Studi Eksperimental Sistem Bahan Bakar *Vaporizer Kerosene* pada Mini Gas *Turbine Engine* Berbasis *Turbocharger*

Muhammad Ar Rohim[1], Radi Suradi Kartanegara[2]

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

ABSTRAK

Mini Gas Turbine Engine (MGTE) hasil modifikasi turbocharger kerap mengalami kendala pada fase *starting* akibat karakteristik *kerosene* yang memiliki *flash point* tinggi (>38°C) dan viskositas yang relatif besar, sehingga atomisasi mekanik konvensional menghasilkan *droplet* berukuran besar dan sulit menguap secara instan pada ruang bakar yang berdimensi terbatas. Penelitian ini bertujuan merancang, membuat, dan menguji sistem pemanas bahan bakar (*fuel pre-heater*) eksternal berbasis *vaporizer* untuk mengubah fasa *kerosene* dari cair menjadi uap sebelum diinjeksikan ke ruang bakar *Mini Gas Turbine Engine* berbasis turbocharger Garrett GT2259LS. Elemen pemanas menggunakan *nichrome ribbon* berdaya 72 W (resistansi 2 Ω) yang dikendalikan melalui PID *controller*, MOSFET modul, dan SMPS, dengan *thermocouple* tipe K sebagai sensor umpan balik. Hasil pengujian menunjukkan temperatur *tube* meningkat dari 30°C hingga 185°C dalam waktu 30 detik, dan mampu memanaskan *kerosene* hingga 80°C, sesuai target rentang 80–100°C. Perhitungan teoritis menghasilkan temperatur 78,98°C. Analisis diagram fasa menunjukkan bahwa pada kondisi pengujian *kerosene* tetap berada pada fase liquid, namun sistem berhasil menginduksi *Flash Vaporization Parsial* yang meningkatkan kualitas atomisasi bahan bakar sehingga proses starting menjadi lebih mudah dan stabil.

Kata Kunci:
Mini Gas Turbine Engine, Vaporizer, Turbocharger, Kerosene

Mini Gas Turbine Engines (MGTE) built from modified automotive turbochargers commonly face starting difficulties caused by the properties of kerosene, which has a high flash point (>38°C) and relatively high viscosity, so that conventional mechanical atomization produces large droplets that vaporize slowly inside the confined combustor volume. This study aims to design, build, and test an external fuel pre-heater vaporizer system to convert kerosene from liquid to vapor phase before injection into the combustor of a Garrett GT2259LS turbocharger-based MGTE. The heating element uses a 72 W nichrome ribbon (2 Ω resistance) controlled through a PID controller, MOSFET module, and SMPS, with a type-K thermocouple as the feedback sensor. Test results show that the tube temperature increased from 30°C to 185°C within 30 seconds and was able to heat the kerosene to 80°C, within the targeted 80–100°C range. Theoretical calculation yielded a temperature of 78.98°C, giving an error of 1.01% relative to the actual result. Phase diagram analysis shows that under the test conditions the kerosene remained in the liquid phase, but the system successfully induced partial flash vaporization that improved fuel atomization quality, making the starting process easier and more stable.

Keywords:
Mini Gas Turbine Engine, Vaporizer, Turbocharger, Kerosene

1. PENDAHULUAN

Pengembangan *Mini Gas Turbine Engine* (MGTE) berbasis turbocharger kendaraan sering menghadapi kendala pada fase penyalaan awal (*starting*). Permasalahan utama disebabkan oleh karakteristik bahan bakar *kerosene* (Jet A-1/Minyak tanah) yang memiliki titik nyala (*flash point*) relatif tinggi, yaitu di atas 38°C, serta viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar gas atau bensin. Sistem injeksi bahan bakar konvensional pada turbin gas umumnya mengandalkan tekanan mekanik, yaitu menggunakan pompa bahan bakar tekanan tinggi dan *nozzle injector* untuk memecah *kerosene* cair menjadi kabut halus (spray atau atomisasi). Meskipun metode ini sangat efektif pada mesin turbin gas skala besar komersial, pendekatan atomisasi mekanik memiliki kelemahan signifikan apabila diaplikasikan pada MGTE yang dibangun dari modifikasi turbocharger. Apabila *kerosene* diinjeksikan dengan mengandalkan tekanan murni (*atomizer*/*spray*), butiran cairan tersebut membutuhkan waktu dan ruang ekstra untuk menyerap kalor. Selain itu, sistem atomisasi menuntut penggunaan pompa bertekanan sangat tinggi yang menambah kompleksitas, beban mekanis, dan biaya sistem secara keseluruhan. Pada mesin pesawat umumnya tekanan penyemprotan bahan bakar berkisar ±150 psi (±10 bar) dari pompa tekanan rendah, dan dapat naik hingga ±1200–1800 psi (±83–124 bar) pada pompa tekanan tinggi atau *pressure-atomizing injector* (1), Suhu udara yang masuk ke ruang bakar pesawat merupakan hasil dari proses kompresi, berkisar ±350°C pada mesin generasi lama hingga ±500–

600°C pada mesin modern dengan rasio kompresi lebih tinggi (2), sementara udara di sekitar nozzle pada sistem sederhana masih bersuhu ambien, sekitar 25–30°C.

