

# ANALISIS PENGARUH KOMPOSISI *INLET FUEL GAS* TERHADAP NILAI KALOR DAN EFISIENSI PEMBAKARAN DI GAS *ENGINE* GENERATOR (GEG) DI PT. X

Dwi Halimah Khayyirah<sup>1</sup>, Alimatun Nashira<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417

Email: [alimatunnashira@ums.ac.id](mailto:alimatunnashira@ums.ac.id)

## Abstrak

*Gas alam merupakan sumber energi penting dalam sektor industri dan pembangkitan listrik, dengan karakteristik pembakaran lebih bersih dibandingkan minyak atau batu bara. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi komposisi inlet fuel gas terhadap nilai kalor dan efisiensi pembakaran pada Gas Engine Generator (GEG) di PT.X. Data komposisi gas diukur menggunakan Gas Chromatography (GC) selama tiga hari berturut-turut (11–13 Agustus 2025), dengan fokus pada mole fraction hidrokarbon (C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>+) dan komponen non-combustible (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S). Parameter kualitas gas seperti Lower Heating Value (LHV), Higher Heating Value (HHV), Wobbe Index (WI), faktor kompresibilitas (Z), Specific Gravity (SG), serta efisiensi pembakaran (EFF) dihitung berdasarkan standar ISO 6976:2016. Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi operasional harian berfluktuasi antara 38,58% hingga 47,21% dengan standar deviasi efisiensi sebesar 4,3230%. Temuan utama mengungkapkan adanya anomali di mana nilai LHV tertinggi pada 13 Agustus (1.011,0 Btu/cuft) tidak menghasilkan efisiensi maksimal, yang mengindikasikan ketidakefektifan konversi energi akibat rasio udara-bahan bakar yang tidak ideal. Hasil perbandingan antarwilayah menegaskan bahwa kadar metana CH<sub>4</sub> adalah determinan utama; wilayah Natuna dengan kadar metana 90% mencapai efisiensi tertinggi (46,56%), sementara PT. X dengan kadar 78,18% memiliki efisiensi lebih rendah (42,86%). Kesimpulannya, performa GEG di PT. X saat ini masih berada di bawah ambang batas standar European Commission 2017 (73,4%-74,2%). Penelitian ini merekomendasikan penerapan strategi fuel trimming dan optimasi sistem kontrol untuk memitigasi dampak impuritas gas guna meningkatkan stabilitas dan efisiensi energi secara berkelanjutan.*

**Kata kunci:** *Gas alam; ; Gas Chromatography (GC); Gas Engine Generator (GEG); Komposisi gas; Efisiensi pembakaran.*

## Pendahuluan

Gas alam merupakan sumber energi fosil yang sebagian besar terdiri dari gas metana (CH<sub>4</sub> sekitar 70-90%) dan berbagai campuran hidrokarbon ringan lainnya seperti etana, propana, dan butana, serta jejak-jejak gas seperti karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan nitrogen (N<sub>2</sub>) yang terbentuk dari sisa-sisa makhluk hidup yang terpendam selama jutaan tahun. Energi dari gas alam diekstrak melalui proses pembakaran, yang menghasilkan panas untuk berbagai aplikasi. Minyak atau batu bara dengan emisi CO<sub>2</sub> yang lebih rendah saat dibakar tidak baik karena lebih kotor dari pada gas alam yang menjadi jembatan energi karena lebih bersih (IEA, 2023). Dalam sektor industri dan pembangkitan listrik di Indonesia energi berbasis gas alam telah menjadi salah satu sumber energi utama. Penggunaan gas alam yang meningkat sebagai sumber bahan bakar dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain harga yang relatif ekonomis, ketersediaan yang stabil, serta karakteristik pembakaran yang lebih bersih dibandingkan sumber energi berbasis minyak atau batu bara (Bareto dan Khinanta, 2025). Menurut laporan *International Energy Agency* (IEA, 2023), penggunaan gas alam di sektor industri diproyeksikan terus meningkat karena mendukung transisi menuju energi rendah karbon dan efisiensi energi dengan proyeksi peningkatan konsumsi global hingga 3% per tahun hingga 2030, terutama di sektor manufaktur seperti baja dan kimia.

