

## Analisis Ekonomi Pengoperasian Ketel Uap Bantu Laboratorium Permesinan Kapal Polimarin Dengan Variasi Bahan Bakar

Susanto<sup>1)</sup>, Okpina Rochadian<sup>2)</sup>, Fajar Pujiyanto<sup>3)</sup>

<sup>1,2)</sup>Jurusan Teknika, Politeknik Maritim Negeri Indonesia

Jl. Pawiyatan Luhur 1/1, Bendan Duwur, Kota Semarang 50233

<sup>3)</sup>Program studi Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Politeknik Bumi Akpelni  
Jalan Pawiyatan Luhur II/17, Bendan Duwur, Kota Semarang 50233

email: <sup>1)</sup>susanto@polimarin.ac.id

### Abstrak

Energi kalor dan tekanan uap merupakan properti yang sangat penting dalam berbagai aplikasi kehidupan. Proses produksi uap pada ketel dapat terjadi di dalam bejana atau di dalam pipa. Bahan bakar sebagai sumber energi kimia untuk ketel uap dapat menggunakan jenis padat, cair maupun gas. Penggunaan bahan bakar padat relatif lebih mudah digunakan, dengan tinggal memasukkan ke dalam dapur api. Penggunaan gas sebagai bahan bakar ketel dapat menggunakan gas burner seperti pada kompor gas. Jenis bahan bakar minyak yang digunakan sebagai bahan bakar ketel uap adalah minyak diesel. Minyak diesel agar dapat digunakan sebagai bahan bakar ketel uap memerlukan burner sebagai pengabut yang dikombinasikan dengan udara bertekanan. Studi ini dilakukan untuk tujuan mempelajari kinerja ketel saat dioperasikan dari kondisi dingin hingga mencapai tekanan maksimal yang dapat dicapai. Secara spesifik untuk mengetahui konsumsi bahan bakar dan besarnya biaya bahan bakar yang diperlukan. Metode eksperimen dipilih pada studi yang dilakukan. Tekanan uap dan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan selama proses pembakaran dan produksi uap merupakan 2 parameter yang diukur. Terdapat 3 jenis grade minyak diesel yang dianalisa pada studi ini. Jenis dan kualitas bahan bakar mempengaruhi waktu yang diperlukan untuk mencapai tekanan maksimal. Bio solar memerlukan waktu paling lama, dextrite memerlukan waktu lebih singkat, dan Pertamina dex memerlukan waktu paling singkat. Perbedaan total konsumsi bahan bakar untuk satu kali operasi dari minyak jenis bio solar, dextrite, dan Pertamina dex masing-masing 4.68, 4.38, dan 4.19 Liter. Jumlah biaya yang diperlukan untuk membayar minyak bio solar, dextrite, dan Pertamina dex masing-masing Rp 31.824,00, Rp 62.415, 00, dan Rp 64.526,00 untuk satu kali operasi. Penggunaan bahan bakar untuk laboratorium direkomendasikan menggunakan dextrite dengan kualitas lebih baik dari bio solar dengan harga lebih murah dibandingkan menggunakan Pertamina dex.

**Kata Kunci:** Analisis Ekonomi; Bahan Bakar; Ketel Uap; Minyak Diesel; Permesinan Kapal

### Abstract

Heat energy and steam pressure are very important properties in various life applications. The steam production process in a boiler can occur in a container or in a pipe. Fuel as a source of chemical energy for steam boilers can use solid, liquid or gas types. The use of solid fuel is relatively easier to use, by simply putting it into the fire kitchen. Use of gas as boiler fuel can use a gas burner as in a gas stove. The type of fuel oil used as boiler fuel is diesel oil. Diesel oil in order to be used as boiler fuel requires a burner as a fogger combined with compressed air. This study was conducted for the purpose of studying the performance of the boiler when operated from cold conditions to the maximum achievable pressure. Specifically, to determine the specific fuel consumption and the amount of fuel cost required. The experimental method was chosen for the study. Steam pressure and the amount of fuel required during combustion and steam production were the two parameters measured. There are 3 types of diesel oil grades that will be analysed in this study. Fuel type and quality affect the time required to reach maximum pressure. Bio diesel takes the longest time, dextrite takes a shorter time, and Pertamina dex takes the shortest time. Total difference in fuel consumption for one operation of bio diesel oil, dextrite, and Pertamina dex is 4.68, 4.38, and 4.19 litres respectively. The amount of cost required to pay for bio diesel oil, dextrite, and Pertamina dex is Rp 31,824, Rp 62,415, and Rp 64,526 for one operation respectively. Fuel consumption for laboratories is recommended to use dextrite with better quality than bio diesel at a lower price than using Pertamina dex.

