

ANALISIS TEKNIS DAN EKONOMIS OPTIMALISASI SISTEM Pengerukan Hidrolik Menggunakan Cutter Suction Dredger dan *Booster Pump* pada Bendungan Tangga dan Sigura-Gura

Mahendra Batnovas Sitinjak¹, Suselo Utoyo², Ayisya Cindy Harifa³

Mahasiswa Manajemen Rekayasa Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang³.

Email: mahendrampiet@gmail.com¹, suselo.utoyo@polinema.ac.id, ayisya_civil@polinema.ac.id³

ABSTRAK

Akumulasi sedimen di Bendungan Tangga dan Bendungan Sigura-Gura, yang merupakan bagian dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Sungai Asahan, telah menyebabkan penyusutan kapasitas tampungan efektif secara signifikan. Permasalahan ini menghambat efisiensi operasional pembangkit dan meningkatkan risiko kerusakan infrastruktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara teknis dan ekonomis tiga konfigurasi sistem pengerukan hidrolik menggunakan *Cutter Suction Dredger* (CSD) yang dikombinasikan dengan *Floating Booster Pump* dan *booster pump* darat, guna menentukan sistem optimal dalam pengerukan sedimen. Perhitungan teknis dilakukan menggunakan persamaan *Darcy-Weisbach* untuk mengevaluasi kehilangan energi (*head loss*), serta analisis risiko kavitasi berdasarkan parameter *Net Positive Suction Head* (NPSH). Evaluasi biaya dilakukan berdasarkan Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) PUPR 2025. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi dengan 1 unit CSD, 1 pompa *submersible*, 2 *floating booster pump* sejajar, dan 1 *booster pump* darat merupakan sistem paling efisien, menghasilkan debit slurry 600 m³/jam dengan *head loss* 72,7 meter. Sistem ini menyelesaikan pekerjaan dalam waktu 3 bulan dengan biaya satuan Rp147.202,47/m³. Dengan demikian, konfigurasi ini dinilai optimal secara teknis, ekonomis, dan mendukung keberlanjutan operasional PLTA di wilayah hulu Sungai Asahan.

Kata kunci : Sedimentasi, pengerukan hidrolik, *booster pump*, *head loss*, efisiensi energi, PLTA Asahan.

ABSTRACT

Sediment accumulation in the Tangga and Sigura-Gura Dams, which are integral parts of the Asahan River hydropower generation system, has significantly reduced their effective reservoir capacity. This issue disrupts operational efficiency and increases the risk of infrastructure damage. This study aims to conduct a technical and economic analysis of three hydraulic dredging system configurations using a Cutter Suction Dredger (CSD) combined with Floating Booster Pumps and a land-based booster pump, in order to determine the most optimal system for sediment removal. Technical evaluation was conducted using the Darcy-Weisbach equation to assess energy loss (head loss), along with a cavitation risk analysis based on the Net Positive Suction Head (NPSH) parameter. Cost analysis referred to the 2025 Unit Price Analysis (AHSP) published by the Indonesian Ministry of Public Works. The results indicate that the configuration comprising 1 CSD unit, 1 submersible pump, 2 floating booster pumps in parallel, and 1 land-based booster pump is the most efficient system. It delivers a slurry flow rate of 600 m³/hour, a total head loss of 72.7 meters, and completes the dredging process within 3 months at a unit cost of Rp147,202.47/m³. Therefore, this configuration is considered technically and economically optimal, and supports the long-term sustainability of hydropower generation operations in the upstream area of the Asahan River.

Keywords : Sedimentation, hydraulic dredging, booster pump, head loss, energy efficiency, Asahan hydropower.

1. PENDAHULUAN

Sedimentasi merupakan permasalahan utama pada bendungan di Indonesia karena dapat mengurangi kapasitas tampungan efektif, menurunkan efisiensi operasional Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), serta meningkatkan

risiko kerusakan pada infrastruktur [1]. Salah satu wilayah yang terdampak signifikan adalah Bendungan Tangga dan Bendungan Sigura-gura di hulu Sungai Asahan, Sumatera Utara. Kedua bendungan ini menopang sistem PLTA dengan

total kapasitas lebih dari 600 MW dan menjadi sumber energi utama kawasan tersebut.

Akumulasi sedimen yang tidak tertangani menyebabkan penyusutan tampungan sebesar ± 5 juta m^3 atau sekitar 4% dari kapasitas desain, yang berimplikasi pada turunnya kontinuitas suplai air ke turbin, penurunan efisiensi pembangkitan, dan biaya operasional yang meningkat karena frekuensi pemeliharaan yang lebih tinggi [2], [3], [4], [5].

Metode pengerukan menjadi solusi yang umum diterapkan dalam mengatasi sedimentasi. Di antara berbagai teknologi yang tersedia, sistem hidrolik menggunakan Cutter Suction Dredger (CSD) yang dikombinasikan dengan *Floating Booster Pump* (FBP) dan *booster pump* darat dinilai lebih efisien dalam menjangkau volume sedimen yang besar dengan durasi pengerjaan yang lebih singkat serta distribusi tekanan yang stabil [3], [4].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi teknis dan ekonomis dari beberapa konfigurasi sistem pengerukan tersebut pada dua bendungan utama di Sungai Asahan. Fokus utama mencakup evaluasi produktivitas pengerukan, penghitungan head loss menggunakan pendekatan Darcy–Weisbach[3], dan estimasi biaya berdasarkan Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) 2025 [6].

2. METODE

Penelitian ini dilakukan pada Bendungan Sigura-gura dan Bendungan Tangga di Sungai Asahan, Sumatera Utara. Tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi efisiensi sistem pengerukan sedimen dengan metode hidrolik menggunakan Cutter Suction Dredger (CSD) yang dikombinasikan dengan berbagai konfigurasi booster pump.

Metode yang digunakan bersifat kuantitatif deskriptif dengan pendekatan simulasi teknik hidrolika dan estimasi biaya. Data yang dianalisis meliputi data primer (pengukuran lokasi, spesifikasi alat, panjang pipa, dan estimasi waktu kerja) serta data sekunder seperti laju sedimentasi tahunan, karakteristik sedimen, dan AHSP PUPR tahun 2025 [7].

