قياس معدل الاحتراق عملياً لوقود صلب (بوليستر) بطريقة كراوفورد

م. محمد وائل الخالد، د. مصطفى طالب، د. أحمد فراس علوش

جامعة ادلب، كلية الهندسة الميكانيكية

الملخص:

طريقة كراوفورد لقياس معدل الاحتراق، تتم بحرق عينة صغيرة اسطوانية الشكل تشبه القلم من الوقود الدافع وبطول معين في وعاء أسطواني (حجرة الاحتراق) مغلق عند ضغط ثابت معين (أو ثابت تقريباً) [1]. يتم إشعال العينة كهربائيًا من أحد طرفيها، ويتم قياس المدة الزمنية التي يستغرقها القلم ليحترق طولياً. عادة ما يتم عزل القلم بطولها بالكامل بمادة عازلة للتأكد من أن الحرق يحدث فقط بشكل عمودياً على السطح. تُستخدم وسائل مختلفة لقياس زمن الاحتراق، في هذا البحث تم اعتماد طريقة تغير الضغط. ويتم الحصول على معدل الاحتراق من خلال معرفة طول العينة بالإضافة إلى زمن الاحتراق. يُستخدم غاز النيتروجين في عملية زيادة الضغط في حجرة الاحتراق. لتوصيف علاقة معدل سرعة الاحتراق مقابل الضغط على نحو فعال لمادة دافعة معينة، يمكن إجراء 10 اختبارات أو أكثر، عند ضغوط تتراوح من 20bar حتى ضغط العمل الذي قد يصل الى أكثر من 100bar.

الكلمات المفتاحية: الوقود الدافع، بوليستر، معدل سرعة الاحتراق، كراوفورد

Practical Measurement of The Burning Rate of Solid Propellant (Polyester) Using Crawford's Method

Mohamad wail alkhaled, Dr.Mostafa Taleb, Dr.Ahmad Feras Alosh
Idlib University Faculty of Mechanic Engineering

Abstract:

With the Crawford Strand Burner method of burn rate measurement, a small sample of propellant is burned in a closed cylinder firing vessel at a certain constant (or approximately constant) pressure. Each propellant sample is electrically ignited at one end, and the duration for the strand to burn along is measured. The strands are usually completely insulated to ensure that burning only occurs vertically on the surface. Various means are used to measure the duration. the paper depends on the method of changing the pressure. the burning rate depended on the length of the sample and the burning duration. Nitrogen is used to pressurize the firing vessel. To effectively characterize the burn rate in relation to pressure relationship for a particular propellant, 10 or more tests may be performed at pressures ranging from 20 bars to 100 bars or more.

Key words: solid propellants, burning rate, polyester, Crawford

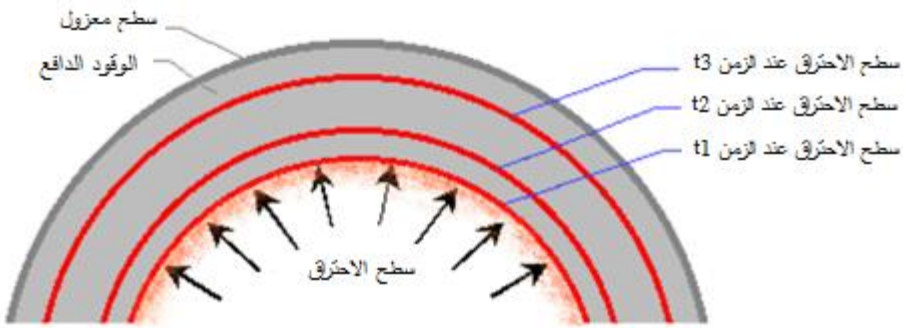
1-مقدمة:

تعد قيمة معدل احتراق وقود ما من بين أهم المعطيات اللازمة لتصميم المحرك الصاروخي، تعرف عملياً و تقاس بواحدة mm/sec. يتغير معدل الاحتراق من وقود إلى آخر بل في الوقود الواحد عند درجة حرارة و ضغط مختلفين. شعاع سرعة الاحتراق يكون عمودياً على سطح الاحتراق، وعادة في الوقود الصلب هناك بعض السطوح لا يجب أن تتعرض للاحتراق لذلك يتم طلاؤها بعازل خاص لتجنب الاحتراق فيه، كما هو مبين بالشكل(1).