**Keywords:** Diesel Oil; Economic Analysis; Fuel; Ship Machinery; Steam Boiler

**1. PENDAHULUAN**

Konversi energi kimia menjadi uap dengan kalor pada tekanan tertentu dapat dilakukan menggunakan seperangkat peralatan yang disebut ketel uap. Energi kalor dan tekanan uap merupakan properti yang sangat penting dalam berbagai aplikasi kehidupan. Proses produksi uap pada ketel dapat terjadi di dalam bejana atau di dalam pipa. Ketel uap dimana gas panas mengalir di dalam pipa yang dikelilingi air di luar pipa pada bejana besar sehingga terjadi interaksi panas, secara konstruksi disebut ketel pipa api (Bhaskar, 2023). Pemanasan air dan pembentukan uap juga dapat dilakukan di dalam pipa yang dialiri air dengan pemanasan dari dinding luar pipa. Ketel dengan model tersebut lebih dikenal sebagai ketel pipa air. Jumlah air yang dibutuhkan pada ketel pipa air lebih sedikit jika dibandingkan dengan ketel pipa api (Nizya Mukti Pratama, Danial, 2021).

Bahan bakar sebagai sumber energi kimia untuk ketel uap dapat menggunakan jenis padat, cair maupun gas. Penggunaan bahan bakar padat relatif lebih mudah digunakan, dengan tinggal memasukkan ke dalam dapur api. Sumber bahan bakar padat pada untuk ketel uap paling banyak menggunakan batubara. Penghematan biaya produksi hingga 18 % dapat dicapai dengan campuran batubara dengan ampas kopi komposisi masing-masing 80:20 (Zakaria & Ariesmayana, 2019). Penggunaan energi alternatif campuran, pengganti atau untuk efisiensi ekonomi terus dilakukan. Limbah kayu juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pengganti batubara dari kelompok biomassa (Gunarto, 2019).

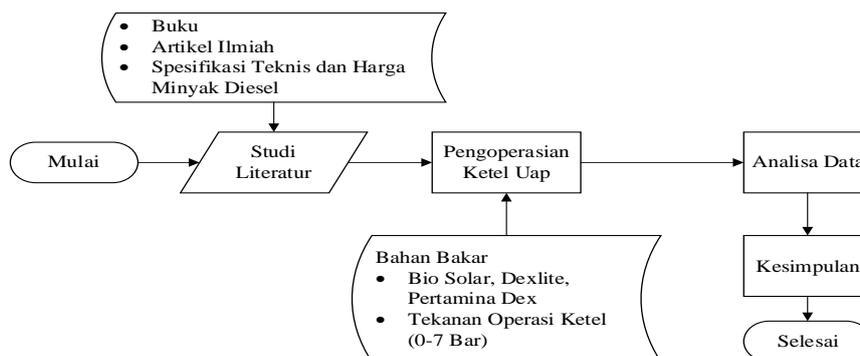
Senyawa hidrokarbon memiliki kandungan yang sangat diperlukan untuk dapat terjadi pembakaran. Senyawa tersebut terdapat pada *liquified petroleum gas (LPG)* maupun *liquified natural gas (LNG)*. Penggunaan gas sebagai bahan bakar ketel dapat menggunakan gas burner seperti pada kompor gas (Hanifah & Andrianto, 2018). Gas yang digunakan untuk bahan bakar boiler juga dapat memanfaatkan energi alternatif. Kombinasi gas hasil gasifikasi limbah kelapa sawit dengan biogass digunakan untuk bahan bakar (Harsi, 2022). Gas alternatif dapat menjadi solusi mengurangi konsumsi dari gas yang berasal dari fosil. Penggunaan kombinasi gas alternatif sebagai bahan bakar ketel uap memerlukan adanya rekonstruksi pada burner.