Tiga konfigurasi sistem yang dianalisis terdiri dari kombinasi unit CSD, submersible pump, floating booster pump (FBP), dan booster pump darat. Evaluasi teknis dilakukan berdasarkan:

- Head loss* (h_f) menggunakan persamaan Darcy–Weisbach [8]:

$$h_f = f_m \times \left(\frac{L}{D}\right) \times \left(\frac{V^2}{2g}\right) \quad (1)$$

di mana:

- h_f = head-loss (m)
- f_m = friction factor untuk slurry = $f_w \times (1 + 1.15 \times C_v)$
- f_w = friction factor air (dikoreksi untuk turbulensi)

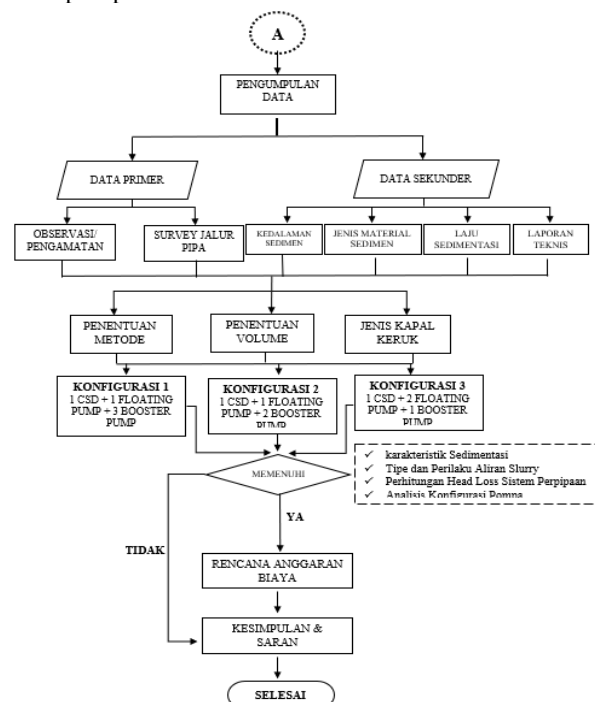
- C_v = volumetric concentration slurry
 - L = panjang pipa (m)
 - D = diameter pipa (m)
 - V = kecepatan aliran slurry (m/s)
 - g = percepatan gravitasi (9.81 m/s²)
- NPSHa (Net Positive Suction Head Available) untuk:

$$NPSH_a = h_a - h_v - h_{f_suction} \quad (2)$$
 Di mana:
 - h_a = tekanan atmosfer lokal (m)
 - h_v = tekanan uap air pada 20°C (sekitar 2.34 kPa atau 0.24 m)
 - $h_{f_suction}$ = head-loss pada sisi hisap pompa
 - Produktivitas pengerukan (Q): berdasarkan kapasitas alat dan waktu kerja.
 - Estimasi biaya: dihitung dari satuan volume dredging (Rp/m^3) berdasarkan AHSP dan analisis pemakaian alat.

Analisis dilakukan untuk menentukan konfigurasi sistem paling efisien secara teknis (stabilitas aliran, tekanan, produktivitas) dan ekonomis (biaya dan waktu pengerjaan minimal).

DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Diagram alir penelitian menggambarkan secara sistematis tahapan-tahapan yang dilakukan dalam studi ini, mulai dari proses pengumpulan data hingga evaluasi hasil dan penyusunan kesimpulan. Tahapan ini dibangun untuk memberikan alur yang logis dan terstruktur dalam menganalisis efisiensi konfigurasi sistem pengerukan, khususnya yang melibatkan kombinasi jumlah dan lokasi booster pump.



Gambar 1. Bagan alir

SPESIFIKASI PERALATAN

spesifikasi teknis umum peralatan utama dan penunjang yang digunakan dalam kegiatan pengerukan sedimen Waduk Tangga dan Bendungan Sigura-gura. Tabel ini mencakup

komponen utama seperti kapal keruk, booster pump, dan pipa buang, serta perlengkapan pendukung seperti ponton, workboat, dan sistem otomasi. Informasi mencakup spesifikasi teknis, tipe atau jumlah peralatan, serta fungsinya dalam sistem pengerukan secara keseluruhan (Wang and Li, 2022).

Tabel 1. Spesifikasi Alat Pengerukan & Penunjang

No	Komponen	Spesifikasi Utama	Jumlah / Tipe	Fungsi
1	Cutter Suction Dredger (CSD)	Submersible Pump, Kedalaman hingga 30m	1 Unit, Tipe BP2525MD	Mengeruk dan memompa sedimen
2	Booster Pump Darat	Tipe BP2525MD, 156–178 kW	1 Unit	Menambah tekanan slurry ke Spoilbank
3	Floating Booster Pump	Tipe BP2525MD, 600 m ³ /jam	2 Unit	Meningkatkan aliran dari CSD ke darat
4	Ponton Service	Modular, Beban maksimum 7.8 Ton	1 Unit	Platform perakitan peralatan
5	Workboat / Service Boat	Diesel 50–100 HP (estimasi)	1 Unit	Transport kru/logistik & dukungan manuver
6	Pipa Buang	Dredging pipe, Floater pipe, Ø250 mm HDPE	-	Membawa slurry ke spoilbank
7	Crawler Crane	150 Ton, Boom 54–57m, Kapasitas max. 7.8 Ton	1 Unit	Mengangkat & merakit komponen
8	Sistem Otomasi	SCADA Ready, Flow/Pressure Sensor	1 Set	Kontrol pompa sinkron, logging, proteksi

(Sumber: Perum Jasa Tirta 1)

DESAIN RENCANA SISTEM Pengerukan

Desain perencanaan pengerukan sedimen pada Bendungan Tangga dan Bendungan Sigura-gura harus mencakup berbagai aspek teknis yang berkaitan dengan karakteristik fisik sedimen, sistem perpompaan, serta pemilihan peralatan dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Perencanaan ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang melibatkan analisis kuantitatif dan penerapan rumus-rumus teknik fluida, guna mendukung penentuan konfigurasi sistem pengerukan yang optimal diantaranya:

a. Analisis Karakteristik Aliran

Penentuan sifat dan parameter fisis sedimen menjadi tahap awal yang krusial dalam merancang metode pengerukan. Beberapa parameter yang dihitung antara lain:

▪ Massa Jenis Padatan (ρ_s)

Menggambarkan densitas partikel padatan dalam sedimen. Parameter ini penting dalam menentukan kerapatan campuran (slurry) dan beban kerja sistem perpompaan.

$$\rho_s = S_G \times \rho_w \quad (3)$$

Dimana:

ρ_s = Massa jenis padatan tercampur (kg/m³)

S_G = Specific Gravity (berat jenis relatif) padatan terhadap air

ρ_w = Massa jenis **air** (biasanya diasumsikan 1000 kg/m³ pada 20°C)

▪ Massa Jenis Slurry (ρ_m)

$$\rho_m = \frac{(1-C_v) \cdot \rho_w + C_v \cdot \rho_s}{1} \quad (4)$$

Massa jenis campuran antara sedimen dan air dihitung menggunakan rumus berikut:

Dimana:

ρ_m = Massa jenis *slurry* (kg/m³)

ρ_w = Massa jenis air (kg/m³)

ρ_s = Massa jenis padatan (kg/m³)

C_v = Konsentrasi volume (tanpa dimensi)

▪ Diameter rata-rata padatan tercampur (d_s)

Diameter partikel padatan rata-rata dalam campuran sedimen dapat dihitung menggunakan distribusi ukuran partikel yang terukur di lokasi.

$$d_s = 2^{-\Phi} \quad (5)$$

Dimana:

d_s = Diameter rata-rata partikel (mm)

Φ = Nilai phi, skala logaritmik ukuran butir sedimen

▪ Konsentrasi volume (C_v)

Konsentrasi volume adalah perbandingan antara volume sedimen terhadap volume total campuran (slurry). Rumusnya adalah:

$$C_v = \frac{C_m}{C_m + (1-C_m) \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s}} \quad (6)$$

Dimana:

C_v = Konsentrasi volume (tanpa satuan)

C_m = Konsentrasi massa (berat sedimen per berat campuran)

G_s = Specific Gravity padatan

G_w = Specific Gravity air (≈ 1)

- Perhitungan Karakteristik aliran dengan menghitung Bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds digunakan untuk menentukan jenis aliran dalam sistem pompa dan pipa. Rumus perhitungan Bilangan Reynolds adalah:

$$Re_w = \frac{\rho_w VD}{\mu_w} \quad (7)$$

Dimana

Re = Bilangan Reynolds

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

D = Diameter karakteristik (misalnya diameter pipa atau impeller pompa) (m)

μ = Viskositas dinamis fluida (Pa.s)

Interpretasi nilai Re:

$Re < 2000 \rightarrow$ Aliran laminar

$2000 \leq Re \leq 4000 \rightarrow$ Aliran transisi

$Re > 4000 \rightarrow$ Aliran turbulen

- Kategori Aliran Fluida
 Ditentukan berdasarkan nilai Re, yang mempengaruhi metode analisis dan desain hidraulika.

- Viskositas Campuran (μ)
 Menggunakan model empiris:

$$\mu = \mu_0(1 + 2.5C + 10.05C^2 + 0.00273e^{16.6Cv}) \quad (8)$$

Keterangan:

μ = Viskositas campuran (Pa.s)

μ_0 = Viskositas air murni (Pa.s)

C = Konsentrasi massa

Cv = Konsentrasi volume

- b. Analisis Sistem Peralatan Dan Hidraulika
 Dalam perencanaan sistem pengerukan, pemilihan peralatan perlu mempertimbangkan efisiensi dan daya tahan terhadap kondisi operasional. Perhitungan teknis mencakup [10]:

- Head Loss dan Debit Aliran
 Dalam penelitian ini, head loss ditentukan melalui pendekatan Darcy-Weisbach, yang relevan untuk sistem aliran slurry bertekanan tinggi dalam konfigurasi pompa yang dikaji.

$$Q = A \cdot v \quad (9)$$

Keterangan:

Q = Debit aliran (m^3/s)

A = Luas penampang pipa (m^2)

v = Kecepatan aliran (m/s)

- Head Output Pompa (Total Head)
 Menggambarkan total energi yang dibutuhkan untuk memindahkan *slurry* ke lokasi pembuangan.

$$H_{total} = H_z - H_v - H_f \quad (10)$$

Keterangan:

H_z = Head elevasi (perbedaan ketinggian antara titik hisap dan titik buang)

H_v = Head kecepatan (energi kinetik karena aliran)

H_f = Head loss akibat gesekan dan fitting dalam pipa (major + minor losses)

- Analisis Kecukupan NPSH
 Evaluasi terhadap kemungkinan terjadinya kavitasi berdasarkan tekanan minimum pada sisi hisap pompa [11].

Ada dua jenis NPSH antara lain:

- 1) NPSH Available ($NPSH_a$): Nilai yang tersedia dari sistem (ditentukan oleh kondisi aktual lapangan)
- 2) NPSH Required ($NPSH_r$): Nilai minimum yang dibutuhkan oleh pompa (ditentukan oleh pabrik pompa)

Syarat Umum Operasi Aman:

$$NPSH_a \geq NPSH_r + \text{safety margin}$$

Rumus:

$$NPSH_a = \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{Z_s}{g} + \frac{P_{vapor}}{\rho g} - h_f \quad (11)$$

Keterangan:

P_{atm} = Tekanan atmosfer (Pa)

Z_s = Head elevasi permukaan cairan ke sumbu pompa (m)

P_{vapor} = Tekanan uap cairan (Pa)

h_f = Head loss di suction line (m)

ρ, g = Massa jenis dan percepatan gravitasi

Dampak Kavitasi

Jika: $NPSH_a < NPSH_r$, maka:

- Terjadi penguapan cairan $\rightarrow$ gelembung uap terbentuk
- Gelembung pecah di area tekanan tinggi $\rightarrow$ kavitasi
- Akibat: erosi impeller, getaran tinggi, efisiensi menurun, dan kerusakan pompa

