

Analisis Emisi dari Pembakaran Bahan Bakar Gas dengan Pendekatan Perhitungan Stoikiometrik

I Made Indradjaja M. Brunner^{1*}, Hernani Yulinawati²

¹Program Studi Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta

²Teknik Lingkungan, Universitas Trisakti, Jakarta

*Koresponden email: imade.brunner@itpln.ac.id

Diterima: 1 Juli 2024

Disetujui: 10 Juli 2024

Abstract

This article explains the analysis of potential emissions from the combustion of gaseous fuels, namely natural gas, coke oven gas (COG) and blast furnace gas (BFG). Fossil gas fuels are widely used in industrial activities, particularly in the integrated iron and steel industry. Natural gas is generally derived from natural sources and contains mainly methane gas in addition to longer chain hydrocarbon gases and other non-hydrocarbon gas compounds. COG is a by-product of the production of coke from coal and generally contains hydrogen and methane gas. BFG is the flue gas from the process of smelting iron ore in a furnace and consists of a mixture of nitrogen, carbon monoxide, carbon dioxide and hydrogen gas. Theoretical analysis shows that for an energy level equivalent to natural gas, approximately 2.35 times more COG and 11.56 times more BFG are required than natural gas. COG emissions tend to be lower in CO₂ but higher in NO₂ and SO₂ than natural gas emissions. CO₂ and NO₂ gas emissions from COG are lower than those from BFG. However, CO₂ and NO₂ gas emissions from BFG are much higher than those from natural gas.

Keywords: *exhaust emission analysis, natural gas, gas oven coke, blast furnace gas, greenhouse gases*

Abstrak

Artikel ini memuat analisis potensi emisi dari pembakaran bahan bakar gas, yaitu Gas Alam, Coke Oven Gas (COG), dan Blast Furnace Gas (BFG). Bahan bakar gas fosil tersebut banyak digunakan dalam kegiatan industri, terutama di industri terpadu besi dan baja. Gas Alam umumnya berasal dari sumber alamiah dan banyak mengandung gas metana selain gas hidrokarbon berantai lebih panjang dan senyawa gas non-hidrokarbon lainnya. COG merupakan produk samping dari proses pembuatan kokas dari bahan baku batu bara, yang umumnya mengandung gas Hidrogen dan Metana. BFG merupakan gas buang dari proses peleburan bijih besi di dalam tanur, yang terdiri dari campuran gas Nitrogen, Karbon Monoksida, Karbon Dioksida, dan Hidrogen. Analisis secara teoritis menunjukkan bahwa pada tingkat energi yang setara dengan Gas Alam, diperlukan COG sekitar 2,35 kali lebih banyak dan BFG 11,56 kali lebih banyak daripada Gas Alam. Emisi dari COG cenderung memiliki kandungan CO₂ yang lebih rendah tetapi dengan kandungan NO₂ dan SO₂ yang lebih tinggi daripada emisi Gas Alam. Emisi gas CO₂ dan NO₂ dari COG lebih rendah daripada emisi BFG. Sedangkan, emisi gas CO₂ dan NO₂ dari BFG jauh lebih tinggi daripada emisi dari Gas Alam.

Kata Kunci: *analisis emisi gas buang, gas alam, coke oven gas, blast furnace gas, gas rumah kaca*

1. Pendahuluan

Penggunaan gas sebagai bahan bakar yang relatif bersih untuk kegiatan industri dapat dipandang sebagai salah satu upaya dalam menurunkan emisi gas rumah kaca. Analisis terhadap potensi emisi dari pembakaran bahan bakar gas penting untuk mengetahui dampak terhadap lingkungan dan mengidentifikasi peluang untuk perbaikan. Analisis terkait emisi dari bahan bakar gas dapat dilakukan dengan pendekatan perhitungan stoikiometri, dengan memperhatikan komposisi dan jumlah bahan bakar secara teoritis [1]. Penelitian terhadap efisiensi bahan bakar gas banyak difokuskan pada sektor transportasi maupun pembangkit listrik [2] [3]. Namun demikian, kajian terhadap potensi emisi dari bahan bakar gas, khususnya perbandingan antara Gas Alam (NG), *Coke Oven Gas* (COG) dan *Blast Furnace Gas* (BFG) masih jarang ditemukan. Analisis terhadap efisiensi penggunaan energi di industri besi dan baja terpadu yang menggunakan NG, COG dan BFG telah banyak dilakukan [4] [5].

NG merupakan salah satu bahan bakar fosil yang banyak mengandung gas metana selain gas hidrokarbon berantai lebih panjang dan senyawa gas non-hidrokarbon seperti nitrogen, karbon dioksida, dan hidrogen sulfida [6]. Di Indonesia, gas alam umumnya disediakan oleh Perusahaan Gas Negara (PGN) melalui sistem perpipaan dengan standar kualitas prima.

