

## الباب التاسع

### كيمياءات الحريق Chemistry of combustion

#### 9 - معادلات الحريق Combustion equation :

الجدول الآتى 1-9 يحتوى على أصغر جزء من المادة ( الذرة ) لعناصر ومركبات يحتوى عليها الوقود السائل ، وكذلك يحتوى على الوزن الذرى وعدد الذرات لكل جزيئى من المادة .

Name	Nature	Atomic symbol	Atomic weight	Molecular symbol	Molecular weight
Carbon	Element	C	12.00	C	12.00
Hydrogen	Element	H	1.008	H <sub>2</sub>	2.016
Oxygen	Element	O	16.00	O <sub>2</sub>	32.00
Nitrogen	Element	N	14.01	N <sub>2</sub>	28.02
Sulphur	Element	S	32.07	S <sub>2</sub>	64.14
Carbon monoxide	Compound	—	—	CO	28
Carbon dioxide	Compound	—	—	CO <sub>2</sub>	44
Sulphur dioxide	Compound	—	—	SO <sub>2</sub>	64.07
Sulphur trioxide	Compound	—	—	SO <sub>3</sub>	80.07
Sulphurous acid	Compound	—	—	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	82.086
Sulphuric acid	Compound	—	—	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.086
Water	Compound	—	—	H <sub>2</sub> O	18.016

Table 9-1 Elements and compounds in liquid fuels and products of combustion

والجداول رقم 2-9، 3-9، 4-9 توضح جميع المتغيرات خلال الحريق ، مع تجاهل مركبات النروجين، وتعتبر كمية الكبريت قليلة الأهمية لعدم تأثيرها فى كمية الحرارة .

وتقدر قيمة الأكسجين لعملية الإحتراق بمعدلات مناسبة لكل عنصر من الوقود السائل وتكون النتيجة المجموع الكلى للأكسجين ، ويفرض أن الهواء الجوى يحتوى على نسبة 23.15% من الأكسجين بالوزن ، و20.96 بالحجم ، وعند الضغط الجوى المطلق 1k من الهواء يحتل حجم 0.83 من المتر المكعب عند درجة حرارة 20 مئوية ، و0.77 متر مكعب عند درجة حرارة الصفر ، وللتحويل من نظام الوحدات الفنية لقيم k cal /kg إلى نظام الوحدات العالمية SI units الآتى .

1 k cal /kg = 4.187 kilo joules /kg

examp<sup>le</sup>: express a fuel caloric value of 10 500 k cal /kg in SI units .

$10\ 500\text{ k cal /kg} = 10\ 500 \times 4.187\text{ kJ /kg} = 44000\text{ kJ /kg} = 44\text{Mj/kg}$ .

### 9.1 - القيمة الحرارية للوقود السائل

لا يمكن حساب القيمة الحرارية الفعلية للوقود السائل بواسطة calorimeter ولكن بالتحاليل المتاحة اللازمة ، ومن ثم يتم حساب القيمة الحرارية النظرية كالآتي .

Table 9-2 combustion equation

Nature of reaction	Equation	Gravimetric meaning
Carbon burned to carbon dioxide	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	12 kg C + 32 kg O = 44 kg CO <sub>2</sub>
Carbon burned to carbon monoxide	$2\text{C} + \text{O}_2 = 2(\text{CO})$	24 kg C + 32 kg O = 56 kg CO
Carbon monoxide burned to carbon dioxide	$2(\text{CO}) + \text{O}_2 = 2(\text{CO}_2)$	56 kg CO + 32 kg O = 88 kg CO <sub>2</sub>
Hydrogen oxidised to steam	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2(\text{H}_2\text{O})$	4 kg H + 32 kg O = 36 kg steam (or water)
Sulphur burned to sulphur dioxide	$\text{S}_2 + 2\text{O}_2 = 2(\text{SO}_2)$	64 kg S + 64 kg O = 128 kg SO <sub>2</sub>
Sulphur dioxide burned to sulphurous acid	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_3$	64 kg SO <sub>2</sub> + 18 kg H <sub>2</sub> O = 82 kg H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>
Sulphur dioxide burned to sulphur trioxide	$\text{O}_2 + 2(\text{SO}_2) = 2(\text{SO}_3)$	32 kg O + 128 kg SO <sub>2</sub> = 160 kg SO <sub>3</sub>
Sulphur trioxide and water to form sulphuric acid	$\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_4$	80 kg SO <sub>3</sub> + 18 kg H <sub>2</sub> O = 98 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Table 9-3 Volumetric Meaning of equation

