

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas *Mobile Power Plant* (PLTGMPP)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas *Mobile Power Plant* (PLTG MPP) dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar, termasuk gas alam, *liquid* (cair) atau solar. Meskipun gas alam umumnya menjadi bahan bakar utama, keberagaman ini menambah fleksibilitas PLTG dalam memenuhi kebutuhan energi yang beragam. Turbin gas pada PLTG MPP dirancang untuk dapat menggunakan berbagai jenis bahan bakar ini tanpa mengorbankan efisiensi dan bersifat *mobile* yang dapat dipindah pindahkan ke daerah yang kekurangan pasokan listrik. Selain gas alam, penggunaan *liquid* atau solar pada PLTG memberikan alternatif yang berguna terutama dalam situasi di mana pasokan gas alam mungkin terbatas atau tidak ekonomis. Sistem kontrol yang canggih pada PLTG memungkinkan transisi yang mulus antara berbagai jenis bahan bakar, memastikan kontinuitas operasi pembangkit listrik. Keberlanjutan energi dan efisiensi PLTG MPP, bersama dengan kemampuannya untuk beradaptasi dengan sumber daya bahan bakar yang berbeda, membuatnya menjadi solusi yang menarik dan berkelanjutan dalam memenuhi kebutuhan listrik Masyarakat (Mulyani & Hartono, 2018)

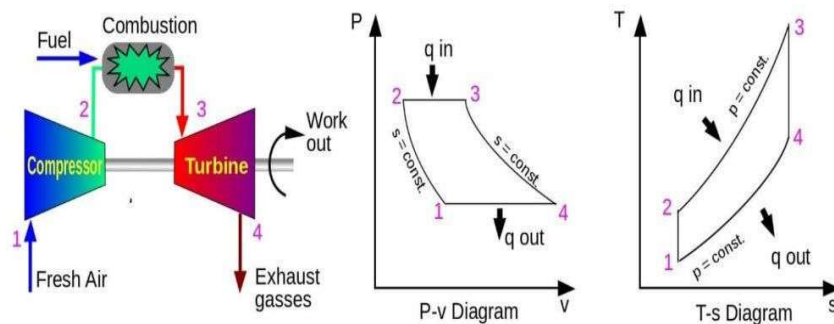
Turbingas bekerja (berputar) disebabkan oleh energi panas berupa gas panas hasil pembakaran di ruang bakar. Pembakaran tersebut terjadi di dalam *combustor* dengan mencampurkan bahan bakar dengan udara. Udara tersebut diperoleh dari *compressor* aksial yang menghisap udara atmosfer. (Rafif et al., 2020).

Compressor aksial tersebut terpasang satu poros dengan turbin gas. Tenaga putar (energi mekanik) turbin gas akan digunakan untuk menggerakkan generator sehingga dapat menghasilkan listrik. Gas panas tersebut setelah digunakan untuk memutar turbin akan dibuang ke atmosfer dengan temperatur yang masih tinggi. (Widodo, 2016).



Gambar 2.1 *Engine GE TM2500 PLTG MPP Bangka*

Keunggulan PLTG MPP adalah efisiensinya yang tinggi, mampu merespons permintaan listrik dengan cepat, serta kemampuannya untuk beroperasi dalam berbagai kondisi. Dengan menggunakan gas alam sebagai bahan bakar, PLTG dianggap sebagai solusi pembangkit listrik yang lebih bersih dan ramah lingkungan. PLTG menggunakan siklus Brayton. Siklus *Brayton* adalah suatu siklus termal yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga gas (PLTG). Siklus ini menyediakan kerangka kerja untuk menjelaskan bagaimana PLTG mengubah energi panas dari pembakaran bahan bakar menjadi energi mekanis yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Siklus *Brayton* terdiri dari empat langkah utama ialah kompresi, pembakaran, ekspansi, dan pembuangan.



Gambar 2.2 Siklus *Brayton* PLTG

Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan proses berkelanjutan yang dimulai dengan membakar bahan bakar gas dalam turbin gas untuk menghasilkan energi mekanis yang digunakan dalam menggerakkan generator listrik. Turbin gas suatu PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang

terkandung di dalam bahan bakar, menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Siklus kerja pembangkit PLTG lebih sederhana. Proses Pembangunan pembangkit listrik yang lebih cepat dibandingkan dengan pembangunan pembangkit listrik tenaga uap. Konstruksi pembangunan pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) sederhana sehingga tidak memerlukan area yang luas. Proses siklus dan keadaan ini memungkinkan PLTG MPP memberikan respons yang cepat terhadap fluktuasi permintaan listrik dan mendukung integrasi sumber energi terbarukan, menjadikannya pilihan yang fleksibel dan efisien dalam penyediaan daya listrik.

2.1.2 Komponen PLTG MPP

2.1.2.1 Komponen Utama PLTG MPP

1. *Compressor*

Compressor berfungsi mengompresikan atau memampatkan udara yang masuk melalui *air filter* untuk dinaikkan tekanannya sebesar 12 – 16 atm. *Compressor* terdiri atas 17 stage terdiri dari *stage 0 – 16 stage* dimana semakin besar ukuran *blades* pada *compressor* maka tekanannya semakin kecil. *Compressor* yang dioperasikan oleh penggerak awal akan menghasilkan pasokan udara bertekanan pada kecepatan putaran sebesar 9.500 rpm. Udara bertekanan ini diterapkan dalam proses pembakaran *fuel* (baik LNG maupun HSD Solar) didalam ruang pembakaran atau *combustion chamber*.



Gambar 2.3 *Compressor*

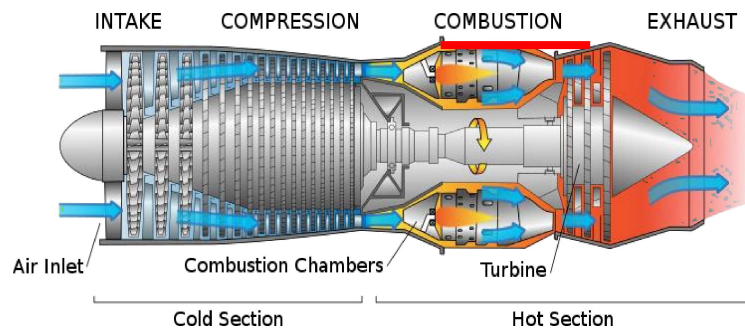
Tabel 2. 1 *Specification Compressor*

<i>Specification Compressor</i>		
	<i>ROW</i>	Material
<i>Disk</i>	0 ~ 10	3,75 NiCrMoV (Alloy Steel)

	11 ~ 16	2,5 CrMoVNb (Alloy Steel)
<i>Blade</i>	0 ~ 6	17-4 PH (Alloy Steel)
	7 ~ 16	12,5% Cr (Alloy Steel)
<i>Diaphragm</i>	IGV	12,5% Cr
	1	12,5% Cr (Alloy Steel)
	0 ~ 16	12,5% Cr (Alloy Steel)

2. Combustion Chamber (Ruang Bakar)

Ruang bakar atau *combustion chamber* adalah lokasi dimana terjadi reaksi pembakaran antara bahan bakar dan udara yang telah ditekan, menghasilkan gas hasil pembakaran dengan suhu dan tekanan tinggi. Gas panas yang timbul dari Proses pembakaran di *combustion chamber* dipergunakan menjadi energi penggerak untuk turbin gas.