COG merupakan produk samping dari pembakaran senyawa volatil (*volatile matters*) dari batu bara dalam pembuatan kokas [7]. Pembakaran tersebut menyisakan karbon padat yang dikenal dengan sebutan kokas dan banyak digunakan dalam industri baja. Gas yang dihasilkan dari pembakaran senyawa volatil banyak mengandung Hidrogen dan Metana, sebagian Karbon Monoksida serta gas-gas lainnya. Kandungan hidrogen dalam COG dipandang sebagai salah satu sumber energi masa depan yang dikenal dengan sebutan Hidrogen Abu-abu yang mengubah kandungan bahan bakar fosil menjadi hidrogen [8], selain itu COG juga digunakan sebagai sumber pembuatan gas amonia [9]. Proses pembuatan kokas menghendaki perhatian yang serius mengingat emisi dari pembuatan kokas memiliki dampak toksikologi terhadap manusia [10].

Proses reduksi oksida besi di *Blast Furnace* menghasilkan BFG. Pada proses ini terjadi pemanasan dan pencairan campuran bijih besi, kokas, dan batu kapur di dalam tanur tersebut. BFG umumnya terdiri dari campuran gas Nitrogen, Karbon Monoksida, Karbon Dioksida, dan Hidrogen [11][12]. BFG merupakan gas yang khas dihasilkan dari proses peleburan bijih besi dan umum digunakan kembali untuk pembakaran dalam tanur maupun menjadi sumber energi pembangkit listrik di industri besi dan baja.

2. Metodologi

Makalah ini akan membahas perbedaan emisi dari pembakaran beberapa jenis bahan bakar gas yang umum dipakai dalam proses industri. Emisi untuk bahan bakar NG, COG), dan BFG diperhitungkan menggunakan pendekatan teoritis secara stoikiometrik. Bahan bakar gas tersebut memiliki kandungan senyawa yang terdiri dari unsur CHONS (Karbon, Hidrogen, Oksigen, Nitrogen, dan Sulfur) dalam berbagai komposisi, yang apabila direaksikan dengan oksigen dalam proses pembakaran akan menghasilkan gas-gas seperti karbon dioksida, nitrogen oksida, dan sulfur dioksida dengan berbagai variasi. Analisis difokuskan pada gas COG dan BFG yang telah melalui proses pembersihan dan siap untuk digunakan. Analisis juga tidak ditujukan untuk melihat aspek toksikologi dari bahan bakar gas tersebut.

Berdasarkan hasil kajian literatur dan pengamatan di industri, diperoleh komposisi dari NG, COG dan BFG sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1** berikut [8][13][14].

Tabel 1. Komposisi Gas Alam (NG)

No.	Nama Senyawa	Rumus Kimia	Persentase Volume Rata-rata
1.	Nitrogen	N ₂	0,3780
2.	Karbon dioksida	CO ₂	4,9257
3.	Metana	CH ₄	89,0985
4.	Etana	C ₂ H ₆	3,6478
5.	Propana	C ₃ H ₈	0,9886
6.	n-Butana	n-C ₄ H ₁₀	0,2737
7.	i-Butana	i-C ₄ H ₁₀	0,2584
8.	n-Pentana	n-C ₅ H ₁₂	0,0843
9.	i-Pentana	i-C ₅ H ₁₂	0,1344
10.	Heksana	C ₆ H ₁₄	0,1214
11.	Heptana	C ₇ H ₁₆	0,0607
12.	Oktana	C ₈ H ₁₈	0,0202
13.	Nonana	C ₉ H ₂₀	0,0000
14.	Air	H ₂ O	0,0081
15.	Hidrogen sulfida	H ₂ S	0,0001
	Jumlah		100,0000

Sumber: komposisi gas alam PT X

Tabel 2. Komposisi *Coke Oven Gas* (COG)

No.	Nama Senyawa	Rumus Kimia	Persentase Volume Rata-rata
1.	Nitrogen	N ₂	10,5347
2.	Karbon dioksida	CO ₂	2,1386
3.	Metana	CH ₄	23,6139
4.	Etana	C ₂ H ₆	0,5545
5.	Propana	C ₃ H ₈	1,1287
6.	Asetilena	C ₂ H ₂	0,6436
7.	Hidrogen	H ₂	52,7624
8.	Oksigen	O ₂	0,9406
9.	Karbon monoksida	CO	6,7129
10.	Asam sianida	HCN	0,1584
11.	Amoniak	NH ₃	0,4554
12.	Hidrogen sulfida	H ₂ S	0,3564
	Jumlah		100,0000

Sumber: komposisi COG PT Y

Tabel 3. Komposisi *Blast Furnace Gas* (BFG)

No.	Nama Senyawa	Rumus Kimia	Persentase Volume Rata-rata
1.	Nitrogen	N ₂	51,6490
2.	Karbon dioksida	CO ₂	21,4000
3.	Hidrogen	H ₂	3,9130
4.	Oksigen	O ₂	0,5300
5.	Karbon monoksida	CO	22,5100
	JUMLAH		100,0000

Sumber: komposisi BFG PT Y

Kandungan nilai kalori, massa jenis, serta densitas dari NG, COG dan BFG yang digunakan dalam penulisan ini disajikan pada tabel berikut. Massa jenis (*Specific Gravity* = SG) dan densitas dihitung pada kondisi standar yaitu pada suhu 0°C dan tekanan 1 atmosfer.

