

PENENTUAN NILAI TEKANAN UDARA LUAR MENGGUNAKAN PENDEKATAN GAS VAN DER WAALS PADA PERCOBAAN HUKUM BOYLE

Defrianto Pratama^{1*}, Ratu Fenny Muldiani², Kunlestiowati Hadiningrum³,
Yunita Citra Dewi⁴
Politeknik Negeri Bandung^{1,2,3,4}
defrianto.pratama@polban.ac.id¹

Abstract: This study aims to obtain more accurate external air pressure values by applying the Van der Waals equation of state for a Boyle's Law experiment. Pressure data taken from a column of air trapped in a U-tube were analyzed using the ideal gas model and the Van der Waals model. The research findings indicate that the Van der Waals model provides external air pressure values closer to the actual value with a relative error of 0.40%, compared to the ideal gas model, which has a relative error of 10.19%. Therefore, the use of the Van der Waals equation is recommended to improve the accuracy of the Boyle's Law experiment. Based on the research results, it can be concluded that the Van der Waals equation provides a higher level of accuracy than the ideal gas model in determining external air pressure in the Boyle's Law experiment.

Keywords: Boyle's Law, Ideal Gas, Van der Waals Equation, Atmospheric Pressure, Laboratory Experiment.

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tekanan udara luar yang lebih akurat dengan menerapkan persamaan keadaan gas *Van der Waals* dalam percobaan Hukum Boyle. Data tekanan yang diambil dari kolom udara terperangkap dalam pipa U dianalisis menggunakan model gas ideal dan model *Van der Waals*. Temuan penelitian menunjukkan bahwa model *Van der Waals* memberikan nilai tekanan udara luar yang lebih mendekati nilai sebenarnya dengan kesalahan relatif sebesar 0,40%, dibandingkan dengan model gas ideal yang memiliki kesalahan relatif sebesar 10,19%. Oleh karena itu, penggunaan persamaan *Van der Waals* disarankan untuk meningkatkan akurasi hasil percobaan Hukum Boyle. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa persamaan *Van der Waals* memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan model gas ideal dalam menentukan tekanan udara luar pada percobaan Hukum Boyle.

Kata Kunci: Hukum Boyle, Gas Ideal, Persamaan *Van der Waals*, Tekanan Atmosfer, Percobaan Laboratorium.

PENDAHULUAN

Hukum Boyle menyatakan bahwa pada suhu yang tetap, tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya dan telah lama digunakan sebagai landasan dalam studi gas ideal. Meskipun hukum ini memberikan gambaran yang cukup baik tentang bagaimana gas berperilaku dalam kondisi tertentu, kenyataannya gas-gas alami tidak sepenuhnya mengikuti asumsi gas ideal. Hal ini disebabkan oleh adanya interaksi antar molekul dan volume partikel gas yang tidak bisa diabaikan, terutama pada

tekanan tinggi dan suhu rendah (Zhang et al., 2020).

Di laboratorium, udara, yang merupakan campuran gas seperti nitrogen, oksigen, argon, dan karbon dioksida, sering dianggap sebagai gas ideal untuk mempermudah perhitungan. Namun, anggapan ini sering menghasilkan hasil yang tidak realistis dan kurang akurat. Untuk mendapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi nyata, pendekatan yang lebih mendalam diperlukan dalam menggambarkan perilaku gas.

Salah satu pendekatan yang lebih akurat untuk menggambarkan perilaku gas adalah dengan menggunakan persamaan keadaan *Van der Waals*. Persamaan ini melakukan koreksi pada tekanan dan volume dengan memperhitungkan interaksi antar molekul serta volume yang ditempati oleh molekul gas (Somuncu et al., 2023). Dengan menggunakan pendekatan ini, diharapkan nilai tekanan udara dalam percobaan hukum Boyle dapat menjadi lebih tepat.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai tekanan udara luar yang lebih realistis dengan menggunakan pendekatan gas *Van der Waals* pada percobaan hukum Boyle yang telah dilakukan di laboratorium. Dengan menganggap gas udara sebagai gas *Van der Waals*, diharapkan hasil perhitungan tekanan udara akan lebih akurat dibandingkan dengan asumsi gas ideal yang selama ini digunakan.

