

Evaluasi Performa Termal dan Listrik Robinson Engine dengan Fluida Kerja Uap Bertekanan Rendah dari Boiler Kecil

Evaluation of Thermal and Electrical Performance of a Robinson Engine using Low-Pressure Steam from a Small Boiler

Murahmad Parulian Marbun¹, Jufrizal^{1*}, Indra Hermawan¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Medan 20223, Indonesia

*Corresponding author: jufrizal@staff.uma.ac.id

Diterima: 01-05-2025

Disetujui: 12-08-2025

Dipublikasikan: 20-08-2025

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa termal dan keluaran listrik dari mesin uap Robinson menggunakan uap bertekanan rendah ($\leq 2,5$ bar) yang dihasilkan dari boiler kecil. Pengujian dilakukan dengan variasi tekanan 0,5 hingga 2,5 bar untuk mengamati pengaruhnya terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan tekanan uap meningkatkan tegangan dari 0 V menjadi 4,52 V dan daya dari 0 W menjadi 6,1 W. Total energi listrik yang dihasilkan adalah 9,726 kJ dengan efisiensi konversi rata-rata 0,2127% dan maksimum 0,3045% pada tekanan 2,5 bar. Meskipun efisiensinya rendah, mesin ini menunjukkan potensi sebagai pembangkit listrik skala kecil dan media edukasi dalam studi konversi energi.

Kata Kunci: Mesin Robinson, Uap bertekanan rendah, Efisiensi termal, Boiler kecil.

Abstract

This study evaluates the thermal and electrical performance of a Robinson steam engine powered by low-pressure steam (≤ 2.5 bar) from a small boiler. Experiments were conducted by varying the steam pressure from 0.5 to 2.5 bar to observe its effects on voltage, current, and power output. Results show that increasing steam pressure raised the voltage from 0 V to 4.52 V and the power output from 0 W to 6.1 W. The total electrical energy generated was 9.726 kJ, with an average conversion efficiency of 0.2127% and a peak efficiency of 0.3045% at 2.5 bar. Despite the low efficiency, the system demonstrates potential for small-scale power generation and educational use in energy conversion studies.

Keywords: Robinson engine, Low-pressure steam, Thermal efficiency, Small boiler.

1. Pendahuluan

Pemanfaatan uap bertekanan rendah sebagai fluida kerja pada pembangkit listrik skala kecil kembali mendapat perhatian karena sifatnya yang relatif aman, mudah diterapkan, serta berpotensi memanfaatkan panas buangan dari proses industri maupun sumber panas bersuhu rendah hingga menengah. Sejumlah studi melaporkan bahwa mesin uap atmosferik mampu mencapai efisiensi teoritis sekitar 14–17%, meskipun dalam praktik nilai efisiensinya masih jauh lebih rendah (Bortolin et al., 2021).

Salah satu pendekatan yang berkembang adalah penerapan siklus Rankine bertekanan rendah, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem pembangkit

skala kecil (Desai et al. 2021). Hasil kajian termodinamika menunjukkan bahwa siklus adiabatik lebih efisien dibandingkan siklus isothermal, meskipun penerapan praktis masih terkendala kebutuhan energi panas yang cukup besar (Bortolin et al. 2021; Desai et al., 2021).

Teknologi pembangkit listrik mini berbasis mesin uap semakin banyak dikembangkan, baik sebagai sarana edukasi maupun penelitian. Sistem ini memungkinkan pengukuran langsung parameter operasi seperti tekanan, putaran, dan keluaran listrik, sehingga mahasiswa maupun peneliti dapat menganalisis karakteristik konversi energi secara *real-time* (Wibowo, 2023). Penelitian serupa juga dilakukan melalui pengembangan prototipe *mini steam power plant* untuk praktikum, yang menegaskan pentingnya riset terhadap mesin uap bertekanan rendah dalam skala laboratorium (Desai et al. 2021).

