ديناميكا حرارية (thermodynamics)

الفصل الأول

الإحتراق (Combustion)

Dr. Osama Mohammed Elmardi Suleiman khayal

د. أسامة محمد المرضي سليمان خيَّال

قسم الهندسة الميكانيكية

كلية الهندسة والتقنية

جامعة وادي النيل

عطبرة، السودان

January 2019

الفصل الأول

الإحتراق (Combustion)

1.1 الكيمياء الأساسية: (Basic Chemistry)

من المهم فهم تركيب وإستخدام الصيغ الكيميائية قبل الدخول إلي الإحتراق ويشمل هذا المبادئ الأولية التي قابلناها في الأعوام الماضـــية للدراســـة. لكننا يمكن أن نعطي توضيحاً مختصراً.

الذرات (Atoms): هي الجزء الأصـــغر في تركيب العناصـــر الكيميائية التي تلعب دوراً رئيســـياً في التغير الكيميـائي. إذا إنشـــطرت الـذرة كمـا في التفـاعـل النووي (nuclear reaction) فإنها لا تحافظ على خواصها الكيميائية الأصلية.

1.2 الجزيئات (Molecules):

نادراً ما توجد العناصــر في الطبيعة كذرات مفردة. بعض العناصــر توجد ذراتها كأزواج وكل زوج يشـكل جزيء (e.g. الأكسـجين)، وتكون ذرات كل جزيء متماسـكة مع بعضـها البعض بواسطة رابطة بينية قوية. فعزل جزيء الأكسجين يصبح مرهقاً ولكنه ممكناً.

تتكون جزيئات بعض المواد بتزاوج ذرات لعناصـــر متباينة. وكمثال لذلك، الماء (الذي يكون كيميائياً مشـــابهاً للثلج أو البخار) له جزيء يتكون من ذرتين من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين.

لذرات العناصـــر المختلفة كتل مختلفة وهذه تكون هامة في حالة التحليل الكمي (quantitative analysis). بما أن الكتل الحقيقية للذرات أو الجزيئات تكون متناهية في الدقة (Infinitesimally small) فيتم إستخدام نسب الكتل.

تُعطي هذه النســب بالكتل الذرية النســبية مأخودة على المقياس الذي يعرّف الكتلة الذرية لنظائر الكربون (12) على أنها 12.

1.3 الكتلة الذرية النسبية للمادة (Relative Atomic Mass):

هي كتلة كيان مفرد من المادة منسوباً إلي كيان مفرد من الكربون –12.

يُعطي الجدول (1.1) أدناه الكتل الذرية النسبية لبعض العناصر.

جدول (1.1) الكتل الذرية النسبية لبعض العناصر

العنصر Element	Oxygen	Hydrogen	Carbon	Sulphur	Nitrogen
الرمز الذري	O	H	C	S	N
الكتلة الذرية النسبية	16	1	12	32	14
المجموعة الجزيئية	O_2	H_2	C	S	N_2
الكتلة الجزيئية النسبية (مقرَّبة)	32	2	12	32	28
القيم المضبوطة	31.999	2.016	12	32.030	28.013

تعتمد الكتل الجزيئية النسبية على الكتل النسبية للذرات التي تُشكِّل الجزيء. في الصيغة الكيميائية فإن ذرة واحدة لعنصر يتم تمثيلها برمز العنصر. i.e. ذرة الهيدروجين تكتب H. أما إذا وُجدت المادة كجزيء يحتوي على ذرتين تكتب H_2. وجزيئين للهيدروجين يتم تمثيلها كالأتي $2H_2$، etc. يبين الجدول (1.2) حساب الكتلة الجزيئية النسبية من الكتل الذرية النسبية للعناصر.

جدول (1.2) المركبات وكتلتها الجزيئية النسبية

المركب	الصيغة	الكتلة الجزيئية النسبية
ماء، بخار	H_2O	2×1+1×16=18
أول أكسيد الكربون	CO	1 × 12 +1 ×16 = 28
ثاني أكسيد الكربون	CO_2	1 ×12 + 2 × 16=44
ثاني أكسيد الكبريت	SO_2	1 ×32 + 2 ×16 =64
الميثان	CH_4	1 ×12 + 4× 1=16
الإيثان	C_2H_6	2 ×12 + 6 × 1= 30
البروبان	C_3H_8	3 × 12 + 8 ×1 = 44
البيوتان	C_4H_{10}	4 ×12 +10 ×1 = 58
الإيثلين	C_2H_4	2 × 12+4 ×1 = 28
البروبلين	C_3H_6	3×12+6 ×1 =42
البنتين	C_5H_{12}	5 ×12 +12 ×1 = 72
البنزين	C_6H_6	6×12 + 6×1=78
التولين (toluene)	C_7H_8	7 ×12 + 8×1=92
الاوكتان	C_8H_{18}	8 ×12 + 18×1 =114

1.4 الوقودات: (Fuels)

عناصـــــر الوقود الهامة هي الكربون والهيدروجين، حيث يتكون معظم الوقود من هذه العناصر إضافة إلي كميات صغيرة من الكبريت (sulphur). يمكن أن يحتوي الوقود على بعض الأكسجين وكمية صغيرة من المواد الغير قابلة للاحتراق (Incombustibles) (e.g بخار الماء، النيتروجين أو الرماد).

الفحم هو الوقود الصـــلب الهام ويتم تقســـيم الأنواع المختلفة إلي مجموعات طبقاً لخواصها الكيميائية والفيزيائية.

التحليل الكيميائي الدقيق للكتلة للعناصـر الهامة في الوقود يسـمي بالتحليل النهائي أو الأقصـى (المطلق) (ultimate analysis). والعناصـر التي غالباً ما تدخل في تركيب الوقود هي الكربون، الهيدروجين، النيتروجين والكبريت. يتم توضـيح المجموعات الأسـاسـية في الجدول (1.3) أدناه.

