

دراسة بعض خصائص بلازما نواتج الاحتراق

الدكتور علي محمد سعد*

(قبل للنشر في 2005/12/5)

□ الملخص □

نتيجة لأهمية بلازما نواتج الاحتراق ودخولها في الصناعة بمساعدة المولدات الهيدروديناميكية المغناطيسية (MHD)، درست في النصف الثاني من القرن العشرين خواص ومكونات البلازما بشكل ملحوظ ولكن نتيجة لحدثة دراسة بلازما نواتج الاحتراق ما زالت هناك جوانب تحتاج إلى إلقاء الضوء عليها وخاصة الجوانب المتعلقة بما يجري من عمليات وتفاعلات داخلها، من هنا شملت دراستنا التالي:

- 1- تحديد شروط التوازن الكيميائي من خلال معالجة قانون الكتلة الفعالة.
- 2- دراسة طاقة الحالة الأساسية وطاقة التفكك إحصائياً لبلازما نواتج الاحتراق والحسابات الترموديناميكية لبلازما نواتج الاحتراق.

بتحديد شروط التوازن الكيميائي تم التوصل إلى قانون الكتلة الفعالة والذي يوضح العلاقة بين تركيز الكتلة والمجموع الإحصائي، ومنه عين ثابت توازن التفاعل الكيميائي، وبناءً عليه عين المجموع الإحصائي الانسحابي، والوزن الإحصائي للسوية وحددت مساهمة الحركة الاهتزازية في المجموع الإحصائي وتم حساب طاقة الحالة الأساسية وطاقة التفكك.

* مدرس في قسم الفيزياء كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

A Study of Some Properties of Plasma Combustion Products

Dr. Ali Muhamed Saad*

(Accepted 5/12/2005)

□ ABSTRACT □

Due to the importance of the plasma of combustion products and its application in industry with the aid of the magnetic hydrodynamic generators (MHD). Its properties and its constituents were studied noticeably in the late 20th century, but since these studies were new, they did not include all the points related to the processes and interactions which take place within it. Therefore, our study was focussed on two directions:

1. Determination of chemical balance conditions by reforming the active masses law.
2. Studying the energy of the main state and decomposition energy statistically.

By determining the conditions of chemical balance, the law of active masses was found. This law explains the relation between the mass concentration and statistical sum, and from it the balance constant of chemical interaction was determined, moreover, based on it, the transformed statistical sum and the statistical weight level were also determined.

The participation of the vibration movement in the statistical sum was determined. Calculation of the energy of the main state and decomposition energy was also performed.

*Assistant Prof, Department Of Physic, Faculty Of Science, Tishreen University, Lattakia, Suria

مقدمة:

منذ أكثر من خمسة عقود تجري محاولات حثيثة لتحسين عمليات الاحتراق وزيادة مردودها لتوفير الوقود بكافة أشكاله والتقليل من التلوث البيئي الذي بدأ يهدد كوكبنا وذلك باستخدام الحقل الكهربائي الذي يمكن أن يؤثر على استقرار اللهب وسرعة انتشاره ونواتجه الكيميائية إلا أن شدة الحقل الكهربائي كانت غير كافية لتوليد البلازما [1,2]. وبالرغم من ذلك تم تحقيق بعض النجاح خلال العقود الثلاثة الماضية وخصوصاً في تحويل مزيج بلازما نواتج الاحتراق والمتمثلة بتحويل مزيج (الهواء-وقود) إلى H_2 و CO [3] ، لزيادة فعالية الاحتراق في المحركات الداخلية ونتاج ND_x . تتشكل بلازما نواتج الاحتراق نتيجة احتراق الوقود السائل والصلب والغازي والتي تم مؤخراً دراسة خواصها الكهروفيزيائية بشكل ملحوظ [1,4] وبشكل خاص تلك المتعلقة بإعداد الخطط اللازمة لإدخالها في الصناعة بطريقة مباشرة أثناء إنشاء محطات الطاقة الكهربائية بمساعدة المولدات الهيدروديناميكية المغناطيسية (Magnetic-hydrodynamic generators) [MHD]. ومن الضروري معرفة الخواص والسمات الأساسية لهذه البلازما لفهم العمليات التي تجري في حجرات الاحتراق الكهروغازية ومحطات انتاج البلازما التقنية لصناعة محركات الصواريخ والكثير من الصناعات [3,5,6] التي تؤثر بشكل فعال في الكثير من مظاهر حياتنا المعاصرة.

