

ANALISIS KAPASITAS POMPA & KINERJA SISTEM PENYALURAN BAHAN BAKAR AVTUR MELALUI PIPA BAWAH TANAH DARI AVIATION FUEL TERMINAL HINGGA BANDARA

Dimas Teraputra Hernawan ^{1)*}, Imam Hidayat ²⁾

^{1,2)}Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*Corresponding author: d.teraputra@gmail.com

ABSTRAK

Sistem perpipaan bawah tanah untuk distribusi bahan bakar avtur dari *Aviation Fuel Terminal* (AFT) ke bandara memainkan peran penting dalam memastikan operasional penerbangan yang andal, efisien, dan aman. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem distribusi bahan bakar, khususnya dalam memenuhi kebutuhan laju alir minimum pada proses *flushing*, serta mengevaluasi kapasitas pompa yang digunakan. Metode penelitian meliputi perhitungan Reynolds *number*, laju alir, dan penurunan tekanan (*major loss* dan *minor loss*) yang dibandingkan dengan standar internasional *Energy Institute 1560 2nd Edition*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju alir aktual sebesar 750 m³/jam belum memenuhi kebutuhan *flushing* sebesar 907 m³/jam, dengan kekurangan sebesar 17,31%. Total penurunan tekanan pada pipa utama adalah 3,62 bar, yang terdiri dari *major loss* sebesar 1,76 bar, *minor loss* sebesar 0,86 bar, dan kerugian akibat *Filter Water Separator* (FWS) sebesar 1 bar. Meskipun efisiensi pompa mencapai 85% dan cukup untuk kebutuhan operasional harian, kapasitasnya perlu ditingkatkan untuk memenuhi persyaratan *flushing*. Optimalisasi sistem yang direkomendasikan melalui penambahan kapasitas pompa sebanyak 2 unit dengan kapasitas masing – masing pompa 150 m³/jam. Kesimpulannya, meskipun sistem saat ini cukup memadai untuk kebutuhan operasional harian, diperlukan penyesuaian teknis untuk memastikan kepatuhan terhadap standar internasional dan menjamin distribusi bahan bakar yang andal serta aman.

Kata Kunci: *Distribusi Bahan Bakar, Pipa Bawah Tanah, Laju Alir, Kerugian Tekanan, Kapasitas Pompa*

1. PENDAHULUAN

Sistem distribusi bahan bakar avtur merupakan salah satu elemen vital dalam mendukung operasional penerbangan. Ketersediaan bahan bakar berkualitas tinggi yang memenuhi standar internasional menjadi syarat utama untuk menjamin keselamatan dan efisiensi penerbangan. Dalam konteks ini, *Aviation Fuel Terminal* (AFT) berperan penting sebagai pusat distribusi bahan bakar yang mengalirkan avtur ke bandara melalui jaringan pipa bawah tanah.

1.1. Latar Belakang

Proses distribusi bahan bakar melalui pipa bawah tanah menghadapi tantangan utama berupa pemenuhan standar laju aliran minimum selama operasi normal dan *flushing*. *Flushing* adalah proses pembersihan pipa untuk memastikan bahan bakar bebas dari kontaminan seperti air dan partikel padat yang dapat memengaruhi kualitas bahan bakar (*Energy Institute, 2021*). Standar *Energy Institute 1560 2nd Edition*