جدول (1.3) تحليل الوقودات الأساسية

المادة الطيَّارة المئوي في وقود جاف %	التحليل الأقصى المئوي بالكتلة في وقود جاف %					محتوي الرطوبة المئوي بالكتلة %	الوقود
	Ash	Nitrogen	Oxygen	Hydrogen	Carbon		

Anthracite Bituminous	1	90.27	3	2.32	1.44	2.97	4
Coal	2	81.93	4.87	5.98	2.32	4.90	25
Lignite	15	56.52	5.72	31.89	1.62	4.25	50
Peat	20	43.70	6.42	44.36	1.52	4.00	65

تكون التحاليل متشـــابهة ولكنها يمكن أن تختلف من عينة لأخرى خلال المجموعة. هنالك تحليل آخر للفحم يسـمي بالتحليل الملازم (Proximate analysis) حيث يعطي النسـب المئوية للرطوبة، المادة الطيَّارة، المادة الصـــلبة القابلة للإحتراق (تســمي بالكربون المثّبت) والرماد.

يوجد الكربون المثبَّت كبقايا لخصـم النسـب المئوية للكميات الأخرى. تشـمل المادة الطيَّارة الماء المشـــتق من التفكيك الكيميائي للفحم (chemical decomposition) والغازات القابلة للاحتراق (.e.g هيدروجين، ميثان، إيثان .etc) والقطران Tar (.i.e خليط مركب من الهيـدروكربونـات وبعض المركبـات العضـــويـة). معظم الوقودات الســـائلـة هي الهيدروكربونات التي توجد في الطور الســـائل عند الأحوال الجوية العادية. زيوت البترول (petrol oils) هي خلائط مركبـة لمئـات من أنواع مختلفـة من الوقود ولكن المعلومـة الضـرورية للمهندس هي التناسـب النسـبي للكربون والهيدروجين وغيره كما معطي بالتحليل الأقصى (المطلق). يُعطي الجدول (1.4) أدناه التحاليل المطلقة لبعض الوقودات السائلة.

الوقود الغازي هو الأبســـط كيميائياً في المجموعات الثلاث. بعض الوقودات الغازية توجد في الطبيعة عند الأحوال الجوية (.e.g الميثان CH_4 هو البرافين (Paraffin)).

يتم تصـــنيع الوقودات الغازية الأخرى بالمعالجات المختلفة للفحم. أول أكســيد الكربون هو وقود غازي هام يتكون من خلائط غازية أخرى وهو أيضـــاً نتاج للاحتراق غير الكامل للكربون.

جدول (1.4) تحليلات الوقودات السائلة

الوقود	الكربون	الهيدروجين	الكبريت	الرماد
100 octane petrol	85.1	14.9	0.01	–
Motor petrol	85.5	14.4	0.1	–
Benzene	91.7	8.0	0.3	–
Kerosene (paraffin)	86.3	13.6	0.1	–
Diesel Oil	86.3	12.8	0.9	–
Light fuel oil	86.2	12.4	1.4	–
Heavy fuel oil	86.1	11.8	2.1	–
Residual fuel oil	88.3	9.5	1.2	1.0

1.5 معادلات الاحتراق: (Combustion Equations)

تدخل الكتل المتناســـبة من الهواء والوقود إلي غرفة الإحتراق حيث يتم التفاعل الكيميائي وتمر نواتج الاحتراق خلال ماسـورة العادم إلي الخارج. حسـب قانون بقاء الكتلة فإن الكتلة تظل ثابتة (i.e. الكتلة الكلية للنواتج تســـاوي الكتلة الكلية للمواد المتفاعلة)، وتختلف المواد المتفاعلة كيميائياً عن النواتج حيث تغادر النواتج عند درجة حرارة عالية.

يظل العدد الكلي للذرات لكل عنصـــر في الاحتراق ثابتاً ولكن يُعاد ترتيب الذرات في مجموعـات تمتلـك خواص كيميـائيـة مختلفـة. يتم التعبير عن هـذه المعلومـة بـالمعـادلـة الكيميائية التي توضِّح:

a/ المواد المتفاعلة والمواد الناتجة من التفاعل.

b/ الكميات النسبية للمواد المتفاعلة والمواد الناتجة.

يجب أن يكون جانبي المعادلة متناســقاً، بحيث أنَّ كل جانب يمتلك نفس الرقم من الذرات لكل عنصر مشترك.

توضَّـح المعادلة عدد الجزيئات لكل مادة متفاعلة وناتجة. يتناسب المول مع عدد الجزيئات وعليه فإنَّ الأرقام الجزيئية النســـبية للمادة المتفاعلة تُعطي التحليل المولي أو الحجمى للمكونات الغازية.

كمـا ذُكر آنفـاً فـإنَّ الأكســـجين الـذي يتم إمـداده للاحتراق يـأتي من الهواء الجوى ومن الضروري أن تُستخدم تحاليل دقيقة ومتناسقة للهواء بالكتلة وبالحجم.

غالباً ما نأخذ مكوِّنات الهواء في حسابات الاحتراق بالكتلة كالآتي:

$$23.3\%\ O_2,\quad 76.7\%\ N_2$$

وبالحجم كالآتي:

$$21\ \%\ O_2,\quad 79\ \%\ N_2$$

يتم تضـمين الآثار الصـغيرة للغازات الأخرى في الهواء الجاف في النيتروجين الذي يُسـمي أحياناً بالنيتروجين الجوي.

إعتبر المعادلة التالية للهيدروجين

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad (1)$$

وهذا يعني أنَّ:

a/ يتفاعل الهيدروجين مع الأكسجين ليُعطي البخار أو الماء.

b/ يتفاعل جزيئين من الهيدروجين مع جزيء من الأكسجين ليُعطي جزيئين من البخار أو الماء.

i.e. 2 حجم من H_2 + 1 حجم من O_2 ← 2 حجم من H_2O .

H_2O يمكن أن يكون سائلاً أو بخاراً إعتماداً على ما إذا تمَّ تبريد الناتج بصورة كافية حتى يتكثف.