Tabel 2. Pengaruh Rejime aliran terhadap NPSH

Rejime Aliran	Pengaruh terhadap NPSH
Turbulen	Tekanan stabil $\rightarrow$ NPSH lebih rendah
Laminar	Tekanan lebih fluktuatif $\rightarrow$ NPSH lebih tinggi diperlukan
Transisi	Perlu margin aman ekstra, karena potensi turbulensi lokal dan tekanan turun

- Efisiensi Pompa (η)

Dihitung sebagai perbandingan antara daya fluida dan daya input Rumus efisiensi pompa secara umum dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{hidraulik}}{P_{input}} \quad (12)$$

- Daya Pompa (P)
Rumus Daya Teoritis Pompa dengan Efisiensi
Rumus perhitungan daya yang dibutuhkan:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (13)$$

Keterangan:

P = Daya pompa (Watt)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s^2)

Q = Debit (m^3/s)

H = Head total (m)

η = Efisiensi pompa

c. Pemilihan Konfigurasi Terbaik

Tiga konfigurasi utama disusun berdasarkan hasil observasi lapangan, konsultasi dengan pelaksana teknis dan ahli, serta kajian awal terhadap sistem perpipaan dan posisi pompa. Variasi konfigurasi dirancang dengan mempertimbangkan jumlah booster pump dan penempatannya sepanjang jalur aliran antara unit *Cutter Suction Dredger* (CSD) dan lokasi *spoil bank*. Penyusunan alternatif ini bertujuan untuk memperoleh spektrum pilihan yang mewakili kondisi operasional lapangan secara realistis.

Tabel 3. Deskripsi Tiga Konfigurasi Sistem Pengerukan

Kriteria Umum	Konfigurasi 1	Konfigurasi 2	Konfigurasi 3
Jumlah Booster Pump	4 unit	3 unit	3 unit
Lokasi Penempatan	CSD – Tengah – Darat	CSD – Darat	Dekat outlet (Darat)
Prinsip Penyaluran	Distribusi bertingkat	Dorong langsung dua titik	Dorong tunggal langsung
Pertimbangan Pemilihan Awal	Efisiensi tekanan	Kombinasi praktis dan efisien	Penghematan alat
Status Ketersediaan Alat	Tersedia di pelaksana	Tersedia di pelaksana	Tersedia di pelaksana
Direkomendasikan oleh	Tenaga ahli pelaksana	Operator teknis dan konsultan	Pelaksana lapangan

Sumber: Hasil analisis

Konfigurasi-konfigurasi tersebut dipilih berdasarkan prinsip efisiensi awal, kemudahan implementasi, serta potensi adaptasi terhadap kontur topografi di lapangan [4]. Masing-masing konfigurasi akan dianalisis secara teknis dan ekonomis untuk menentukan mana yang paling layak digunakan dalam proyek pengerukan sedimen di bendungan [2].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

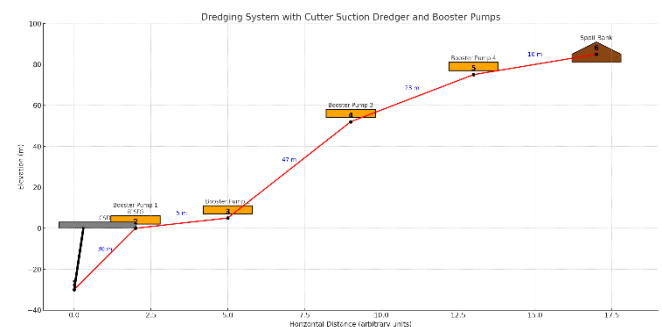
Bagian ini menyajikan analisis teknis dan ekonomis dari tiga konfigurasi sistem pengerukan sedimen di Bendungan Sigura-gura dan Tangga. Evaluasi dilakukan terhadap debit slurry yang dihasilkan, kehilangan tekanan (head loss), efisiensi waktu pengerjaan, serta biaya satuan pengerukan [12]. Data yang digunakan bersumber dari hasil simulasi hidrolis, spesifikasi teknis alat, dan acuan Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Kementerian PUPR Tahun 2025.

Tabel 4. Perbandingan Teknis Konfigurasi Sistem Pengerukan

Parameter	Konf-1	Konf-2	Konf-3	Terbaik	Keterangan
Ø Pipa (mm)	220	220	250	Konf-3	Diameter lebih besar → gesekan kecil
Head-loss Total (m)	104,9	86,4	72,7	Konf-3	Konf-3 paling efisien
Daya Total (kW)	1655	1402	1235	Konf-3	Efisiensi energi tinggi
NPSH Margin (m)	1,1	2,4	3,8	Konf-3	Aman dari kavitasi
Durasi (bulan)	4	5	3	Konf-3	Produktivitas tinggi
Biaya (Rp/m ³)	2.299	2.191	2.165	Konf-3	Biaya termurah

Sumber: Hasil Perhitungan.

Konfigurasi 1



Gambar 2. Skema Konfigurasi 1 (CSD + 1 FBP + 3 Booster Darat)
Keterangan: Pipa Ø220 mm; head-loss tertinggi, konsumsi daya terbesar. Konfigurasi pertama dirancang dengan satu unit *Floating Booster Pump* dan tiga unit *Booster Pump*, yang terhubung melalui pipa buang berdiameter 220 mm. Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga tekanan aliran *slurry* pada lintasan yang relatif panjang, dengan asumsi kebutuhan peningkatan tekanan secara bertahap melalui setiap *booster*. Skema peralatan yang digunakan meliputi:

- 1 unit *Submersible Pump* (CSD)
- 1 unit *Floating Booster Pump*
- 3 unit *Booster Pump* Pipa buang Ø220 mm

Tabel 5. Hasil Perhitungan Head Tekanan Keluar Masing-Masing Pompa

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Head tekanan di titik 2	47.5326	m	Calculated
Head tekanan di titik 3	16.6302	m	Calculated
Head tekanan di titik 4	2.4484	m	Calculated
Head tekanan di titik 5	6.1048	m	Calculated
Head tekanan di titik 6	9.9246	m	Calculated

