

KAJI EKSPERIMEN MESIN KOMPRESI UDARA DENGAN MEMODIFIKASI GIGI SENTRIS MOTOR BENซิน 4-TAK SEBAGAI SOLUSI ALTERNATIF KENDARAAN BERMOTOR BEBAS EMISI

Experiment Study of Air Compression Engines with Modification of 4-Stroke Gasoline Engine Central Gear as an Alternative Solution of Zero Emission Motor Vehicles

Darwin R. B. Syaka^{1*}, Triyono², Mohammad Joko Triyanto³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, Jakarta, Indonesia 13220.

² Program Studi Rekayasa Keselamatan Kebakaran, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, Jakarta, Indonesia 13220.

³ Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, Jakarta, Indonesia 13220.

* Email Korespondensi : drbsyaka@unj.ac.id

Artikel Info - : Diterima : 19-05-2022; Direvisi : 16-06-2022; Disetujui: 23-06-2022

ABSTRAK

Mesin kompresi udara merupakan alternatif yang ramah lingkungan dengan keuntungan bebas emisi gas buang dan proses pengisian cepat sehingga sesuai untuk diaplikasikan sebagai daya utama pada kendaraan. Penelitian terdahulu mesin tenaga kompresi udara yang memodifikasi mesin pembakaran dalam dilakukan dengan merubah bentuk *camshaft*. Hal ini rumit, sehingga solusi lain adalah dengan merubah perbandingan gigi sentris. Namun demikian, penelitian modifikasi gigi sentris masih belum ada. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja mesin kompresi udara dengan modifikasi gigi sentris. Penelitian ini menyajikan kaji eksperimental mesin piston yang didorong oleh kompresi udara dimana alat ujinya yaitu mesin pembakaran dalam 4-tak yang di ubah menjadi 2-tak dengan memodifikasi perbandingan gigi sentris yang awalnya 2 : 1 menjadi 1 : 1. Torsi yang dihasilkan mesin diukur menggunakan *prony brake* dimana variasi tekanan rem berkisar 0,4 bar – 2 bar dengan perubahan tekanan rem tiap 0,2. Adapun variasi tekanan udara antara 3 bar – 9 bar dengan perubahan tekanan udara 1 bar. Putaran mesin yang dihasilkan diukur menggunakan *tachometer*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan udara merupakan faktor utama yang mempengaruhi kinerja mesin kompresi udara, semakin besar tekanan udara yang dikompresikan maka semakin besar daya yang dihasilkan. Kinerja terbaik mesin kompresi udara berada pada percobaan tekanan udara tertinggi yaitu 8 bar dengan menghasilkan daya 2,36 kW pada putaran mesin 724,33 rpm dengan torsi 31,09 Nm, tetapi torsi tertinggi yang di dapat ialah 34,55 Nm di putaran mesin 618,67 rpm.

Kata Kunci: Bebas Emisi, Kinerja, Mesin Kompresi Udara, Tekanan Udara

ABSTRACT

The compressed air engine is an environmentally friendly alternative with the advantages of zero emissions and a fast-charging process making it suitable for application as the main power source in vehicles. Previous research on compressed air power engines that modify the internal combustion engine was carried out by changing the shape of the camshaft. This is complicated, so another solution is to change the gear-centric ratio. However, research on centric gear modification is still not available. Therefore, this study aims to determine the performance of a compressed air engine with centric gear modification. This research presents an experimental study of a piston engine driven by compressed air where the test equipment is a 4-stroke internal combustion engine which is converted to a 2-stroke by modifying the centric gear ratio from 2:1 to 1:1. The torque produced by the engine is measured using a prony brake

where variations in a brake pressure range from 0.4 bar to 2 bar with a change in brake pressure every 0.2. The variations in air pressure between 3 bar - 9 bar with a change in air pressure of 1 bar. The resulting engine speed is measured using a tachometer. The results of this study indicate that air pressure is the main factor affecting the performance of a compressed air engine, the greater the pressure of the compressed air, the greater the power generated. The best performance of the compressed air engine is at the highest air pressure experiment, which is 8 bar by producing 2.36 kW of power at 724.33 rpm engine speed with 31.09 Nm of torque, but the highest torque that can be obtained is 34.55 Nm at 618.67 rpm.