Oleh karena itu, agar masalah tersebut teratasi, diperlukan suatu metode pemanasan awal (*pre-heating*) di luar ruang bakar untuk menurunkan viskositas dan meningkatkan laju penguapan *kerosene* sebelum diinjeksikan, sehingga proses *starting* menjadi lebih mudah dan stabil saat kondisi *idle* ataupun operasional. Rancang bangun sistem vaporizer kerosene menjadi solusi yang esensial. Berbeda dengan sistem atomisasi yang hanya mengubah ukuran fisik butiran cairan, sistem vaporizer mengandalkan perpindahan panas secara elektrik untuk mengubah fasa *kerosene* dari cair menjadi gas (*vapor*) sebelum diinjeksikan ke dalam ruang bakar. Dengan mensuplai bahan bakar yang sudah berwujud gas, proses pencampuran molekuler dengan udara dari kompresor menjadi seketika dan sangat homogen.

Hal ini secara efektif menghilangkan kebutuhan waktu penguapan di dalam ruang bakar, memastikan reaksi pembakaran berlangsung lebih cepat, stabil, dan efisien meskipun di dalam volume ruang bakar yang sangat sempit, sekaligus menurunkan ketergantungan sistem pada tekanan fluida yang tinggi. Penelitian sebelumnya oleh Rahmatunnisa (3) telah merancang dan membangun test bench Mini Gas Turbine Engine hasil modifikasi turbocharger yang dilengkapi sistem bahan bakar LPG dan minyak tanah. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada rancang bangun sistem bahan bakar minyak tanah yang lebih efisien, lebih cepat terbakar, dan terintegrasi untuk MGTE berbasis turbocharger, melalui pendekatan vaporisasi elektrik.

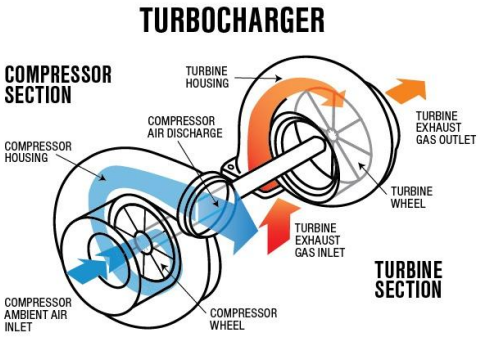
2. LANDASAN TEORI

2.1. Mini Gas Turbine Engine (MGTE)

Mini Gas Turbine Engine (MGTE) adalah sistem konversi energi berukuran kompak yang beroperasi berdasarkan prinsip siklus termodinamika Brayton terbuka. Mesin ini mengisap udara dari lingkungan, mengkompresinya, menambahkan panas melalui proses pembakaran bahan bakar di ruang bakar (*combustion chamber*), dan mengekspansikan gas panas bertekanan tinggi tersebut melalui turbin (4).

2.2. Pemanfaatan Turbocharger sebagai Inti Turbin Gas

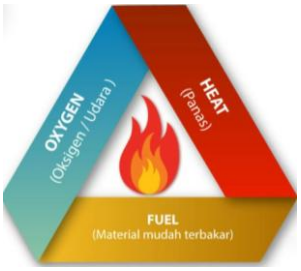
Turbocharger otomotif pada dasarnya terdiri dari kompresor sentrifugal dan turbin radial yang dihubungkan oleh sebuah poros tunggal (*single shaft*). Karena kesamaan arsitektur putaran mekanisnya, *turbocharger* dapat dimodifikasi menjadi MGTE dengan menambahkan ruang bakar di antara saluran buang kompresor dan saluran masuk turbin (5). Berikut adalah Gambar 1 bentuk dari *turbocharger* yang digunakan (6) :



Gambar 1 Turbocharger

2.3. Konsep Segitiga Api

Pembakaran adalah reaksi kimia eksotermis yang kelangsungannya mutlak membutuhkan tiga elemen dasar, yang dikenal sebagai segitiga api: bahan bakar (*fuel*), oksigen (*oxygen*), dan panas/sumber nyala (*heat*) (7). Pada MGTE, oksigen disuplai secara kontinu dari kompresor bertekanan, bahan bakar disuplai berupa *kerosene*, dan panas awal diberikan oleh sistem pemantik. Kegagalan menyatukan ketiga elemen ini secara homogen, terutama karena kondisi bahan bakar yang belum siap bereaksi, akan menyebabkan efisiensi pembakaran menurun drastis atau bahkan *flame out* (mati mesin). Berikut adalah Gambar 2 konsep dari segitiga api (8) :



