Engine Starter Pada Mini Gas Turbine Engine Berbasis Turbocharger Garret GT 2259 LS : Rancang Bangun

Yoga Maulana Yusuf [1], Radi Suradi Kertanegara [2*]

[1]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
E-mail : yoga.maulana.aer23@polban.ac.id
[2]*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia*
[*]*E-mail korespondensi : radisk@polban.ac.id*

ABSTRAK

Mini gas turbine engine berbasis *turbocharger* Garret GT 2259 LS yang dikembangkan di Politeknik Negeri Bandung. sebelumnya menggunakan *blower* sebagai sistem *starting*. Salah satu syarat keberhasilan proses *starting* pada *engine* adalah kompresor harus mampu berputar hingga menghasilkan aliran udara (*mass flow rate*) yang cukup untuk menigkatkan tekanan di ruang bakar untuk proses pembakaran. Berdasarkan hasil analisis kebutuhan *starting* sistem *starter* harus mampu berputar hingga 40.000 – 48.000 RPM (*Revolution per Minute*) dengan daya *minimum* sebesar 187 – 412 Watt dan torsi *minimum* sebesar 0,045 Nm – 0,082 Nm, dan *mass flow rate* yang dihasilkan 0,0207 kg/s – 0,0249 kg/s. Namun motor listrik dengan spesifikasi yang dibutuhkan tidak tersedia di pasaran. Maka dari itu penelitian ini melakukan perancangan sistem transmisi untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Motor listrik yang digunakan adalah motor listrik gerinda tangan, dengan spesifikasi 600 Watt, dan 12.000 RPM. Spesifikasi sistem transmisi yang dirancang memiliki rasio RPM 1:4 (*increase* RPM, *Decrease Torque*) dengan *spur gear* untuk komponen transmisinya. Pengujian dilakukan dengan dua tahapan yaitu pengujian sistem sebelum terintegrasi dengan *engine* dan ketika sudah terintegrasi. Hasil pengujian menunjukan sistem yang dirancang mengahasilkan *output* putaran hingga 45.000 – 46.000 RPM. Namun pengujian *starter* ketika sudah terintegrasi dengan *engine* tidak berhasil dilakukan.

Kata Kunci:
Mini Gas Turbine Engine; Engine Starter; Turbocharger.

A mini gas turbine engine based on the Garrett GT2259LS turbocharger, developed at Bandung State Polytechnic, previously used a blower as its starting system. Successful engine starting requires sufficient compressor speed to generate adequate airflow and combustion-chamber pressure for initiating combustion. The required starter performance is 40,000–48,000 RPM, with a minimum power of 187–412 W, torque of 0.045–0.082 Nm, and airflow (mass flow rate) of 0.0207–0.0249 kg/s. Since a commercially available electric motor meeting these requirements was not available, this study designed a transmission system using a 600 W handheld angle grinder motor operating at 12,000 RPM. The transmission employs spur gears with a 1:4 speed ratio to increase rotational speed while reducing torque. Testing was conducted in two stages: standalone starter testing and testing after integration with the engine. The standalone test results showed that the designed starter system achieved an output speed of 45,000–46,000 RPM, which meets the required rotational speed range for engine starting. However, the second testing stage after integration with the mini gas turbine engine could not be successfully completed. Therefore, the designed transmission system demonstrated the capability to achieve the required starter speed, although further improvements and testing are required for successful engine integration.

Keywords:
Mini Gas Turbine Engine; Engine starter; Turbocharger

1. PENDAHULUAN

Gas Turbine Engine (GTE) merupakan mesin konversi energi yang mengubah energi hasil pembakaran menjadi energi mekanik melalui proses kompresi, pembakaran, dan ekspansi gas. Selain digunakan sebagai sistem propulsi, GTE juga menjadi media pembelajaran untuk memahami karakteristik mesin turbin gas. Namun, keterbatasan fasilitas laboratorium mendorong pengembangan *mini gas turbine engine* (*mini* GTE) berbasis *turbocharger* (2), sebagai alternatif yang lebih murah. Di Politeknik Negeri Bandung, penelitian *mini* GTE telah berhasil mengembangkan sistem pengapian dan pelumasan (5), optimasi aliran udara (10), *test bench* pada *mini* GTE (14) dan sistem lubrikasi (7) sehingga *engine* mampu beroperasi secara mandiri.

Meskipun *mini* GTE telah beroperasi, proses *starting* masih dilakukan secara manual menggunakan *blower* sehingga kurang praktis dan belum menghasilkan putaran awal yang konsisten. Selain itu, kebutuhan *starting* RPM, daya, dan torsi yang diperlukan untuk mencapai kondisi *self-sustaining speed*

belum di-implementasikan dalam suatu sistem *engine starter* yang terintegrasi.

