

ANALISIS MODEL PERSAMAAN GAS NYATA PADA EKSPERIMEN HUKUM GAY-LUSSAC DAN BOYLE

Kunlestiowati Hadiningrum¹, Ratu Fenny Muldiani^{2,3}, Defrianto Pratama³

Politeknik Negeri Bandung^{1,2,3}
kunlestiowati@polban.ac.id¹

Abstract: This study aims to analyze the real gas equation model in the Gay-Lussac and Boyle's Law experiments using the curve fitting method. The method used involves the collection and preparation of experimental data for analysis. Furthermore, the ideal gas equation and the Van der Waals equation are calculated based on the given pressure, volume, and temperature values. Differences between experimental data and modeling results were analyzed using the Linear Regression method, then the Root Mean Square Error (RMSE) and Coefficient of Determination (R square) values were calculated. From this analysis, it was found that the Van der Waals gas model has a better fit with the experimental data of Gay-Lussac and Boyle's Law. These results make an important contribution to the understanding of the behavior of gases at constant volume and constant temperature. The effects of intermolecular interactions and the volume of gas particles cannot be ignored in the gas equation model because it is more suitable in describing the behavior of real gases. This conclusion underscores the importance of considering these factors in gas equation models to gain a more accurate understanding of gas properties.

Key words: Real Gas Equation, Gay-Lussac's Law, Boyle's Law, Van der Waals Model

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis model persamaan gas nyata pada eksperimen Hukum Gay-Lussac dan Boyle menggunakan metode pencocokan kurva. Metode yang digunakan melibatkan pengumpulan dan persiapan data eksperimental untuk analisis. Selanjutnya, persamaan gas ideal dan persamaan Van der Waals dihitung berdasarkan nilai tekanan, volume, dan suhu yang diberikan. Perbedaan antara data eksperimental dan hasil permodelan dianalisis menggunakan metode Regresi Linear, kemudian dihitung nilai Root Mean Square Error (RMSE) dan Koefisien Determinasi (R square). Dari analisis ini, ditemukan bahwa model gas Van der Waals memiliki kesesuaian yang lebih baik dengan data eksperimental Hukum Gay-Lussac dan Boyle. Hasil ini memberikan kontribusi penting dalam pemahaman tentang perilaku gas pada volume tetap dan suhu tetap. Efek interaksi antar molekul dan volume partikel gas tidak dapat diabaikan dalam model persamaan gas karena lebih sesuai dalam menggambarkan perilaku gas nyata. Kesimpulan ini menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan faktor-faktor ini dalam model persamaan gas untuk mendapatkan pemahaman yang lebih akurat tentang sifat gas.

Kata Kunci: Persamaan Gas Nyata, Hukum Gay-Lussac, Hukum Boyle, Model Van der Waals

PENDAHULUAN

Gas adalah fase materi yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari dan dalam berbagai bidang ilmiah, seperti fisika, kimia, dan teknik. Pemahaman yang mendalam tentang perilaku gas menjadi landasan penting dalam pembuatan desain sistem perpipaan (Harfit *et al*, 2022), pemodelan atmosfer (Jacobson, 1999), dan menghitung faktor kompresibilitas gas pada industri industri minyak dan gas (Kontogeorgis *et al.*, 2019). Saat mempelajari sifat gas, terdapat dua hukum dasar yang menjadi

pijakan utama, yaitu Hukum Gay-Lussac dan Hukum Boyle.

Hukum Gay-Lussac, juga dikenal sebagai Hukum Amontons, ditemukan oleh fisikawan Prancis Joseph Louis Gay-Lussac pada tahun 1802. Hukum ini menyatakan bahwa pada suhu konstan, tekanan gas akan meningkat secara proporsional dengan kenaikan suhunya (Kidnay *et al*, 2019). Gay-Lussac melakukan eksperimen dengan menggunakan berbagai jenis gas dan diukur tekanan serta suhu gas pada volume yang konstan. Hasil eksperimen

menunjukkan hubungan linier antara tekanan dan suhu gas.