Ketidakakuratan asumsi gas ideal dan mengusulkan penggunaan model yang lebih kompleks untuk menggambarkan perilaku gas telah dilakukan di beberapa penelitian. Zhang et al. (2020) mengkaji perilaku gas nitrogen pada tekanan tinggi menggunakan persamaan *Van der Waals* dan menemukan bahwa pendekatan *Van der Waals* memberikan hasil yang lebih sesuai dengan data percobaan dibandingkan dengan asumsi gas ideal. Somuncu et al. (2023) mengevaluasi validitas hukum Boyle pada gas campuran di berbagai kondisi suhu dan tekanan, dan menunjukkan bahwa deviasi dari perilaku gas ideal meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan, dan persamaan *Van der Waals* dapat mengurangi deviasi ini secara signifikan. Liu et al. (2020) memfokuskan penelitian mereka pada gas argon dan menemukan bahwa pada suhu rendah, asumsi gas ideal gagal total dalam memprediksi tekanan gas yang terukur, sedangkan

model *Van der Waals* mampu mengakomodasi anomali yang diamati dalam data percobaan mereka. Brown et al. (2021) melakukan analisis komparatif antara berbagai model gas nyata dan menunjukkan bahwa meskipun semua model memberikan perbaikan dibandingkan dengan model gas ideal, persamaan *Van der Waals* sering kali memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi dan kesederhanaan perhitungan. Hernández dan García (2022) menyoroti aplikasi persamaan *Van der Waals* dalam pengajaran termodinamika di laboratorium pendidikan tinggi dan mengemukakan bahwa penggunaan persamaan *Van der Waals* tidak hanya meningkatkan akurasi hasil percobaan, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih baik kepada mahasiswa mengenai sifat-sifat gas nyata.

Pada saat ini telah tersedia alat percobaan termodinamika Hukum Boyle dengan variasi variabel pengamatan yang lengkap meliputi tekanan, suhu, dan volume, untuk memenuhi kebutuhan kajian konsep ilmu prodi yang selama ini dilaksanakan melalui percobaan termodinamika, seperti diperlihatkan pada gambar 1. Dengan variasi variabel terikat pada percobaan Hukum Boyle, mahasiswa dapat mengamati semua kondisi makroskopik gas sehingga dapat menarik kesimpulan (Wamepa et al., 2022).



Gambar 1.
Alat percobaan hukum Boyle di laboratorium fisika terapan

Tingginya kebutuhan terhadap percobaan Hukum Boyle di Laboratorium Fisika Terapan menuntut performa alat percobaan Hukum Boyle yang baik dan hasil percobaan yang akurat. Gambar 1 merupakan Alat Percobaan Hukum Boyle yang telah tersedia di Laboratorium Fisika Terapan Jurusan Teknik Energi Politeknik Negeri Bandung.

Walaupun percobaan berdasarkan Hukum Boyle memberikan wawasan yang berguna mengenai hubungan antara tekanan, suhu, dan volume gas dalam kondisi umum (Smith et al., 2018), model gas ideal yang digunakan dalam percobaan ini memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan perilaku gas sebenarnya. Model ini berasumsi bahwa partikel gas adalah titik massa tanpa volume dan mengabaikan gaya tarik antar partikel. Untuk mengatasi kekurangan ini, Johannes Diderik Van der Waals mengembangkan Model Gas Van der Waals, sebuah model matematis yang lebih kompleks yang mempertimbangkan volume partikel gas dan gaya tarik antar partikel (Nuriyah, 2021).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa model Van der Waals memiliki nilai R square sebesar 0,999 untuk kurva antara volume dan tekanan pada suhu tetap, sedangkan model gas ideal hanya memiliki nilai R square sebesar 0,912. Nilai R square yang lebih tinggi pada model Van der Waals menunjukkan bahwa model ini lebih akurat dalam menggambarkan data percobaan (Kunlestiowati et al., 2023). Selain itu, nilai tekanan udara teoritis adalah 1 atm atau sekitar $1,013 \times 10^5$ Pa. Namun, pengukuran tekanan udara menggunakan instrumen DT-Sense Barometric Pressure berbasis sensor HP03 menunjukkan nilai $1,010 \times 10^5$ Pa. Tekanan udara juga dipengaruhi oleh ketinggian, dengan tekanan berkurang seiring dengan bertambahnya ketinggian dari permukaan laut, mengikuti

persamaan: $P = P_0 - 0,116 P_0 h$ (Handini et al., 2020). Oleh karena itu, tekanan udara yang lebih besar dari 1 atm tidak mungkin terjadi di Laboratorium Fisika Terapan Politeknik Negeri Bandung yang berada di dataran tinggi; seharusnya, tekanan udara yang terukur akan lebih rendah dari 1 atm.