ويمكن الحصول على التناسب بالكتلة باستخدام الكتل الذرية النسبية.

$$i.e.\ 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

$$2\times(2\times1)+2\times16 \rightarrow 2(2\times1+16)$$

$$i.e.\ 4kg\,H_2 + 32kg\,O_2 \rightarrow 36kg\,H_2O$$

أو $1kg\,H_2 + 8O_2 \rightarrow 9kg\,H_2O$

نفس التناسب يمكن الحصول عليه بكتابة المعادلة (1) بالصورة التالية:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

يمكن ملاحظة التالي من المعادلة (1)،

الحجم الكلي للمواد المتفاعلة = 2 حجم من H_2 + 1 حجم من O_2 = 3 حجوم

الحجم الكلي للمادة الناتجة = 2 حجم.

عليه يكون هنالك إنكماش حجمي عند الإحتراق.

بما أنَّ الأكسجين يكون مصاحباً بالنيتروجين عند إمداد الهواء للاحتراق، فيجب تضمين النيتروجين في المعادلة.

وبما أنَّ النيتروجين يكون خاملاً خلال التفاعل الكيميائي فسيظهر على جانبي المعادلة.

لكل مول من الأكسجين هنالك 79/21 مول من النيتروجين.

عليه تصبح المعادلة (1) كالآتي:

$$2H_2 + O_2 + \frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2H_2O + \frac{79}{21}N_2$$

يمكن إيجاد معادلات مشابهة لاحتراق الكربون.

a/ الاحتراق الكامل للكربون ليتحول إلي ثاني أكسيد الكربون:

(Complete Combustion of Carbon)

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

وبتضمين النيتروجين ،

$$C + O_2 + \frac{79}{21}N_2 \rightarrow CO_2 + \frac{79}{21}N_2$$

باعتبار حجوم المواد المتفاعلة والمواد الناتجة ،

صفر حجم من C + 1 حجم من O_2 + $\frac{79}{21}$ حجم من N_2 ← 1 حجم من CO_2 + $\frac{79}{21}$ حجم من N_2.

لقد تمَّ اعتبار حجم الكربون يساوي صفراً لأنَّ الحجم الصلب يمكن تجاهله مقارنة بحجم الغاز.

التحليل بالكتلة ،

$$12kgC + (2\times16)kgO_2 + \frac{79}{21}(2\times14)kgN_2 \rightarrow$$

$$(12+2\times16)kgCO_2 + \frac{79}{21}(2\times14)kgN_2$$

$$i.e.\ 12kgC + 32kgO_2 + 105.3kgN_2 \rightarrow 44kgCO_2 + 105.3kgN_2$$

أو $1kgC + \frac{8}{3}kgO_2 + \frac{105.3}{12}kgN_2 \rightarrow \frac{11}{3}kgCO_2 + \frac{105.3}{12}kgN_2$

b/ الاحتراق غير الكامل للكربون: (Incomplete Combustion of Carbon)

هذا يحدث عندما لا يكون هنالك إمداد كافٍ من الأكسجين لإحراق الكربون تماماً. وبتضمين النيتروجين،

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

$$2C + O_2 + \frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2CO + \frac{79}{21}N_2$$

التحليل بالكتلة،

$$(2\times12)kg\,C+(2\times16)kg\,O_2+\frac{79}{21}(2\times14)kgN_2\rightarrow$$

$$2(12+16)kg\,CO+\frac{79}{21}(2\times14)kg\,N_2$$

$$i.e.\ 24kg\,C+32kg\,O_2+105.3kg\,N_2\rightarrow56kg\,CO+105.3kg\,N_2$$

أو $\quad 1kg\ C+\frac{4}{3}kg\ O_2+\frac{105.3}{24}kg\,N_2\rightarrow\frac{7}{3}kg\,CO+\frac{105.3}{24}kg\,N_2$

وإذا تمَّ إمداد كميات إضافية من الأكسجين فإن الاحتراق سيستمر حتى يكتمل تماماً.

$$2CO+O_2+\frac{79}{21}N_2\rightarrow2CO_2+\frac{79}{21}N_2$$

وبالكتلة،

$$56kg\,CO+32\,kg\,O_2+\frac{79}{21}\times28kg\,N_2\rightarrow88kg\,CO_2+\frac{79}{21}\times28kg\,N_2$$

أو $\quad 1kg\ CO+\frac{4}{7}kg\ O_2+\frac{105.3}{56}kg\,N_2\rightarrow\frac{11}{7}kg\,CO_2+\frac{105.3}{56}kg\,N_2$

1.6 نسبة هواء إلي وقود متكافئة أو صحيحة كيميائياً:

(Stoichiometric, or Chemically Correct, Air Fuel Ratio)

الخليط المتكافئ (Stoichiometric Mixture) للهواء والوقود هو الخليط الذي يحتوي على أكسجين كاف فقط للاحتراق الكامل للوقود.

الخليط الذي يحتوي على كميات زائدة من الهواء يُسمي بالخليط الضعيف (weak mixture)، والخليط الذي يحتوي على كميات ناقصة من الهواء يُسمي بالخليط الغني (rich mixture)

النسبة المئوية للهواء الزائد يمكن إعطاؤها بالمعادلة التالية:

النسبة المئوية للهواء الزائد =

(نسبة الـ A/F الفعلية – نسبة الـ A/F المتكافئة)/ (نسبة الـ A/F المتكافئة) (2)

للوقود الغازي فإنَّ النسب يتم التعبير عنها بالحجم وللوقود الصلب والسائل فإنَّ النسب يتم التعبير عنها بالكتلة.

تُعطي المعادلة (2) نتيجة موجبة عندما يكون الخليط ضعيفاً ونتيجة سالبة إذا كان الخليط غنياً. للغلاية (boiler plant) فإنَّ الخليط غالباً ما يكون أكبر من 20% ضعيف وللتوربينات الغازات (Gas turbines) فإنَّ النسبة تكون أكبر من 300% ضعيف. تقابل المحركات البترولية أحوالاً مختلفة من الحمولة والسرعة وتشتغل في مدى واسع من متانة الخلائط.

(متانة) قوة الخليط = (نسبة الـ A/F المتكافئة)/(نسبة الـ A/F الفعلية) (3)

تتراوح القيم التشغيلية في المدى بين 80% (ضعيف) إلي 120% (غني) عندما يحتوي الوقود على بعض الأكسجين (e.g. الكحول الإيثيلي) C_2H_6O فإنَّ الوقود في هذه الحالة يتطلب إمداد قليل من الهواء.