Sementara itu, Hukum Boyle yang ditemukan oleh fisikawan Irlandia Robert Boyle pada tahun 1662, menyatakan bahwa pada suhu konstan, volume gas akan berbanding terbalik dengan tekanan yang diberikan padanya (Kidnay *et al.*, 2019). Eksperimen yang dilakukan oleh Boyle menggunakan tabung tertutup berisi gas, di mana dia memvariasikan tekanan dan mengamati perubahan volume yang terjadi. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa ketika tekanan gas ditingkatkan, volume gas akan berkurang secara proporsional.

Meskipun Hukum Gay-Lussac dan Hukum Boyle memberikan pemahaman yang baik tentang hubungan antara tekanan, suhu, dan volume gas pada kondisi umum, kedua hukum ini memiliki keterbatasan dalam menjelaskan perilaku sebenarnya dari gas. Salah satu keterbatasan tersebut terletak pada tidak seimbang antara gaya tarik antar partikel dan gaya dorong partikel dalam gas. Hukum-hukum tersebut mengasumsikan bahwa partikel gas adalah titik massa tanpa volume dan tidak memperhitungkan gaya tarik antara partikel-partikelnya. Namun, pada tekanan tinggi dan suhu rendah, volume partikel dan gaya tarik menjadi signifikan, dan akibatnya, gas cenderung mengalami kondensasi menjadi cairan (Vestfálová *et al.*, 2018). Johannes Diderik van der Waals, seorang fisikawan Belanda pada abad ke-19, mengembangkan model matematis yang lebih kompleks pada gas yang dikenal sebagai Model Gas van der Waals untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Model ini memperhitungkan adanya volume partikel gas dan gaya tarik antara partikel-partikelnya (Nuriyah, 2021).

Tujuan penelitian ini adalah melakukan analisis perilaku gas nyata pada eksperimen Hukum Boyle dan Gay-Lussac dengan pendekatan model gas

ideal dan model gas Van der Waals. Pada penelitian ini akan dilakukan pemeriksaan apakah model gas Van der Waals memberikan kesesuaian yang lebih baik dengan data eksperimental daripada hukum gas ideal yang lebih sederhana.

Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2) antara kurva eksperimen terhadap kurva model persamaan gas ideal dan Van der Waals, kemudian akan dapat ditentukan model mana yang memberikan hasil terbaik atau memiliki hasil yang mendekati keadaan sesungguhnya. *Root Mean Square Error* (RMSE) adalah metrik evaluasi yang digunakan untuk mengukur sejauh mana prediksi atau perkiraan yang dibuat oleh model statistik yang cocok dengan nilai sebenarnya dalam data yang diamati. RMSE menghitung perbedaan antara nilai sebenarnya dan nilai yang diprediksi, dan kemudian mengambil akar kuadrat rata-rata dari seluruh perbedaan kuadrat (Calasan *et al.*, 2020). Sedangkan, koefisien determinasi (R^2) digunakan untuk mengukur seberapa baik variabilitas data dapat dijelaskan oleh model teori. Nilai R^2 berkisar antara 0 dan 1, di mana 1 menunjukkan kesesuaian sempurna antara teori dan data (Chicco *et al.*, 2021).

LANDASAN TEORI

Penelitian yang telah dilakukan oleh Muldiani *et al.* (2020), dan Aminoto *et al.* (2019), memperlihatkan bahwa perilaku gas dapat didekati menggunakan gas ideal dengan tekanan awal rendah. Akan tetapi, ketika tekanan awal gas semakin tinggi dan jumlah mol gas semakin banyak, perilaku gas akan semakin jauh dari kondisi gas ideal, terlihat nilai koefisien regresi semakin kecil, sebaran titik-titik data semakin jauh dari persamaan garis lurus untuk gas ideal (Wibowo *et al.*, 2017); (Kilmer *et al.*,

