeser keseimbangan pH produk selama penyimpanan.

Berdasarkan ketentuan Badan Standardisasi Nasional (2004), kategori derajat keasaman untuk produk sari buah diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu kategori asam (pH 0–6,4), kategori netral (pH 6,5–7,5), dan kategori basa (pH 7,6–

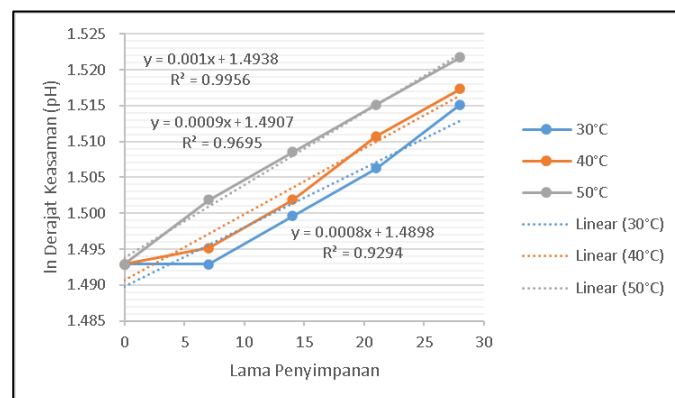
14,0). Nilai pH produk sari buah pala kalengan dalam penelitian ini secara keseluruhan terpantau masih berada dalam rentang kategori asam, yaitu berkisar antara 4,45 hingga 4,58.

4.1.1 Hasil Penentuan Umur Simpan Berdasarkan Respon pH

Penentuan umur simpan ditentukan dengan menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) melalui pendekatan model *Arrhenius*. Untuk mengetahui ordo yang tepat, dilakukan pemetaan data dari Tabel 4. parameter pH di berbagai suhu terhadap waktu penyimpanan untuk ordo reaksi 0 dan ordo reaksi 1 yang disajikan pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. Grafik perubahan derajat keasaman (pH) pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0



Gambar 10. Grafik perubahan derajat keasaman (pH) pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1

Setelah data dari Tabel 4. tersebut diplotkan ke dalam ordo 0 dan ordo 1 pada gambar 9 dan 10, dilakukan penentuan koefisien determinasi (R^2) paling tinggi dari hasil regresi pada tiap penurunan mutu dalam bentuk ordo 0 dan ordo 1 sehingga dapat ditentukan ordo reaksi yang paling sesuai terhadap peningkatan pH.

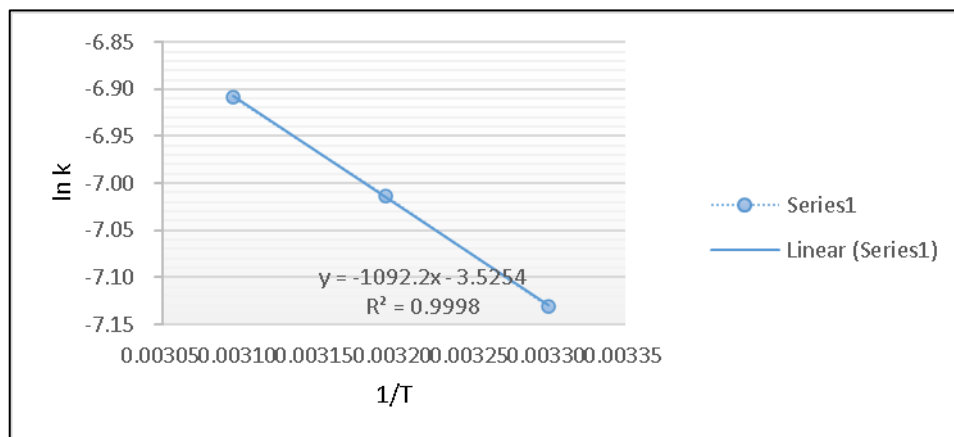
Tabel 5. Hasil Penentuan Orde Reaksi Nilai pH

Ordo Reaksi	Nilai R^2 pada tiap Suhu Penyimpanan			Ordo Terpilih
	30°C	40°C	50°C	
0	0.9286	0.9689	0.9961	1
1	0.9294	0.9695	0.9956	

Dari hasil tabel di atas, penentuan ordo reaksi didasarkan pada nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi, di mana ordo 1 menunjukkan hasil yang paling sesuai. Konstanta laju reaksi (k) yang diperoleh dari regresi linier ordo 1 tersebut selanjutnya digunakan dalam pendekatan *Arrhenius* Melalui pemetaan hubungan linier antara $1/T$ (K) sebagai sumbu x dan $\ln k$ sebagai sumbu y seperti pada tabel 6. dan gambar 11.

Tabel 6. Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan Nilai pH pada Setiap Suhu Penyimpanan

Suhu (°C)	Suhu (K)	$1/T$ (K)	k	$\ln k$
30	303	0.00330	0.0008	-7.13
40	313	0.00319	0.0009	-7.01
50	323	0.00310	0.001	-6.91



Gambar 11. Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan Nilai pH

Dari persamaan tersebut dapat diperoleh nilai energi aktivasi dan diperoleh pula nilai k (konstanta penurunan mutu) pada suhu 30, 40, 50 °C. Selanjutnya nilai konstanta laju penurunan mutu (k) diplotkan ke dalam persamaan perhitungan umur simpan mengikuti ordo reaksi satu sehingga diperoleh estimasi umur simpan sari buah pala kaleng, Nilai energi aktivasi (E_a), konstanta laju penurunan mutu (k) dan umur simpan sari buah pala kaleng dengan parameter derajat keasaman (pH) dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Konstanta Penurunan Mutu dan Umur Simpan Sari Buah Pala Parameter pH

Suhu (°C)	E_a (kal/mol)	k_0	Konstanta Penurunan Mutu (k)(/Hari)	Umur Simpan (Hari)
30	2169,1092	0,02944	0,0008	311
40			0,0009	276
50			0,001	249

Laju penurunan mutu sari buah pala memiliki energi aktivasi (E_a) sebesar 2169,1092 kal/mol. nilai konstanta yang kecil, sehingga dapat diketahui bahwa umur sari buah pala yang dikemas dengan kaleng dan disimpan pada suhu 30°C memiliki umur simpan selama 311 hari, suhu 40°C memiliki umur simpan 276 hari dan suhu 50°C memiliki umur simpan 249 hari. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka konstanta laju penurunan mutu pH akan semakin tinggi, sehingga akan mengakibatkan sari buah pala semakin cepat mengalami kerusakan dan memiliki umur simpan yang lebih pendek.

4.2 Hasil Penentuan Respon Total Fenolik

Total fenolik merupakan sekumpulan senyawa bioaktif alami yang tersusun atas cincin aromatik dan gugus hidroksil, yang di dalam matriks pangan berperan penting sebagai sumber antioksidan. Kadar senyawa fenolik ini bersifat fluktuatif dan rentan mengalami perubahan selama kurun waktu tertentu, di mana paparan suhu menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi tingkat kerusakannya (Mahardani & Yuanita, 2021).

Analisis total fenolik digunakan instrumen Spektrofotometer UV-Vis dimana alat tersebut akan mendeteksi absorbansi dari kompleks senyawa fenol yang ada pada sampel sari buah pala kalengan. Hasil analisis terhadap nilai total fenolik pada sampel sari buah pala dinyatakan dalam mg GAE/100ml (Jumlah Kandungan Fenolik sebanding dengan jumlah mg ekuivalen asam galat dalam 100 mL sampel) dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Total Senyawa Fenolik Sari Buah Pala Kaleng

Lama Penyimpanan (Hari)	Suhu Penyimpanan		
	30°C	40°C	50°C
	mg GAE /100ml		
0	486.250	486.250	486.250
7	473.750	473.750	448.750
14	461.250	448.750	417.500
21	442.500	423.750	373.750
28	423.750	405.000	342.500

Berdasarkan data pada tabel 8. laju penyusutan total fenolik pada sampel sari buah pala kaleng mengalami tren penurunan total fenolik yang signifikan seiring dengan lamanya waktu inkubasi dan meningkatnya suhu penyimpanan. Hal ini sejalan dengan pernyataan Priadi et al., (2019) yang menegaskan bahwa laju degradasi kimiawi suatu komponen bioaktif akan berbanding lurus dan semakin terakselerasi akibat adanya peningkatan suhu penyimpanan.

Fenomena penyusutan kadar fenol ini selaras dengan hasil penelitian Wisnu et al., (2015), yang turut mendokumentasikan adanya penurunan total fenolik secara progresif pada minuman wedang uwuh siap minum selama masa penyimpanan. Secara kimiawi, degradasi ini disebabkan oleh terjadinya reaksi oksidasi pada komponen polifenol akibat pemanasan konstan, yang mengubah strukturnya menjadi senyawa turunan quinon. Senyawa quinon yang terbentuk ini tidak memiliki gugus hidroksil aktif, sehingga tidak mampu lagi bereaksi mereduksi reagen pada saat pengujian metode *Folin-Ciocalteu*. Akibatnya, senyawa tersebut tidak terdeteksi oleh alat dan nilai bacaan total fenolik menurun secara drastis. Senada dengan temuan tersebut, Husnun et al., (2022) juga mengonfirmasi bahwa

proses termal merupakan penyebab utama terjadinya proses oksidasi yang menurunkan total fenolik pada produk jus buah. (Hidayat et al., 2021).

Penurunan kadar total fenolik seiring dengan naiknya suhu penyimpanan merupakan hal yang wajar dalam kinetika kerusakan pangan. Menurut Kumar et al. (2024), senyawa fenolik adalah komponen yang sangat sensitif terhadap paparan panas. Dalam penelitiannya menyebutkan bahwa suhu tinggi tidak hanya mempercepat pemecahan struktur fenol, tetapi juga memicu reaksi kerusakan lain secara bersamaan, seperti reaksi pencoklatan (*Maillard*) dan degradasi asam askorbat. Sebaliknya, penyimpanan pada suhu yang lebih rendah terbukti efektif menekan laju reaksi biokimia ini, sehingga kerusakan molekul fenolik berjalan jauh lebih lambat.