1.7 تحليل غاز العادم: (Exhaust and Flue Gas Analysis)

الغازات هي نواتج الاحتراق الرئيسـية. عندما يتم أخذ عينة من الغاز للتحليل غالباً ما يتم تبريدها إلي درجة حرارة ما دون درجة حرارة التشبع للبخار.

لا يُضـــمَّن المحتوى البخاري في هذه الحالة أي في التحليل الذي يتم تصـــنيفه على أنَّه تحليل للنواتج الجافة. بما أنَّ النواتج هي غازات فإنَّه غالباً ما يتم التحليل بالحجم. أما التحليل الذي يشمل البخار في العادم يُسمي بالتحليل الرطب.

1.8 أمثلة محلولة في الإحتراق: (Solved Examples in Combustion)

1/ أحسب نسبة الـ A/F المتكافئة لاحتراق عينة من الـ Anthracite الجاف الذي يتكون من الآتي بالكتلة:

ash 3%, S 0.5%, N 1%, O 2.5%, H 3%, C 90%

حدد نسبة الـ A/F والتحليل الجاف والرطب لنواتج الاحتراق بالحجم عندما يتم إمداد 20% هواء زائد.

الحل:

الجدول أدناه يوضِّح التحاليل المطلوبة بالكتلة.

التحليل بالكتلة

الكتلة لكل kg فحم	معادلة الاحتراق	الأكسجين المطلوب لكل kg من الفحم	النواتج لكل kg من الفحم
0.9	$C+O_2 \rightarrow CO_2$ $12kg+32kg \rightarrow 44kg$	$0.9\times\frac{32}{12}=2.4kg$	$0.9\times\frac{44}{12}=3.3kg\,CO_2$
0.03	$2H+O_2 \rightarrow 2H_2O$ $1kg+8kg \rightarrow 9kg$	$0.03\times 8=2.24kg$	$0.03\times 9=27kg\,H_2O$
0.025	–	$-0.025kg$	–
0.01	–	–	0.01kg N_2
0.005	$S+O_2 \rightarrow SO_2$ $32kg+32kg \rightarrow 64kg$	$0.005\times\frac{32}{32}=0.005kg$	$0.005\times\frac{64}{32}=0.01kg\,SO_2$
0.03	–	–	–
	–	2.62kg الجملة	

من الجدول أعلاه،

الأكسجين O_2 المطلوب لكل kg من الفحم = 2.62kg

∴ الهواء المطلوب لكل kg من الفحم = $\frac{2.62}{0.233}=11.25kg$

(بما أنَّ الهواء يحتوي على 23.3% أكسجين (O_2) بالكتلة).

النيتروجين N_2 المتحد مع الهواء، $0.767\times11.25=8.63kg$

جملة النيتروجين N_2 في النواتج، $8.63+0.01=8.64\text{kg}$

نسبة الـ A/F المتكافئة = $\frac{11.25}{1}$.

باستخدام المعادلة (2)،

النسبة المئوية للهواء الزائد =

(نسبة الـ A/F الفعلية – نسبة الـ A/F المتكافئة)/ (نسبة الـ A/F المتكافئة)

من المعادلة (2)،

نسبة الـ A/F الفعلية =

نسبة الـ A/F المتكافئة + النسبة المئوية للهواء الزائد × نسبة A/F المتكافئة

$$=11.25+\frac{20}{100}\times11.25=13.5/1$$

عليه فإنَّ إمداد النيتروجين N_2،

$$0.767\times13.5=10.36kg$$

أيضاً إمداد الأكسجين O_2،

$$0.233\times13.5=3.144kg$$

في النواتج،

$$N_2 = 10.36 + 0.01 = 10.374\ kg$$

والأكسجين الزائد O_2،

$$O_2 = 3.144 + 2.62 = 0.524\ kg$$

الجدول أدناه يوضّح التحاليل المطلوبة بالحجم.

التحليل بالحجم

المنتج Product	Mass/kg Coal	%by Mass	M Kg/kmol	Kmol/kg Coal	%by volume wet	% by volume dry
1	2	3	4	5	6	7
CO_2	3.3	22.8	44	0.075	15.77	16.3
H_2O	0.27	1.87	18	1.015	3.16	–
SO_2	0.01	0.07	64	0.0002	0.03	0.03
O_2	0.52	3.6	32	0.0162	3.4	3.51
N_2	10.37	71.65	28	0.37	77.8	80.3
	14.47		Total wet	0.4764	100.16	100.14
			$-H_2O$	0.015		
			Total dry	0.4614		

2/ تحليل إمداد من غاز الفحم كالآتي:

أحسب نسبة H_2 49.4%, CO 18%, CH_4 20%, C_4H_8 2%, O_2 0.4%, N_2 6.2%, CO_2 4% الـــــ A/F المتكافئة. أوجد أيضاً التحليل الرطب والجاف لنواتج الاحتراق إذا كان الخليط الفعلي 20% ضعيف.

الحل:

هذا المثال يتم حله بطريقة الجدولة، يتم توضيح عيِّنة من الحسابات فيما يلي لـ CH_4

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

$$i.e.\ 1kmol\,CH_4 + 2kmol\,O_2 \rightarrow 1kmol\,CO_2 + 2kmol\,H_2O$$

هنالك 0.2 kmol من الميثان CH_4 لكل kmol من غاز الفحم، عليه،

$$0.2\,\text{kmol}\,CH_4 + 0.2\times 2\,\text{kmol}\,O_2 \rightarrow 0.2\,\text{kmol}\,CO_2 + 0.2\times 2\,\text{kmol}\,H_2O$$

عليه فإنَّ الأكسجين المطلوب للميثان CH_4 في غاز الفحم هو 0.4 kmol لكل kmol من غاز الفحم.