Gambar 2.4 Combustion Chambers

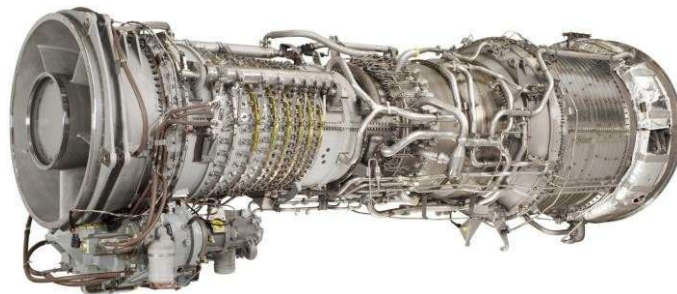
Tabel 2. 2 Spesification Combuster Chamber

<i>Spesification Combuster Chamber</i>	
<i>Identify</i>	<i>Material</i>
<i>Combustor type</i>	<i>Single Annular</i>
<i>Environmental (EV) Burner</i>	72
<i>Fuel</i>	<i>HSD Solar / LNG</i>
<i>LHV for design</i>	48.480 kJ/kg
<i>Density at 0°C</i>	0,7317 kg/Nm ³
<i>Min & Max Temperature</i>	15°C & 1700°C
<i>Min & Max Pressure</i>	14,9 bar & 38 bar

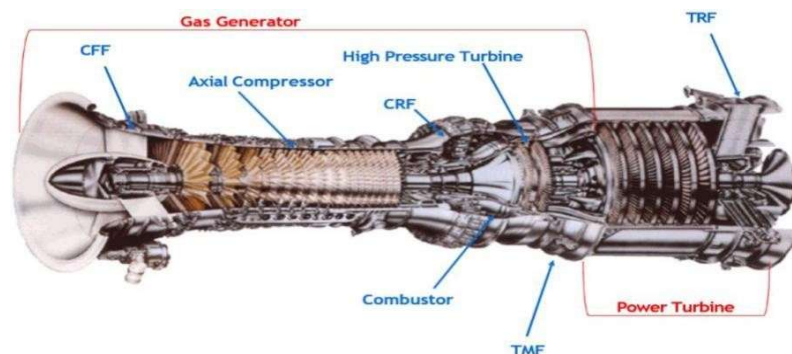
<i>Transition Piece</i>	<i>Tomilloy (Ni base super alloy)</i>
-------------------------	---------------------------------------

3. Turbin Gas

Turbin gas berfungsi untuk mengkonversikan dari gas yang dihasilkan dari *combustion chamber* yang bertekanan dan berkecepatan tinggi menjadi energi mekanis (putaran poros). Hasil putaran dari turbin digunakan memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. Bagian turbin yang berputar ini disebut rotor turbin dan bagian yang diam disebut stator. Dalam rangkaian turbin gas di kopel bersamaan dengan *compressor*, *combuster*, dan generator.



Gambar 2.5 Case Turbin Gas



Gambar 2.6 Turbin Gas PLTG MPP

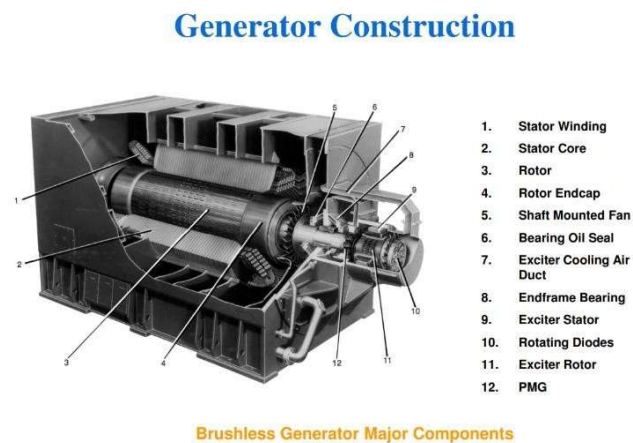
Tabel 2. 3 Spesifikasi Turbin Gas

<i>Specification</i>		
	<i>ROW</i>	Material
<i>Disk</i>	<i>1~6</i>	<i>3,75 NiCrMoV (Alloy Steel)</i>
	<i>1~6</i>	<i>MGA 1400 (Ni base super alloy)</i>
<i>Blade</i>	<i>1~6</i>	<i>MGA 1400 (Ni base super alloy)</i>

	6	<i>X-45 (Co base super alloy)</i>
--	---	-----------------------------------

4. Generator

Generator berfungsi sebagai sebagai alat pembangkit listrik untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan sistem rangkaian magnetik dengan menggunakan tenaga putaran yang dihasilkan oleh turbin.



3

Gambar 2.7 Generator PLTG MPP

2.1.2.2 Komponen Pendukung PLTG MPP

1. Sistem Minyak Pelumas (*Lube Oil System*)

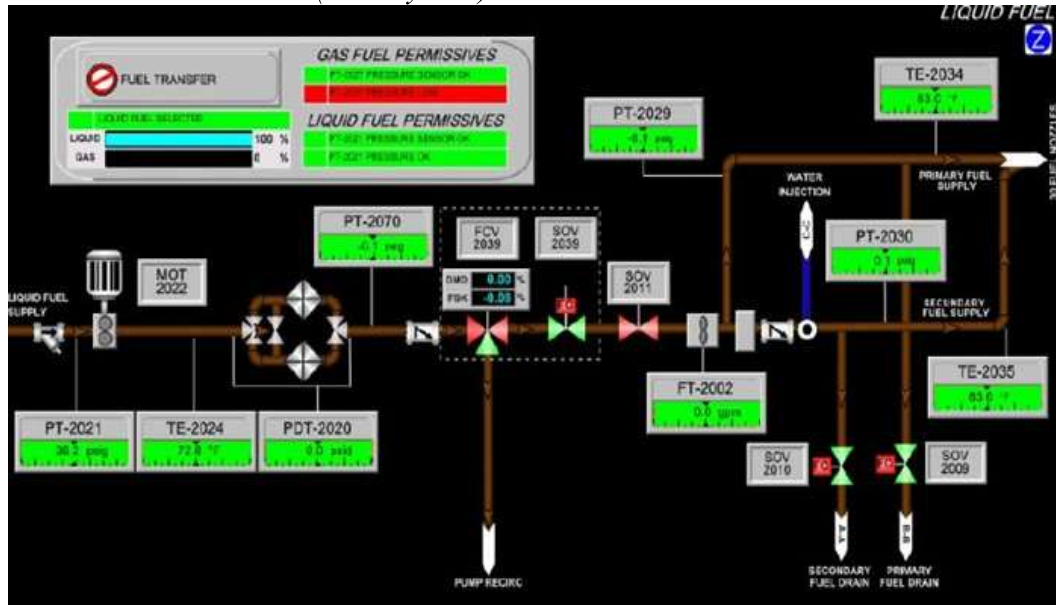


Gambar 2.8 TLO (*Turbine Lube Oil*) Reservoir PLTG MPP

Lubrication oil system pada PLTG MPP (Pembangkit Listrik Tenaga Gas *Mobile Power Plant*) merupakan komponen yang menyediakan pelumas atau oli yang

diperlukan untuk mengurangi gesekan dan menjamin pelumasan yang baik pada berbagai komponen mesin seperti poros, bantalan dan roda gigi. Sistem ini juga berperan dalam menjaga suhu dan mendinginkan komponen yang terkena Panas pada mesin. Selain itu, sistem pelumasan juga melindungi komponen tersebut dari keausan dan korosi. (Nabilah et al., 2022)

