

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di sektor industri terus meningkat seiring dengan pertumbuhan aktivitas produksi dan tuntutan efisiensi operasional (IPCC, 2021; IRENA, 2024; IEA, 2023). Di sisi lain, isu perubahan iklim global dan komitmen penurunan emisi gas rumah kaca mendorong industri untuk mengadopsi strategi transisi energi melalui pemanfaatan energi baru dan energi terbarukan (EBT) serta peningkatan efisiensi energi (IPCC, 2021; IRENA, 2024; IEA, 2023). Dalam konteks tersebut, sektor ketenagalistrikan, khususnya pembangkit berbasis bahan bakar fosil, memiliki peran strategis melalui optimalisasi pemanfaatan energi yang tersedia di dalam sistem pembangkit (IPCC, 2021; IRENA, 2024; IEA, 2023).

PT XYZ merupakan salah satu unit bisnis Palm Oil Group yang bergerak di bidang pengolahan minyak kelapa sawit melalui aktivitas refinery dan produksi biodiesel (Nag, 2021; Moran et al., 2022). Perusahaan ini memiliki fasilitas pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berkapasitas 2×25 MW untuk memenuhi kebutuhan listrik internal, sehingga sistem utilitas energi yang dimiliki beroperasi secara kontinu dan relatif kompleks (Nag, 2021; Moran et al., 2022). PLTU tersebut menggunakan sistem pendingin terbuka (open cooling system) dengan air laut sebagai media pendingin kondensor (Nag, 2021; Moran et al., 2022). Air pendingin dialirkan dalam debit besar untuk proses kondensasi uap turbin, kemudian dibuang kembali ke laut setelah proses tersebut berlangsung (Nag, 2021; Moran et al., 2022). Secara teknis, sistem kondensor dalam siklus Rankine membutuhkan aliran pendingin dalam jumlah besar untuk menjaga tekanan balik turbin serta menjamin kestabilan operasi pembangkit (Nag, 2021; Moran et al., 2022).

Aliran buangan air pendingin kondensor (*tailrace*) pada PLTU memiliki karakteristik debit yang besar dan relatif stabil karena mengikuti operasi pembangkit

yang berlangsung secara kontinu (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018). Kondisi tersebut menunjukkan adanya potensi energi hidrolik yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal dan masih dilepaskan kembali ke lingkungan (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018). Berdasarkan kondisi aktual di lapangan, saluran tailrace memiliki lebar sekitar 2,8 m dan kedalaman rata-rata 0,3 m sehingga menghasilkan luas penampang aliran sekitar 0,84 m² (Paish, 2002; Kumar & Katoch, 2015). Dengan karakteristik tersebut, aliran buangan ini memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi hidrolik skala kecil (Paish, 2002; Kumar & Katoch, 2015). Dalam perspektif efisiensi energi dan pemanfaatan EBT, potensi tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), khususnya pada sistem *low-head hydropower* yang memanfaatkan energi kinetik dan potensial aliran air buangan industri (Paish, 2002; Kumar & Katoch, 2015).

Sejalan dengan hal tersebut, PT XYZ merencanakan pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan memanfaatkan aliran buangan air pendingin kondensor PLTU untuk menghasilkan daya listrik sekitar 100 kW (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018). Energi listrik yang dihasilkan direncanakan digunakan untuk menyuplai kebutuhan listrik pada peralatan unit *Water Treatment Plant* (WTP) yang mendukung penyediaan air baku bagi sistem *Reverse Osmosis* (RO) dan proses produksi perusahaan (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018). Adapun beberapa peralatan di WTP Plant seperti motor pada pompa transfer fresh water, HP pump, chemical pump, blower, dan compressor.

Implementasi PLTMH tersebut diharapkan dapat dilakukan tanpa mengganggu keandalan operasi PLTU, baik dari aspek hidrolika sistem pendingin maupun integrasi sistem kelistrikan (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018).