Meningkatkan efisiensi secara signifikan dilakukan dengan pemantauan kualitas gas dan sistem kontrol pembakaran modern untuk memberikan peluang perkembangan teknologi bagi industri. Prediksi performa *engine*, serta integrasi data *real-time* dari *Gas Chromatography* mulai diterapkan dalam berbagai fasilitas pembangkitan energi mulai dengan tren digitalisasi seperti penggunaan sensor berbasis IoT dan *machine learning* (Rahman & Nugroho, 2024). Namun, pemanfaatan teknologi ini memerlukan dasar perhitungan teknis yang kuat tentang parameter kualitas gas dan dampak parameter gas terhadap performa mesin. Penelitian mengenai hubungan antara pengaruh komposisi

gas dan kinerja *engine* tidak hanya relevan secara operasional, tetapi juga mendukung transformasi industri menuju *smart power plant* yang siap menghadapi tantangan transisi energi, lebih terpercaya, dan efisien (IEA, 2023).

Menurut Budiman dan Sipahutar tahun 2023 menemukan bahwa perubahan komposisi *fuel* gas pada stasiun gas alam di Indonesia berkorelasi langsung dengan penurunan *Methane Number* (MN), perubahan *Lower Heating Value* (LHV), serta peningkatan sensitivitas performa *engine* terhadap gangguan pembakaran. Pada kondisi tersebut variasi komposisi gas bukan hanya berdampak pada kualitas bahan bakar, tetapi juga berdampak pada kestabilan proses konversi energi untuk sistem pembangkit berbasis Gas *Engine* Generator (GEG).

PT. X mengukur dan mengidentifikasi komposisi *inlet fuel* gas yang dikaitkan dengan nilai kalor, serta efisiensi pembakaran. Data operasi mengindikasikan bahwa fluktuasi komponen *non-combustible* seperti CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> dapat menyebabkan penurunan *output* daya, peningkatan konsumsi bahan bakar per kWh, serta perubahan *respons air-fuel ratio control system*. Sehingga, evaluasi kuantitatif antara parameter performa pembakaran terhadap variasi komposisi gas belum dilakukan secara sistematis. Permasalahan dari penelitian ini adalah variasi komposisi *inlet fuel* gas untuk mempengaruhi nilai kalor (LHV) dan efisiensi pembakaran pada Gas *Engine* Generator (GEG). di PT. X, serta perubahan efisiensi pembakaran apakah berdampak terhadap *output* energi yang dihasilkan dan stabilitas operasi mesin. Analisis diperlukan untuk mengetahui batas perubahan komposisi gas yang masih dapat diterima sistem, serta mendukung pengambilan keputusan terkait optimasi operasi, penjadwalan perawatan, dan pemantauan kualitas gas secara berkelanjutan dengan melakukan perhitungan teknis menggunakan data komposisi gas aktual melalui analisis Gas *Chromatography*, untuk mendapatkan nilai LHV, HHV, *specific gravity*, *wobbe index*, *gas compressibility factor*, dan efisiensi serta deviasi yang kemudian dikorelasikan dengan kinerja operasional mesin.

Pada analisis ini, PT. X memperoleh ilmiah dasar untuk menentukan perkiraan nilai *fuel* gas yang aman dan efisien, kemudian menyusun rekomendasi teknis terkait *fuel trimming control*, *fuel blending*, atau *upgrader* gas, dan menyusun SOP pemantauan kualitas gas. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan batas perubahan komposisi gas yang masih dapat diterima oleh Gas *Engine* Generator melalui perhitungan parameter kualitas gas seperti LHV, HHV, SG, WI, *Z-factor*, dan efisiensi berdasarkan data Gas *Chromatography*. Hasil deviasi dan perhitungan dikorelasikan dengan kinerja operasional mesin untuk mengetahui dampak terhadap konsumsi bahan bakar, efisiensi pembakaran, dan stabilitas mesin. Penelitian ini bermanfaat untuk pengambilan keputusan teknis, optimasi operasi, pemantauan kualitas gas secara berkelanjutan, serta perencanaan perawatan prediktif. Selain itu, penelitian memberikan manfaat ekonomi berupa penghematan biaya operasional dan peningkatan efisiensi.