Pengukuran kadar total fenolik pada penelitian ini didasarkan pada prinsip metode *Folin-Ciocalteu* (FC), dengan menggunakan asam galat sebagai larutan standar yang diukur absorbansinya pada panjang gelombang 400-800 nm menggunakan instrumen spektrofotometer UV-Vis. Prinsip kerja dari analisis metode ini mengandalkan kemampuan daya reduksi senyawa fenolik sampel terhadap reagen FC (yang tersusun atas asam fosfomolibdat dan asam fosfotungstat). Reduksi ini akan menghasilkan pembentukan senyawa kompleks molibdenum-tungstat yang berwarna biru. Semakin pekat atau tua intensitas warna biru yang terbentuk pada larutan, maka semakin besar pula kandungan total fenolik di dalam senyawa yang diujikan, yang secara kuantitatif ditandai oleh tingginya nilai pembacaan absorbansi pada alat. (Rumagit, et al., 2023)

Daging buah pala (*Myristica fragrans* Houtt.) Secara alamiah sangat kaya akan senyawa bioaktif dan turunan fenolik. Daging buah pala mengandung konsentrasi senyawa fenolik yang sangat tinggi seperti tanin, asam galat, flavonoid yang menjadikannya memiliki fungsionalitas antioksidan yang kuat serta minyak atsiri seperti miristisin dan safrol. Namun, kelemahan utama dari mayoritas senyawa fenolik ini adalah sifatnya yang termolabil, atau sangat peka dan mudah rusak oleh paparan panas (Sipahelut, 2025)

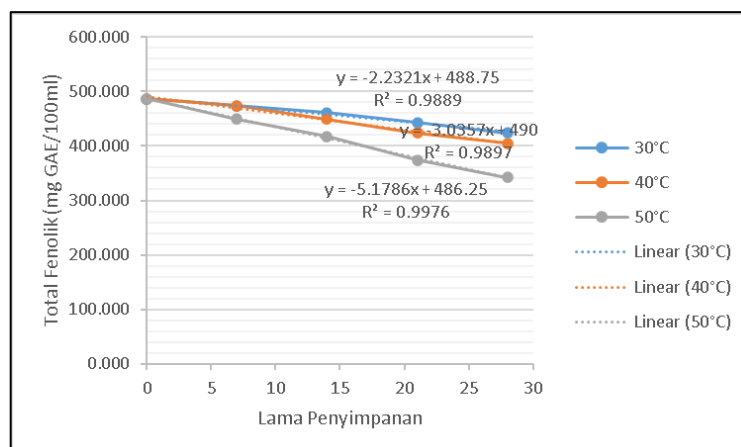
Pada prinsipnya, dinamika suhu dan durasi penyimpanan dapat menyebabkan fluktuasi pada senyawa fenolik; entah itu kenaikan akibat terlepasnya ikatan fenol kompleks dari dinding sel menjadi fenol sederhana, maupun penurunan akibat kerusakan termal (Mahardani & Yuanita, 2021). Namun, pada kasus pengujian ini, durasi pemanasan jangka panjang terbukti lebih mendominasi kerusakan. Hal tersebut didukung oleh pembuktian dari penelitian Husnun et al. (2022), di mana kenaikan suhu juga menyebabkan senyawa fenol terdegradasi sehingga mengalami penurunan kemampuan sebagai senyawa antioksidan. Degradasi kandungan total fenolik sebagai senyawa bioaktif pada proses pasteurisasi jus melon GMP juga diduga menjadi penyebab peningkatan nilai pH jus menjadi lebih basa.

Pada penelitian Saarniit et al. (2023) dinyatakan bahwa senyawa fenolik cenderung jauh lebih stabil pada kondisi pH yang asam. Tingkat stabilitas ini juga bergantung pada jenis spesifik serta struktur molekul dari fenolik itu sendiri. Saarniit juga menegaskan bahwa retensi total fenolik akan lebih terjaga pada matriks bahan yang memiliki nilai pH rendah (sangat asam), dan sebaliknya, laju

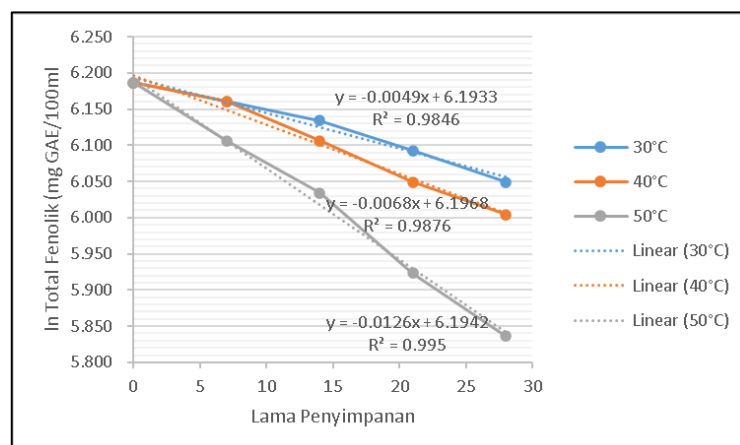
degradasinya akan melonjak tajam seiring dengan kenaikan suhu. Degradasi kandungan total fenolik sebagai sangat berkorelasi dengan hasil analisis pada pengujian sebelumnya, di mana pergeseran nilai pH sari buah pala kalengan perlahan naik (menjadi kurang asam) selama penyimpanan suhu tinggi. Penurunan tingkat keasaman (kenaikan pH) inilah yang pada akhirnya turut memicu ketidakstabilan dan mempercepat kerusakan struktur senyawa fenolik di dalam produk.

4.2.1 Hasil Penentuan Umur Simpan Berdasarkan Respon Total Fenolik

Penentuan umur simpan ditentukan dengan menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) melalui pendekatan model *Arrhenius*. Untuk mengetahui ordo yang tepat, dilakukan pemetaan data dari Tabel 8. parameter Total Fenolik di berbagai suhu terhadap waktu penyimpanan untuk ordo reaksi 0 dan ordo reaksi 1 yang disajikan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Grafik perubahan total senyawa fenolik pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0



Gambar 13. Grafik perubahan total senyawa fenolik pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1

Setelah data dari Tabel 8. tersebut diplotkan ke dalam ordo 0 dan ordo 1 pada gambar 12 dan 13, dilakukan penentuan koefisien determinasi (R^2) paling tinggi dari hasil regresi pada tiap penurunan mutu dalam bentuk ordo 0 dan ordo 1 sehingga dapat ditentukan ordo reaksi yang paling sesuai terhadap penurunan Total Fenolik.

Tabel 9. Hasil Penentuan Orde Reaksi Nilai Total Fenolik

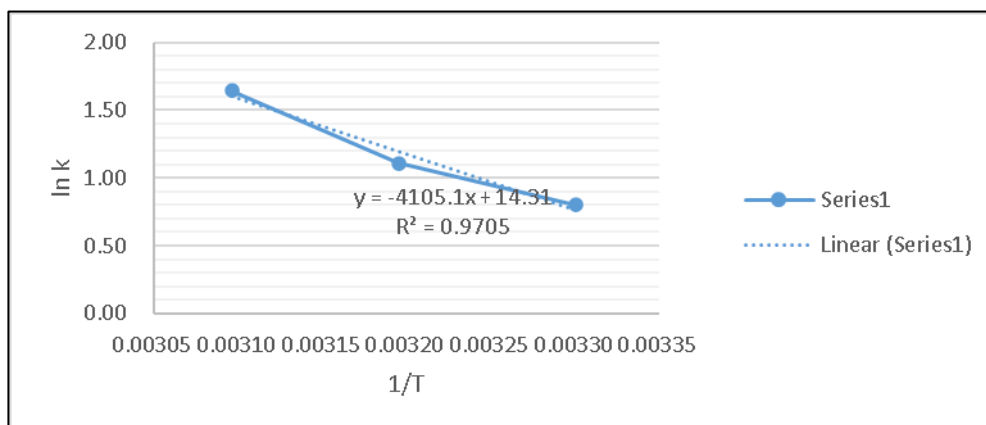
Ordo Reaksi	Nilai R^2 pada tiap Suhu Penyimpanan			Ordo Terpilih
	30°C	40°C	50°C	
0	0.9889	0.9897	0.9976	0
1	0.9846	0.9876	0.995	

Dari hasil tabel di atas, penentuan ordo reaksi didasarkan pada nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi, di mana ordo 0 menunjukkan hasil yang paling sesuai. Konstanta laju reaksi (k) yang diperoleh dari regresi linier ordo 0 tersebut

selanjutnya digunakan dalam pendekatan *Arrhenius* melalui pemetaan hubungan linier antara $1/T$ (K) sebagai sumbu x dan $\ln k$ sebagai sumbu y seperti pada tabel 10. dan gambar 14.

Tabel 10. Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total senyawa fenolik pada setiap suhu penyimpanan

Suhu (°C)	Suhu (K)	$1/T$ (K)	k	$\ln k$
30	303	0.00330	2.2321	0.80
40	313	0.00319	3.0357	1.11
50	323	0.00310	5.1786	1.64



Gambar 14. Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total senyawa fenolik

Dari persamaan tersebut dapat diperoleh nilai energi aktivasi dan diperoleh pula nilai k (konstanta penurunan mutu) pada suhu 30, 40, 50 °C. Selanjutnya nilai konstanta laju penurunan mutu (k) diplotkan ke dalam persamaan perhitungan umur simpan mengikuti ordo reaksi satu sehingga diperoleh estimasi umur simpan sari buah pala kaleng. Nilai energi aktivasi (E_a), konstanta laju penurunan mutu (k) dan umur simpan sari buah pala kaleng dengan parameter total fenolik dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Konstanta Penurunan Mutu dan Umur Simpan Sari Buah Pala
Parameter Total Fenolik

Suhu (°C)	Ea (kal/mol)	k_0	Konstanta Penurunan Mutu (k)(/Hari)	Umur Simpan (Hari)
30	8152,73	$1,639660 \times 10^6$	2.14216	110
40			3.30245	71
50			4.95656	48

Laju penurunan mutu sari buah pala memiliki energi aktivasi (E_a) sebesar 8152,73 kal/mol. Sehingga dapat diketahui bahwa umur sari buah pala yang dikemas dengan kaleng dan disimpan pada suhu 30°C memiliki umur simpan selama 110 hari, suhu 40°C memiliki umur simpan 71 hari dan suhu 50°C memiliki umur simpan 48 hari. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka konstanta laju penurunan mutu total senyawa fenolik semakin tinggi, sehingga akan mengakibatkan sari buah pala semakin cepat mengalami kerusakan dan memiliki umur simpan yang lebih pendek.

4.3 Hasil Penentuan Respon Total Padatan Terlarut

Total Padatan Terlarut (TPT) merupakan parameter kimia yang mencakup keseluruhan komponen terlarut, seperti gula reduksi (sukrosa, fruktosa, dan glukosa), asam organik, vitamin serta mineral larut air. kandungan gula merupakan komponen utama yang memberikan kontribusi terbesar terhadap nilai derajat Brix serta pembentukan rasa manis pada produk (Hidayat et al., 2025).

Analisis total padatan terlarut menggunakan instrumen *hand refraktometer* dimana alat tersebut mendeteksi nilai indeks bias dari padatan terlarut yang ada pada sampel. Hasil analisis sampel sari buah pala dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Total Padatan Terlarut Sari Buah Pala Kaleng

Lama Penyimpanan (Hari)	Suhu Penyimpanan		
	30°C	40°C	50°C
	°Brix	°Brix	°Brix
0	13.38	13.38	13.38
7	13.18	13.18	13.08
14	13.18	13.18	12.98
21	13.18	12.98	12.67
28	12.98	12.67	12.37

Berdasarkan hasil penelitian pada Tabel 12. diketahui bahwa nilai Total Padatan Terlarut (TPT) yang dinyatakan dalam satuan derajat Brix mengalami tren penurunan selama masa penyimpanan yang dipercepat (ASLT). Penurunan ini terpantau berjalan semakin cepat seiring dengan peningkatan suhu inkubasi (40 °C dan 50 °C). Sebaliknya, pada suhu ruang (30 °C), nilai TPT cenderung stabil pada angka 13,18 °Brix hingga hari ke-21 sebelum akhirnya mengalami sedikit penurunan menjadi 12,98 °Brix pada hari ke-28..

Menurut Faridah et al. (2013), nilai TPT yang cenderung konstan selama penyimpanan menunjukkan ketiadaan aktivitas mikroorganisme kontaminan yang memanfaatkan gula sebagai substrat metabolisme. Karena produk dikemas secara hermetis dan berada dalam kondisi steril, tidak terjadi perombakan senyawa

karbohidrat secara biologis pada suhu ruang wajar. Stabilitas nilai TPT pada suhu 30 °C tersebut mengonfirmasi efektivitas proses sterilisasi komersial pada produk.