Berbagai kajian menunjukkan bahwa aliran buangan pada sistem utilitas industri dan pembangkit listrik memiliki potensi untuk dikonversi menjadi energi listrik melalui teknologi *small* atau *micro hydropower*, terutama pada kondisi debit besar dan head rendah (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018). Oleh karena itu,

penelitian ini difokuskan untuk mengidentifikasi potensi pemanfaatan energi hidrolik dari aliran buangan tersebut sebagai sumber energi baru dan terbarukan (EBT) melalui penerapan teknologi PLTMH (Paish, 2002; Kumar & Katoch, 2015).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji potensi pemanfaatan aliran buangan air pendingin kondensor PLTU sebagai unit pembangkit listrik mandiri (Paish, 2002; Quaranta & Revelli, 2018). Selanjutnya, kapasitas pembangkit yang direncanakan dalam penelitian ini ditentukan melalui analisis potensi energi hidrolik serta evaluasi kondisi teknis sistem aliran yang tersedia, yang kemudian menjadi dasar dalam perumusan permasalahan sebagai berikut.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana potensi daya dan energi listrik yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan air buangan pendingin kondensor PLTU sebagai sumber energi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)?
2. Bagaimana kesesuaian pemilihan turbin, generator, dan konfigurasi sistem PLTMH berdasarkan karakteristik hidrolik air buangan pendingin kondensor untuk mendukung kapasitas pembangkit sekitar 100 kW?
3. Bagaimana tingkat kelayakan pemanfaatan PLTMH pada aliran buangan air pendingin kondensor ditinjau dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan di lingkungan industri PT XYZ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan beberapa masalah di atas, tujuan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis potensi daya dan energi listrik yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan aliran buangan air pendingin kondensor PLTU sebagai sumber energi PLTMH.

2. Menganalisis kesesuaian pemilihan turbin, generator, dan konfigurasi sistem PLTMH berdasarkan karakteristik hidrolik air buangan pendingin kondensor untuk menghasilkan kapasitas pembangkit sekitar 100 kW.
3. Menganalisis kelayakan penerapan PLTMH berbasis air buangan pendingin kondensor pada PLTU ditinjau dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan, termasuk potensi pengurangan emisi sebagai upaya mendukung dekarbonisasi sektor energi.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan oleh berbagai kalangan, antara lain akademisi, profesional, industri, dan pembuat kebijakan, sebagai berikut:

1. Bagi akademisi, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kajian Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada lingkungan industri, khususnya yang memanfaatkan aliran buangan sistem pendingin PLTU sebagai sumber energi.
2. Bagi praktisi dan profesional, hasil penelitian ini dapat menjadi referensi teknis dalam perencanaan dan implementasi PLTMH berbasis pemanfaatan energi buangan (*waste energy recovery*) pada fasilitas pembangkit listrik maupun utilitas industri.
3. Bagi industri, penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan teknis dan ekonomi dalam upaya peningkatan efisiensi energi, optimalisasi pemanfaatan energi internal, serta pengurangan emisi karbon.
4. Bagi pembuat kebijakan, hasil penelitian ini dapat memberikan masukan dalam penyusunan kebijakan dan strategi pengembangan energi terbarukan serta efisiensi energi di sektor industri.

1.5 Orisinalitas Penelitian dan Gap Penelitian

Penelitian terkait perencanaan dan analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) telah banyak dilakukan dengan memanfaatkan sumber daya air alami seperti sungai, bendungan, dan saluran irigasi (Kumar & Singh, 2022; Singh et

al., 2023). Penelitian-penelitian tersebut umumnya berfokus pada wilayah pedesaan atau non-industri dengan tujuan penyediaan energi listrik bagi masyarakat.

Namun demikian, kajian mengenai pemanfaatan aliran buangan air pendingin kondensor PLTU sebagai sumber energi PLTMH di lingkungan industri masih relatif terbatas. Studi mengenai potensi energi pada sistem pendingin pembangkit termal baru mulai dikaji dalam beberapa tahun terakhir dan belum banyak membahas integrasi sistem secara komprehensif pada pembangkit skala menengah di lingkungan industri aktif (Zhang et al., 2022; Rahman et al., 2024).