## Metode

Metode yang digunakan dari analisis ini menggunakan sensor gas kromatografi dan dinamometer secara *real time* untuk menghasilkan data. *Fuel* gas merupakan campuran dari multikomponen gas kromatografi yang mampu memisahkan dan mengukur tiap komponen. Diperlukan akurasi tinggi untuk perhitungan HHV, LHV, *Wobbe Index*. GC dapat menganalisis hidrokarbon C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>+ secara lengkap. Kombinasi TCD dan FID memungkinkan pengukuran gas *combustible* dan *inert*. GC (Gas *Chromatography*) merupakan metode standar internasional dengan ASTM dan ISO yang digunakan secara *online* untuk kontrol proses *real-time*, fleksibilitas, akurat, sensitivitas, dan kecocokan untuk kebutuhan industri energi dan proses (Darawia dan Persada, 2025).

Digunakan analisis dan simulasi pada Gas *Engine* Generator (GEG) skala menengah dengan kapasitas 100-500 kW, dengan fokus pada *inlet* bahan bakar gas berbasis emisi dan gas alam. Pengujian dilakukan di laboratorium dan lapangan selama tiga hari berturut-turut yakni 11, 12, dan 13 Agustus 2025. Variabel utama adalah komposisi gas seperti Tabel 1.

Tabel 1. Data Komposisi gas alam di PT. X berdasarkan Gas *Chromatography*.

Komponen	Tanggal 11 Agustus 2025 (Mole %)	Tanggal 12 Agustus 2025 (Mole %)	Tanggal 12 Agustus 2025 (Mole %)
N <sub>2</sub> Nitrogen	5,234	5,145	5,138
CO <sub>2</sub> Carbon Dioxide	4,817	4,805	4,799
H <sub>2</sub> S Hydrogen Sulphide	0	0	0
C <sub>1</sub> Methane	78,252	78,181	78,064
C <sub>2</sub> Ethane	4,733	4,784	4,729
C <sub>3</sub> Propane	3,508	3,589	3,51
iC <sub>4</sub> i-Butane	0,798	0,827	0,809
nC <sub>4</sub> n-Butane	0,959	1,004	0,98
iC <sub>5</sub> i-Pentane	0,406	0,415	0,434
nC <sub>5</sub> n-Pentane	0,323	0,33	0,35

C <sub>6</sub> Hexanes	0,382	0,375	0,438
C <sub>7</sub> Heptanes	0,362	0,346	0,446
C <sub>8</sub> Octanes	0,177	0,166	0,239
C <sub>9</sub> Nonanes	0,03	0,025	0,045
C <sub>10</sub> Decanes	0,013	0,004	0,012
C <sub>11</sub> Undecanes	0,005	0,003	0,004
C <sub>12+</sub> Dodecanes plus	0,001	0,001	0,003

Perhitungan parameter kualitas gas. Nilai *Higher Heating Value* (HHV) dihitung menggunakan rumus penjumlahan kontribusi masing-masing komponen hidrokarbon berdasarkan fraksi mol  $Y_i$  dan nilai kalor standar komponen (HHV<sub>i</sub>) (ISO 6976:2016) :

$$HHV_{mix} = \sum(y_i \times HHV_i) \tag{1}$$

$$LHV_{mix} = HHV_{mix} - (2y_{CH_4})x(\Delta H_{vap}/V_m) \tag{2}$$

Dengan

- Y<sub>i</sub> : Fraksi mol gas ke-i dalam campuran gas (%mole)
- LHV : *Lower Heating Value* (Btu/scf).
- HHV : *Higher Heating Value* (Btu/scf).
- ΔH<sub>vap</sub> : *Enthalpy of vaporization* (Btu/lb)
- V<sub>m</sub> : Volume gas kondisi basis (60°F, 14.73 psia)

Setelah mendapat nilai LHV dan HHV kemudian menghitung SG dengan menggunakan rumus (ISO 6976:2016) :

$$SG = \frac{P_{gas}}{P_{air}} = \frac{M_{gas}}{M_{air}} \tag{3}$$

Dengan

- M<sub>gas</sub> : Massa jenis gas (kg/m<sup>3</sup>).
- P<sub>gas</sub> : Tekanan gas (Pa atau atm).
- P<sub>air</sub> : Tekanan udara (Pa atau atm).
- M<sub>air</sub> : Massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>).