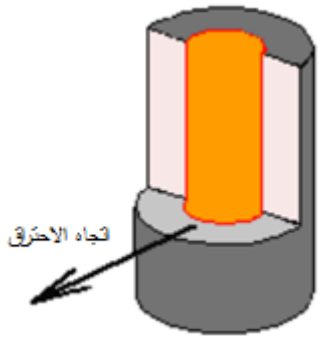
2-العوامل التي تؤثر على معدل الاحتراق[2]:

يتأثر معدل احتراق وقود ما بما يلي :

1) ضغط حجرة الاحتراق.
2) درجة حرارة الوقود الأولية قبل بداية الاحتراق.
3) سرعة غازات الاحتراق التي تكون موازية لسطح الاحتراق في أثناء خروجها.
4) تركيب الوقود الدافع .
5) حجم الحبيبات للمؤكسد.
6) دوران الجسم وتسارعه في أثناء الطيران.



الشكل(1) مقطع عرضي للوقود [3]



الشكل(2) مقطع نصفي للحشوة الدافعة [3]

3-تأثير ضغط حجرة الاحتراق:

يتأثر معدل احتراق وقود ما، بشكل كبير بالتغير في ضغط حجرة الاحتراق فمثلاً وقود (نترات البوتاسيوم والسوربتول) لديه سرعة احتراق تقدر بـ 3.8mm/s عند الضغط الجوي، بينما تساوي 15 mm/s عند الضغط 68 bar (1000 psi) أي زيادة بأربع مرات .

علاقة سرعة الاحتراق بالضغط تتمثل بقانون :

وهو: Saint Robert's Law (a.k.a. Vieille's Law)

$$r_b = r_o + aP_c^{\,n} \dots\dots\dots\dots (1)$$

حيث:

r_o ثابت عادة يؤخذ صفر.

r_b يمثل معدل سرعة الاحتراق mm/sec .

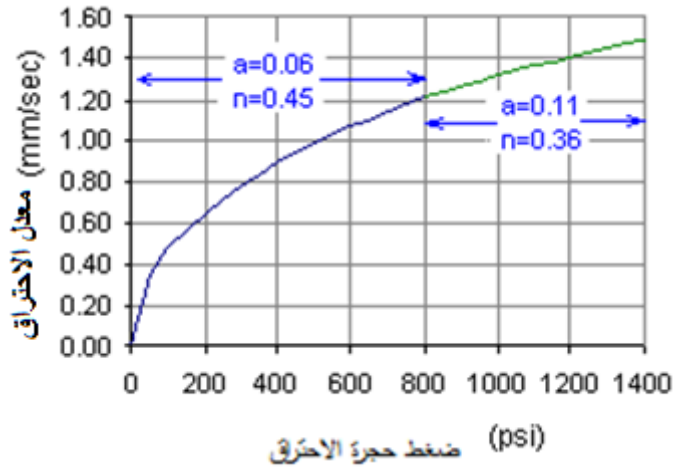
P_c ضغط حجرة الاحتراق bar .

a يسمى معامل سرعة الاحتراق .

n أس الضغط .

حيث تحدد قيمة n و a تجريبياً، ولا يمكن حسابها نظرياً.