Data percobaan Hukum Boyle memiliki nilai presisi yang baik namun memerlukan koreksi untuk nilai akurasi. Sedangkan penelitian ilmiah juga berarti penyelidikan yang sistematis, terkontrol, empiris, dan kritis tentang fenomena-fenomena alami, dengan dipandu oleh teori-teori dan hipotesis-hipotesis tentang hubungan yang dikira terdapat diantara fenomena-fenomena itu (Azhari et al., 2023). Teruji secara rasional dan empiris berarti data hasil percobaan harus dapat diterima secara logis oleh nalar yang bersandar pada pengamatan realitas dari kondisi yang dapat diamati secara langsung maupun berdasarkan rujukan teori.

Berdasarkan kondisi tersebut, sangat diperlukan penelitian lebih lanjut sebagai koreksi dan penyempurnaan dalam pengembangan modul percobaan Hukum Boyle sehingga diperoleh data hasil percobaan yang lebih akurat. Disamping itu, mahasiswa dapat menganalisis data hasil percobaan yang diperolehnya berdasarkan acuan dan referensi yang teruji kebenarannya.

LANDASAN TEORI

Hukum Boyle, yang dinyatakan pada awal abad ke-17 oleh Robert Boyle, menjelaskan hubungan antara tekanan dan volume gas pada suhu konstan. Menurut hukum ini, tekanan suatu gas berbanding terbalik dengan volumenya ketika suhu tetap konstan. Hukum ini merupakan salah satu pilar dalam studi gas ideal, di mana gas dianggap sebagai partikel yang tidak saling berinteraksi dan volume partikel gas dianggap sangat kecil dibandingkan dengan volume total gas.

Dengan asumsi ini, hukum Boyle dapat dinyatakan secara matematis sebagai:

$$PV = C \quad (1)$$

di mana P adalah tekanan, V adalah volume, dan C adalah konstanta. Dalam praktik laboratorium, udara sering kali diperlakukan sebagai gas ideal untuk menyederhanakan perhitungan dan memudahkan analisis, tetapi sering kali menghasilkan hasil yang kurang akurat (Vestfálová & Šafařík, 2018). Ini karena asumsi gas ideal tidak sepenuhnya mencerminkan perilaku gas nyata, yang dipengaruhi oleh interaksi antar molekul dan volume yang ditempati oleh molekul gas itu sendiri. Hal ini terutama terjadi pada kondisi tekanan tinggi dan suhu rendah.

Model gas ideal mengabaikan interaksi antar molekul gas dan menganggap bahwa molekul gas tidak memiliki volume. Pada kenyataannya, gas-gas di alam memiliki volume dan saling berinteraksi (Lu & Chen 2020). Pada tekanan tinggi dan suhu rendah, efek-efek ini menjadi signifikan dan menyebabkan deviasi dari perilaku yang diprediksi oleh hukum Boyle. Dalam kondisi seperti itu, model gas ideal sering kali tidak mampu memberikan hasil yang akurat.

Untuk memperbaiki keterbatasan model gas ideal, diperkenalkan persamaan keadaan gas *Van der Waals*. Persamaan ini mengoreksi model gas ideal dengan mempertimbangkan dua faktor utama: interaksi antar molekul gas dan volume yang ditempati oleh molekul gas. Persamaan *Van der Waals* dinyatakan sebagai:

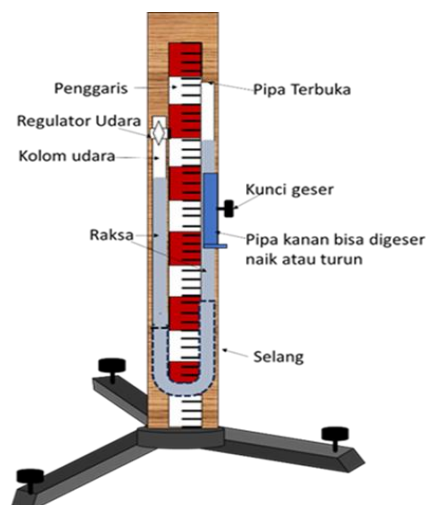
$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2)$$

a dan b adalah konstanta empiris yang berbeda untuk setiap gas

Konstanta a mengoreksi tekanan untuk mempertimbangkan gaya tarik menarik antar molekul, sedangkan konstanta b mengoreksi volume untuk mempertimbangkan volume partikel gas (Kontogeorgis et al., 2019). Dengan mempertimbangkan faktor-faktor ini, persamaan *Van der Waals* memberikan prediksi yang lebih akurat mengenai perilaku gas, terutama pada kondisi di mana model gas ideal gagal.