Tabel 4. Karakteristik NG, COG dan BFG

Deskripsi	Satuan	Gas Alam	Coke Oven Gas	Blast Furnace Gas
Nilai Kalori	kcal/m ³	9169	3908	793
	kcal/kg	11061	9005	595
Massa Jenis (SG)	-	0,6411	0,3357	1,0302
Densitas	kg/m ³	0,829	0,434	1,332

Sumber: Komposisi NG PT X, dan COG BFG PT Y

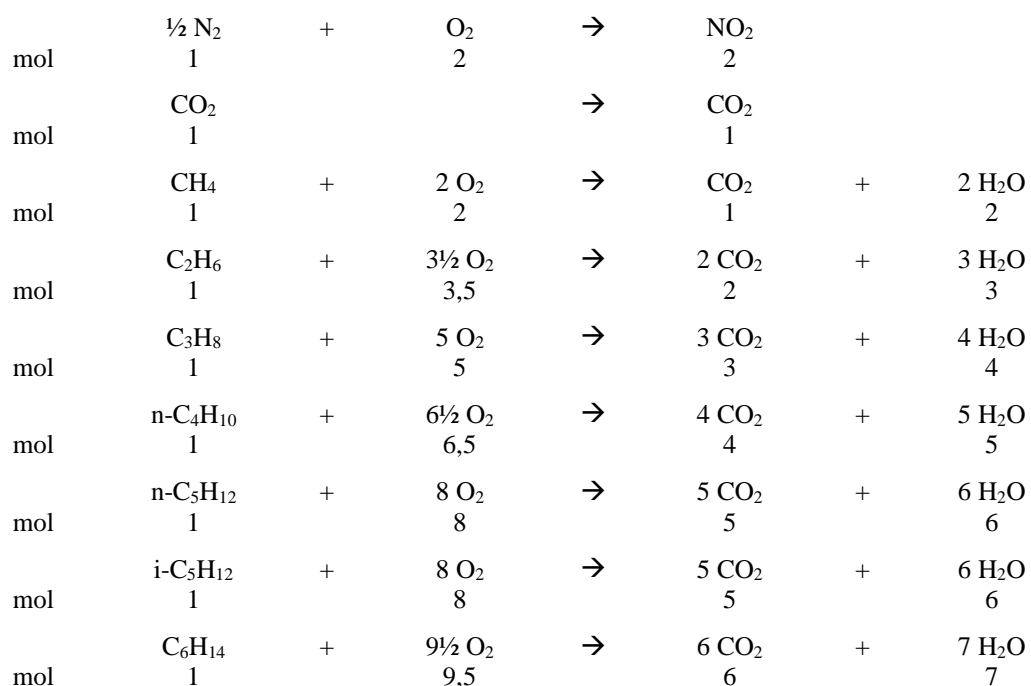
Perhitungan emisi dari pembakaran gas-gas tersebut dihitung dengan persamaan stoikiometrik untuk setiap senyawa yang ada. Asumsi jumlah gas yang dibakar adalah 1 m³/jam, sehingga dapat diketahui jumlah oksigen yang diperlukan, serta emisi yang dihasilkan dalam besaran m³/jam. Perhitungan selanjutnya dilakukan dengan mengonversi nilai volume per satuan waktu menjadi massa per satuan waktu dari masing-masing senyawa, sehingga dapat diketahui besaran emisi dalam satuan gram/jam. Perhitungan juga dilakukan untuk mengetahui jumlah emisi bila pembakaran dilakukan dalam satuan nilai kalori yang sama untuk seluruh gas.

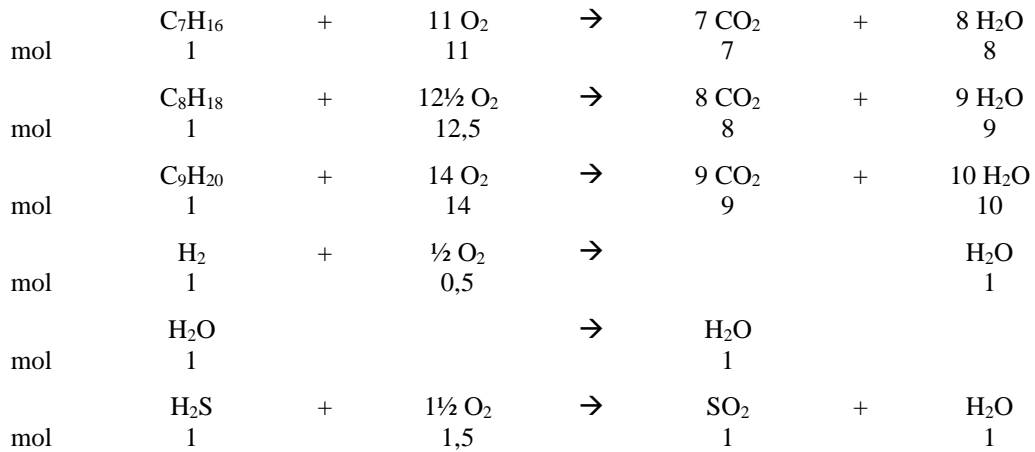
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perhitungan stoikiometri dari pembakaran masing-masing gas diterangkan pada sub-bagian berikut.