Gambar 2 Konsep Segitiga Api

2.4. Karakteristik Kerosene

Kerosene (seperti Jet-A1) adalah bahan bakar hidrokarbon cair dengan kepadatan energi tinggi. Namun, bahan bakar ini memiliki titik didih (*boiling point*) pada rentang 150°C hingga 300°C dan viskositas yang cukup tinggi (9). Pada temperatur dan tekanan ruang, *kerosene* sulit untuk bereaksi secara langsung dengan oksigen.

2.5. Sistem Atomisasi Bahan Bakar

Atomisasi adalah proses mekanik pemecahan cairan curah (*bulk liquid*) menjadi partikel-partikel butiran kecil (*droplet*). Sistem ini umumnya mengandalkan *pressure atomizer* (nosel) konvensional yang memaksa fluida bertekanan tinggi melewati celah sempit (10). Tujuannya adalah memperluas luas permukaan spesifik bahan bakar agar lebih cepat menguap. Namun, untuk sistem berskala kecil seperti MGTE, metode ini menuntut pompa bertekanan sangat tinggi yang membebani kinerja perangkat keras dan sering kali masih menyisakan *droplet* berukuran besar.

2.6. Fase Karakteristik: Spray, Steam, dan Vapor

Dalam sistem pengkondisian bahan bakar, terdapat perbedaan perilaku fisik fluida, yaitu *spray*, *steam*, dan *vapor*. *Spray* adalah semburan partikel yang secara fisik masih berwujud cairan (*liquid droplet*) hasil atomisasi mekanik. *Steam* umumnya secara terminologi merujuk pada uap panas dari air murni akibat pendidihan. Sementara itu, *vapor* adalah fase gas dari zat yang pada suhu ruang berwujud cair, seperti halnya bahan bakar (11). Reaksi hidrokarbon yang paling optimal, homogen, dan instan di dalam ruang bakar terjadi ketika bahan bakar sepenuhnya telah terkonversi menjadi fase *vapor*, bukan sekadar *spray* cairan.

2.7. Perpindahan Panas (Heat Transfer) dan Konversi Energi Listrik

Agar bahan bakar mencapai fase *vapor*, diperlukan mekanisme perpindahan panas (*heat transfer*) yang andal. Pada fase penyalaan awal (*starting*), kondisi dinding ruang bakar masih dingin. Oleh karena itu, diterapkan konversi energi listrik menjadi energi panas (efek pemanasan Joule) melalui elemen pemanas seperti *glow plug* (12). Pemanas listrik ini akan memanaskan tabung logam tempat bahan bakar mengalir secara konduksi.