Nature of reaction	Volumetric result
Carbon burned to carbon dioxide	1 vol C + 1 vol O = 1 vol CO <sub>2</sub>
Carbon burned to carbon monoxide	2 vols C + 1 vol O = 2 vols CO
Carbon monoxide burned to carbon dioxide	2 vols CO + 1 vol O = 2 vols CO <sub>2</sub>
Hydrogen oxidised to steam	2 vols H + 1 vol O = 2 vols H <sub>2</sub> O (steam not water)
Sulphur burned to sulphur dioxide	1 vol S + 2 vols O = 2 vols SO <sub>2</sub>
Sulphur dioxide burned to sulphurous acid	—
Sulphur dioxide burned to sulphur trioxide	—
Sulphur trioxide and water to form sulphuric acid	—

Table 9-4 heat evolved by combustion

Nature of reaction	Thermo-chemical equation	Heat evolved per kg of element burned kcal/kg
Carbon burned to carbon dioxide	$C + O_2 = CO_2 + 96\,900$	8 080
Carbon burned to carbon monoxide	$2C + O_2 = 2(CO) + 58\,900$	2 450
Carbon monoxide burned to carbon dioxide	$2(CO) + O_2 = 2(CO_2) + 315\,000$	5 630 (per kg CO burned)
Hydrogen oxidised to steam	$2H_2 + O_2 = 2(H_2O) + 136\,000$	33 900 (a) 29 000 (b)
Sulphur burned to sulphur dioxide	$S_2 + 2O_2 = 2(SO_2) + 144\,000$	2 260
Sulphur dioxide burned to sulphurous acid	—	—
Sulphur dioxide burned to sulphur trioxide	—	—
Sulphur trioxide and water to form sulphuric acid	—	—

Note. (a) Value if the latent heat of the steam formed is to be included.  
(b) Value if the latent heat of the steam formed is to be excluded.

Table 9-5

Fuel	H:C ratio	Calorific value kJ/kg
Methane	4:1	55 500
Ethane	3:1	51 900
Propane	2.7:1	50 400
Kerosene	1.9:1	48 300
Heavy fuel	1.5:1	42 500
Benzene	1:1	42 300
Coal	0.8:1	33 800

ودائما مع التجربة نحصل على قيم متغيرة حقيقية ، وربما يوجد تناقض بسيط لأسباب مختلفة لا نحتاج تتبع أثرها الآن .

$$\text{Calorific value in k cal /kg of fuel} = \frac{8100 c + 34000 (h - \frac{o}{8})}{100}$$

حيث أن O , H , C نسب لهذه العناصر لكل واحد كيلوجرام من الوقود السائل وينتج الكربون 8080 k cal /kg عند عملية الحريق الكامل ، والهيدروجين 34000 kcal /kg ، ويفرض أن الأكسجين يتحد بنسب مع الهيدروجين بمعنى أن كمية الهيدروجين تساوى واحد من ثمانية بالوزن من الأكسجين ، وبفرض أن مركبات الكبريت لها حريق غير مؤثر على أكسيد النتروجين ، ويوجد فى هذه المعادلة إختلافات عديدة ومنها على سبيل المثال .

$$\text{Calorific value in k cal/kg} = 7500 C + 33800 (H - \frac{o}{8})$$

حيث أن O , H , C تكون جزء من واحد صحيح من الكيلوجرام لكل كيلوجرام من الوقود كما أن القيمة الحرارية التى يتم حسابها بجهاز الكالوريمتر calorimeter تتم بالقيمة الحجمية بمعنى أنها تشمل الحرارة الكامنة لبخار الوقود عند حرق الهيدروجين ، وللحصول على القيمة القياسية تطرح الحرارة الكامنة للبخار من القيمة الحرارية الكلية وذلك للحصول على القيمة الحرارية الصافية وعادة ما يكون فيه إختلاف بين القيمة الحجمية والقيمة الصافية kcal /kg from 600 to 700 وتعتمد القيم الحرارية الحجمية على نسبة الهيدروجين وعادة ماتكون من 10700 kcal /kg إلى 10550 لوقود الديزل على فرض أن القيمة الحرارية هي 10750 .