يتم تضمين الأكسجين في الوقود (0.004 kmol) في العمود 4 ككمية سالبة

	kmol/kmol Fuel	Combustion Equation	O_2kmol/kmol Fuel	Products	
				CO_2	H_2O
1	2	3	4	5	6
H_2	0.494	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	0.247	–	0.494
CO	0.18	$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$	0.09	0.18	–

CH_4	0.20	$CH_4 + CO_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	0.4	0.20	0.40
C_4H_8	0.02	$CH_4 + 6O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O$	0.12	0.08	0.08
O_2	0.004	–	−0.004	–	–
N_2	0.062	–	–	–	–
CO_2	0.04		–	0.04	–
		Total	0.853	0.5	0.974

الهواء المطلوب $= \frac{0.853}{0.21} = 4.06$ (kmol لكل kmol من الوقود)

(حيث أنَّ الهواء يحتوي على 21% من O_2 بالحجم).

i.e. نسبة الـ A/F المتكافئة = 4.06/1 بالحجم

لخليط 20% ضعيف، وباستخدام المعادلة (2)،

نسبة الـ A/F الفعلية $= 4.06 + 4.06 \times \frac{20}{100} = 4.872/1$

النيتروجين المتحد = 0.79 × 4.872 = 3.85 (kmol لكل kmol من الوقود)

الأكسجين الزائد،

$$= 0.21 \times 4.872 - 0.853 = 0.1706\ kmol/kmol\ fuel$$

الـ kmol الكلي للنيتروجين N_2 في النواتج،

$$3.85 + 0.062 = 3.912\,\text{kmol} / \text{kmol fuel}$$

يتم توضيح التحليل بالحجم للنواتج الرطبة والجافة من الجدول التالي:

Product الناتج	kmol/kmol fuel	% by Vol. (dry)	% by Vol. (wet)
CO_2	0.5	10.90	9
H_2O	0.974	–	17.5
O_2	0.171	3.72	3.08
N_2	3.912	85.4	70.4
	Total wet =5.557	100.02	99.98
	$-H_2O = 0.974$		
	Total dry = 4.583		

في المثالين (1) و(2) يمكن ملاحظة أنَّ حاصل جمع التحاليل لا يكون بالضبط 100%. وعليه فإنَّ الدقة الموضحة كافية ولا يوجد زمن لتضييعه في سبيل الوصول إلي تحاليل مضبوطة.

3/ أوجد نسبة A/F المتكافئة لاحتراق الكحول الايثيلي (C_2H_6O) في محرك بترولي. أحسب نسبة A/F لمتانات الخليط 90% و 120% حسب تعريف المعادلة (3). حدِّد التحاليل الرطبة والجافة بالحجم لغاز العادم لكل متانة مزيج.

الحل:

تكون معادلة الاحتراق للكحول الايثيلي كالآتي:

$$C_2H_6O + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$$

بما أنَّ هنالك ذرتين من الكربون في كل مول من C_2H_6O فسيكون هنالك مولان من CO_2 في النواتج، لتعطي ذرتين من الكربون في كل جانب من المعادلة. بالمثل وبما أنَّ هنالك ستة ذرات من الهيدروجين في كل مول من الكحول الايثيلي فسيكون هنالك ثلاثة مولات من H_2O في النواتج لإعطاء ستة ذرات من الهيدروجين على جانبي المعادلة. وبموازنة ذرات الأكسجين، نجد أنَّ هنالك (2×3+2=7) ذرات من الأكسجين على الجانب الأيمن للمعادلة، عليه يجب أن تظهر 7 ذرات على الجانب الأيسر للمعادلة.

بما أنَّ هنالك ذرة واحدة من الأكسجين في الكحول الايثيلي، يجب إضافة ستة ذرات من الأكسجين (أي ثلاثة مولات).

وبما أنَّ الأكسجين يتم سحبه من الهواء الجوي فسيكون مصاحباً بالنيتروجين كما في المعادلة أدناه:

$$\text{i.e, } C_2H_6O + 3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 3\times\frac{79}{21}N_2$$

1 kmol من الوقود يمتلك كتلة مقدارها (2×6+12×1+1×16)= 46 kg

3 kmol من الأكسجين يمتلك كتلة مقدارها (3×2×16) = 96 kg

عليه،

الأكسجين المطلوب لكل kg من الوقود = $\frac{96}{46} = 2.09\,\text{kg}$

إذن نسبة A/F المتكافئة = $\frac{2.09}{0.233} = 8.96/1$

إعتبر متانة المزيج 90%، من المعادلة (3)،

متانة الخليط = (نسبة الـ A/F المتكافئة) / (نسبة A/F الفعلية)

= (8.96) / (نسبة A/F الفعلية) = 0.9

نسبة الـ A/F الفعلية = $\frac{8.96}{0.9} = 9.95/1$

هذا يعني أنَّ الهواء المسحوب حقيقة يكون 1/0.9 أو $\frac{9.95}{8.96}$ = 1.11 مرة

الهواء الضروري للاحتراق الكامل.

سيحتوي العادم على 0.11 من الأكسجين المتكافئ،

i.e $C_2H_6O + 1.11\left(3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2\right) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 0.11\times 3O_2 + 1.11\times 3\times\frac{79}{21}N_2$

والنواتج هي:

$$2kmol\,CO_2 + 3kmol\,H_2O + 0.33kmol\,O_2 + 12.54kmol\,N_2$$

الكيلومولات الكلية،

2 + 3 + 0.33 + 12.54 = 17.87 kmol

التحليل الرطب،

$$\frac{2}{17.87}\times 100 = 11.20\%\ CO_2;\ \frac{3}{17.87}\times 100 = 16.8\% H_2O$$

$$\frac{0.33}{17.87}\times 100 = 1.85\%\ O_2;\ \frac{12.54}{17.87}\times 100 = 70.2\% N_2$$

الكيلومولات الجافة الكلية،

$$2 + 0.33 + 12.54 = 14.87 \text{ kmol}$$

عليه، التحليل الجاف،

$$\frac{2}{14.87}\times 100 = 13.45\%\ CO_2;\ \frac{0.33}{14.87}\times 100 = 2.22\% O_2$$

$$\frac{12.54}{14.87}\times 100 = 84.4\%\ N_2$$

إعتبر متانة المزيج 120%، من المعادلة (3)،

(نسبة الـ A/F المتكافئة) / (نسبة الـ A/F الفعلية) = 1.2

∴ نسبة الـ A/F الفعلية = $\frac{8.96}{1.2} = 7.47/1$

هذا يعني أنَّ الهواء المســـحوب حقيقة $\frac{7.47}{8.96} = 0.834$ أو 1/1.2 مرة من الهواء اللازم للاحتراق الكامل.