2019). Profil perubahan tekanan terhadap suhu pada volume tetap telah didapatkan melalui serangkaian penelitian (Kua *et al*, 2021); (Mahardika *et al*, 2023), dan melalui perhitungan simulasi (Sigarlaki *et al*, 2015) akan tetapi masih menggunakan pendekatan gas ideal. Perhitungan simulasi telah dilakukan untuk mempelajari perilaku gas nyata (Amalia *et al*, 2022), namun pada skala laboratorium belum banyak dikembangkan. Suatu sistem gas dapat dikonfirmasi dengan mengikuti persamaan gas ideal atau gas nyata, dalam penelitian ini akan dirancang suatu alat untuk memvalidasi persamaan keadaan gas melalui pengujian secara empiris pada kondisi isothermal dan isokorik.

Pada model Gas van der Waals, persamaan keadaan gas diubah dengan memasukkan koefisien yang mewakili volume partikel dan gaya tarik antara partikel-partikelnya. Persamaan Gas van der Waals dinyatakan sebagai berikut :

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (1)$$

a dan b adalah konstanta empiris yang berbeda untuk setiap gas. Nilai a dan b dapat dilihat pada tabel 1. untuk beberapa jenis gas umum. Suku tekanan $\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)$ mengoreksi gaya tarik antar molekul yang cenderung mengurangi tekanan dari yang diprediksi oleh hukum gas ideal. Kemudian, $\frac{n^2}{V^2}$ menyatakan konsentrasi gas (n/V), dikuadratkan karena itu mengambil dua partikel untuk terlibat dalam interaksi antarmolekul berpasangan. Suku volume $(V - nb)$ mengoreksi volume yang ditempati oleh molekul gas.

Tabel 1. Konstanta a dan b untuk beberapa jenis gas (Nuriyah, 2021).

Gas	a (L ² atm /mol ²)	b (L/mol)
He	0.03410	0.0238
Ne	0.0205	0.0167
Ar	1.337	0.032
H ₂	0.2420	0.0265
N ₂	1.352	0.0387
O ₂	1.364	0.0319
Cl ₂	6.260	0.0542
NH ₃	4.170	0.0371
CH ₄	2.273	0.0430
CO ₂	3.610	0.0429

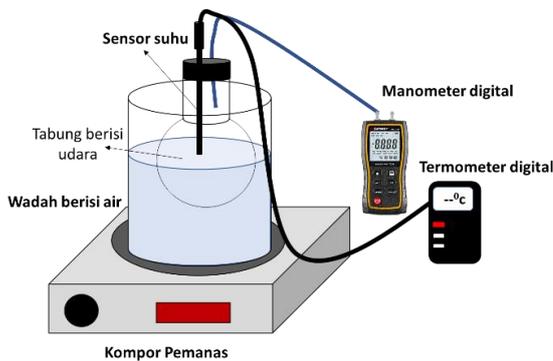
Koreksi untuk volume negatif, tetapi koreksi untuk tekanan adalah positif, hal ini untuk merefleksikan pengaruh dari masing-masing faktor pada V dan P . Karena volume molekul tidak nol, akan menghasilkan volume terukur yang lebih besar dari yang diperkirakan oleh hukum gas ideal, kita harus mengurangi volume molekul untuk mendapatkan volume aktual yang tersedia. Sebaliknya, gaya tarikan antar molekul menghasilkan tekanan yang kurang dari nilai yang diprediksi hukum gas ideal, sehingga suku (an^2/V^2) harus ditambahkan ke tekanan terukur untuk mengoreksi efek ini (Nuriyah, 2021). Model Gas van der Waals memberikan pendekatan yang lebih realistis untuk menjelaskan sifat-sifat gas, terutama pada tekanan tinggi dan suhu rendah di mana gaya tarik antara partikel-partikel gas dan volume partikel menjadi signifikan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pencocokan kurva. Pertama, data eksperimental dikumpulkan dan disiapkan untuk analisis. Selanjutnya, persamaan gas ideal dan persamaan Van der Waals dihitung menggunakan nilai tekanan, volume dan suhu yang diberikan. Selanjutnya, perbedaan antara data eksperimental dan hasil permodelan dianalisis menggunakan metode Regresi Linear. Hasil yang diperoleh dari analisis ini adalah RMSE (Root Mean Square