METODE PENELITIAN

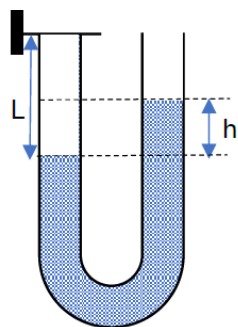
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, dengan sketsa alat percobaan yang ditunjukkan pada gambar 2. Pada pipa di sebelah kiri terdapat kolom udara yang berisi udara terperangkap, sementara pipa di sebelah kanan adalah pipa terbuka yang dapat digerakkan ke atas atau ke bawah, memungkinkan air raksa untuk naik atau turun. Saat pipa sebelah kanan digerakkan ke atas, air raksa akan naik dan volume kolom udara akan menyusut; sebaliknya, jika pipa digerakkan ke bawah, volume kolom udara akan meningkat. Perubahan dalam volume kolom udara ini mengakibatkan perubahan tekanan, yang dapat dilihat dari perbedaan ketinggian air raksa antara pipa sebelah kiri dan pipa sebelah kanan.



Gambar 2.

Sketsa alat percobaan hukum Boyle

Pengambilan data dilakukan dengan cara memberikan variasi volume kolom udara pada pipa sebelah kiri sehingga mendapatkan data tekanan dari perbedaan tinggi raksa pipa kiri dan pipa kanan. Data yang didapatkan kemudian dianalisis untuk mencari nilai tekanan udara luar dengan menggunakan dua pendekatan, yaitu menggunakan model persamaan gas ideal dan persamaan gas *Van der Waals*. Nilai tekanan udara luar dari dua pendekatan yang berbeda kemudian dibandingkan dengan nilai tekanan udara luar sebenarnya yang diukur oleh barometer. Pengambilan data dilakukan pengulangan dengan mengubah rentang pemberian variasi volume kolom udara untuk mendapatkan nilai tekanan udara luar yang paling mendekati nilai tekanan udara luar sebenarnya.



Gambar 3.

Kolom udara L dan perbedaan tinggi raksa h pada alat percobaan.

Tekanan udara luar berdasarkan data hasil percobaan untuk pendekatan gas ideal didapat menggunakan metode regresi linier. Pada percobaan ini persamaan gas ideal pada proses isothermal dapat diubah menjadi variabel panjang kolom udara L dan perbedaan tinggi raksa h (persamaan 5) seperti berikut

Gambar 6. Kolom udara L dan perbedaan tinggi raksa h pada alat percobaan

$$PV = nRT = C_0 \quad (3)$$

$$(P_0 + \rho gh)A'L = C_0 \quad (4)$$

$$h = M \left(\frac{1}{L} \right) - N \quad (5)$$

$$\text{dengan } M = \frac{C_0}{\rho g A'}, \quad N = \frac{P_0}{\rho g}.$$

Dimana P adalah tekanan pada kolom udara, P_0 adalah tekanan udara luar, V adalah volume kolom udara, n adalah jumlah mol, R adalah tetapan gas (8,314 J/mol K), T adalah suhu pada kolom udara dalam Kelvin, ρ adalah massa jenis raksa, dan A' adalah luas penampang pipa.

Persamaan 5 kemudian dibandingkan dengan persamaan garis lurus dari hasil interpolasi data menggunakan regresi linier (Cervantes et al., 2020) dengan $x = \frac{1}{L}$, dan $y = h$.

$$y = Bx + A \quad (6)$$

dimana,

$$B = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (7)$$

$$A = \frac{(\sum y_i)(\sum x_i^2) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (8)$$

dengan B adalah kemiringan (gradien), A adalah titik potong di sumbu y dan n jumlah data. Nilai gradien B menyatakan nilai M dan A menyatakan nilai -N. Sehingga untuk mencari nilai tekanan udara luar P_0 menggunakan persamaan :

$$P_0 = \rho g N \quad (9)$$

Sedangkan, nilai tekanan udara luar P_0 dengan pendekatan gas *Van der Waals* dapat dicari dengan menggunakan regresi nonlinier (polinomial orde 2). Persamaan gas *Van der Waals* dapat dilihat pada persamaan 10.