Penurunan TPT yang signifikan baru terakselerasi akibat intervensi suhu ekstrem (40 °C dan 50 °C). Hal tersebut sejalan dengan temuan Hidayat et al. (2025) dimana peningkatan suhu lingkungan berbanding lurus dengan laju penurunan nilai TPT sari buah akibat stimulasi kinetika reaksi kimia. Fenomena penyusutan padatan terlarut pada suhu tinggi ini dipicu oleh dekomposisi struktur kimia dan pemecahan senyawa karbohidrat akibat paparan energi termal (*thermal breakdown of sugars*) di dalam matriks cairan. Energi panas yang diakumulasi secara konstan selama pengujian akselerasi mengkatalisis pemecahan rantai gula sederhana, yang merupakan penyusun utama komponen makro padatan terlarut. Pola degradasi termal ini didukung oleh Wang (2022), di mana pengondisian suhu tinggi mempercepat destruksi senyawa karbohidrat yang berjalan beriringan dengan merosotnya kadar gula total.

Penurunan nilai °Brix pada produk sari buah berkaitan erat dengan dinamika reaksi pencoklatan non-enzimatis. Di dalam sistem cairan yang kompleks, komponen karbohidrat atau gula pereduksi tidak berdiri sendiri, melainkan berinteraksi secara aktif dengan asam amino dan komponen organik lainnya. Reaksi degradasi ini akan mengubah karbohidrat menjadi senyawa-senyawa intermediet baru yang tidak lagi terdeteksi sebagai padatan terlarut murni oleh instrumen refraktometer (Yadav et al., 2023).

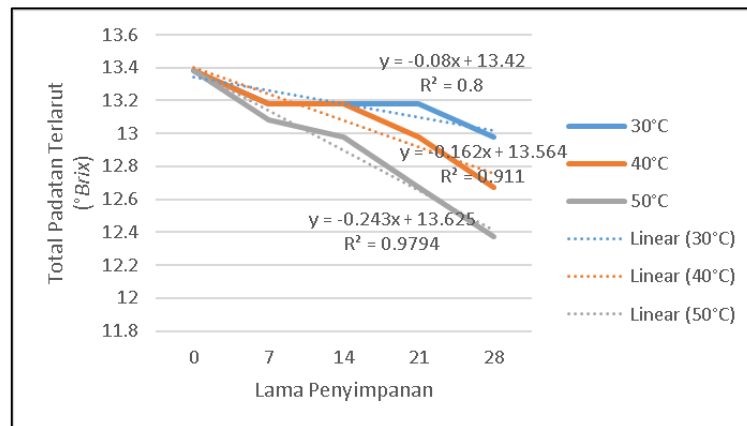
Sebagaimana yang dinyatakan oleh Swadana & Yuwono (2014), menurunnya total asam tersebut disebabkan oleh menyusutnya keberadaan

senyawa-senyawa asam volatil (mudah menguap) selama produk berada di dalam penyimpanan. Swadana juga menyatakan bahwa berkurangnya kadar vitamin C juga dapat mempengaruhi penurunan total padatan terlarut dalam produk, dimana hal ini berkaitan dengan penurunan komponen vitamin C pada fenomena kenaikan nilai derajat keasaman yang telah dikaji pada pengujian sebelumnya.

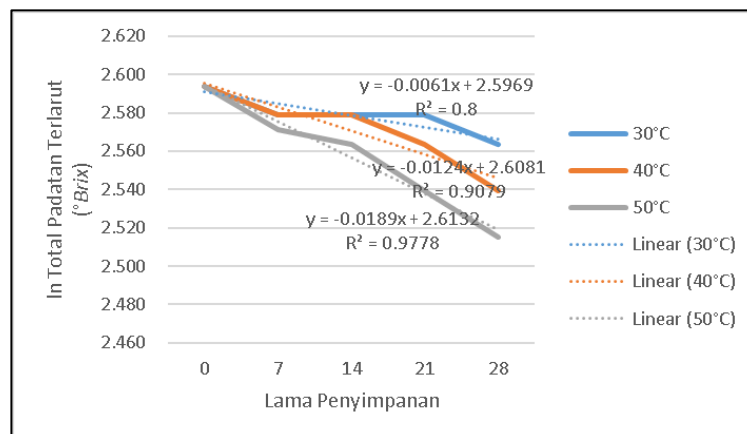
Dekomposisi bahan padat seperti gula dan senyawa pektin pada suhu tinggi juga disertai dengan munculnya fenomena pengendapan (presipitasi) yang mengakibatkan laju penurunan kualitas sari buah berjalan eksponensial (Shaik & Chakraborty, 2023). Terjadinya pergeseran komposisi (reduksi °Brix) akibat paparan termal ini pada akhirnya mengonfirmasi bahwa suhu merupakan akselerator utama yang mampu merombak kestabilan matriks sari buah yang bersifat asam, meskipun produk tersebut telah disterilisasi dan dikemas secara hermetis (Sabbe et al., 2013).

4.3.1 Hasil Penentuan Umur Simpan berdasarkan Respon Total Padatan Terlarut

Penentuan umur simpan ditentukan dengan menggunakan metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) melalui pendekatan model *Arrhenius*. Untuk mengetahui ordo yang tepat, dilakukan pemetaan data dari Tabel 12. parameter Total Padatan Terlarut di berbagai suhu terhadap waktu penyimpanan untuk ordo reaksi 0 dan ordo reaksi 1 yang disajikan pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15. Grafik perubahan total padatan terlarut pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0



Gambar 16. Grafik perubahan total padatan terlarut pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1

Setelah data dari Tabel 12. tersebut diplotkan ke dalam ordo 0 dan ordo 1 pada gambar 15 dan 16, dilakukan penentuan koefisien determinasi (R^2) paling tinggi dari hasil regresi pada tiap penurunan mutu dalam bentuk ordo 0 dan ordo 1 sehingga dapat ditentukan ordo reaksi yang paling sesuai terhadap penurunan Total Padatan Terlarut.

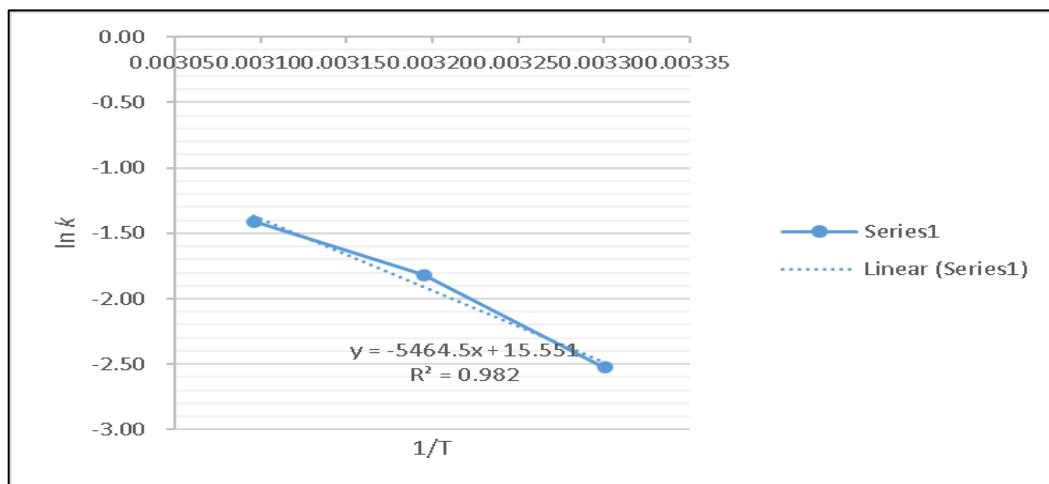
Tabel 13. Hasil Penentuan Orde Reaksi Nilai Total Padatan Terlarut

Ordo Reaksi	Nilai R^2 pada tiap Suhu Penyimpanan			Ordo Terpilih
	30°C	40°C	50°C	
0	0.8000	0.9110	0.9794	0
1	0.8000	0.9079	0.9778	

Dari hasil tabel di atas, penentuan orde reaksi didasarkan pada nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi, di mana orde 0 menunjukkan hasil yang paling sesuai. Konstanta laju reaksi (k) yang diperoleh dari regresi linier orde 0 tersebut selanjutnya digunakan dalam pendekatan *Arrhenius* melalui pemetaan hubungan linier antara $1/T$ (K) sebagai sumbu x dan $\ln k$ sebagai sumbu y seperti pada tabel 14. dan gambar 17.

Tabel 14. Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total padatan terlarut pada Setiap Suhu Penyimpanan

Suhu (°C)	Suhu (K)	$1/T$ (K)	k	$\ln k$
30	303	0.00330	0.08	-2.53
40	313	0.00319	0.162	-1.82
50	323	0.00310	0.2437	-1.41



Gambar 17. Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total padatan terlarut

Dari persamaan tersebut dapat diperoleh nilai energi aktivasi dan diperoleh pula nilai k (konstanta penurunan mutu) pada suhu 30, 40, 50 °C. Selanjutnya nilai konstanta laju penurunan mutu (k) diplotkan ke dalam persamaan perhitungan umur simpan mengikuti ordo reaksi satu sehingga diperoleh estimasi umur simpan sari buah pala kaleng, Nilai energi aktivasi (E_a), konstanta laju penurunan mutu (k) dan umur simpan sari buah pala kaleng dengan parameter total padatan terlarut dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Konstanta Penurunan Mutu dan Umur Simpan Sari Buah Pala
Parameter total padatan terlarut

Suhu (°C)	E_a (kal/mol)	k_0	Konstanta Penurunan Mutu (k)/(Hari)	Umur Simpan (Hari)
30	10.852,50	5.6717×10^6	0.0834	156
40			0.1484	88
50			0.2548	51

Laju penurunan mutu sari buah pala memiliki nilai konstanta yang kecil, sehingga dapat diketahui bahwa umur sari buah pala yang dikemas dengan kaleng

dan disimpan pada suhu 30°C memiliki umur simpan selama 156 hari, suhu 40°C memiliki umur simpan 88 hari dan suhu 50°C memiliki umur simpan 51 hari. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka konstanta laju penurunan mutu total padatan terlarut akan semakin tinggi, sehingga akan mengakibatkan sari buah pala semakin cepat mengalami kerusakan dan memiliki umur simpan yang lebih pendek.

4.4 Penetapan Parameter Kritis dan Umur Simpan Akhir Produk

Pada prinsipnya, penentuan umur simpan produk pangan melalui metode *Accelerated Shelf-Life Testing* (ASLT) model *Arrhenius* tidak didasarkan pada nilai rata-rata dari seluruh parameter yang diuji. Sebaliknya, batas waktu kedaluwarsa secara komprehensif diputuskan oleh satu parameter kritis saja. Parameter kritis ini bertindak sebagai indikator utama, yakni atribut mutu yang paling peka terhadap fluktuasi suhu lingkungan dan paling awal mengalami penolakan kualitas.

Berdasarkan hasil pemodelan kinetika pada ketiga parameter uji sari buah pala kalengan, diperoleh tiga variasi nilai energi aktivasi (E_a). Parameter derajat keasaman (pH) mencatatkan nilai E_a sebesar 2169,11 kal/mol, diikuti oleh total fenolik sebesar 8152,73 kal/mol, dan total padatan terlarut (TPT) dengan nilai tertinggi, yakni 10.852,50 kal/mol.