Kajian yang secara spesifik meneliti mesin uap Robinson masih sangat terbatas. Padahal, mesin ini memiliki konfigurasi sederhana, mudah dibuat, serta relevan untuk kebutuhan eksperimen laboratorium maupun pembangkit listrik mikro. Penelitian ini berbeda dengan penelitian Desai et al. (2021), yang berfokus pada prototipe siklus Rankine mini. Penelitian ini menawarkan kontribusi pada aspek analisis kinerja termal dan keluaran listrik mesin uap Robinson dengan fluida kerja berupa uap bertekanan rendah. Penelitian ini sederhana, mudah dibuat, dan relevan untuk kebutuhan eksperimen laboratorium maupun pembangkit skala mikro. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai potensi pemanfaatan mesin Robinson, baik untuk aplikasi praktis sebagai pembangkit listrik skala kecil maupun sebagai media edukasi dalam bidang konversi energi (Bělohoubek et al., 2024).

2. Metode

2.1. Desain Eksperimental

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Universitas Medan Area (UMA). Eksperimen dirancang untuk mengevaluasi kinerja termal dan keluaran listrik mesin uap Robinson dengan variasi tekanan uap kerja pada kisaran 0,5–2,5 bar.

2.2. Material dan Alat

Perangkat utama yang digunakan adalah mesin uap Robinson mini yang dirancang khusus untuk keperluan penelitian. Komponen utama meliputi: Boiler mini dengan tekanan operasi maksimum 2,5 bar; Silinder dan piston berbahan baja karbon; *Flywheel* dengan diameter 21 cm; Generator tipe dinamo stepper NEMA 17; dengan tegangan keluaran 5–12 V. Beban listrik berupa lampu pijar 5 Watt digunakan sebagai resistansi eksternal. Penelitian ini menggunakan mesin uap Robinson mini sebagai material utama, serta dilengkapi alat pendukung untuk menunjang proses dan meningkatkan keakuratan hasil pengujian.



(a)



(b)

Gambar 1. (a). Prototipe mesin Robinson dan (b). Boiler mini

2.3. Instrumen Pengukuran

Parameter yang diukur meliputi tekanan uap, suhu, kecepatan putaran, tegangan, arus, dan daya listrik. Instrumen yang digunakan adalah: *Pressure gauge* (akurasi $\pm 0,1$ bar), *hermocouple* (akurasi $\pm 1,5$ °C), *Infrared thermometer* (akurasi ± 1 °C), *Tachometer* digital (akurasi $\pm 0,5$ –1 rpm), *DC Wattmeter* (akurasi ± 1 –2%).

2.4. Prosedur pengujian

Langkah-langkah pengujian dilakukan secara sistematis sebagai berikut:

- Menyiapkan instalasi eksperimen yang terdiri atas *boiler*, mesin Robinson, generator, dan instrumen ukur.
- Memanaskan boiler hingga mencapai variasi tekanan yang ditentukan (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; dan 2,5 bar).
- Mengukur parameter keluaran berupa tegangan, arus, dan daya listrik pada setiap variasi tekanan.
- Mencatat kecepatan putaran *flywheel* pada setiap kondisi operasi.
- Menghitung total energi listrik serta efisiensi konversi energi, baik secara total maupun instan.

2.5. Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis dengan membandingkan hubungan antara:

- Tekanan uap dengan keluaran listrik (tegangan, arus, dan daya).
- Kecepatan putaran (RPM) dengan tegangan, arus, dan daya,
- Panas masuk (Q_{in}) dengan energi listrik keluaran (E_{elec}).

Efisiensi konversi dihitung menggunakan Persamaan (1) (Wulandari et al., 2023).