Penelitian ini bertujuan merancang, memproduksi, dan menguji *engine starter* untuk *mini* GTE berbasis *turbocharger* Garrett GT 2259 LS. Perancangan dilakukan berdasarkan kebutuhan putaran, daya, dan torsi *starting*, kemudian dilanjutkan dengan pemilihan motor listrik, perancangan sistem transmisi roda gigi, mekanisme *engage* & *disengage*, serta sistem pengaturan putaran (3).

Penelitian difokuskan pada perancangan, manufaktur dan pengujian *engine starter* untuk *mini* GTE berbasis *turbocharger* Garrett GT 2259 LS. Pembahasan mencakup analisis kebutuhan *starting*, perancangan sistem transmisi dan mekanisme *engage* & *disangage starter*, serta evaluasi performa sistem sebelum dan sesudah diintegrasikan dengan *engine*, tanpa membahas analisis struktur komponen maupun sistem kontrol otomatis.

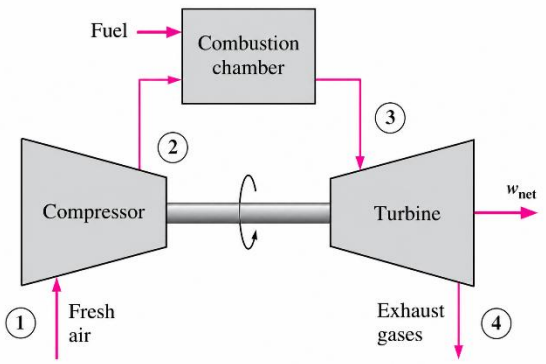
2. LANDASAN TEORI

2.1 *Gas Turbine Engine*

Gas Turbine Engine (GTE) merupakan mesin konversi energi yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik melalui proses kompresi udara, pembakaran, dan ekspansi gas. Siklus kerja GTE mengacu pada siklus Brayton, yang terdiri atas proses kompresi udara oleh *compressor*, penambahan energi panas di *combustion chamber*, dan ekspansi gas hasil pembakaran pada *turbine*. Energi yang dihasilkan turbin digunakan untuk memutar *compressor* melalui (*shaft*) sedangkan energi sisanya dimanfaatkan sebagai daya keluaran atau gaya dorong sesuai dengan jenis *engine*(3).

Agar proses pembakaran dapat berlangsung secara kontinu atau terus menerus, poros *engine* harus diputar hingga mencapai putaran *minimum* (*self-sustaining speed*), yaitu kondisi ketika turbin mampu menghasilkan daya yang cukup untuk menggerakkan *compressor* tanpa bantuan sistem *starter*. Oleh karena itu, keberadaan *engine starter* menjadi salah satu sistem pendukung yang penting pada tahap awal pengoperasian *gas turbine engine* (3).

Pada gambar 1 yaitu Siklus Brayton yang merupakan siklus termodinamika ideal yang digunakan untuk menganalisis kinerja mesin turbin gas. Pada siklus ini, proses pembakaran dimodelkan sebagai pe-nambahan kalor pada tekanan konstan, sedangkan proses pembuangan gas dimodelkan sebagai pelepasan kalor pada tekanan konstan (1) secara ideal. Siklus Brayton terdiri atas empat proses, yaitu:



Gambar 1. *Brayton Cycle* (1)

Proses 1–2 (Kompresi Isentropik), udara dikompresi oleh *compressor* sehingga tekanan dan temperatur meningkat (1).
Proses 2–3 (Penambahan Kalor Isobarik), udara bertekanan menerima kalor pada tekanan konstan di ruang bakar (*combustion*) (1).
Proses 3–4 (Ekspansi Isentropik), gas hasil pembakaran berekspansi melalui turbin untuk menghasilkan kerja (1).
Proses 4–1 (Pelepasan Kalor Isobarik), sisa kalor dilepaskan sehingga fluida kembali ke kondisi awal dan siklus berulang (1).

2.2 *Mini Gas Turbine Engine*

Mini Gas Turbine Engine (*Mini* GTE) merupakan pengembangan *gas turbine engine* dengan skala kecil yang umumnya memanfaatkan *turbocharger* sebagai komponen utama. *Turbocharger* dipilih karena telah memiliki *compressor*, *turbine*, dan poros yang terintegrasi sehingga memiliki prinsip kerja yang menyerupai *gas turbine engine* konvensional (6). penggunaan *turbocharger* memungkinkan pe-ngembangan *mini* GTE dengan biaya yang lebih rendah, namun tetap mampu merepresentasikan karakteristik dasar sistem turbin gas (2).