Keywords: Air Pressure, Compressed Air Engine, Performance, Zero Emissions

1. Pendahuluan

Beberapa dekade terakhir, pencemaran udara dan pengurangan polusi udara telah menjadi isu yang sangat penting di seluruh dunia. Di Indonesia sendiri tingkat pencemaran sangat memprihatinkan. Hal ini diakibatkan karena meningkatnya jumlah pengguna kendaraan bermotor. Untuk menangani masalah ini diperlukan kendaraan yang tidak menimbulkan polusi udara atau yang kita kenal *zero emission*. Kendaraan listrik adalah alternatif energi hijau yang paling umum, dan telah dikembangkan dan dikomersialkan selama beberapa dekade. Namun, pengisian ulang baterai yang lambat dan bobot baterai yang berat merupakan masalah kritis dari kendaraan listrik [1]. Mesin listrik baterai, mesin sel bahan bakar dan mesin listrik hibrid telah dikembangkan. Ini hanya solusi sementara, bukan solusi permanen. Karena dalam proses pembangkitan listrik, masih ada tingkat polusi yang berbeda seperti emisi karbon tergantung pada mode pembangkit listrik, penggunaan baterai akan menyebabkan pencemaran air dan tanah selama pembuangan atau jika tidak ditangani dengan benar. Dibandingkan dengan berbagai teknologi dibahas di atas, teknologi udara terkompresi memiliki banyak keuntungan potensial [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, mesin kompresi udara bertekanan tinggi telah dianggap sebagai sumber energi ramah lingkungan dengan keuntungan bebas emisi gas buang dan aplikasi tekanan udara sebagai daya utama atau penunjang sistem kendaraan bermotor yang proses pengisian udaranya lebih cepat. Pada tahun – tahun ini, udara dengan tekanan yang sangat tinggi dinyatakan sebagai sumber energi ramah lingkungan yang mempunyai kelebihan bebas emisi gas buang (*zero carbon emission*) dan berpotensi digunakan sebagai tenaga penggerak utama pada sistem penggerak utama motor. Peluang penggunaan teknologi kendaraan dengan mesin kompresi udara, termasuk sebagai alternatif untuk kendaraan listrik semakin terbuka lebar. Beberapa studi simulasi berkaitan dengan kelayakan dari teknologi mesin kompresi udara ini telah dilakukan [3]–[5]. Namun, dalam penerapannya diperlukan usaha untuk mengatasi keterbatasan kepadatan energi udara tekan dan kerugian efisiensi ekspansi [6]–[10].

Salah satu cara mengubah tekanan udara menjadi tenaga mekanik adalah menggunakan mesin piston yang bergerak bolak-balik (*reciprocating engine*). Cara kerja mesin kompresi udara yang menggunakan piston mengikuti siklus mesin 2-tak, oleh karena itu, beberapa penelitian mengenai mesin kompresi udara ini dilakukan dengan mengubah mesin pembakaran dalam 2-tak menjadi mesin kompresi udara [11]–[15]. Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan dengan metode ini diketahui bahwa saat tekanan masuk meningkat, daya rem mesin juga meningkat. Adapun efisiensinya tidak bisa lebih dari 20 % [12], [13]. Modifikasi mesin pembakaran dalam 2-tak dilakukan dengan menambahkan aktuator elektromekanis kompleks atau aktuator listrik ekspansif. Namun untuk tekanan udara dan kecepatan mesin yang lebih tinggi, aktuator listrik perlu dirancang ulang. Sebagai penggantinya, mekanisme cam dapat memberikan respons yang lebih cepat, dan menopang tekanan operasi yang lebih tinggi daripada aktuator listrik [16].