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada evaluasi desain dan kelayakan pemanfaatan PLTMH yang menggunakan aliran buangan air pendingin kondensor PLTU sebagai sumber energi, yang diaplikasikan pada lingkungan industri aktif. Penelitian ini tidak hanya menganalisis aspek teknis berupa debit, *head* efektif, serta pemilihan jenis turbin dan generator, tetapi juga mengkaji aspek ekonomi dan lingkungan sebagai bagian dari strategi peningkatan efisiensi energi dan transisi menuju energi berkelanjutan di sektor industri.

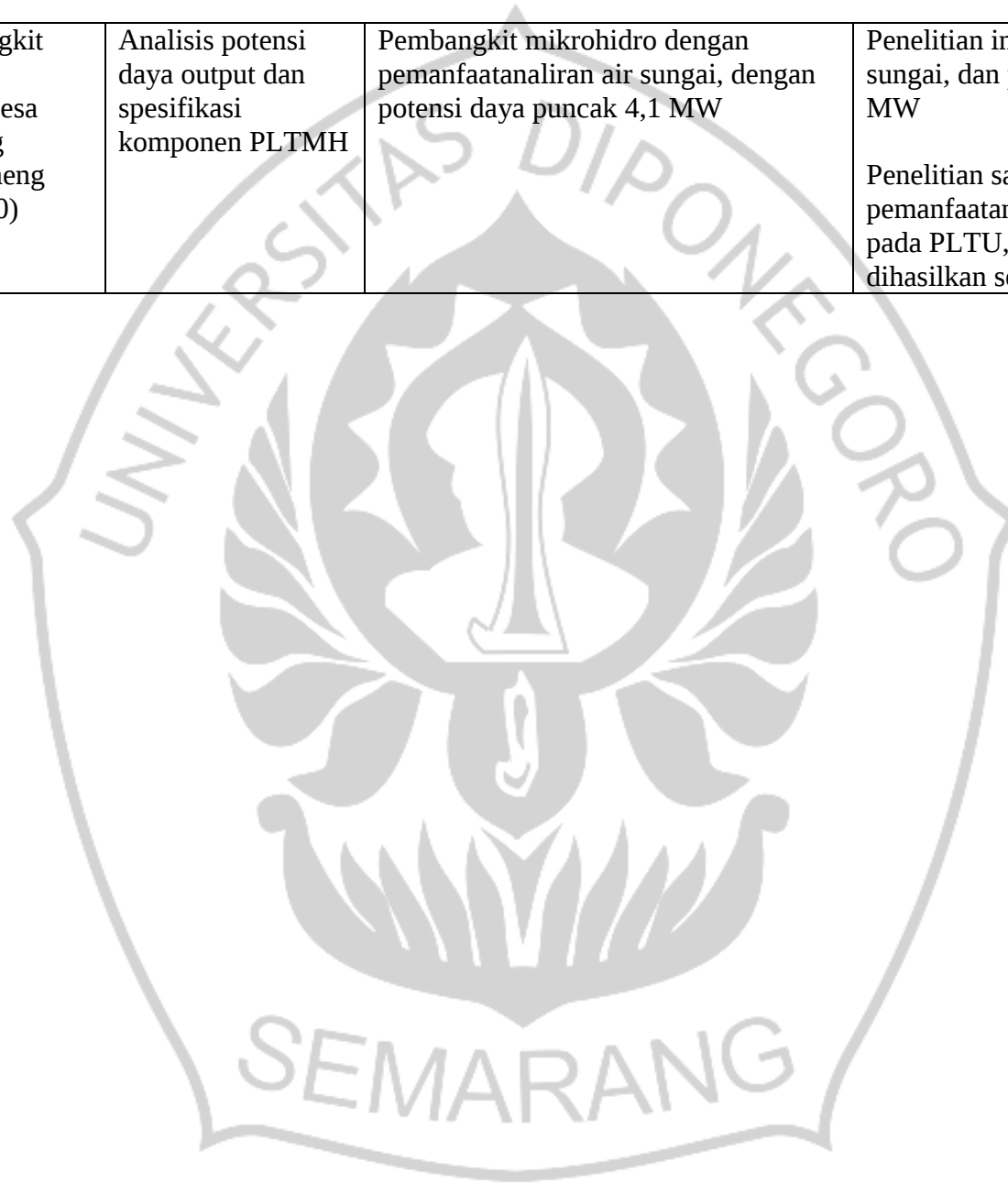
Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi celah penelitian (*research gap*) terkait pemanfaatan energi hidrolik dari limbah energi PLTU serta menjadi referensi dalam pengembangan PLTMH serupa di lingkungan industri lainnya.