والقيمة الحرارية لوقود الغاز 10900 kcal/kg gas oil من 10700 from ، ووقود الغلايات 10450 kcal/kg من 10300 from وعندما تتوافر المعلومات العملية فإن الثقل النوعى للوقود يكون عامل مفيد تقريبا للدلالة على القيمة الحرارية . والجدول الآتى يوضح العلاقة بين القيمة الحرارية الحجمية والكثافة النوعية عند 15°C .

$$\text{Specific gravity at } 15^{\circ} C = 0.85 \quad 0.89 \quad 0.91 \quad 0.93$$

$$\text{Gross cal . val . k cal/kg} = 10\ 900 \quad 10\ 800 \quad 10\ 700 \quad 10\ 500$$

وإذا كانت درجة الحرارة الحقيقية للثقل النوعى أزيد من 15°C فإنه للحصول على مكافئ الثقل النوعى عند درجة الحرارة 15°C يضاف 0.00063 لكل درجة حرارة زيادة عن درجة الحرارة 15°C وبالمثل إذا كانت درجة الحرارة الحقيقية أقل من 15°C يطرح 0.00063 من الثقل النوعى لكل درجة حرارة ناقصة ، ويقاس الوقود المحترق بالوزن ، ولكن يخزن الوقود فى تنكات وتقاس بالحجم وتعرف بالسعة التخزينية للتتك ، ووزن الوقود يحدد بواسطة إستخدام

الهيدروميتر للحصول على الثقل النوعي للوقود ، وتوضيح فإن النسب المتوسطة لمركب وقود الديزل يتكون من - 0.86- 87 كربون ، 11.0 – 13.5 هيدروجين ، 0.5 – 2.0 كبريت ، 0.5 – 1.0 لكل من الأكسجين والنروجين ، والطاقة الحرارية الكبيرة من الإحتراق تنتج من إحتراق عنصر الهيدروجين والوقود الذى يملك نسبة هيدروجين أعلى ، وينتج عنه كمية حرارة كبيرة . كما هو موجود فى جدول 5-9 .

## 9.2 - حساب الإيزان الحرارى للمحرك Balance and thermal calculation heat of engine

### 9-2a - الإيزان الحرارى شكل 1 . 9 .

التحليلات الآتية لدوائر المحرك جزء من إنتاج حريق باستخدام الوقود لأداء شغل مؤثر ولتحديد الإستفادة الطبيعية للحرارة وطرق تحسينها ، وأيضًا المعلومات المطلوبة لتصميم دوائر التبريد يجب معرفة كيفية إنتاجها وإستخدامها مع هذه الأهداف المنظورة والخطة الجيدة تكون بإيجاد المكونات الفردية للإيزان الحرارى ومهام القيم المتغيرة المختلفة التى تصف حالات التشغيل ( الحمل ، السرعة ، الحريق ) .

ومعادلة الإيزان الحرارى لكمية الحرارة بالنسبة لوحد الوقت تأخذ الشكل هكذا .

$$Q_{tot} = Q_b + Q_{cool} + Q_{gas} + Q_{ic} + Q_{oil} + Q_{res} \quad 9-1$$

Where  $Q_t$  = total amount of heat introduce into an engine with the fuel at the given duty .

$Q_b$  = heat equivalent to the effective ( brake ) work of the engine .

$Q_{cool}$  = heat rejected to the cooling medium

$Q_{gas}$  = heat carried away from the engine with the exhaust gases .

$Q_{ic}$  = part of the heat lost owing chemically incomplete combustion .

$Q_{oil}$  = heat rejected to the oil .

$Q_{res}$  = term showing the residual losses discharged in the other members of the heat balance equation .

9.2b- كمية الحرارة الكلية المنتجة من الممكن أن تقاس بنسبة في المائة % هكذا كالاتى .

$$q_b = \frac{Q_b}{Q_{tot}} 100 \% ; q_{cool} = \frac{Q_{cool}}{Q_{tot}} 100 \% ; Q_{gas} = \frac{Q_{gas}}{Q_{tot}} 100 \% .$$

$$q_{ic} = \frac{Q_{ic}}{Q_{tot}} 100 \% ; Q_{oil} = \frac{Q_{oil}}{Q_{tot}} 100 \% ; Q_{res} = \frac{Q_{res}}{Q_{tot}} 100 \% \quad 9-2$$

obviously

$$q_b + q_{cool} + q_{gas} + q_{ic} + q_{oil} + q_{res} = 100 \% \quad 9-3$$

9.2c - كمية الحرارة المفقودة في الثانية .

$$Q_{tot} = H_l G_f \text{ j / sec} \quad 9-4$$

حيث أن  $G_f$  تكون بالكيلوجرام / الثانية ،  $H_l$  تكون بالجول / الكيلوجرام .

$$Q_{tot} = H_l G_f \text{ Kcal / hr}$$

hence  $H_l$  is an kcal / hr and  $G_f$  in kg / hr

المكافئ الحرارى للشغل المؤثر في الثانية .

$$Q_b = N_b \text{ watts or j / sec} \quad 9-5$$

$$Q_b = 632 N_b \text{ Kcal / hr}$$

حيث أن  $N_b$  بالحصان .