2. Sistem Bahan Bakar (*Fuel System*)



Gambar 2.9 Sistem Bahan Bakar PLTG

Sumber: (PT PLN Batam 2025)

Fuel system pada PLTG MPP (Pembangkit Listrik Tenaga Gas *Mobile Power Plant*) merupakan kompoen yang bertugas menyuplai bahan bakar HSD solar atau gas LNG ke ruang bakar mesin. Fungsi utama dari *fuel system* adalah untuk memastikan jumlah bahan bakar yang tepat, campuran bahan bakar diangkut dari penyimpanan atau suplai eksternal ke ruang bakar melalui saluran dan katup yang dikontrol. Sistem ini juga mencakup perangkat keselamatan dan kontrol untuk menjaga keselamatan dan kinerja mesin serta untuk mengukur aliran bahan bakar. (Nabilah et al., 2022)

3. Sistem Pemasukan Udara (*Air Inlet System*)



Gambar 2.10 *Motor Ventilation Air*



Gambar 2.11 *Air Intake Pre-Filter*

Sumber: (PT PLN Batam 2025)

Sistem pemasukan udara pada PLTG MPP merupakan sistem yang mengatur masuknya udara ke dalam ruang bakar. Ini mencakup filter untuk membersihkan udara dari partikel debu, pengaturan aliran udara untuk menjaga rasio udara bahan bakar yang benar, dan memantau suhu, tekanan, dan kecepatan udara. Sistem ini penting untuk menjaga efisiensi dan kinerja mesin PLTG MPP dalam menghasilkan listrik. (Nabilah et al, 2022).

2.1.2.3 Analisa Termodinamika

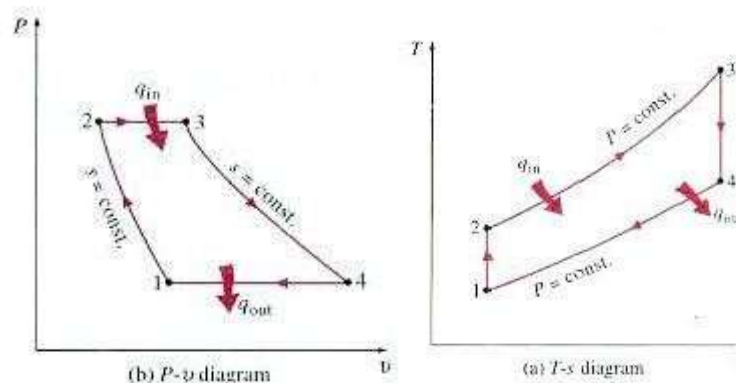
Secara etimologis, kata "termodinamika" berasal dari dua kata dalam bahasa Yunani: "termal" yang artinya panas dan "dinamis" yang artinya perubahan, merujuk pada sejarah konversi panas menjadi tenaga. Pada hakikatnya, termodinamika adalah cabang ilmu yang mempelajari energi, suatu konsep yang mudah dipahami namun kompleks untuk didefinisikan secara tepat. Energi pada dasarnya adalah kemampuan suatu sistem untuk mengalami perubahan. Ruang lingkup termodinamika modern telah berkembang jauh, mencakup aspek-aspek seperti konversi energi, produksi energi, dan sifat-sifat material. Salah satu pilar utamanya adalah Hukum Kekekalan Energi, yang

menyatakan bahwa energi bersifat kekal; ia hanya dapat diubah bentuknya, tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan..

Hukum pertama termodinamika pada hakikatnya merupakan representasi dari prinsip konversi energi yang menunjukkan bahwa energi merupakan salah satu ciri termodinamika. Disisi lain hukum kedua termodinamika menunjukan bahwa energi memiliki aspek kualitatif dan kuantitatif dan proses alamiah berlangsung menuju penurunan kualitas energi. (Mulyono, 2022).

2.1.2.4 Siklus *Brayton*

Pada sekitar tahun 1870, George Brayton, seorang insinyur dari Boston, mengembangkan konsep mesin yang serupa dengan mesin pembakaran internal. Dalam turbin gas, proses kompresi dan ekspansi terjadi dalam mesin putar (*compressor* dan turbin), dan mesin ini selalu beroperasi dalam siklus terbuka. Siklus termodinamika *Brayton*, yang digunakan dalam turbin gas, dapat dijelaskan pada diagram P-V dan T-S sebagai berikut:



Gambar 2.12 Siklus Turbin Gas Tekanan Konstan (Sumber:Faizaletal,2017)

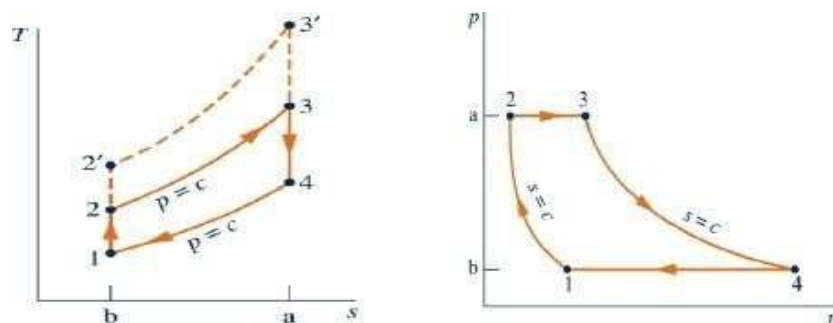
Dalam siklus terbuka turbin gas, udara yang bersih dari lingkungan diambil oleh *compressor* dan dikompresi hingga mencapai tekanan tinggi di dalam ruang bakar. Proses ini dapat dilihat pada diagram T-S (temperatur-entropi), di mana setelah *compressor*, suhu gas naik dari suhu awal T_1 ke T_2 dan tekanan naik dari P_1 ke P_2 . Tekanan dan suhu yang tinggi ini penting untuk proses pembakaran yang akan terjadi di dalam ruang bakar.

Setelah udara mencapai tekanan yang diinginkan, bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar untuk bercampur dengan udara terkompresi tersebut. Proses pembakaran berlangsung pada tekanan konstan dan menghasilkan gas bersuhu tinggi (T_3). T_3

adalah suhu gas hasil pembakaran yang selanjutnya akan dialirkan ke turbin. Penting untuk membatasi nilai T_3 karena kemampuan material turbin dalam menahan suhu tinggi. Suhu yang melebihi batas aman berisiko merusak komponen turbin. Setelah proses pembakaran, gas yang dipanaskan tersebut mengalami ekspansi pada turbin, menyebabkan suhu gas turun hingga mencapai T_4 . Meskipun demikian, suhu gas sisa pada tahap ini masih lebih tinggi dari suhu awal T_1 . Gas Sisa tersebut kemudian dibuang ke lingkungan. Gas buang tersebut berupa panas sisa pembakaran dari PLTG MPP.