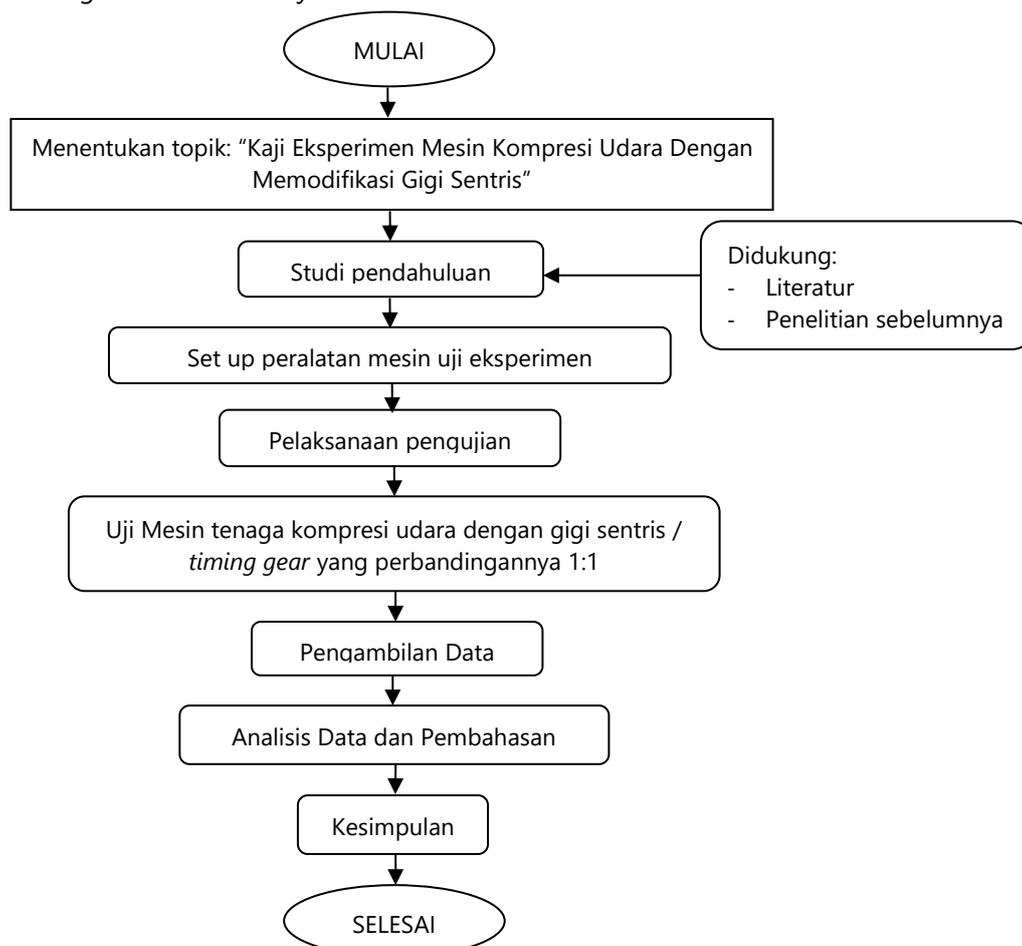
Penelitian mesin kompresi udara yang menggunakan cam dilakukan dengan cara memodifikasi mesin pembakaran dalam 4-tak, yang kemudian diubah sistem kerjanya menjadi mesin 2-tak dengan memodifikasi bentuk *camshaft*, *intake* dan *exhaust valve*, karena pada mesin tenaga kompresi udara hanya perlu langkah masuk dan langkah buang, baik dalam studi desain [17] maupun studi eksperimen

telah berhasil dilakukan [16], [18]. Modifikasi *camshaft* mesin 4-tak menjadi mesin kompresi udara 2-tak ini menghasilkan efisiensi hingga 25% [19], Bahkan dalam penerapannya pada sepeda motor yang dipasang mesin kompresi udara 100 cc ini dapat beroperasi dengan kecepatan maksimum sekitar dengan 38,2 km/jam. dan jarak hingga 5 km [20]. Namun merubah bentuk *camshaft* merupakan hal yang rumit, ada peluang untuk mengubah sistem 4 langkah menjadi 2 langkah dengan cara memodifikasi bentuk gigi sentris (*timing gear*) yang diharapkan lebih sederhana.

Penelitian yang mengubah bentuk gigi sentris (*timing gear*) mesin tenaga kompresi udara belum pernah dilakukan sehingga belum diketahui kinerja. Tekanan udara merupakan faktor utama yang mempengaruhi daya dan torsi mesin tenaga kompresi udara. Oleh karena itu, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui kinerja mesin tenaga kompresi udara. Hasil ini dapat digunakan untuk evaluasi aplikasi praktis dari mesin tenaga kompresi udara dan kemungkinan solusi ekonomis dan efisiensi dalam kinerja mesin. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja terbaik mesin kompresi udara sehingga dapat dijadikan penggerak utama pada kendaraan.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode pengujian dimana diagram alirnya dapat dilihat pada Gambar 1. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Otomotif, Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta. Sampel mesin uji akan dipersiapkan dahulu kemudian dilakukan pengujian pada mesin uji yaitu mesin tenaga kompresi udara dengan memodifikasi gigi sentris, lalu setelah sampel mesin selesai diuji dilanjutkan dengan analisis hasil uji.



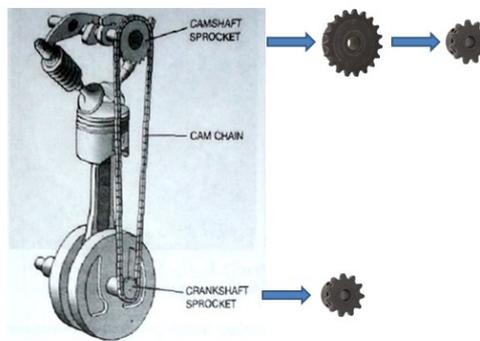
Gambar 1. Metode Penelitian

Skema instalasi pengujian ditunjukkan oleh Gambar 2 dan 3. Adapun mesin yang di uji merupakan mesin pembakaran dalam yang dimodifikasi menjadi mesin tenaga kompresi udara, dimana spesifikasi mesin uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Uji Honda Grand Tahun 1997.