الحرارة المفقودة في دائرة التبريد خلال جدران الاسطوانة ورأس الاسطوانات ، المكابس والشناير عندما يبرد المحرك بالماء العذب يمكن حسابها من المعادلة الآتية .

$$Q_w = G_w c_w ( t_{out} - t_{in} ) \text{ j / sec} \quad 9-6$$

ومن الممكن أن يكون الناتج في المعادلة السابقة kcal / kg

where  $G_w$  = amount of water passed through the engine . kg / sec .

$c_w$  = specific heat of water , j / kg ;

$$c_w = 4.187 \text{ j / kg ;}$$

$t_{out}$  = temperature of the water flowing out of the engine ,  $C^\circ$  .

$t_{in}$  = temperature of the water flowing into the engine ,  $C^\circ$  .

$$Q_w = G_w c_w ( t_{out} - t_{in} ) \text{ kcal / hr ;}$$

Where  $G_w$  is in kg /hr and  $c_w$  is about 1 kcal /kg

9-2d - كمية الحرارة المفقودة من غاز العادم .

$$Q_{gas} = G_f [ M_2 ( \mu c_p'' ) t_{gas} - M_1 ( \mu c_p ) t_0 ] \text{ j / sec} \quad 9-7$$

Where  $G_f M_2 (\mu c_p'') t_{gas}$  = amount of heat carried away from the cylinder together with the exhaust gases j / sec .

$G_f M_1 (\mu c_p) t_0$  = amount of heat admitted into the engine cylinder together with the fresh charge , j / sec .

$\mu c_p''$  = molar heat capacity of the combustion products at constant pressure j / ( k mole. Deg ) .

$\mu c_p$  = molar heat capacity of the fresh air charging at constant, j / ( k mole. deg ) .

$t_{gas}$  = temperature of the exhaust gas measured after the exhaust pipe,  $C^0$  .

$t_0$  = temperature of the fresh air charging at the cylinder intake ,  $C^0$  .

The formula 9-7 has the same form , but  $G_f$  should be expressed in kg / hr and the specific heat ( heat capacity ) in kcal / ( k mole. deg) here  $Q_{gas}$  is measured in kcal / hr .

شكل 9-1 يبين الرسم التخطيطي للاتزان الحرارى لمحرك الديزل .

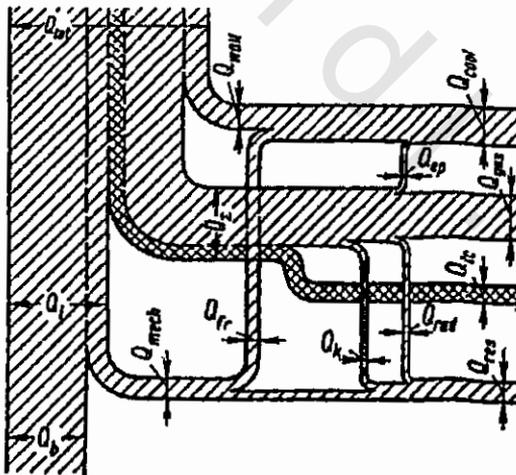


Figure 9-1

$Q_{tot}$  = heat introduce into the engine with the fuel .

$Q_i$  = heat equivalent to the indicator work of the engine.

$Q_b$  = heat equivalent to the effective ( brake ) work of the engine .

$Q_{wall}$  = heat transferred to the internal cylinder walls .

$Q_{cool}$  = heat rejected to the cooling medium .

$Q_{\Sigma}$  = total heat contained in the exhaust gas .

$Q_{mech}$  = heat equivalent to the work spend on friction and driving the auxiliary mechanisms .

$Q_{fr}$  = heat transferred to the cooling medium owing to friction of the piston and its rings .

$Q_{ic}$  = heat of the fuel lost owing to chemically incomplete combustion .

$Q_{res}$  = residual term .

$Q_k$  = heat corresponding to the kinetic energy of the exhaust gases .

$Q_{rad}$  = heat lost as result of radiation .

$Q_{ep}$  = heat rejected by the spend gases to the cooling system in the exhaust pipe .

