JIPFRI
https://journal.unuha.ac.id/index.php/JIPFRI

JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah)
Vol. 10 No. 2, November 2026, hlm. 285–295
p-ISSN 2549-905X | e-ISSN 2549-9076
https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5446

Rancang Bangun Aparatus Titik Didih Variabel Berbasis Syringe untuk Praktikum Persamaan Clausius-Clapeyron

Devi Silvya, Eka Wulandari dan Jeliana Veronika Sirait*

Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia
*Penulis korespondensi: jelianasirait@unja.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima: 23/06/2026
Direvisi: 14/11/2026
Disetujui: 22/11/2026
Terbit: 29/11/2026

Kata kunci:
Aparatus sederhana
Clausius-Clapeyron
Perubahan fasa
Termodinamika
Titik didih

Keywords:
Boiling point
Clausius-Clapeyron
Phase transition
Simple aparatus
Thermodynamics

ABSTRAK

Persamaan Clausius-Clapeyron merupakan relasi fundamental dalam termodinamika yang menggambarkan ketergantungan tekanan uap kesetimbangan terhadap temperatur pada proses transisi fasa. Penelitian ini bertujuan merancang bangun dan menguji kinerja aparatus titik didih variabel berbiaya rendah berbasis *syringe* 50 mL sebagai perangkat praktikum untuk mengamati penurunan titik didih air akibat penurunan tekanan. Pengujian dilakukan dengan memanaskan 100 mL air demineralisasi di dalam reaktor silinder aluminium tertutup hingga 65°C, kemudian membiarkannya mendingin secara alami sambil menarik piston *syringe* 50 mL pada kelompok interval $\Delta T = 5\,^{\circ}\mathrm{C}$ dan $\Delta T = 10\,^{\circ}\mathrm{C}$ dengan tiga kali pengulangan. Secara kualitatif, penurunan tekanan ruang uap secara konsisten menurunkan temperatur didih air. Analisis regresi linier ln P terhadap 1/T pada interval 5 °C menghasilkan kemiringan $m = -4085{,}3 \pm 144{,}2$ K ($r = -0{,}845$; $R^2 = 0{,}714$) dan entalpi penguapan $\Delta H_{\mathrm{uap}} = 33{,}97 \pm 1{,}20$ kJ/mol dengan deviasi relatif -16,4 % hingga -20,4 % terhadap literatur, sedangkan interval 10°C mengalami anomali ($m = +328{,}1$ K; $r = +0{,}112$) akibat kebocoran mikro dan ketidakpastian manometer langsung. Aparatus ini berpotensi digunakan sebagai media demonstrasi dan praktikum awal termodinamika di laboratorium.

ABSTRACT

The Clausius-Clapeyron equation is a fundamental thermodynamic relation describing the dependence of equilibrium vapor pressure on temperature during phase transitions. This study aims to design, construct, and evaluate a low-cost variable boiling-point apparatus utilizing a 50 mL syringe as an instructional tool to observe the boiling point depression of water under reduced pressure. Experiments were conducted by heating 100 mL of demineralized water inside a sealed aluminum cylindrical reactor up to 65°C, followed by natural cooling while inducing pressure drawdown via a 50 mL syringe pull at target intervals of $\Delta T = 5\,^{\circ}\mathrm{C}$ *and* $\Delta T = 10\,^{\circ}\mathrm{C}$ *in triplicate. Qualitatively, reducing vapor space pressure consistently lowers the boiling temperature of water. Linear regression of ln P versus 1/T for the 5°C interval yields a slope of* $m = -4085.3 \pm 144.2$ K ($r = -0.845$; $R^2 = 0.714$) *and an enthalpy of vaporization* $\Delta H_{\mathrm{uap}} = 33.97 \pm 1.20$ kJ/mol *with relative deviations of -16.4% to -20.4% against literature values, whereas the 10°C interval exhibits anomalies (*$m = +328.1$; $r = +0.112$*) due to micro-leakage and the absence of a direct pressure gauge. This apparatus holds pedagogical potential as an introductory thermodynamics demonstration kit.*

Cara mengutip: Silvya, D., Wulandari, E., & Sirait, J. V. (2026). Rancang bangun aparatus titik didih variabel berbasis syringe untuk praktikum persamaan Clausius-Clapeyron. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah), 10*(2), 285–295. https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5446
Copyright © 2026 Penulis. Artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

PENDAHULUAN

Perubahan fasa merupakan fenomena fundamental dalam kajian fisika termal yang melibatkan perpindahan energi kalor laten dan transisi keadaan materi akibat perubahan hingga optimalisasi proses distilasi desalinasi (Borgnakke & Sonntag, 2013; Çengel & Boles, 2015; Moran et al., 2014; Smith et al., 2005). Sebagai fluida kerja yang paling umum, air memperlihatkan perilaku kesetimbangan fasa cair-uap yang hubungan dinamis antara tekanan uap jenuh dan temperaturnya dirumuskan secara matematis melalui persamaan Clausius-Clapeyron (Koutsoyiannis, 2012; Thompson & Paluch, 2023; Wagner & Pruß, 2002).

Meskipun persamaan ini menjadi pilar utama dalam kurikulum termodinamika di tingkat perguruan

tinggi, visualisasi dan internalisasi konsepnya sering kali menjadi hambatan belajar bagi mahasiswa (Cloonan *et al*., 2011; Halpern & Marzzacco, 2018). Mahasiswa umumnya hanya berhadapan dengan penurunan matematis abstrak tanpa pengalaman empiris langsung dalam mengamati bagaimana penurunan tekanan lingkungan secara riil menurunkan titik didih zat cair. Di sisi lain, verifikasi eksperimental persamaan Clausius-Clapeyron di laboratorium standar umumnya bergantung pada perangkat pompa vakum mekanis, manometer presisi, atau bejana bertekanan yang berbiaya tinggi (Cloonan et al., 2011; Tellinghuisen, 2010). Ketergantungan pada instrumen berspesifikasi tinggi tersebut menjadi kendala bagi institusi pendidikan dengan keterbatasan anggaran laboratorium, sehingga praktikum kesetimbangan fasa sering kali ditiadakan.

Upaya menghadirkan praktikum Clausius-Clapeyron berbiaya rendah telah dirintis oleh sejumlah peneliti, mulai dari penggunaan labu Erlenmeyer dengan sensor tekanan elektronik (Cloonan et al., 2011; Levinson, 1982; Peterson, 1999) hingga kit sederhana untuk mengamati variasi titik didih minyak goreng (Aryati et al., 2022). Namun, perangkat berbasis sensor tekanan elektronik tetap memerlukan antarmuka akuisisi data yang belum tentu tersedia di semua laboratorium dasar, sedangkan kit manual terdahulu umumnya masih menggunakan pemanas api terbuka yang rentan fluktuasi termal dan belum mengisolasi volume ekspansi secara terukur. Pengembangan aparatus ekonomis ini menjadi krusial dalam konteks pembelajaran fisika eksperimental di Indonesia, di mana banyak sekolah menengah maupun perguruan tinggi daerah masih menghadapi keterbatasan ketersediaan instrumen termodinamika standar (Fatu, 1999). Sebagai kontribusi kebaruan dalam penelitian ini, penulis merancang bangun aparatus titik didih variabel berbiaya rendah yang memanfaatkan kaleng reaktor aluminium terisolasi dengan sumber kalor hot plate digital serta piston vakum berbasis syringe medis 50 mL terkalibrasi sebagai pengatur ekspansi volume ruang uap tanpa memerlukan pompa vakum listrik. Penelitian ini bertujuan merancang bangun aparatus tersebut serta mengevaluasi kinerja kualitatif dan batasan kuantitatifnya dalam mengamati penurunan titik didih air sesuai persamaan Clausius-Clapeyron.