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad (10)$$

a dan b konstanta empiris yang berbeda untuk setiap gas. Suku tekanan

$(P + \frac{an^2}{V^2})$ mengoreksi gaya tarik antar molekul yang cenderung mengurangi tekanan dari yang diprediksi oleh hukum gas ideal. $(\frac{n^2}{V^2})$ menyatakan konsentrasi gas (n/V) , dikuadratkan karena mengambil dua partikel terlibat dalam interaksi antar molekul berpasangan. Suku volume $(V - nb)$ mengoreksi volume yang ditempati molekul gas.

Persamaan gas Van der Waals pada proses isothermal dapat diubah menjadi variabel panjang kolom udara L dan perbedaan tinggi raksa h (persamaan 11) seperti berikut

$$h = \frac{C_0}{\rho g(A'L - nb)} - \frac{an^2}{\rho gA'^2L^2} - \frac{P_0}{\rho g} \quad (11)$$

karena jumlah mol udara yang pada kolom udara sangat kecil ($\sim 10^{-4}$ mol) dan nilai konstanta b juga sangat kecil ($\sim 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$), untuk mempermudah perhitungan maka dilakukan pendekatan $A'L - nb \approx A'L$, maka persamaan 11 menjadi :

$$h = \frac{C_0}{\rho gA'L} - \frac{an^2}{\rho gA'^2L^2} - \frac{P_0}{\rho g} \quad (12)$$

atau dapat ditulis menjadi persamaan 13.

$$h = M\left(\frac{1}{L}\right) - N\left(\frac{1}{L}\right)^2 \quad (13)$$

dengan $M = \frac{C_0}{\rho gA'}$, $N = \frac{P_0}{\rho g}$ dan $Q = \frac{an^2}{\rho gA'^2}$

Persamaan 13 merupakan persamaan polinomial orde 2, persamaan 12 kemudian dibandingkan dengan persamaan polinomial orde 2 dari hasil interpolasi data menggunakan regresi polinomial orde 2 (Serbouti et al., 2021), dengan $x = \frac{1}{L}$, dan $y = h$.

$$y = A + Bx + Cx^2 \quad (14)$$

Untuk mencari nilai regresi A , B dan C menggunakan persamaan-persamaan berikut :

$$\sum y_i = n \cdot A + B \sum x_i + C \sum x_i^2 \quad (15)$$

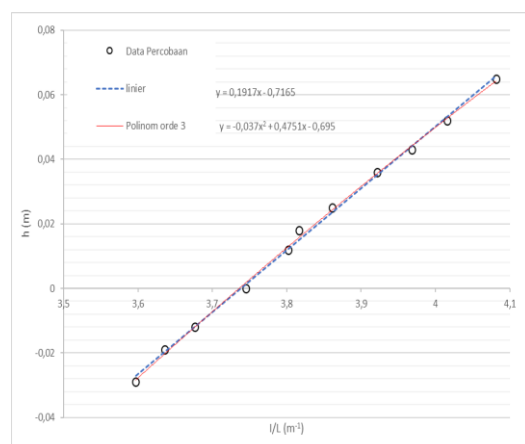
$$\sum x_i y_i = A \sum x_i + B \sum x_i^2 + C \sum x_i^3 \quad (16)$$

$$\sum x_i^2 y_i = A \sum x_i^2 + B \sum x_i^3 + C \sum x_i^4 \quad (17)$$

Nilai A menyatakan nilai $-N$, nilai B menyatakan nilai M dan nilai C menyatakan nilai $-Q$, untuk mencari nilai tekanan udara luar P_0 menggunakan persamaan 9.

HASIL PENELITIAN

Pada penelitian ini, kami mempelajari hubungan antara panjang kolom udara (L) yang terjebak dalam pipa U dan perbedaan tinggi raksa (h). Percobaan dilakukan pada tekanan udara luar 92400 Pa, menggunakan pipa U dengan diameter 9 mm yang diisi air raksa. Kolom udara terjebak di salah satu sisi pipa U, sementara pipa lainnya terbuka dan dapat digeser untuk mengubah tinggi kolom udara.



Gambar 4.

Grafik percobaan hukum Boyle dengan pendekatan gas ideal (regresi linier) dan

pendekatan *Van der Waals* (regresi polinomial orde 2).