Bahan bakar minyak juga banyak digunakan untuk sumber panas ketel uap. Jenis bahan bakar minyak yang digunakan sebagai bahan bakar ketel uap adalah minyak diesel. Minyak diesel digolongkan menjadi 2 grade yaitu *light oil* dan *heavy oil* (Cafaggi et al., 2019). Kategori *Light oil* termasuk ke dalam jenis *High Speed Diesel* dengan produk serupa meliputi bio solar, dextrite, dan Pertamina Dex. *Heavy Fuel oil* dengan berat jenis yang lebih berat dan kekentalan yang lebih juga termasuk dalam jenis minyak diesel. Minyak diesel agar dapat digunakan sebagai bahan bakar ketel uap memerlukan burner sebagai pengabut yang dikombinasikan dengan udara bertekanan. Tekanan udara sebesar 8 bar digunakan untuk mendorong minyak melalui pengabut agar menjadi partikel kabut yang lembut.

Kajian tentang kinerja dan konsumsi bahan bakar saat dioperasikan belum pernah dilakukan. Fakta tersebut dijadikan permasalahan untuk dipelajari sampai pada analisis ekonomi agar bisa menjadi referensi dalam perencanaan operasi. Studi ini dilakukan untuk tujuan mempelajari kinerja ketel saat dioperasikan dari kondisi dingin hingga mencapai tekanan maksimal yang dapat dicapai. Secara spesifik untuk mengetahui spesifik fuel consumption dan besarnya biaya bahan bakar yang diperlukan. Penelitian ini akan memberikan manfaat kajian pada pengoperasian ketel uap di laboratorium permesinan kapal Polimarin. Manfaat meliputi analisis kinerja dan biaya yang diperlukan saat pengoperasian ketel uap pada kegiatan praktikum mahasiswa.

**2. METODE PENELITIAN**

Metode eksperimen dipilih pada studi yang dilakukan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja ketel uap dari kondisi dingin, analisis ekonomi pengoperasian ketel uap dengan menggunakan beberapa jenis bahan bakar. Studi dilakukan dengan tahapan mengikuti diagram alir pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Alir Penelitian

**2.1 Alat Dan Material**

Obyek utama pada studi ini menggunakan ketel pipa air sebagai alat pokok untuk eksperimen. Spesifikasi teknis ketel tersebut disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Ketel Uap (Ganapathy, 2014)

Pabrik Pembuat	GARIONI
Type	VPR 80
Bahan Bakar	Minyak Diesel
Kapasitas	56 kW
Produksi Uap	80 kg/Jam
Tekanan Buka Katup Keamanan	7 Bar
Tekanan Kerja	7 Bar
Temperatur Kerja	250°C (maks)
Kapasitas Cairan	37 Liter
Pengetesan Tekanan Hidrolik	18.93 Bar

Ketel uap tersebut digunakan pada laboratorium sebagai media belajar sistem uap bantu di atas kapal. Ketel uap tersebut memiliki 3 sistem utama untuk dapat menunjang operasinya. Ketiga sistem tersebut meliputi, sistem bahan bakar, sistem pengisian air ketel, dan sistem distribusi uap. Konstruksi dan komponen utama yang dimiliki ketel uap tersebut disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Ketel Uap dan Komponennya (Ganapathy, 2014)

Berdasarkan Gambar 2 ketel uap tersebut memiliki komponen antara lain; (1) Panel kontrol; (2) Drum Ketel uap; (3) Pelat Nama; (4) *Level transmitter*; (5) Burner set; (7) Cerobong; (8) Pompa Pengisi air; (9) Kaca Penduga; (10) *Pressure gauge*; (11) *Pressure Switch*. Komponen tersebut merupakan bagian-bagian penting yang berfungsi sebagai alat bantu penunjang keselamatan operasi ketel yang biasa disebut dengan apendansi ketel (Heri, 2020).