تتحدد الخواص الكهروفيزيائية لبلازما نواتج الاحتراق [7] بتركيبها الفيزيائي والكيميائي وحالتها الترموديناميكية، كما ترتبط بظروف احتراق الوقود المؤكسد وتركيبه الكيميائي، حيث تتشكل أثناء الاحتراق نواتج الاحتراق الغازية، التي تتكون من ذرات وجزئيات وجذور وأيونات والكترونات [6,8] كما يعتبر تكاثف الجسيمات المشحونة وتيار تصادم كافة عناصر البلازما، من المتحولات الهامة التي تحدد الخواص الأساسية لبلازما نواتج الاحتراق وخاصة كفاءة نقل التيار الكهربائي (الموصلية الكهربائية) [9,10].

تعتبر البلازما ذات درجات الحرارة المنخفضة (Non-thermal-plasma) NTPs من أكثر الأدوات أهمية لتعزيز عملية الاحتراق حيث تكون الالكترونات محملة بالطاقة العالية (حارة) بينما الأيونات والغازات المحايدة تكون حرارتها قريبة من درجة حرارة الوسط المحيط (باردة) وهذا يؤدي بدوره إلى الاستقرار في نواتج الاحتراق. إن الخاصية المميزة لبلازما نواتج الاحتراق هي وجود عدد كبير من الجسيمات المتكاثفة من طور التشتت (C.D.Ph.- The phase of Dispersion of the Condensed Particles) وتعتبر بقايا الرماد والجسيمات غير المحترقة مؤثرة بشكل ملحوظ على الخواص الكهروفيزيائية للبلازما، إذ تتوضع الشحنات المتوسطة الحجم بنشاط على سطحها ، حيث تتراكم الشحنات الكهربائية الساكنة و تؤدي إلى تشكيل حقل مشحون بإشارات مختلفة حول الجسيمات. وهكذا نجد أن بلازما نواتج الاحتراق المحتوية على الجسيمات المتكاثفة من طور التشتت تمتلك ميزات خاصة جديدة [10,11].

تتميز الحالة الترموديناميكية لبلازما نواتج الاحتراق بدرجة الحرارة التي تتراوح بين (2000 – 3500 K) ولا يزيد متوسط الطاقة العشوائية لحركة ذرات الوقود في هذه الحالة عن عدة أجزاء من العشرة من الالكترون-فولط (كل 1 الكترون- فولط يقابل 11600 K). وهذا أصغر بكثير من طاقة تأين الذرات ($eV \geq 4$) ولذلك تعتبر بلازما نواتج الاحتراق أحد أشكال البلازما الباردة [10,12].

ويشكل عام تعتبر بلازما نواتج الاحتراق مجموعة غير متجانسة ترموديناميكياً ويبدو ذلك من اختلاف درجات الحرارة لعناصرها (الذرات، الالكترونات.... الخ). واختلاف التوزع بالسرعات ودرجة التهيج (توزع بولتزمان- ماكسويل) إلا أنه في منطقة نواتج الاحتراق حيث يتم التفاعل الكيميائي للاحتراق يمكن أن تتحقق شروط التوازن الترموديناميكي

موضوعياً. يسمح وجود التوازن الترموديناميكي من وجهة نظر واحدة بدراسة المشكلات المتعلقة بمحتويات نواتج الاحتراق والتأين الحراري لذرات الطور الغازي والجسيمات المتكاثفة من طور التشتت (C.D.Ph) [13].