Tabel 1.1 Gap Penelitian:

No	Judul Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil Penelitian	Gap Analysis
1	Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Damar Kecamatan Pageruyung Kabupaten Kendal (Mohamad et al., 2025)	Metode analisis potensi daya dengan perhitungan matematis komponen.	Penelitian mengidentifikasi, potensi energi air Sungai dan estimasi daya listrik dari aliran Sungai dengan <i>Head</i> Efektif 46,78 meter, dan Debit 1,212 m ³ /s. Dan daya yang dihasilkan 425,69 kW, turbin yang digunakan menggunakan turbin francis.	Penelitian ini adalah pemanfaatan aliran Sungai, dengan <i>Head</i> Efektif 46,78 meter, dan Debit 1,212 m³/s. menghasilkan Daya sebesar 425,69 kW, Turbine yang digunakan menggunakan turbin francis. Penelitian saat ini adalah pemanfaatan air kondensor PLTU, dengan <i>head</i> efektif 8,73 meter dan debit rata-rata 1,20 m³/s. Estimasi daya yang akan dihasilkan sekitar 100 kW, Turbin yang direncanakan adalah turbin <i>Crossflow</i> atau <i>impuls</i>.
2	Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Kabupaten Tana Toraja (Paillin et al., 2023)	Metode analisis hidrologi dan perhitungan daya	Penelitian ini menghitung potensi daya PLTMH dengan memanfaatkan Sungai wisata dikawasan toraja, dan daya listrik yang dihasilkan berdasarkan debit aliran 0,88 m ³ /s Adalah 15.67 kW.	Penelitian ini adalah pemanfaatan aliran Sungai, dengan debit 0,88 m³/s dan menghasilkan Daya sebesar 15.67 kW. Penelitian saat ini adalah pemanfaatan air kondensor PLTU, dengan debit rata-rata 1,20 m³/s dan estimasi daya yang akan dihasilkan sekitar 100 kW.

3	Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro pada saluran irigasi desa angantaka badung (I Komang et al., 2023)	Metode perencanaan teknis PLTMH	Penelitian merancang sistem PLTMH dengan penentuan turbin dan kapasitas daya. <i>Head</i> yang digunakan adalah 2,1 meter dan debit 0,306 m ³ /s, daya yang dihasilkan Adalah 3,75 kW, daya mekanis yang dipakai Adalah kincir air.	Penelitian ini adalah pemanfaatan aliran irigasi, <i>Head</i> yang digunakan adalah 2,1 meter dan debit 0,306 m³/s, daya yang dihasilkan Adalah 3,75 kW, daya mekanis yang dipakai Adalah kincir air. Penelitian saat ini adalah pemanfaatan buangan air kondensor pada PLTU, dengan debit rata-rata 1,20 m³/s dan estimasi daya yang akan dihasilkan sekitar 100 kW, Daya penggerak yang direncanakan adalah turbin <i>Crossflow</i>.
4	Rancang bangun pembangkit listrik turbin air mikro hidro tipe <i>cross-flow</i> kapasitas 2.500 watt Di kp. Mulyasari -bogor jawa barat (Azharul, 2020)	Perancangan turbin <i>Crosflow</i> berdasarkan karakteristik debit dan <i>head</i> untuk PLTMH	Perenacangan PLTMH dengan pemanfaatan air sungai di Desa Mulyasari dengan <i>head</i> 1,85 meter dan debit 0,2 m ³ /s, potensi daya yang dihasilkan adalah 2,497 kW.	Penelitian ini adalah pemanfaatan air sungai dengan menggali potensi daya dengan <i>head</i> 1,85 meter dan debit 0,2 m³/s, daya yang dihasilkan adalah 2,497 kW. Penelitian saat ini adalah pemanfaatan buangan air kondensor pada PLTU, dengan debit rata-rata 1,20 m³/s dan estimasi daya yang akan dihasilkan sekitar 100 kW.