Dari nilai SG yang didapat kemudian digunakan untuk menghitung WI dengan rumus (ISO 6976:2016) :

$$WI = \frac{H_v}{\sqrt{SG}} \tag{4}$$

Dengan

- WI : Laju alir gas (psia).

Kemudian menghitung Z dengan menggunakan rumus (Moiseeva and Malyshev, 2019) :

$$Z = \frac{P.V}{n.R.T} \tag{5}$$

Dengan

- Z : Faktor kompresibilitas gas.
- P : *pressure* (psia)
- V : volume (mL)
- N : *number of gas moles*
- R : *gas constant* (8,314 x 10<sup>-3</sup> kJ/mol.K)
- T : *temperature* (°F)

Setelah didapatkan data hasil HHV, LHV, SG, WI, dan Z kemudian memperoleh data power(kW) serta laju alir gas (MMSCFD) untuk mencari efisiensi dari *fuel* gas yang akan masuk ke dalam GEG dengan rumus (Souza *et al*,2016) :

$$EFF = \text{Power} / (\text{laju Alir Gas} \times \text{LHV}) \times 100\% \tag{6}$$

Dengan

EFF : Efisiensi pembakaran (%).

Power : *Power Load* (Btu/hr)

Laju Alir Gas : *Filter Flow Outlet* (SCFH).

LHV : *Lower Heating Value* (Btu/scf).

Metodologi dalam penelitian ini menggunakan Gas *Chromatography* untuk evaluasi kuantitatif kualitas *fuel* gas secara akurat melalui pengukuran komposisi multikomponen. Dengan kombinasi detektor TCD dan FID, GC (*Gas Chromatography*) yang memisahkan serta mengukur hidrokarbon dari C<sub>1</sub> sampai C<sub>6+</sub> dan komponen *non-combustible* seperti N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, dan juga H<sub>2</sub>S secara *real-time*. Data ini menggunakan standar ISO 6976:2016 untuk menghitung parameter kualitas gas, termasuk *Higher Heating Value* (HHV), *Lower Heating Value* (LHV), *Wobbe Index*, *Specific Gravity*, dan faktor kompresibilitas (Z). Pendekatan ini memastikan akurasi tinggi dalam menentukan karakteristik energi gas, yang merupakan dasar penting untuk evaluasi efisiensi pembakaran dan kestabilan operasi Gas *Engine Generator*.

Selain itu, perhitungan efisiensi pembakaran (EFF) berdasarkan rasio antara daya keluaran dan energi *input* dari gas (laju alir gas × LHV) memberikan indikasi langsung terhadap performa sistem. Identifikasi pengaruh dari fluktuasi komposisi gas terhadap stabilitas penggunaan mesin dan *output* energi menggunakan Integrasi data gas kromatografi dengan analisis teknis persamaan termodinamika dan kompresibilitas. Metode ini tidak hanya mendukung pengambilan keputusan terkait optimasi operasi dan pengendalian kualitas gas, tetapi juga menyediakan dasar ilmiah untuk penentuan batas aman komposisi *inlet fuel* gas, perencanaan pemeliharaan prediktif, dan pengembangan strategi *fuel trimming* atau *blending* yang lebih efisien.

**Hasil dan Pembahasan**

Dari data yang diperoleh Laju alir Gas (MMSCFD) yang dikonversi ke btu/hr setiap tanggal 11 Agustus 2025, 12 Agustus 2025, dan 13 Agustus 2025 adalah sebesar 0,0591 SCFH ; 0,0727 SCFH & 0,0702 SCFH. Data *Power Load* yang didapat dari PT. X pada tanggal 11 Agustus 2025 sebesar 2.784.592,21 btu/hr, tanggal 12 Agustus 2025 sebesar 2.805.918,11 btu/hr, dan tanggal 13 Agustus 2025 sebesar 3.014.058,76 btu/hr. Hasil penelitian yang diperoleh dengan menggunakan metode menggunakan alat *Chromatography* pada PT.X secara 3 hari berturut didapatkan hasil seperti Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Analisis Gas *Chromatography* pada PT. X.