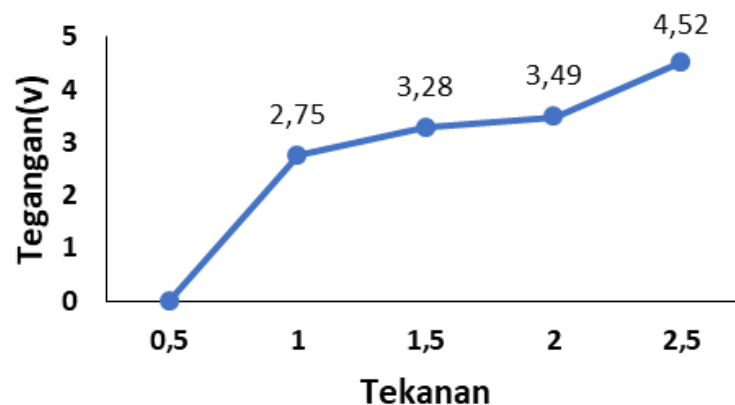
$$\eta = \frac{E_{elec}}{Q_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

Analisis dilakukan secara kuantitatif dan dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu untuk memvalidasi temuan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengukuran Tekanan terhadap Tegangan, Arus, dan Daya

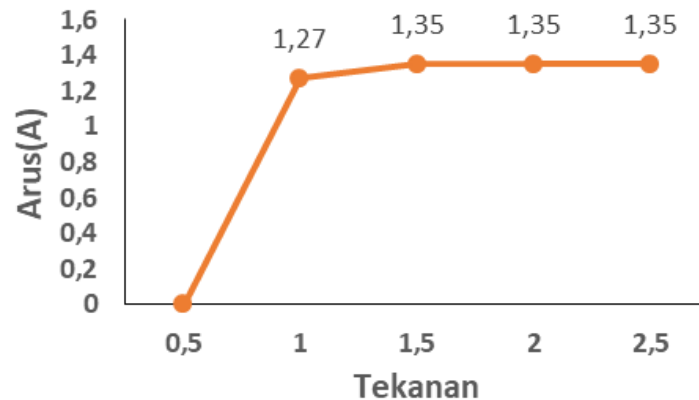
Grafik hasil Pengujian yang menjelaskan Hubungan antara tekanan dengan tegangan dapat dijelaskan pada Gambar 2.



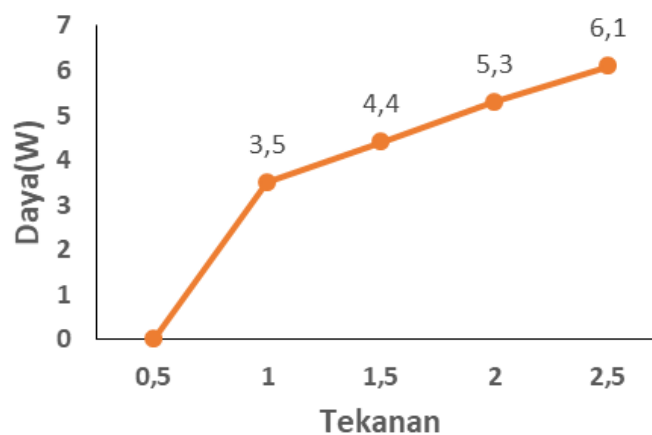
Gambar 2. Grafik tekanan terhadap tegangan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada tekanan uap 0,5 bar, mesin belum mampu menghasilkan tegangan karena poros tidak berputar. Tegangan baru mulai terukur pada tekanan 1,0 bar sebesar 2,75 V, kemudian meningkat hingga 4,52 V pada tekanan 2,5 bar. Peningkatan ini menegaskan adanya hubungan positif antara tekanan uap dengan energi mekanik piston yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

Arus keluaran mulai terbaca pada tekanan 1,0 bar sebesar 1,27 A, dan relatif konstan pada kisaran 1,35 A hingga 2,5 bar. Fenomena stagnasi ini mengindikasikan keterbatasan kapasitas generator terhadap beban eksternal. Dengan kata lain, meskipun tekanan dan putaran meningkat, arus tidak bertambah signifikan karena generator hanya mampu mempertahankan arus pada level tertentu.