5	Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Desa Batu Pataneteang Kabupaten Bantaeng (Indra et al., 2020)	Analisis potensi daya output dan spesifikasi komponen PLTMH	Pembangkit mikrohidro dengan pemanfaatan aliran air sungai, dengan potensi daya puncak 4,1 MW	Penelitian ini memanfaatkan air sungai, dan potensi daya adalah 4,1 MW Penelitian saat ini adalah pemanfaatan buangan air kondensor pada PLTU, dengan daya yang akan dihasilkan sekitar 100 kW.
---	--	---	---	---



Berdasarkan Tabel 1.1, sebagian besar penelitian terdahulu mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) masih berfokus pada pemanfaatan sumber daya air alami, seperti sungai, bendungan, dan air terjun, yang umumnya terdapat di wilayah pedesaan atau non-industri. Penelitian-penelitian tersebut pada umumnya membahas aspek perencanaan teknis PLTMH untuk penyediaan energi listrik bagi masyarakat, serta optimalisasi desain turbin pada kondisi aliran alami (*natural flow condition*) (Kumar & Singh, 2022; Singh et al., 2023; Paish, 2020).

Kajian mengenai pemanfaatan aliran buangan sistem pendingin air condenser pada unit PLTU belum banyak dibahas. Tesis ini berfokus pada analisis air buangan dari *condenser* pada PLTU, sebagai sumber energi mikrohidro masih relatif terbatas dalam literatur ilmiah. Beberapa studi terbaru mulai mengidentifikasi potensi energi yang dapat diekstraksi dari sistem pendingin dan aliran limbah industri, namun sebagian besar penelitian tersebut belum mengkaji integrasi sistem PLTMH secara komprehensif pada pembangkit listrik skala menengah di lingkungan industri aktif (Zhang et al., 2022; Rahman et al., 2024).

Penelitian ini menunjukkan perbedaan fundamental dibandingkan studi-studi terdahulu. Pemanfaatan aliran buangan air pendingin kondensor (*tailrace*) pada PLTU membuka peluang penerapan sistem PLTMH yang berdiri sendiri (*mnadiri*), sehingga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi total kapasitas pembangkit itu sendiri. Selain melakukan evaluasi teknis yang mencakup karakteristik debit, *head* efektif, serta pemilihan tipe turbin dan generator pada kondisi *low head-high flow*, penelitian ini juga menganalisis kelayakan ekonomi serta dampak lingkungannya sebagai bagian dari upaya optimalisasi efisiensi energi dan pemanfaatan energi buangan dalam sistem pembangkitan (Gatti et al., 2020; IEA, 2023).

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengisi celah penelitian terkait pemanfaatan energi hidrolik buangan pada sistem pendingin PLTU, serta memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan PLTMH berbasis *waste energy recovery* pada sektor industri, yang hingga saat ini masih relatif terbatas dalam literatur ilmiah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi sistem PLTMH dengan aliran buangan air pendingin kondensor PLTU sebagai sumber energi hidrolik buangan. Penelitian ini mengembangkan pendekatan evaluasi potensi daya, desain sistem PLTMH pada kondisi *low head-high flow*, serta analisis tekno-ekonomi untuk pemanfaatan energi buangan pada lingkungan industri aktif. Pendekatan ini berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya memanfaatkan sumber air alami, sehingga penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam

pengembangan konsep *waste energy recovery* untuk peningkatan efisiensi energi pada sistem pembangkit listrik.