Bahan bakar yang digunakan untuk melakukan eksperimen adalah minyak diesel yang diproduksi oleh Pertamina. Dipasaran umum minyak diesel yang diedarkan oleh Pertamina. Minyak diesel yang digunakan sebagai variable berubah yang akan dianalisa pengaruhnya. Tekanan uap yang akan dicapai merupakan variable tetap yang dijadikan acuan sebagai kinerja maksimal ketel uap. Terdapat 3 jenis grade minyak diesel dengan karakteristik material yang berbeda disajikan pada Tabel 2 berikut.

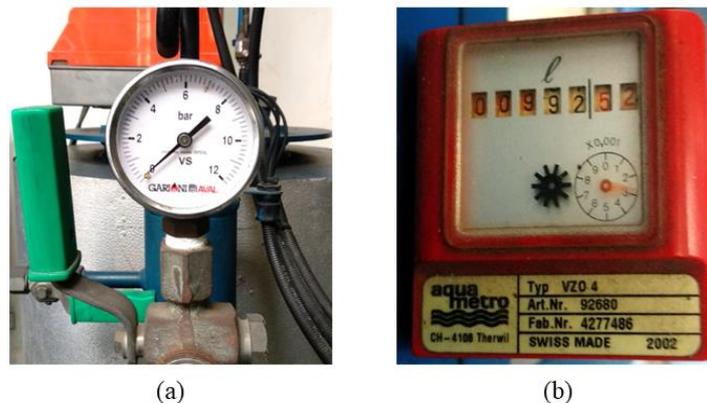
Tabel 2. Spesifikasi Bahan Bakar (Pertamina, 2020)

Spesifikasi Teknis	Bio Solar	Dexlite	Pertamina Dex
Angka Setana	48	51	53
Berat Jenis @ 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	815	815	820
Viskositas @ 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	2.0	2.0	2.0
Kandungan Sulfur (% m/m)	0.35	0.12	0.03
Titik Nyala (°C)	52	52	55

Bahan bakar diesel yang digunakan untuk studi sesuai dengan Tabel 1 memiliki harga yang bervariasi. Saat dilakukan pembelian harga dari bio solar, dextrite, dan pertamina dex masing-masing Rp 6.800, Rp 14.250, dan 15.400 (PT. Pertamina, 2022).

**2.2 Metode Pengambilan Data**

Pengambilan data hasil eksperimen dilakukan dengan melakukan observasi pada parameter yang dijadikan variable. Tekanan uap dan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan selama proses pembakaran dan produksi uap merupakan 2 parameter yang diukur. Pengambilan data tekanan uap dan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi menggunakan alat ukur pada Gambar 3 berikut.



**Gambar 3.** Alat Ukur (a) Manometer Tekanan Uap (b) Flowmeter Bahan Bakar (Ganapathy, 2014)

Alat ukur pada Gambar 3 digunakan untuk mengetahui kenaikan tekanan uap dan konsumsi bahan bakar selama proses pembakaran. Pengukuran dilakukan dari tekanan 0 bar, setiap tekanan naik 1 bar data tekanan, waktu dan pembacaan flowmeter dicatat. Tekanan tertinggi yang dijadikan acuan tekanan maksimal uap dan tekanan pembukaan *safety valve* yaitu 7 bar. Banyaknya massa bahan bakar yang dibutuhkan selama proses pembakaran dihitung perbandingannya (Kongsuk & Boonpramote, 2019).

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil eksperimen yang dilakukan menghasilkan beberapa data yang diperoleh dari percobaan. Data terukur dicatat untuk dianalisa pengaruh dan perbandingannya selama ketel dioperasikan. Data yang diperoleh selanjutnya disajikan ke dalam beberapa tabel dan dibuat grafik perbandingan sebagai berikut.