توازن تركيب نواتج الاحتراق:

1. شروط التوازن الكيميائي، قانون الكتل الفعالة [3,5,13]:

تعتبر بلازما نواتج الاحتراق نظام متعدد العناصر، يجري فيه عمليات فيزيائية وتفاعلات كيميائية، وهنا سوف ندرس بالإضافة للتفاعلات الكيميائية عمليات التفكك والتأين. تجري كافة العمليات الكيميائية بالاتجاهين المباشر وغير المباشر، أي يتم بنفس الوقت تشكّل النواتج بالتفاعل المباشر والمادة الناتجة بالتفاعل العكسي، ويمرور الزمن نصل إلى حالة التوازن، والتي عندها لا تتغير مركبات المواد المتفاعلة، تدعى حالة التوازن الترموديناميكي هذه بالتوازن الكيميائي، ودارسته لم يعد مهماً بأي طريقة تم التفاعل وإنما المهم الأخذ بعين الاعتبار الشروط التي تخضع لها العناصر والنواتج في حالة التوازن. إذا كان المزيغ المدروس عبارة عن مجموعة متعددة العناصر، وجب أثناء كتابة المعادلات الكيميائية الأخذ بعين الاعتبار الحد الأدنى لعددها والمعين بشرط الارتباط الخطي لمجموعة المعادلات الناتجة. يمكن اختياريًا كتابة المعادلة الكيميائية رمزياً بالشكل [14]:

$$\sum_k \nu_k A_k = 0 \quad (1)$$

حيث: A_k - الرمز الكيميائي للعناصر و ν_k - عامل التناسب بين كتل المواد المشتركة في التفاعل.

ويعبّر عن ν_k عددياً بالقيم التي تتناسب مع عدد الجزئيات الموافقة للعناصر A_k التي تُستهلك أو تتشكل في هذا التفاعل وعادةً تكون $\nu_k > 0$ للمواد المستهلكة و $\nu_k < 0$ بالنسبة لنواتج التفاعل، مثلاً معادلة احتراق أول أكسيد الكربون $2CO + O_2 \Leftrightarrow 2CO_2$ عامل التناسب $\nu_{CO_2} = 2$ ، $\nu_{CO} = -1$ ، $\nu_{O_2} = -1$ ، أما في معادلة تفكك الماء $2H_2 + O_2 \Leftrightarrow 2H_2O$ وبالتالي $\nu_{H_2O} = 2$ و $\nu_{H_2} = -2$ و $\nu_{O_2} = -1$.

لنفترض أن التوازن الكيميائي يُدرس ضمن ظروف ثبات درجة الحرارة T والحجم V ، يبرهن في الترموديناميك على أن شروط توازن المنظومات المجهرية المغلقة (Closed Microscopical Systems) تتبع الشروط الحدية الموافقة للكمون الترموديناميكي (Thermodynamic Potential). إذا كانت أي مجموعة مجهرية تتبادل التأثير مع الوسط المحيط بشكل ما فإن شروط التوازن لهذه المنظومة ستختلف. فعندما $T=Const$ و $V=Const$ يعتبر الشرط الضروري للتوازن الترموديناميكي الحد الأدنى من الطاقة الحرة f [11,13]. نرسم N_k ($k=1,2,3,\dots$) لعدد الجسيمات المختلفة المشاركة من المادة في التفاعل. يُعطى تغيّر الطاقة الحرة ضمن شروط ثبات درجة الحرارة والحجم بالعلاقة:

$$\Delta \bar{f} = \sum_k \mu_k \Delta N_k \quad (2)$$

حيث: μ_k - الكمون الكيميائي للعنصر k ، المعين كطاقة حرة مصروفة على جسيم واحد من المركب k . يجب أن يتحقق عند التوازن الشرط التالي:

$$\sum_k \mu_k \Delta N_k = 0 \quad (3)$$

يرتبط تغير الأعداد N_k بعضها ببعض أثناء حدوث التفاعل وفق المعادلة (1). لذلك إذا تغير N_1 بالتناسب مع العامل V_1 ، فإن كلاً من الأعداد الباقية N_k يتغير بالتناسب مع V_k حيث يُعبر عنه بالعلاقة:

$$\frac{\Delta N_k}{\Delta N_1} = \frac{V_k}{V_1} \quad (4)$$

ينتج منه: $\Delta N_k = \frac{\Delta N_1}{V_1} V_k$. بتعويض (4) في (3) نحصل على:

$$\sum_k \mu_k V_k = 0 \quad (5)$$

يعبر الشرط (5) عن شرط التوازن الكيميائي.