إجعل عدد الكيلومولات لـ CO_2 في النواتج يساوي a،

إجعل عدد الكيلومولات لـ CO في النواتج يساوي b،

عليه فإنَّ معادلة الاحتراق ستكون كالآتي:

$C_2H_6O + 0.834\left(3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2\right) \rightarrow aCO_2 + bCO + 3H_2O + 0.834\times3\times\frac{79}{21}N_2$ لإيجاد قيم

a، b يجب عمل موازنة لذرات الكربون والأكسجين.

i.e. موازنة الكربون: $2 = a + b$

موازنة الأكسجين: $1 + 0.834 \times 3 = 2a + b + 3$

بطرح المعادلتين نتحصَّل على،

$a = 1.0$

و $b = 2 - 1.004 = 0.996$

i.e. النواتج هي:

$$1.004 kmol\, CO_2 + 0.996 kmol\, CO + 3 kmol\, H_2 + 9.41 kmol\, N_2$$

عدد الكيلومولات الكلية الجافة،

$1.004 + 0.996 + 9.41 = 11.41$ kmol

عليه، التحليل الجاف،

$$\frac{1.004}{11.41}\times100 = 8.8\%\ CO_2;\ \frac{0.996}{11.41}\times100 = 8.73\% CO$$

$$\frac{9.41}{11.41}\times100 = 82.5\%$$

4/ أحســـــب للمزيج المتكافئ في المثال (3)، حجم الخليط لكل kg من الوقود عند درجة حرارة 65°C وضـغط 1.013 bar. أحسـب أيضـاً نواتج الاحتراق لكل kg من الوقود بعد التبريد إلي درجة حرارة 120°C عند ضغط 1 bar.

الحل:

$$C_2H_6O + 3O_2 + 3\times\frac{79}{21}N_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 3\times\frac{79}{21}N_2$$

عليه، عدد الكيلومولات الكلية للمواد المتفاعلة،

$$1+3+3\times\frac{79}{21} = 15.3kmol$$

ومن العادلة المميزة للغازات،

$$PV = nR_oT$$

$$V = \frac{nR_oT}{P} = \frac{15.3\times10^3\times8.314\times338}{10^5\times1.013} = 424.4m^3/kmol$$

(ثابت الغاز المولاري) $\mathrm{R_o = 8.314\,kj/kmol\,K}$ (molar gas constant)

(حيث T = 65 + 273 = 338 K)

في كل1 كيلو مول من الوقود يوجد (2 × 12 + 6 + 16 = 46kg)

∴ حجم المواد المتفاعلة لكل kg من الوقود $= \frac{424.4}{46} = 9.226\mathrm{m^3}$

عندما يتم تبريد النواتج إلي 120°C فإن الماء H_2O يوجد كبخار، لأنَّ درجة الحرارة تكون أعلى من درجة حرارة التشبع نتيجة للضغط النسبي للماء H_2O

يكون العدد الكلي لكيلومولات النواتج مساوياً لـ $\left(2+3+3\times\frac{79}{21}\right)=16.3\,kmol$

من المعادلة، $PV = nR_oT$،

$$\therefore V=\frac{16.3\times10^3\times8.314\times393}{10^5\times1}=533.8m^3/kmol\,of\quad fuel$$

(حيث $T = 120 + 273 = 393\ K$).

عليه، حجم النواتج لكل kg من الوقود $= \frac{533.8}{46} = 11.58\text{m}^3$.

5/ إذا تمَّ تبريد النواتج في المثال (4) إلي 15°C عند ضـــغط ثابت، أحســـب كمية الماء الذي سيتكثَّف لكل 1 kg من الوقود.

الحل: عند 15°C، ولأن هنالك بعض التكثيف فإن البخار المتبقي (جاف مشبع) يظل على التصــاق مع الســائل. ضــغط التشــبع عند 15°C هو 0.01704 bar، وهذا هو الضــغط الجزيءي للبخار الجاف المشبع.

من المعادلة،

$$\frac{V_i}{V}=\frac{n_i}{n}=\frac{P_i}{P}$$

وللبخار،

$$\frac{n_s}{n}=\frac{0.01704}{1}=0.01704$$

من المثال (4) عدد الكيلومولات الكلي للنواتج الجافة هو 13.3 kmol، عليه،

$$\frac{n_s}{n_s + 13.3} = 0.01704$$

$$\therefore n_s = \left(\frac{0.01704 \times 13.3}{1 - 0.01704} \right) = 0.2305$$

i.e. عدد الكيلومولات للبخار الجاف المشبع المتبقي عند 15°C = 0.2305

∴عدد كيلومولات الماء المتكثف، 3 – 0.2305 = 2.77

1 kmol من H_2O يحتوي على (2 + 16 = 18kg). عليه فإنَّ كتلة الماء المتكثف هي 18kg × 2.77 لكل kmol من الوقود.

∴كتلة الماء المتكثف لكل kg من الوقود $= \frac{2.77 \times 18}{46} = 1.084kg$

6/ يكون التحليل بالقياس الوزني (Gravimetric Analysis) لعينة من الفحم هو كالآتي:

80% C، 12% H، 8% رماد. أحسب نسبة الـ A/F المتكافئة وتحليل النواتج بالحجم.