2.1.2.5 Siklus *Brayton* Ideal

Siklus ideal *brayton* pada PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) adalah model teoritis untuk digunakan tentang menjelaskan bagaimana mesin PLTG bekerja secara konseptual (Irianto, 2016). Siklus tersebut melibatkan dua proses isentropik reversibel dan dua proses dengan tekanan konstan. Gas ini kemudian dikompresi secara isentropik dari titik awal ke titik kedua, dipanaskan pada tekanan yang tetap dari titik kedua ke titik ketiga, dan selanjutnya di ekspansikan secara isentropik melalui turbin dari titik ketiga ke titik keempat. Pendinginan terjadi dari titik keempat kembali ke titik awal, entah melalui pertukaran panas dalam siklus tertutup atau melalui lingkungan dalam siklus terbuka. Apabila diabaikan irreversibilitasnya maka udara akan mengalir pada setiap komponen siklus *brayton* sehingga tidak adanya penurunan tekanan maka udara akan mengalir melalui ruang bakar dengan tekanan konstan. Ketika perpindahan panas menyimpang pada lingkungan juga diabaikan oleh karena itu proses yang terjadi komponen tersebut merupakan proses isentropik. Hal ini berdasarkan siklus ideal yang dimana ditunjukkan dalam diagram P dan T dalam gambar dibawah ini sebagai berikut.



Gambar 2.13 Diagram P-v dan T-s siklus *Brayton* Ideal

(Sumber: Buku *Thermodynamics An Engineering Approach Fifth edition*)

Dengan diabaikannya *irreversibilitas* yang terjadi dimana udara akan mengalir melewati setiap komponen utama siklus *brayton*, tidak adanya penurunan tekanan yang disebabkan oleh gesekan dan udara akan bergerak dengan tekanan konstan didalam alat penukar kalor. Oleh sebab itu proses pada *compressor* dan turbin merupakan proses isentropik. Siklus ini memiliki empat tahap Langkah utama seperti yang terdapat pada gambar di atas diantaranya:

1. Langkah satu sampai dua: Udara dari lingkungan diambil dan melalui proses kompresidaridalam*compressor*untukmendapatkanudara dengantekananyang lebih tinggi (tahap kompresi).
2. Langkah dua sampai tiga: Udara yang telah ditekan oleh *compressor* akan dicampur dengan *fuel*, yang memulai reaksi proses pembakaran dan mendapatkan gas panas (tahap induksi kalor).
3. Langkah tiga sampai empat: Gas panas yang timbul dari proses pembakaran mengalir ke turbin untuk memulai perputaran turbin (tahap ekspansi).
4. Langkah empat sampai satu: Gas panas dari turbin dilepaskan ke atmosfer (tahap pelepasan gas).

Berikut beberapa persamaan siklus *brayton* yang akan digunakan dalam proses perhitungan analisis data pada siklus brayton ideal:

- a. Temperatur udara tekan ideal (T_2')

$$T_2 = T_1 \times r^{(k-1)/k} \dots\dots\dots (2.5)$$

- b. Temperatur gas buang ideal (T_4')

$$T_1 \times \frac{1}{r^{p(k-1)/k}} \dots\dots\dots (2.8)$$

(Setiawanetal.,2017)

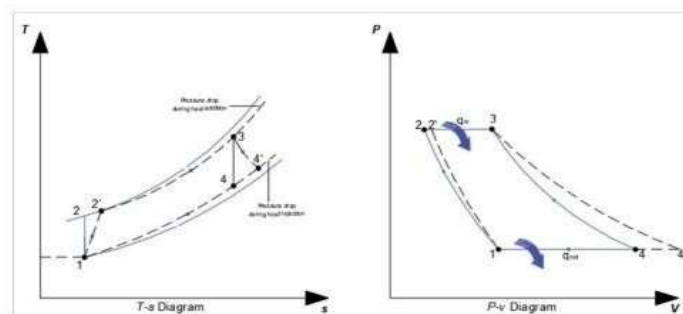
Keterangan:

T_1	: Temperatur masuk <i>compressor</i> (K)
T_2'	: Temperatur udara keluar <i>compressor</i> ideal (K)
T_3	: Temperatur udara masuk turbin aktual (K)
T_4'	: Temperatur gas buang ideal (K)
r_p	: Rasio <i>pressure</i>
K	: Rasio kapasitas spesifik

2.1.2.6 Siklus *Brayton* Aktual

Siklus *Brayton* Aktual ditampilkan dengan garis putus-putus dan tanda (') di atas. Pada setiap proses kompresi, terjadi gesekan fluida (1-2'), dan proses ekspansi mengalami gesekan fluida (3-4'), menunjukkan peningkatan entropi serta penurunan tekanan. Selama proses pemasukan panas (2-3) dan proses pembuangan panas (4-1), penurunan tekanan dapat dianggap tidak signifikan. Keperluan tekanan ini hanya diikuti dalam kasus-kasus perbandingan tekanan rendah.

Siklus mesin turbin gas aktual sebenarnya memiliki perbedaan dengan siklus *Brayton* ideal dalam beberapa perhitungan. Di satu sisi, terjadi penurunan tekanan tertentu dalam proses tersebut karena perpindahan panas dan kehilangan panas. Namun, yang lebih signifikan adalah bahwa dalam siklus mesin turbin gas aktual, energi yang dibutuhkan oleh *compressor* lebih besar dari pada energi yang dihasilkan oleh turbin. Siklus mesin turbin gas aktual memiliki perbedaan dengan siklus ideal ini dikarenakan terjadi kerugian yang terdapat di komponen *compressor* dan gas *turbine*, oleh karena itu proses ketika kompresi dan ketika ekspansi tidak bersifat isentropis (Irianto, 2016).



Gambar 2.14 Siklus *Brayton* Aktual (Sumber: Faizal et al., 2017)

Diagram T-S yang terdapat pada siklus *Brayton* aktual menggambarkan serangkaian proses yang terjadi, diantaranya:

2. Proses 1-2': Kompresi terjadi secara politropik. Ketika fluida mengalir melalui *compressor*. Selama proses ini, terjadi gesekan antara fluida dan dinding *compressor* serta bilah *compressor*, yang mengakibatkan peningkatan energi panas di atas kondisi ideal. Selain itu, tekanan udara yang masuk ke *compressor* juga mengalami penurunan akibat filter udara di saluran masuknya, yang harusnya meningkatkan rasio kompresi ideal.
3. Proses 2'-3: Proses pemberian panas terjadi dengan temperatur pelepasan *compressor* yang tinggi, melebihi batas ideal. Namun, temperatur keluar dari ruang

bakar tetap konstan karena terbatas oleh ketahanan material turbin. Hal ini mengakibatkan berkurangnya panas yang disuplai ke siklus. Idealnya, proses penyediaan panas adalah isobaric, tetapi dalam kondisi nyata terjadi penurunan tekanan di ruang bakar.

4. Proses 3-4': Proses ini karena gesekan antara gas dan sudu turbin, proses ekspansi memiliki karakter politropik yang berarti suhu gas yang keluar dari turbin lebih tinggi daripada suhu ideal.