Sumber: Hasil Perhitungan

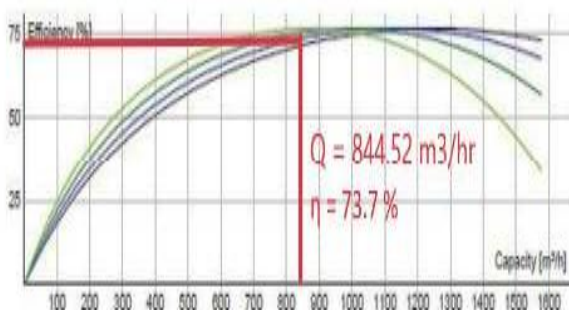
Tabel 6. Hasil Analisis Kecukupan NPSH

Parameter	NPSH available (kPa)	NPSH required (kPa)	Keterangan
Submersible	346.27	38.28	Cukup
Booster Pump 1	485.162	38.28	Cukup
Booster Pump 2	169.7437	38.28	Cukup
Booster Pump 3	24.991	38.28	Tidak cukup
Booster Pump 4	62.3109	38.28	Cukup

Sumber: Hasil Perhitungan

Penentuan Efisiensi Pompa

Dari kurva efisiensi vs debit diperoleh bahwa untuk debit $Q = 844.52 \text{ m}^3/\text{hr}$, efisiensi pompa $\eta = 73.7\%$.



Gambar 3. Kurva Efisiensi vs Debit

Penentuan Daya Pompa



Gambar 4. Hasil Penentuan Daya 1 Pompa Untuk Konfigurasi 5 Pompa

Dari kurva daya vs debit diperoleh bahwa untuk debit $Q = 844.52 \text{ m}^3/\text{hr}$, Daya pompa $P = 156 \text{ kW}$. Namun demikian, daya tersebut merupakan daya yang diperoleh melalui pengujian menggunakan air murni. Pada fluida campuran, nilai tersebut harus dimodifikasi menggunakan hukum kesebangunan pompa sebagai berikut:

$$\frac{P_1}{\rho_1 N_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{\rho_2 N_2^3 D_2^5} \quad (14)$$

Karena diameter pompa tidak berubah ($D_1 = D_2$) dan putaran pompa juga sama ($N_1 = N_2$), persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2}$$

$$P = \frac{\rho_m}{\rho_w} P_w \quad (15)$$

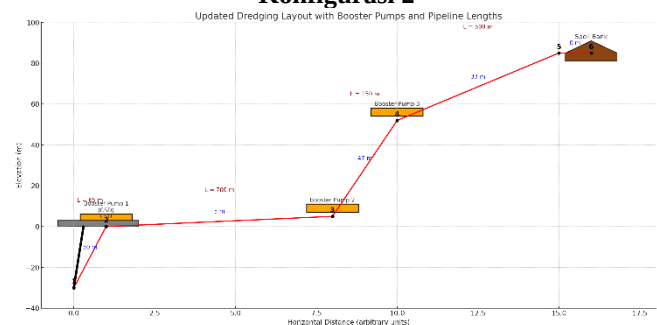
Daya pompa yang sudah disesuaikan dapat dilihat dalam tabel berikut:

Tabel 7. Kebutuhan Daya Tiap Pompa Untuk Konfigurasi 5 Pompa

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Daya 1 pompa dengan fluida air	156	kW	Data grafik
Daya 1 pompa dengan slurry	162.6374	kW	Calculated
Total daya 5 pompa	813.1871	kW	Calculated

Sumber: Hasil Perhitungan

Konfigurasi 2



Gambar 5. Skema Konfigurasi 2 (CSD + 1 FBP + 2 Booster Darat)

Keterangan: Dengan mengurangi satu unit *Booster Pump* dibanding konfigurasi sebelumnya, diharapkan terjadi

penghematan energi dan biaya operasional. Akan tetapi, diameter pipa yang sama tetap memberikan tantangan dalam hal head loss yang cukup signifikan, khususnya pada bagian hilir saluran alir. Skema peralatan yang digunakan meliputi:

- 1 unit Submersible Pump (CSD)
- 1 unit Floating Booster Pump
- 2 unit Booster Pump
- Pipa buang Ø220 mm

Tabel 8. Debit dan Head Yang Dihasilkan Oleh Konfigurasi 4 Pompa

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Head loss total 4 pompa (1 dredge + 3 booster) (H_L)	114.7775	m	calculated
Debit aliran yg dihasilkan 4 pompa (H_P)	713.5644	m ³ /hr	calculated
Head total yg dihasilkan 4 pompa ($H_{P\text{total}}$)	196.3086	m	calculated
Head yg dihasilkan per pompa (H_p)	49.0771	m	calculated

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan Head Tekanan Di Setiap Segmen

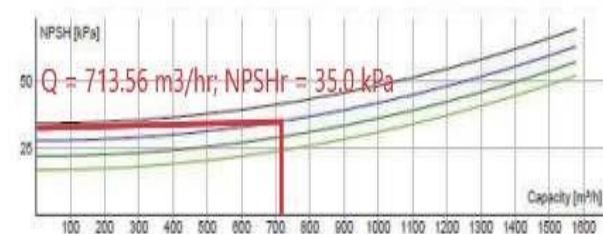
Head tekanan keluar pipa di setiap segmen dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 9. Head Tekanan Keluar Di Setiap Segmen

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Head tekanan di titik 2	51.4856	m	Calculated
Head tekanan di titik 3	41.4642	m	Calculated
Head tekanan di titik 4	32.9805	m	Calculated
Head tekanan di titik 5	9.9246	m	Calculated

Sumber: Hasil Perhitungan

Perhitungan Kecukupan NPSH



Gambar 6. Penentuan NPSH Required Masing-Masing Pompa Untuk Konfigurasi 4 Pompa

Dari kurva NPSH required vs debit diperoleh bahwa NPSH yang dibutuhkan pada debit $Q = 713.56 \text{ m}^3/\text{hr}$ adalah 35.00 kPa. Dari perhitungan sebelumnya, diperoleh bahwa:

1. Head tekanan di titik 2 sama dengan NPSH available di inlet Booster Pump 1.
2. Head tekanan di titik 3 sama dengan NPSH available di inlet Booster Pump 2.
3. Head tekanan di titik 4 sama dengan NPSH available di inlet Booster Pump 3.