الحل:

1 kg من الفحم يحتوي على 0.8 kg C و 0.12 kg H،

∴ 1 kg من الفحم يحتوي على $0.12kmol\,H, \frac{0.8}{12}kmol\,C$

إجعل الأكسجين المطلوب للاحتراق الكامل يكون *x* kmol، يكون النيتروجين المصاحب للأكسجين هو $x \times \frac{79}{21} = 3.76\,xkmol$

لـ 1kg من الفحم تكون معادلة الاحتراق كالآتي،

$$\frac{0.8}{12}C + 0.12H + xO_2 + 3.76xN_2 \rightarrow aCO_2 + bH_2O + 3.76xN_2$$

عليه،

موازنة الكربون: $\therefore a = 0.067kmol, \frac{0.8}{12} = a$

موازنة الهيدروجين: $\therefore b = 0.06kmol, 0.12 = 2b$

موازنة الأكسجين: $\therefore x = 0.097kmol, 2x = 2a + b$

كتلة 1 kmol من الأكســـجين هي 32 kg، عليه فإنَّ كتلة الأكســـجين O_2 لكل kg من الفحم هي: 0.097 × 32

i.e. نسبة الـ A/F المتكافئة $= \frac{32 \times 0.097}{0.233} = 13.3/1$

جملة كيلومولات النواتج،

$$= a + b + 3.7x$$

$$= 0.067 + 0.06 + 3.7 \times 0.097 = 0.492kmol$$

عليه فإنَّ التحليل الرطب،

$$\frac{0.067}{0.492} \times 100 = 13.3\% CO_2; \ \frac{0.06}{0.492} \times 100 = 12.2\% H_2;$$

$$\frac{0.365}{0.492} \times 100 = 74.2\% \ N_2$$

7/ محرك غازي يتم إمداده بغاز الفحم بالمكونات التالية:

$$3\% CO_2, 0.4\% O_2, 3\% C_4H_8, 25\% CH_4, 9\% CO, \ 53.6\% H_2, 6\% N_2$$

إذا كانت نسبة الهواء / الوقود تساوي 6.5/1 بالحجم، أحسب تحليل نواتج الاحتراق.

يمكن افتراض أن نسبة الـ A/F المتكافئة أقل من 6.5/1.

الحل:

بما أنَّ نسبة الـــ A/F الفعلية تكون أكبر من المتكافئة يتبع ذلك أن الهواء الزائد يتم إمداده بالتالي تحتوي النواتج على CO_2, H_2O, O_2, N_2. ويمكن كتابة معادلة الاحتراق كالآتي:

$$0.536H_2 + 0.09CO + 0.25CH_4 + 0.03C_4H_8 + 0.004O_2 + 0.03CO_2 + 0.06N_2$$
$$+ 0.21\times 6.5O_2 + 0.79\times 6.5N_2 \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cO_2 + dN_2$$

عليه،

موازنة الكربون: $0.09 + 0.25 + 0.12 + 0.03 = a$ $\therefore a = \underline{0.49}$

موازنة الهيدروجين: $0.536\times2+0.25\times4+0.03\times8 = b$ $\therefore b = \underline{1.26}$

موازنة الأكسجين: $0.09+0.004\times2+0.03\times2+0.21\times6.5\times2=2a+b+2c$،

$\therefore c = \underline{1.26}$

موازنة النيتروجين: $0.06\times2+0.79\times6.5\times2=2d$ $\therefore d = 5.2$

عليه، جملة الكيلومولات للنواتج الجافة،

$$0.49 + 0.378 + 5.2 = 6.068$$

ويكون التحليل بالحجم كالآتي،

$$\frac{0.49}{6.068}\times100 = 8.08\%CO_2; \frac{0.378}{6.068}\times100 = 6.22\%O_2;$$

$$\frac{5.2}{6.068}\times 100 = 85.7\% N_2$$

1.9 التحليل العملي لنواتج الاحتراق:

(Practical Analysis of Combustion Products)

يتطلب التحقق المختبري لإجراء الاحتراق تحليل نواتج الاحتراق حيث تُؤخذ عينات من النواتج من نقاط كافية في المحطة.

إذا تمَّ التحليل بطريقة كيميائية يتم استخدام محاليل معينة، كل واحدة تمتص إحدى المكونات. وعندما يتم امتصاص جميع المكونات يتم قياس الحجم المتبقي عند نفس الضغط

ودرجة الحرارة للعينة الأولية.

يتم الحصول على حجم المكونات التي تمَّ امتصاصها بأخذ الفرق بين الحجوم قبل وبعد الامتصاص.

1.10 أمثلة محلولة في تحليل نواتج الإحتراق:

(Solved Examples in Combustion Products Analysis)

1/ أوضح تحليلاً للعادم (باستخدام جهاز أورسات) لمحرك يعمل بوقود البنزول (Benzol) أنَّ محتوي CO_2 هو 15%، وليس هنالك CO. إفترض أنَّ باقي العادم يحتوي على أكسجين ونيتروجين فقط، أحسب الـــ A/F للمحرك. يكون التحليل المطلق للبترول هو 90%C و 10%H.

الحل:

1 kg من الوقود يحتوي على 0.9 kg من C و 0.1 kg من H، عليه يمكن كتابته كالآتي:

$\frac{0.9}{12} kmol C$, $0.1 kmol H$. عليه وباعتبار 1kmol من غاز العادم الجاف (D.E.G) يمكن كتابة معادلة الاحتراق كالآتي:

$$x\left(\frac{0.9}{12}C + 0.1H\right) + yO_2 + \frac{79}{21}y\,N_2 \rightarrow 0.15CO_2 + a\,O_2 + (0.85-a)N_2 + b\,H_2O$$

حيث: x = هي كتلة الوقود لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

y = هي عدد كيلومولات الأكسجين لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

a = هي عدد كيلومولات الأكسجين الزائدة لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

b = هي عدد كيلومولات الماء لكل كيلومول من غاز العادم الجاف.

عليه، موازنة الكربون: $\frac{0.9}{12}x = 0.5$ ، $\therefore x = 2.0$

موازنة الهيدروجين: $0.1\,x = 2b$ ، $\therefore b = 0.1$

موازنة الأكسجين: $2y = 2 \times 0.15 + 2a + b$ ، $\therefore y = 0.2 + a$ (1)

موازنة النيتروجين: $3.76 \times 2 \times y = 2 \times (0.85-a)$ ، $\therefore y = 0.226 - 0.266a$ (2)

وبمساواة قيم y في المعادلتين (1) و (2)،

$$0.226 - 0.266a = 0.2 + a$$

$$\therefore a = 0.0206$$

$$\therefore y = 0.2 + 0.0206 = 0.221 kmol$$

∴ الأكسجين الذي يتم إمداده، $0.221 \times 32 kg/kmol D.E.G$

الأكسجين الذي يتم إمداده، $\frac{0.221 \times 32}{0.233} = 30.4 kg/kmol D.E.G$

بما أنَّ $x = 2$، فإنَّ الوقود الذي يتم إمداده لكل كيلومول، D.E.G هو 2 kg.

$$A/F\ ratio = \frac{30.4}{2} = 15.2/1$$

2/ أعطي تحليلاً للعادم الجاف من محرك احتراق داخلي الأتي:

4.5% O_2, 1% H_2, 4% CH_4, 2% CO, 12% CO_2

والمتبقي نيتروجين. أحسب التناسب بالكتلة للكربون إلي الهيدروجين في الوقود، بافتراض أنَّه هيدروجين نقي.