5. Proses 4'-1: Proses pembuangan panas. Dengan temperatur keluaran turbin yang tinggi, energi panas yang dilepaskan juga menjadi lebih besar. Berikut beberapa persamaan siklus brayton yang akan digunakan dalam proses perhitungan analisis data pada siklus brayton aktual:

a. Panas masuk system actual atau kerja *Combustion Chamber* (Q_{in})

$$Q_{in} = LHV \times \dot{m}_{bb} \dots \dots \dots (2.7)$$

(Syammary et al., 2020)

b. $\dot{m}_{udara} = \left(\frac{Q_{in} - \dot{m}_{bb} \times h_3}{h_3 - h_2} \right) \dots \dots \dots (2.8)$

(Setiawan et al., 2017)

Keterangan:

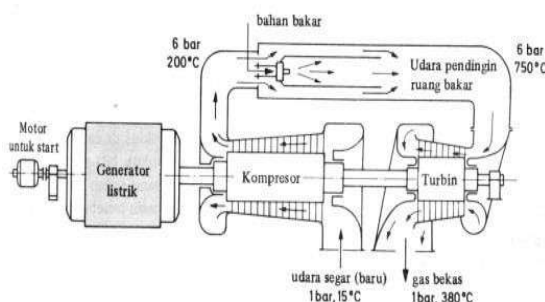
- Q_{in} : Panas masuk sistem (kJ/s)
- $\dot{m}_{bb}$: Laju aliran massa bahan bakar (kg/s)
- LHV : Nilai kalor bahan bakar
- (kJ/kg) $\dot{m}_{udara}$: kapasitas udara compressor (kg/s)
- h_1 : *Enthalpy* udara masuk *compressor* (kJ/kg)
- h_2 : *Enthalpy* udara keluar *compressor* (kJ/kg)
- h_3 : *Enthalpy* gas masuk turbin (kJ/kg)
- h_4 : *Enthalpy* gas keluar turbin (kJ/kg)

2.1.3 Prinsip Kerja dan Kerja Komponen

2.1.3.1 Prinsip Kerja dan Kerja Komponen Turbin Gas (W_{turbin})

Turbin gas adalah gas merupakan mesin yang menggunakan gas sebagai fluida kerja untuk menghasilkan gerakan. Prinsip dasarnya adalah mengonversi energi kinetik dari gas menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor, yang kemudian menghasilkan tenaga. Secara struktural, mesin ini terdiri atas dua bagian utama: komponen berputar

(rotor) dan komponen diam (stator). Rotor berfungsi memutar poros yang dapat menggerakkan peralatan seperti generator listrik, pompa, atau kompresor. Secara fundamental, sebuah PLTG MPP tersusun atas empat komponen inti: kompresor, ruang bakar, turbin, dan generator. Beberapa keunggulan turbin gas meliputi sifatnya yang mudah dipindahkan, desainnya yang ringkas, daya keluaran yang tinggi, tingkat getaran yang rendah, serta kemudahan pemasangan karena tidak memerlukan pondasi yang rumit.. Berbeda dengan mesin bolak-balik (reciprocating) yang prosesnya terputus-putus dalam satu ruang silinder, turbin gas beroperasi secara kontinu di mana fluida kerja mengalir secara terus-menerus melalui masing-masing komponennya. Keunggulan utama dari turbin gas adalah kemampuannya untuk beroperasi pada putaran tinggi, yang memungkinkan untuk mencapai efisiensi yang tinggi dalam menghasilkan daya. Selain itu, turbin gas juga memiliki kecepatan respons yang cepat, sehingga dapat dengan mudah diatur untuk memenuhi permintaan beban yang bervariasi dalam sistem UIP3BS.



Gambar 2.15 Skema Ilustrasi Turbin Gas Industri

Pada ilustrasi susunan turbin gas yang sederhana diatas, *compressor* bertindak seperti kipas yang mendorong fluida kerja ke dalam sistem pemanas. Fluida ini dipanaskan melalui dua Fluida dipanaskan dengan dua cara utama: secara internal melalui motor pembakaran dalam (proses terkontrol di mana bahan bakar disuntikkan langsung ke aliran udara) atau secara eksternal melalui motor pembakaran luar (fluida terkompresi dialirkan melalui saluran yang dipanaskan dari luar). Gas panas yang dihasilkan kemudian diekspansikan di turbin. Putaran poros turbin menghasilkan energi yang digunakan untuk menggerakkan kompresor dan beban eksternal.

Untuk memperkirakan kerja turbin gas, perlu diperhatikan bahwa gas hasil pembakaran mengalami ekspansi yang mengakibatkan penurunan tekanan dan suhu, namun dengan

entropi yang tetap (proses isentropik. Seperti terlihat pada gambar 2.15

2.1.3.2 Prinsip Kerja dan Kerja Komponen *Compressor* ($W_{compressor}$)

Compressor PLTG adalah perangkat mekanis yang bertugas untuk meningkatkan tekanan gas alam dari nilai tekanan masuk (*suction pressure*) ke nilai tekanan yang dibutuhkan (*discharge pressure*) sebelum gas alam tersebut masuk ke dalam turbin gas. Proses ini dikenal sebagai kompresi. *Compressor* adalah salah satu komponen utama dalam sistem PLTG MPP berperan meningkatkan tekanan udara atau gas untuk menghasilkan aliran udara bertekanan tinggi, yang sangat penting bagi proses pembakaran di ruang bakar. Prinsip operasinya mengacu pada hukum termodinamika, terutama prinsip Bernoulli dan hukum gas ideal. Saat udara memasuki kompresor, udara tersebut dikompresi sehingga tekanannya meningkat dan volumenya menurun. Fenomena ini sesuai dengan hukum gas ideal yang menjelaskan hubungan berbanding terbalik antara tekanan dan volume pada suhu konstan.. Proses ini meningkatkan energi kinetik dan potensial udara, sehingga menghasilkan aliran udara bertekanan tinggi pada keluaran *compressor*.

Pengertian *compressor* dalam konteks PLTG adalah mesin yang menghasilkan aliran udara bertekanan tinggi dengan memampatkan udara atau gas. Terdapat beberapa jenis *compressor* yang digunakan dalam PLTG, seperti *axial compressor* dan *centrifugal compressor*. *Axial compressor* bekerja dengan cara menekan udara secara aksial sejalan dengan poros *compressor*, sementara *centrifugal compressor* memampatkan udara dengan menggunakan gaya sentrifugal yang dihasilkan oleh rotor berputar di dalam ruang kompresi. Kedua jenis *compressor* ini memiliki prinsip kerja yang berbeda, tetapi tujuannya sama yaitu menciptakan aliran udara bertekanan tinggi (Kartono et al., 2020)

