

Bab

3

PEMBAKARAN DAN BAHAN BAKAR

Bab ini membahas proses dan karakter pembakaran bahan bakar hidrokarbon yang digunakan baik pada motor bensin maupun motor diesel, dengan oksidator oksigen yang terdapat di udara atmosfer. Beberapa jenis bahan bakar alternatif serta analisis gas buang sebagai produk pembakaran juga disajikan dalam bab ini.

3.1 PENDAHULUAN

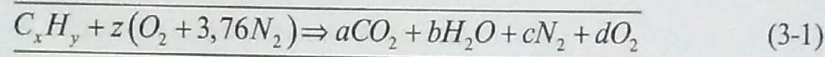
Pembakaran adalah reaksi kimia di mana elemen tertentu dari bahan bakar bergabung dengan oksigen (dari atmosfer) dan melepaskan sejumlah besar energi yang menyebabkan peningkatan suhu gas. Dalam pembakaran, oksigen merupakan komponen reaktif dari udara.

Jumlah maksimum energi kimia yang dilepaskan (berupa kalor) dari bahan bakar terjadi ketika bereaksi (terbakar) dengan sejumlah oksigen dari udara dengan rasio tertentu untuk menghasilkan pembakaran.

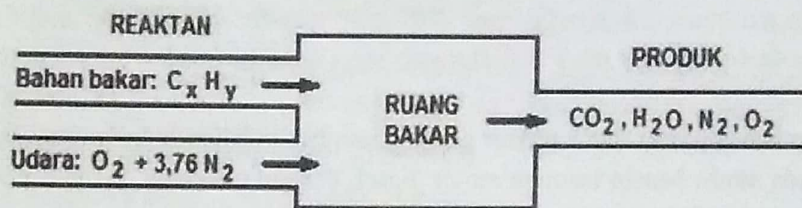
Udara atmosfer berisi sekitar 21% volume oksigen (O_2). Sisanya yang 79% terdiri dari gas-gas lain yang sebagian besar adalah nitrogen (N_2). Jadi kita dapat menganggap udara terdiri dari oksigen 21% dan nitrogen 79% volume, maka untuk setiap mol oksigen di udara terdapat $\frac{1-0,21}{0,21} = 3,76$ mol nitrogen atmosfer. Dengan demikian setiap mol oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi hidrokarbon perlu ditambah dengan $79/21 = 3,76$ mol nitrogen sebagai asumsi. Dalam perhitungan digunakan nilai berat molekul udara = 29.

Kerapatan udara atmosfer sedikit banyak berpengaruh terhadap proses pembakaran karena kerapatan udara dipengaruhi suhu dan ketinggian lokasi suatu tempat di atas permukaan laut. Berarti udara yang masuk ke mesin di lokasi yang berbeda dapat memiliki jumlah oksigen yang sangat berbeda.

Proses pembakaran dasar dapat dijelaskan melalui reaksi kimia bahan bakar (hidrokarbon) dengan pengoksidasinya (udara atau oksigen) yang disebut **reaktan**, yang mengalami proses kimia sambil melepaskan panas untuk membentuk produk pembakaran. Dalam proses pembakaran sempurna, yang dikenal sebagai **pembakaran stoikiometri**, semua karbon dalam bahan bakar membentuk karbondioksida (CO_2) dan semua hidrogen membentuk air (H_2O) di dalam produk (Gambar 3-1). Karena setiap mol oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi hidrokarbon perlu ditambah dengan 3,76 mol nitrogen, maka dapat dituliskan persamaan pembakaran sempurna bahan bakar hidrokarbon umum dari komposisi molekuler rata-rata C_xH_y dengan udara sebagai berikut:



di mana z disebut sebagai **koefisien stoikiometri** untuk oksidator tersebut (udara).



Gambar 3-1 Proses pembakaran sempurna

Persamaan reaksi ini menghasilkan lima variabel yang tidak diketahui, yaitu z , a , b , c , d , sehingga dibutuhkan lima persamaan untuk memecahkannya dengan menyetimbangkan jumlah atom dari setiap elemen dalam reaktan (karbon, hidrogen, oksigen dan nitrogen) dan produk. Dalam pembakaran stoikiometri, diasumsikan tidak ada kelebihan oksigen dalam produk sehingga $d = 0$. Air yang terbentuk dalam produk dapat dalam fase uap atau cair, tergantung suhu dan tekanan dari produk pembakaran.