**3.1 Konsumsi Bahan Bakar dan Peningkatan Tekanan**

Hasil pengelompokkan data yang diperoleh selama eksperimen dengan menggunakan 3 grade minyak diesel disajikan berikut.

Tabel 3. Data Operasi Ketel Bahan Bakar Bio Solar

Tekanan Uap (bar)	Waktu yang dibutuhkan (Detik)	Selisih Waktu (Detik)	Konsumsi Total BB (Liter)	Selisih Konsumsi BB (Liter)
0	0	0	0	0
1	318	318	3.90	3.9
2	444	126	4.19	0.29
3	504	60	4.33	0.14
4	552	48	4.44	0.11
5	594	42	4.53	0.09
6	624	30	4.61	0.08
7	642	18	4.68	0.07

Pada Tabel 3 di atas menyajikan hasil pengukuran selama ketel dioperasikan menggunakan bahan bakar jenis bio solar. Tekanan uap sebesar 7 bar dapat dicapai dengan durasi waktu keseluruhan 642 detik dengan konsumsi bahan bakar 4.68 liter. Konsumsi bahan bakar setiap peningkatan tekanan uap 1 bar sangat bervariasi.

Tabel 4. Data Operasi Ketel Bahan Bakar Dexlite

Tekanan Uap (bar)	Waktu yang dibutuhkan (Detik)	Selisih Waktu (Detik)	Konsumsi Total BB (Liter)	Selisih Konsumsi BB (Liter)
0	0	0	0	0
1	310	310	3.70	3.7
2	430	120	3.95	0.25
3	486	56	4.07	0.12
4	534	48	4.17	0.10
5	574	40	4.25	0.08
6	600	26	4.32	0.07
7	618	18	4.38	0.06

Pada Tabel 4 menyajikan jumlah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tekanan 7 bar dengan bahan bakar Dexlite. Konsumsi bahan bakar selama operasi dari kondisi dingin sampai tekanan maksimal sebanyak 4.38 liter dengan durasi pembakaran selama 618 detik.

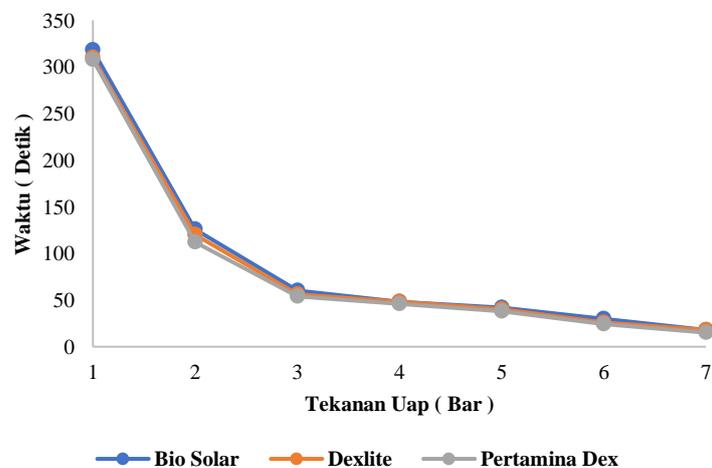
Tabel 5. Data Operasi Ketel Bahan Bakar Pertamina Dex

Tekanan Uap (bar)	Waktu yang dibutuhkan (Detik)	Selisih Waktu (Detik)	Konsumsi Total BB (Liter)	Selisih Konsumsi BB (Liter)
0	0	0	0	0
1	308	308	3.60	3.6
2	420	112	3.82	0.22
3	474	54	3.92	0.1
4	520	46	4.01	0.09
5	558	38	4.08	0.07
6	582	24	4.14	0.06
7	597	15	4.19	0.05

Data kinerja ketel dengan menggunakan bahan bakar pertamina dex disajikan pada **Tabel 5** di atas. Durasi waktu selama 597 detik diperlukan untuk menaikkan tekanan uap dari 0 bar hingga mencapai 7 bar. Konsumsi total bahan bakar yang diperlukan selama operasi tersebut sebanyak 4.19 liter.