3.1. Gas Alam (NG)

Reaksi kimia yang dapat terjadi dari pembakaran NG, adalah sebagai berikut.





Gas Alam sebanyak 1 m³/jam akan memiliki 0,9886% yang setara dengan 0,00989 m³ gas Propana (C₃H₈). Perbandingan nilai mol Oksigen terhadap Propana menunjukkan angka 5 : 1, yang mengartikan pembakaran 1 mol Propana akan memerlukan 5 mol Oksigen. Sementara, pada sisi produk terbentuk 3 mol gas Karbon Dioksida dan 4 mol uap air. Dengan demikian, untuk 0,00989 m³ gas Propana akan memerlukan 0,04943 m³ gas Oksigen, serta menghasilkan 0,02966 m³ gas Karbon Dioksida dan 0,03954 m³ uap air. Apabila seluruh reaksi pembakaran terhadap 1 m³ Gas Alam diselesaikan, maka kebutuhan oksigen teoritis dapat dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 5. Kebutuhan Oksigen Teoritis untuk NG

Nama Senyawa	Kebutuhan Oksigen (m ³ /jam)
Pembakaran Nitrogen menjadi NO ₂	0,0076
Pembakaran CO ₂ menjadi CO ₂	0
Pembakaran Hidrokarbon menjadi CO ₂	2,0319
Pembakaran H ₂ O menjadi H ₂ O	0
Pembakaran H ₂ S menjadi SO ₂	1,38 x 10 ⁻⁶
Total kebutuhan oksigen untuk pembakaran	2,0395
Oksigen dalam Gas Alam	0
Kebutuhan oksigen teoritis	2,0395

Kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran Gas Alam sebanyak 1 m³/jam dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan udara teoritis} &= 100/21 \times \text{Kebutuhan Oksigen teoritis} & (1) \\ &= 100/21 \times 2,0395 \text{ m}^3/\text{jam} = 9,7119 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

Kebutuhan udara aktual untuk pembakaran Gas Alam sebanyak 1 m³/jam dengan eksese udara 21% (pembakaran bukan dalam ruang bakar tertutup) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Kebutuhan udara aktual} &= (100+\text{eksese udara})/100 \times \text{Kebutuhan udara teoritis} & (2) \\ &= 121/100 \times 9,7119 \text{ m}^3/\text{jam} = 11,7514 \text{ m}^3/\text{jam} \end{aligned}$$

Gas Alam sebanyak 1 m³/jam pada kondisi standar akan setara dengan 0,829 kg/jam. Dengan menggunakan pendekatan stokiometrik, maka 0,00989 m³ gas Propana akan setara dengan 19,42 g/jam atau 0,44 mol/jam. Nilai ini diperoleh dengan formula:

$$\text{Massa Gas (g)} = \text{Berat Molekul Gas} / 22,4 \text{ (liter/mol)} \times \text{Volume Gas (m}^3) \times 1000 \text{ L/m}^3 \quad (3)$$

$$\text{Mol Gas} = \text{Massa Gas (g)} / \text{Berat Molekul Gas} \quad (4)$$

Sebagai contoh, Massa gas Propana = $44 / 22,4 \times 0,00989 \times 1000 = 19,42$ gram; Mol gas Propana = $19,42 / 44 = 0,44$ mol.

Bila seluruh reaksi pembakaran diperhitungkan, maka kesetimbangan massa untuk Gas Alam sebanyak 1 m³/jam dapat dirangkum dalam **Tabel 6** berikut.