Berdasarkan kriteria $\text{NPSH}_a \text{ (kPa)} > \text{NPSH}_r \text{ (kPa)} + 10 \text{ kPa}$ dapat dilakukan analisis kecukupan NPSH yang hasilnya ditampilkan pada table berikut.

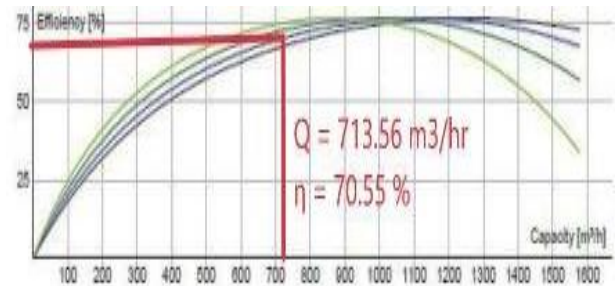
Tabel 10. Kecukupan NPSH Masing-Masing Pompa Untuk Konfigurasi 4 Pompa

Parameter	NPSH available (kPa)	NPSH required (kPa)	Keterangan
Submersible	346.27	35.0	Cukup

Booster Pump 1	525.5103	35.0	Cukup
Booster Pump 2	423.2228	35.0	Cukup
Booster Pump 3	336.6297	35.0	Cukup

Sumber: Hasil Perhitungan

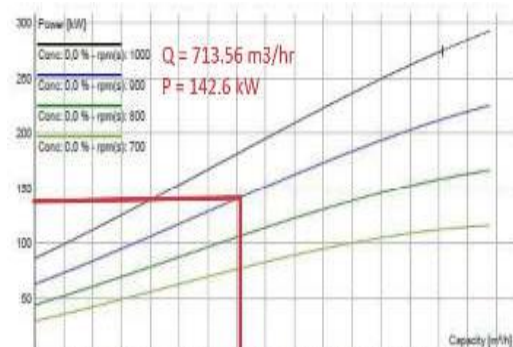
Penentuan Efisiensi Pompa



Gambar 7. Penentuan Efisiensi Tiap Pompa Pada Konfigurasi 4 Pompa

Dari kurva efisiensi vs debit diperoleh bahwa untuk debit $Q = 713.56 \text{ m}^3/\text{hr}$, efisiensi pompa $\eta = 70.55\%$.

Penentuan Daya Pompa



Gambar 8. Penentuan Daya Tiap Pompa Untuk Konfigurasi 4 Pompa

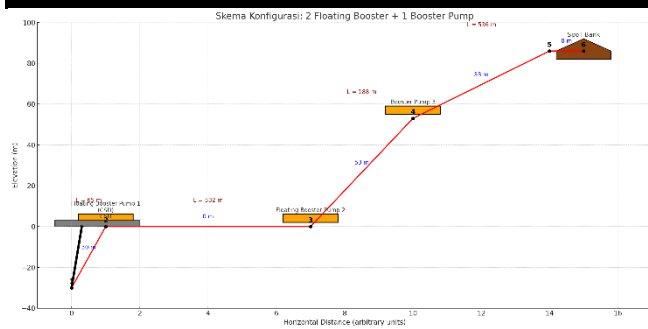
Dari kurva daya vs debit diperoleh bahwa untuk debit $Q = 713.56 \text{ m}^3/\text{hr}$, daya pompa $P = 142 \text{ kW}$. Namun demikian, daya tersebut merupakan daya yang diperoleh melalui pengujian menggunakan air murni. Pada fluida campuran, nilai tersebut harus dimodifikasi menggunakan hukum kesebangunan pompa. Daya pompa yang sudah disesuaikan dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 11. Daya Pompa Yang Sudah Disesuaikan Dengan Fluida Slurry Untuk Konfigurasi 4 Pompa

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Daya 1 pompa dengan fluida air	142.6	kW	Data grafik
Daya 1 pompa dengan slurry	148.6673	kW	Calculated
Total Daya 4 pompa	650.5497	kW	Calculated

Sumber: Hasil Perhitungan

Konfigurasi 3



Gambar 9. Skema Konfigurasi 3 (CSD + 2 FBP + 1 Booster Darat)

Keterangan: Penggunaan dua unit Floating Booster Pump secara paralel memberikan fleksibilitas distribusi tekanan dari titik awal pengerukan. Sementara diameter pipa yang lebih besar berkontribusi signifikan dalam menurunkan head loss total, sehingga sistem dapat beroperasi dengan kebutuhan daya lebih rendah. Berdasarkan hasil simulasi, konfigurasi ini menunjukkan performa paling stabil dan efisien secara teknis maupun ekonomis. Skema peralatan yang digunakan meliputi:

- 1 unit Submersible Pump (CSD)
- 2 unit Floating Booster Pump
- 1 unit Booster Pump Pipa buang Ø250 mm

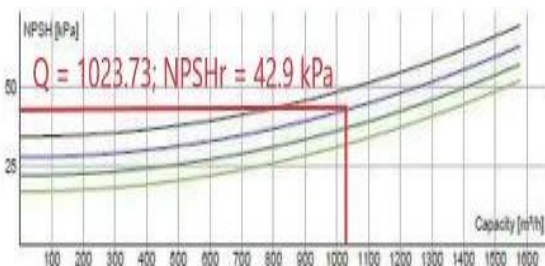
Penentuan Head Tekanan Di Setiap Segmen

Tabel 12. Head Tekanan di Setiap Segmen (nomenklatur titik merujuk pada skema di Gambar diatas)

Parameter	Nilai (m)	Keterangan
Head tekanan di titik 2	51.4856 m	Calculated
Head tekanan di titik 3	41.4642 m	Calculated
Head tekanan di titik 4	32.9805 m	Calculated
Head tekanan di titik 5	9.9246 m	Calculated

Sumber: Hasil Perhitungan

Analisis Kecukupan NPSH



Gambar 10. Penentuan NPSH Required Untuk Konfigurasi Pipa 250 mm dan 4 Pompa

Dari kurva NPSH required vs debit diperoleh bahwa NPSH yang dibutuhkan pada debit $Q = 1023.73 \text{ m}^3/\text{hr}$ adalah 42.9 kPa. Dari perhitungan sebelumnya, diperoleh bahwa:

1. Head tekanan di titik 2 sama dengan NPSH available di inlet Booster Pump 1.
2. Head tekanan di titik 3 sama dengan NPSH available di inlet Booster Pump 2.
3. Head tekanan di titik 4 sama dengan NPSH available di inlet Booster Pump 3.