إذا تم في المنظومة الترموديناميكية بعض التفاعلات المستقلة فإن شروط التوازن الكيميائي ستكون مجموعة المعادلات من الشكل (5)، واستعمالها في حساب التوازن لتفاعلات كيميائية محددة يتطلب حسابات تمهيدية لكمون العناصر الكيميائية.

لتكن العناصر مكونة من جسيمات غاز مثالي، فتكون العلاقة المعبرة عن الكمون الكيميائي لكل مركب على

حده من الشكل [11]:

$$\mu_k = -KT \ln \left[\frac{1}{n_k} \left(\frac{2\pi m_k KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} Z_k \right] \quad (6)$$

حيث: $Z_k = (2\pi m_k KT)^{\frac{3}{2}} \cdot V$ و $-K$ ثابت بولتزمان، $-h$ ثابت بلانك، m_k ، n_k ، Z_k - على الترتيب الكتلة والتركيز والمجموع الإحصائي لجزيئات المركبات k . (باستثناء المجموع الإحصائي للحركة الانتسابية). يقود شرط التوازن الكيميائي (5) مع الشرط (6) إلى العلاقة:

$$\prod_k n_k^{V_k} = \prod_k \left[\left(\frac{2\pi m_k KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} Z_k \right]^{V_k} \equiv K(T) \quad (7)$$

تسمى العلاقة الأخيرة الناتجة بقانون الكتلة الفعالة، والكمية $-K(T)$ ثابت التوازن للتفاعل الكيميائي (1).

2. حساب طاقة الحالة الأساسية وطاقة التفكك إحصائياً لبلازما نواتج الاحتراق:

يمكن استخدام معادلة التوازن الكيميائي (7) لحساب طاقة الحالة الأساسية وطاقة التفكك لمكونات بلازما نواتج الاحتراق، وكذلك يجب معرفة الضغط والتركيب الابتدائي والإنتالبي للمادة المستهلكة لانتاج البلازما. في البداية نفترض مشاركة كافة المكونات الممكنة نظرياً عندئذ يمكن كتابة علاقات الارتباط الخطي فيما بين التفاعلات الكيميائية ضمن المجموعات التالية [15,16]:

1- معادلات التفاعلات الكيميائية المعكوسة وعدد معادلات هذا النموذج يساوي عدد جزيئات المركبات الداخلة في مكونات نواتج التفاعل.

2- معادلات إنحفاظ الكتلة لكل عنصر كيميائي في المادة المستهلكة وفي نواتج الاحتراق. عدد هذه المعادلات يتناسب مع عدد العناصر المشاركة في التفاعلات الكيميائية [16,17].

3- المعادلات المعبرة عن قانون دالتون: مجموع الضغوط الجزئية للعناصر يساوي الضغط الكلي للمزيج [5].
يقود حل المسألة 1 / لحساب ثابت التوازن لكل تفاعل كيميائي وفق المعادلة (7). ومن أجل ذلك يجب حساب المجموع الإحصائي Z_k . في حالة الغاز المثالي يتفرق المجموع الإحصائي إلى المجموع الإحصائي الانسحابي (Z_{tran} . (transition)، والدوراني (Z_{rot} . (rotation) والإهتزازي (Z_{vib} . (Vibration):

$$Z_k = Z_{tran} \cdot Z_{rot} \cdot Z_{vib} \quad (8)$$

يحسب المجموع الإحصائي الأكثر بساطة من أجل جزيئ واحد ثنائي الذرة. الجزء الانسحابي للمجموع الإحصائي يساوي:

$$Z_{tran} = \sum_k g_k \cdot e^{-\epsilon_k / KT} \quad (9)$$

والجزء الدوراني هو:

$$Z_{rot} = \sum_{L=0}^{\infty} (2L+1) \exp\left(-\frac{\hbar^2 L(L+1)}{2JKT}\right)$$