الحل:

اجعل 1 kg من الوقود يحتوي على x kg C و y kg H.

عليه، وباعتبار 1 kmol من D.E.G وبإدخال x، y كما معرَّف في المثال السابق، يمكن كتابة،

$$X\left(\frac{xC}{12} + yH\right) + Y\,O_2 + \frac{97}{21} Y\,N_2 \rightarrow$$
$$0.12CO_2 + 0.02CO + 0.04CH_4 + 0.01H_2 + 0.045O_2 + a\,H_2O + 0.765N_2$$

عليه،

موازنة النيتروجين: $3.76\,Y = 0.765$, $Y = 0.2035$ ∴

موازنة الأكسجين: $0.2035 = 0.12 + \frac{0.02}{2} + 0.045 + \frac{a}{2}$ ، $a = 0.057$ ∴

موازنة الكربون: $\frac{Xx}{12} = 0.12 + 0.02 + 0.04$ ،

$$Xx = 2.16 \quad \therefore \qquad (1)$$

موازنة الهيدروجين: $Xy = 4 \times 0.04 + 2 \times 0.01 + 2 \times 0.057$

$$Xy = 0.294 \quad \therefore \qquad (2)$$

وبقسمة (1) % (2)،

$$\frac{Xx}{Xy} = \frac{2.16}{0.294} = 7.35$$

∴ نسبة الكربون إلي الهيدروجين في الوقود،

$$\frac{x}{y} = 7.35/1$$

الكتب والمراجع

الكتب والمراجع العربية:

1. أســـامة محمد المرضـــي ســـليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة الجزء الأول، الثاني والثالث" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).

2. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الكتلة بالانتشار والحمل الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2005م).

3. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي لنيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).

4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجيد مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنش ، جامعة لموصـــل ، الجمهورية العراقية ،(1988م).

الكتب والمراجع الإنجليزية

1. T. D. Eastop and A. McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineers and Technologists", Longman Singapore Publishers, 1994.
2. Eastop T. D. and Craft D. R., "Energy Efficiency", Longman, 1990.
3. Douglas J. F., Gasiorek J. M. and Swaffield J. A., "Fluid Mechanics",2nd Edition, Longman, 1986.

4. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Engineering Thermodynamics, Work and Heat Transfer", 4th Edition, Longman, 1992.
5. National Engineering Labrotary, "Steam Tables", HMSO, 1964.
6. Haywood R. W., "Analysis of Engineering Cycles", Pergamon, 1991.
7. Walker G., "Stirling Engines", Oxford University Press, 1980.
8. Harker J. H. and Bachurst J. R., "Fuel and Energy", Academic Press, 1981.
9. Hickson D. C. and Taylor F. R., "Enthalpy – Entropy Diagram for Steam", Basil Blackwell, 1980.
10. Eastop T. D. and Watson W. E., "Mechanical Services for Buildings", Longman, 1992.
11. Cohen H., Rogers G. F. C. and Saravanamuttoo H. I. H., "Gas Turbine Thoery", 3rd Edition, Longman, 1987.
12. Shapiro A. H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Flow", Volumes 1 and 2, Kreiger, 1983.
13. Dixon S. L., "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinary", 3rd Edition, Pergamon, 1978.
14. Kearton W. J., "Steam Turbine Theory and Practice", Pitman, 1960.
15. Heywood J. B., "Thermal Combustion Engines Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
16. Taylor C. F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", Volumes 1 and 2, MIT Press, 1977.
17. Watson N. and Janota M. S., "Turbo charging the IC Engines", Macmillan, 1984.

18. Dossat R. J., "Principles of Refrigeration", 2nd Edition, Wiley, 1990.

19. Reay D. A. and Macmichael D. B. A., "Heat Pumps", 2nd Edition, Pergamon, 1987.

20. Rogers G. F. C. and Mayhew Y. R., "Thermodynamics and Transport Properties of Fluids", 4th Edition, Basil Blackwell, 1987.

21. Kemp D. D., "Global Environmental Issues", Routledge, 1990.

22. Threlkeld J. L., "Thermal Environmental Engineering", 2nd Edition, Prentice, 1970.

23. Jones W. P., "Air Conditioning Engineering", 3rd Edition, Edward Arnold, 1985.

24. Welty J. R., "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", 3rd Edition, John Wiley, 1984.

25. Craft D. R. and Lilley D. G., "Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations", Pavic Publications, 1986.

26. Incropera F. P. and De Witt D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3rd Edition, John Wiley, 1990.

27. Eckert E. R. and Drake R. M., "Analysis of Heat and Mass Transfer", Taylor and Francis, 1971.

28. Kern D. Q., "Process Heat Transfer", McGraw – Hill, 1950.

29. Walker G., "Industrial Heat Exchangers", 2nd Edition, McGraw – Hill, 1990.

30. Kays W. M. and London A. L., "Compact Heat Exchangers", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1984.

31. McAdams W. H., "Heat Transmission", 3rd Edition, McGraw – Hill, 1954.
32. Dunn P. D., "Renewable Energies: Sources, Conversion, and Applications", Peter Peregrines, 1986.
33. Culp(jr) A. R., "Principles of Energy Conversion", McGraw – Hill, 1980.
34. Mohammed Elmardi Osama, "Solution of Problems in Heat Transfer, Transient Conduction or Unsteady Conduction", Lambert Academic Publishing, 2017.
35. Mohammed Elmardi Osama, "Further Experimental research work on water Current Turbines, Case Study on Atbara Water Turbine", Lambert Academic Publishers, 2015.