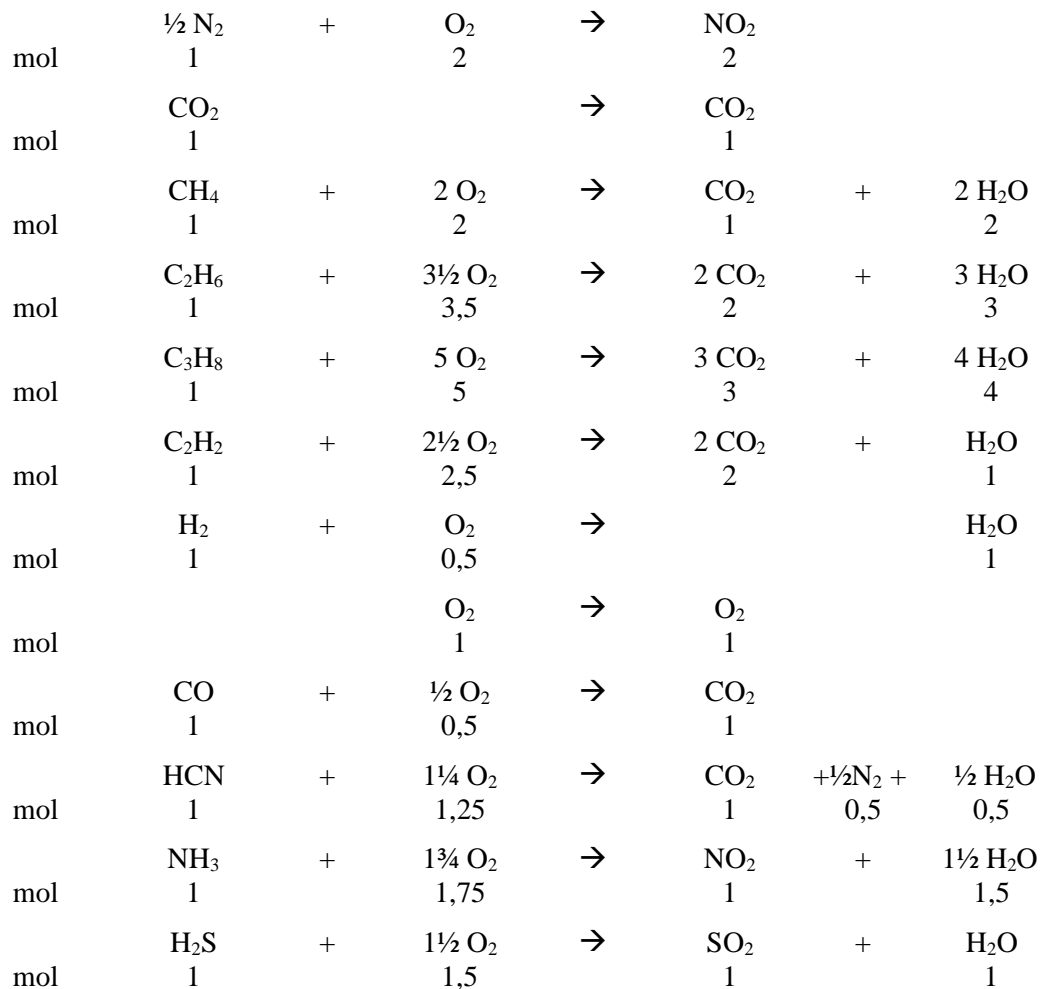
Tabel 6. Perhitungan Kesetimbangan Massa Pembakaran Gas Alam

Komponen	Masukan		Keluaran	
	g/jam	mol/jam	g/jam	mol/jam
Nitrogen	4,73	0,17		
Karbon dioksida	96,75	2,20	2137,60	48,58
Hidrokarbon	733,90	42,27		
Air	0,07	0,0036	1595,84	88,66
Hidrogen sulfida	$1,40 \times 10^{-3}$	$4,11 \times 10^{-5}$		
Oksigen	2913,52	91,05		
Nitrogen dioksida			15,53	0,34
Sulfur dioksida			$2,63 \times 10^{-3}$	$4,11 \times 10^{-5}$
Partikulat	$9,62 \times 10^{-4}$		$9,62 \times 10^{-4}$	
Jumlah Neraca Massa	3748,97	135,69	3748,97	137,58

Catatan: Partikulat dihitung dengan rumusan $11,6 \text{ kg/ton bahan bakar} \times \text{kandungan abu dalam Gas Alam} (0,1\%)$

3.2. Coke Oven Gas (COG)

Reaksi kimia yang dapat terjadi dari pembakaran COG, adalah sebagai berikut.



COG sebanyak 1 m³/jam akan memiliki 0,5545% yang setara dengan 0,00554 m³ gas Etana (C₂H₆). Perbandingan nilai mol Oksigen terhadap Etana menunjukkan angka 3,5 : 1, yang mengartikan pembakaran

1 mol Etana akan memerlukan 3,5 mol Oksigen. Pada sisi produk terbentuk 2 mol gas Karbon Dioksida dan 3 mol uap air. Dengan demikian, 0,00554 m³ gas Etana akan memerlukan 0,0194 m³ gas Oksigen, serta menghasilkan 0,01109 m³ gas Karbon Dioksida dan 0,01663 m³ uap air. Apabila seluruh reaksi pembakaran terhadap 1 m³ COG diselesaikan, maka kebutuhan oksigen teoritis dapat dijelaskan pada **Tabel 7** berikut.

Tabel 7. Kebutuhan Oksigen Teoritis untuk COG

Nama Senyawa	Kebutuhan Oksigen (m ³ /jam)
Pembakaran Nitrogen menjadi NO ₂	0,2107
Pembakaran CO ₂ menjadi CO ₂	0
Pembakaran Hidrokarbon menjadi CO ₂	0,5642
Pembakaran H ₂ menjadi H ₂ O	0,2638
Pembakaran CO menjadi CO ₂	0,0336
Pembakaran HCN menjadi CO ₂ dan N ₂	0,0020
Pembakaran NH ₃ menjadi NO ₂	0,0080
Pembakaran H ₂ S menjadi SO ₂	0,0053
Total kebutuhan oksigen untuk pembakaran	1,0970
Oksigen dalam COG	0,0094
Kebutuhan oksigen teoritis	1,0876

Kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran COG sebanyak 1 m³/jam dapat dihitung dengan persamaan (1) sehingga diperoleh:

$$\text{Kebutuhan udara teoritis} = 100/21 \times 1,0876 \text{ m}^3/\text{jam} = 5,1789 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Kebutuhan udara aktual untuk pembakaran COG sebanyak 1 m³/jam dengan eksese udara 21% (pembakaran bukan dalam ruang bakar tertutup) dapat dihitung dengan persamaan (2) sehingga diperoleh:

$$\text{Kebutuhan udara aktual} = 121/100 \times 5,1789 \text{ m}^3/\text{jam} = 6,2665 \text{ m}^3/\text{jam}$$

COG sebanyak 1 m³/jam pada kondisi standar akan setara dengan 0,434 kg/jam. Dengan menggunakan pendekatan stokiometrik, maka 0,00554 m³ gas Etana akan setara dengan 7,43 g/jam atau 0,2475 mol/jam. Nilai ini diperoleh dengan formula (3) dan (4). Perhitungan yang dilakukan adalah: Massa gas Etana = $30 / 22,4 \times 0,00554 \times 1000 = 7,43$ gram; Mol gas Etana = $7,43 / 30 = 0,2475$ mol.