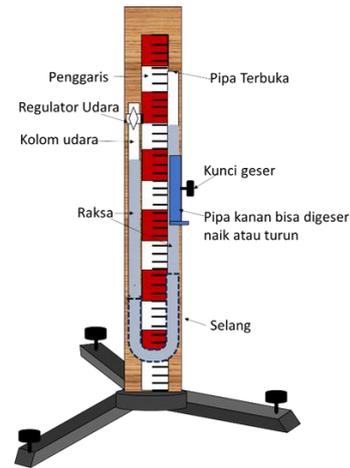
Error), dan R square (Koefisien Determinasi).

Pada kondisi volume tetap menggunakan set alat eksperimen Hukum Gay Lussac seperti pada gambar 1. Labu kaca tertutup berisi udara dipanaskan melalui medium air, kemudian di catat perubahan tekanan menggunakan manometer digital dan perubahan suhu menggunakan termometer digital, keduanya dimasukkan ke dalam tabung tersebut.



Gambar 1. Peralatan eksperimen hukum Gay Lussac

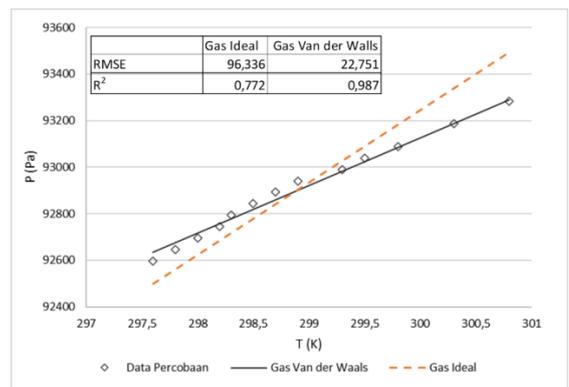
Pada kondisi suhu tetap menggunakan set alat eksperimen hukum Boyle seperti pada gambar 2. Pada pipa sebelah kiri terdapat kolom udara yang berisi udara yang terjebak, pipa sebelah kanan merupakan pipa terbuka yang dapat digeser ke atas atau ke bawah, supaya raksa dapat naik atau turun. Ketika pipa sebelah kanan digeser ke atas maka air raksa naik dan volume kolom udara mengecil, begitu sebaliknya. Perubahan volume kolom udara menyebabkan perubahan tekanan yang dilihat dari perbedaan ketinggian air raksa pada pipa sebelah kiri dengan pipa sebelah kanan.



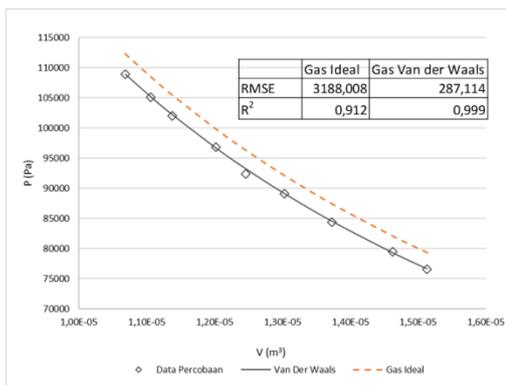
Gambar 2. Peralatan eksperimen hukum Boyle

HASIL PENELITIAN

Eksperimen Hukum Gay-Lussac dilakukan pada udara dengan volume udara $5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ pada kondisi suhu ruangan 297,6 K dan tekanan udara luar 92500 Pa. Gambar 3 memperlihatkan bahwa model gas Van der Waals memberikan bentuk kurva yang lebih baik dengan nilai RMSE 22,75 Pa terhadap data eksperimen pada volume tetap, sedangkan bila dibandingkan dengan model gas ideal memiliki nilai RMSE 96,33 Pa.