3.2.1 PEMBAKARAN STOIKIOMETRI

Pada umumnya motor pembakaran dalam mendapat energi dari pembakaran bahan bakar hidrokarbon dengan udara, yang mengubah energi kimia bahan bakar menjadi energi internal gas di dalam motor. Energi kimia maksimum yang dapat dilepaskan (berupa kalor) dari bahan bakar adalah saat bereaksi dengan sejumlah **oksigen stoikiometri**. Oksigen stoikiometri (kadang-kadang juga disebut oksigen teoretis) hanya cukup untuk mengubah semua karbon dalam bahan bakar menjadi CO_2 dan semua hidrogen H_2O , tanpa sisa oksigen. Reaksi pembakaran yang terjadi dengan sejumlah oksigen stoikiometri ini disebut **reaksi stoikiometri**. Komponen di sisi kiri persamaan reaksi kimia yang hadir sebelum reaksi disebut **reaktan**, sedangkan komponen di sisi kanan dari persamaan, yang hadir setelah reaksi disebut **produk** atau **buangan**.

Dalam reaksi kimia, molekul bereaksi dengan molekul sehingga dalam menyeimbangkan persamaan kimia digunakan kuantitas molar dan bukan kuantitas massa. Hal ini untuk mempermudah penyeimbangan persamaan reaksi pembakaran untuk satu k -mol bahan bakar. Energi yang dilepaskan oleh reaksi dengan demikian akan memiliki satuan energi per k -mol

bahan bakar, yang mudah ditransformasi ke energi total jika laju aliran bahan bakar diketahu.

Satu k -mol zat memiliki massa (dalam kilogram) yang sama jumlahnya dengan massa molekular (massa molar) dari zat tersebut. Secara matematik:

$$m = N M \text{ [k-mol] [kg/k-mol]},$$

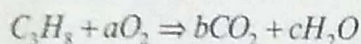
di mana m = massa [kg], N = jumlah mol [k-mol], M = massa molekular [kg/kmole], $1 \text{ k-mol} = 6.02 \times 10^{26}$ molekul.

3.2.2 UDARA TEORETIS DAN RASIO UDARA-BAHAN BAKAR

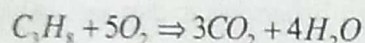
Jumlah minimum udara yang dimungkinkan untuk pembakaran sempurna bahan bakar disebut **udara teoretis** (disebut juga sebagai **udara stoikiometri**). Dalam hal ini tidak terdapat oksigen dalam produk.

Beberapa contoh, persamaan reaksi kimia untuk suatu pembakaran sempurna.

1. Propan C_3H_8 :

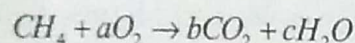


Kesetimbangan karbon antara reaktan dan produk menghasilkan $b = 3$. Kesetimbangan hidrogen memberikan $2c = 8$ atau $c = 4$ dan kesetimbangan oksigen memberikan $2b + c = 2a$ atau $a = 5$ sehingga persamaan menjadi:



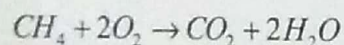
Artinya, satu molekul bahan bakar (C_3H_8) bereaksi dengan lima molekul oksigen menghasilkan tiga molekul karbon dioksida (CO_2) dan empat molekul uap air (H_2O).

2. Metana (gas), CH_4

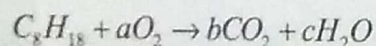


Kesetimbangan karbon $b = 1$

Kesetimbangan hidrogen $4 = 2c$, atau $c = 2$. Kesetimbangan oksigen: $2a = 2b + c$, atau $a = 2$. Persamaan reaksi pembakaran sempurna:

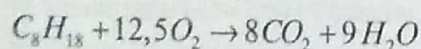


3. Isooktan, C_8H_{18}

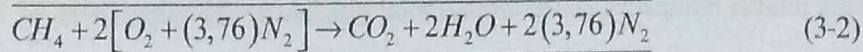


Kesetimbangan karbon $b = 8$

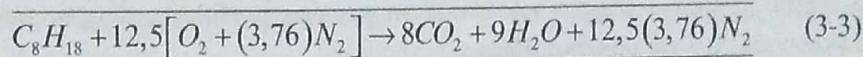
Kesetimbangan hidrogen $2c = 18$, atau $c = 9$ Kesetimbangan oksigen $2a = 2b + c$, atau $a = 12.5$ Persamaan reaksi pembakaran sempurna:



Karena untuk setiap mol oksigen di udara terdapat $\frac{1-0,21}{0,21} = 3,76$ mol nitrogen atmosfer. Dengan demikian setiap mol oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi hidrokarbon perlu ditambah dengan $79/21 = 3,76$ mol nitrogen. Maka pembakaran stoikiometrik metana (gas) dengan udara adalah



dan pembakaran isooktana dengan udara adalah



Secara teoretis, campuran stoikiometri hanya memiliki udara yang cukup untuk membakar secara sempurna bahan bakar yang tersedia. Dalam praktik kondisi ini tidak pernah tercapai, terutama disebabkan oleh sangat singkatnya waktu yang tersedia untuk setiap siklus pembakaran pada motor pembakaran dalam. Sebagian besar proses pembakaran dilengkapi pada sekitar 4 hingga 5 milidetik pada kecepatan mesin 6000 rpm. Ini adalah selang waktu ketika percikan menyala sampai pembakaran campuran udara bahan bakar, di mana pada dasarnya dilengkapi setelah sekitar 80 derajat rotasi poros engkol.

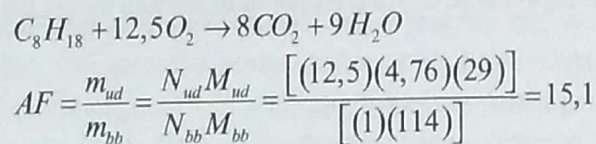
3.2.2.1 RASIO UDARA-BAHAN BAKAR

Ukuran standar jumlah udara yang digunakan dalam proses pembakaran adalah **rasio udara-bahan bakar** (*Air-Fuel Ratio*, AFR), yang didefinisikan sebagai berikut:

$$AF = \frac{m_{ud}}{m_{bb}} = \frac{N_{ud}M_{ud}}{N_{bb}M_{bb}} \quad (3-4)$$

di mana m_{ud} = massa udara; m_{bb} = massa bahan bakar; N_{ud} = jumlah molekul udara; M_{ud} = berat molekul udara.

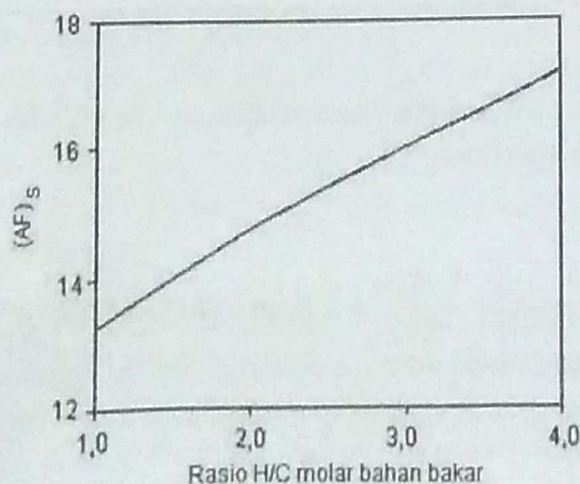
Jadi hanya dengan mempertimbangkan komponen reaktan bahan bakar dari pembakaran dengan udara teoretis yang disajikan di atas, dapat diperoleh nilai AF . Misalnya, dari persamaan reaksi pembakaran sempurna isooktana



Rasio bahan bakar-udara (*Fuel-Air Ratio*, FAR) merupakan kebalikan dari rasio udara-bahan bakar, atau

$$FA = \frac{1}{AF} = \frac{m_{bb}}{m_{ud}} = \frac{N_{bb}M_{bb}}{N_{ud}M_{ud}} \quad (3-5)$$

Nilai AF stoikiometri (AF_s) berubah terhadap variasi **rasio hidrogen terhadap karbon** (Gambar 3-2).



Rasio bahan bakar-udara aktual terhadap rasio stoikiometri (atau kebalikannya) merupakan parameter yang dapat digunakan untuk menjelaskan komposisi campuran.