Bila seluruh reaksi pembakaran diperhitungkan, maka kesetimbangan massa untuk COG sebanyak 1 m³/jam dapat dirangkum dalam **Tabel 8** berikut.

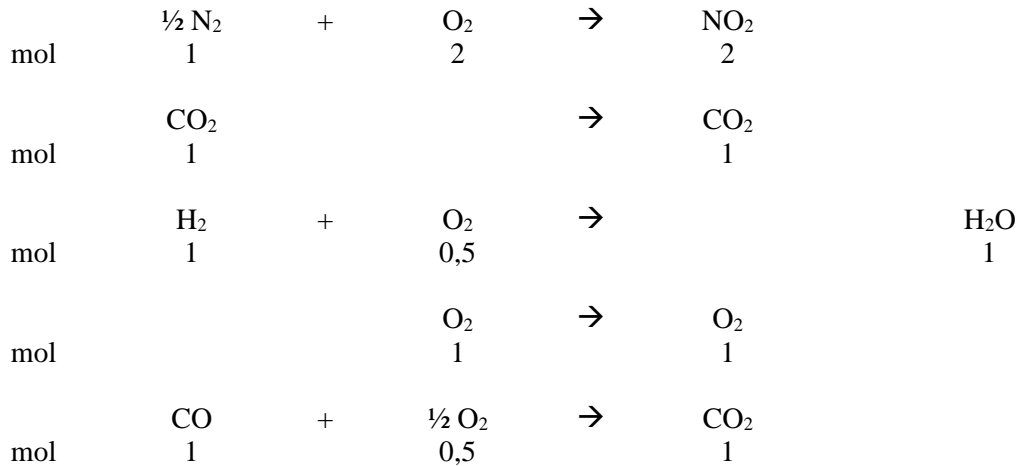
Tabel 8. Perhitungan Kesetimbangan Massa Pembakaran COG

Komponen	Masukan		Keluaran	
	g/jam	mol/jam	g/jam	mol/jam
Nitrogen (N ₂)	131,68	4,70	0,99	0,04
Karbon dioksida (CO ₂)	42,01	0,95	754,40	17,15
Hidrokarbon (HC)	205,74	11,58		
Hidrogen (H ₂)	47,11	23,55		
Karbon monoksida (CO)	83,91	3,00		
Hidrogen sulfida (H ₂ S)	5,41	0,16		
Hidrogen sianida (HCN)	1,91	0,07		
Amonia (NH ₃)	3,46	0,20		
Oksigen (O ₂)	1567,11	48,97	13,44	0,42
Nitrogen oksida (NO ₂)			442,03	9,61
Air (H ₂ O)			867,30	48,18
Sulphur dioksida (SO ₂)			10,18	0,16
Partikulat	0,0005		0,0005	
Jumlah Neraca Massa	2088,34	93,20	2088,34	75,55

Catatan: Partikulat dihitung dengan rumusan 11,6 kg/ton bahan bakar x kandungan abu dalam COG (0,1%)

3.3. Blast Furnace Gas (BFG)

Reaksi kimia yang dapat terjadi dari pembakaran BFG, adalah sebagai berikut.



BFG sebanyak 1 m³/jam akan memiliki 3,9129% yang setara dengan 0,03913 m³ gas Hidrogen (H₂). Perbandingan nilai mol Oksigen terhadap Hidrogen menunjukkan angka 0,5 : 1, yang mengartikan pembakaran 1 mol Hidrogen akan memerlukan 0,5 mol Oksigen. Pada sisi produk terbentuk 1 mol uap air. Dengan demikian, 0,03913 m³ gas Hidrogen akan memerlukan 0,0196 m³ gas Oksigen, serta menghasilkan 0,03913 m³ uap air. Apabila seluruh reaksi pembakaran terhadap 1 m³ BFG diselesaikan, maka kebutuhan oksigen teoritis dapat dijelaskan pada **Tabel 9** berikut.