Gambar 3. Hubungan Suhu terhadap Tekanan Gas Nyata pada Volume Tetap



Gambar 4. Hubungan Volume terhadap Tekanan Gas Nyata pada Suhu Tetap

Eksperimen Hukum Boyle dilakukan dengan volume udara awal $1,25 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (volume awal pada kolom udara) pada kondisi suhu ruangan $300,0 \text{ K}$ dan tekanan udara luar 92400 Pa . Gambar 4 memperlihatkan bahwa model gas Van der Waals memberikan bentuk kurva yang lebih baik dengan nilai RMSE $287,114 \text{ Pa}$ terhadap data eksperimen pada suhu tetap, sedangkan bila dibandingkan dengan model gas ideal memiliki nilai RMSE $96,33 \text{ Pa}$.

PEMBAHASAN

Pada gambar 3 hubungan suhu terhadap tekanan gas nyata pada volume tetap dapat dilihat bahwa suhu pengamatan diatas 300 K terjadi penyimpangan yang sangat berarti pada persamaan gas ideal, hal ini ditandai dengan nilai *R square* sebesar $0,772$. Untuk persamaan gas Van der Waals nilai *R square* sebesar $0,987$ menunjukkan korelasi yang kuat antara suhu dan tekanan pada volume tetap. *R square* merupakan koefisien determinasi yang mengindikasikan seberapa baik variabilitas data dapat dijelaskan oleh model yang digunakan. Nilai *R square* mendekati 1 menandakan bahwa model memiliki kemampuan yang tinggi dalam menjelaskan hubungan antara variabel yang terlibat.

Hasil ini menunjukkan bahwa kurva data gas pada volume tetap, model gas

Van der Waals memberikan hasil yang lebih akurat dan konsisten dengan data eksperimental dibandingkan dengan model gas ideal. Oleh karena itu, dalam mengamati perilaku gas nyata pada volume tetap, lebih tepat untuk menggunakan model Van der Waals daripada model gas ideal. Model Van der Waals memperhitungkan volume partikel gas dan gaya tarik-menarik antarmolekul, sehingga memberikan deskripsi yang lebih akurat terhadap perilaku gas nyata (Ranea *et al*, 2019).

Pada gambar 4 menunjukkan bahwa model Van der Waals memberikan kesalahan yang lebih kecil dalam memprediksi tekanan gas pada suhu tetap. Selain itu, nilai *R square* pada model Van der Waals juga lebih tinggi, yaitu sebesar $0,999$, dibandingkan dengan model gas ideal yang memiliki nilai *R square* sebesar $0,912$. Nilai *R square* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa model Van der Waals memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjelaskan variasi data eksperimental.

Perbedaan yang signifikan antara kedua model tersebut dapat dijelaskan oleh fakta bahwa model gas ideal tidak memperhitungkan efek interaksi antar molekul dan volume partikel gas. Pada suhu tetap, partikel gas memiliki volume yang dapat mempengaruhi tekanan gas yang dihasilkan. Selain itu, adanya gaya tarik-menarik antar molekul juga memainkan peran penting dalam menentukan perilaku gas pada suhu tetap (Ranea *et al*, 2019).

Model Van der Waals mengambil hal ini menjadi pertimbangan dan memperhitungkan efek volume dan gaya tarik-menarik antar molekul dalam perhitungan tekanan gas. Dengan memperhitungkan volume molekul yang tidak nol akan menghasilkan volume terukur yang lebih besar dari yang diperkirakan oleh hukum gas ideal, dengan mengurangi volume molekul untuk mendapatkan volume aktual yang

tersedia. Sebaliknya, gaya tarikan antar molekul menghasilkan tekanan yang kurang dari nilai yang diprediksi hukum gas ideal.

Dengan adanya hasil yang lebih baik dari model Van der Waals dapat disimpulkan bahwa model Van der Waals lebih sesuai untuk digunakan dalam mengamati perilaku gas nyata daripada model gas ideal. Model gas Van der Waals memberikan pendekatan yang lebih realistis untuk menjelaskan sifat-sifat gas, terutama pada tekanan tinggi dan suhu rendah di mana gaya tarik antara partikel-partikel gas dan volume partikel menjadi signifikan.