Gambar 3-2 Perubahan AF stoikiometri terhadap rasio H/C

3.2.2.2 RASIO KESETARAAN BAHAN BAKAR-UDARA

Untuk pembakaran aktual dalam mesin, rasio kesetaraan (*equivalence ratio*) bahan bakar-udara, ϕ adalah ukuran dari campuran bahan bakar udara relatif terhadap kondisi stoikiometri. Hal ini didefinisikan sebagai:

$$\phi = \frac{(FA)_a}{(FA)_s} = \frac{(AF)_s}{(AF)_a} \quad (3-6)$$

3.2.2.3 RASIO UDARA-BAHAN BAKAR RELATIF

Rasio udara-bahan bakar relatif, yang kadang disebut faktor kelebihan udara (*excess air*), λ (lambda), menyatakan perbandingan berapa banyak udara yang harus disediakan (massa aktual udara, dalam kg) terhadap udara yang dibutuhkan secara teoretis. Nilainya merupakan kebalikan dari ϕ .

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{(AF)_a}{(AF)_s} = \frac{(FA)_s}{(FA)_a} \quad (3-7)$$

3.2.3 SIFAT CAMPURAN UDARA-BAHAN BAKAR

Pada **campuran miskin**, di mana $\phi < 1$ atau $\lambda > 1$, oksigen dihasilkan dalam produk pembakaran. Energi maksimum yang dilepaskan dari bahan bakar diperoleh pada campuran stoikiometri, di mana $\phi = 1$ atau $\lambda = 1$. Pada **campuran kaya**, di mana $\phi > 1$ atau $\lambda < 1$, karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon tak terbakar (HC) dihasilkan dalam produk pembakaran. Karbon monoksida dapat dibakar lebih lanjut untuk membentuk CO₂. Gas ini terbentuk pada setiap proses pembakaran ketika kekurangan oksigen. Hal ini dimungkinkan karena sebagian dari bahan bakar tidak terbakar ketika kekurangan oksigen. Bahan bakar yang tidak terbakar ini berakhir sebagai polutan dalam buangan motor.

Motor bensin secara normal beroperasi dengan rasio kesetaraan dalam kisaran antara 0,9 sampai 1,2 bergantung pada tipe operasi.

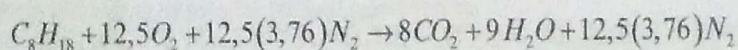
Contoh Soal 3-1

Bahan bakar isooktan (C₈H₁₈) dibakar dengan udara berlebih 20% atau 1,20 kali kebutuhan udara stoikiometri. Tentukan:

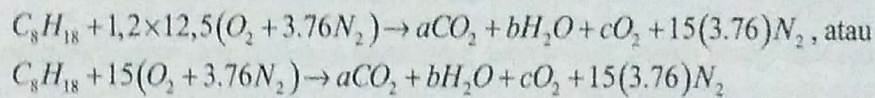
1. Rasio udara-bahan bakar
2. Rasio bahan bakar-udara
3. Rasio kesetaraan
4. Rasio udara-bahan bakar relatif

Penyelesaian:

Reaksi stoikiometrinya adalah



Dengan 20% kelebihan udara (terdapat oksigen pada produk), reaksinya adalah

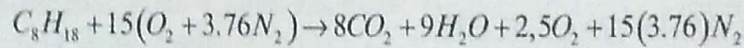


Kesetimbangan karbon: $a = 8$

Kesetimbangan hidrogen: $2b = 18$ atau $b = 9$

Kesetimbangan oksigen: $30 = 2a + b + 2c$ atau $c = 2,5$

Persamaan reaksi menjadi:



terdapat 2,5 molekul oksigen dalam produk.

1. Rasio udara-bahan bakar (aktual):

$$AF = \frac{m_{ud}}{m_{bb}} = \frac{N_{ud}M_{ud}}{N_{bb}M_{bb}} = \frac{[(15)(4,76)(29)]}{[(1)(114)]} = 18,16$$

2. Rasio bahan bakar-udara (aktual):

$$FA = \frac{m_{bb}}{m_{ud}} = \frac{1}{AF} = \frac{1}{18,16} = 0,055$$

Rasio bahan bakar-udara stoikiometri:

$$(FA)_s = \frac{[(1)(114)]}{[(12,5)(4,76)(29)]} = 0,066$$

3. Rasio kesetaraan:

$$\varphi = \frac{(FA)_a}{(FA)_s} = \frac{(0,055)}{(0,066)} = 0,833$$

4. Rasio udara-bahan bakar relatif:

$$\lambda = \varphi^{-1} = \frac{1}{0,833} = 1,2$$

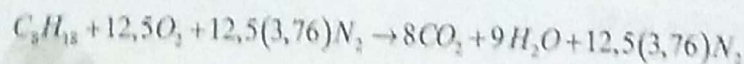
Contoh Soal 3-2

Bahan bakar isooktan (C_8H_{18}) dibakar dengan 80% udara stoikiometri, tentukan:

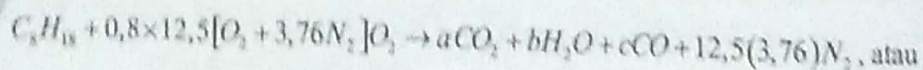
1. Rasio udara-bahan bakar
2. Rasio bahan bakar-udara
3. Rasio kesetaraan
4. Rasio udara-bahan bakar relatif

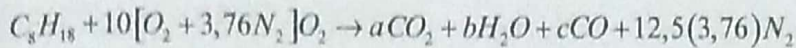
Penyelesaian:

Reaksi stoikiometrinya adalah



Dengan 80% udara stoikiometri (kekurangan udara), karbon monoksida (CO) dihasilkan dalam produk buangan. Persamaan reaksinya:





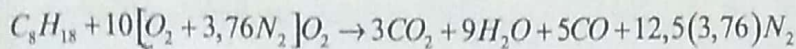
Kesetimbangan karbon: $8 = a + c$

Kesetimbangan hidrogen: $18 = 2b$ atau $b = 9$

Kesetimbangan oksigen: $20 = 2a + b + c$ atau $11 = 2a + c$

Solusi dari ketiga persamaan in diperoleh $a = 3$, $b = 9$ dan $c = 5$

Persamaan reaksi menjadi:



1. Rasio udara-bahan bakar (aktual):

$$AF = \frac{m_{ud}}{m_{bb}} = \frac{N_{ud}M_{ud}}{N_{bb}M_{bb}} = \frac{[(10)(4,76)(29)]}{[(1)(114)]} = 12,11$$

2. Rasio bahan bakar-udara (aktual):

$$FA = \frac{m_{bb}}{m_{ud}} = \frac{1}{AF} = \frac{1}{12,11} = 0,083$$

Rasio bahan bakar-udara stoikiometri:

$$(FA)_s = \frac{[(1)(114)]}{[(12,5)(4,76)(29)]} = 0,066$$

3. Rasio kesetaraan:

$$\varphi = \frac{(FA)_a}{(FA)_s} = \frac{(0,083)}{(0,066)} = 1,26$$

4. Rasio udara-bahan bakar relatif:

$$\lambda = \varphi^{-1} = \frac{1}{1,26} = 0,79$$

Contoh Soal 3-3

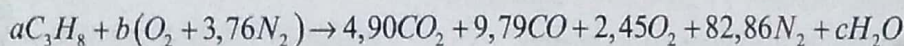
Sebuah mobil empat silinder diubah untuk beroperasi dengan bahan bakar propana. Suatu analisis kering pembuangan motor memberikan persentase volumetris sebagai berikut: $CO_2 = 4,9\%$; $CO = 9,79\%$ dan $O_2 = 2,45\%$. Hitung rasio ekivalen di mana motor sedang beroperasi.

Penyelesaian:

Jumlah ketiga komponen yang diidentifikasi

$$4,90 + 9,79 + 2,45 = 17,14\% \text{ dari jumlah total,}$$

berarti gas yang tinggal (nitrogen) meliputi 82,86% dari total. Persen volume sama dengan persen molar, maka jika sejumlah bahan bakar yang tak dikenal dibakar dengan sejumlah udara yang tak diketahui kuantitasnya, reaksi yang dihasilkan



di mana c = jumlah molekul uap air yang dipindahkan sebelum analisis kering.

Konservasi nitrogen selama reaksi memberikan

$$b(3,76) = 82,86 \text{ atau } b = 22,037$$

Kesetimbangan karbon $3a = 4,9 + 9,79$, atau $a = 4,9$

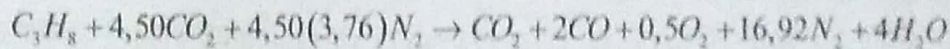
Kesetimbangan hidrogen

$$8a = 2c \text{ atau } c = 19,588$$

Reaksinya adalah



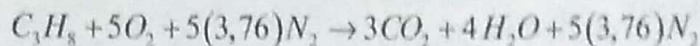
Dibagi dengan 4,90, hasilnya:



Rasio udara-bahan bakar aktual:

$$(AF)_{act} = \frac{m_{ud}}{m_{bb}} = \frac{[(4,50)(4,76)(29)]}{[(1)(44)]} = 14,12$$