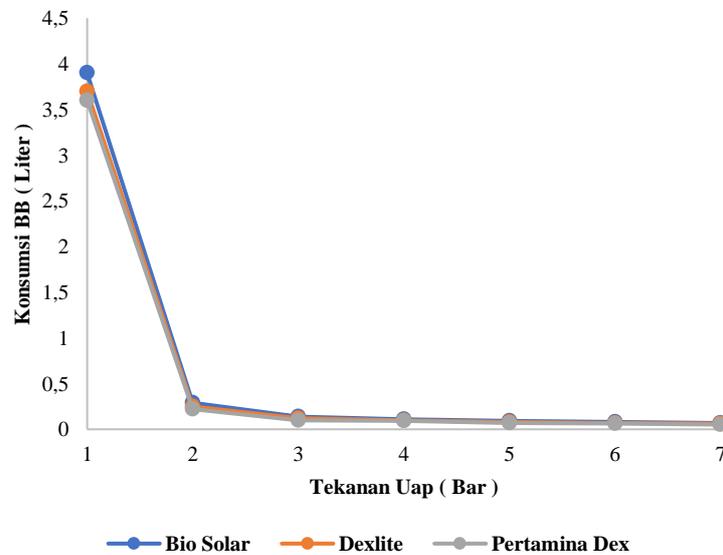
### 3.2 Analisis Ekonomi

Data yang diperoleh selanjutnya akan dianalisa lebih mendalam berdasarkan variable yang telah ditentukan. Seluruh kajian analisa didasarkan pada perbedaan bahan bakar yang digunakan. Pembuatan grafik didasarkan pada tekanan uap yang dipengaruhi bahan bakar yang disajikan sebagai berikut.



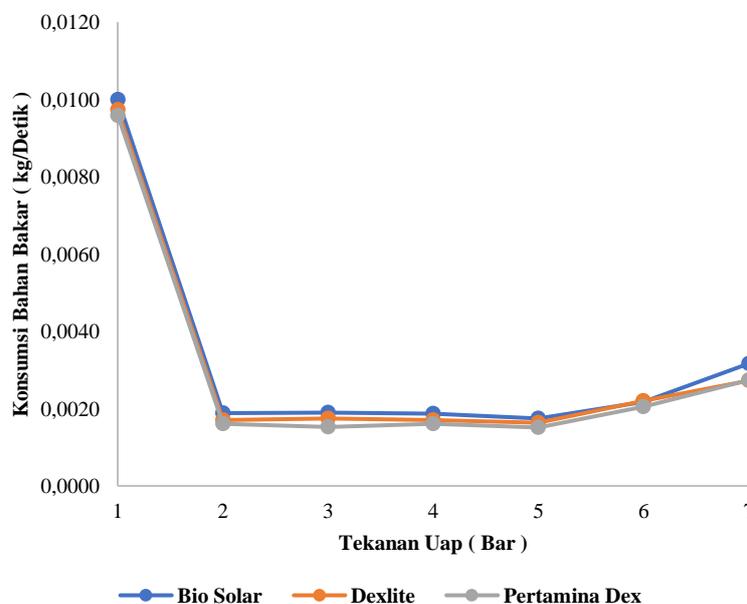
Gambar 4. Grafik Kebutuhan Waktu Terhadap Kenaikan Tekanan Uap

Berdasarkan grafik Gambar 4 disajikan perbandingan bahan bakar terhadap peningkatan tekanan uap dan durasi waktu yang diperlukan. Ketiga jenis bahan bakar mempengaruhi perubahan waktu terhadap kenaikan tekanan uap secara variatif. Saat ketel baru dinyalakan untuk mencapai tekanan uap 1 bar memerlukan waktu lebih dari 300 detik. Hal tersebut terjadi karena air masih kondisi dingin, sehingga kalor dibutuhkan untuk menaikkan temperatur air hingga terjadi penguapan. Kenaikan tekanan dari 1 bar menjadi 2 bar memerlukan waktu dengan penurunan yang sangat drastis. Saat air sudah panas maka lebih cepat terjadi pembentukan uap yang diikuti peningkatan tekanan. Waktu yang diperlukan untuk peningkatan dari 2 bar hingga 7 bar semakin lebih singkat dengan penurunan terjadi secara linier.