Secara teoritis, persamaan Clausius-Clapeyron pertama kali dikembangkan dari kontribusi Emile Clapeyron pada tahun 1834 dan disempurnakan oleh Rudolf Clausius pada pertengahan abad ke-19 berdasarkan hukum kedua termodinamika dan syarat kesetimbangan energi bebas Gibbs antar-fasa (Atkins & de Paula, 2014; Callen, 1985; Zemansky & Dittman, 1997). Ketika fasa cair (c) dan fasa uap (u) berada dalam kesetimbangan pada tekanan P dan temperatur absolut T, potensial kimia atau energi bebas Gibbs molar kedua fasa bernilai sama (Gc = Gu). Untuk perubahan infinitesimal sepanjang garis koeksistensi fasa (dGc = dGu), dengan memanfaatkan hubungan fundamental dG = V dp – S dT serta perubahan entropi transisi pada temperatur konstan $\Delta S = \Delta H_{\text{uap}} / T$ diperoleh persamaan Clapeyron (Zemansky & Dittman, 1997)

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{uap}}}{T\left(V_u - V_c\right)} \tag{1}$$

Integrasi persamaan tersebut menghasilkan bentuk linear standar:

$$V_c\ dP - S_c\ dT = V_u\ dP - S_u\ dT \tag{2}$$

$$\ln P = -\frac{\Delta H_{\text{uap}}}{R}\left(\frac{1}{T}\right) + C \tag{3}$$

di mana $R = 8{,}314\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$adalah konstanta gas universal dan C adalah konstanta integrasi (Atkins & de Paula, 2014).

Karena perubahan entropi transisi fasa pada temperatur konstan setara dengan perubahan entalpi kesetimbangan (kalor laten penguapan, ΔH_{uap}) dibagi temperatur absolut ($\Delta S = \frac{\Delta H_{\text{uap}}}{T}$), maka diperoleh persamaan Clapeyron:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{uap}}}{T\left(V_u - V_c\right)} \tag{4}$$

Untuk menyederhanakan persamaan Clapeyron menjadi persamaan Clausius-Clapeyron yang dapat diuji pada alat praktikum sederhana ini, diterapkan tiga asumsi pembatas utama:

Asumsi Volume Molar: Volume molar fasa cair jauh lebih kecil dibandingkan fasa uap $\left(V_u \gg V_c\right)$, sehingga volume fasa cair dapat diabaikan $\left(\Delta V = V_u - V_c \approx V_u\right)$. (Rogers & Mayhew, 1995

Asumsi Gas Ideal: Fasa uap air diperlakukan seperti gas ideal, sehingga volume molarnya memenuhi hubungan $V_u = \frac{RT}{P}$.

Asumsi Entalpi Konstan: Nilai entalpi penguapan (ΔH_{uap}, dalam satuan J/mol) dianggap konstan dan tidak bergantung pada perubahan temperatur di sepanjang rentang suhu percobaan.

Dengan mensubstitusikan asumsi gas ideal ke dalam persamaan (4), diperoleh bentuk diferensial Clausius-Clapeyron:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{uap}}}{T\frac{RT}{P}} = \frac{P.\Delta H_{\text{uap}}}{RT^2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{P}\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{uap}}}{RT^2} \quad (6)$$

Guna keperluan analisis linear, integrasi dari persamaan di atas menghasilkan bentuk standar:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_{\text{uap}}}{R}\left(\frac{1}{T}\right) + C \quad (7)$$

Di mana $R = 8{,}314\ \text{J/mol}.K$ adalah konstanta gas universal dan C adalah konstanta integrasi. Melalui aparatus variabel tekanan berbasis syringe ini, penelitian bertujuan memverifikasi nilai kalor laten penguapan molar (ΔH_{uap}) dari kemiringan grafik linear $\ln P$ terhadap 1/T serta menganalisis sejauh mana deviasi riil yang muncul ketika asumsi ideal dihadapkan pada keterbatasan sistem laboratorium sederhana.

Dari sisi analisis, data, persamaan Clausius-Clapeyron terintegrasi dengan asumsi gas ideal menunjukkan bahwa hubungan antara logaritma natural tekanan uap jenuh dan kebalikan temperatur absolut memiliki pola linear, dengan kemiringan garis yang berkaitan dengan kalor laten penguapan air dibagi konstanta gas universal (Atkins & de Paula, 2014; Koutsoyiannis, 2012). Selain itu, percobaan ini juga memungkinkan kajian terhadap keterbatasan asumsi dalam persamaan Clausius-Clapeyron sederhana, seperti anggapan bahwa uap air bersifat gas ideal, volume cairan dapat diabaikan dibandingkan volume uap, serta kalor laten penguapan dianggap konstanta terhadap temperatur. Dengan demikian, pengujian persamaan Clausius-Clapeyron pada perubahan fasa air menggunakan variasi tekanan sederhana memiliki urgensi dari aspek metodologi dan praktis karena melatih keterampilan eksperimen dan analisis ketidakpastian dengan perangkat yang ekonomis.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menguji persamaan Clausius-Clapeyron pada proses transisi fasa cair-uap-air melalui manipulasi tekanan dinamis (Koutsoyiannis, 2012). Pendekatan eksperimen dipilih agar hubungan kausalitas antara penurunan tekanan sistem tertutup terhadap temperatur didih air dapat diamati, diukur, dan dievaluasi secara kuantitatif serta dibandingkan langsung dengan nilai referensi termodinamika air (International Association for the Properties of Water and Steam [IAPWS], 2007; National Institute of Standards and Technology [NIST], 2025).

Aparatus titik didih variabel dinamis dalam penelitian ini dirancang menggunakan komponen-komponen mikro-laboratorium yang ekonomis namun terkalibrasi. Sistem ini mengisolasi sampel air di dalam ruang penguapan kedap udara untuk meminimalkan interaksi tekanan dengan atmosfer luar (Koutsoyiannis, 2012). Detail arsitektur alat beserta spesifikasi teknis setiap komponen yang digunakan disajikan secara rinci pada Gambar 1. Spesifikasi teknis komponen aparatus titik didih variabel meliputi beberapa komponen utama yang dirancang untuk mendukung pengamatan hubungan tekanan dan temperatur pada proses perubahan fasa air. Ruang penguapan (kaleng reaktor) berfungsi sebagai wadah sampel air dan ruang akumulasi uap jenuh, dengan spesifikasi berupa bahan aluminium berbentuk silinder berkapasitas 300 mL serta telah dimodifikasi menggunakan tutup kedap udara. Piston vakum (*syringe*) digunakan sebagai generator penurunan tekanan (*pressure drawdown*) melalui mekanisme vakum, berbahan polipropilena medis, kapasitas 50 mL, tipe sambungan *Luer Lock,* serta memiliki ketidakpastian mutlak volume $\Delta V_{\text{syr}} = \pm 0{,}5\ \text{mL}$. Termometer digital berfungsi untuk mengukur temperatur awal dan temperatur kesetimbangan fasa menggunakan sensor termokopel tipe *probe stainless steel* dengan rentang pengukuran $-10\,^{\circ}\text{C}$ hingga $110\,^{\circ}\text{C}$ serta memiliki ketidakpastian temperatur standar termokopel tipe K sebesar $\Delta T = \pm 1{,}0\,^{\circ}\text{C}$ (atau $\pm 1{,}0\ \text{K}$). Selang penghubung digunakan sebagai jalur transmisi tekanan antara reaktor dan *Syringe,* dengan spesifikasi bahan silikon fleksibel transparan, diameter dalam 5 mm, dan panjang 25 cm. *Hot plate* digital berperan sebagai sumber kalor