Reaksi pembakaran stoikiometri adalah:



Rasio udara-bahan bakar stoikiometri:

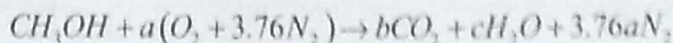
$$(AF)_{stoi} = \frac{m_{ud}}{m_{bb}} = \frac{[(5)(5,76)(29)]}{[(1)(44)]} = 15,69$$

Rasio kesetaraan:

$$\phi = \frac{(AF)_{stoi}}{(AF)_{act}} = \frac{15,69}{14,12} = 1,11$$

Jika bahan bakar mengandung oksigen (misalnya alkohol), prosedur untuk menentukan keseluruhan persamaan pembakaran adalah sama, kecuali oksigen dalam bahan bakar termasuk di dalam keseimbangan oksigen antara komponen reaktan dan produk.

Untuk metil alkohol (metanol), CH_3OH , persamaan pembakaran stoikiometrinya adalah

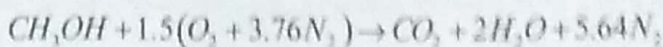


Kesetimbangan karbon $1 = b$ atau $b = 1$

Kesetimbangan hidrogen $4 = 2c$ atau $c = 2$

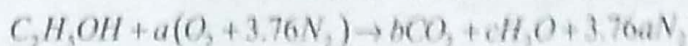
Kesetimbangan oksigen $1 + 2a = 2b + c$ atau $a = 1,5$

Persamaan pembakaran stoikiometrinya:



$$AF = \frac{1,5(4,76)(29)}{1(12 + 3 + 16 + 1)} = 6,47$$

Untuk etil alkohol (ethanol), C_2H_5OH , persamaan pembakaran stoikiometrinya:

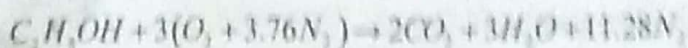


Kesetimbangan karbon $b = 2$

Kesetimbangan hidrogen $6 = 2c$ atau $c = 3$

Kesetimbangan oksigen $1 + 2a = 2b + c$ atau $a = 3$,

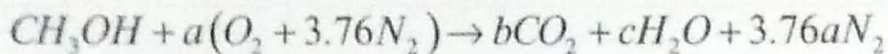
maka persamaan pembakaran sempurnanya:



$$AF = \frac{3(4,76)(29)}{1(24 + 5 + 16 + 1)} = 9,00$$

Jika bahan bakar mengandung oksigen (misalnya alkohol), prosedur untuk menentukan keseluruhan persamaan pembakaran adalah sama, kecuali oksigen dalam bahan bakar termasuk di dalam keseimbangan oksigen antara komponen reaktan dan produk.

Untuk metil alkohol (metanol), CH_3OH , persamaan pembakaran stoikiometrinya adalah

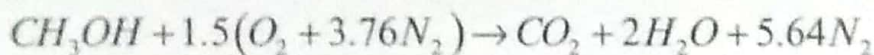


Kesetimbangan karbon $1 = b$ atau $b = 1$

Kesetimbangan hidrogen $4 = 2c$ atau $c = 2$

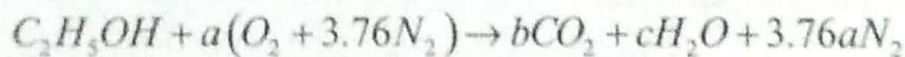
Kesetimbangan oksigen $1 + 2a = 2b + c$ atau $a = 1.5$

Persamaan pembakaran stoikiometrinya:



$$AF = \frac{1.5(4.76)(29)}{1(12 + 3 + 16 + 1)} = 6.47$$

Untuk etil alkohol (ethanol), C_2H_5OH , persamaan pembakaran stoikiometrinya:

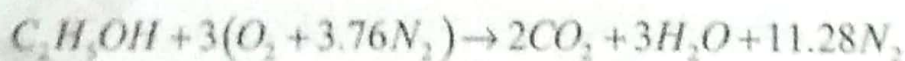


Kesetimbangan karbon $b = 2$

Kesetimbangan hidrogen $6 = 2c$ atau $c = 3$

Kesetimbangan oksigen $1 + 2a = 2b + c$ atau $a = 3$,

maka persamaan pembakaran sempurnanya:



$$AF = \frac{3(4.76)(29)}{1(24 + 5 + 16 + 1)} = 9.00$$