Pada penelitian ini digunakan *turbocharger* Garrett GT 2259 LS sebagai inti *mini* GTE (5). *Engine* telah dilengkapi dengan sistem pembakaran dan mampu beroperasi secara mandiri setelah mencapai putaran awal tertentu. Namun, proses *starting* masih memerlukan sistem eksternal untuk memutar *rotor* hingga mencapai putaran *minimum* (*starting speed*) (3). Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem *engine starter* yang mampu menghasilkan putaran awal sesuai kebutuhan *engine* agar proses *starting* menjadi lebih efektif dan konsisten.

2.3 *Engine Starter*

Engine starter merupakan sistem yang berfungsi memberikan putaran awal pada poros *gas turbine engine* hingga mencapai putaran *minimum* (13) yang dibutuhkan untuk memulai proses pembakaran dan mencapai kondisi *self-sustaining speed*. Pada *gas turbine engine*, sistem *starter* harus mampu menghasilkan putaran, daya, dan torsi (13) yang sesuai dengan karakteristik

rotor agar proses *starting* berlangsung secara aman dan stabil. Dalam penelitian ini, *engine starter* dirancang menggunakan motor listrik (12) sebagai sumber penggerak yang dipadukan dengan sistem transmisi roda gigi untuk meningkatkan putaran sesuai kebutuhan *mini* GTE. Selain itu, sistem dilengkapi dengan mekanisme *engage* & *disengage* untuk menghubungkan dan me-lepaskan poros *starter* terhadap poros *engine*, serta pengatur putaran (RPM *controller*) untuk mengendalikan putaran motor selama proses *starting* (12). Konfigurasi tersebut dirancang agar *engine starter* mampu memenuhi kebutuhan *starting* pada *mini gas turbine engine* berbasis *turbocharger* Garrett GT2259 LS.

2.4 *Gear* (Roda Gigi)

Roda gigi (*gear*) merupakan elemen mesin yang berfungsi mentransmisikan daya dan putaran antar poros melalui kontak antar gerigi. Sistem transmisi roda gigi memiliki efisiensi tinggi, rasio putaran yang konstan, serta mampu bekerja pada putaran dan beban yang relatif besar sehingga banyak digunakan pada sistem transmisi mekanik. Berdasarkan bentuk geriginya, roda gigi terdiri atas beberapa jenis, seperti *spur gear, helical gear, bevel gear, worm gear, & internal gear* (11). Pada penelitian ini dipilih *spur gear* karena memiliki konstruksi sederhana, efisiensi transmisi tinggi, mudah diproduksi, serta sesuai digunakan pada poros yang sejajar tanpa mengubah arah sumbu putar. Perancangan roda gigi ditentukan oleh beberapa parameter utama, yaitu modul (*module*), jumlah gerigi (*number of teeth*), diameter *pitch* (*pitch circle diameter*), sudut tekanan (*pressure angle*), dan lebar muka gerigi (*face width*). Parameter tersebut digunakan untuk menentukan dimensi roda gigi, rasio transmisi, serta kemampuan roda gigi dalam mentransmisikan daya dan torsi pada sistem *engine starter* (11).

2.5 Perhitungan & Rumus

Perancangan *engine* starter pada *mini gas turbine engine* memerlukan beberapa perhitungan dasar untuk menentukan kebutuhan daya, torsi dan putaran (12), sistem transmisi roda gigi, serta dimensi komponen mekanik. Perhitungan dilakukan berdasarkan teori mekanika teknik, perpindahan daya, dan desain elemen mesin sehingga *starter* yang dirancang mampu menghasilkan putaran awal (*cranking speed*) yang dibutuhkan oleh *engine*. Berikut beberapa persaman yang digunakan :

1. Kecepatan Sudut (11).
   Digunakan untuk mengubah putaran motor (RPM) menjadi kecepatan sudut (rad/s).

   [1]

   Keterangan :
   ω = *Angular Velocity (rad/s)*
   π = $\frac{22}{7} or\ 3{,}142857$
   n = *Revolution per Minute (RPM)*

2. Daya & Torsi (11).
   Digunakan untuk menghitung hubungan antara daya, torsi, dan kecepatan sudut.

   [2]

   Keterangan :
   P = Power (Watt)
   T = Torque (Nm)
   ω = *Angular Velocity (rad/s)*

3. Perhitungan Torsi Pada Gerigi (11).
   Digunakan untuk menghitung torsi yang diperlukan berdasarkan daya dan putaran

   [3]

   Keterangan :
   T = *Torque (Nm)*
   P_d = *Power Design (kWatt)*
   π = $\frac{22}{7} or\ 3{,}142857$
   n = *Revolution per Minute (RPM)*

4. Gaya Tangensial Roda Gigi (11).
   Digunakan untuk menghitung gaya tangensial yang bekerja pada roda gigi.

   [4]

   Keterangan :
   T = *Torque (Nm)*
   F_T = *Tangential Force (N)*
   r = *radius (m)*

5. Tegangan Lentur Roda Gigi (11).
   Digunakan untuk menghitung tegangan lentur pada gigi roda gigi menggunakan persamaan Lewis.