Gambar 3. Grafik tekanan terhadap arus



Gambar 4. Grafik pengukuran tekanan terhadap daya

Tabel 1. Pengukuran tekanan uap terhadap output listrik

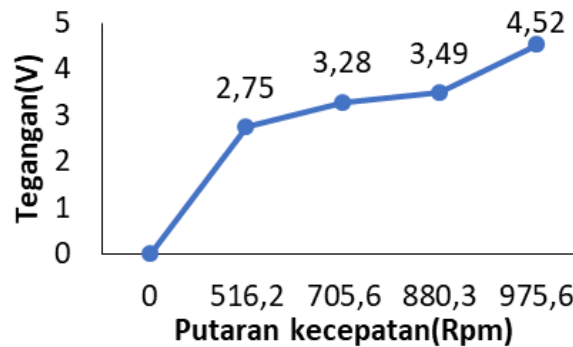
Waktu (menit)	Tekanan (bar)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)
22	0,5	0	0	0
28	1	2,75	1,27	3,5
33	1,5	3,28	1,35	4,4
42	2	3,49	1,35	5,3
48	2,5	4,52	1,35	6,1

Daya listrik yang dihasilkan meningkat signifikan dari 3,5 W pada 1,0 bar menjadi 6,1 W pada 2,5 bar, seperti dijelaskan pada Gambar 2. Dan Pengukuran tekanan uap terhadap *output* listrik dapat dijelaskan pada Tabel 1. Pola kenaikan daya bersifat hampir linear terhadap tekanan,

menunjukkan bahwa peningkatan energi kinetik piston berkontribusi langsung terhadap keluaran generator. Hasil ini sejalan dengan temuan Desai et al. (2021), yang melaporkan tren serupa pada prototipe pembangkit mini berbasis siklus Rankine.

3.2. Hubungan Kecepatan Putaran dengan Tegangan, Arus, dan Daya

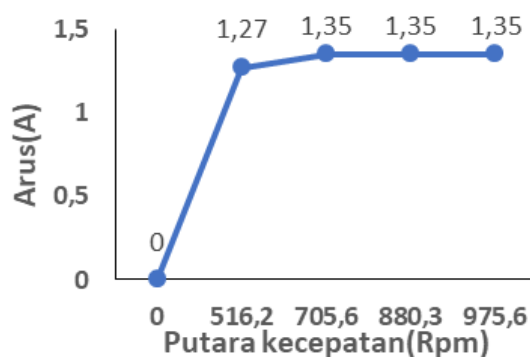
Peningkatan tekanan uap menyebabkan kenaikan kecepatan putaran mesin. Pada putaran 516,2 RPM, tegangan tercatat 2,75 V. Tegangan meningkat hingga 4,52 V pada kecepatan maksimum 975,6 RPM. Kurva Hasil data ini dapat dilihat pada Gambar 5. Pola kenaikan ini menegaskan adanya hubungan linier positif antara kecepatan putaran mesin dengan tegangan yang dihasilkan, sesuai dengan teori induksi elektromagnetik (Cengel & Boles, 2014).



Gambar 5. Grafik hubungan rpm terhadap tegangan

Temuan ini sejalan dengan penelitian Desai et al. (2021), yang melaporkan bahwa kenaikan tekanan operasi pada prototipe pembangkit mini berbasis siklus Rankine berbanding lurus dengan kenaikan tegangan keluaran. Hal serupa juga ditunjukkan oleh Wibowo (2023), di mana sistem turbin uap skala laboratorium menghasilkan tegangan lebih stabil pada tekanan mendekati maksimum operasi.

Gambar 6 menjelaskan hubungan putaran dengan arus. Arus keluaran meningkat dari 1,27 A pada 516,2 RPM menjadi 1,35 A pada 705,6 RPM, lalu stabil hingga 975,6 RPM. Kondisi ini konsisten dengan laporan Bělohoubek et al. (2024), yang menemukan adanya plateau pada arus keluaran turbin uap bertekanan rendah akibat keterbatasan karakteristik generator dan beban.