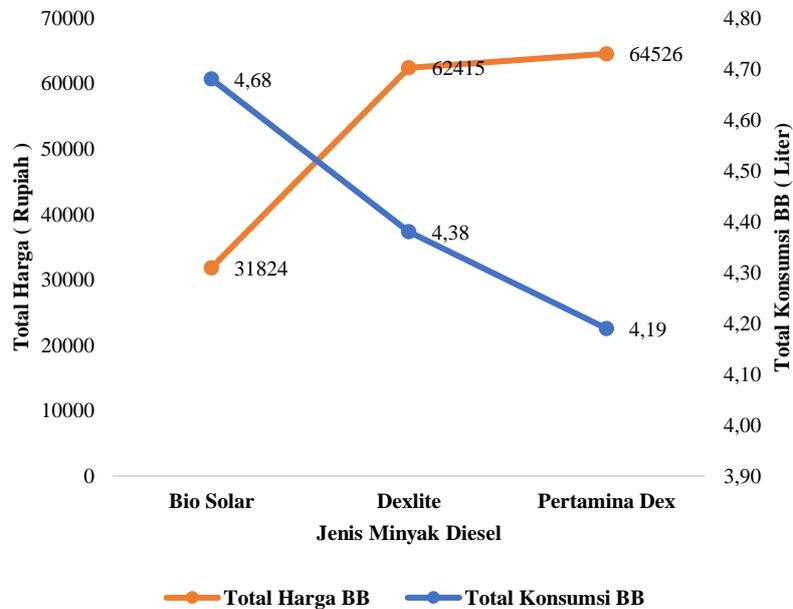
Gambar 5. Grafik Konsumsi Bahan Bakar Terhadap Kenaikan Tekanan Uap

Pada grafik Gambar 5 disajikan jumlah volume bahan bakar yang dibutuhkan untuk menaikkan tekanan uap. Kenaikan tekanan 1 bar pertama dari tekanan 0 bar menjadi 1 bar memerlukan bahan bakar paling banyak. Kondisi tersebut sesuai dengan jumlah waktu yang dibutuhkan dari grafik waktu sebelumnya. Penurunan konsumsi bahan bakar terjadi secara drastis dari tekanan 1 ke 2 bar. Setelah melewati tekanan 2 bar, konsumsi bahan bakar terus mengalami penurunan secara perlahan.



Gambar 6. Grafik Konsumsi Bahan Bakar Terhadap Kenaikan Tekanan Uap

Jumlah massa bahan bakar per detik yang diperlukan untuk peningkatan tekanan uap setiap 1 bar disajikan pada grafik Gambar 6 di atas. Tekanan 0 ke 1 bar jumlah massa konsumsi bahan bakar per detik sangat tinggi. Penurunan konsumsi terjadi dari tekanan 1 ke 2 bar. Jumlah massa konsumsi cenderung sama pada tekanan 2, 3, 4 dan 5 bar. Peningkatan konsumsi terjadi pada tekanan 6 dan 7 bar.



Gambar 7. Grafik Jenis BB Terhadap Total Konsumsi Dan Total Harga

Berdasarkan grafik pada Gambar 7 diketahui jumlah total bahan bakar yang digunakan dan nominal uang yang digunakan untuk membeli bahan bakar. Total konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan untuk memproduksi uap dari tekanan 0 bar dengan kondisi air pada suhu kamar hingga mencapai 7 bar terdapat perbedaan. Perbedaan total konsumsi bahan bakar untuk satu operasi dari minyak jenis bio solar, dexlite, dan pertamina dex masing-masing 4.68, 4.38, dan 4.19 Liter. Jumlah biaya yang diperlukan untuk membayar minyak bio solar, dexlite, dan pertamina dex masing-masing Rp 31.824,00, Rp 62.415, 00, dan Rp 64.526,00 untuk satu kali operasi.