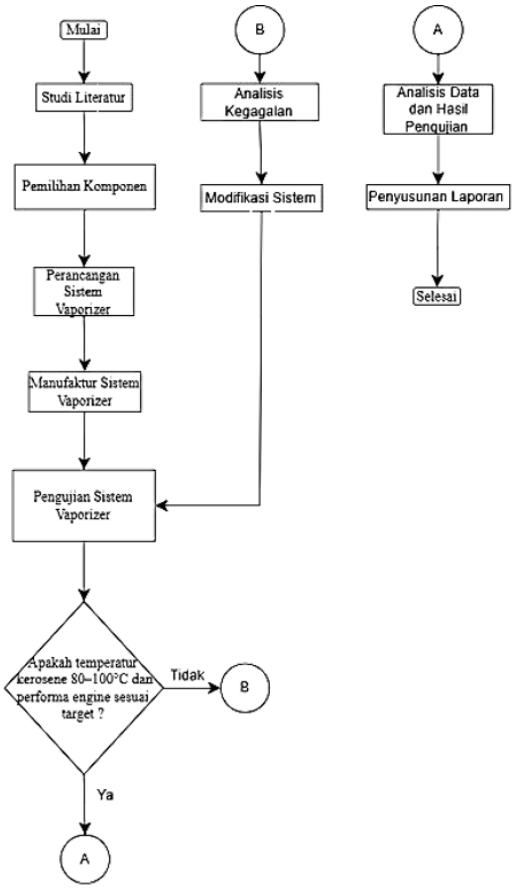
2.8. Sistem Vaporizer pada Ruang Bakar

Setelah mesin menyala secara mandiri (*self-sustaining*) dan elemen pemanas listrik dimatikan, sistem *vaporizer* beroperasi penuh memanfaatkan panas dari reaksi pembakaran. Panas ruang bakar dipindahkan secara radiasi dan konveksi ke dinding tabung *vaporizer*, lalu dihantarkan secara konduksi ke fluida *kerosene* di dalamnya (13). Mekanisme ini terus-menerus memanaskan fluida hingga melewati titik didihnya, memastikan *kerosene* keluar menuju zona reaksi sudah dalam fase *vapor* seutuhnya. Hal ini mengatasi keterbatasan waktu tinggal (*residence time*) aliran dan menjaga turbin tetap bekerja stabil di RPM tinggi tanpa harus bergantung pada nosel bertekanan ekstra tinggi.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara keseluruhan, tahapan penelitian ini dirangkum dalam diagram alir penelitian, mulai dari studi literatur, pemilihan komponen, perancangan dan manufaktur sistem vaporizer, pengujian, hingga analisis data dan penyusunan laporan. Apabila hasil pengujian belum memenuhi target (temperatur kerosene 80–100°C dan performa engine sesuai target), dilakukan analisis kegagalan dan modifikasi sistem sebelum pengujian diulang.



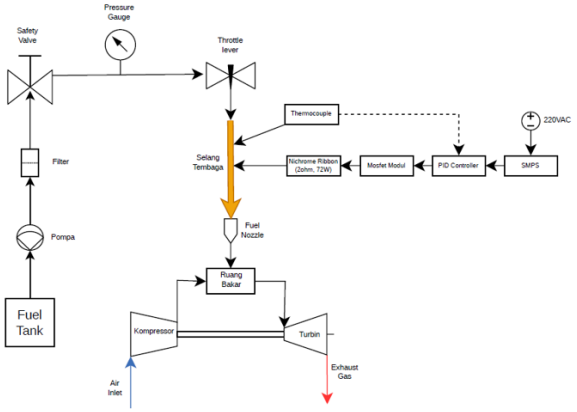
Gambar 3 Diagram Alir Penelitian

3.2 Desain Eksperimen dan *Test Bench*

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif yang dilakukan secara langsung pada *test bench Mini Gas Turbine Engine* (MGTE). Fokus pengujian adalah untuk mengevaluasi keandalan fungsional perangkat keras sistem bahan bakar *vaporizer kerosene* yang telah diintegrasikan pada modifikasi *turbocharger*. Pengujian dilakukan secara bertahap mulai dari kalibrasi instrumen, pengujian fase pemanasan awal tanpa nyala mesin, hingga pengujian *running* dengan beban putaran (RPM) tinggi guna mengamati karakteristik perpindahan panas dan profil suplai bahan bakar.

3.3 Konfigurasi Sistem Keseluruhan

Secara garis besar, sistem bahan bakar vaporizer kerosene yang dibangun terdiri atas jalur mekanis (fuel tank, pompa, filter, safety valve, dan nozzle) serta jalur kendali elektrik (thermocouple, PID controller, MOSFET, dan SMPS) yang bekerja sebagai satu kesatuan sistem tertutup. Blok diagram sistem keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Blok Diagram Sistem Keseluruhan

Bahan bakar *kerosene* dipompa dari *fuel tank* melalui filter dan *safety valve* menuju *throttle lever* yang mengatur laju alirnya. Sebelum mencapai fuel nozzle, kerosene dialirkan melalui selang tembaga yang dililit elemen pemanas *nichrome ribbon (vaporizer*). Temperatur pada selang ini dipantau oleh *thermocouple* dan dikendalikan oleh PID *controller*, yang mengatur daya listrik menuju elemen pemanas melalui MOSFET modul dengan sumber daya dari SMPS 220VAC. Bahan bakar yang telah dipanaskan kemudian diinjeksikan ke ruang bakar (*combustor*) dan bercampur dengan udara dari kompresor, menghasilkan gas panas bertekanan tinggi yang memutar turbin dan keluar sebagai *exhaust gas*.

3.4 Instrumen Pengujian

Untuk memastikan data eksperimen yang valid dan relevan dengan parameter termodinamika mesin, digunakan beberapa instrumen pengukuran meliputi:

1. Termokopel (Tipe K): Digunakan untuk membaca temperatur secara real-time pada dua titik utama: dinding tabung pemanas (tube) dan temperatur fluida kerosene sesaat sebelum diinjeksikan ke ruang bakar, Termokopel tipe K dipilih karena rentang pengukurannya yang luas (-200°C hingga +1260°C) dan kestabilannya pada aplikasi pengukuran suhu umum (16).
2. Tachometer/Sensor Optik: Digunakan untuk memonitor kecepatan putaran poros kompresor turbin dalam satuan RPM (Revolutions Per Minute).
3. Gelas Ukur dan Stopwatch: Digunakan secara manual dan dikalibrasi dengan pompa mekanis untuk menentukan profil debit aliran massa (*mass flow rate*) bahan bakar dalam satuan kg/dt.