Gambar 6. Grafik hubungan rpm terhadap arus



Gambar 7. Grafik hubungan rpm terhadap daya

Daya listrik juga meningkat seiring bertambahnya kecepatan, dari 3,5 W pada 516,2 RPM menjadi 6,1 W pada 975,6 RPM, seperti dijelaskan pada Gambar 7. Nilai ini mendekati hasil penelitian Yani et al. (2018), yang melaporkan daya sekitar 7–8 W pada prototipe pembangkit uap mini dengan kondisi operasi serupa. Perbedaan nilai daya dipengaruhi oleh ukuran *flywheel*, desain piston, dan efisiensi mekanik generator.

Perolehan daya puncak sebesar 6,1 W pada penelitian ini mendekati hasil yang diperoleh (Yani et al., 2018), di mana prototipe pembangkit uap mini mampu menghasilkan daya sekitar 7–8 W pada tekanan serupa. Perbedaan nilai daya terutama dipengaruhi oleh ukuran *flywheel*, desain piston, serta efisiensi mekanik generator yang digunakan.

Hasil data yang menyatakan hubungan kecepatan putaran, tegangan, arus dan daya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan kecepatan putaran(rpm) dengan tegangan, arus dan daya

Waktu (menit)	Tekanan (bar)	Kecepatan putaran (Rpm)	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya Listrik (Watt)
22	0,5	0	0	0	0
28	1	516,2	2,75	1,27	3,5
33	1,5	705,6	3,28	1,35	4,4
42	2	880,3	3,49	1,35	5,3
48	2,5	975,6	4,52	1,35	6,1

Data menunjukkan adanya korelasi positif antara kecepatan putaran dan tegangan serta daya. Pada 516 RPM tegangan tercatat 2,75 V dan meningkat hingga 4,52 V pada 975 RPM. Daya listrik juga naik dari 3,5 W menjadi 6,1 W pada rentang putaran tersebut. Sebaliknya, arus cenderung konstan pada 1,35 A setelah mencapai titik tertentu.

Hasil ini sejalan dengan model teoritis (Cengel & Boles, 2014), yang menyatakan bahwa peningkatan kecepatan rotasi turbin secara langsung meningkatkan induksi elektromagnetik pada generator, sehingga memperbesar tegangan dan daya, meskipun arus bisa terbatas oleh resistansi beban.

3.3. Efisiensi termal dan listrik

Total energi listrik yang dihasilkan selama pengujian adalah 9,726 kJ, dengan efisiensi konversi rata-rata 0,2127%. Efisiensi instan tertinggi tercatat 0,3045% pada tekanan maksimum 2,5 bar. Nilai ini relatif rendah, namun sesuai dengan literatur yang menyebutkan bahwa mesin uap skala kecil umumnya memiliki efisiensi <1% (Bortolin et al., 2021; Ilyas et al., 2023).

Hasil ini memperkuat pandangan bahwa keterbatasan efisiensi bukanlah kelemahan spesifik mesin Robinson, melainkan karakteristik umum dari sistem konversi energi bertekanan rendah skala kecil. Namun demikian, efisiensi rendah justru menjadikan mesin ini ideal sebagai media edukasi, karena mampu memperlihatkan secara nyata hubungan antara tekanan, putaran, tegangan, arus, dan daya dengan biaya operasional yang rendah.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan uap dari 0,5 hingga 2,5 bar berpengaruh signifikan terhadap kinerja mesin uap Robinson. Tegangan keluaran meningkat dari 0 V menjadi 4,52 V, arus dari 0 A menjadi 1,35 A, dan daya listrik dari 0 W menjadi 6,1 W. Total energi listrik yang dihasilkan selama pengujian adalah 9,726 kJ, dengan efisiensi konversi rata-rata 0,2127% dan efisiensi instan tertinggi 0,3045% pada tekanan 2,5 bar. Meskipun efisiensi yang diperoleh relatif rendah, hasil ini menegaskan bahwa uap bertekanan rendah tetap dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi pada pembangkit listrik skala kecil. Selain itu, mesin uap Robinson memiliki nilai aplikatif yang tinggi sebagai media pembelajaran dalam bidang konversi energi karena mampu memperlihatkan secara nyata hubungan antara tekanan, putaran, dan keluaran listrik.