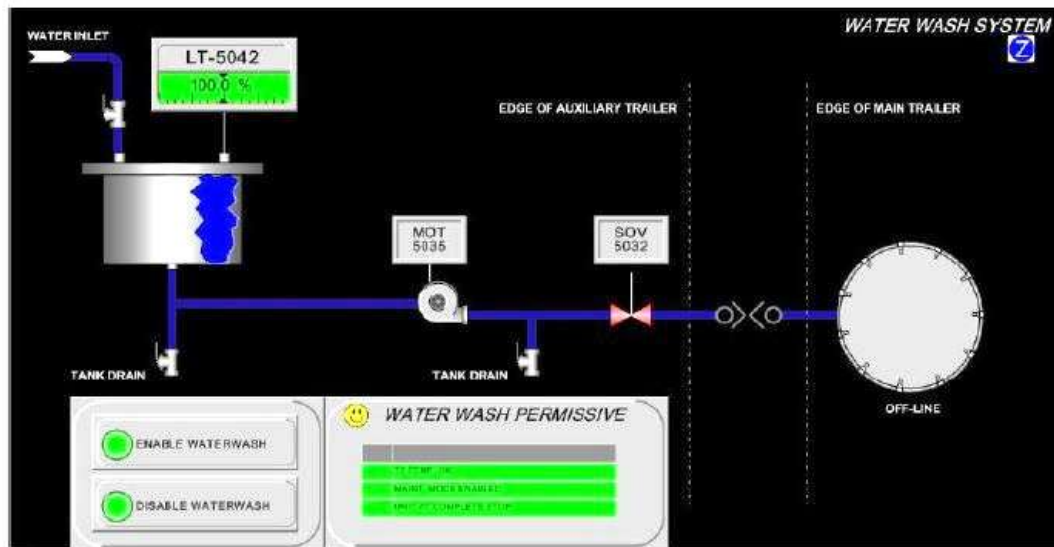
Dalam proses operasinya, *compressor* PLTG harus menjaga efisiensi kerja yang optimal untuk memastikan kinerja sistem pembangkit listrik secara keseluruhan. Hal ini dapat dicapai dengan menjaga kebersihan sudu-sudu *compressor*, mengatur tekanan masukan udara, dan memantau suhu operasi *compressor*. Selain itu, pemeliharaan rutin seperti *water wash* juga penting untuk menghilangkan kotoran dan deposit yang dapat mengganggu aliran udara, sehingga menjaga kinerja dan umur operasional *compressor*. Dengan memahami prinsip kerja dan melakukan pemeliharaan yang tepat, *compressor* dalam PLTG dapat beroperasi secara efisien dan andal, mendukung produksi

listrikyang stabil dan berkualitas.

Proses kompresi *isentropic* yang terdapat di *compressor* terjadi Ketika udara masuk ke dalam *compressor* sehingga menyebabkan peningkatan tekanan dan suhu tanpa mengubah entropi. (Syammary et al.,2020)

2.1.4 Water Wash Compressor

Water wash Compressor adalah proses pembersihan atau pencucian pada sudut-sudut *compressor* menggunakan air demin atau cairan pembersih khusus (ZOK). Tujuan utama dari *water wash* adalah untuk menghilangkan kotoran, debu, dan partikel lain yang menempel pada sudu *compressor*. Proses ini penting untuk menjaga kinerja dan efisiensi *compressor* dan turbin gas agar tetap optimal, karena penumpukan kotoran dapat mengganggu aliran udara masuk ke dalam *compressor* dan mengurangi daya kompresi yang dihasilkan. Kompresor dalam PLTG bertugas untuk meningkatkan tekanan udara yang masuk sehingga dapat menghasilkan udara bertekanan yang cukup tinggi untuk proses pembakaran di ruang bakar. Namun, dalam proses operasinya, kotoran seperti debu, minyak, dan partikel lainnya dapat menempel pada sudu *compressor*, mengurangi kinerja *compressor*. Proses *water wash* dilakukan dengan menyemprotkan air bersih atau campuran air dengan bahan kimia pembersih ke dalam *compressor*. Cairan pembersih ini membantu melarutkan dan menghilangkan kotoran serta deposit yang menempel pada sudu *compressor*. *Water wash* biasanya dilakukan melalui sistem *nozzle* atau pipa khusus yang terpasang pada unit PLTG, yang memungkinkan penyemprotan air atau cairan pembersih ke area-area yang sulit dijangkau oleh tangan manusia. Proses ini dilakukan dalam interval waktu tertentu, tergantung pada kondisi operasional dan kebutuhan pemeliharaan dari unit PLTG tersebut.



Gambar 2.16 Tampilan HMI *Water Wash*

Water wash memiliki beberapa manfaat, diantaranya adalah menjaga kinerja optimal *compressor* dengan menghilangkan kotoran yang dapat mengganggu aliran udara masuk, mencegah terjadinya *over heating* pada *compressor*, dan meningkatkan efisiensi serta daya output dari unit PLTG secara keseluruhan. Dengan menjaga kebersihan dan kinerja *compressor*, proses *water wash* menjadi bagian integral dari pemeliharaan rutin dalam menjaga agar PLTG dapat beroperasi dengan efisien dan andal. Hal yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan *water wash*.

2.1.4.1 Persiapan *Water wash*

Hal yang perlu dipersiapkan sebelum melakukan *water wash compressor* PLTG MPP diantaranya:

1. Pemeriksaan Peralatan

Proses *water wash* kompresor diawali dengan pemeriksaan peralatan, yang meliputi pengecekan motor pompa transfer air dan unit *water washing* skid.

2. Pembersihan Tanki *Water wash*

Setelah manhole dibuka, teramati bahwa tangki dalam kondisi kotor. Oleh karena itu, dilakukan pengurasan, diikuti dengan proses pembuangan sisa cairan (*drain*). Selanjutnya, tangki dibersihkan secara menyeluruh menggunakan *water jet* dan lap (*majun*).

3. *Flushing* Pipa

Karena beberapa bagian *water skid* terendam, maka dilakukan prosedur *flushing* pada seluruh saluran pipa menggunakan air demineral.

4. Pengisian Air Demin dan cairan ZOK

Tahap terakhir adalah pengisian tangki water wash. Tangki diisi dengan air demineral dan larutan ZOK yang berfungsi sebagai cairan pembersih untuk membersihkan sudu-sudu kompresor.



Gambar 2.17 Perlengkapan *Water Wash Compressor*

2.1.4.2 Pelaksanaan *Water wash*

Pelaksanaan *water wash* dengan memulai membuka beberapa katup dan menutup beberapa katup lainnya. Katup yang dibuka adalah katup pembuangan yang membuang air limbah dari *casing compressor*, ruang masuk *plenum*, dan ruang pembakaran. Katup yang ditutup termasuk katup pendingin udara dari *compressor* dan katup penutup udara dari *compressor* kebantalan Katup Pendeteksinya juga ditutup, sementara katup *blade* akan menutup secara otomatis sesuai dengan pengaturan sistem kontrol.



Gambar 2.18 *Witness* dan Pengambilan Sampel *Water Wash Compressor*

Sistem kontrol mengatur *water wash* pada turbin gas dengan cara menyemprotkan campuran air dan cairan ZOK langsung kedalam *compressor* saat proses *cranking*. Untuk melakukan ini, sebuah motor-pompa diaktifkan untuk menginjeksikan campuran tersebut ke dalam *compressor*. Pada awalnya, air yang keluar dari saluran pembuangan *combustion chamber* terlihat sangat kotor. Proses tersebut berlanjut hingga air yang keluar dari saluran pembuangan *compressor* terlihat bersih secara visual. Penyemprotan air terus dilakukan sampai mesin berhenti dan turbin gas mencapai kecepatan 0 rpm.



Gambar 2.19 Proses *Water Wash Compressor*

2.1.4.3 Pengeringan

Proses pengeringan *compressor* dan ruang bakar dilakukan dalam dua langkah. Langkah pertama melibatkan pengaktifan *cranking* pada turbin gas setelah proses *rising*. *Cranking* bertujuan untuk menghilangkan residu yang masih tersisa di inlet *plenum*, *compressor*, dan ruang bakar. Sebelum memulai langkah kedua pengeringan, semua katup yang sebelumnya disiapkan untuk *water wash* dikembalikan ke posisi semula. Langkah kedua dari proses pengeringan dilakukan dengan menggerakkan turbin hingga mencapai kecepatan penuh. Setelah *water wash* selesai, pengoperasian dilanjutkan, yang ditandai oleh perubahan parameter seperti penurunan suhu *exhaust*.