3.5 Prosedur Pengujian

Rangkaian eksperimen mekanis dibagi menjadi tiga tahap pengujian utama yaitu :

A. Pengujian Pemanasan Awal (*Pre-heating*)

Tahap ini bertujuan untuk mengkarakterisasi respons *hardware vaporizer* terhadap injeksi panas dari elemen pemanas listrik (*glow plug*). Pengukuran dilakukan selama rentang waktu 30 detik (interval 5 detik) sejak pemanas diaktifkan. Parameter yang diamati adalah seberapa cepat dinding *tube* menghantarkan panas secara konduksi kepada cairan *kerosene* hingga mendekati fase *vapor*-nya.

B. Pengukuran Debit Aliran Kerosene

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui batas operasional fisik dari pompa bahan bakar pendukung sistem vaporizer. Debit fluida diukur pada dua kondisi ekstrem yang relevan dengan operasional turbin: saat tegangan pompa minimum yang mengindikasikan putaran mesin stasioner (*idle*), dan saat tegangan pompa maksimum (*max pump power*).

C. Pengujian Operasional Putaran Tinggi (*Engine Run*)

Tahap akhir adalah mengoperasikan keseluruhan perangkat keras turbin gas. Pemanas listrik dimatikan, dan *vaporizer* sepenuhnya mengandalkan perpindahan panas konvektif dan radiasi dari nyala api di dalam ruang bakar. Pengambilan data temperatur fluida *kerosene* dilakukan secara bertahap seiring dengan kenaikan putaran mesin, mulai dari putaran rendah hingga putaran maksimum (85.000 RPM). Pengujian ini sangat krusial untuk mengevaluasi ketahanan alat dan memvalidasi apakah sistem *vaporizer* mampu menstabilkan pasokan fasa uap secara presisi guna mencegah *flame out* di RPM tinggi.

3.6 Variabel Penelitian

Untuk memastikan hasil pengujian dapat dianalisis secara sistematis, penelitian ini menetapkan tiga kelompok variabel sebagai berikut:

A. Variabel bebas (*independent variable*): daya pemanasan elemen *nichrome ribbon* (72 W) pada tahap *pre-heating*, dan putaran turbocharger (rpm) pada tahap pengujian operasional, yang divariasikan secara bertahap dari 0 hingga 85.000 rpm.

B. Variabel terikat (*dependent variable*): temperatur dinding tube vaporizer, temperatur fluida *kerosene*, dan debit aliran massa bahan bakar (*mass flow rate*), yang diukur sebagai respons terhadap perubahan variabel bebas.

C. Variabel kontrol (*control variable*): dimensi tube vaporizer (diameter luar 5 mm, diameter dalam 4 mm), jenis dan volume bahan bakar (*kerosene*), set point PID *controller*, serta tegangan sumber daya elemen pemanas (12 V), yang dijaga tetap konstan pada setiap sesi pengujian agar perbandingan data antar tahap tetap valid.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data kuantitatif dari hasil pengujian *hardware vaporizer kerosene* pada *test bench* MGTE. Analisis difokuskan pada tiga parameter utama: karakteristik pemanasan awal, profil debit pasokan bahan bakar, dan stabilitas perpindahan panas saat turbin beroperasi pada putaran tinggi.

Setiap tahapan pengujian (pemanasan awal, pengukuran debit, dan operasional putaran tinggi) dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan (*replikasi*) pada kondisi ambien yang relatif sama, untuk memastikan konsistensi dan keterulangan (*repeatability*) data yang diperoleh. Data yang disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan data rata-rata dari kelima pengulangan tersebut.

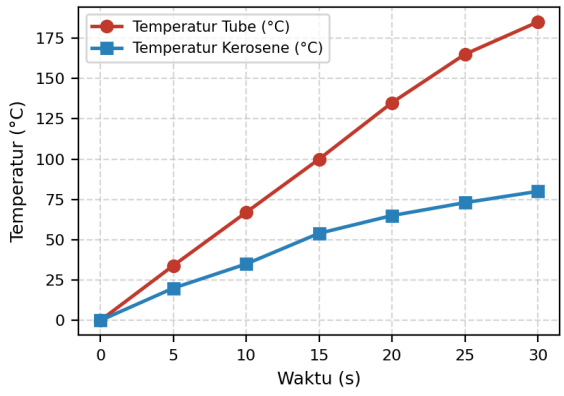
4.1 Karakteristik Pemanasan Awal (Pre-heating)

Tahap pemanasan awal menggunakan elemen pemanas listrik sangat krusial untuk menyiapkan fase campuran bahan bakar sebelum nyala api utama (*ignition*) terjadi di dalam ruang bakar. Tabel 1 menunjukkan peningkatan temperatur pada tabung (*tube*) *vaporizer* dan fluida *kerosene* selama durasi 30 detik pertama.