   [5]

   Keterangan :
   σ_{Gear} = *Gear Teeth Bending Stress (N/mm²)*
   F_T = *Tangential Force (N)*
   b = *Gear Face Width (mm)*
   m = *module*
   Y = *Lewis Factor*

6. Tegangan Geser Poros (11).

Digunakan untuk menentukan tegangan geser yang diizinkan pada poros.

[6]

Keterangan :
τ_α = *Shear Stress allowable (N/mm²)*
σ_{UTS} = *Ultimate Tensile Strength (N/mm²)*
Sf_1 = *Safety Factor 1*
Sf_2 = *Safety Factor 2*

7. Diameter *Minimum* Poros (11).
Digunakan untuk menentukan diameter *minimum* poros agar mentransmisikan torsi dengan aman.

[7]

Keterangan :
d_s = *Diameter Shaft (mm)*
K_t = *Impact Correction Factor*
C_b = *Bending Correction Factor*
T = *Torque (Nmm)*
π = $\frac{22}{7}$ *or* 3.142857
τ_α = *Shear Stress allowable (N/mm²)*

3. METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan sebagai tahap awal penelitian untuk memperoleh dasar teori, metode perancangan, serta referensi yang berkaitan dengan *mini gas turbine engine*, *engine starter*, sistem transmisi yaitu roda gigi, elemen mesin, dan metode perhitungan yang digunakan. Referensi diperoleh dari buku, jurnal ilmiah, standar teknik, serta penelitian terdahulu yang relevan. Hasil studi literatur digunakan sebagai acuan dalam proses pengumpulan data, perancangan, manufaktur, hingga pengujian *engine starter*.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh parameter yang diperlukan dalam proses perancangan *engine starter* (9). Data yang dikumpulkan meliputi hasil *engine run up* (9), massa dan dimensi *rotor*, kebutuhan *minimum* putaran awal (*minimum starting speed*) (9), serta spesifikasi komponen pendukung. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan daya, torsi, rasio transmisi, serta pemilihan motor listrik yang sesuai dengan kebutuhan sistem *starter*.

3.3 Perancangan *Engine Starter*

Tahap perancangan dilakukan berdasarkan data yang telah diperoleh dari proses pengumpulan data. Perancangan meliputi pemilihan motor listrik, perhitungan daya dan torsi (12), penentuan rasio transmisi roda gigi, perancangan mekanisme *engage-disengage*, pemilihan sistem pengatur putaran (RPM *controller*) (12), serta pembuatan model komponen menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD). Seluruh perhitungan dilakukan untuk memastikan sistem *starter* mampu mentransmisikan daya secara aman dan memenuhi kebutuhan putaran awal *mini gas turbine engine*.

3.4 Manufaktur *Engine Starter*

Manufaktur *engine starter* dilakukan berdasarkan hasil perancangan dengan menggunakan kombinasi proses 3D *printing* dan permesinan konvensional. Komponen dengan material PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) diproduksi menggunakan metode 3D *printing*, sedangkan komponen berbahan ST37 (*steel*) diproduksi melalui proses *turning*, *tapping*, dan *welding*. Seluruh komponen kemudian dirakit menggunakan komponen pendukung hingga membentuk sistem *engine starter* yang siap untuk diuji. Daftar komponen dan metode manufaktur disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Manufaktur Komponen *Engine Strater*

No	Komponen	Material	Manufaktur
1	*Spur Gear 1*	PETG	*3D Printing*
2	*Spur Gear 2*	PETG	*3D Printing*
3	*Spur Gear 3*	PETG	*3D Printing*
4	*Spur Gear 4*	PETG	*3D Printing*
5	*Shaft 1*	ST37	*Turning*
6	*Shaft 2*	ST37	*Turning*
7	*Coupling Output*	ST37	*Turning*
8	*Gearbox Sub Part 1*	PETG	*3D Printing*
9	*Gearbox Sub Part 2*	PETG	*3D Printing*
10	*Flange Adaptor*	PETG	*3D Printing*

3.5 Metode Pengujian & Analisis

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan fungsionalitas *engine starter* yang telah dirancang. Pengujian dilaksanakan dalam dua tahap, yaitu pengujian sistem sebelum terintegrasi dengan *mini gas turbine engine* dan pengujian setelah sistem terintegrasi dengan *engine*. Pada pengujian awal, parameter yang diamati meliputi putaran motor, putaran pada setiap tahap sistem transmisi, serta rasio putaran yang dihasilkan. Selanjutnya, pengujian dilakukan pada kondisi terintegrasi dengan engine untuk memperoleh data *Revolution per Minute* (RPM), *Exhaust Gas Temperature* (EGT) , dan waktu *starting* (9). Data hasil pengujian kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan hasil perancangan untuk mengevaluasi kinerja sistem *engine starter*. Analisis dilakukan berdasarkan kesesuaian putaran, karakteristik sistem transmisi, serta kemampuan *engine starter* dalam mencapai putaran awal (*starting speed*) yang dibutuhkan oleh *mini gas turbine engine*.