Tabel 9. Kebutuhan Oksigen Teoritis untuk BFG

Nama Senyawa	Kebutuhan Oksigen (kmol/jam)
Pembakaran Nitrogen menjadi NO ₂	1,0330
Pembakaran CO ₂ menjadi CO ₂	0
Pembakaran H ₂ menjadi H ₂ O	0,0196
Pembakaran CO menjadi CO ₂	0,1125
Total kebutuhan oksigen untuk pembakaran	1,1704
Oksigen dalam BFG	0,0053
Kebutuhan oksigen teoritis	1,1651

Kebutuhan udara teoritis untuk pembakaran BFG sebanyak 1 m³/jam dapat dihitung dengan persamaan (1) sehingga diperoleh:

$$\text{Kebutuhan udara teoritis} = 100/21 \times 1,1651 \text{ m}^3/\text{jam} = 5,5481 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Kebutuhan udara aktual untuk pembakaran BFG sebanyak 1 m³/jam dengan eksese udara 21% (pembakaran bukan dalam ruang bakar tertutup) dapat dihitung dengan persamaan (2) sehingga diperoleh:

$$\text{Kebutuhan udara aktual} = 121/100 \times 5,5481 \text{ m}^3/\text{jam} = 6,7132 \text{ m}^3/\text{jam}$$

BFG sebanyak 1 m³/jam pada kondisi standar akan setara dengan 1,332 kg/jam. Dengan menggunakan pendekatan stokiometrik, maka 0,03913 m³ gas Hidrogen akan setara dengan 3,49 g/jam atau 1,7468 mol/jam. Nilai ini diperoleh dengan formula (3) dan (4). Perhitungan yang dilakukan adalah:

$$\text{Massa gas Hidrogen} = 2 / 22,4 \times 0,03913 \times 1000 = 3,49 \text{ gram}; \text{ Mol gas Hidrogen} = 3,49 / 2 = 1,7468 \text{ mol.}$$

Bila seluruh reaksi pembakaran diperhitungkan, maka kesetimbangan massa untuk BFG sebanyak 1 m³/jam dapat dirangkum dalam **Tabel 10** berikut.

Tabel 10. Perhitungan Kesetimbangan Massa Pembakaran BFG

Komponen	Masukan		Keluaran	
	g/jam	mol/jam	g/jam	mol/jam
Nitrogen (N ₂)	645.60	23.06		
Karbon dioksida (CO ₂)	420.35	9.55	862.50	19.60
Hidrogen (H ₂)	3.49	1.75		
Karbon monoksida (CO)	281.37	10.05		
Oksigen (O ₂)	1671.96	52.25	7.57	0.24
Nitrogen oksida (NO ₂)			2121.26	46.11
Air (H ₂ O)			31.44	1.75
Partikulat	0.015		0.015	
Jumlah Neraca Massa	3022.77	96.65	3022.77	67.70

Catatan: Partikulat dihitung dengan rumusan 11,6 kg/ton bahan bakar x kandungan abu dalam BFG (0,1%)

4. Kesimpulan

Perhitungan secara teoritis terhadap pembakaran NG, COG dan BFG yang masing-masing sebanyak 1 m³/jam, dapat menghasilkan energi dan emisi gas-gas CO₂, NO₂, dan SO₂ sebagaimana berikut:

Tabel 11. Perbandingan Tingkat Energi dan Emisi dari Pembakaran NG, COG dan BFG

Deskripsi	Satuan	Gas Alam	Coke Oven Gas	Blast Furnace Gas
Nilai Kalori	kcal/jam	9169	3908	793
Emisi gas CO ₂	gram/jam	2137,60	754,40	862,50
Emisi gas NO ₂	gram/jam	15,53	442,03	2121,26
Emisi gas SO ₂	gram/jam	2,63 x 10 ⁻³	10,18	-

Nampak bahwa Gas Alam yang terdiri dari banyak kandungan Metana dan sebagian Hidrokarbon memiliki tingkat energi yang paling tinggi dibandingkan dengan COG maupun BFG. Namun demikian, COG yang terdiri dari senyawa yang dapat terbakar seperti Metana, Hidrogen, dan Karbon Monoksida pada tingkat 23,85%, 53,29%, dan 6,78% secara berturut-turut, memiliki nilai kalor sekitar 5 kali lipat dibandingkan BFG yang memiliki senyawa gas yang dapat terbakar terutama Hidrogen (3,913%) dan Karbon Monoksida (22,51%).

Apabila perbandingan ketiga gas fosil tersebut disamakan dalam nilai kalori Gas Alam sebesar 9169 kkal/m³, maka diperlukan 2,346 m³ COG atau 11,562 m³ BFG untuk menghasilkan energi yang setara. Dengan demikian perbandingan tingkat emisi dari masing-masing gas relatif terhadap nilai kalori Gas Alam, adalah sebagai berikut.

Tabel 12. Perbandingan Tingkat Emisi Relatif Terhadap Nilai Kalori Gas Alam

Deskripsi	Satuan	Gas Alam	Coke Oven Gas	Blast Furnace Gas
Nilai Kalori	kcal/jam	9169	9169	9169
Kebutuhan Gas	m ³ /jam	1	2,346	11,562
Emisi gas CO ₂	gram/jam	2137,60	1769,82	9972,23
Emisi gas NO ₂	gram/jam	15,53	1037,00	24526,01
Emisi gas SO ₂	gram/jam	2,63 x 10 ⁻³	23,88	-

Tabel 12 di atas menunjukkan bahwa untuk mencapai tingkat energi yang sama dengan Gas Alam, maka emisi CO₂ sebagai Gas Rumah Kaca dari COG adalah sekitar 82,8% dibandingkan emisi dari Gas Alam. Sedangkan, BFG berpotensi mengemisikan gas CO₂ hingga 4,7 kali lebih tinggi daripada emisi Gas Alam. Potensi emisi gas NO₂ yang terburuk diperoleh dari pembakaran BFG dengan 1580 kali lipat potensi emisi NO₂ Gas Alam, sedangkan COG berpotensi hingga 67 kali lipat lebih tinggi dalam mengemisikan gas NO₂ dibandingkan Gas Alam. Secara umum, potensi gas SO₂ lebih akan ditimbulkan dari pembakaran gas COG akibat kehadiran 0,3564% gas H₂S.