Gambar 2.20 Area *Drain Plug* setelah di bersihkan



9TH Stage

Gambar 2.20 Area *Stage 9* Setelah *Water Wash Compressor*

2.1.5 Faktor–Faktor yang Mempengaruhi Unjuk Kerja PLTG MPP

Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi unjuk kerja atau efisiensi dan performa PLTG MPP adalah sebagai berikut:

2.1.5.1 Kondisi Udara Lingkungan

Perubahan kondisi udara yang terjadi secara terus-menerus dapat memengaruhi performa sistem PLTG (Firmansyah et al., 2021). Suhu udara memengaruhi kerapatan udara, di mana suhu yang lebih tinggi mengakibatkan kerapatan udara yang lebih rendah. Tekanan udara atmosfer juga mempengaruhi kerapatan udara, dimanaketinggian tempat atau perubahan tekanan atmosfer dapat mengakibatkan penurunan kerapatan udara. Akibatnya, penurunan kerapatan udara akan mengurangi laju aliran udara yang masuk ke dalam *compressor*. Kehadiran kelembaban udara, dalam bentuk butiran air, akan menyerap sejumlah panas yang seharusnya diberikan kepada bahan bakar, mengubah butiran air menjadi uap. Sebagai hasilnya, proses ekspansi udaradalam ruang bakar menurun. Akibatnya, jumlah panas yang mendorong turbin gas juga dapat berkurang, menyebabkan penurunan dalam data yang dihasilkan. Sehingga untuk menjaga turbin pada daya atau beban yang sama, penambahan massa gas panas diperlukan. Proses ini hanya dapat dilakukan dengan menambahkan jumlah bahan bakar. Oleh karena itu, dalam kondisi di mana kerapatan udara menurun, penggunaan bahan bakar akan lebih besar untuk mempertahankan jumlah gas panas atau *heat rate* yang diperlukan. Peningkatan penggunaan bahan bakar menjadi kebutuhan penting untuk menjaga stabilitas dan kinerja optimal turbin gasdalammenghasilkan jumlah gas panas yang diperlukan.

2.1.5.2 Efisiensi *Compressor* dan Turbin Gas

Efisiensi *compressor* dan Turbin gas akan berbanding lurus dengan nilai efisiensi termalnya. Sehingga semakin baik nilai efisiensi *compressor* dan turbin gas maka efisiensi termal juga akan mengalami peningkatan.

2.1.5.3 Pengaturan Pembukaan *VIGV* (*Variabel Inlet Guide Van*)

Kerusakan *part* hidrolik pada *VIGV* akan mengalami gangguan pada suplai udara yang masuk kedalam *compressor*. Pembukaan *VIGV* dipengaruhi oleh kondisi beban yang dioperasikan, semakin tinggi bebannya maka pembukaan *VIGV* juga akan besar.

2.1.6 Kelebihan dan Kekurangan PLTG MPP

PLTG MPP memiliki beberapa keuntungan dibandingkan Pembangkit termal lainnya. Keuntungan tersebut antara lain yaitu:

1. *Start* dapat lebih cepat

Mengoperasikan PLTG MPP lebih mudah untuk di *start* sehingga lebih cepat menghasilkan daya yang besar dibandingkan dengan jenis pembangkit listrik lainnya, oleh karena itu PLTG MPP lebih baik untuk dioperasikan ketika menerima permintaan beban puncak dan sebagai pembangkit cadangan ketika kondisi *black out* atau darurat.

2. Ringan dan Bersifat *Mobile Power Plant*

PLTG MPP mempunyai berat persatuan daya (kg/kw) yang relatif kecil, oleh karena itu PLTG MPP tidak memerlukan pondasi yang berat dan ditempatkan di atas trailer sehingga apabila dibutuhkan sewaktu-waktu dapat dengan mudah dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya.

3. Waktu pembangunan yang singkat

PLTG MPP mempunyai waktu pembangunan yang lebih singkat dibandingkan dengan pembangunan PLTU, oleh karena itu PLTG MPP sangat cocok untuk mengatasi permasalahan tenaga listrik di suatu daerah.

4. Harga produksi listrik yang murah

PLTG MPP memiliki harga produksi yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik yang lain.

Selain mempunyai keuntungan, PLTG MPP juga mempunyai kerugian, diantaranya yaitu:

1. Efisiensi termal yang rendah

PLTG mempunyai efisiensi termal yang rendah dibandingkan dengan jenis pembangkit tenaga listrik lainnya yang terpasang daya yang sama. Oleh karena itu PLTG memiliki biaya operasinya yang tinggi.

2. Umur komponen yang relatif pendek

Untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat di suatu daerah sehingga PLTG beroperasi secara terus menerus dalam waktu yang telah ditentukan. Oleh sebab itu komponen-komponen PLTG sering mengalami pergantian yang lebih sering dibandingkan dengan jenis pembangkit tenaga listrik lainnya.

2.2 Penelitian Relevan

Sebagai pendukung pengerjaan penelitian ini penulis mencantumkan beberapa referensi penelitian sebelumnya yang sejenis dengan penelitian kali ini.

1. Analisa Pengaruh *Water Wash* Terhadap Performa Turbin Gas Pada PLTG Unit 1 Borang PT. PLN Sektor Pembangkitan Keramasan (Fauzan, 2021)

Penelitian ini menjelaskan Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Borang 1, yang dimiliki oleh PT. PLN (Persero), mengaplikasikan turbin gas sebagai penggerak utama generator dan beroperasi secara kontinu, memerlukan performa yang optimal untuk memenuhi kebutuhan listrik. Untuk meningkatkan performa, PLTG Borang 1 menggunakan system *Water wash*, yang telah terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi *compressor* dan turbin gas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *water wash* terhadap performa *compressor* dan turbin gas PLTG Borang 1. Melalui pengujian *performance test* dengan daya 32500 kW, hasil perhitungan menunjukkan peningkatan performa dan efisiensi setelah *water wash* dilakukan. *Water wash* tidak hanya meningkatkan *output power* dan menurunkan temperatur *HPC discharge*, tetapi juga memperkecil pemakaian *fuel* gas, yang merupakan indikator keberhasilan proses *Water wash*. Dalam konteks pembangkit listrik, pemeliharaan rutin seperti *Water wash* memiliki manfaat besar dalam menjaga kinerja dan efisiensi mesin, yang merupakan informasi penting bagi pengelolaan pembangkit listrik yang efisien dan handal. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pemahaman tentang pengaruh *water wash* terhadap performa *compressor* dan *gas turbine*, serta manfaatnya dalam menjaga kinerja dan keandalan pembangkit listrik tenaga gas.