menetapkan bahwa laju aliran tertentu harus dicapai selama *flushing* untuk menjamin efektivitas pembersihan. Ketidakmampuan sistem dalam memenuhi standar ini dapat menyebabkan kegagalan operasional, seperti yang terjadi pada insiden Cathay Pacific pada 2010 (*Report on the Accident to Airbus A330-342 B-HLL, 2010*), di mana kontaminasi bahan bakar menjadi penyebab utama kegagalan mesin pesawat. Oleh karena itu, evaluasi kinerja sistem distribusi bahan bakar menjadi penting untuk memastikan operasional yang andal dan aman.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis kinerja sistem distribusi bahan bakar avtur dari AFT ke bandara. Analisis ini meliputi evaluasi kemampuan sistem dalam mencapai laju aliran minimum yang dipersyaratkan selama operasi normal dan *flushing*, serta evaluasi kapasitas pompa yang digunakan, termasuk efisiensinya dalam mendukung kebutuhan operasional dan standar internasional *Energy Institute 1560 2nd Edition*.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan dua jenis data yaitu data *commissioning* terdahulu dan data operasional terkini. Data *commissioning* mencakup informasi historis mengenai kinerja awal sistem ketika pertama kali dioperasikan. Data ini diperoleh melalui wawancara dan dokumentasi teknis. Sementara itu, data operasional terkini dikumpulkan melalui pengukuran langsung, pencatatan sistem monitoring, serta wawancara dengan operator. Kedua jenis data ini digunakan untuk memastikan analisis kinerja sistem yang akurat.

Tahapan pertama dalam analisis adalah perhitungan sistem penyaluran bahan bakar. Perhitungan ini melibatkan Reynolds *number* untuk mengidentifikasi jenis aliran (laminar atau turbulen), penurunan tekanan menggunakan persamaan Darcy-Weisbach, dan *head* total untuk menentukan energi yang dibutuhkan oleh pompa. Selain itu, laju aliran minimum dihitung untuk memastikan sistem dapat beroperasi dengan andal sesuai standar.

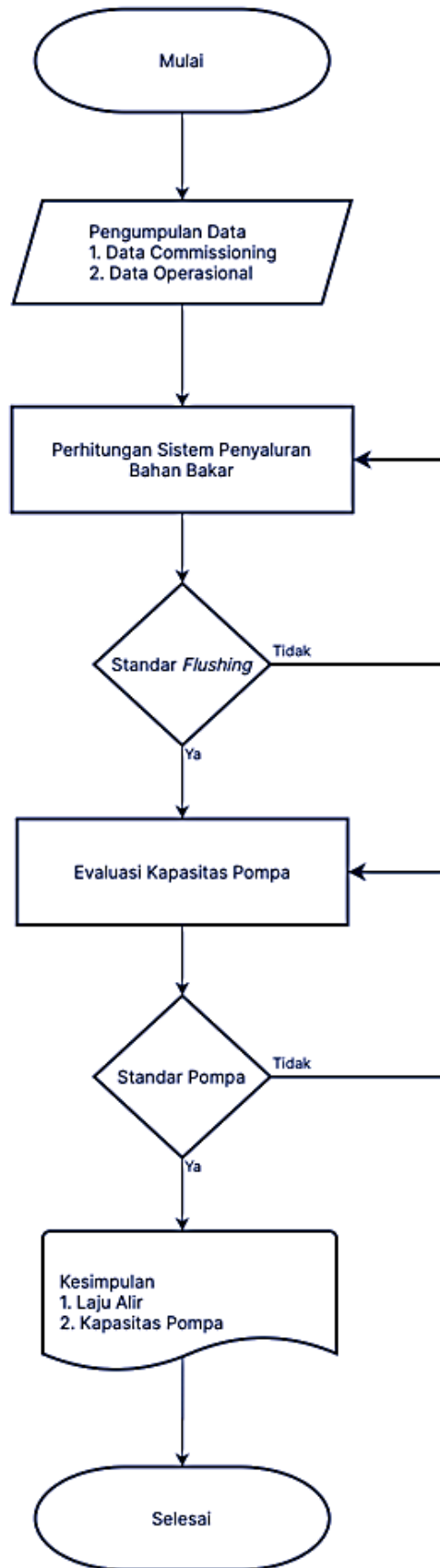
Tahapan berikutnya adalah evaluasi kesesuaian dengan standar *flushing*. Jika laju aliran aktual tidak memenuhi standar *flushing*, analisis dilakukan untuk mengidentifikasi penyebabnya, termasuk perhitungan tekanan dan laju aliran. Berdasarkan hasil analisis, solusi teknis seperti penyesuaian tekanan atau peningkatan kapasitas pompa dapat diterapkan untuk memenuhi standar.

Evaluasi kapasitas pompa menjadi langkah penting dalam penelitian ini. Perhitungan daya yang dibutuhkan dilakukan berdasarkan laju aliran dan *head* total (*Munson et al., 2010*).