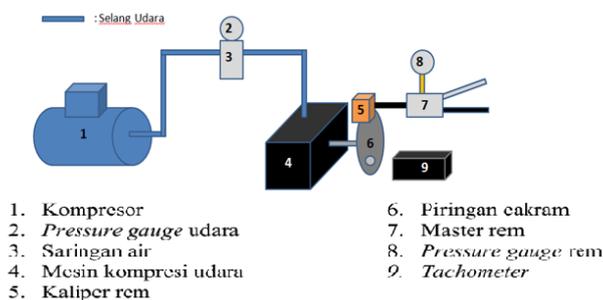
Jenis	4-tak, <i>Overhead Camshaft</i> (OHC), silinder tunggal
Diameter x langkah	50 × 49,5 mm
Kapasitas mesin	97,1cc

Sebelum percobaan, mesin motor empat langkah mengalami beberapa modifikasi terutama pada gigi sentris/*timing gear* yang awalnya 2 : 1 menjadi 1 : 1 agar sistem 4-tak pada motor berubah menjadi 2-tak, karena pada percobaan ini hanya membutuhkan langkah udara masuk untuk mendorong piston bergerak ke bawah dan langkah udara buang.



Gambar 2. Penggantian Gigi Sentris Dengan Perbandingan 1 : 1 Pada *Gear Cam Shaft* Dan *Crank Shaft*

Untuk menyesuaikan udara masuk dan udara buang maka mekanisme buka tutup derajat katup pun disesuaikan untuk mesin motor tenaga kompresi udara dengan memodifikasi bentuk noken as/*camshaft*. Penyesuaian panjang rantai gigi sentris pun disesuaikan agar tenaga yang dihasilkan lebih maksimal. Bagian saluran masuk/*intake manifold* pun mengalami perubahan bentuk yang disesuaikan untuk masuknya udara terkompresi dari kompresor ke mesin uji kompresi udara.



Gambar 3. Skema instalasi pengujian

Percobaan dilakukan dengan menyalurkan udara bertekanan dari kompresor ke mesin kompresi udara dan dilakukan variasi pada tekanan udara masuk dari tekanan 3 bar, 4 bar, 5 bar, 6 bar, 7 bar dan 8 bar. Tekanan udara masuk diukur dengan menggunakan *pressure gauge* merek *Warm*. Setelah mesin berputar dalam kondisi stabil pada variasi tekanan yang ditentukan, selanjutnya *prony brake* diberikan tekanan hidrolis dengan menggunakan tuas rem untuk memberikan beban pada putaran mesin, dimana variasi tekanan rem hidrolis yang diberikan piringan cakram yang terhubung dengan *crankshaft* mesin oleh *prony brake* yang diukur menggunakan *pressure gauge* berkisar antara 0,4 – 2 bar dengan kenaikan

tekanan di setiap 0,2 bar. Data yang diambil dari percobaan ini berupa putaran mesin yang diukur dengan menggunakan *non contact tachometer* yang sensornya diletakkan pada *poros crankshaft* mesin pada setiap variasi tekanan udara masuk mesin kompresi udara dan variasi tekanan rem hidrolik. Selanjutnya untuk mengetahui parameter gaya pengereman yang diberikan ke mesin uji, dan torsi serta daya yang dihasilkan oleh mesin uji pada setiap variasi yang dilakukan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [21]:

Gaya pengereman (Bar)

$$F = A \cdot Pr \quad (1)$$

Torsi (N.m)

$$T = F \cdot r \quad (2)$$

Daya (kW)