4. Hasil & Pembahasan

4.1 Analisis Kebutuhan *Starter*

Analisis kebutuhan *starter* dilakukan berdasarkan data hasil *engine run up*, massa dan dimensi *rotor*, serta kebutuhan *minimum* putaran awal (*minimum starting speed*) *mini gas turbine engine*. Berdasarkan data tersebut dilakukan perhitungan kebutuhan daya, torsi, putaran, serta rasio transmisi yang diperlukan agar *engine starter* mampu memutar *rotor* hingga mencapai kondisi *self-sustaining speed*. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2.

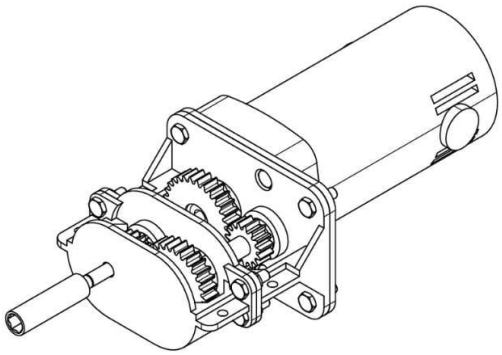
Tabel 2 Kebutuhan *Minimum Starting*

RPM	Daya (Watt)	Torsi (Nm)	*Mass Flow* (kg/s)
40000	187	0.04465	0.02072
42000	237.3	0.05390	0.02176
44000	291.6	0.06325	0.02279
46000	349.8	0.07260	0.02383
48000	411.8	0.08195	0.02487

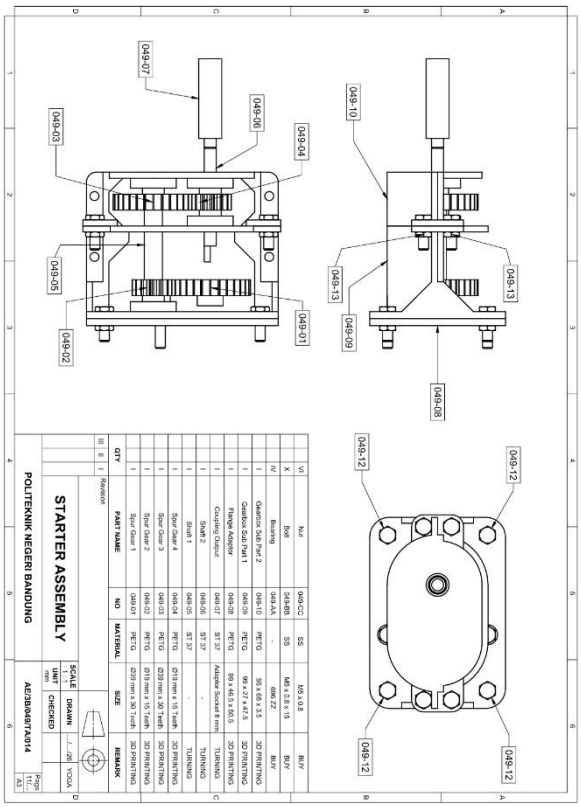
Berdasarkan Tabel 2, kebutuhan daya, torsi, & *mass flow* untuk *starting* meningkat seiring dengan ber-tambahnya putaran (8). Pada putaran 40000 RPM dibutuhkan daya sebesar 187 Watt dengan torsi 0.04465 Nm dan 0.02072 kg/s *mass flow* udara, sedangkan pada putaran 48000 RPM kebutuhan daya meningkat menjadi 411.8 Watt dengan torsi 0.08195 Nm dan 0.02487 kg/s *mass flow* udara. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa semakin tinggi putaran pada proses *starting*, semakin besar daya dan torsi yang harus disediakan oleh sistem *engine starter* & *mass flow* udara yang masuk ke *engine* stabil pada nilai tersebut (8).