$Q_{gas}$  = heat carried away from the engine with the exhaust gases.

حيث أن قيمة  $Q_{oil}$  تحدد بحساب كمية الحرارة المنقولة من الزيت إلى المياه في مبرد الزيت .

كما أن  $Q_{ic}$  في القانون لا تحسب منفصلة عندما تكون  $\alpha \geq 1$  ولكن تحسب ضمن الغازات المتبقية  $Q_{res}$  والتي من الممكن أن تتواجد من الاختلاف .

$$Q_{res} = Q_{tot} - ( Q_b + Q_w + Q_{gas} + Q_{oil} ) \quad 9-8$$

وإذا كانت الإختبارات محسوبة على أساس  $\alpha < 1$  فإن الحرارة لا تكون ذات منفعة بسبب التفاعل الكيميائي للحريق الكامل ويحسب من المعادلة الآتية .

$$Q_{ic} = \Delta H_{l,chem} G_f \quad j / sec \quad 9-9$$

حيث أن  $\Delta H_{l,chem}$  تحسب من المعادلة الآتية .

$$\Delta H_{l,chem} = (\Delta H_l)_{co} + (\Delta H_l)_{H_2} .$$

حيث أن  $co$  أول أكسيد الكربون ،  $H_2$  الهيدروجين

ويعبر عن  $\Delta H_{l,chem}$  بالآتى  $kcal / kg$  و  $G_f$  من الممكن أن نعبر عنها  $kcal / hr$  .

ومكونات الإتران الحرارى لمحركات آلات الإحتراق الداخلى موضحة بالجدول 9-6 .

والجدول 6 - 9 يعطى قيم تقريبية لمكونات الإتران الحرارى .

Table 9-6

COMPONENTS OF HEAT BALANCE IN PER CENT

Engine	$q_b = \eta_b$	$q_{cool}$	$q_{gas}$	$q_{ic}$	$q_{res}$
Spark-ignition	21-28	12-27	30-55	0-45	3-10
Diesel	29-42	15-35	25-45	0-5	2-5

9-2e - حساب كمية الهواء المستخدمة فى حرق 1 كيلوجرام ديزل حريقاً كاملاً فى محركات الديزل .

باعتبار أن حدوث العمليات فى المحركات منفصلة فى هذه الحالة يمكن تحديد الحسابات المتوقعة للكميات متغيرة القيمة فى دوائر التشغيل ، قدرة المحرك والأداء وضغط الغازات حيث غرفة الإشتعال أعلى المكبس تعتمد على زاوية شوط عمود المرفق وهذا أيضاً يستخدم فى إيجاد الأبعاد الأساسية للمحرك ( قطر اللابطوانة وشوط المكبس ) ومراجعة حسابات المتانة للمكونات الرئيسية . فى الحساب الحرارى يكون من الضرورى إختيار البيانات الإبتدائية الصحيحة . والحساب يجب أن يكون مأخوذ من السرعة وعوامل أخرى خاصة فى حالة تشغيل المحرك .

مثلاً : الحساب الحرارى لمحرك ديزل مبين أسفل .

مثال : الحساب الحرارى لأداء محرك ديزل ، يستخدم للحصول على البيانات الآتية: وجود الأبعاد الرئيسية والأداء المتوقع للمحرك ، والبيانات الإبتدائية . معدل القدرة عند عدد لفات 450 لفة / دقيقة 4500 hp وعدد الإسطوانات 12 V ونسبة الإنضغاط 10.5 .

The excess air coefficient  $\alpha = 0.9$

وقود الديزل 0.87 CO , 0.13 H

القيمة الحرارية لوقود الديزل 44 MJ / kg , 10750 kcal / kg

كمية الهواء النظرية المطلوبة لحرق واحد كيلوجرام من الوقود .

$$a_{th} = \frac{1}{0.225} \left( \frac{8}{3} C + 8 H - O_f \right) = \frac{1}{0.225} \left( \frac{8}{3} \times 0.87 + 8 \times 0.13 \right)$$

14.93 kg .

Note . when calculating  $a_{th}$  , the content of oxygen in air is taken equal to 0.225 .

9-2f - الكمية الحقيقية العملية للهواء عند حرق 1 كيلوجرام من وقود الديزل عندما تكون  $\alpha = 0.9$  .

$$\alpha a_{th} = 0.9 \times 14.96 = 13.46 \text{ kg}$$

كمية الهواء النقي المخلوط .

$$G_1 = 1 + \alpha a_{th} = 1 + 13.46 = 14.46 \text{ kg} .$$