Untuk menentukan mana di antara ketiga parameter tersebut yang bertindak sebagai titik kritis, dilakukan komparasi terhadap nilai energi aktivasinya masing-masing. Sebagaimana yang dinyatakan oleh Arif (2016), parameter kunci dalam penentuan umur simpan merujuk pada atribut mutu yang memiliki nilai E_a terendah. Konsep kinetika ini juga diperkuat oleh Anagari et al. (2011), yang

menyatakan bahwa semakin kecil nilai energi aktivasi pada suatu parameter, maka produk tersebut akan semakin cepat mengalami reaksi kerusakan. Oleh karena itu, parameter pengujian yang terbukti memiliki nilai energi aktivasi paling kecil harus dipilih dan dijadikan sebagai landasan utama dalam menentukan umur simpan produk.

Estimasi umur simpan akhir untuk produk sari buah pala kalengan merujuk sepenuhnya pada perhitungan kinetika parameter pH yang menempati posisi terendah (2169,11 kal/mol) jika dibandingkan dengan laju penyusutan fenolik maupun padatan terlarut. Melalui ekstrapolasi model *Arrhenius* pada parameter kritis ini, produk minuman sari buah pala kalengan diprediksi memiliki masa simpan pada suhu 30°C selama 311 hari, suhu 40°C selama 276 hari dan suhu 50°C selama 249 hari.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini akan menguraikan mengenai (5.1) Kesimpulan, dan (5.2) Saran.

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian "Pendugaan Umur Simpan Produk Sari Buah Pala Dalam Kemasan Kaleng Dengan Metode *Accelerated Shelf Life Testing* (ASLT) Model *Arrhenius*" adalah sebagai berikut:

1. Hasil analisis penelitian utama berdasarkan respon derajat keasaman (pH) menunjukkan bahwa umur simpan sari buah pala yang disimpan pada suhu 30°C, 40°C, dan 50°C berturut-turut adalah 311 hari, 276 hari, dan 249 hari.
2. Berdasarkan respon total fenolik, umur simpan sari buah pala yang disimpan pada suhu 30°C, 40°C, dan 50°C berturut-turut adalah 110 hari, 71 hari, dan 48 hari.
3. Berdasarkan respon total padatan terlarut (°Brix), umur simpan sari buah pala yang disimpan pada suhu 30°C, 40°C, dan 50°C berturut-turut adalah 156 hari, 88 hari, dan 51 hari.
4. Berdasarkan perhitungan ketiga respon analisis, parameter derajat keasaman (pH) ditetapkan sebagai parameter kritis penentu umur simpan produk karena memiliki nilai Energi Aktivasi (E_a) terendah, yaitu sebesar 2169,1092 kal/mol. Dengan mengacu pada parameter kritis tersebut, umur simpan produk sari buah pala kalengan ditetapkan selama 311 hari, 276 hari, dan 249 hari pada suhu penyimpanan 30°C, 40°C, dan 50°C.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil evaluasi terhadap penelitian yang telah dilakukan, saran yang dapat disampaikan adalah:

1. Perlu dilakukannya pengujian lanjutan secara spesifik terhadap kinetika degradasi asam askorbat (Vitamin C) dan indeks kecokelatan (browning index) untuk memvalidasi secara langsung mekanisme pemicu fluktuasi nilai derajat keasaman (pH) selama penyimpanan.
2. Perlu dilakukannya pengujian atribut organoleptik selama penyimpanan untuk mengetahui batas penolakan konsumen akibat degradasi termal.
3. Perlu dilakukannya penelitian lanjutan mengenai pendugaan umur simpan sari buah pala menggunakan jenis kemasan alternatif yang berbeda, seperti botol kaca atau plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*).

DAFTAR PUSTAKA

- Afianto, E. (2008): Pengawasan Mutu Bahan/Produk Pangan. *Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah*
- Anagari, H., Mustaniroh, S., & Wignyanto, W. (2011): Penentuan Umur Simpan Minuman Fungsional Sari Akar Alang – Alang Dengan Metode *Accelerated Shelf Life Testing* (Aslt) (Studi Kasus Di UKM “R.Rovit” Batu - Malang). *Agrointek. Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, **5(2)**, 133-140.
- Antasionasti, I., Datu, O., & Lestari, U. (2022): Aktivitas antioksidan minuman instan herbal pala (*Myristica fragrans* Houtt.) secara in vitro. *Prosiding Seminar Nasional Kefarmasian Program Studi Farmasi FMIPA Universitas Sam Ratulangi*, **1(1)**, 23-29.
- Arif, A. B. (2016): Metode Accelerated Shelf Life Test (Aslt) Dengan Pendekatan *Arrhenius* Dalam Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Nanas, Pepaya Dan Cempedak. *Informatika Pertanian*, **25 (2)**, 189 – 198.
- Arif, S., Wijana, S., & Mulyadi, A. F. (2016): Pendugaan umur simpan minuman sari buah sirsak (*Annona muricata* L.) berdasarkan parameter kerusakan fisik dan kimia dengan metode accelerated shelf life testing (ASLT). *Jurnal Industria*, **4(2)**, 89-96.
- Azizah, K. N., Pertiwi, S. R. R., & Rifqi, M. (2024): Karakteristik fisikokimia kombucha berbahan baku cascara (kulit kopi) dan kulit buah naga. *Karimah Tauhid*, **3(5)**.
- Assa, J. R., Widjanarko, S.B, Kusnadi, J. (2014): Antioxidant potential of flesh, seed and mace of nutmeg (*Myristica fragrans* Houtt). *International J ChemTech Res.* **6(4)**, 2460–8.
- Badan Standardisasi Nasional. (2004): Cara Uji pH (pH meter) SNI Nomor 06-6989.11-2004. Jakarta (ID): Badan Standardisasi Nasional.
- Basak, S., Shaik, L, & Chakraborty, S. (2023): Effect of ultraviolet and pulsed light treatments on ascorbic acid content in fruit juices-A review of the degradation mechanism. *Food Chemistry Advances*, **2**, 1-14.
- Burgos, G. (2022): Thermal degradation kinetics of vitamin C in fruit juices during sterilization. *Food Chemistry*, **3**, 132112.
- Calligaris, S., Manzocco, L., Anese, M., & Nicoli, M. C. (2023): Accelerated shelf-life testing of foods: An update. *Foods*, **12(5)**, 987.
- Cendrowski, A., Przybył, J. L., & Studnicki, M. (2024): Physicochemical Characteristics, Vitamin C, Total Polyphenols, Antioxidant Capacity, and Sensory Preference of Mixed Juices Prepared with Rose Fruits (*Rosa rugosa*) and Apple or Strawberry. *Applied Sciences*, **14(1)**, 113.

- Dari, D. W., & Junita, D. (2020): Karakteristik fisik dan sensori minuman sari buah pedada. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, **23(3)**, 532-541.
- Euromonitor International. (2024): Functional ready-to-drink beverages in Asia-Pacific 2024..
- Faza, F. I. I., Wahyu, Y. I., & Ariadi, P. S. (2024): Pengendalian Produk Sterilisasi Komersial Tuna Dalam Kemasan Kaleng Dengan Menggunakan Penerapan Sistem Hazard Analysis Critical Control Point. *J. Sains dan Teknologi Pangan (JSTP)* , **9(6)**, 7891-7902.
- Faridah, D. N., Yasni, S., Suswantinah, A., & Aryani, G. W. (2013): Pendugaan umur simpan dengan metode accelerated shelf-life testing pada produk bandrek instan dan sirup buah pala (*Myristica fragrans*). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia (JIPI)*, **18(3)**, 144-153.
- Fernandez-Rosillo, F., Mori-Mestanza, D., Cabrejos-Barrios, A. S., Medina-Mendoza, M., Cabrejos-Barrios, E. M., León-Roque, N., Hernández-Martínez, E., Rivera-Botonares, R., Castro-Alayo, E. M., Minchán-Velayarce, H., & Balcázar-Zumaeta, C. R. (2026): Kinetic Modeling of Vitamin C Degradation for Predicting Shelf Life in Tropical Juices Made from Camu Camu and Naranjilla Under Accelerated Storage Conditions. *Foods*, **15(10)**, 1722.
- Fennema, O. R. (2017): *Food chemistry* (5th ed.). CRC Press.
- Feszterová, M., Kowalska, M., & Mišiaková, M. (2023): Stability of Vitamin C Content in Plant and Vegetable Juices under Different Storing Conditions. *Applied Sciences*, **13(19)**, 10640.
- Herawati, H. (2008): Penentuan Umur Simpan Pada Produk Pangan. *Jurnal Litbang Pertanian*, **27(4)**.
- Hidayat, K., Ulya, M., & Aronika, N. F. (2021): Pendugaan umur simpan minuman herbal cabe jamu (*Piper retrofractum* Vahl) dengan penambahan benzoat menggunakan metode accelerated shelf-life testing (ASLT). In *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, **10(2)**, 100-110.
- Hidayat, R., Afian, S., Palupi, H. T., & Swasono, M. A. H. (2025): Pengaruh kondisi penyimpanan terhadap sifat mutu sari buah jeruk lemon (*Citrus limon*) dan nipis (*Citrus aurantiifolia*). *Seminar Nasional Teknologi Pertanian Indonesia III (STPI)*. 44-56.
- Husnun, F., Daryono, B. S., Fitriani, A., & Supriyadi, S. (2022): Sifat kimia dan kinetika degradasi termal antioksidan jus melon (*Cucumis melo* L.). *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas*. **26(1)**.
- Kilcast, D., & Subramaniam, P. (2011): *The stability and shelf-life of food* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Kong, F.; Singh, R.P. (2011): *Advances in Instrumental Methods to Determine Food Quality Deterioration. In Food and Beverage Stability and Shelf Life*;

- Kilcast, D., Subramaniam, P., Eds.; Woodhead Publishing: Oxford, UK, 381–404.
- Krishnamoorthy, B., & Rema, J. (2001): *Nutmeg and mace*. In *Handbook of herbs and spices* (3rd ed., pp. 413–438). Woodhead Publishing.
- Kumar, S., Pipliya, S., Srivastav, P. P., & Srivastava, B. (2024): Shelf life and storage stability of cold plasma treated kiwifruit juice: kinetic models. *International Journal of Food Properties*, **27(1)**, 1-23.
- Labuza, T. P., (1982): *Shelf-Life Dating of Food*. Food and Nutrition. Press Inc. Westport. Connecticut.
- Labuza, T. P., & Riboh, D. (1982): Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods. *Food Technology*, **36(10)**, 66–74.
- Labuza, T. P., & Schmidl, M. K. (1985): Accelerated shelf-life testing of foods. *Food Technology*, **39(9)**, 57–64.
- Mahardani, O. T., & Yuanita, L. (2021): Efek metode pengolahan dan penyimpanan terhadap kadar senyawa fenolik dan aktivitas antioksidan. *UNESA Journal of Chemistry*, **10(1)**.
- NielsenIQ. (2023): Global health and wellness report 2023.
- Pathakakula, S., Motha, K., & Veluru, A. (2024): Exploring the Potential and Opportunities of Nutmeg Pericarp. *Functional Foods*. **5**. 94-102.
- Peraturan BPOM No. 13. (2023): Tentang Persyaratan Pengemasan Pangan Olahan dalam Kaleng.
- Peraturan Pemerintah No. 86. (2019): Tentang Keamanan Pangan.
- Perdana, W. W. (2019): Analisis Logam Berat di Kemasan Kaleng. *Agroscience*, **9(2)**, 215-223.
- Priadi, G., Setiyoningrum, F., Afiati, F., Amieni, H., & Arpah, M. (2019): Pendugaan umur simpan sediaan bawang tunggal hitam dengan metode accelerated shelf-life testing (ASLT). *Jurnal Litbang Industri*, **9(2)**, 79-88.
- Raj, N., Vikram, H. C., Philip, M., & Deepa, E. T. (2017): Fruit rind constituents in nutmeg (*Myristica fragrans*) morphotypes. *Journal of Plantation Crops*. **44**. 153.
- Rema, J., & Krishnamoorthy, B. (2001): Genetic resources and ex situ conservation of nutmeg, a tree spice of medicinal importance. Genetic resources and ex situ conservation of nutmeg, a tree spice of medicinal importance., **22(4)**, 340-343
- Rickman, J. C., Barrett, D. M., & Bruhn, C. M. (2007): Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **87(7)**, 1185–1196.
- Robertson, G. L. (2016): Food packaging: Principles and practice (3rd ed.). CRC Press.