حيث: $\epsilon_{rot} = \frac{\hbar^2}{2J} L(L+1)$ و $g_k = (2L+1)$ و g_k - رتبة الانطباق

T - درجة الحرارة (تناسب الطاقة الحركية الوسطى مع الحركة الانسحابية). تمتلك الإلكترونات رتبة انطباق تساوي 2، حيث تتناسب مع الحالتين الممكنتين للسين [16].

يبسط حساب g بشكل كبير أثناء استخدام مخطط راسل - ساوندرس، الموافق للسوية المتميزة بتبدل اتجاه السين والعزم المداري، المتحددين في صورة متحركة (multi-ply) (نسخة ثانية، وثالثة وهكذا). عندئذ بتأثير الطاقة ϵ في العلاقة (9) يتضح مفهوم الطاقة الوسطى للشكل المتحرك، ووزنها الإحصائي:

$$g = (2L+1)(2n_s+1) \quad (10)$$

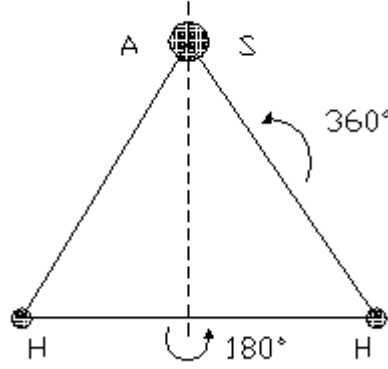
حيث L - العدد الكوانتي المداري ($L=0,1,2,3,\dots$).

يحسب دوران الجزيئات بمساعدة Z_{rot} ، والذي من أجل الجزيئات الثنائية الذرات يحسب بالعلاقة:

$$Z_{rot} = \frac{1}{\sigma} \frac{8\pi^2 IKT}{h^2} \quad (11)$$

حيث I - عزم عطالة الجزيئ، σ - تدعى عدد التناظر، ويساوي العدد الفيزيائي للإتجاهات المعروفة للجزيئات كما في الشكل أدناه.

تمتلك الجزيئات المكونة من أكثر من ثلاث ذرات عزم عطالة أكبر، بحيث تثار الحالة الدورانية بشكل كامل عند عدة درجات أكبر من الصفر المطلق. لذلك يمكن حساب المجموع الإحصائي للقسم الدوراني من أجل الجزيئات المتعددة الذرات بالعلاقة الكلاسيكية التالية [11,17].



جزينة H_2S متماثلة في المثلث متساوي الساقين. الجزينة تبقى نفسها أثناء الدوران 360° حول

الذرة S ، وتدور 180° حول المحور A لذلك $\sigma_{H_2S} = 2$

$$Z_{rot.} = \frac{8\pi^2 (2\pi^3)^{3/2} (I_1 \cdot I_2 \cdot I_3)^{1/2} (KT)^{3/2}}{\sigma h^3} \quad (12)$$

حيث I_1, I_2, I_3 - عزوم العطالة الرئيسية للجزئيات، حسب النظرية الكوانتية. تتعين الطاقة الإهتزازية للجزئيات الثنائية الذرة بالعلاقة:

$$\varepsilon_{vib} = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2}\right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

حيث أن: $\omega_0 = \left(\frac{1}{2\pi}\right)\sqrt{K/m}$ ، m - الكتلة المختزلة للذرات، K - ثابت المرونة، ω_0 - تردد الإهتزاز،

n - العدد الكوانتي الاهتزازي وهكذا تتعين مساهمة الحركة الإهتزازية في المجموع الإحصائي بالعلاقة:

$$Z_{vib} = \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(\frac{-\hbar\omega_0(n+1/2)}{KT}\right) = \frac{\exp(-\hbar\omega_0/2KT)}{1 - \exp(\hbar\omega_0/KT)} \quad (13)$$

هنا $g_n = 1$ أي أن سويات الطاقة للهزاز غير متحللة وذلك من أجل مختلف قيم n .