Tanggal	HHV (Btu/cuft)	LHV (Btu/cuft)	WI (psia)	SG	Z	Eff (%)
11 Agustus 2025	1.102,20	998,8	1.276,50	0,7455	0,9968	47,21
12 Agustus 2025	1.104,5	1.000,90	1.278,90	0,7458	0,9968	38,58
13 Agustus 2025	1.115,30	1.011,00	1.285,60	0,7527	0,9967	42,44
s (Stdr Deviasi)	9,26	6,52	4,71	0,0041	0,0001	43,23

Menurut *European Commission* (2017), standar deviasi efisiensi motor generator dihitung berdasarkan variasi hasil pengukuran pada setiap titik operasi, sehingga nilai penyimpangan statistik dari efisiensi dan penghematan CO<sub>2</sub> dapat ditentukan secara kuantitatif. Standar efisiensi minimum motor generator sebesar 73,8% untuk mesin bensin, 73,4% untuk bensin turbo, dan 74,2% untuk mesin diesel yang dimana digunakan sebagai syarat kelayakan teknologi untuk memperoleh sertifikasi *eco-innovation*. Meskipun kualitas bahan bakar (LHV) meningkat, efisiensi bisa menurun jika sistem tidak mampu mengelola laju alir gas atau perbandingan udara-bahan bakar secara proporsional terhadap beban kerja mesin (*Power Load*).

Rendahnya efisiensi dipengaruhi oleh kadar metana (CH<sub>4</sub>) yang digunakan sebagai komponen utama dan penentu kualitas pembakaran, ketika kadar metana menurun maka akan digantikan oleh hidrokarbon berat atau gas

*inert*, serta karakteristik pembakaran berubah dan efisiensi cenderung merosot. Selain itu, variasi nilai *Specific Gravity* (SG) dari 0,7455 ke 0,7527 mempengaruhi densitas gas dan akurasi sistem injeksi, sementara kandungan impuritas seperti nitrogen atau karbon dioksida menyerap panas pembakaran tanpa menghasilkan energi, sehingga menurunkan efisiensi termal secara signifikan. Keausan komponen motor generator secara berturut-turut memperburuk hilangnya energi dalam bentuk panas buang, yang menjelaskan mengapa efisiensi operasional di PT.X masih berada di bawah ambang batas karena faktor lingkungan seperti temperatur udara masuk yang tinggi serta kondisi mekanis.

Data hasil analisis Gas *Chromatography* pada Tabel 2 menunjukkan nilai-nilai ini untuk menghitung efisiensi pembakaran dan deviasi selama 3 hari berturut turut, yang disajikan bersama perbandingan kualitas gas dari berbagai wilayah pada Tabel 3.

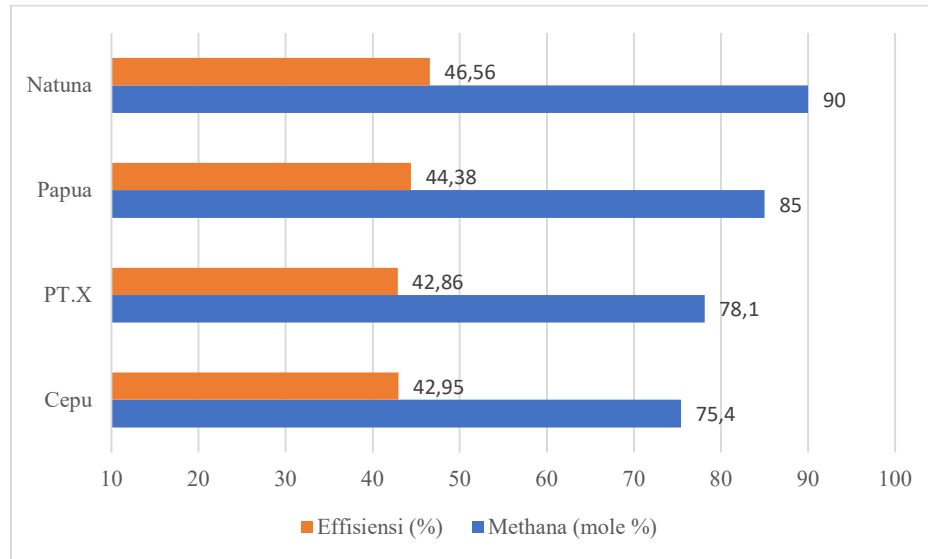
Tabel 3. Nilai Kalor dan Efisiensi dari Berbagai Sumur Gas Alam.