Efisiensi pompa dievaluasi dengan membandingkan daya input dan output hidraulik (*Schmidt, 2016*). Sedangkan *Net Positive Suction Head* (NPSH) dihitung untuk memastikan tidak terjadi kavitasi. Hasil evaluasi ini menentukan apakah kapasitas pompa sudah memadai atau memerlukan peningkatan.

Pada tahap kesimpulan, hasil penelitian dirangkum dalam dua aspek utama: (1) evaluasi laju alir bahan bakar dalam kondisi normal dan saat *flushing*, serta (2) kapasitas pompa dalam mendukung kebutuhan sistem. Jika kapasitas tidak memenuhi standar, rekomendasi teknis disiapkan untuk meningkatkan kapasitas pompa dan perencanaan pemeliharaan sistem agar dapat beroperasi dengan optimal.

Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem distribusi bahan bakar avtur saat ini terdiri dari lima unit pompa dengan kapasitas masing-masing 150 m³/jam dengan head total 165 meter dan *discharge pressure* 13,48 bar, yang beroperasi secara paralel untuk mendukung kebutuhan operasional harian dan proses *flushing*. Secara total, kapasitas pompa yang tersedia adalah 750 m³/jam. Analisis kinerja dilakukan untuk mengevaluasi apakah sistem ini memenuhi standar internasional, khususnya pada kondisi flushing, di mana kebutuhan kecepatan alir minimum adalah 2,13 m/s (*Energy Institute, 2021*). Adapun data dan perhitungannya sebagai berikut :

Tabel 1. 1. Data Pipe & Fitting

Material	Jumlah	ΔP
Pipa 16"	2441,9 m	1,76 bar
Elbow 90 16"	5 bh	0,05 bar
Equal Tee 16"	8 bh	0,2 bar
Gate Valve 16"	15 bh	0,04
Filter Water Separator	1 bh	1 bar

- a. Kecepatan alir eksisting.

$$v_{eksisting} = \frac{Q_{total}}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} Q_{total} &= 750 \text{ m}^3/\text{hr} \\ A &= \pi \cdot r^2 \\ &= 3,14 \cdot (198,44 \text{ mm})^2 \\ &= 123.642,05 \text{ mm}^2 \approx 0,12 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$v_{eksisting} = \frac{750 \text{ m}^3/\text{hr}}{0,12 \text{ m}^2} = 6,048,39 \text{ m}^3/\text{hr} \approx \mathbf{1,68 \text{ m/s}}$$

- b. Kecepatan alir yang dibutuhkan untuk operasional.

$$Q_{operasional} = n \cdot Q_{pengisian} \quad (2)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} n &= 4 \text{ (jumlah titik penyaluran dalam satu waktu)} \\ Q_{pengisian} &= 1200 \text{ lpm} \approx 72 \text{ m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} Q_{operasional} &= 4 \cdot 72 \text{ m}^3/\text{hr} \\ Q_{operasional} &= \mathbf{288 \text{ m}^3/\text{hr}} \end{aligned}$$

- c. Kecepatan alir *flushing* sesuai standar *EI 1560 2nd edition*.

$$v_{standar} = \frac{Q_{flushing}}{A} \quad (3)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} v_{standar} &= 2,13 \text{ m/s} \\ A &= \pi \cdot r^2 \\ &= 3,14 \cdot (198,44 \text{ mm})^2 \\ &= 123.642,05 \text{ mm}^2 \approx 0,12 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} Q_{flushing} &= v \cdot A_{16"} \\ Q_{flushing} &= 2,1 \text{ m/s} \cdot 0,12 \text{ m}^2 \\ Q_{flushing} &= 0,252 \text{ m}^3/\text{s} \approx 907 \text{ m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

d. Perhitungan Reynold number.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (4)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} \rho &= 830 \text{ kg/m}^3 \\ v_1 &= 750 \text{ m}^3/\text{hr} \\ v_2 &= 75 \text{ m}^3/\text{hr} \\ D_1 &= 0,04 \text{ m} \\ D_2 &= 0,16 \text{ m} \\ \mu &= 0,00664 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

maka :

$$Re = \frac{830 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,68 \text{ m/s} \cdot 0,04 \text{ m}}{0,00664 \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$Re_{16} = 69.377.396$$

e. Major loss (Darcy-Weisbach).