homogen untuk memanaskan air sampel di dalam reaktor serta memiliki *ketidakpastian* temperatur sebesar $\Delta T_{\text{hot}} = \pm 1{,}0\,^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, gelas ukur digunakan untuk mengukur volume fluida kerja berupa air sampel, dengan spesifikasi bahan borosilikat berkapasitas 100 mL dan memiliki ketidakpastian pengukuran volume sebesar $\Delta V_{\text{fluid}} = \pm 1{,}0\ \text{mL}$. Secara keseluruhan, setiap komponen memiliki fungsi spesifik dengan karakteristik teknis dan nilai ketidakpastian pengukuran yang diperhitungkan untuk memastikan kinerja aparatus titik didih variabel dalam memperoleh data eksperimen yang akurat dan mendukung analisis hubungan tekanan terhadap temperatur.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium melalui tahapan rancang bangun instrumen dan pengujian karakterisasi transisi fasa cair-uap air (Koutsoyiannis, 2012). Sebelum pengambilan data, seluruh sambungan reaktor, segel termometer, dan selang silikon diuji kerapatannya melalui uji tarikan vakum awal untuk meminimalkan kebocoran udara luar ke dalam sistem (Atkins & de Paula, 2014). Sekaligus mengoreksi kapasitas wadah reaktor menjadi $\pm 300\ \text{mL}$ agar konsisten dengan volume fluida kerja 100 mL.

Karena aparatus sederhana ini tidak dilengkapi sensor tekanan digital (manometer) langsung pada ruang reaktor, nilai tekanan total di dalam sistem (P_{total}) yang digunakan ditentukan secara analisis tidak diukur secara langsung, melainkan dihitung secara analitis melalui pendekatan ekspansi isothermal (Hukum Boyle) dan penjumlahan tekanan parsial (Hukum Dalton). Sebelum penarikan piston, ruang kosong di atas permukaan air (*headspace,* $V_h = V_{\text{kaleng}} - V_{\text{air}} = 300\ \text{mL} - 100\ \text{mL} = 200\ \text{mL}$) berada pada tekanan atmosfer awal ($P_0 \approx 101.325\ \text{Pa}$) yang merupakan jumlah dari tekanan parsial udara kering (P_{udara}) dan tekanan uap air (P_{uap}). Ketika tuas *syringe* ditarik sebesar $\Delta V_{\text{syr}} = 50\ \text{mL}$, volume ruang gas meningkat menjadi $V_{\text{akhir}} = V_h + \Delta V_{\text{syr}} = 250\ \text{mL}$, sehingga tekanan parsial udara mengalami penurunan secara proporsional ($P_{\text{udara, akhir}} = P_{\text{udara, awal}} \cdot \frac{V_h}{V_{\text{akhir}}}$) dengan asumsi proses berlangsung kuasi-isotermal sesaat setelah tarikan, yang kemudian dijumlahkan dengan kontribusi tekanan uap jenuh pada suhu kesetimbangan teramati sebagai estimasi tekanan total ruang uap. Karena tekanan tidak diukur secara independen menggunakan manometer, analisis regresi dalam penelitian ini diposisikan sebagai evaluasi konsistensi model dan estimasi kuantitatif aparatus, bukan sebagai verifikasi eksperimental independen terhadap hukum Clausius-Clapeyron.

Untuk menjamin validitas internal dan keterulangan data, ditentukan matriks variabel eksperimen yang ketat sebagai berikut: Temperatur awal penarikan tuas syringe (T_{awal}), yang divariasikan pada dua kelompok interval selisih termal, yaitu interval 5°C(65°C,60°C,55°C, dan 50 $^{\circ}\text{C}$) dan interval 10°C(65°C,55°C,dan 45°C). Temperatur kesetimbangan fasa saat air kembali bergejolak mendidih (T_{didih}), laju perubahan tekanan eksperimen (dP/dT_{eksp}), serta volume ekspansi udara pada syringe ($\Delta V = 50\,\text{mL}$). Parameter lingkungan dan operasional yang dijaga konstan selama seluruh seri pengukuran untuk mencegah bias energi bebas Gibbs sistem.

Matriks pengendalian variabel kontrol eksperimen dilakukan untuk memastikan kondisi sistem termodinamika tetap stabil dan hasil pengukuran yang diperoleh memiliki tingkat keakuratan yang baik. Volume air sampel (V_0) dikontrol sebesar 100 mL dengan metode pengukuran menggunakan gelas ukur borosilikat berkapasitas 100 mL secara presisi sebelum sampel dimasukkan ke dalam reaktor. Pengendalian volume ini bertujuan untuk menjaga rasio ruang kosong (*headspace*) uap jenuh tetap konstan sehingga tekanan parsial uap ideal tidak mengalami perubahan yang dapat memengaruhi hasil eksperimen. Jenis fluida kerja yang digunakan adalah air murni (*distilled water*), dengan metode pengendalian menggunakan air demineralisasi dari satu sumber tunggal untuk seluruh proses pengulangan eksperimen. Penggunaan fluida kerja yang seragam bertujuan untuk mencegah peningkatan titik didih akibat efek ebulioskopik dari kontaminan terlarut yang dapat mengganggu perubahan energi gibbs cairan. Skala tarikan piston dikontrol pada kondisi 50 mL secara konstan, dengan metode pengendalian berupa tuas syringe ditarik penuh hingga batas skala 50 mL secara cepat dan konstan. Pengendalian ini dilakukan untuk menjamin volume ekspansi gas (V_u) tetap sama pada setiap percobaan sehingga perubahan tekanan (dP) yang terjadi tetap sesuai dengan

prinsip hukum gas dan dapat dibandingkan secara teoritis. Selanjutnya, laju pendinginan alami dikendalikan pada kondisi ruang standar dengan temperatur lingkungan ($T_{amb} \approx 26\,°C$). Metode pengendalian dilakukan dengan meletakkan reaktor di atas landasan isolator termal setelah proses pemanasan serta menjauhkannya dari hembusan angin langsung. Pengendalian laju pendinginan ini bertujuan untuk memastikan kehilangan kalor ke lingkungan berlangsung secara tunak (*steady*) pada setiap siklus transisi fase sehingga perubahan temperatur yang diamati lebih merepresentasikan karakteristik sistem termodinamika yang diuji.