Wilayah	Kadar Metana (% mol)	HHV (Btu/cuft)	LHV (Btu/cuft)	SG	WI (psia)	Z	Eff (%)
Natuna [12]	90	1.010	915	0,61	1.293	0,9980	46,56
Papua [11]	85	1.060	960	0,68	1.285	0,9970	44,38
PT.X	78,18	1.104,5	994,1	0,77	1.278	0,9998	42,86
Cepu [8]	75,40	1.150	992	0,74	1.279	0,9950	42,95

Hasil data pada tabel 3 menunjukkan bahwa wilayah dengan gas alam dengan kadar metana lebih tinggi yaitu wilayah Natuna dan Papua memiliki efisiensi pembakaran yang lebih baik sekitar 46-44% dibandingkan gas alam wilayah Cepu 42,95%, meskipun HHV tidak selalu tertinggi. Gas alam wilayah Cepu menonjol dengan HHV tertinggi dan SG tertinggi untuk PT.X, menunjukkan gas yang lebih kaya akan energi, yang berpotensi meningkatkan *output* GEG namun memerlukan penyesuaian generator untuk menghindari *overheating*. Deviasi berkisar 2,855%-9,560%, dengan Gas alam wilayah Natuna tertinggi, menunjukkan variasi signifikan dari standar 952,5 Btu/scf, yang dapat mempengaruhi konsumsi gas dan biaya operasional. Secara keseluruhan, efisiensi rata-rata 90% menunjukkan kinerja GEG yang stabil, tetapi wilayah seperti gas alam wilayah Cepu mungkin memerlukan pencampuran gas untuk meningkatkan nilai kalor. Pengaruh utama pada efisiensi adalah kadar metana serta kinerja operasional yang sedang *start-up* sehingga kinerja pada PT.X yang dihasilkan belum maksimal.

Kualitas gas berpengaruh signifikan terhadap kinerja operasional Gas *Engine* Generator (GEG). Gas dengan *Higher Heating Value* (HHV) tinggi yang digunakan oleh PT X terbukti mampu menghemat konsumsi bahan bakar hingga 10%-15% per satuan energi yang dihasilkan. Sebaliknya, deviasi komposisi yang tinggi pada gas alam wilayah Natuna, khususnya fluktuasi nilai kalor dan densitas relatif, berpotensi menimbulkan risiko operasional dan konservasi energi apabila tidak dikelola secara optimal. Hubungan parameter yang paling dominan terhadap performa GEG adalah kadar metana, HHV, dan efisiensi, yang menunjukkan korelasi positif kuat. Sementara itu, parameter kunci dalam karakterisasi kualitas gas dan menjadi dasar evaluasi kesesuaian gas terhadap spesifikasi operasional GEG adalah *Specific Gravity* (SG) dan *Wobbe Index*.

Gas alam wilayah Natuna menunjukkan hubungan positif yang lebih kuat antara kadar metana dan HHV terhadap efisiensi GEG, sehingga lebih optimal digunakan sebagai bahan bakar tanpa memerlukan penyesuaian signifikan. Sebaliknya, gas alam wilayah Cepu memiliki nilai korelasi yang lebih rendah, sehingga memerlukan strategi optimasi, seperti penyesuaian sistem pembakaran atau blending gas, untuk mencapai efisiensi operasional yang setara. Gambar 1 menyajikan analisis korelasi antara kadar metana dan *Higher Heating Value* (HHV) terhadap efisiensi Gas *Engine* Generator (GEG) guna mengevaluasi pengaruh kualitas gas alam terhadap kinerja operasional sistem.



Gambar 1. Grafik Hubungan antara Efisiensi dengan Kadar Metana.

Gas alam wilayah Cepu menonjol karena LHV tinggi, meskipun kadar metana paling rendah, yang berarti gasnya lebih berenergi tetapi perlu pengaturan generator agar efisiensi tetap optimal dan menghindari *overheating*. Sesuai dengan rekomendasi dalam Tabel 2 bahwa Gas alam dengan kadar metana pada wilayah Natuna mungkin perlu pencampuran gas untuk meningkatkan kualitas pembakaran. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan hubungan positif antara kualitas gas metana dan efisiensi operasional GEG, sekaligus menekankan pentingnya monitoring deviasi untuk menjaga kestabilan operasional.