القيم الضرورية من أجل حساب المجموع الإحصائي لبعض الذرات والجزئيات الواردة في الجدول الآتي [17]:

العنصر	S	$1.10^{-47} \text{ kg.m}^2$	ω_0 $10^{14} / \text{sec}$	\mathcal{E}_D Ev	الحالة الأساسية

2S	-	-	-	1/2	H
2S	4.478	0.4	0.4	1/2	H ₂
2S	-	-	-	3/2	Na
2S	-	-	-	3/2	K
2S	-	-	-	7/2	C _s
2S	5.11	2.98	19.6	-	O ₂

بشكل عام لحساب طاقة الحالة الأساسية من أجل معادلة التفكك $AB \leftrightarrow A+B$ ، وباستخدام قانون الكتلة الفعالة (7) يبدو العامل :

$$\exp\left(-\frac{\varepsilon_D}{KT}\right) = \frac{\exp(-\hbar\omega_A / 2KT) \exp(-\hbar\omega_B / KT) \exp(-\varepsilon_A / KT) \exp(-\varepsilon_B / KT)}{\exp(-\hbar\omega_{AB} / KT) \exp(-\varepsilon_{AB} / KT)}$$

حيث أن المقدار ε_D - يدعى طاقة التفكك.

الإحصاء الترموديناميكي لمكونات بلازما نواتج الاحتراق:

يمكن استخدام معادلة التوازن الكيميائي من أجل الإحصاء الترموديناميكي لعناصر بلازما نواتج الاحتراق. ببساطة أكثر تستخدم هذه العملية لدراسة عمليات تفكك الجزيئات ثنائية الذرة وسنوضح ذلك بدراسة تفكك جزيئ الهيدروجين الذي يمكن كتابة معادلته الكيميائية:



المعاملات الأولية للمعادلة تساوي: $\nu_{H_2} = 1, \nu_H = -2$

تعتبر H_2 الجزيئة الخطية التي من الضروري اعتبار الحركات الانسحابية والدورانية والاهتزازية في حركتها.

المجموع الإحصائي للحركة الدورانية من أجل الجزيئات الثنائية الذرة تساوي:

$$Z_{\text{rot}} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{T}{T_r} \quad (15)$$

حيث: $\sigma = 2$ من أجل الجزيئات الأحادية الذرة.

$\sigma = 1$ من أجل الجزيئات التي تحتوي أكثر من ذرة.

يمكن التعبير عن درجة الحرارة الدورانية من خلال عنصر عزم العطالة J (момент инерции):

$$T_r = \frac{\hbar^2}{2KJ} \quad \text{حيث } \hbar = \frac{h}{2\pi} \text{ ثابت بلانك.}$$

يمكن إيجاد عزم العطالة J (المحسوب بالنسبة لمركز عطالة الذرة) لمختلف الجزيئات من جداول مرجعية أو بحسابها ذاتياً.

من أجل جزيئات H_2 : $J_{H_2} = 0.47 \cdot 10^{-47} \text{ kg.m}^2$ وهذه القيمة تتناسب مع درجة الحرارة الدورانية: $T_{rot} = 85 \text{ K}$

يمكن إيجاد المجموع الإحصائي للحركة الاهتزازية إذا اعتبرت جزيئات H_2 كمولد ذبذبات تردده ω_0 عندئذ يكون:

$$Z_{vib} = \frac{\exp(-\hbar \omega_0 / 2KT)}{1 - \exp(-\hbar \omega_0 / KT)} \quad (16)$$

يدعى المقدار $T_0 = \frac{\hbar \omega_0}{K}$ درجة الحرارة الاهتزازية. يعين التردد الاهتزازي لذرات الجزيئات تجريبياً بطريقة دقات (نبضات) إشعاعية لجزيئات الغاز.