Gambar 1. Diagram Alat dan Bahan

Langkah kerja eksperimen dirancang melalui protokol berulang yang terstruktur untuk mereduksi kesalahan acak (random error). Tahap sistematis:

Tahap Kalibrasi dan Preparasi: Air sampel sebanyak 100 mL dimasukkan ke dalam kaleng reaktor. Sistem reaktor ditutup rapat dan dipastikan kedap udara. Sensor termometer digital diaktifkan untuk membaca temperatur dasar cairan.

Tahap Termalisasi: Reaktor dipanaskan di atas hot plate digital hingga temperatur air melewati batas target awal, yaitu mencapai kisaran 65°C. Setelah stabil, hot plate dimatikan dan reaktor dipindahkan ke meja isolator menggunakan sarung tangan tahan panas.

Tahap Modifikasi Tekanan Dinamis dan Pencatatan Data: Air sampel dibiarkan mendingin secara alami. Tepat ketika temperatur menyentuh titik-titik suhu awal penarikan (T_{awal}) yang ditetapkan yakni pada kelompok interval $5\,°C$ (65°C,60°C,55°C,50°C) dan kelompok interval $10\,°C$ (65°C, 55°C, 45°C) tuas syringe ditarik secara cepat dan konstan sejauh 50 mL. Nilai suhu yang diperoleh (T_{didih}) yang dicatat pada tabel pengamatan merupakan temperatur kesetimbangan sesaat ketika air sampel mulai bergejolak mendidih kembali akibat penurunan tekanan ruang vakum (bukan suhu akhir interval pendinginan). Penurunan titik didih yang teramati berkisar antara 0,2°C hingga 4,1°C di bawah T_{awal}, bergantung pada besarnya tekanan vakum yang berhasil dipertahankan oleh sistem.

Skema Pengulangan Pengukuran: Untuk setiap satu titik temperatur awal target (misalnya pada titik 65°C), dilakukan tiga kali penarikan tekanan berturut-turut (n=3) dalam rentang waktu singkat pada siklus pendinginan tersebut. Tarikan pertama menghasilkan data pengulangan 1 (T_1), tuas dikembalikan perlahan untuk menstabilkan tekanan, lalu ditarik kembali untuk pengulangan 2 (T_2), dan diulang sekali lagi untuk pengulangan 3 (T_3). Karena ketiga tarikan dilakukan pada satu siklus pendinginan alami yang sedang berlangsung, penurunan nilai $T_1 > T_2 > T_3$ tidak sepenuhnya mencerminkan variasi acak independen melainkan turut membawa tren pendinginan alami sistem; hal ini diperhitungkan sebagai komponen ketidakpastian sistematis dalam analisis data.

Data mentah temperatur hasil pengulangan (T_1 , T_2 , T_3), dikonversi ke satuan kelvin (K) dan dihitung nilai rata-ratanya (T_{rata}) menggunakan persamaan (1). Karena instrumen ukur memiliki keterbatasan pembacaan, maka analisis data harus disertai perhitungan perambatan ketidakpastian (propagation of error).

Ketidakpastian Pengukuran Temperatur (ΔT_{rata})

Ketidakpastian dari temperatur rata-rata dihitung menggunakan gabungan ketidakpastian alat (Tipe B) dan ketidakpastian acak dari fluktuasi pengulangan (Tipe A)

Ketidakpastian acak (Tipe A) untuk temperatur rerata didefinisikan melalui galat baku sampel (*standard error of the mean)*:

$$S_T = \frac{s}{\sqrt{n}}, \text{ dengan } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (T_i - \acute{T})^2}{n-1}} \qquad (8)$$

Di mana n=3 adalah jumlah pengulangan. Sebagai contoh pada kelompok pertama interval 5 °C (65,2°C; 64,6°C; 64,1°C), diperoleh simpangan baku sampel $s = 0{,}55\,°C$ dan galat baku rerata $S_T = 0{,}32\,°C$.

Ketidakpastian gabungan untuk temperatur rata-rata adalah:

$$\Delta T_{rata} = \sqrt{(S_T)^2 + (\Delta T_{alat})^2} \qquad (9)$$

Perambatan Ketidakpastian Selisih Temperatur (Δ (dT))

Nilai selisih temperatur antara dua titik pengukuran didefinisikan sebagai $dT = \Delta T_{\text{rata},1} - \Delta T_{\text{rata},2}$. Berdasarkan teorema perambatan ketidakpastian untuk operasi pengukuran dua variabel bebas, ketidakpastian mutlak dari selisih temperatur (dT) dihitung dengan menjumlahkan kuadrat ketidakpastian masing-masing variabel:

$$\Delta\,(dT) = \sqrt{(\Delta T_{\text{rata},1})^2 + (\Delta T_{\text{rata},2})^2} \qquad (10)$$

Kuantifikasi Ketidakpastian Tekanan (ΔP) dan Kemiringan Regresi:

Nilai laju perubahan tekanan eksperimen diperoleh dari $\frac{dP}{dT}_{\text{eksp}} = \frac{dP}{dT}$. Diasumsikan bahwa variasi tekanan sistem ΔP diperoleh secara sistematis melalui relasi volume syringe konstan, maka ketidakpastian terhadap fluktuasi pembacaan suhu pembagi (dT).Persamaan perambatan ketidakpastian relatifnya ditentukan oleh:

$$\left| \frac{\Delta\,(\frac{dP}{dT}_{\text{eksp}})}{\frac{dP}{dT}_{\text{eksp}}} \right| = \sqrt{(\frac{\Delta(dP)}{dP})^2 + (\frac{\Delta(dT)}{dT})^2}$$

Ketidakpastian tekanan sistem (ΔP) diturunkan dari perambatan ketidakpastian volume *headspace* ($\Delta V_h = \Delta V_{\text{fluida}} = \pm 1{,}0$ mL) dan volume *syringe* ($\Delta V_{\text{syr}} = \pm 0{,}5$ mL) melalui relasi $\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_h}{V_h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{\text{syr}}}{V_{\text{syr}}}\right)^2} \approx 0{,}54\,\%$, sehingga diperoleh ketidakpastian tekanan berkisar $\Delta P \approx \pm 45$ Pa hingga ± 130 Pa pada rentang pengukuran. Seluruh hasil perhitungan temperatur rerata, tekanan, kemiringan regresi ($m \pm \Delta m$), serta kalor laten penguapan ($\Delta H_{\text{uap}} \pm \Delta(\Delta H_{\text{uap}})$) dilaporkan dalam format $x \pm \Delta x$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Ringkasan data pengamatan temperatur titik didih, konversi suhu mutlak, serta nilai tekanan terhitung untuk kelompok interval suhu 5°C dan 10 °C disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Ringkasan Data Eksperimen Kelompok Interval Suhu 5°C

Titik Awal (T_{awal})	$T_1,\ T_2,\ T_3\,(°\text{C})$	$\overline{T} \pm \Delta T\,(°\text{C})$	$\overline{T} \pm \Delta T\,(\text{K})$	$1/\overline{T}\,(\times 10^{-3} K^{-1})$	$P \pm \Delta P$ (Pa)	ln P
65°C	65,2; 64,6; 64,1	64,6 ± 1,1	337,8 ± 1,1	2,960	24.380 ± 132	10,102
60°C	60,5; 59,8; 58,8	59,7 ± 1,1	332,9 ± 1,1	3,004	19.480 ± 105	9,877
55°C	54,8; 53,8; 52,8	53,8 ± 1,2	327,0 ± 1,2	3,058	14.720 ± 80	9,597
50°C	49,8; 48,8;47,8	48,8 ± 1,2	322,0 ± 1,2	3,106	11.550 ± 62	9,354

Pada titik awal 55°C dan 50°C (Tabel 1), data suhu terukur menunjukkan penurunan konstan sebesar 1,0°C di setiap pengulangan (berturut-turut 54,8; 53,8; 52,8°C dan 49,8; 48,8; 47,8°C). Keteraturan selisih ini terjadi karena pada rentang temperatur 48°C - 55°C selisih suhu sistem terhadap lingkungan ($\Delta T_{\text{ling}} \approx 22°\text{C} - 29°\text{C}$) berada pada rezim pendinginan alami yang mendekati linier dengan selang waktu antar-tarikan syringe yang seragam (~ 15 detik), serta dipengaruhi oleh resolusi tampilan layar digital satu desimal (0,1°C). Log catatan waktu-suhu dan dokumentasi pembacaan pada repositori penelitian.