Dari grafik tersebut terlihat adanya kecenderungan pola menaik (korelasi positif), yang menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar metana (%mol), maka efisiensi yang dihasilkan belum tentu semakin besar pula karena dipengaruhi oleh faktor senyawa lain yang menjadi inti utama dari didapkannya efisiensi yang tinggi dan juga karena *load power* dan *outlet* gas semakin tinggi maka hasilnya juga semakin tinggi. Gas alam wilayah Cepu berada pada posisi terendah dengan kadar metana sekitar 75,40% dan efisiensi sebesar 42,95%, yang mengindikasikan bahwa kandungan metana yang lebih rendah menghasilkan nilai kalor (HHV dan LHV) yang lebih kecil sehingga proses pembakaran menjadi kurang optimal. Selanjutnya, PT.X dengan kadar metana sekitar 78,18% menunjukkan peningkatan efisiensi menjadi 42,86%, meskipun masih terdapat pengaruh gas *inert* seperti CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> yang menurunkan kualitas energi yang dihasilkan.

Gas alam pada wilayah Papua dengan kadar metana mencapai 85% dengan efisiensi sebesar 44,38%, yang menunjukkan peningkatan kualitas bahan bakar dan energi yang dilepaskan selama pembakaran. Nilai tertinggi ditunjukkan oleh gas alam wilayah Natuna dengan kadar metana 90% dan efisiensi mencapai 46,56%, sehingga berada di posisi paling atas pada grafik. Hal ini menegaskan bahwa metana merupakan komponen utama penentu nilai kalor pada gas alam, sehingga semakin besar fraksi mol metana, semakin tinggi pula energi pembakaran yang dihasilkan dan semakin baik efisiensi sistem GEG secara keseluruhan.

Faktor-faktor yang dapat menurunkan efisiensi atau dapat meningkatkan deviasi yaitu kehadiran komponen *non-combustible* seperti CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>, fluktuasi komposisi gas, kualitas peralatan pengukuran, variasi kualitas gas dari hari ke hari, dan ketidaksesuaian dari pengaturan gas *engine* generator, serta operasional tekanan, temperatur, kelembapan, pemeliharaan mesin yang mempengaruhi pembakaran. Faktor-faktor yang mendukung efisiensi pembakaran yaitu nilai HHV, nilai LHV, kadar metana, WI (*wobbe index*), SG (*specific gravity*), Z (faktor kompresibilitas), dan stabilitas laju alir gas yang dapat mempengaruhi pengaturan *air fuel ratio* pada gas *engine generator*.

Secara keseluruhan, data menunjukkan adanya hubungan antara kualitas gas, terutama pada kadar metana, dengan efisiensi operasional GEG. Gas dengan HHV tinggi, meskipun kadar metana lebih rendah seperti di PT.X, tetap dapat memberikan *output* energi yang optimal jika pengaturan gas *engine generator* disesuaikan. Wilayah dengan kadar metana rendah dan deviasi tinggi, seperti gas alam wilayah Cepu, berpotensi menurunkan efisiensi sehingga memerlukan strategi pencampuran gas atau optimasi proses untuk menjaga kestabilan operasional. Analisis ini memberikan dasar ilmiah bagi PT.X untuk menentukan batas aman komposisi *inlet* gas, menyusun SOP pemantauan kualitas gas, dan melakukan optimasi teknis, termasuk *fuel trimming* dan *blending*, untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas GEG secara berkelanjutan.

## Kesimpulan

Berdasarkan analisis data operasional di PT. X selama periode 11 hingga 13 Agustus 2025, dapat disimpulkan bahwa efisiensi pembakaran *Gas Engine Generator* (GEG) sangat dipengaruhi oleh fluktuasi komposisi kimia gas, terutama kadar metana dan keberadaan gas *inert*. Meskipun nilai *Lower Heating Value* (LHV) sempat mencapai titik tertinggi sebesar 1.011,0 Btu/cuft pada 13 Agustus 2025, efisiensi yang dihasilkan 42,44% dimana lebih rendah dibandingkan tanggal 11 Agustus 2025 yaitu 47,21%, yang menunjukkan adanya ketidakefektifan konversi energi akibat rasio udara bahan bakar yang tidak ideal dan juga karena PT.X masih mengalami proses *start-up*, sehingga kinerja alat belum maksimal. Dimana diperkuat dengan fakta tentang efisiensi rata-rata PT.X masih berada di bawah ambang batas minimum sertifikasi *eco-innovation* menurut *European Commission* 2017 sekitar 73,4% - 74,2%, yang dipicu oleh tingginya kadar komponen *non-combustible* dan kerugian panas pada sistem.