SIMPULAN

Model gas van der Waals memberikan kesesuaian yang lebih baik dengan data eksperimental Hukum Boyle dan Gay-Lussac. Hasil ini memiliki kontribusi penting dengan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku gas pada volume tetap dan suhu tetap. Efek interaksi antar molekul dan volume partikel gas tidak dapat diabaikan dalam model persamaan gas karena lebih sesuai menunjukkan perilaku gas nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, A. F., Budhi, W., Melati, A., & Prabowo, U. N. (2022). Mathematical Model Simulation of Non-Linear Equations using MATLAB: Specific Volume of Gas with Van der Waals Equation. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 11(2), 197-206.
- Aminoto, T., Dani, R., & Yuversa, E. (2019). Pengembangan Termometer Gas Sebagai Alat Peraga Pembelajaran Pokok Bahasan Skala Suhu Mutlak. *EduFisika: Jurnal Pendidikan Fisika*, 4(02), 48-55.
- Ćalasan, M., Aleem, S. H. A., & Zobaa, A. F. (2020). On the root mean square error (RMSE) calculation for parameter estimation of photovoltaic models: A novel exact analytical solution based on Lambert W function. *Energy conversion and management*, 210, 112716.
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623.
- Harfit, A. R., & Wiseno, E. (2022). Analisa Rancangan Pipa Penyaring H₂O Pada Biogas. *Jurnal Inovasi Penelitian*, 3(3), 5621-5630.
- Jacobson, Mark Z. *Fundamentals of atmospheric modeling*. Cambridge university press, 1999.
- Kidnay, Arthur J., William R. Parrish, and Daniel G. McCartney. *Fundamentals of natural gas processing*. CRC press, 2019.
- Kilmer, N., & Krehbiel, J. D. (2019). Improved gay-lussac experiment considering added volumes. *The Physics Teacher*, 57(1), 21-25.
- 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.
- Kua, M. Y., & Bakti, S. C. (2021). Tabung Suntik untuk Hukum Boyle, Simulasi Pengukuran Tekanan Udara dengan Real World Problem sebagai Alternatif Pemecahan Masalah. *JURNAL IMEDTECH (Instructional Media, Design and Technology)*, 4(2), 43-53.

- Mahardika, I. K., Bektiarso, S., Cecilia, H. M., Pitri, I. W. R., Malihah, B. M., & Sabeta, M. N. (2023). Analisis Hukum Gay-Lussac Tentang Fluida Pada Kaleng Parfum (Dalam Kajian Studi Literatur). *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(3), 204-209.
- Muldiani, R. F., Hadiningrum, K., & Pratama, D. (2020, April). Optimization of Charles Gay-Lussac's law experiment with temperature correction at the capillary pipe and fixed volume to improve the accuracy of experimental data in Polban applied physics laboratory. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 830, No. 2, p. 022002).
- Nuriyah, L. (2021). *Termodinamika: Tinjauan Sains dan Rekayasa*. Universitas Brawijaya Press.
- Ranea, V. A., Quiña, P. L. D., & Yalet, N. M. (2019). General adsorption model for H₂S, H₂Se, H₂Te, NH₃, PH₃, AsH₃ and SbH₃ on the V₂O₅ (0 0 1) surface including the van der Waals interaction. *Chemical Physics Letters*, 720, 58-63.
- Sigarlaki, A. M., Kolibu, H. S., & Suoth, V. A. (2015). Pemodelan Kontrol Suhu, Tekanan, Dan Laju Aliran Uap Pada Kondensor Dengan Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy. *Jurnal Ilmiah Sains*, 1-8.
- Vestfálová, 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.
- Wibowo, N. A., Susilo, W., Pradipta, A. S., Setiyani, A., & Fillimditty, E. J. (2017). Desain Eksperimen Karakterisasi Perilaku Udara Sekitar dalam Tinjauan Sebagai Gas Ideal atau Gas Nyata. *Scientiae Educatia: Jurnal Pendidikan Sains*, 6(2), 102-110.