Tabel 2. Ringkasan Data Eksperimen Kelompok Interval Suhu 10°C

Titik Awal (T_{awal})	$T_1,\ T_2,\ T_3\,(°\text{C})$	$\overline{T} \pm \Delta T\,(°\text{C})$	$\overline{T} \pm \Delta T\,(\text{K})$	$1/\overline{T}\,(\times 10^{-3} K^{-1})$	$P \pm \Delta P$ (Pa)	ln P
65°C	64,8; 62,5; 60,8	62,7 ± 1,5	335,9 ± 1,5	2,977	22.340 ± 121	10,014
55°C	53,7; 51,6; 49,8	51,7 ± 1,5	324,9 ± 1,5	3,078	13.350 ± 72	9,499
45°C	44,7; 42,9; 40,9	42,8 ± 1,5	316,0 ± 1,5	3,165	8.480 ± 46	9,045

Pada kelompok interval 10°C (Tabel 2), sebaran data antar-pengulangan meningkat tajam dengan simpangan baku sampel mencapai s = 1,90°C hingga 2,01°C (jauh lebih besar dibandingkan kelompok 5°C yang hanya berkisar 0,55°C - 1,00°C), sehingga ruang vakum reaktor mengalami akumulasi rembesan udara luar yang lebih besar serta penurunan tekanan uap air jenuh yang

semakin kecil pada suhu rendah, yang membuat pengamatan visual maupun termal saat titik didih tercapai menjadi jauh lebih sulit dideteksi secara presisi.

Nilai P pada Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan hasil perhitungan analitis berbasis ekspansi volume headspace, bukan pembacaan manometer langsung. Pada persamaan Clausius-Clapeyron dilakukan pengukuran transisi fasa menggunakan aparatus variabel tekanan dinamis berbasis syringe 50 mL yang memungkinkan variasi tekanan secara manual pada sistem air tertutup pada kelompok interval suhu $\Delta T = 5\,^{\circ}\mathrm{C}$ dan $\Delta T = 10\,^{\circ}\mathrm{C}$. Nilai laju perubahan tekanan terhadap suhu eksperimen $\left(\frac{dP}{dT}_{\text{eksp}}\right)$ ditentukan melalui rasio diferensial parameter terukur $\left(\frac{dP}{dT}\right)$ pada setiap titik transisi. Untuk mengevaluasi akurasi verifikasi persamaan Clausius-Clapeyron secara kuantitatif, dihitung persentase deviasi penguapan hasil eksperimen ($\Delta H_{\text{uap, eksp}}$) terhadap nilai referensi literatur standar air ($\Delta H_{\text{uap, lit}} = 40{,}65\ \text{kJ/mol}$): (IAPWS, 2007; NIST, 2025).

$$\text{Deviasi}\ (\%) = \left(\frac{\Delta H_{\text{uap, eksp}} - \Delta H_{\text{uap, lit}}}{\Delta H_{\text{uap, lit}}}\right) \times 100\,\% \quad (11)$$

Berdasarkan Tabel 3, pada kelompok interval $5\,^{\circ}\mathrm{C}$, diperoleh nilai $\Delta H_{\text{uap, eksp}} = 33{,}97\ \text{kJ/mol}$, sehingga persentase deviasinya adalah:

$$\text{Deviasi}\ (\%) = \left(\frac{33{,}97 - 40{,}65}{40{,}65}\right) \times 100\,\%$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa nilai kalor laten penguapan yang terukur secara eksperimen lebih rendah sekitar 16,4% dibandingkan nilai teoritis ideal akibat keberadaan non-kondensabel (udara sisa) yang membantu menekan titik didih lebih awal.

Nilai deviasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa aparatus mampu memberikan perubahan tekanan yang cukup untuk mengamati penurunan titik didih air. Namun, pada selisih $10\,^{\circ}\mathrm{C}$, penyimpangan lebih besar ditemukan. Contohnya pada transisi 45-35$\,^{\circ}\mathrm{C}$ diperoleh suhu 44,7$\,^{\circ}\mathrm{C}$, 42,9 $\,^{\circ}\mathrm{C}$, 40,9$\,^{\circ}\mathrm{C}$ dengan variasi antar pengulangan yang cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar perubahan tekanan yang diberikan,semakin besar pula pengaruh faktor eksternal terhadap kestabilan sistem.

Secara kuantitatif, berdasarkan kemiringan garis linier pada kelompok interval suhu $5\,^{\circ}\mathrm{C}$ ($m = -4085{,}3 \pm 144{,}2\ \mathrm{K}$), diperoleh nilai kalor laten penguapan molar air eksperimen sebesar:

$$\Delta H_{\text{uap, eksp}} = -m \cdot R$$

$$= -(-4085{,}3\ \mathrm{K}) \times 8{,}314\ \mathrm{J/mol \cdot K}$$

$$= 33{,}97 \pm 1{,}2\ \mathrm{kJ/mol}$$

Apabila dibandingkan dengan nilai referensi literatur kalor laten penguapan air standar (40,65 kJ/mol pada $100\,^{\circ}\mathrm{C}$, atau sekitar 42,70 kJ/mol pada kisaran suhu rata-rata percobaan $55\,^{\circ}\mathrm{C}$) (IAPWS, 2007; NIST, 2025), nilai eksperimen ini memiliki deviasi relatif sebesar -16,4% hingga -20,4%. Tingkat kesesuaian berkisar antara 79,6% hingga 83,6% ini menunjukkan bahwa aparatus titik didih variabel berbasis *syringe* 50 mL mampu merepresentasikan hubungan termodinamika Clausius-Clapeyron dengan cukup akurat untuk ukuran perangkat praktikum berbiaya rendah. Sebaliknya, pada interval suhu $10\,^{\circ}\mathrm{C}$, kemiringan positif menghasilkan nilai ΔH_{uap} negatif (-2,73 kJ/mol) yang tidak bermakna secara fisis akibat kegagalan mempertahankan kesetimbangan tekanan pada rentang pendinginan yang terlalu panjang.