- Rumagit, T. A., Fatimawali, & Antasionasti, I. (2023): Analisis korelasi aktivitas antioksidan minuman herbal pala dengan kandungan total fenolik dan total flavonoid. *Jurnal lentera farma*, **2(1)**, 58-65.
- Saarniit, K., Lang, H., Kuldjärv, R., Laaksonen, O., & Rosenvald, S. (2023): The stability of phenolic compounds in fruit, berry, and vegetable purees based on accelerated shelf-life testing methodology. *Foods*, **12**, 1777.
- Shaik, L, and Chakraborty, S. (2023): The impact of storage temperature and packaging material on the quality of ultrasound treated sweet lime juice. *Food and Humanity*, **1**, 445–458.
- Sipahelut, S. G. (2025): Pengaruh kombinasi air kelapa tua dan sari buah pala (*Myristica fragrans Houtt.*) terhadap karakteristik sirup. *J. Sains dan Teknologi Pangan*, **10(5)**, 8886-8896
- Suloi, A.F. dan Suloi, A.N.F. (2021): Bioaktivitas pala (*Myristica fragrans Houtt.*). *Jurnal Teknologi Pengolahan Pertanian*, **3 (1)**, 11-18.
- Syarief, R., S. Santausa, dan S. Isyana. (1989): *Teknologi Pengemasan Pangan*. Pusat Antar-Universitas, Institut Pertanian Bogor.
- Swadana, A.W., & Yuwono, S.S. (2014): Pendugaan Umur Simpan Minuman Berperisa Apel Menggunakan Metode Accelerated Shelf Life Testing (Aslt) Dengan Pendekatan Arrhenius. *Jurnal Pangan dan Agroindustri*, **2(3)**. 203-213.
- Teixeira, A. (2018): Thermal processing of canned foods. *In Handbook of food preservation* (3rd ed, 629–660). CRC Press.
- Utami, T.S., dan Rahmawati, R. (2024): Pemanfaatan Limbah Daging Buah Pala Sebagai Minuman Fungsional: Peluang Wirausaha. *Seminar Nasional Pariwisata dan Kewirausahaan*, **3**, 707-717.
- Wang, H. (2022): Effects of fruit storage temperature and time on cloud stability of not from concentrated apple juice. *Foods*, **11(17)**, p. 2568
- Wisnu, L., Kawiji, K., & Atmaka, W. (2015): Pengaruh Suhu Dan Waktu Pasteurisasi Terhadap Perubahan Kadar Total Fenol Pada Wedang Uwuh Ready To Drink Dan Kinetika Perubahan Kadar Total Fenol Selama Penyimpanan. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*. **8**. 71.
- Yadav, S., Arora, S., & Vats, S. (2023): Vitamins and Minerals: A Review on Processing Losses and Strategies to Control It. *Modern Concepts & Developments in Agronomy*, **12(5)**, 1178.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Prosedur Analisis Penentuan Derajat Keasaman (pH) Metode Potentiometri Menggunakan pH-Meter (Cendrowski et al., 2024)

Prosedur:

Kalibrasi pH-meter terlebih dahulu dengan buffer standar pH 4 dan pH 7 (atau buffer terdekat dengan pH sampel) sesuai instruksi alat. Bilas elektroda dengan air suling, kemudian keringkan dengan tisu lembut. Ambil sampel sari buah pala kaleng sebanyak 50–100 mL dalam gelas beaker bersih. Rendam elektroda pH ke dalam sampel hingga stabil (tunggu 30–60 detik hingga pembacaan konstan). Baca nilai pH yang ditampilkan pada layar pH-meter. Ulangi pengukuran minimal tiga kali untuk akurasi, dan catat rata-rata.

Lampiran 2. Prosedur Analisis Penentuan Total Fenolik Metode Spektrofotometri Folin-Ciocalteu (Cendrowski et al., 2024)

Prosedur:

Siapkan reagen Folin-Ciocalteu (FC) (encerkan 1:10 dengan air), larutan Na_2CO_3 7.5%, dan standar asam galat (GAE) untuk kurva kalibrasi (0–100 $\mu\text{g/mL}$). Ambil sampel sari buah pala kaleng sebanyak 0.5 mL, campur dengan 1 mL reagen FC dalam tabung uji. Diamkan 5 menit, tambahkan 1 mL Na_2CO_3 , lalu encerkan hingga 5 mL dengan air suling. Inkubasi campuran pada suhu ruang selama 30 menit. Ukur absorbansi pada panjang gelombang 400–800 nm menggunakan spektrofotometer. Buat kurva kalibrasi dengan standar GAE untuk menghitung konsentrasi. Hasil analisis terhadap nilai total fenolik pada sampel sari buah pala dinyatakan dalam

mg GAE/100ml (Jumlah Kandungan Fenolik sebanding dengan jumlah mg ekuivalen asam galat dalam 100 mL sampel)

$$KTFe \text{ (mg GAE/100ml)} = \frac{V \text{ tabung reaksi (liter)} \times \text{Konsentrasi} \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}} \right) \times FP}{\text{berat sampel (ml)}} \times 100\text{ml}$$

Lampiran 3. Prosedur Analisis Total Padatan Terlarut Metode Refraktometri Menggunakan Refraktometer (AOAC, 2012)

Prosedur:

Persiapan alat refraktometer dilakukan dengan mengkalibrasi prisma menggunakan aquades hingga skala menunjukkan angka 0 °Brix, kemudian dikeringkan secara perlahan menggunakan tisu lensa searah. Sampel minuman sari buah pala kaleng dibuka dan dihomogenkan perlahan untuk memastikan padatan terdistribusi merata tanpa membentuk gelembung udara. Sebanyak 1 hingga 2 tetes sampel diambil menggunakan pipet tetes bersih dan diteteskan tepat di bagian tengah kaca prisma refraktometer. Kaca penutup prisma kemudian ditutup secara perlahan agar sampel menyebar merata menutupi seluruh permukaan prisma tanpa adanya gelembung. Refraktometer diarahkan ke sumber cahaya terang, lalu nilai derajat Brix (°Brix) yang ditunjukkan oleh garis batas antara area terang dan gelap pada skala dibaca dan dicatat. Pengukuran diulang sebanyak tiga kali untuk setiap sampel guna memastikan akurasi data, dan diambil nilai rata-ratanya. Setelah selesai digunakan, kaca prisma dan penutupnya dibilas menggunakan aquades lalu dikeringkan kembali secara perlahan.

Lampiran 4. Perhitungan Kebutuhan Bahan Baku

No	Nama Bahan	Harga	Jumlah	Total
1	Sari Buah Pala	Rp58,800.00	2L	Rp58,800.00
Total				Rp58,800.00

Lampiran 5. Perhitungan Kebutuhan Jumlah Sampel Analisis Perhitungan Kebutuhan Jumlah Sampel Analisis

No	Analisis	Bahan	Kebutuhan	Total (ml)
1	pH	Sari Buah Pala	50 ml x 26 sampel	1300
2	TPT	Sari Buah Pala	10 ml x 26 sampel	260
3	Total Fenolik	Sari Buah Pala	1 ml x 26 sampel	26
Total				1586

Lampiran 6. Perhitungan Biaya Analisis Penelitian

No	Analisis	Jumlah Sampel	Harga	Total
1	pH	26	Rp 10.000	Rp 260.000
2	TPT	26	Rp 3,000.00	Rp 78,000.00
3	Total Fenolik	26	Rp 100.000	Rp 2.600.000
4	(-) Dari 6 Bulan			Rp 250.000
Total				Rp 3.188.000

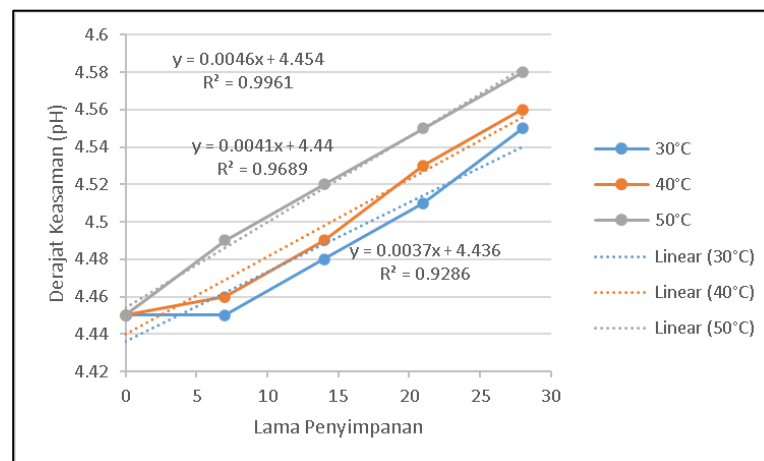
Lampiran 7. Perhitungan Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Pala (pH)

Hasil Analisis Derajat Keasaman (pH) Sari Buah Pala Kaleng

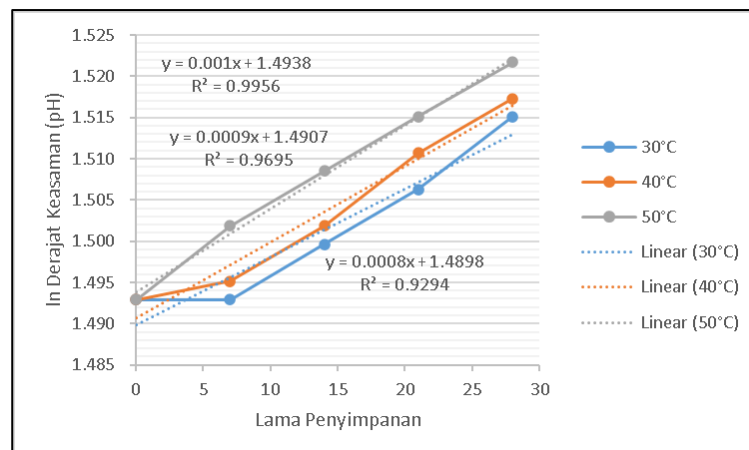
Hari	30°C		Rata-rata	40°C		Rata-rata	50°C		Rata-rata
	1	2		1	2		1	2	
0	4.43	4.47	4.45	4.43	4.47	4.45	4.43	4.47	4.45
7	4.44	4.46	4.45	4.48	4.44	4.46	4.47	4.51	4.49
14	4.51	4.45	4.48	4.47	4.51	4.49	4.56	4.48	4.52
21	4.49	4.53	4.51	4.56	4.50	4.53	4.55	4.55	4.55
28	4.58	4.52	4.55	4.53	4.59	4.56	4.60	4.56	4.58