$$\Delta P_{major} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned} f &= 0,02 \text{ (koefisien gesekan)}, \\ L &= 4800 \text{ m (panjang pipa)}, \\ D &= 0,406 \text{ m}, \\ v &= 1,68 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} \Delta P_{major} &= 0,01 \cdot \frac{4800 \text{ m}}{0,40 \text{ m}} \cdot \frac{830 \text{ kg/m}^3 \cdot (1,68 \text{ m/s})^2}{2} \\ \Delta P_{major} &= 176.128,95 \text{ Pa} \approx 1,76 \text{ bar} \end{aligned}$$

f. Minor loss (Fitting).

$$\Delta P_{minor} = \Delta P_{elbow 16" \text{ total}} + \Delta P_{tee 16"} + \Delta P_{valve} + \Delta P_{elevasi 16"} + \Delta P_{fws} \quad (6)$$

Keterangan :

$$\begin{aligned}\Delta P_{elbow\ 16''\ total} &= 0,05\ bar \\ \Delta P_{tee\ 16''} &= 0,2\ bar \\ \Delta P_{valve} &= 0,04\ bar \\ \Delta P_{elevasi\ 16''} &= 0,05\ bar \\ \Delta P_{FWS} &= 1\ bar\end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned}\Delta P_{minor} &= \Delta P_{elbow\ 16''\ total} + \Delta P_{tee\ 16''} + \Delta P_{valve} + \Delta P_{elevasi\ 16''} + \Delta P_{fws} \\ &= 0,05\ bar + 0,2\ bar + 0,04 + 0,57\ bar + 1\ bar \\ &= \mathbf{1,86\ bar}\end{aligned}$$

g. Total Kerugian Tekanan:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{major} + \Delta P_{minor} \quad (7)$$

Keterangan:

$$\Delta P_{major} = 1,76\ bar$$

$$\Delta P_{minor} = 1,86\ bar$$

maka:

$$\begin{aligned}\Delta P_{total} &= 1,76\ bar + 1,86\ bar \\ \Delta P_{total} &= 3,62\ bar\end{aligned}$$

h. Kapasitas Pompa untuk *Flushing*:

$$n = \frac{Q_{flushing}}{Q_{pompa}} \quad (8)$$

Keterangan :

$$n = \text{Jumlah unit pompa}$$

$$Q_{pompa} = 150\ m^3/hr$$

$$Q_{flushing} = 965,4\ m^3/hr$$

maka :

$$\begin{aligned}n &= \frac{965,4\ m^3/hr}{150\ m^3/hr} \\ n &= \mathbf{6,43 \approx 7\ unit\ pompa}\end{aligned}$$

i. Kinerja Pompa :

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot H_t}{\eta} \quad (7)$$

Keterangan :

$$\rho = 830\ kg/m^3$$

$$Q = 150\ m^3/hr$$

$$g = 8,81 \text{ m/s}^2$$

$$H_t = 165 \text{ m}$$

$$\eta = 70\%$$

maka :

$$P = \frac{830 \text{ kg/m}^3 \cdot 150 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 165 \text{ m}}{70\%}$$

$$P = 79,97 \text{ kW}$$

3.1. Laju Aliran pada Sistem Penyaluran Bahan Bakar AFT ke Bandara

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem penyaluran bahan bakar saat ini memadai untuk kebutuhan operasional harian. Laju alir aktual sebesar 750 m³/jam jauh melampaui kebutuhan harian sebesar 288 m³/jam, dengan kapasitas terpakai hanya sekitar 38,4%. Namun, sistem ini belum optimal untuk proses *flushing*, terutama pada pipa berdiameter 16", yang membutuhkan laju alir minimum sebesar 907 m³/jam. Kekurangan sekitar 17% ini mengindikasikan bahwa sistem tidak memenuhi standar internasional *Energy Institute 1560 2nd Edition* untuk proses *flushing*.