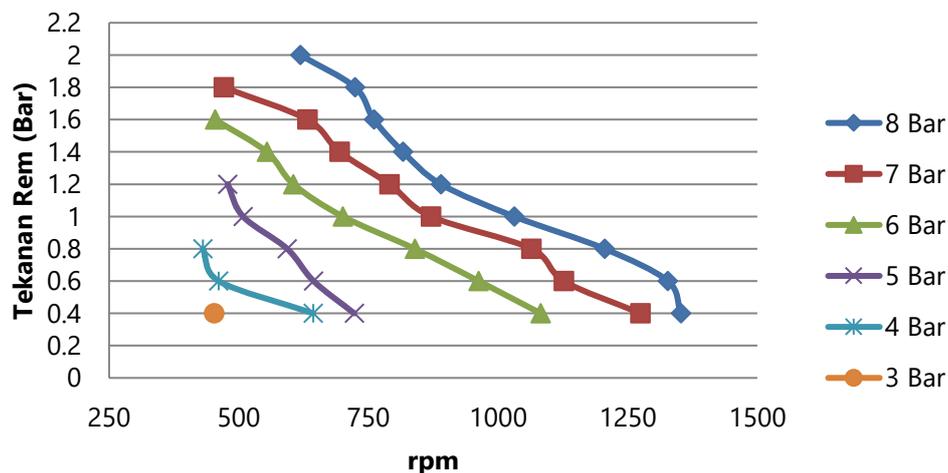
$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{1000 \cdot 60} \quad (3)$$

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Beberapa parameter yang dianalisis pada pengujian kinerja mesin kompresi udara ini yaitu :

- Pengaruh tekanan hidrolik rem pada putaran mesin pada beberapa variasi tekanan udara masuk
- Pengaruh putaran mesin terhadap torsi mesin
- Pengaruh putaran mesin terhadap daya mesin
- Pengaruh torsi terhadap daya mesin

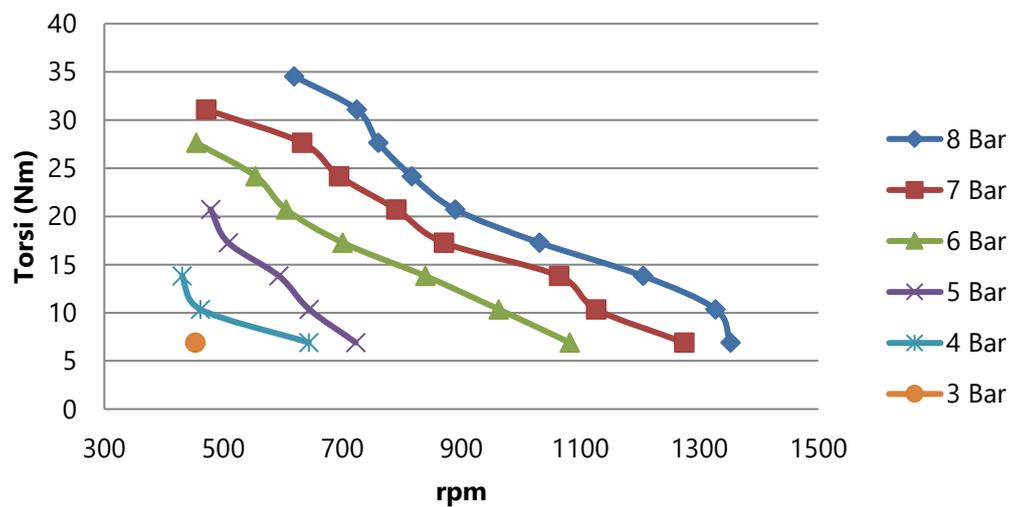
Gambar 4 menunjukkan pengaruh tekanan rem pada putaran mesin pada beberapa variasi tekanan udara masuk yang menunjukkan bahwa penambahan tekanan rem dapat mempengaruhi putaran mesin kompresi udara, semakin besar tekanan rem yang diberikan kepada piringan cakram maka menimbulkan penurunan putaran mesin pada mesin kompresi udara karena semakin besar pemberian penambahan tekanan rem maka semakin besar gesekan yang diterima piringan cakram yang merupakan sebagai pengganti beban untuk mesin agar mengetahui kinerjanya. Tekanan rem yang di berikan kepada piringan cakram berkisar 0,4 bar sampai 2 bar dengan kenaikan tekanan 0,2 bar.



Gambar 4. Pengaruh Tekanan Rem Pada Putaran Mesin Pada Beberapa Variasi Tekanan Udara Masuk