4.2 Hasil Perancangan *Engine Starter*

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan *starting* pada *mini gas turbine engine*, dilakukan perancangan sistem *engine starter* yang meliputi pemilihan motor listrik, sistem transmisi roda gigi, mekanisme *engage & disengage*, serta dudukan (*mounting*) komponen. Seluruh komponen dirancang menggunakan *software* AutoCAD dengan mem-pertimbangkan kemudahan perakitan, serta efisiensi transmisi daya. Hasil perancangan ditunjukkan melalui model tiga dimensi, gambar teknik, dan hasil perhitungan komponen yang digunakan.



Gambar 2. *Engine Starter Assembly*



Gambar 3. Gambar Kerja *Engine Starter*

Tabel 3 Besar Beban Pada Gerigi Roda Gigi

Gear	RPM	T (Nm)	F_t (N)	σ_{Gear} (N/mm^2)
1	12000	0.716	37.697	10.530
2	24000	0.358	37.697	13.044
3	24000	0.358	18.849	5.265
4	48000	0.179	18.849	6.522

Berdasarkan Tabel 3, perhitungan beban roda gigi dilakukan menggunakan faktor koreksi 1.5. Seiring meningkatnya putaran (*Revolution per Minute*, RPM), torsi yang ditransmisikan menurun dari 0.716 Nm menjadi 0.179 Nm,

diikuti dengan perubahan gaya tangensial (Ft) dari 37.697 N menjadi 18.849 N. tegangan lentur roda gigi (σ) yang dihasilkan berada pada rentang 5.265–13.044 N/mm²

Tabel 4 Ukuran Diameter *Minimum* Poros

RPM	τ_α (N/mm²)	T (Nm)	d_s (mm)
12000	60	0.716	5.15
24000	60	0.358	4.09
48000	60	0.179	3.25

Berdasarkan Tabel 4, hasil perhitungan menunjukkan bahwa diameter *minimum* poros yang dibutuhkan berkisar antara 3.25–5.15 mm pada tegangan geser izin sebesar 60 N/mm². Berdasarkan hasil tersebut, dipilih diameter poros 6 mm untuk dudukan *bearing* dan 8 mm untuk dudukan roda gigi.

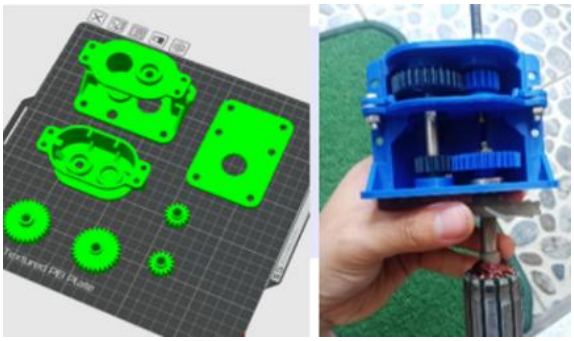
Tabel 5 Spesifikasi Roda Gigi *Engine Starter*

Gear	*Pitch* Ø (mm)	*Module*	*Number of Teeth*	*Face Width* (mm)
1	38	1.25	30	8
2	19	1.25	15	8
3	38	1.25	30	8
4	19	1.25	15	8

Berdasarkan Tabel 5, sistem transmisi menggunakan empat buah *spur gear* dengan modul 1.25 dan lebar muka 8 mm. *Gear* 1 dan *Gear* 3 memiliki 30 gerigi dengan diameter *pitch* 38 mm, sedangkan *Gear* 2 dan *Gear* 4 memiliki 15 gerigi dengan diameter *pitch* 19 mm, sehingga diperoleh rasio transmisi 1:2 pada setiap tahap dan rasio total 1:4 pada sistem *engine starter*.

4.3 Hasil Manufaktur *Engine Starter*

Tahap manufaktur dilakukan sesuai dengan hasil perancangan yang telah ditetapkan. Proses meliputi pembuatan komponen, proses pemesinan dan 3D *printing*, perakitan sistem transmisi, pemasangan motor listrik, serta penyusunan seluruh komponen menjadi satu kesatuan *engine starter*. Setelah proses manufaktur selesai, dilakukan pemeriksaan dimensi dan fungsi mekanisme untuk memastikan seluruh komponen dapat bekerja sesuai dengan rancangan.



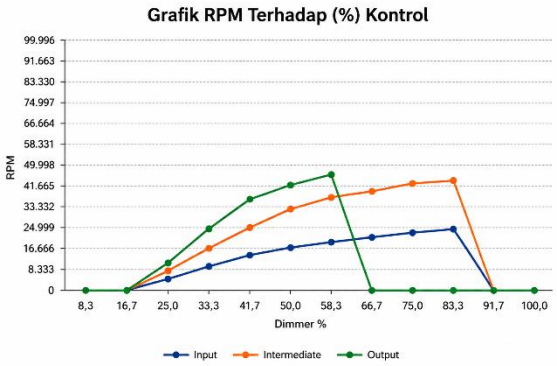
Gambar 4. Hasil Manufaktur *Engine Starter*

4.4 Hasil Pengujian *Engine Starter*

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa *engine starter* dalam memutar *rotor mini gas turbine engine*. Parameter yang diamati meliputi putaran motor, putaran *rotor*, kebutuhan arus dan tegangan (15), waktu *starting*, serta kemampuan sistem mencapai putaran awal yang dibutuhkan. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis untuk mengetahui tingkat kesesuaian desain dan performa sistem yang telah dikembangkan. Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sehingga memudahkan proses analisis terhadap karakteristik *engine starter*.