Derajat Keasaman (pH) Sari Buah Pala Kaleng

Lama Penyimpanan (Hari)	Suhu Penyimpanan					
	30°C		40°C		50°C	
	pH	ln	pH	ln	pH	ln
0	4.45	1.493	4.45	1.493	4.45	1.493
7	4.45	1.493	4.46	1.495	4.49	1.502
14	4.48	1.500	4.49	1.502	4.52	1.509
21	4.51	1.506	4.53	1.511	4.55	1.515
28	4.55	1.515	4.56	1.517	4.58	1.522



Grafik perubahan derajat keasaman (pH) pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0



Grafik perubahan derajat keasaman (pH) pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1

Grafik ln derajat keasaman (pH) sari buah pala kaleng selama penyimpanan (ordo

1) Dari kurva diatas didapatkan persamaan regresi linier ordo 1 sebagai berikut :

$$y_{30^{\circ}\text{C}} = 1.4898 - 0,0008x \quad a = 1.4898$$

$$b = -0,0008x$$

$$y_{40^{\circ}\text{C}} = 1,4907 - 0,0009x \quad a = 1,4907$$

$$b = -0,0009x$$

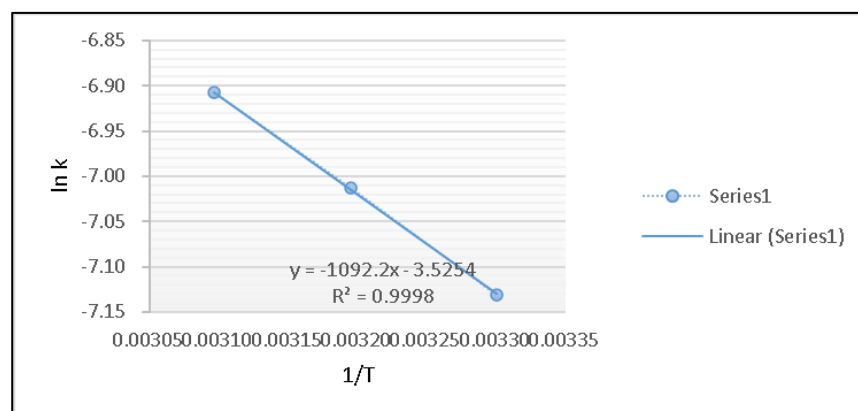
$$y_{50^{\circ}\text{C}} = 1.4938 - 0,001x \quad a = 1.4938$$

$$b = -0,001x$$

Dengan diketahui nilai $b = k$, maka selanjutnya nilai k dan $1/T$ di plot ke dalam grafik sehingga didapatkan laju penurunan mutu

Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan Nilai pH pada Setiap Suhu Penyimpanan

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu (K)	$1/T$ (K)	k	$\ln k$
30	303	0.00330	0.0008	-7.13
40	313	0.00319	0.0009	-7.01
50	323	0.00310	0.001	-6.91



Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan Nilai pH

- Nilai Ea**

$$k = k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)}$$

$$\ln k = \ln k_0 - E_a/R \times 1/T$$

$$y = a + bx$$

$$\begin{aligned}
 y &= -3.5254 - 1092.2x \\
 \ln k &= -3.5254 - 1092.2 (1/T) \\
 -E_a/R &= -1092.2 \quad ; R = 1,986 \text{ kal/mol} \\
 E_a &= 2169.1092 \text{ kal/mol}
 \end{aligned}$$

- **Nilai k₀**

$$\begin{aligned}
 \ln k_0 &= a \\
 \ln k_0 &= -3.5254 \\
 k_0 &= 0.02944
 \end{aligned}$$

- **Penurunan Mutu**

$$\begin{aligned}
 k &= k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)} \\
 k &= 0.02944 \cdot e^{-1092.2(1/T)} \\
 k_{30} &= 0.0008/\text{hari} \\
 k_{40} &= 0.0009/\text{hari} \\
 k_{50} &= 0.001/\text{hari}
 \end{aligned}$$

- **Penentuan Umur Simpan**

$$\begin{aligned}
 t_s &= (\ln A_0/A_t)/k \\
 \text{Suhu } 30^\circ\text{C} \\
 t_{s30} &= (\ln 4.45/3.47)/0.0008 = 311 \text{ hari} \\
 \text{Suhu } 40^\circ\text{C} \\
 t_{s40} &= (\ln 4.45/3.47)/0.0009 = 276 \text{ hari} \\
 \text{Suhu } 50^\circ\text{C} \\
 t_{s50} &= (\ln 4.45/3.47)/0.001 = 249 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Lampiran 8. Perhitungan Penentuan Total Fenolik dan Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Pala (Total Fenolik)

-Penentuan Total Fenolik Metode Folin Ciocalteu

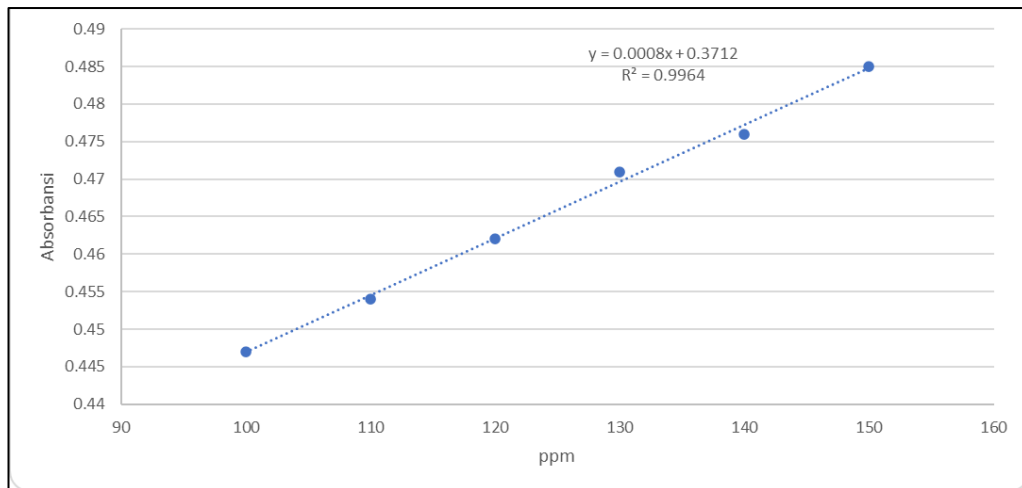
Tabel 16. Hasil Pembacaan Larutan Standar Baku Asam Galat

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi
100	0.447
110	0.454
120	0.462
130	0.471
140	0.476
150	0.485

Dari kurva diatas didapatkan persamaan regresi linier standar asam galat sebagai berikut :

$$y = a + bx$$

$$y = 0.3712 + 0.0008x$$



Kurva Kalibrasi Standar Asam Galat

Setelah persamaan regresi linear asam galat didapatkan, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai Konsentrasi(mg/(mL)) dan KTF_e (Kadar Total Fenolik) dari sampel sari buah pala yang telah diuji dari hasil pembacaan absorbansi sampel berikut :

Sampel	Suhu	Abs blanko	Abs sampel	
			Ulangan I	Ulangan II
Sampel Hari Ke 0	30	0.00	0.450	0.448
	40	0.00	0.450	0.448
	50	0.00	0.450	0.448
Sampel Hari Ke 7	30	0.00	0.447	0.447
	40	0.00	0.450	0.444
	50	0.00	0.442	0.444
Sampel Hari Ke 14	30	0.00	0.447	0.443
	40	0.00	0.443	0.443
	50	0.00	0.441	0.435

Sampel	Suhu	Abs blanko	Abs sampel	
			Ulangan I	Ulangan II
Sampel Hari Ke 21	30	0.00	0.441	0.443
	40	0.00	0.437	0.441
	50	0.00	0.431	0.431
Sampel Hari Ke 28	30	0.00	0.439	0.439
	40	0.00	0.437	0.435
	50	0.00	0.424	0.428

• **Perhitungan Nilai Konsentrasi**

Hari Ke-0 Suhu 30,40,50°C

Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{Abs\ sampel - a}{b}$	
Ulangan 1	Ulangan 2
$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.450 - 0.3712}{0.0008}$ $= 98.500$	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.448 - 0.3712}{0.0008}$ $= 96.000$

30°C

Hari	Ulangan I	Ulangan II
7	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.447 - 0.3712}{0.0008}$ $= 94.750$	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.447 - 0.3712}{0.0008}$ $= 94.750$
14	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.447 - 0.3712}{0.0008}$ $= 94.750$	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.443 - 0.3712}{0.0008}$ $= 89.750$
21	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.441 - 0.3712}{0.0008}$ $= 87.250$	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.443 - 0.3712}{0.0008}$ $= 89.750$
28	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.439 - 0.3712}{0.0008}$ $= 84.750$	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.439 - 0.3712}{0.0008}$ $= 84.750$

40°C

Hari	Ulangan I	Ulangan II
7	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.450 - 0.3712}{0.0008}$	$\text{Konsentrasi} \left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.444 - 0.3712}{0.0008}$

Hari	Ulangan I	Ulangan II
	= 98.500	= 91.000
14	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.443-0.3712}{0.0008}$ = 89.750	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.443-0.3712}{0.0008}$ = 89.750
21	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.437-0.3712}{0.0008}$ = 82.250	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.441-0.3712}{0.0008}$ = 87.250
28	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.437-0.3712}{0.0008}$ = 82.250	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.435-0.3712}{0.0008}$ = 79.750

50°C

Hari	Ulangan I	Ulangan II
7	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.442-0.3712}{0.0008}$ = 88.500	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.444-0.3712}{0.0008}$ = 91.000
14	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.441-0.3712}{0.0008}$ = 87.250	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.435-0.3712}{0.0008}$ = 79.750
21	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.431-0.3712}{0.0008}$ = 74.750	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.431-0.3712}{0.0008}$ = 74.750
28	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.424-0.3712}{0.0008}$ = 66.000	Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right) = \frac{0.428-0.3712}{0.0008}$ = 71.000

Setelah nilai Konsentrasi $\left(\frac{mg}{mL}\right)$ dari setiap sampel pada masing-masing suhu didapatkan, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai KTF_e (Kadar Total Fenolik) sebagai berikut :

- **Perhitungan Kadar Total Fenolik**

Hari Ke-0 Suhu 30,40,50°C

$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{V \text{ tabung reaksi (liter)} \times \text{Konsentrasi} \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}} \right) \times FP}{\text{berat sampel (ml)}} \times 100\text{ml}$
Ulangan 1
$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 98.500 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 492.500 \text{ mg GAE/100ml}$
Ulangan 2
$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 96.000 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 480.000 \text{ mg GAE/100ml}$

30°C

Hari	Ulangan 1
7	$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 94.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 473.750 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 94.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 473.750 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
14	$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 94.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 473.750 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 89.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 448.750 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
21	$K\text{TFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 87.250 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 436.250 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2

	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 89.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 448.750 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
28	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 84.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 423.750 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 84.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 423.750 \text{ mg GAE/100ml}$