#### 4. KESIMPULAN

Studi yang dilakukan pada ketel uap dengan variasi perbedaan jenis bahan bakar mendapatkan beberapa kesimpulan. Jenis dan kualitas bahan bakar mempengaruhi waktu yang diperlukan untuk mencapai tekanan maksimal. Bio solar memerlukan waktu paling lama, dexlite memerlukan waktu lebih singkat, dan pertamina dex memerlukan waktu paling singkat. Analisis biaya penggunaan bio solar merupakan bahan bakar paling ekonomis untuk digunakan, hal ini dikarenakan harga dasar bahan bakar yang paling murah. Penggunaan bahan bakar untuk laboratorium direkomendasikan menggunakan dexlite dengan kualitas lebih baik dari bio solar dengan harga lebih murah dibandingkan menggunakan pertamina dex.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kami ucapkan kepada Kepala laboratorium permesinan kapal polimarin yang memberikan kesempatan melakukan riset. Apresiasi juga kami ucapka kepada rekan-rekan pranata laboratorium yang telah memberikan dukungan tenaga dan pikiran untuk menyelesaikan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

Bhaskar, M. (2023). Review on Performance Analysis of Fire Tube Boilers. *Journal of Advanced Mechanical Sciences (JAMS)*, 2(1), 21–25. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7789289>

Cafaggi, G., Glarborg, P., & Jensen, P. A. (2019). Experimental Measurement Campaign of an Auxiliary Marine Boiler: HFO and Diesel operation. *Nordic Flame Days 2019*.

Ganapathy, V. (2014). Garioni - Steam Generators. *Steam Generators and Waste Heat Boilers*, 120–197.

<https://doi.org/10.1201/b17519-6>

- Gunarto, A. R. dan F. (2019). Pengaruh Perubahan Penggunaan Bahan Bakar Dari Uap Dengan Simulasi Ketel Uap Sederhana. *Suara Teknik*, 4698, 13–18.
- Hanifah, U., & Andrianto, M. (2018). Experimental Study on Fuel Consumption and Energy Efficiency at Soymilk Cooking Using a Mini Boiler and Using a Gas Stove. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology, ICST 2018*, 4–8. <https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528681>
- Harsi, D. R. (2022). Analisis Penggunaan Biogas Sebagai Bahan Bakar Alternatif Boiler Di Pabrik Kelapa Sawit Ptpn II Pagar Merbau. *Universitas Medan Area*.
- Heri, J. (2020). Proses Sertifikasi Ketel Uap dan Bejana Tekan PT SUCOFINDO (Persero). *Jurnal Sains Teknologi Transportasi Maritim*, 2(2), 16–23. <https://doi.org/10.51578/j.sitektransmar.v2i2.24>
- Kongsuk, R., & Boonpramote, T. (2019). Comparative Study of Available Fuels for Boiler Selection. *Proceedings of the 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations, ICPEI 2019, Icpai*, 75–77. <https://doi.org/10.1109/ICPEI47862.2019.8944937>
- Nizya Mukti Pratama, Danial, M. T. (2021). Analisa Efisiensi Water Tube Boiler Dengan Menggunakan Metode Langsung. *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, 2(2), 105–110.
- Pertamina. (2020). Spesifikasi Produk BBM, BBN & LPG. *Supply & Distribution Management*, 23.
- PT. Pertamina. (2022). Price Update - MyPertamina. <https://mypertamina.id/fuels-harga>
- Zakaria, T., & Ariesmayana, A. (2019). Studi Kelayakan Penerapan Blending Fuel Batubara-Ekstraks Ampas Kopi pada Ketel UAP DZL-20 di PT . DDD. *Jurnal*, 2(2), 147–159.