Analisis perbandingan antarwilayah menunjukkan bahwa kemurnian gas merupakan determinan utama performa mesin, di mana gas alam wilayah Natuna dengan kadar metana 90% mencatat efisiensi tertinggi sebesar 46,56%. Sebaliknya, wilayah dengan nilai *Specific Gravity* (SG) yang lebih tinggi cenderung mengalami penurunan stabilitas pembakaran karena kadar metana lebih rendah. Oleh karena itu, penerapan *fuel trimming control* atau *fuel blending* untuk optimasi kinerja GEG di PT. X memerlukan strategi pengendalian kualitas gas yang lebih ketat guna menjaga parameter *Wobbe Index* (WI) dan faktor kompresibilitas (Z) tetap berada dalam batas toleransi operasional mesin demi meningkatkan efisiensi dan stabilitas jangka panjang.

### Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada PT.X yang telah memberikan bimbingan, fasilitas, dan dukungan selama proses penelitian terlebih untuk pembimbing lapangan, manajemen, dan tim operasional lapangan yang telah mengajarkan ilmu-ilmu yang bermanfaat, menjelaskan data operasional, dan dukungan teknis untuk pengambilan data komposisi *fuel gas* dengan *Gas Chromatography* serta kepada dosen pembimbing.

### Daftar Pustaka

- [1] Administrasi Informasi Energi AS. (2023). *Penjelasan Gas Alam*. Departemen Energi AS. <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>
- [2] Bareto, D.T. Da.S., dan Khinanta,P. (2025). Peran Gas Alam Sebagai Bahan Bakar Penghubung Dalam Transisi Energi. *CITIZEN: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 5(4): 959-964. [www.journal.das-institute.com](http://www.journal.das-institute.com)
- [3] Budiman, R.W. & Sipahutar, R. (2023). Gas Quality Impact on Gas Engine Performance: Case of an Indonesia Natural Gas Station. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Science*, 2(7): 2869–2880.
- [4] Darawia, A.I.W. & Persada, A.A. (2025). Analisis Komposisi Dari Sampel Gas Alam Menggunakan Alat Kromatografi Gas. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 11(3).
- [5] European Commission. (2017). Commission Implementing Decision (EU) 2017/785 of 5 May 2017 on the approval of efficient 12 V motor-generators for use in conventional combustion engine powered passenger cars as an innovative technology for reducing CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars pursuant to Regulation (EC) No 443/2009. *Official Journal of the European Union*, L 118 : 20–29.
- [6] ISO 6976: (2016). *Natural gas : Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition*. Geneva: International Organization for Standardization.
- [7] Moiseeva, E.F., & Malyshev,V.L. 2019. Compressibility Factor Of Natural Gas Determination By Means Of Molecular Dynamics Simulations. *AIP Publishing*, 9 (055108) : 1-6.
- [8] Purba, H., & Wijaya, T. (2010). Gas Composition Characteristics in the Cepu Block, East Java, Indonesia. *Journal of Indonesian Petroleum*, 36(2): 45–56.
- [9] Rahman, F., & Nugroho, T. (2024). *Digital Monitoring Systems for Fuel Gas Quality in Modern Power Plants*. *Journal of Industrial Automation*, 9(2): 88–104.
- [10] Souza, S.N.D., Lenz, A.M., Werncke, I., Nogueira, C.E., Antonelli, J. and Souza, J.D. (2016). Gas emission and efficiency of an engine-generator set running on biogas. *Engenharia Agricola*, 36(4) : 613-621.
- [11] Silitonga, F. J.P., dan Maulana A. (2023). Concept Selection and Feasibility Study for Tangguh Carbon Capture, Utilization and Storage/Enhanced Gas Recovery Project. *Indonesian Petroleum Association*, 43-52.
- [12] Tandry, R. H., Abdassah, D., dan Irawan, D. (2019). Utilization of Gas from East Natuna Field for Improving Oil Recovery in Heavy and Light Oil Reservoir. *Institut Teknologi Bandung*, 1-13.