Perbedaan ini disebabkan oleh hambatan tekanan yang lebih besar pada pipa berdiameter 16", terutama akibat kerugian tekanan mayor dan minor. Kerugian total tekanan pada pipa utama tercatat sebesar 3,62 bar, dengan kontribusi dari kerugian mayor (1,76 bar), kerugian minor (0,86 bar), dan *Filter Water Separator* (FWS) (1 bar). Analisis ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas aliran pada pipa sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan *flushing*.

3.2. Kapasitas Kompa

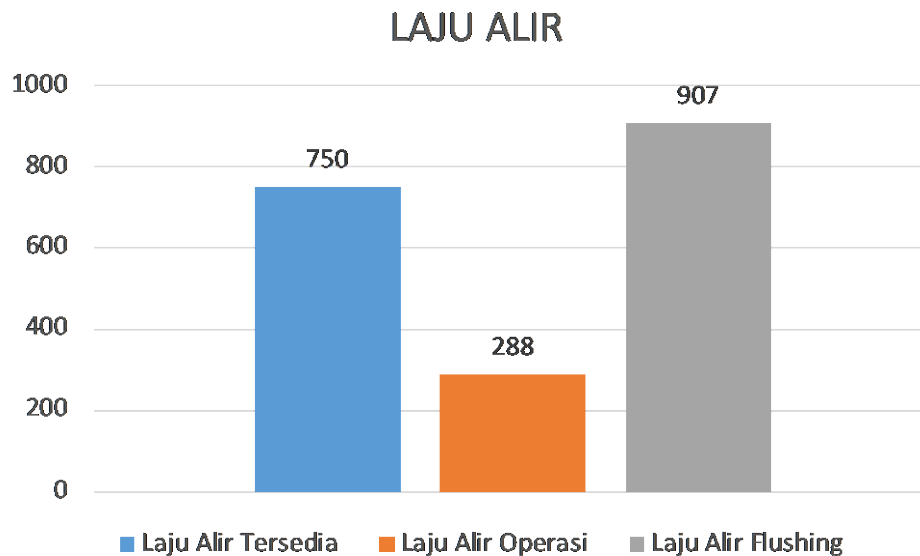
Evaluasi kapasitas pompa menunjukkan bahwa sistem saat ini terdiri dari lima unit pompa dengan kapasitas masing-masing 150 m³/jam, yang cukup untuk kebutuhan harian tetapi belum mampu mendukung proses *flushing* pada pipa 16". Untuk mencapai laju alir *flushing* sebesar 907 m³/jam, diperlukan tambahan dua unit pompa serupa yang beroperasi secara paralel atau alternatifnya menggunakan pompa dengan kapasitas variabel yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan *flushing*.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi pompa sebesar 85% sudah memadai untuk operasi harian, tetapi peningkatan kapasitas menjadi solusi utama untuk memastikan keberhasilan proses *flushing*. Selain itu, perawatan rutin terhadap pipa dan fitting direkomendasikan untuk mengurangi kerugian tekanan akibat penumpukan residu atau penurunan kualitas pipa.

Analisis kapasitas pompa bertujuan untuk memastikan bahwa kebutuhan *flushing* sesuai standar dapat dipenuhi. Berdasarkan perhitungan, diketahui bahwa untuk mencapai laju alir *flushing* yang dipersyaratkan (907 m³/hr) pada pipa 16", sistem memerlukan setidaknya 7 unit pompa, apabila setiap pompa memiliki kapasitas 150 m³/hr dan beroperasi secara paralel. Saat ini, sistem yang tersedia hanya 5 unit pompa yang bekerja secara simultan, yang menyebabkan kapasitas *flushing* belum optimal untuk memenuhi standar yang diperlukan.

3.3. Pembahasan

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas terkait kinerja sistem, berikut disajikan gambar grafik perbandingan laju alir.