التردد الدوراني لذرات الهيدروجين ω_0 يساوي من أجل ذرتين طبيعيتين $8.28 \times 10^{14} \text{ sec}^{-1}$ ، والذي يتناسب مع درجة الحرارة $T_0 = 6300 \text{ K}$ والمجموع الإحصائي للحركة الانسحابية يساوي:

$$Z_{Tran} = g e^{\frac{\epsilon}{KT}} \quad (17)$$

حيث: ϵ - طاقة الحالة الأساسية، g - عدد تكرار التحلل وهنا يساوي الواحد

بتعويض العلاقات (15) و (16) و (17) في العلاقة (8) نجد:

$$Z_{H_2} = 4 \frac{T}{2T_R} \frac{\exp(-\hbar \omega_0 / 2KT)}{1 - \exp(-\hbar \omega_0 / KT)} \exp\left(-\frac{\epsilon_{H_2}}{KT}\right) \quad (18)$$

لا تملك ذرة الهيدروجين سويا دورانية واهتزازية وبالتالي:

$$Z_H = 2 \exp\left(-\frac{\epsilon_{H_2}}{KT}\right) \quad (19)$$

الجداء 4 في الصيغة (18) و (15) وفي العلاقة (19) يشترط السبين النووي.

نعوض (18) و (19) في العلاقة (7) من أجل ثابت التوازن الكيميائي أي $m_{H_2} = 2m_H$ نجد:

$$K = \frac{2(K \pi m_H)^{3/2} T^{3/2}}{h^3} T_R \left[1 - \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \right] e^{-\frac{\epsilon_0}{KT}} \quad (20)$$

يدعى المقدار $\varepsilon_D = 2\varepsilon_H - \varepsilon_{H_2} - 0.5\hbar\omega_0$ - طاقة التفكك من أجل جزيء الهيدروجين
 $\varepsilon_D = 4.47 \text{ eV}$.

لنحسب ثابت التوازن لتفكك جزيء الهيدروجين عندما $T_0 = 5000 \text{ K}$ ، نجد:

$$\ln K = \ln \frac{2\pi^{3/2} K^{3/2}}{h^3 N_A^{3/2}} + \ln A_A^{3/2} T_R (1 - e^{-\frac{T_0}{T}}) + \frac{1}{2} \ln T - \frac{\varepsilon_D}{KT}$$

حيث A_K - الكتلة الذرية النسبية للهيدروجين. بتعويض القيمة العددية نجد:

$$\ln K = \ln \frac{2 \times 5.57 \times 5.1 \times 10^{-35}}{2.9 \times 10^{-100} \times 1.48 \times 10^{40}} + \ln(1.008)^{3/2} \times 85(1 - e^{-\frac{6300}{5000}})$$

$$+ \frac{1}{2} \ln 5000 - \frac{4.47 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 5000} = 60.15 + 4.11 + 4.26 - 10.4 = 58.12$$

تحدد القيمة العددية لـ k :

$$k = 1.74 \times 10^{25} \text{ mol}$$

وبالتالي يأخذ قانون الكتلة الفعالة الشكل:

$$\frac{n_H^2}{n_{H_2}} = 1.74 \times 10^{25}$$

إذا كان التكاثر الابتدائي لجزيئات الهيدروجين مساوياً لعدد أفوغادرو N_A ، فإن كمية ذرات الهيدروجين تساوي:

$$n_H = \sqrt{n_{H_2} K} = \sqrt{1.83 \times 10^{25} \times 6.02 \times 10^{26}} \Rightarrow$$

$$n_H = 1.023 \times 10^{26}$$

تدعى العلاقة التالية بدرجة تفكك الجزيئات:

$$\alpha = \frac{n_H}{n_{H_2}}$$

عند $T = 5000 \text{ K}$ تكون درجة تفكك جزيئات الهيدروجين مساوية:

$$\alpha = \frac{1.023 \times 10^{26}}{6.02 \times 10^{26}} = 0.17$$

نعين درجة حرارة التفكك التام للغاز من العلاقة:

$$KT_D = \varepsilon_D$$

$$T_D = \frac{4.47 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}} = 51800 \text{ K}$$

وفق القيم العددية المفروضة نجد:

وبهذا الشكل بالرغم من أن درجة الحرارة $T = 5000 \text{ K}$ أصغر بكثير من درجة حرارة التفكك فإن 17 % من الغاز يتكون من ذرات الهيدروجين.