Ada pula penyebab yang memungkinkan nilai tersebut menjadi negatif dengan ketidakstabilan tekanan dalam sistem tertutup menggunakan tarikan syringe secara manual dapat menyebabkan perubahan tekanan yang tidak seragam. Tekanan mungkin belum mencapai keadaan setimbang ketika suhu pendidihan dicatat. Keterlambatan respons pada termometer yang membutuhkan waktu untuk mencapai suhu aktual air, sehingga nilai yang terbaca dapat lebih rendah atau lebih tinggi dari kondisi sebenarnya. Terjadinya kehilangan kalor ke lingkungan memungkinkan adanya perpindahan panas dari sistem (aparatus sederhana) menuju lingkungan sehingga suhu air turun sebelum mencapai kondisi kesetimbangan. Kesalahan pembacaan skala syringe yang divariasikan tarikan syringe sebesar 50 mL yang dilakukan secara manual dapat menghasilkan perubahan volume dan tekanan yang berbeda antarpercobaan. Dengan demikian, nilai dP/dT negatif tidak menunjukkan fenomena fisika sebenarnya, melainkan merupakan indikasi adanya ketidakpastian pengukuran dan keterbatasan aparatus.

Tabel 3. Hasil Analisis Regresi Linear $\ln P = m(1/T) + C$ pada Kedua Kelompok Interval

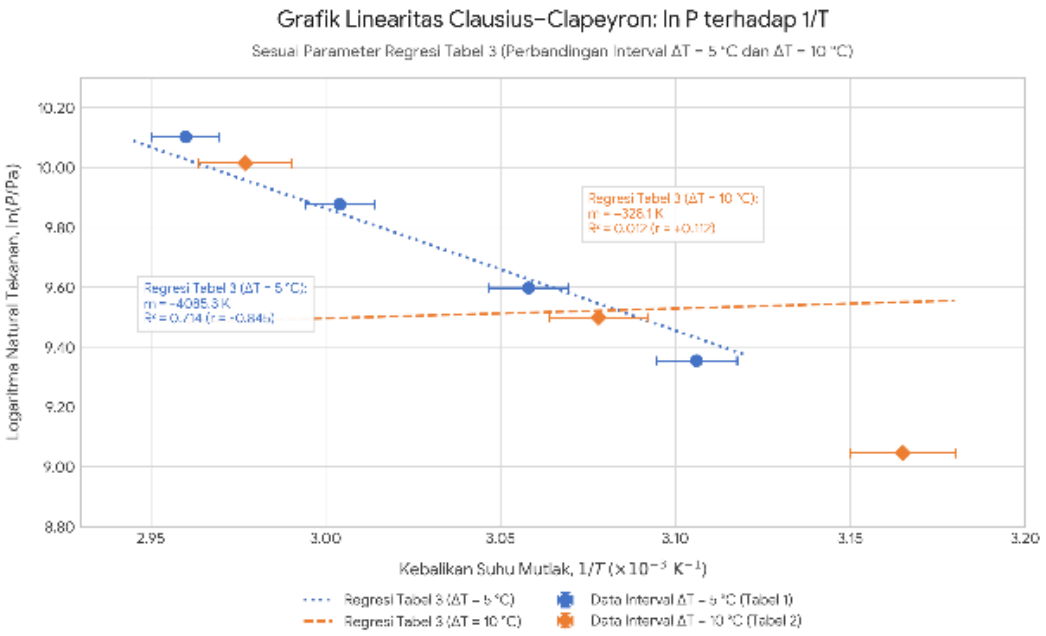
Kelompok Data Eksperimen	Jumlah Titik (n)	Persamaan Garis Regresi ($y = mx + c$)	Kemiringan $m \pm \Delta m$ (K)	Koefisien Korelasi (r)	Koefisien Determinasi (R^2)
Interval $\Delta T = 5\,^\circ\mathrm{C}$	12	$y = -4085{,}3\,x + 22{,}19$	$-4085{,}3 \pm 144{,}2$	$-0{,}845$	0,714
Interval $\Delta T = 10\,^\circ\mathrm{C}$	9	$y = 328{,}1\,x + 8{,}45$	$+328{,}1 \pm 285{,}4$	$+0{,}112$	0,012

Berdasarkan Tabel 3, pada kelompok interval 5 $^\circ$ ($n = 12$ titik pengulangan), diperoleh kemiringan negatif $m = -4085{,}3 \pm 144{,}2$ K dengan koefisien korelasi negatif yang kuat sebesar $r = -0{,}845$ dan $R^2 = 0{,}714$. Tanda negatif pada m dan r konsisten secara matematis maupun fisis: semakin besar nilai 1/T (temperatur semakin rendah), semakin kecil nilai ln P (tekanan uap menurun). Sebaliknya, pada kelompok interval $10\,^\circ\mathrm{C}$ (n=9), garis regresi berbalik memiliki kemiringan positif lemah ($m = +328{,}1$ K; $r = +0{,}112$; $R^2 = 0{,}012$), yang membuktikan rusaknya linieritas hubungan tekanan-temperatur akibat gangguan kebocoran vakum pada interval yang lebar.

Persamaan regresi ($y = -4085{,}3\,x + 22{,}19$) memiliki gradien negatif (m = -4085,3 K), yang secara fisis bermakna bahwa ketika nilai 1/T membesar (suhu semakin rendah), nilai ln P akan semakin mengecil (tekanan semakin turun). Kemiringan negatif ini secara kualitatif selaras dengan model teoritis Clausius-Clapeyron, di mana gradien fungsi mewakili nilai konstanta energi penguapan ($\frac{-\Delta H_{Vap}}{R}$). Sebaliknya, pada kelompok interval $10\,^\circ\mathrm{C}$, model regresi linear tidak mampu memetakan trajektori data dengan baik. Nilai koefisien korelasi yang mendekati nol (r = +0,112) dan koefisien determinasi yang sangat rendah ($R^2 = 0{,}012$) menunjukkan bahwa hanya 1,2% variasi data yang terjelaskan oleh model linear.

Persamaan regresi berbalik arah menjadi positif ($y = 328{,}1\,x + 8{,}45$). Secara statistik, ketiadaan korelasi linear ini menjadi bukti kuat adanya interferensi dari luar sistem eksperimen yaitu kebocoran mikro atmosfer (micro-leaking) akibat kuatnya tarikan vakum manual pada rentang termal yang lebar. Penyusupan udara luar mendistorsi nilai tekanan total internal secara acak, sehingga merusak linearitas dan konsistensi aparatus syringe sederhana ini pada skala interval suhu yang besar.

Hubungan linearitas antara logaritma natural tekanan (ln P, dengan P dalam Pa) terhadap kebalikan temperatur absolut (1/T dalam K^{-1}) beserta garis regresi dan error bar ketidakpastian pengukuran pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik linier ln P terhadap 1/T pada variasi interval suhu 5° C dan 10° C (nilai P diperoleh dari kalibrasi ekspansi gas isothermal pada headspace).