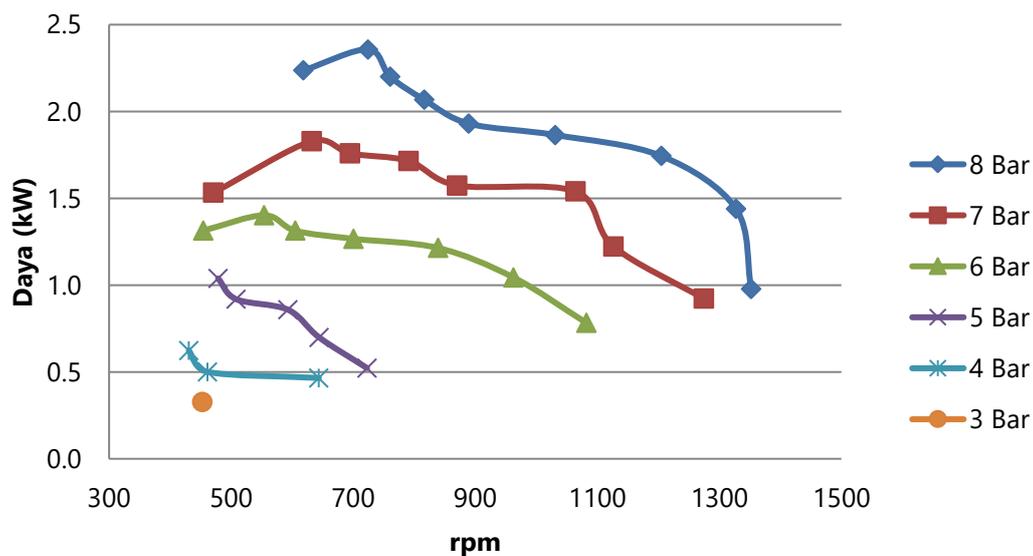
Pada tekanan udara 8 bar yang merupakan tekanan udara tertinggi pada percobaan ini, menghasilkan putaran mesin bermula pada 1352,33 rpm yang merupakan putaran mesin yang tertinggi dengan tekanan rem 0,4 bar. Hal ini dikarenakan pada tekanan udara 8 bar ini udara yang berada pada tabung kompresor masih termampatkan dan aliran udara yang cepat menghasilkan tekanan udara yang menuju ruang silinder dapat mendorong piston dengan keras yang berakhir di 618,67 rpm pada tekanan rem 2 bar. Ini terjadi dikarenakan pada tekanan udara 8 bar merupakan tekanan tertinggi pada

percobaan ini sehingga butuh tekan rem yang sangat besar untuk memperlambat putaran mesin udara hingga berhenti. Pada tekanan udara 3 bar merupakan tekanan udara yang paling rendah pada percobaan ini sehingga hanya menghasilkan putaran mesin 452,67 rpm dengan tekanan rem 0,4 bar. Hal ini dikarenakan tekanan udara di dalam tabung kompresor terlalu rendah sehingga tidak mampu menggerakkan mesin kompresi udara jika diberi beban pada tekanan rem 0,4 bar.



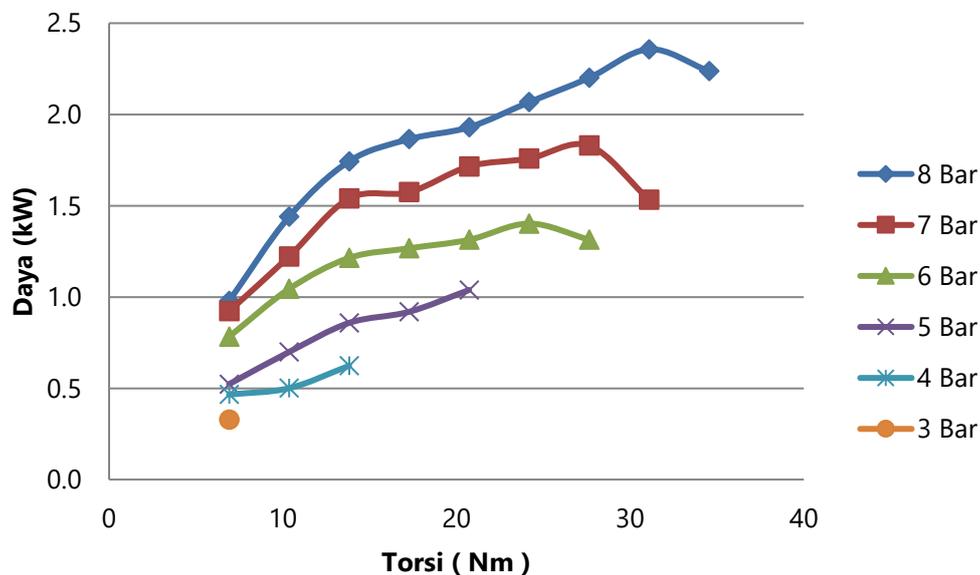
Gambar 5. Pengaruh Putaran Mesin Terhadap Torsi Mesin

Torsi adalah gaya yang bekerja pada poros engkol (*crankshaft*) atau bagian sistem penggerak yang mengirimkan gaya ke roda-roda dari titik pusat poros engkol. Torsi maksimum biasanya digunakan saat mesin mulai bergerak dan saat mendapatkan beban berat. Torsi berkembang di putaran mesin yang rendah memberikan kemampuan kendaraan untuk berakselerasi. Torsi maksimum dapat dicapai pada putaran mesin yang rendah, hal ini ditunjukkan oleh Gambar 5, di mana torsi tertinggi yang didapat oleh mesin kompresi udara yaitu 34,55 Nm pada putaran mesin 618,67 rpm di tekanan udara 8 bar.