Daftar Pustaka

- Bělohoubek, M., K. Liška, Z. Kubín, P. Polcar, L. Smolík, and P. Polach. 2024. "An Investigation of Efficiency Issues in a Low-Pressure Steam Turbine Using Neural Modelling." *Sensors* 24(7): 2056. <https://doi.org/10.3390/S24072056>.
- Bortolin, V. A. A., B. L. H. D. Lemos, R. de L. Amaral, C. M. Freire, and J. R. Meneghini. 2021. "Thermodynamical Model of an Atmospheric Steam Engine." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43(11): 1–9. <https://doi.org/10.1007/S40430-021-03209-9>.
- Cengel, Y., and M. Boles. 2014. *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th ed.). <https://akademik.adu.edu.tr/fakulte/muhendislik/personel/uploads/ycerci/chapter-14-gas-vapor-mixtures-1514360799.pdf>.
- Desai, R., V. Mane, Y. Sahindrakar, P. Patkar, and A. Sathe. 2021. "Design and Analysis of a Mini Setup of Steam Power Plant." *International Research Journal of Engineering and Technology*. <https://www.irjet.net>.
- Dickinson, Henry Winram. 2022. *A Short History of the Steam Engine*. London: Routledge.
- Ilyas, I., N. A. Rosyidi, and J. I. Moh Kahfi. 2023. "Pemanfaatan Panas Gas Buang Menjadi Energi Listrik." *Sinusoida* 25(1): 88–95. <https://doi.org/10.37277/S.V25I1.1673>.
- Lubis, Rahmadsyah, Jufrizal Jufrizal, Supriatno Supriatno, and Nurdiana Nurdiana. 2024. "Analysis of Thermal Efficiency and Fuel Consumption on SNI Stove Burners As a Reference Basis for Stirling Engine Burner Planning". *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 3 (2):1-7. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v3i2.96>.
- Narantoko, Resi Aji, Abrar Riza, and Harto Tanujaya. 2025. "Analysis of Dual Combustion of Natural Gas and Biodiesel Fuels in a Single Cylinder Diesel Engine: Thermal Efficiency and Performance Study". *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 4 (2):17-25. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i2.219>.
- Prasetyo, Indra, Jufrizal Jufrizal, and Supriatno Supriatno. 2024. "Cooling Water Performance Testing for Small Scale Gamma Stirling Engine". *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 3 (3):10-16. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v3i3.146>.
- Simanjuntak, Eli, Muhammad Idris, and Jufrizal Jufrizal. 2023. "Analysis Of Boiler Performance Using Fiber And Shell Combinations In A Takuma N-600 SA". *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)* 2 (1):34-42. <https://doi.org/10.56862/irajtma.v2i1.41>.
- Wibowo, A. 2023. *Revolusi Industri 4.0 dan Society 5.0*. Penerbit Yayasan Prima Agus Teknik. <https://penerbit.stekom.ac.id/index.php/yayasanpat/article/view/457>.
- Wulandari, P. F., D. Lutfiananda, K. Sumada, and L. Suprianti. 2023. "Unjuk Kerja dan Efisiensi Turbin Uap dan Generator (TG-65) pada Pembangkit Listrik Unit Sistem Utilitas Departemen Produksi IIIA PT Petrokimia Gresik." *Sinergi Polmed: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin* 4(1): 67–74. <https://doi.org/10.51510/SINERGIPOLMED.V4I1.1036>.
- Yani, A., D. Mustafa, J. Teknik Mesin STT Industri Bontang, J. Brigjen Katamso No., K. Timur, I. Jurusan Teknik Mesin Universitas Trunajaya Bontang, and J. Taekwondo No. 2018. "Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Uap Mini Sebagai Media Praktikum Mahasiswa." *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 7(1). <https://doi.org/10.24127/TRB.V7I1.711>.