40°C

Hari	Ulangan 1
7	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 98.500 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 492.500 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 91.000 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 455.000 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
14	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 89.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 448.750 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 89.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 448.750 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
21	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 82.250 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 411.250 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 87.250 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$

	= 436.250 mg GAE/100ml
Hari	Ulangan 1
28	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 82.250 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 411.250 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 79.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 398.750 \text{ mg GAE/100ml}$

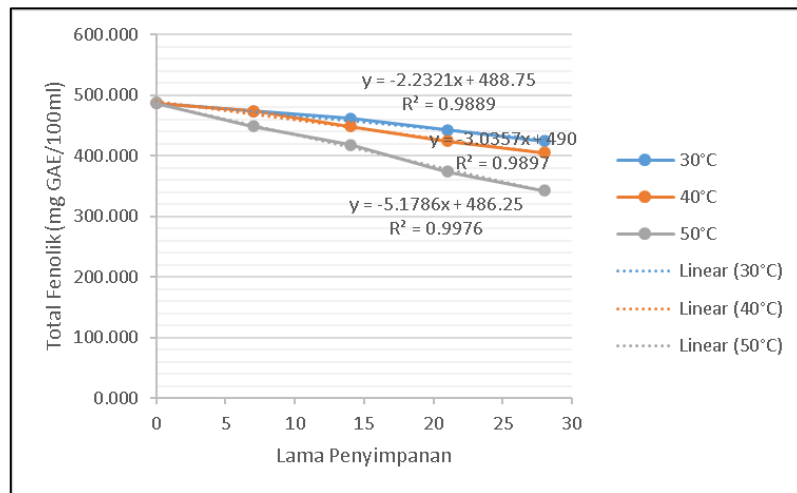
50°C

Hari	Ulangan 1
7	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 88.500 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 442.500 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 91.000 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 455.000 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
14	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 87.250 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 436.250 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 79.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 398.750 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1
21	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 74.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 373.750 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 74.750 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 373.750 \text{ mg GAE/100ml}$
Hari	Ulangan 1

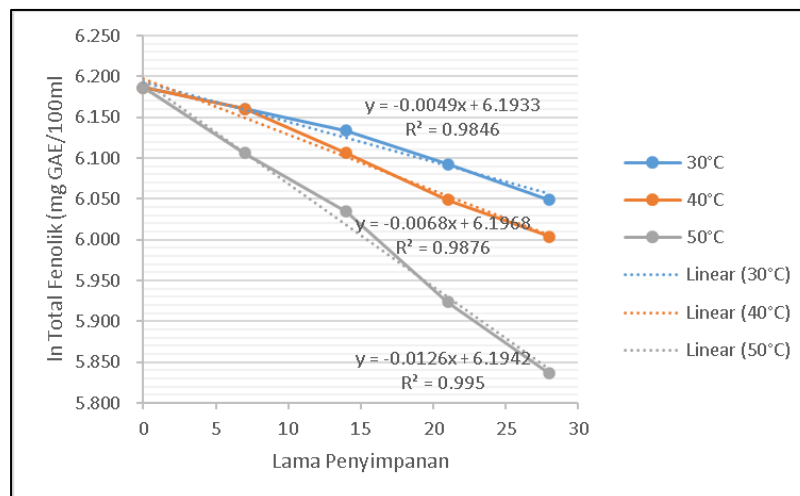
28	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 66.000 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 330.000 \text{ mg GAE/100ml}$
	Ulangan 2
	$\text{KTFe (mg GAE/100ml)} = \frac{0.005 \times 71.000 \times 5}{0.5} \times 100\text{ml}$ $= 355.000 \text{ mg GAE/100ml}$

Hasil Akhir Kadar Total Fenolik (mg GAE/100ml)

Hari	30°C		Rata-rata	40°C		Rata-rata	50°C		Rata-rata
	1	2		1	2		1	2	
0	492.500	480.000	486.250	492.500	480.000	486.250	492.500	480.000	486.250
7	473.750	473.750	473.750	492.500	455.000	473.750	442.500	455.000	448.750
14	473.750	448.750	461.250	448.750	448.750	448.750	436.250	398.750	417.500
21	436.250	448.750	442.500	411.250	436.250	423.750	373.750	373.750	373.750
28	423.750	423.750	423.750	411.250	398.750	405.000	330.000	355.000	342.500



Grafik perubahan total senyawa fenolik pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0



Grafik perubahan total senyawa fenolik pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1

Grafik ln total fenolik sari buah pala kaleng selama penyimpanan (ordo 0) Dari kurva diatas didapatkan persamaan regresi linier ordo 0 sebagai berikut :

$$y_{30^{\circ}\text{C}} = 488,75 - 2,2321x \quad \begin{array}{l} a = 488,75 \\ b = -2,2321x \end{array}$$

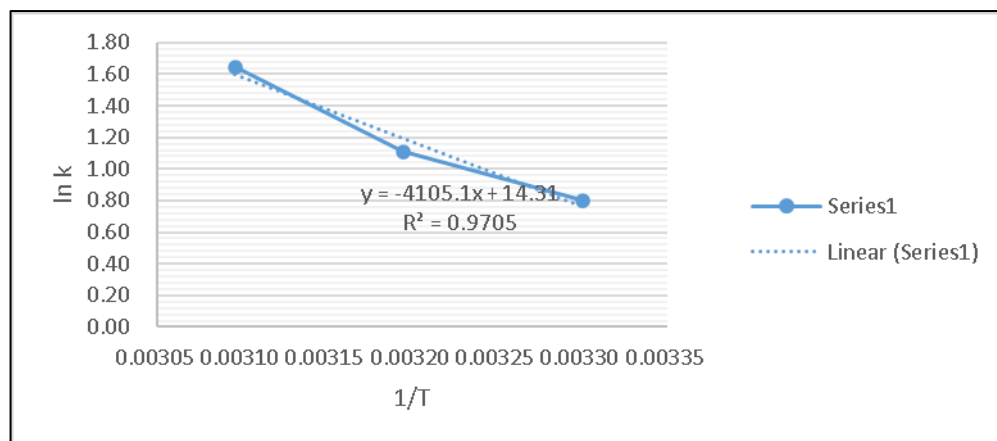
$$y_{40^{\circ}\text{C}} = 490 - 3,0357x \quad \begin{array}{l} a = 490 \\ b = -3,0357x \end{array}$$

$$y_{50^{\circ}\text{C}} = 486,25 - 5,1786x \quad \begin{array}{l} a = 486,25 \\ b = -5,1786x \end{array}$$

Dengan diketahui nilai $b = k$, maka selanjutnya nilai k dan $1/T$ di plot ke dalam grafik sehingga didapatkan laju penurunan mutu

Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total senyawa fenolik pada setiap suhu penyimpanan

Suhu (°C)	Suhu (K)	$1/T$ (K)	k	$\ln k$
30	303	0.00330	2.2321	0.80
40	313	0.00319	3.0357	1.11
50	323	0.00310	5.1786	1.64



Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total senyawa fenolik

- **Nilai E_a**

$$\begin{aligned}
 k &= k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)} \\
 \ln k &= \ln k_0 - E_a/R \times 1/T \\
 y &= a + bx \\
 y &= 14.31 + -4105.1x \\
 \ln k &= 14.31 + -4105.1 (1/T) \\
 -E_a/R &= -4105.1 \quad ; R = 1,986 \text{ kal/mol} \\
 E_a &= 8152.7286 \text{ kal/mol}
 \end{aligned}$$

- **Nilai k_0**

$$\begin{aligned}
 \ln k_0 &= a \\
 \ln k_0 &= 14.31 \\
 k_0 &= 1,639660 \times 10^6
 \end{aligned}$$

- **Penurunan Mutu**

$$k = k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)}$$

$$k = 1,639660 \times 10^6 \cdot e^{-4105.1(1/T)}$$

$$k_{30} = 2.14216/\text{hari}$$

$$k_{40} = 3.30245/\text{hari}$$

$$k_{50} = 4.95656/\text{hari}$$

- **Penentuan Umur Simpan**

$$t_s = (A_0 - A_t)/k$$

Suhu 30°C

$$t_{s30} = (486.250 - 116.21)/2.14216 = 110 \text{ hari}$$

Suhu 40°C

$$t_{s40} = (486.250 - 116.21)/3.30245 = 71 \text{ hari}$$

Suhu 50°C

$$t_{s50} = (486.250 - 116.21)/4.95656 = 48 \text{ hari}$$

Lampiran 9. Perhitungan Penentuan Total Padatan Terlarut dan Pendugaan Umur Simpan Sari Buah Pala (Total Padatan Terlarut)

Total Padatan Terlarut Sari Buah Pala Kaleng

Hari	30°C		Rata-rata	40°C		Rata-rata	50°C		Rata-rata
	1	2		1	2		1	2	
0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
7	12.9	12.7	12.8	12.8	12.8	12.8	12.6	12.8	12.7
14	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.6	12.6	12.6
21	12.8	12.8	12.8	12.6	12.6	12.6	12.3	12.3	12.3
28	12.6	12.6	12.6	12.2	12.4	12.3	12.0	12.0	12.0

Setelah data °Brix pengujian sari buah pala didapatkan, data tersebut diinterpolasikan berdasarkan tabel koreksi temperatur refraktometer sesuai suhu pengujian ruangan yakni 25°C

Tabel Koreksi Temperatur Refraktometer

TEMPERATURE CORRECTION TABLE																	
Concentration(%)																	
Temperature °C			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Subtract from reading	10		0.50	0.54	0.58	0.61	0.64	0.66	0.68	0.70	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76	0.78	0.79
	11		0.46	0.46	0.53	0.55	0.58	0.60	0.62	0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71
	12		0.42	0.45	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	0.63	0.63
	13		0.37	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55
	14		0.33	0.35	0.37	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48
	15		0.27	0.29	0.31	0.33	0.34	0.34	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.39	0.39	0.40	0.40
	16		0.22	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32
	17		0.17	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24
	18		0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16
	19		0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
20		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Add to reading	21		0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	22		0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	23		0.19	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	24		0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32
	25		0.33	0.35	0.36	0.37	0.38	0.38	0.39	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	26		0.40	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
	27		0.48	0.50	0.52	0.53	0.54	0.55	0.55	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
	28		0.56	0.57	0.60	0.61	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
	29		0.64	0.66	0.68	0.69	0.71	0.72	0.72	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
	30		0.72	0.74	0.77	0.78	0.79	0.80	0.80	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81

Rumus interpolasi yang digunakan yakni :

$e = f + \left[\left(\frac{b-a}{c-a} \right) \times (f - d) \right] z$	
Hari	Nilai Brix Suhu 30,40,50°C
0	$= 0,37 + \left[\left(\frac{13-10}{15-10} \right) \times (0,37 - 0,36) \right]$ $= 0,376$ Kadar Total Padatan Terlarut = 13 °Brix + 0,376 °Brix $= 13,376 \approx 13,38 \text{ °Brix}$

30°C

Hari	Nilai Brix
7	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,8-10}{15-10} \right) \times (0,37 - 0,36) \right]$ $= 0,3756$