Gambar 6. Pengaruh Putaran Mesin Terhadap Daya Mesin

Daya yang dihasilkan sebanding dengan torsi dan putaran mesin seperti yang telah ditunjukkan oleh persamaan 3, sehingga daya naik seiring dengan naiknya torsi dan putaran mesin namun kemudian turun saat torsi mesin turun drastis karena efisiensi volumetrik mesin kompresi udara ini turun. Oleh karena itu, daya berkembang pada sebelum tercapainya putaran mesin (rpm) maksimum dan menentukan kemampuan kecepatan maksimum. Gambar 6 dapat dijelaskan daya tertinggi terjadi di tekanan udara masuk 8 bar pada putaran mesin 618,67 rpm menghasilkan daya sebesar 2,24 kW dan daya puncak pada putaran mesin 724,33 rpm yang menghasilkan daya sebesar 2,36 kW, pada saat ini mesin menerima beban yang besar saat putaran mesin meningkat. Setelah putaran mesin tinggi dan stabil maka daya yang dihasilkan mesin pun menurun dan menghasilkan daya 0,98 kW pada putaran mesin 1352,33 rpm. Namun pada tekanan udara 5 bar ke bawah yang berada di dalam tabung kompresor mesin tidak dapat menghasilkan daya maksimum karena pada percobaan ini udara merupakan faktor utama untuk menggerakkan mesin kompresi udara, pada tekanan udara di bawah 5 bar tekanan udara yang berada di dalam tabung kompresor sudah rendah sehingga udara yang menuju ke mesin kompresi udara pun ikut rendah dan tidak mampu mendorong piston untuk menghasilkan daya yang cukup.



Gambar 7. Pengaruh Torsi Terhadap Daya Mesin

Gambar 7 menunjukkan bahwa torsi sebanding dengan daya yang dihasilkan, semakin meningkat torsi maka semakin berkembang daya yang dihasilkan. Penurunan daya sesaat setelah torsi maksimum masih dapat diimbangi oleh kenaikan putaran mesin. Akibatnya perkalian antara torsi dan putaran tetap menghasilkan daya yang tinggi. Dapat kita lihat daya tertinggi yang dihasilkan mesin kompresi udara yaitu 2,36 kW dengan torsi sebesar 31,09 Nm pada tekanan udara 8 bar. Namun kemudian daya turun sebagai akibat drastisnya penurunan torsi sebagai akibat turunnya efisiensi volumetrik dari mesin kompresi udara ini.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis kinerja pada mesin kompresi udara, dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya sebagai berikut :

1. Mesin kompresi udara dapat dijadikan sebagai mesin yang ramah lingkungan, karena pada mesin kompresi udara hanya membutuhkan tekanan udara murni sebagai tenaga utama. Semakin tinggi tekanan udara maka semakin meningkat kinerja mesin kompresi udara.

2. Pengaruh tekanan hidrolik rem yang diberikan pada piringan cakram yang terhubung pada poros *crankshaft* adalah untuk mengetahui besarnya kinerja mesin kompresi udara yang dihasilkan. Kinerja terbaik yang dihasilkan mesin kompresi udara ialah pada tekanan udara 8 bar dengan daya 2,36 kW pada putaran mesin 724,33 rpm dengan torsi 31,09 Nm, tetapi torsi tertinggi yang di dapat ialah 34,55 Nm di putaran mesin 618,67 rpm.
3. Efisiensi torsi dan daya ditunjukkan pada tekanan udara 6 bar bukan pada tekanan tertinggi yaitu 8 bar. Hal tersebut dikarenakan pada tekanan udara 6 bar udara yang dimasukkan ke dalam mesin kompresi udara lebih stabil, tidak terlalu tinggi dan terlalu rendah.