Potensi emisi gas NO₂ dari COG dan BFG yang cenderung tinggi mengharuskan penggunaan alat pengendalian pencemaran udara yang dapat mengubah gas NO₂ menjadi N₂ dan H₂O dengan bantuan katalis dan gas amoniak, atau dikenal dengan metoda *Selective Catalytic Reduction* (SCR) [15]. Sementara, untuk menurunkan emisi gas CO₂ dari penggunaan BFG dapat dilakukan dengan: meresirkulasi BFG ke *blast*

furnace dengan menggunakan metoda *Top Gas Recirculation* (TGR); serta mengaplikasikan metoda *Carbon Capture* semisal dengan penggunaan amina atau kalsium di gas buang [11].

5. Referensi

- [1] A. Ibrahim and S. Bari, "An experimental investigation on the use of EGR in a supercharged natural gas SI engine," *Fuel*, vol. 89, no. 7, pp. 1721–1730, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.07.005.
- [2] I. W. Utama, K. J. Mustika, and I. W. Suriana, "Analisis Konsumsi Bahan Bakar Dan Emisi Karbon Dioksida (CO₂) Pada PLTDG Blok 2 di PT. Indonesia Power UP Bali," *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil dan Teknik Informasi*, vol. 5, no. 2, pp. 112–121, Aug. 2022, doi: 10.38043/telsinas.v5i2.4112.
- [3] T. Udjiyanto and T. Sasono, "Pemanfaatan Gas Buang Blast Furnace Plant Menggunakan Top-Gas Recovery Turbine (TRT) Sebagai Upaya Penghematan Energi," vol. 10, 2020.
- [4] D. J. Mariños Rosado, S. B. Rojas Chávez, J. Amaro Gutierrez, F. H. Mayworm de Araújo, J. A. de Carvalho, and A. Z. Mendiburu, "Energetic analysis of reheating furnaces in the combustion of coke oven gas, Linz-Donawitz gas and blast furnace gas in the steel industry," *Appl Therm Eng*, vol. 169, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.114905.
- [5] Q. Zhang, X. Zhao, H. Lu, T. Ni, and Y. Li, "Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry," *Appl Energy*, vol. 191, pp. 502–520, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.01.072.
- [6] J. Wójcik and P. Synowiec, "Methods for sweetening natural and shale gas." [Online]. Available: <http://www.odolanow.pgnig.pl/odolanow/produkty/ghe>
- [7] R. Razzaq, C. Li, and S. Zhang, "Coke oven gas: Availability, properties, purification, and utilization in China," 2013. doi: 10.1016/j.fuel.2013.05.070.
- [8] G. Moral, R. Ortiz-Imedio, A. Ortiz, D. Gorri, and I. Ortiz, "Hydrogen Recovery from Coke Oven Gas. Comparative Analysis of Technical Alternatives," May 11, 2022, *American Chemical Society*. doi: 10.1021/acs.iecr.1c04668.
- [9] Z. Di, F. Lei, J. Jing, H. Peng, X. Lu, and F. Cheng, "Technical alternatives for coke oven gas utilization in China: A comparative analysis of environment-economic-strategic perspectives," *Environmental Science and Ecotechnology*, vol. 21, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ese.2024.100395.
- [10] F. F. Farris, "Coke Oven Emissions," in *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition*, Elsevier, 2014, pp. 1003–1006. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00290-6.
- [11] J. Perpiñán, M. Bailera, and B. Peña, "Outline of all potential Power to Gas integrations in blast furnace ironmaking: A systematic review," Sep. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2024.114605.
- [12] P. Grammelis, N. Margaritis, and E. Karampinis, "Solid fuel types for energy generation: Coal and fossil carbon-derivative solid fuels," in *Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels*, Elsevier Inc., 2016, pp. 29–58. doi: 10.1016/B978-1-78242-378-2.00002-X.
- [13] P. Grammelis, N. Margaritis, and E. Karampinis, "Solid fuel types for energy generation: Coal and fossil carbon-derivative solid fuels," in *Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels*, Elsevier Inc., 2016, pp. 29–58. doi: 10.1016/B978-1-78242-378-2.00002-X.
- [14] J. Wójcik and P. Synowiec, "Methods for sweetening natural and shale gas." [Online]. Available: <http://www.odolanow.pgnig.pl/odolanow/produkty/ghe>
- [15] Z. Zhang *et al.*, "Development and evaluation of mechanistic model for standard SCR, fast SCR, and NO₂ SCR of NH₃-SCR over Cu-ZSM-5," *Energy*, vol. 306, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132544.