	$\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,8^{\circ}\text{Brix} + 0,3756^{\circ}\text{Brix}$ $= 13,175 \approx 13,18^{\circ}\text{Brix}$
14	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,8-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3756$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,8^{\circ}\text{Brix} + 0,3756^{\circ}\text{Brix}$ $= 13,175 \approx 13,18^{\circ}\text{Brix}$
21	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,8-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3756$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,8^{\circ}\text{Brix} + 0,3756^{\circ}\text{Brix}$ $= 13,175 \approx 13,18^{\circ}\text{Brix}$
28	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,6-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3752$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,6^{\circ}\text{Brix} + 0,3752^{\circ}\text{Brix}$ $= 12,9752 \approx 12,98^{\circ}\text{Brix}$

40°C

Hari	Nilai Brix
7	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,8-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3756$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,8^{\circ}\text{Brix} + 0,3756^{\circ}\text{Brix}$ $= 13,175 \approx 13,18^{\circ}\text{Brix}$
14	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,8-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3756$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,8^{\circ}\text{Brix} + 0,3756^{\circ}\text{Brix}$ $= 13,175 \approx 13,18^{\circ}\text{Brix}$
21	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,6-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3752$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,6^{\circ}\text{Brix} + 0,3752^{\circ}\text{Brix}$ $= 12,9752 \approx 12,98^{\circ}\text{Brix}$
28	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,3-10}{15-10}\right) \times (0,37 - 0,36)\right]$ $= 0,3746$ $\text{Kadar Total Padatan Terlarut} = 12,3^{\circ}\text{Brix} + 0,3746^{\circ}\text{Brix}$

	$= 12,6748 \approx 12,67^{\circ}\text{Brix}$
--	--

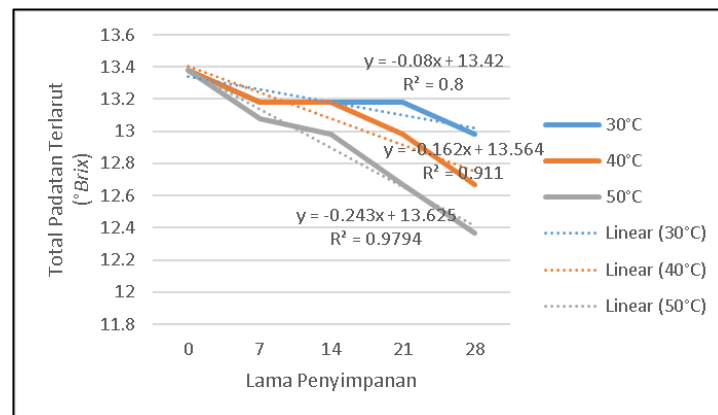
50°C

Hari	Nilai Brix
7	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,7-10}{15-10} \right) \times (0,37 - 0,36) \right]$ $= 0,3754$ Kadar Total Padatan Terlarut = $12,7^{\circ}\text{Brix} + 0,3754^{\circ}\text{Brix}$ $= 13,0754 \approx 13,08^{\circ}\text{Brix}$
14	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,6-10}{15-10} \right) \times (0,37 - 0,36) \right]$ $= 0,3752$ Kadar Total Padatan Terlarut = $12,6^{\circ}\text{Brix} + 0,3752^{\circ}\text{Brix}$ $= 12,9752 \approx 12,98^{\circ}\text{Brix}$
21	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12,3-10}{15-10} \right) \times (0,37 - 0,36) \right]$ $= 0,3746$ Kadar Total Padatan Terlarut = $12,3^{\circ}\text{Brix} + 0,3746^{\circ}\text{Brix}$ $= 12,6746 \approx 12,67^{\circ}\text{Brix}$
28	$= 0,37 + \left[\left(\frac{12-10}{15-10} \right) \times (0,37 - 0,36) \right]$ $= 0,374$ Kadar Total Padatan Terlarut = $12^{\circ}\text{Brix} + 0,374^{\circ}\text{Brix}$ $= 12,374 \approx 12,37^{\circ}\text{Brix}$

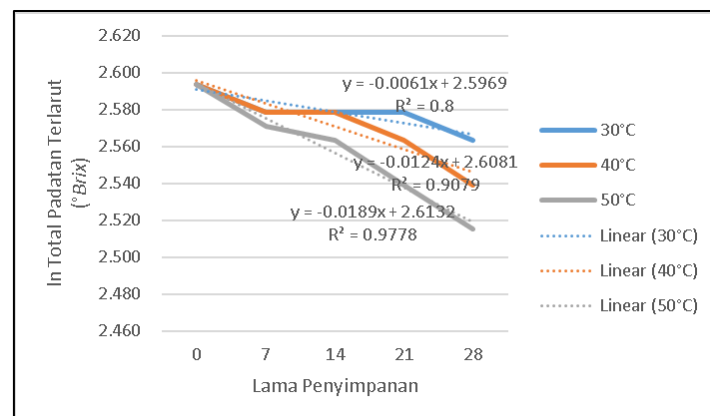
Nilai $^{\circ}\text{Brix}$ total padatan terlarut dari masing-masing suhu penyimpanan dimasukkan kedalam tabel kemudian dilakukan perhitungan umur simpan berdasarkan parameter total padatan terlarut.

Total Padatan Terlarut Sari Buah Pala Kaleng

Lama Penyimpanan (Hari)	Suhu Penyimpanan					
	30°C		40°C		50°C	
	°Brix	ln	°Brix	ln	°Brix	ln
0	13.38	2.594	13.38	2.594	13.38	2.594
7	13.18	2.579	13.18	2.579	13.08	2.571
14	13.18	2.579	13.18	2.579	12.98	2.563
21	13.18	2.579	12.98	2.563	12.67	2.539
28	12.98	2.563	12.67	2.539	12.37	2.515



Grafik perubahan total padatan terlarut pada sari buah pala kaleng untuk ordo 0



Grafik perubahan total padatan terlarut pada sari buah pala kaleng untuk ordo 1

Grafik ln total padatan terlarut sari buah pala kaleng selama penyimpanan (ordo 0)

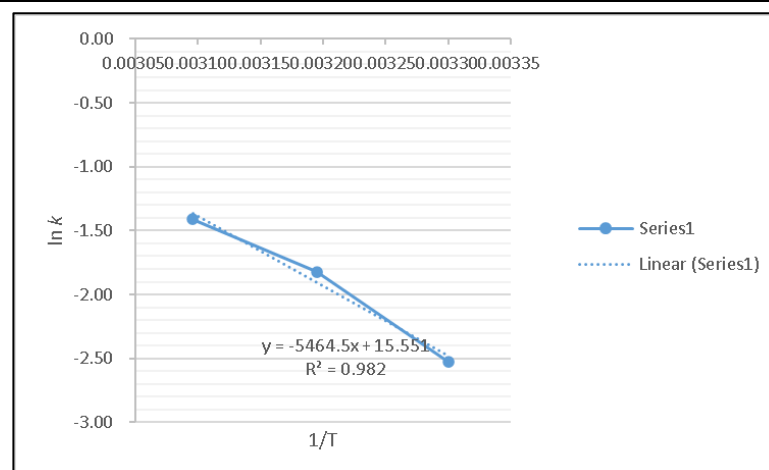
Dari kurva diatas didapatkan persamaan regresi linier ordo 0 sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 y \text{ } 30^{\circ}\text{C} &= 488,75 - 2,2321x & a &= 13,42 \\
 & & b &= -0,08x \\
 y \text{ } 40^{\circ}\text{C} &= 490 - 3,0357x & a &= 13,564 \\
 & & b &= -0,162x \\
 y \text{ } 50^{\circ}\text{C} &= 486,25 - 5,1786x & a &= 13,625 \\
 & & b &= -0,243x
 \end{aligned}$$

Dengan diketahui nilai $b = k$, maka selanjutnya nilai k dan $1/T$ di plot ke dalam grafik sehingga didapatkan laju penurunan mutu

Hasil Nilai $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total padatan terlarut pada Setiap Suhu Penyimpanan

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu (K)	$1/T$ (K)	k	$\ln k$
30	303	0.00330	0.08	-2.53
40	313	0.00319	0.162	-1.82
50	323	0.00310	0.2437	-1.41



Grafik Hubungan $1/T$ dan $\ln k$ berdasarkan nilai total padatan terlarut

- **Nilai Ea**

$$\begin{aligned}
 k &= k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)} \\
 \ln k &= \ln k_0 - E_a/R \times 1/T \\
 y &= a + bx \\
 y &= 15.551 - 5464.5x \\
 \ln k &= 15.551 - 5464.5x (1/T) \\
 -E_a/R &= -5465.5 \quad ; R = 1,986 \text{ kal/mol} \\
 E_a &= 10.852.50 \text{ kal/mol}
 \end{aligned}$$

- **Nilai k₀**

$$\begin{aligned}
 \ln k_0 &= a \\
 \ln k_0 &= 15.551 \\
 k_0 &= 5.6717 \times 10^6
 \end{aligned}$$

- **Penurunan Mutu**

$$\begin{aligned}
 k &= k_0 \cdot e^{(-E_a/RT)} \\
 k &= 1.46165 \times 10^{11} \cdot e^{-8765(1/T)} \\
 k_{30} &= 0.0834/\text{hari} \\
 k_{40} &= 0.1484/\text{hari} \\
 k_{50} &= 0.2548/\text{hari}
 \end{aligned}$$

- **Penentuan Umur Simpan**

$$\begin{aligned}
 t_s &= (A_0 - A_t)/k \\
 \text{Suhu } 30^\circ\text{C} \\
 t_{s30} &= (13.38 - 0.38)/0.0834 = 156 \text{ hari} \\
 \text{Suhu } 40^\circ\text{C} \\
 t_{s40} &= (13.38 - 0.38)/0.1484 = 88 \text{ hari} \\
 \text{Suhu } 50^\circ\text{C} \\
 t_{s50} &= (13.38 - 0.38)/0.2548 = 51 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Lampiran 10. Dokumentasi Penelitian



Preparasi analisis total fenolik



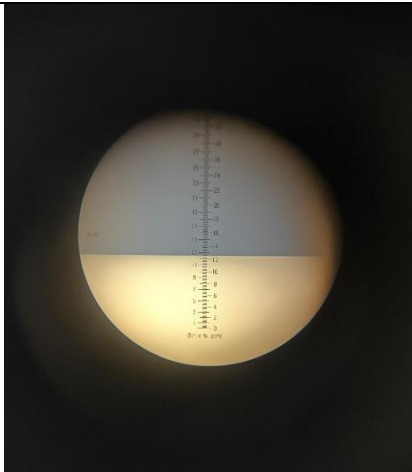
Inkubasi sampel total fenolik



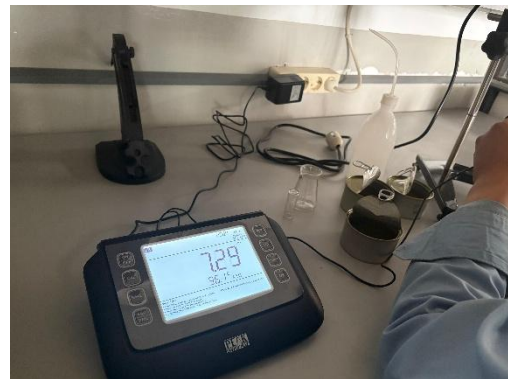
Penghomogenan sampel



Analisis total padatan terlarut



**Hasil pembacaan °Brix padatan
terlarut dari alat
handrefraktometer**



Kalibrasi alat pengukur pH



Pembacaan pH pada Sampel



**Analisis total fenolik menggunakan
spektrofotometri**



Preparasi alat spektrofotometri



Pembacaan absorbansi sampel