Pembahasan

Hasil percobaan menggunakan aparatus titik didih variabel menunjukkan bahwa perubahan tekanan yang diinduksi melalui tarikan syringe sebesar 50 mL secara konsisten menyebabkan penurunan suhu kesetimbangan fasa air, yang secara kualitatif sesuai dengan prediksi persamaan Clausius-Clapeyron. Pola penurunan suhu yang konsisten dari pengulangan pertama hingga ketiga pada setiap titik pengukuran-misalnya dari 65,2°C → 64,6°C → 64,1°C pada titik awal 65°C mengkonfirmasi bahwa penurunan tekanan mendorong penurunan titik kesetimbangan fasa. Hal ini selaras dengan prinsip dasar persamaan Clausius-Clapeyron yang menyatakan bahwa dP/dT = $\Delta H_{\text{uap}}/(T\,\Delta V)$, dimana penurunan tekanan sistem akan menurunkan suhu transisi fasa (Koutsoyiannis, 2012; Thompson & Paluch, 2023). Besarnya selisih kuantitatif yang muncul dapat dikaitkan dengan keterbatasan sistem eksperimen sederhana dalam mempertahankan kondisi kesetimbangan termal dan mekanis yang stabil terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Pada kelompok interval $\Delta T = 5\ ^{\circ}\text{C}$, analisis regresi linear $\ln P$ terhadap $1/T$ menghasilkan kemiringan negatif $m = -4085{,}3\ \text{K}$ dengan koefisien korelasi $r = -0{,}845$ $(R^2 = 0{,}714)$. Berdasarkan hubungan $m = -\Delta H_{\text{uap}}/R$, kemiringan tersebut bersesuaian dengan nilai entalpi penguapan eksperimental sebesar $\Delta H_{\text{uap,eksp}} = 33{,}97 \pm 1{,}20\ \text{kJ/mol}$. Jika dibandingkan dengan nilai referensi kalor laten penguapan air pada kisaran suhu $55\ ^{\circ}\text{C}$ yaitu $\Delta H_{\text{uap,ref}} \approx 42{,}7\ \text{kJ/mol}$ (Zemansky & Dittman, 1997; Halpern & Marzzacco, 2018; IAPWS, 2007; NIST, 2025), diperoleh deviasi relatif sekitar -16,4% hingga -20,4%. Deviasi ini sejalan dengan temuan Aryati et al. (2022) dan Levinson (1982) pada pengembangan kit praktikum Clausius-Clapeyron sederhana, di mana pengaturan tekanan secara manual menghasilkan kecenderungan kurva yang sesuai dengan teori meskipun masih menyisakan galat kuantitatif akibat keterbatasan kontrol kesetimbangan mekanis dan termal. Sebaliknya, pada kelompok interval $\Delta T = 10\ ^{\circ}\text{C}$, hasil regresi mengalami anomali dengan gradien berbalik menjadi positif $(m = +328{,}1 \pm 285{,}4\ \text{K};\ r = +0{,}112$ dan koefisien determinasi yang sangat rendah $(R^2 = 0{,}012)$, yang menghasilkan nilai ΔH_{uap} negatif $(-2{,}73\ \text{kJ/mol})$ dan tidak bermakna secara fisis akibat kegagalan mempertahankan kestabilan vakum pada rentang pendinginan yang lebar. Penyimpangan signifikan pada interval lebar maupun deviasi kuantitatif sebesar 20,4% pada interval $5\ ^{\circ}\text{C}$ disebabkan oleh empat keterbatasan teknis utama pada desain aparatus saat ini: 1. Ketiadaan pengukuran tekanan langsung, 2. Kebocoran mikro (micro-leaking), 3. Kontrol mekanis manual, 4. Keterbatasan isolasi termal dan jeda respons sensor.

Penyimpangan nilai ΔH_{uap} sebesar $-16{,}4\%$ hingga $-20{,}4\%$ pada kelompok interval $5\,^{\circ}\text{C}$ mencerminkan keterbatasan teknis yang wajar pada skala eksperimen sederhana, bukan kegagalan hukum fisika maupun kesalahan sistematik fatal. Kontribusi sumber galat tersebut dapat diestimasi secara kuantitatif sebagai berikut:

Tekanan parsial udara non-kondensabel di headspace:

Pada suhu 50°C-60°C, tekanan uap air hanya menyumbang sekitar 12%-25% dari tekanan atmosfer awal, sedangkan 75%-88% sisa ruang headspace (200 mL) masih ditempati oleh udara kering yang ikut memuai saat syringe ditarik, sehingga menurunkan ambang energi penguapan efektif. (Peterson, 1999).

Jeda waktu respons termometer (time-lag):

Sensor termokopel probe stainless steel memiliki konstanta waktu respons termal sekitar 2-3 detik. Dengan laju pendinginan alami sistem sekitar 0,06°C/detik, keterlambatan pembacaan ini menyumbang selisih pembacaan suhu sebesar $\pm 0{,}15\,^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 0{,}20\,^{\circ}\text{C}$ pada setiap titik pencatatan.

Kebocoran mikro (micro-leaking) dan kontrol manual:

Celah pada sambungan selang silikon dan karet piston polipropilena saat ditahan pada tekanan vakum menyebabkan kenaikan tekanan balik perlahan ($\sim 50 - 100\ \text{Pa}$ per siklus), yang baru berdampak merusak linearitas secara signifikan ketika interval pengukuran diperlebar menjadi $10\,^{\circ}\text{C}$.

Grafik menunjukkan bahwa tekanan uap jenuh meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Pada rentang suhu sekitar 316–337 K, tekanan meningkat dari ±8.000 Pa menjadi ±24.000 Pa. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur menyebabkan energi kinetik molekul air bertambah sehingga jumlah molekul yang berubah menjadi uap semakin banyak dan tekanan meningkat (Cloonan et

al., 2011). Tren positif pada grafik sesuai dengan prinsip Clausius–Clapeyron, yaitu tekanan uap akan meningkat ketika suhu meningkat. Meskipun terdapat sedikit penyimpangan dari garis tren, hal tersebut dapat disebabkan oleh keterbatasan alat ukur, ketidaksempurnaan kesetimbangan termal, serta kehilangan panas selama proses eksperimen. Secara umum, hasil percobaan telah menunjukkan hubungan tekanan–suhu yang sesuai dengan teori perubahan fasa air.

Meskipun masih menyisakan deviasi kuantitatif, percobaan ini memiliki potensi pedagogis sebagai inovasi media demonstrasi termodinamika di laboratorium fisika dasar. Aparatus titik didih variabel berbasis syringe yang dikembangkan dalam penelitian ini menawarkan keunggulan berupa kemudahan perakitan, biaya rendah, serta kemampuan memvariasikan tekanan secara langsung tanpa memerlukan pompa vakum mekanis. Halpern dan Marzzacco (2018) menegaskan bahwa kajian eksperimental persamaan Clausius-Clapeyron memberikan pengalaman belajar yang melengkapi penurunan matematis semata, karena mahasiswa dapat mengamati fenomena perubahan fasa secara langsung dan berlatih melakukan analisis ketidakpastian data termodinamika. Dengan demikian, aparatus yang dikembangkan ini berpotensi dimanfaatkan sebagai perangkat praktikum awal di institusi pendidikan dengan keterbatasan fasilitas, asalkan disertai panduan analisis galat yang sistematis.

Dari perspektif pendidikan fisika, meskipun validasi presisi tinggi memerlukan integrasi sensor tekanan digital seperti yang dikembangkan Cloonan et al. (2011) dan Tellinghuisen (2010), aparatus berbasis syringe ini memiliki potensi pedagogis yang kuat sebagai media pembelajaran awal atau demonstrasi kelas. Perangkat ini berbiaya rendah, mudah dirakit, dan memungkinkan mahasiswa mengamati secara langsung fenomena fisik bahwa air dapat mendidih pada suhu hangat ($50-65\ ^{\circ}\mathrm{C}$) ketika tekanannya diturunkan suatu pengalaman empiris yang krusial untuk menjembatani pemahaman matematis persamaan Clausius-Clapeyron (Halpern & Marzzacco, 2018; Thompson & Paluch, 2023).