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan pendekatan model gas ideal dan model gas *Van der Waals*. Berikut grafik hubungan antara panjang kolom udara ($1/L$) dan perbedaan tinggi raksa (h) yang didekati dengan model gas ideal menggunakan metode regresi linier dan didekati dengan model

gas *Van der Waals* menggunakan metode regresi polinomial orde 2.

Data yang diperoleh dari percobaan dibandingkan dengan perhitungan teoretis untuk mengevaluasi keakuratan masing-masing model. Tujuan percobaan ini adalah menentukan tekanan udara luar dari percobaan (P_{coba}) dan jumlah mol dari percobaan (mol_{coba}). Hasil P_{coba} dan mol_{coba} dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1.

Perbandingan antara hasil percobaan (P_{coba} dan mol_{coba}) menggunakan pendekatan model gas ideal dan model gas *Van der Waals*.

No. Perc	P_{ukur} (Pa)	mol hitung (mmol)	Model Gas Ideal				Model Gas <i>Van der Waals</i>			
			P_{coba} (Pa)	KSR (%)	mol_{coba} (mmol)	KSR (%)	P_{coba} (Pa)	KSR (%)	mol_{coba} (mmol)	KSR (%)
1	92400	0,489	98067	6,13	0,530	8,46	92630	0,25	0,492	0,72
2	92400	0,486	102130	10,53	0,460	5,29	93163	0,83	0,475	2,29
3	92400	0,392	99960	8,18	0,461	17,67	92363	0,04	0,401	2,38
4	92400	0,450	113420	22,75	0,460	2,18	91830	0,62	0,454	0,93
5	92400	0,612	95495	3,35	0,458	25,04	92630	0,25	0,620	1,39
	Rata-rata		101815	10,19	0,474	11,73	92523	0,40	0,488	1,54

Tekanan udara yang dihitung menggunakan model gas ideal menunjukkan nilai rata-rata $P_{\text{coba}}=101815$ Pa dengan KSR sebesar 10,19%. Sedangkan, model gas *Van der Waals* menunjukkan hasil yang lebih akurat dengan nilai rata-rata $P_{\text{coba}}=92523$ Pa dan KSR sebesar 0,40%. Hal ini menunjukkan bahwa model *Van der Waals* lebih mendekati nilai tekanan udara luar yang diukur ($P_{\text{uku}} = 92400$ Pa) dan memberikan nilai tekanan udara yang lebih logis.

Perhitungan jumlah mol udara dalam kolom menggunakan model gas ideal memberikan rata-rata KSR sebesar 11,73%. Sedangkan, model *Van der Waals* memberikan nilai rata-rata KSR sebesar 1,54%. Hasil ini menunjukkan bahwa model *Van der Waals* lebih akurat dalam memperkirakan jumlah mol udara dalam kolom, dengan memperhitungkan faktor-faktor yang diabaikan oleh model gas ideal.

Dari data percobaan dan analisis regresi, ditemukan bahwa model gas *Van der Waals* lebih akurat dalam memprediksi tekanan udara luar dibandingkan dengan model gas ideal. Hal ini terlihat dari nilai KSR yang lebih rendah pada model *Van der Waals* baik untuk tekanan percobaan maupun mol udara. Model *Van der Waals* mempertimbangkan faktor-faktor tambahan seperti gaya tarik-menarik antar molekul dan volume yang ditempati oleh molekul gas, yang tidak diperhitungkan dalam model gas ideal. Dengan demikian, untuk percobaan yang memerlukan presisi tinggi dalam pengukuran tekanan udara, model gas *Van der Waals* lebih disarankan dibandingkan dengan model gas ideal.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan persamaan *Van der Waals* menghasilkan nilai tekanan udara

luar yang lebih mendekati nilai sebenarnya dibandingkan model gas ideal. Hal ini dibuktikan melalui nilai kesalahan relatif sebesar 0,40%, sedangkan pendekatan gas ideal menghasilkan kesalahan relatif sebesar 10,19%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa persamaan *Van der Waals* memiliki kemampuan yang lebih baik dalam merepresentasikan perilaku gas nyata karena mempertimbangkan adanya volume partikel gas serta gaya tarik antarmolekul yang diabaikan dalam persamaan gas ideal. Dengan demikian, penggunaan model *Van der Waals* memberikan estimasi tekanan yang lebih akurat pada percobaan Hukum Boyle. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kunlestiawati et al. (2024) yang menunjukkan bahwa model *Van der Waals* memiliki tingkat kecocokan yang lebih tinggi terhadap data eksperimen dibandingkan model gas ideal.