Tabel 1 Waktu vs T.Tube vs T.Kerosene

Waktu (s)	T. Tube (°C)	T. Kerosene (°C)
0	0	0
5	34	20
10	67	35
15	100	54
20	135	65
25	165	73
30	185	80

Berdasarkan data di atas, terlihat laju perpindahan panas konduksi yang sangat responsif dari elemen pemanas menuju *tube*. Dalam waktu 30 detik, dinding *tube* mampu mencapai temperatur 185°C. Panas ini secara efektif ditransfer secara konveksi ke dalam fluida *kerosene* sehingga temperaturnya meningkat menjadi 80°C. Peningkatan suhu fluida ini secara drastis menurunkan viskositas *kerosene* dan mendekatkannya pada titik penguapan (*flash point*), sehingga ketika disemprotkan pada fase *starting*, bahan bakar jauh lebih mudah tersulut dibandingkan atomisasi pada suhu ruang.



Gambar 5 Grafik temperatur tube dan kerosene terhadap waktu pemanasan.

Secara teoretis, laju perpindahan panas konduksi pada dinding tube mengikuti Hukum Fourier ($q = -kA(dT/dx)$), di mana laju aliran kalor berbanding lurus dengan konduktivitas termal material dan gradien temperatur, sedangkan perpindahan panas dari dinding tube ke fluida kerosene mengikuti Hukum Pendinginan Newton ($q = hA\Delta T$) untuk konveksi (13). Nichrome ribbon memiliki konduktivitas termal dan resistansi listrik yang mendukung pemanasan cepat, sehingga gradien temperatur yang besar antara dinding tube dan fluida pada detik-detik awal pemanasan menghasilkan laju transfer kalor yang tinggi, sebagaimana tercermin pada kenaikan temperatur yang curam pada Gambar 5.

4.2 Karakteristik Debit Aliran Massa (Mass Flow Rate)

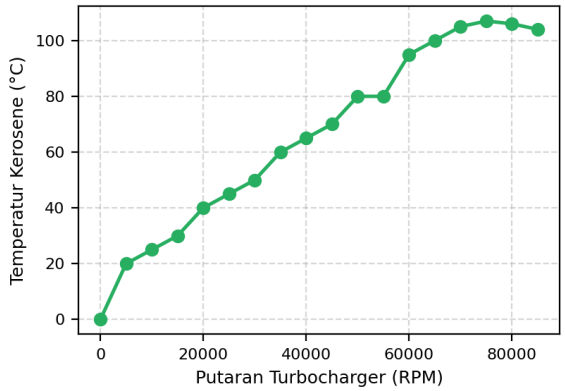
Pengaturan suplai bahan bakar yang presisi merupakan syarat mutlak agar MGTE terhindar dari kondisi *rich flame-out* (terlalu banyak bahan bakar) atau *lean die-out* (kekurangan bahan bakar). Hasil pengukuran debit aliran massa (*mass flow rate*, m_f) dari pompa pendukung sistem *vaporizer* menunjukkan bahwa pada kondisi putaran mesin stasioner (*idle*), debit bahan bakar terukur stabil di angka 0,00062 kg/dt. Seiring dengan peningkatan tegangan kerja pompa menuju kapasitas maksimumnya (*max pump power*), debit aliran meningkat dan mencapai batas atas pada 0,00106 kg/dt. Rentang debit suplai ini membuktikan bahwa *hardware vaporizer* tidak memerlukan pompa bertekanan ekstrem untuk dapat menyuplai bahan bakar, sekaligus menunjukkan fleksibilitas sistem dalam melayani kebutuhan volume bahan bakar dari kondisi *idle* hingga beban penuh tanpa menyebabkan penumpukan fluida cair (*pooling*) di dalam ruang bakar.

4.3 Pengaruh Putaran Mesin (RPM) terhadap Stabilitas Temperatur Kerosene

Pengujian paling kritis adalah mengamati stabilitas termal *vaporizer* saat sistem dioperasikan (*running*) mengandalkan panas murni dari ruang bakar (elemen pemanas dimatikan). Tabel 2 merepresentasikan dinamika perpindahan panas termal ke dalam bahan bakar seiring dengan peningkatan putaran poros kompresor dari kondisi *spool-up* hingga maksimal 85.000 RPM.

Tabel 2 RPM vs T. Kerosene

RPM	T. Kerosene (°C)
0	0
5000	20
10000	25
15000	30
20000	40
25000	45
30000	50
35000	60
40000	65
45000	70
50000	80
55000	80
60000	95
65000	100
70000	105
75000	107
80000	106
85000	104



Gambar 6 Grafik temperatur kerosene terhadap putaran Engine (rpm).