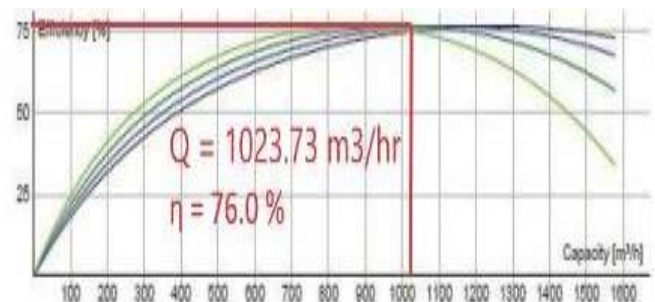
Berdasarkan kriteria $\text{NPSH}_a (\text{kPa}) > \text{NPSH}_r (\text{kPa}) + 10 \text{ kPa}$ dapat dilakukan analisis kecukupan NPSH yang hasilnya ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 13. Analisis Kecukupan NPSH Untuk Konfigurasi Pipa 250 mm dan 4 Pompa

Parameter	NPSH Available (kPa)	NPSH Required (kPa)	Keterangan
Submersible	346.2700	42.9	Cukup
Booster Pump 1	545.7784	42.9	Cukup
Booster Pump 2	630.4333	42.9	Cukup
Booster Pump 3	475.1782	42.9	Cukup

Sumber: Hasil Perhitungan

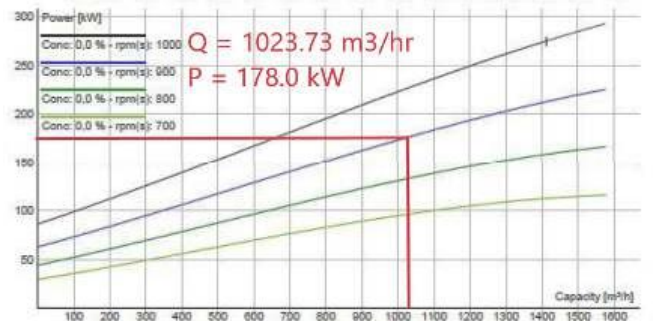
Penentuan Efisiensi Pompa



Gambar 11. Penentuan Efisiensi Pompa Untuk Konfigurasi Pipa 250 mm dan 4 Pompa

Dari kurva efisiensi vs debit diperoleh bahwa untuk debit $Q = 1023.73 \text{ m}^3/\text{hr}$, efisiensi pompa $\eta = 76.0\%$.

Penentuan Daya Pompa



Gambar 12. Penentuan Daya Pompa Untuk Konfigurasi Pipa 250 mm dan 4 Pompa

Dari kurva daya vs debit diperoleh bahwa untuk debit $Q = 1023.73 \text{ m}^3/\text{hr}$, daya pompa $P = 178 \text{ kW}$. Namun demikian, daya tersebut merupakan daya yang diperoleh melalui pengujian menggunakan air murni. Pada fluida campuran, nilai tersebut harus dimodifikasi menggunakan hukum kesebangunan pompa. Daya pompa yang sudah disesuaikan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 14. Penentuan Daya Pompa jika Menggunakan Fluida Slurry

Parameter	Nilai (kW)	Satuan	Keterangan
Daya 1 pompa dengan fluida air	178.0	kW	Data grafik
Daya 1 pompa dengan slurry	185.5735	kW	(Calculated)
Total daya untuk 4 pompa	742.2938	kW	(Calculated)

Pembahasan teknis dari kalkulasi 3 (tiga) jenis konfigurasi di atas meliputi:

- 6.1. Evaluasi Head Loss Sistem Pengerukan
Perhitungan head loss menggunakan Persamaan Darcy-Weisbach menunjukkan bahwa konfigurasi sistem dengan booster pump ganda menghasilkan total head loss sebesar 72,7 meter untuk panjang pipa ± 2.800 meter. Faktor gesekan disesuaikan berdasarkan karakteristik slurry dan jenis pipa. Hasil ini mendukung efisiensi aliran lumpur (slurry) dalam sistem pengerukan hidrolik.

Hasil ini sejalan dengan studi dari Patel (2019), yang menekankan pentingnya perhitungan head loss dalam desain sistem pipa untuk slurry transportasi sedimen, agar sistem tidak mengalami overpressure maupun efisiensi rendah dalam operasional jangka panjang.

- 6.2. Analisis NPSH dan Kavitasi
Nilai NPSHa (Net Positive Suction Head Available) dihitung sebesar 6,8 meter, dengan NPSHr (Net Positive Suction Head Required) pada pompa sebesar 4,5 meter. Selisih positif ini menunjukkan sistem beroperasi dalam zona aman terhadap risiko kavitasi. Hal ini penting dalam sistem pengerukan berkelanjutan, karena kavitasi dapat menyebabkan erosi impeller pompa dan penurunan performa. Menurut Kausar et al. (2020), margin antara NPSHa dan NPSHr minimal harus $>1,5$ meter untuk menghindari kavitasi pada sistem booster pump dalam operasi pengerukan berkelanjutan.