الخاتمة:

من خلال الدراسة السابقة تم التوصل إلى التالي:

1. تحديد شروط التوازن الكيميائي وإيجاد قانون الكتلة الفعالة أو ثابت التوازن الكيميائي.
2. حساب طاقة الحالة الأساسية وطاقة التفكك لبلازما نواتج الاحتراق.
3. حساب طاقة تفكك الجزيئات ثنائية الذرة وبشكل خاص لجزيء الهيدروجين وكذلك ثابت التوازن والكتلة الفعالة له وأخيراً إيجاد درجة تفكك الجزيئات وتعيين درجة حرارة التفكك التام للغاز. تبين هذه الدراسة النظرية أيضاً أنه بالإمكان استخدام معادلة التوازن الكيميائي من أجل الإحصاء الترموديناميكي لمكونات بلازما نواتج الاحتراق في حساب سويات الطاقة وطاقة التفكك لجزيئات الغاز.

المراجع:

1. F.J. Weinberg, Ed., Advanced Combustion Methods (Academic Press, London, 1986).
2. L. Bromberg, D.R. Cohn, A. Rabinovitch, and J. Heywood, " Emissions reductions using hydrogen from plasmatron fuel converters" 1115-1121 (2001).
3. U. Kogelschatz, "Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications" Plasma Chemistry and Plasma Processing 23, 1-46 (2003).
4. Parameter Determination of Plasma Combustion Products with Alkaline Additives by Emitting Characteristics/ Technical Report № 8 IVTAN, Moscow 1986.
5. Gordon J. Van wyln & Richard A. Sonntag - Bases of classical Thermodynamics, - (in Arabic) Translated by Dr. Mohsen Salem Radwan,- John Wiley publishing house,-New York, first edition, 1987.
6. Smirnov B. M. "Introduction in plasma Physics" Moscow, Nauka, 1982.
7. L.A. Rosocha, " Processing of hazardous chemicals using silent electrical discharge plasma," in Environmental Aspects in Plasma Science, W. Manheimer, L.E. Sugiyama, and T.H. Stix., (American Institute of Physics Press, W00dbury, New York, 1997).
8. "Physics of Weakly Ionized Gas" Moscow, Nauka 1985.
9. Pavinski P. P. "Introduction in Thermodynamics and Statistical Physics" Leningrad University 1984.
10. Kondratev V. N. & Nikiten E. E., -Talroze V. A "Research Problems of Elementary Processes in low Temperature Plasma: low Temperature plasma. /Mir publishing house, 1967.
11. Stepuchovich A. D., Ulitski V. A., -"Lectures in Statistical Physics" Moscow "Vyshaya Shcola" 1978.
12. M.S. Cha, S.M. Lee, K.T. Kim, and S.H. Chung, "Interaction between a non-thermal plasma and a flame, " in Proceedings of the 30th International Conference Plasma Science, Cheju, Korea, June 2-5, 2003.
13. Mark W. Zemansky & Richard H. Dittman –Temperature and Thermodynamics, (in Arabic) "Translated by Dr. Mohsen Salem Radwan" Mac and Hill publishing house, Cairo 1981.
14. Targinera U. "Chemistry of Combustion" (translated from English) Mir publishing house, 1988.
15. L.A Rosocha, D.M. Coates, D. Platts, and S. Stange, "Plasma- enhanced combustion of propane using a silent discharge," Physics of Plasma 11, 2950- 2956 (2004).
16. Landau L. D., Lifshits E.M., "Quantum Mechanics" Moscow, Nauka, 1989.
17. USSR Academy of Sciences, "Thermophysics of High Temperatures" Tom 22- Nauka Vol.1- 1984.