Data pada Tabel 2 menunjukkan kenaikan temperatur fluida yang linier dengan peningkatan putaran mesin pada fase awal hingga menengah. Semakin tinggi RPM, semakin besar aliran udara dan bahan bakar yang terbakar, sehingga intensitas panas (kalor) di dalam ruang bakar meningkat secara eksponensial. Panas ini diserap dengan sangat baik oleh *vaporizer* hingga temperatur fluida memuncak di angka 107°C saat mesin dipacu pada 75.000 RPM. Kondisi ini membuktikan bahwa *kerosene* telah mengalami peningkatan temperature signifikan sehingga kualitas atomisasi dan penguapan parsialnya (vapor) menjadi optimal ketika memasuki zona reaksi, meskipun secara termodinamika fluida *bulk kerosene* tetap berada pada fase liquid sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.

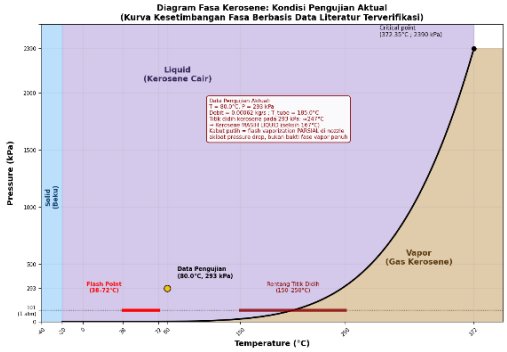
Fenomena termodinamika yang sangat menarik terjadi ketika RPM terus dinaikkan hingga beban puncaknya di 85.000 RPM. Alih-alih mengalami *overheating*, temperatur *kerosene* justru mengalami sedikit penurunan dan stabil pada angka 104°C. Penurunan termal ini disebabkan oleh efek pendinginan internal (kalor sensibel) dari debit massa bahan bakar yang mencapai titik maksimalnya (0,00106 kg/dt). Debit cairan yang masuk dengan sangat cepat menyerap sebagian panas dari dinding *tube*, mencegah material alat mengalami degradasi atau pelelehan akibat suhu ruang bakar yang ekstrem. Hal ini memvalidasi bahwa desain fisik dan tata letak *vaporizer* tidak hanya mampu menyiapkan bahan bakar menjadi gas, tetapi juga memiliki properti *self-cooling* yang memastikan keandalan operasional pada RPM maksimal.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui prinsip keseimbangan energi (energy balance) untuk kalor sensibel, $Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta T$, di mana Q adalah laju kalor yang diserap fluida, $\dot{m}$ adalah laju alir massa kerosene, Cp adalah kalor jenis fluida, dan ΔT adalah kenaikan temperaturnya (13). Karena daya pemanasan elemen nichrome ribbon bersifat tetap (72 W), maka pada saat laju alir massa ($\dot{m}$) meningkat signifikan mendekati debit maksimalnya (0,00106 kg/dt) akibat putaran pompa yang tinggi, kenaikan temperatur (ΔT) yang dapat dicapai fluida untuk kalor yang sama akan menurun secara proporsional. Dengan kata lain, penambahan massa fluida dingin yang mengalir melewati tube lebih cepat daripada kemampuan elemen pemanas menambah energi ke dalamnya, sehingga temperatur keluaran sedikit menurun dan stabil pada 104°C alih-alih terus meningkat.

4.4 Diagram Fasa Kerosene pada Kondisi Pengujian

Untuk memvalidasi fase aktual kerosene pada kondisi operasi pengujian, data temperatur dan tekanan hasil pengujian diplot pada diagram kesetimbangan fasa tekanan-temperatur kerosene, yang disusun berdasarkan data titik didih standar Jet A-1 pada tekanan atmosfer (15) dan data pengukuran *critical point kerosene* (14), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat bahwa *kerosene* secara masih berada dalam fase *Liquid*, karena suhu operasi (80°C) jauh di bawah titik didihnya pada tekanan tersebut (~247°C) selisih 167°C. Ini terlihat jelas di diagram: titik data (●) berada solid di area ungu (Liquid), bukan di area coklat (Vapor).

Namun demikian, sistem vaporizer hasil rancang bangun tetap berhasil menginduksi *flash vaporization parsial*, teramati sebagai kabut (*mist*) putih akibat mekanisme *pressure drop* mendadak di *nozzle* serta karakteristik *kerosene* sebagai campuran multikomponen. Temuan ini menunjukkan bahwa alat berfungsi meningkatkan kualitas atomisasi dan fraksi uap *kerosene* dibandingkan kondisi tanpa pemanasan, meskipun belum mencapai vaporisasi penuh pada kondisi *bulk* fluida.