- 6.3. Evaluasi Produktivitas dan Efisiensi Biaya
Konfigurasi sistem 3 dengan 2 Floating Booster Pump sejajar dan 1 booster darat menghasilkan debit slurry $600 \text{ m}^3/\text{jam}$, waktu pengerjaan 90 hari, dan biaya pengerukan Rp147.202,47 per m^3 . Estimasi ini berdasarkan pada AHSP 2025 dan hasil observasi lapangan. Dibandingkan konfigurasi lainnya, sistem ini menunjukkan produktivitas tinggi dengan efisiensi energi optimal dengan perbandingan sebagai berikut:

- Konfigurasi 1

- a. Biaya pengadaan meliputi: 1 unit *Submersible Pump* (CSD), 1 unit *Floating Booster Pump*, 3 unit *Booster Pump* Pipa buang $\varnothing 220$ mm sebesar Rp.52,611,989,000
- b. Biaya operasional sebesar Rp. 4,867,696,843
- c. Total biaya Pengerukan pada konfigurasi 1 sebesar Rp.57,479,685,843.00 dengan harga biaya operasional pengerukan per meter kubik sebesar Rp.194,707.87.

- Konfigurasi 2

- a. Biaya pengadaan meliputi: 1 unit *Submersible Pump* (CSD), 1 unit *Floating Booster Pump*, 2 unit *Booster Pump*, Pipa buang $\varnothing 220$ mm sebesar Rp.48,898,389,000
- b. Biaya operasional sebesar Rp.5,878,165,373
- c. Total biaya Pengerukan pada konfigurasi 2 sebesar Rp.54,776,554,373.00 dengan harga biaya operasional pengerukan per meter kubik sebesar Rp.235,126.61.

- Konfigurasi 3

- a. Biaya pengadaan meliputi: 1 unit *Submersible Pump* (CSD), 2 unit *Floating Booster Pump*, dan 1 unit *Booster Pump* Pipa buang $\varnothing 250$ mm sebesar Rp.50,434,000,000
- b. Biaya operasional sebesar Rp.3,680,061,759
- c. Total biaya Pengerukan pada konfigurasi 3 sebesar Rp.54,114,508,231.00 dengan harga biaya operasional pengerukan per meter kubik sebesar Rp. 147,202.47.

Perbandingan ini diperkuat oleh studi Nisa (2022), yang menyebutkan bahwa kecepatan pengerukan sangat dipengaruhi oleh konfigurasi pompa dan panjang pipa. Sistem dengan booster ganda cenderung memberikan debit yang stabil, terutama untuk jarak panjang seperti pada Bendungan Sigura-gura dan Tangga.

- 6.4. Dampak terhadap Keberlanjutan Operasional PLTA
Keberhasilan sistem pengerukan dalam mempertahankan volume tampungan bendungan berdampak langsung terhadap kestabilan debit aliran masuk ke turbin. Hal ini mengurangi risiko downtime akibat penumpukan sedimen dan menjaga efisiensi konversi energi.

Dukungan sistem pengerukan yang tepat terbukti secara signifikan meningkatkan kapasitas produksi listrik seperti yang disoroti oleh Ahmad & Mahendra (2021) dalam studi evaluasi desain pengerukan untuk keberlanjutan waduk di sistem PLTA Asahaan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode pengerukan sedimen menggunakan sistem *Cutter Suction Dredger* (CSD) yang dikombinasikan dengan alat bantu berupa floating booster pump dan booster pump darat dapat menjadi solusi teknis dan ekonomis dalam mengatasi akumulasi sedimentasi di Bendungan Tangga dan Sigura-gura.

Dari tiga konfigurasi yang dianalisis, Konfigurasi 3 terdiri dari 1 unit CSD, 1 submersible pump, 2 floating booster pump dipasang sejajar, dan 1 booster pump darat terbukti paling optimal. Sistem ini mampu menghasilkan debit slurry sebesar $600 \text{ m}^3/\text{jam}$, menekan head loss hingga 72,7 meter, menyelesaikan pengerjaan dalam waktu hanya 3 bulan, serta

memiliki biaya pengerukan paling efisien yaitu Rp147.202,47 per m³.

Secara teknis, konfigurasi ini juga memenuhi kriteria keamanan terhadap risiko kavitasi dengan nilai NPSHa yang memadai. Keunggulan ini menunjukkan bahwa penerapan sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional pengerukan, tetapi juga menjamin keberlanjutan kapasitas tampungan bendungan dan operasional PLTA secara keseluruhan di wilayah hulu Sungai Asahan.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) M. Zulfan et al., 'ANALISIS KERUNTUHAN TUBUH BENDUNGAN AKIBAT OVERTOPPING PADA BENDUNGAN GINTUNG KABUPATEN PURBALINGGA ALTERNATIF 1', 2024. [Online]. Available: <http://jurnal.polinema.ac.id/>
- 2) I. Z. Nisa, 'Manajemen Waduk dan Kinerja PLTA di Sumatera', Jurnal Teknik Sipil FT Unsoed, 2022.
- 3) R. Patel, 'Slurry Pipeline Design for Sediment Transport', International Journal of Fluid Engineering, 2019.
- 4) A. Kausar and others, 'Optimization of Hydraulic Dredging Systems', Water Resources Management, 2020.
- 5) M. Hossain and A. Rahim, 'Cost Estimation for Dredging Projects', International Journal of Project Management, 2021.
- 6) I. Zahrotin Nisa' et al., 'PERANCANGAN NORMALISASI SUNGAI BOGOWONTO BAGIAN HILIR KAWASAN STRATEGIS NASIONAL YOGYAKARTA INTERNATIONAL AIRPORT', 2023. [Online]. Available: <http://jos-mrk.polinema.ac.id/>
- 7) S. Kumari and A. Verma, 'Dredging Equipment Performance and Sediment Flow', Applied Mechanics and Materials, 2020.
- 8) R. Ahmad and M. Mahendra, 'Evaluation of Dredging Design for Sediment Management', Journal of Sustainability, vol. 13, no. 2, pp. 112–120, 2021.
- 9) Y. Wang and J. Li, 'Cutter Suction Dredger Efficiency Model', Ocean Engineering, 2022.
- 10) F. Rahman and K. Yusuf, 'Sustainable Sediment Management', Journal of Environmental Hydraulics, 2020.
- 11) L. Zhang and H. Wu, 'Numerical Simulation of Cavitation', Advances in Mechanical Engineering, 2021.
- 12) M. Z. D. Saputra, 'Efisiensi Sistem Pompa pada Proyek Irigasi', Jurnal Teknik FT UNRIKA, 2021.