Tabel 6 Hasil Pengujian *Engine Starter*

Dimmer (%)	RPM (*Revolution per Minute*)		
	Input	*Middle*	*Output*
8.3	0	0	0
16.7	0	0	0
25.0	4675	7775	10500
33.3	9750	17000	24600
41.7	13950	25000	36200
50.0	16800	32500	42000
58.3	19150	37500	46000
66.7	21100	39500	-
75.0	23000	42500	-
83.3	24350	43500	-
91.7	-	-	-
100.0	-	-	-

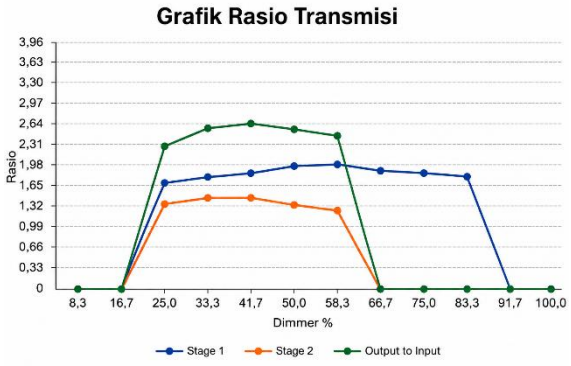


Gambar 5. Grafik RPM Terhadap (%) Kontrol

Berdasarkan Tabel 6 & grafik pada gambar 5, pe-ningkatan persentase kontrol (dimmer) menghasilkan peningkatan putaran pada sisi *input*, *middle*, dan *output* sistem transmisi. Peningkatan putaran selama proses starting menunjukkan karakteristik transien motor listrik (15). Putaran keluaran (*output*) mulai diperoleh pada pengaturan 25.0% sebesar 10500 RPM dan meningkat hingga 46000 RPM pada pengaturan 58.3%. Pada pengaturan di atas 58.3%, pengujian pada sisi *output* tidak dapat dilakukan karena keterbatasan sistem, sedangkan putaran pada sisi *input* dan *middle* masih mengalami peningkatan seiring bertambahnya (%) dimmer.

Tabel 7 Hasil Pengujian *Engine Starter*

Dimmer (%)	RPM (*Revolution per Minute*)		
	Stage 1	*Stage 2*	*Output to Input*
8.3	0	0	0
16.7	0	0	0
25.0	1.67	1.35	2.26
Dimmer (%)	RPM (*Revolution per Minute*)		
	Stage 1	*Stage 2*	*Output to Input*
33.3	1.74	1.45	2.52
41.7	1.79	1.45	2.59
50.0	1.93	1.29	2.50
58.3	1.96	1.23	2.40
66.7	1.87	-	-
75.0	1.85	-	-
83.3	1.79	-	-
91.7	-	-	-
100.0	-	-	-
AVERAGE	1.83	1.35	2.46



Gambar 6. Grafik Rasio Transmisi

Berdasarkan Tabel 7 & grafik pada gambar 6, sistem transmisi menghasilkan rata-rata rasio putaran sebesar 1.83 pada *Stage* 1, 1.35 pada *Stage* 2, dan 2.46 pada *output to input*. Namun, pengujian pada putaran tinggi tidak dapat dilanjutkan akibat terjadinya kerusakan berupa *tooth chipping* (rompal) pada roda gigi. Kerusakan tersebut diperkirakan dipengaruhi oleh rendahnya kekuatan material PETG terhadap beban dinamis serta kekasaran permukaan roda gigi.