5. Daftar Pustaka

- [1] A. H. Ingle, R. Ambatkar, R. Badwaik, and D. Pise, "Literature Review Paper on the Compressed Air Vehicle with Air Motor," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 30, pp. 1–3, 2016.
- [2] S. Kumar, P. K. Pradhan, Z. H. Khan, and B. A. Kumar, "Design and Developing of Compressed Air Engine," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 04, no. 05, pp. 1468–1474, 2017.
- [3] A. Subiantoro, K. K. Wong, and K. T. Ooi, "Exergy Analysis of the Revolving Vane Compressed Air Engine," *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/5018467.
- [4] Q. Yu, X. Hao, and X. Tan, "Performance analysis of an innovative kind of two-stage piston type expansion air engine," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1177/1687814018773860.
- [5] Q. Yu, M. Cai, Y. Shi, and Z. Fan, "Optimization of the energy efficiency of a piston compressed air engine," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 60, no. 6, pp. 395–406, 2014, doi: 10.5545/sv-jme.2013.1383.
- [6] A. Papson, F. Creutzig, and L. Schipper, "Compressed air vehicles: Drive-cycle analysis of vehicle performance, environmental impacts, and economic costs," *Transp. Res. Rec.*, no. 2191, pp. 67–74, 2010, doi: 10.3141/2191-09.
- [7] Y. Fang, Y. Lu, A. P. Roskilly, and X. Yu, "A review of compressed air energy systems in vehicle transport," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 33, no. November 2020, p. 100583, 2021, doi: 10.1016/j.esr.2020.100583.
- [8] R. Marshall, "The Compressed Air Energy Equation," *Fluid Power J.*, 2017.
- [9] K. L. Rixon, M. S. V. K. S. Prajith, K. Sarath, S. Sreejith, and P. Sreeraj, "Fabrication of Compressed Air Bike," pp. 1863–1866, 2016.
- [10] I. D. Reza Alizade Evrin, "Experimental investigation of a compressed air vehicle prototype with phase change materials for heat recovery," *Energy Storage*, vol. 2, no. 5, 2020.
- [11] D. R. B. Syaka, U. F. Amaly, and A. Kholil, "Mesin Kompresi Udara Untuk Aplikasi Alat Transportasi Ramah Lingkungan Bebas Polusi," *Proceeding Semin. Nas. Tah. Tek. Mesin XIV (SNTTM XIV)*, no. Snttm Xiv, pp. 7–8, 2015, [Online]. Available: <http://eprints.ulm.ac.id/602/%0Ahttp://eprints.ulm.ac.id/602/1/KE-21.pdf>.
- [12] G. Sujaykumar, R. M. Sushiledra, and V. Nayak, "Compressed Air Engine with Self Compression Arrangement System," *Energy and Power*, vol. 6, pp. 33–35, 2016, doi: 10.5923/c.ep.201601.06.
- [13] D. R. Budi syaka, F. Bastian, and A. Kholil, "Studi Eksperimental Kinerja Mesin Kompresi Udara Satu Langkah Dengan Variasi Sudut Pembukaan Selenoid," *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 3, no. 2, pp. 52–58, 2016, doi: 10.21009/jkem.3.2.1.
- [14] S. Sumadi and S. P. Sutisna, "Perancangan Sistem Kontrol Mobil Menggunakan Compressed Air Engine Sebagai Penggerak Mula," *Almikanika*, vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2019, [Online]. Available: <http://150.107.142.43/index.php/ALMIKANIKA/article/view/1565%0Ahttp://150.107.142.43/index.php/ALMIKANIKA/article/download/1565/1344>.
- [15] J. U. Goghari, P. Chetan, and V. Jainil, "Design of Small Capacity Automobile Engine to Run on Compressed Air," vol. 3, no. 03, pp. 1102–1104, 2015.

- [16] C. Y. Huang, C. K. Hu, C. J. Yu, and C. K. Sung, "Experimental investigation on the performance of a compressed-air driven piston engine," *Energies*, vol. 6, no. 3, pp. 1731–1745, 2013, doi: 10.3390/en6031731.
- [17] B. Saivardhan, "Compressed air engine masseur," *Laryngoscope*, vol. 7, no. 1, pp. 75–75, 2017, doi: 10.1288/00005537-189907000-00048.
- [18] N. Parashar, S. M. Ali, S. Chauhan, and R. Saini, "Design and Analysis of Compressed Air Engine," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 693–696, 2014.
- [19] Q. Yu and M. Cai, "Experimental Analysis of a Compressed Air Engine," *J. Flow Control. Meas. & Vis.*, vol. 03, no. 04, pp. 144–153, 2015, doi: 10.4236/jfcmv.2015.34014.
- [20] Y. W. Wang, J. J. You, C. K. Sung, and C. Y. Huang, "The applications of piston type compressed air engines on motor vehicles," *Procedia Eng.*, vol. 79, no. 1st ICM, pp. 61–65, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.311.
- [21] W. Hidayat, *Motor bensin modern*, 1st ed. Jakarta: Rineka Cipta, 2012.