2. Analisis Pengaruh *Compressor Washing* Terhadap Efisiensi *Compressor* Dan Efisiensi *Thermal Turbin Gas* Blok 1.1 PLTG UP Muara Tawar (Setiawan et al., 2017)

Penelitian ini menjelaskan terkait masalah penurunan performa Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti kondisi *compressor* yang kotor dan penurunan kemampuan *Variable Inlet Guide Vanes (VIGV)*, yang memengaruhi kemampuan PLTG dalam mencapai beban maksimum. Dalam keadaan normal, PLTG diharapkan dapat mencapai Daya Mampu Netto (DMN) sesuai dengan yang telah disetujui dalam kontrak kinerja atau kemampuan

aktualnya. Untuk mengatasi masalah ini, dilakukan *Compressor washing* yang bertujuan untuk membersihkan *compressor* dan memulihkan performanya. Temuan ini menunjukkan pentingnya pemeliharaan rutin seperti *Compressor washing* dalam menjaga kinerja dan efisiensi PLTG. Hal ini juga menegaskan perlunya pemantauan yang berkelanjutan terhadap kinerja turbin gas untuk mengidentifikasi masalah dengan cepat dan mencegah penurunan performa yang lebih lanjut. Dengan penelitian ini memberikan sebuah kontribusi penting dalam upaya meningkatkan ketersediaan dan efisiensi pembangkit listrik tenaga gas. Performa *Compressor washing* dibulan Agustus–Agustus 2015 mengalami depresiasi sekitar 0,31% dan setelah pencucian menjadi 0,53%. Efisiensi *thermal* juga mengalami kenaikan 1,461% yang sebelumnya 0,039%.

3. Analisa Pengaruh *Water Wash* Terhadap Performansi Turbin Gas Pada PLTG Unit 7 Paya Pasir PT.PLN Sektor Pembangkitan Medan (Senjaya & Napitupulu, 2013)

Penelitian ini Analisis performansi turbin gas sebelum dan setelah penerapan teknologi *water wash* pada PLTG unit 7 PT PLN Paya Pasir Medan menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam daya keluaran turbin gas dan efisiensi siklus. Sebelum penerapan *water wash*, daya yang dihasilkan turbin gas adalah sekitar 38 MW dengan efisiensi siklus sebesar 26,4%. Namun, setelah penerapan *water wash*, daya turbin gas meningkat menjadi sekitar 42 MW dengan efisiensi siklus meningkat menjadi 26,85%. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi *water wash* efektif dalam meningkatkan kinerja turbin gas dengan membersihkan *compressor* dan mengurangi tingkat *fouling* pada sudu-sudu *compressor*. Metode *water wash* yang dilakukan secara *offline* dan *online* juga memainkan peran penting dalam meningkatkan performa turbin gas. Penggunaan pola pancaran air dari *nozzle* yang didesain khusus untuk masuk sepenuhnya ke dalam inti *compressor*, baik pada proses *offline* maupun *online*, berkontribusi dalam membersihkan endapan dan meningkatkan kinerja *compressor*. Proses *offline* bertujuan membersihkan inti secara menyeluruh dan memulihkan kinerja yang telah menurun, sementara proses *online* membantu menjaga kebersihan *compressor* setelah proses pembersihan *offline*, menjaga kinerja dan efisiensi dengan mengurangi kerugian yang sedang terjadi, serta memperpanjang periode operasi antara *shutdown* yang diperlukan untuk mencuci *offline*. Penelitian eksperimental yang dilakukan juga memberikan

gambaranyangjelastentangefektivitasteknologiwaterwashdalammeningkatkan performa turbin gas. Data yang diperoleh dari perbandingan sebelum dan setelah penerapan *water wash* menunjukkan peningkatan yang konsisten dalam daya keluaran turbin gas dan efisiensi siklus. Hal ini menegaskan bahwa *water wash* bukan hanya meningkatkan daya keluaran turbin gas, tetapi juga membantu dalam menjaga kinerja turbin gas secara keseluruhan dengan mengurangi tingkat *fouling* dan menjaga kebersihan *compressor*. Sebagai bagian dari tindakan untuk meningkatkan efisiensi dan performa PLTG, penerapan teknologi *water wash* terbukti menjadi langkah yang efektif dan relevan dalam industri pembangkit listrik.

4. Optimalisasi *Heat Rate* Turbin Gas PLTG 250 MW Dengan *Offline Washing Blade Compressor* (Yerson & Prasetyo, 2017)

Penelitian ini membahas tentang peningkatan efisiensi *compressor* dan pengoptimalan *heat rate* pada turbin gas unit 2 di PLTG UP Muara Karang. Dengan menggunakan metode *offline washing blade compressor*, efisiensi *compressor* meningkat sebesar 1,4% dari 87,3% menjadi 88,7% pada bulan Maret 2017. Selain itu, nilai *heat rate* turbin gas unit 2 juga mengalami penurunan sebesar 35 kcal/kWh, menurun dari 2695 kCal/kWh menjadi 2660 kCal/kWh pada bulan yang sama. Penurunan *heat rate* ini berpotensi menghasilkan penghematan biaya bahan bakar sebesar Rp.3,374,559,014.4. Metode penelitian dilakukan dengan menggunakan data operasi harian dan bulanan yang ada di PT. PJB UP Muara Karang, dengan nilai efisiensi *compressor* dan *heat rate* yang secara otomatis ditampilkan melalui layar monitoring di *Central Control Room* (CCR). Pengumpulan data tersebut memungkinkan untuk memantau perubahan efisiensi *compressor* dan *heat rate* setelah pelaksanaan *offline washing blade compressor*. Prosedur operasional untuk *offline washing blade compressor* mengikuti standar operasional yang telah ditetapkan, dengan durasi sekitar 3 jam 45 menit dan menggunakan peralatan sesuai spesifikasi yang telah ditetapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *offline washing blade compressor* efektif dalam meningkatkan efisiensi *compressor* dan mengoptimalkan *heat rate* turbin gas unit 2. Penurunan *heat rate* ini tidak hanya mengurangi biaya bahan bakar, tetapi juga mencegah penumpukan kotoran pada *blade compressor* yang dapat menyebabkan kerusakan lebih lanjut. Disarankan untuk menjalankan *offline washing blade compressor* secara teratur setiap 6 bulan atau mengikuti jadwal *over*

haul dan periode *shutdown* cadangan.

5. Analisis Pengaruh Pembersihan Sudu *Compressor* (*Compressor Blade Washing*) Terhadap Efisiensi Termal PLTG (Rizcky, 2023)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dikenal sebagai salah satu jenis pembangkit listrik dengan efisiensi termal yang relatif rendah, berkisar antara 21- 45%. Penyebab utama rendahnya efisiensi ini adalah sebagian besar energi dari turbin gas dialokasikan untuk menggerakkan *compressor*. Semakin berat beban *compressor*, semakin kecil produksi energi dari turbin gas. Dalam periode tiga bulan, efisiensi *compressor* dapat menurun hingga 0,8%, yang salah satunya disebabkan oleh akumulasi kotoran pada sudu *compressor*, sehingga meningkatkan beban kerja *compressor*. Untuk memulihkan efisiensi *compressor*, direkomendasikan untuk melakukan pembersihan sudu *compressor* menggunakan metode *compressor blade washing*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan prosedur pembersihan sudu *compressor* yang diterapkan pada sistem PLTG, menentukan parameter yang diuji dalam metode tersebut, serta menganalisis pengaruhnya terhadap efisiensi termal PLTG. Penelitian dilakukan pada unit PLTG yang beroperasi dengan beban 120 MW atau 50% dari kapasitas terpasang. Tahapan penelitian mencakup pengumpulan data, perhitungan efisiensi *compressor*, perhitungan heat rate turbin gas, serta perhitungan efisiensi termal siklus PLTG. Dari pelaksanaan pembersihan sudu *compressor* dengan mode offline, diperoleh peningkatan efisiensi *compressor* sebesar 0,38%, yang berdampak pada penurunan heat rate sebesar 128 kJ/kWh, sehingga secara keseluruhan efisiensi termal siklus PLTG meningkat sebesar 1,01%.