Keunggulan persamaan *Van der Waals* dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui karakteristik udara sebagai gas nyata. Meskipun pada tekanan rendah udara sering diasumsikan sebagai gas ideal, dalam praktik eksperimen laboratorium masih terdapat pengaruh interaksi antarmolekul dan volume molekul yang menyebabkan penyimpangan dari perilaku ideal. Persamaan *Van der Waals* mengoreksi kedua faktor tersebut sehingga hubungan antara tekanan dan volume menjadi lebih representatif terhadap kondisi sebenarnya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa semakin realistis model yang digunakan, semakin kecil pula penyimpangan hasil pengukuran terhadap nilai acuan. Temuan tersebut konsisten dengan kajian termodinamika modern yang menyatakan bahwa persamaan *Van der Waals* merupakan dasar penting dalam pemodelan gas nyata pada berbagai kondisi eksperimen.

Nilai kesalahan relatif yang sangat kecil pada pendekatan *Van der Waals* juga menunjukkan bahwa model tersebut mampu meningkatkan ketelitian analisis dalam percobaan Hukum Boyle. Hasil ini memberikan gambaran bahwa sumber kesalahan dalam praktikum tidak hanya berasal dari keterbatasan alat ukur atau faktor manusia, tetapi juga dipengaruhi oleh ketepatan model teoritis yang digunakan dalam pengolahan data. Apabila data eksperimen dianalisis menggunakan asumsi gas ideal pada kondisi yang tidak sepenuhnya ideal, maka hasil yang diperoleh cenderung memiliki deviasi yang lebih besar. Oleh karena itu, pemilihan model matematis yang sesuai menjadi faktor penting dalam menghasilkan interpretasi data yang lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Hasil penelitian ini juga memiliki implikasi terhadap pembelajaran fisika, khususnya pada kegiatan praktikum Hukum Boyle di tingkat sekolah maupun perguruan tinggi. Selama ini, pembelajaran sering kali hanya memperkenalkan persamaan gas ideal sebagai pendekatan utama tanpa memberikan pemahaman bahwa perilaku gas nyata dapat mengalami penyimpangan terhadap model tersebut. Dengan memperkenalkan persamaan *Van der Waals* dalam analisis hasil praktikum, peserta didik dapat memahami alasan ilmiah mengapa terdapat perbedaan antara hasil eksperimen dan perhitungan teoritis. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep termodinamika, tetapi juga melatih kemampuan mahasiswa atau siswa dalam mengevaluasi model fisika berdasarkan bukti empiris. Hasil tersebut didukung oleh penelitian mengenai pengembangan eksperimen gas nyata yang menunjukkan bahwa penggunaan model *Van der Waals* mampu meningkatkan kualitas interpretasi data praktikum.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa persamaan *Van der Waals* merupakan pendekatan yang lebih tepat dibandingkan persamaan gas ideal dalam menentukan tekanan udara luar pada percobaan Hukum Boyle. Perbedaan kesalahan relatif yang cukup besar antara kedua model memperlihatkan bahwa penggunaan persamaan gas nyata mampu meningkatkan validitas hasil eksperimen. Oleh karena itu, persamaan *Van der Waals* layak direkomendasikan sebagai model analisis pada praktikum fisika, terutama ketika diperlukan tingkat ketelitian yang lebih tinggi. Selain meningkatkan akurasi hasil pengukuran, penerapan model ini juga memperkuat keterkaitan antara konsep teoritis dan fenomena fisika yang diamati secara langsung dalam kegiatan eksperimen.

SIMPULAN

Hasil analisis menggunakan pendekatan *Van der Waals* dengan regresi polinomial orde dua untuk menentukan nilai tekanan udara luar memberikan hasil yang lebih mendekati nilai nyata dibandingkan dengan menggunakan pendekatan gas ideal. Oleh karena itu, disarankan pada percobaan hukum Boyle untuk menggunakan pendekatan *Van der Waals* dalam analisis guna meningkatkan akurasi hasil yang diperoleh.