Gambar 2 Grafik Perbandingan Laju Alir

Gambar perbandingan laju alir menunjukkan hubungan antara kapasitas aliran (*flowrate*) dengan tekanan operasional (*pressure*) pada kondisi operasional harian dan proses *flushing*. Grafik ini mengindikasikan bahwa pada kondisi operasional harian, laju alir sebesar 288 m³/jam dapat dicapai karena kondisi laju alir eksisting mencapai 750 m³/jam namun untuk proses *flushing* membutuhkan laju alir sebesar 907 m³/jam.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem penyaluran bahan bakar avtur dari *Aviation Fuel Terminal* (AFT) ke bandara telah dirancang dengan baik untuk memenuhi kebutuhan operasional harian, dengan kapasitas laju alir yang memadai serta tekanan operasional yang stabil. Namun, sistem ini menghadapi keterbatasan signifikan dalam memenuhi kebutuhan *flushing*, yang merupakan salah satu persyaratan utama sesuai standar internasional *Energy Institute 1560 2nd Edition*. Kekurangan pada laju alir *flushing* terutama disebabkan oleh keterbatasan kapasitas pompa yang ada, yang berisiko meningkatkan potensi residu dalam pipa dan dapat memengaruhi kualitas bahan bakar yang disalurkan ke pesawat. Jika peningkatan kapasitas tidak dilakukan, dampaknya dapat menurunkan keselamatan operasional penerbangan akibat penurunan kualitas bahan bakar.

Solusi yang dapat diterapkan untuk mengatasi keterbatasan ini mencakup penambahan pompa baru atau penggunaan pompa kapasitas variabel, yang memberikan fleksibilitas dalam mendukung kebutuhan aliran yang bervariasi. Peningkatan kapasitas ini akan memastikan bahwa proses *flushing* dapat dilakukan dengan laju alir yang sesuai standar, sehingga mencegah terjadinya kontaminasi bahan bakar akibat residu di dalam pipa. Selain itu, penelitian ini juga menegaskan pentingnya evaluasi berkala pada sistem distribusi bahan bakar untuk memastikan kepatuhan terhadap standar internasional dan mempertahankan keandalan operasional sistem.

Dengan mengimplementasikan rekomendasi yang diusulkan, diharapkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi bahan bakar di sektor penerbangan dapat meningkat. Peningkatan ini tidak hanya mendukung operasional harian, tetapi juga

memberikan keamanan tambahan bagi penerbangan, sekaligus memastikan bahwa bahan bakar yang digunakan selalu memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan

4. KESIMPULAN

Sistem distribusi bahan bakar avtur dari *Aviation Fuel Terminal* (AFT) ke bandara telah dirancang untuk memastikan pasokan bahan bakar yang efisien dan aman sesuai kebutuhan operasional. Namun, sistem ini masih menghadapi tantangan dalam memenuhi persyaratan *flushing*, dengan kekurangan laju alir sekitar 17% dari kebutuhan standar. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan peningkatan kapasitas pompa, yang dapat dilakukan dengan menambahkan dua unit pompa baru guna mendukung proses *flushing* sesuai standar yang berlaku.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa terima kasih yang mendalam kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penyelesaian penelitian ini. Ucapan terima kasih khusus ditujukan kepada:

- a. **Prof. Dr. Andi Adriansyah**, selaku Rektor Universitas Mercu Buana, atas dukungan yang diberikan dalam pengembangan akademik di institusi ini.
- b. **Dr. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T.**, Dekan Fakultas Teknik, yang telah memfasilitasi berbagai kebutuhan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2010). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (6th ed.). Wiley.
- Schmidt, R. (2016). *Pump Handbook* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Energy Institute. (2021). *Energy Institute 1560 2nd Edition: Design, Operation, and Maintenance of Aviation Fuel Systems*. London: Energy Institute.
- Joint Inspection Group (JIG). (2021). *JIG Standards for Aviation Fuel Quality Control & Operating Procedures*. JIG Group.
- Hong Kong Civil Aviation Department. (2010). *Report on the Accident to Airbus A330-342 B-HLL operated by Cathay Pacific Airways Limited at Hong Kong International Airport, Hong Kong on 13 April 2010*. Hong Kong CAD.