4.5 Estimasi Lubrikan *Gear Engine Starter*

Estimasi lubrikasi dilakukan berdasarkan parameter operasi roda gigi yang telah diperoleh pada tahap perancangan (4). Nilai kecepatan keliling, gaya normal, tekanan kontak, serta karakteristik pelumasan untuk beberapa grade viskositas yang direkomendasikan (4). Seluruh hasil perhitungan tersebut disajikan pada tabel 8

Tabel 8 Estimasi Lubrikan Untuk *Engine Starter*

Gear	RPM	*Temp* (°C)	*Lubricant Grade*
1	12000	34,53	ISO VG 32
2	24000	45,95	ISO VG 46
3	24000	34,53	ISO VG 32
4	48000	45,95	ISO VG 46

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, manufaktur, dan pengujian, telah berhasil dirancang sebuah *engine starter* untuk *mini gas turbine engine* berbasis *turbocharger* Garrett GT 2259 LS dengan komponen transmisi roda gigi dengan rasio RPM (*Revolution per Minute*) 1:4 yang mampu meningkatkan putaran motor listrik dari 12000 RPM menjadi 45000 – 46000 RPM. Hasil tersebut me-nunjukkan bahwa sistem transmisi yang dirancang mampu menghasilkan peningkatan putaran yang mendekati kebutuhan *minimum* proses *starting* pada *mini gas turbine engine*.

Komponen utama sistem terdiri atas *spur gear* dan *gearbox* material PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) yang dimanufaktur menggunakan teknologi 3D *printing*, sedangkan poros menggunakan material ST37 dengan konfigurasi *shoulder shaft*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem transmisi bekerja sesuai dengan hasil perancangan dalam meningkatkan putaran keluaran. Namun, pengujian *engine starter* ketika terintegrasi dengan *engine* belum dapat diselesaikan karena terjadi kerusakan pada roda gigi selama proses pengujian. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya perlu difokuskan pada peningkatan kekuatan material dan sistem lubrikasi (4).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala dan seluruh Teknisi Laboratorium Fenomena Dasar Mesin serta Laboratorium Teknik Aeronautika Politeknik Negeri Bandung atas fasilitasi tempat, bantuan teknis instalasi mesin, serta peminjaman instrumen kalibrasi standar selama seluruh tahapan penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

1. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). Thermodynamics: An Engineering Approach (9th Ed.). New York: Mcgraw-Hill Education
2. Chung, H.Y.; Rhee, D.H.; Kang, Y.S. Simulation of Aero-Propulsion Micro Gas Turbine Engine Using CFD. KSFM Journal of Fluid Machinery 2021.
3. Federal Aviation Administration. *Aviation Maintenance Technician Handbook–Powerplant*. Vol. 1. FAA-H-8083-32A. Washington DC: U.S. Department of Transportation; 2018

4. Federal Aviation Administration. *Aviation Maintenance Technician Handbook–Powerplant*. Vol. 2. FAA-H-8083-32B. Washington DC: U.S. Department of Transportation. 2018
5. Fachrizal M. *Rancang Bangun Prototipe Mini Turbin Gas dengan Menggunakan Turbocharger: Sistem Pengapian dan Pelumasan* [Laporan Tugas Akhir]. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2017
6. Garrett Motion Inc. Garrett Performance Catalog Vol. 9. Torrance, CA: Garrett Motion Inc.; 2022.
7. Ibrahim MR. *Rancang Bangun Sistem Lubrikasi pada Mini Gas Turbine Engine Hasil Modifikasi Turbocharger* [Laporan Tugas Akhir]. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2025
8. Liu J, Fu X. Study on dynamic characteristics of micro gas turbine with load mutation of pulse generator. J Phys Conf Ser. 2020
9. Lim, Su Bin; Lee, DongEun; Kim, Seokmin; Lee, Sangeun; Rhee, Dong-Ho; Kang, Young Seok. Parameter Analysis of Engine Start-up Phase of Micro Gas Turbine Engine for Rapid Start-up. The KSFM Journal of Fluid Machinery; 2026.
10. Muhidin IF. *Rancang Bangun Air Intake Bellmouth pada Turbocharger Garrett GT 2259* [Laporan Tugas Akhir]. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2020
11. Oberg, Erik; Jones, Franklin D.; Horton, Holbrook L.; Ryffel, Henry H.; McCauley, Christopher J. Machinery's Handbook. 32nd ed. New York: Industrial Press; 2024
12. Part-66 Academy. *Module 15 B1 Gas Turbine Engine*. European Aviation Safety Agency (EASA) Part-66 Training Notes; 2020
13. Popov GM, Baturin OV, Novikova YD, Zubanov VM, Volkov AA, Korneeva AI. Method of coordinating joint operation of air starter and auxiliary power unit and determining the gas turbine engine starting time. Vestnik of Samara University: Aerospace and Mechanical Engineering. 2020
14. Rahmatunnisa S. *Rancang Bangun Test Bench Mini Gas Turbine Engine Hasil Modifikasi Turbocharger: Kaji Sistem Bahan Bakar* [Laporan Tugas Akhir]. Bandung: Politeknik Negeri Bandung; 2019
15. Tian W, Wang L, Bai X, Han Z, Zuo Z, Wu X, Wu Y, Yan Y, Fang J. Research on transient characteristics of an aviation starter motor under low temperature and pressure. Energies. 2024