DAFTAR PUSTAKA

- Azhari, M. T., Al Fajri Bahri, M. P., Asrul, M. S., & Rafida, T. (2023). *Metode Penelitian Kuantitatif*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Brown, D., Wilson, M., & Thompson, L. (2021). Comparative Analysis of Real Gas Models: An Empirical Study. *Chemical Engineering Journal*, 136(4), 102-110.
- Cervantes, P., Purdue, P., & Steele, J. (2020). A Physical Model for Intuiting Linear Regression. *American Journal of Physics*, 88(10), 795-800. <https://pubs.aip.org/aapt/ajp/article/88/10/795/1057948>
- Handini, I. T., Yulkifi, Y., & Darvina, Y. (2020). Rancang Bangun Sistem Pengukuran Tekanan Udara Menggunakan DT-Sense Barometric Pressure Berbasis Internet of Things dengan Display Smartphone. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 1-10. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v8i1.230>
- Hernández, R., & García, M. (2022). Teaching Thermodynamics with *Van Der Waals* Equation: Enhancing Laboratory Accuracy and Understanding. *Journal of Chemical Education*, 99(3), 432-440.
- Konermann, M. (2021). Analysis of p , T , P -Data for All Fluid States Via Comparison With A Transcribed *Van Der Waals* Equation. *Chemical Thermodynamics and Thermal Analysis*, 1-2, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.ctta.2021.100003>
- Kontogeorgis, G. M., Privat, R., & Jaubert, J. N. (2019). Taking Another Look At The *Van Der Waals* Equation of State—Almost 150 Years Later. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 64(11), 4619-4637. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00264>
- Kunlestiawati, K., Muldiani, R. F., & Pratama, D. (2024). Analisis Model Persamaan Gas Nyata pada Eksperimen Hukum Gay-Lussac dan Boyle. *Science and Physics Education Journal*, 7(1). <https://doi.org/10.31539/spej.v7i1.6869>
- López-Echeverry, J. S. (2022). Equations of State: Demonstration of A Mathematical Development

- Methodology. *Chemical Engineering Research and Design*, 178, 164–167. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.12.018>
- Liu, H., Wang, J., & Zhao, Q. (2020). Low-Temperature Anomalies in Argon Gas Behavior: Ideal Vs Van Der Waals Models. *International Journal of Thermodynamics*, 145(9), 1672-1684.
- Lu, T., & Chen, Q. (2020). Van der Waals Potential: An Important Complement to Molecular Electrostatic Potential in Studying Intermolecular Interactions. *Journal of Molecular Modeling*, 26(11), 315. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00894-020-04577-0>
- Nuriyah, L. (2021). *Termodinamika: Tinjauan sains dan rekayasa*. Universitas Brawijaya Press.
- Pratama, D., Hadiningrum, K., & Muldiani, R. F. (2024). Experimental Analysis of Deviations of Real Gases From Ideal Gases At Constant Temperature. *Jurnal Geliga Sains: Jurnal Pendidikan Fisika*, 12(1). <https://natur.ejournal.unri.ac.id/index.php/jgs/article/view/1010>
- Smith, J., Doe, R., & Johnson, M. (2018). Understanding Boyle's Law and its applications. *Journal of Chemical Education*, 95(3), 567-574. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00567>
- Serbouti, A., Rattal, M., Oualim, E. M., & Mouhsen, A. (2021). Innovative Time Efficient Method to Optimize Buildings' Performance Using Design of Experiment, Polynomial Regression and Genetic Algorithms. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1714, No. 1, p. 012014). IOP Publishing. [https://doi.org/10.1088/1742-6596/1714/1/012014/meta](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1714/1/012014/meta)
- Somuncu, E., & Mamedov, B. A. (2023). Accurate Analytical Evaluation of Fugacity Coefficient of Gases. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 97(5), 878-882. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0036024423050072>
- Vestřálová, M., & Šafařík, P. (2018). Determination of The Applicability Limits of The Ideal Gas Model for The Calculation of Moist Air Properties. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 180, p. 02115). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002115>
- Wamepa, A., Siregar, E., & Sagala, M. K. (2022). Pengembangan Augmented Reality Sebagai Media Pendukung Praktikum Mekanika dan Termodinamika Dasar: *Decode: Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi*, 2(1), 8-14. <https://journal.umkendari.ac.id/decode/article/view/38>
- Zhang, D., Liu, H. S., Xing, L., Li, Q. Q., Liu, X. Q., Wei, J., ... & Ge, X. M. (2020). Simulation and Verification of An Air-Gun Array Wavelet in Time-Frequency Domain Based on Van Der Waals Gas Equation. *Applied Geophysics*, 17(5), 736-746. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11770-020-0874-y>