SIMPULAN

Aparatus titik didih variabel berbiaya rendah berbasis syringe 50 mL dan reaktor aluminium tertutup telah berhasil dirancang bangun dan diuji untuk mengamati fenomena penurunan titik didih air. Secara kualitatif, pengujian menunjukkan bahwa penurunan tekanan ruang uap secara konsisten menurunkan temperatur kesetimbangan pendidihan air pada rentang $42{,}8^{\circ}\mathrm{C}$ hingga $64{,}6^{\circ}\mathrm{C}$. Pada kelompok interval $\Delta T = 5\,^{\circ}\mathrm{C}$, analisis regresi linear ln P (berdasarkan tekanan terhitung) terhadap 1/T untuk seluruh titik data (n = 12) menunjukkan kesesuaian tren dengan model Clausius-Clapeyron ($m = -4085{,}3 \pm 144{,}2\ \mathrm{K};\ r = -0{,}845;\ R^2 = 0{,}714$) dan menghasilkan estimasi entalpi penguapan $\Delta H_{\mathrm{uap}} = 33{,}97 \pm 1{,}20\ \mathrm{kJ/mol}$ dengan deviasi relatif sebesar $-16{,}4\%$ hingga $-20{,}4\%$ terhadap nilai referensi literatur. Sementara itu, pada kelompok interval suhu $10^{\circ}\mathrm{C}$, hasil regresi menyimpang dari tren linear ($m = +328{,}1\ \mathrm{K};\ r = +0{,}112$) akibat akumulasi kebocoran mikro pada sambungan syringe, pengaruh tekanan parsial udara sisa di headspace, serta jeda waktu respons (time-lag) termometer pada rentang pendinginan yang lebar. Dengan mempertimbangkan batasan teknis tersebut, aparatus ini berpotensi digunakan sebagai media demonstrasi dan praktikum awal termodinamika di laboratorium fisika dasar, serta disarankan untuk dilengkapi sensor tekanan digital terkalibrasi dan selubung isolator termal pada pengembangan selanjutnya.

PERNYATAAN

Kontribusi Penulis: Devi Silvya berkontribusi dalam konsepsi ide penelitian, perancangan aparatus eksperimen, dan pengambilan data laboratorium; Eka Wulandari berkontribusi dalam kurasi data, perhitungan ketidakpastian statistik, dan analisis regresi; Jeliana Veronika Sirait berkontribusi dalam penelaahan teoritis, penyusunan draf naskah, serta supervisi keseluruhan penelitian. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir naskah.

Pendanaan: Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri tanpa dukungan hibah eksternal, menggunakan fasilitas pendukung di Laboratorium Pendidikan Fisika, Universitas Jambi.

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial

maupun non-finansial yang dapat memengaruhi hasil dan interpretasi dalam artikel ini.

Penggunaan AI: Penulis memanfaatkan perangkat kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) secara terbatas untuk membantu penyuntingan tata bahasa akademik dan format penulisan; seluruh pengambilan data, analisis fisika, dan verifikasi ilmiah dilakukan sepenuhnya oleh penulis.

Persetujuan Etik: Tidak relevan, karena penelitian ini merupakan eksperimen fisika murni yang tidak melibatkan subjek manusia maupun hewan uji.

Ketersediaan Data: Data mentah pengamatan (log waktu-temperatur dan dokumentasi pembacaan instrumen) tersedia pada penulis korespondensi (jelianasirait@unja.ac.id) dan dapat diakses berdasarkan permintaan yang wajar.

REFERENSI

Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Atkins' physical chemistry* (10th ed.). Oxford University Press.

Aryati, D., Jumini, S., & Guntara, Y. (2022). Inovasi KIT percobaan Clausius–Clapeyron dalam pembelajaran fisika untuk penentuan titik didih minyak goreng pada berbagai tekanan. *SPEKTRA: Jurnal Kajian Pendidikan Sains, 8*(1), 81–86. https://doi.org/10.32699/spektra.v8i1.238

Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2013). *Fundamentals of thermodynamics* (8th ed.). Wiley.

Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics* (2nd ed.). Wiley.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Cloonan, C. A., Andrew, J. A., Nichol, C. A., & Hutchinson, J. S. (2011). A simple system for observing dynamic phase equilibrium via an inquiry-based laboratory or demonstration. *Journal of Chemical Education, 88*(7), 975–978. https://doi.org/10.1021/ed100846k

Fatu, D. (1999). The determination of latent heats of vaporization under quasi-isothermal conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 56*(2), 739–747. https://doi.org/10.1023/A:1010150021530

Halpern, A. M., & Marzzacco, C. J. (2018). Using the principles of classical and statistical thermodynamics to calculate the melting and boiling points, enthalpies and entropies of fusion and vaporization of water, and the freezing point depression and boiling point elevation of ideal and nonideal solutions. *Journal of Chemical Education, 95*(12), 2205–2211. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00561

International Association for the Properties of Water and Steam. (2007). *Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam* (IAPWS R7-97(2012)). https://iapws.org/relguide/IF97-Rev.html

Koutsoyiannis, D. (2012). Clausius–Clapeyron equation and saturation vapour pressure: Simple theory reconciled with practice. *European Journal of Physics, 33*(2), 295–305. https://doi.org/10.1088/0143-0807/33/2/295

Levinson, G. S. (1982). A simple experiment for determining vapor pressure and enthalpy of vaporization of water. *Journal of Chemical Education, 59*(4), 337–338. https://doi.org/10.1021/ed059p337

Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2014). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (8th ed.). Wiley.

National Institute of Standards and Technology. (2025). *NIST Chemistry WebBook (NIST Standard Reference Database 69): Water*. https://doi.org/10.18434/T4D303

Peterson, A. R. (1999). An inexpensive microscale method for measuring vapor pressure, associated thermodynamic variables, and molecular weight. *Journal of Chemical Education, 76*(8), 1113. https://doi.org/10.1021/ed076p1113

Rogers, G. F. C., & Mayhew, Y. R. (1995). *Thermodynamic and transport properties of fluids* (5th ed.). John Wiley & Sons.

Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (7th ed.). McGraw-Hill.

Tellinghuisen, J. (2010). Vapor pressure plus: An experiment for studying phase equilibria in water, with observation of supercooling, spontaneous freezing, and the triple point. *Journal of Chemical Education, 87*(6), 619–622. https://doi.org/10.1021/ed100138j

Thompson, J. E., & Paluch, A. S. (2023). Revisiting the Clausius/Clapeyron equation and the cause of linearity. *Thermo, 3*(3), 412–423. https://doi.org/10.3390/thermo3030025

Wagner, W., & Pruß, A. (2002). The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use. *Journal of Physical and Chemical Reference Data, 31*(2), 387–535. https://doi.org/10.1063/1.1461829

Zemansky, M. W., & Dittman, R. H. (1997). *Heat and thermodynamics: An intermediate textbook* (7th ed.). McGraw-Hill.