Gambar 7 Diagram Fasa Kerosene: Kondisi Pengujian Aktual

5. KESIMPULAN

Penelitian eksperimental terhadap fungsionalitas *hardware vaporizer kerosene* pada modifikasi *mini gas turbine engine* telah berhasil dilakukan. Hasil pengujian membuktikan bahwa sistem ini mampu menghasilkan perpindahan panas yang optimal, di mana proses *pre-heating* selama 30 detik dapat meningkatkan suhu tabung hingga 185°C dan fluida mencapai 80°C untuk mempermudah fase penyalaan awal. Sistem menunjukkan kemampuan menyuplai debit bahan bakar secara presisi dari 0,00062 kg/dt (*idle*) hingga 0,00106 kg/dt (maksimal) tanpa menuntut kinerja pompa bertekanan ekstrem. Saat dioperasikan pada beban putaran penuh, sistem menunjukkan stabilitas termal yang sangat baik; temperatur *kerosene* memuncak pada 107°C di 75.000 RPM dan stabil di 104°C saat menyentuh putaran maksimal 85.000 RPM akibat efek *self-cooling* dari debit fluida. Pada kondisi operasi T = 80°C dan P = 293 kPa, *kerosene* masih berada

pada fase *liquid* menurut diagram kesetimbangan fasa. Namun demikian, sistem vaporizer hasil rancang bangun tetap berhasil menginduksi *flash vaporization parsial* teramati sebagai kabut atau *mist* putih akibat mekanisme pressure drop mendadak di *nozzle*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Radi Suradi Kartanegara, Dipl. Ing., M.Eng, selaku Dosen pembimbing, staf laboratorium Program Studi Teknik Aeronautika/Teknik Mesin Politeknik Negeri Bandung, serta seluruh pihak yang telah memberikan bimbingan, fasilitas, dan dukungan selama proses perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem vaporizer *kerosene* ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Simple Flying. (2024). How Jet Fuel Is Routed Within Aircraft Engines. Diakses 22 Juli 2026, dari https://simpleflying.com/how-jet-fuel-is-routed-within-aircraft-engines/
2. ScienceDirect Topics. (2026). Primary Combustion Zone. Diakses 22 Juli 2026, dari https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/primary-combustion-zone
3. Rahmatunnisa. Rancang Bangun Test Bench Mini Gas Turbine Engine Hasil Modifikasi Turbocharger Kaji Sistem Bahan Bakar. Tugas Akhir, Politeknik Negeri Bandung, 2019.
4. Nuclear Power. (2026). Brayton Cycle – Gas Turbine Engine. Diakses 28 Juli 2026, dari https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/brayton-cycle-gas-turbine-engine/
5. Butt, M. U. (2019). Converting an Automobile Turbocharger into a Micro Gas Turbine. E3S Web of Conferences, 95, 02008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199502008
6. Eagle Ridge Chevrolet Buick GMC Ltd. (2024). What is a Turbocharger and How Does it Work? Diakses 28 Juli 2026, dari https://www.eagleridgegm.com/what-is-a-turbocharger-and-how-does-it-work/
7. Turns, S. R., & Haworth, D. C. (2021). An Introduction to Combustion: Concepts and Applications (4th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
8. Dunia Pemadam. (2025). Teori Segitiga Api: Unsur, Fungsi, dan Pencegahannya. Diakses 22 Juli 2026, dari https://duniapemadam.com/teori-segitiga-api/
9. Taylor & Francis. (2026). Kerosene – Knowledge and References. Diakses 5 Agustus 2026, dari https://taylorandfrancis.com/knowledge/Engineering_and_technology/Chemical_engineering/Kerosene/
10. ScienceDirect Topics. (2026). Pressure Atomisation. Diakses 30 Juli 2026, dari https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pressure-atomisation
11. Cengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoglu, M. (2024). Thermodynamics: An Engineering Approach (10th ed.). New York: McGraw Hill.
12. OpenStax. (2016). University Physics Volume 2, Chapter 9: Current and Resistance. Houston: Rice University. https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-introduction
13. OpenStax. (2025). University Physics Volume 2: Mechanisms of Heat Transfer. Rice University. https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-6-mechanisms-of-heat-transfer
14. Chen, W. W., & Fang, X. D. (2016). Modeling of Convective Heat Transfer of RP-3 Aviation Kerosene in Vertical Miniature Tubes under Supercritical Pressure. International Journal of Heat and Mass Transfer, 95, 272–277. Diakses 28 Juli 2026, dari https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931015306967
15. Airways Magazine. (2024). Explained: Properties of Jet and Aviation Fuel. Diakses 28 Juli 2026, dari https://www.airwaysmag.com/new-post/properties-jet-aviation-fuel
16. ScienceDirect Topics. (2026). Chromel Alumel Thermocouple. Diakses 28 Juli 2026, dari https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chromel-alumel-thermocouple