حيث توجد عدة طرق لحساب هذه القيم عملياً، وذلك باستعمال إما طريقة Strand burner أو Ballistic Evaluation Motor (BEM). يجب التأكيد هنا على أن قيم n و a عندما تحدد عملياً فهي صحيحة ضمن مجال واسع من الضغط. عند التجريب ينبغي إجراء عدة تجارب للتأكد من قيم n و a كما هو مبين في الشكل(3):

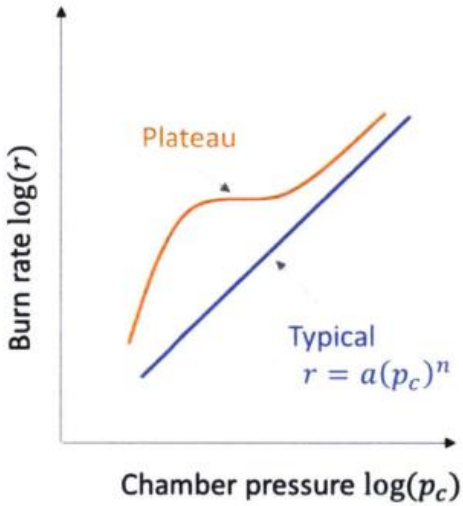


الشكل (3) ضغط حجرة الاحتراق مع سرعة الاحتراق

بأخذ لوغاريتم الطرفين في العلاقة (1) نجد:

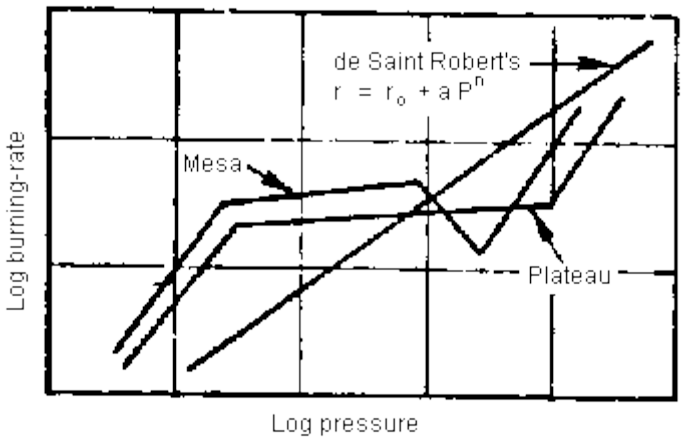
$$ln\, r_b = ln\, a + n\, ln\, P_c$$

وهي تمثل معادلة مستقيم ميله n كما هو مبين بالشكل(4).



الشكل(4) لوغاريتم الضغط مع لوغاريتم السرعة [4]

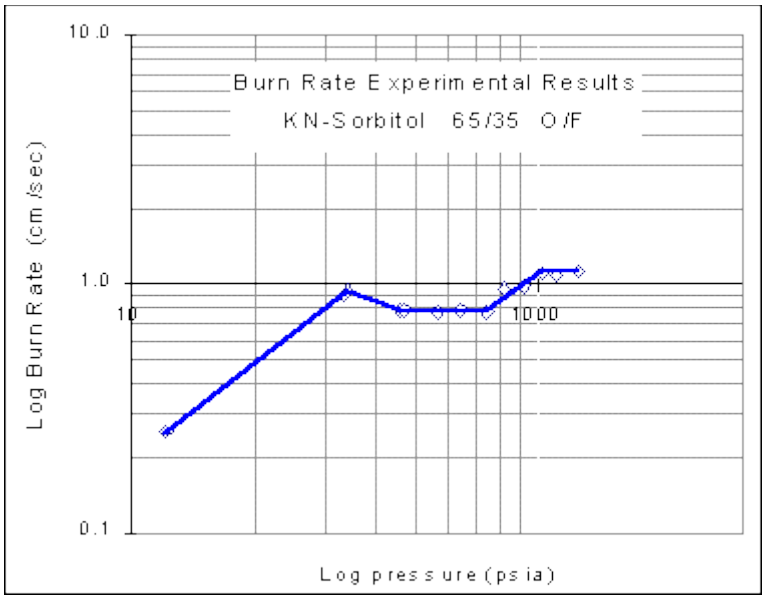
بعض أنواع الوقود الدافع (أو عند إضافة بعض المضافات) لا تعطي احتراقاً متزايداً كما هو مبين في الشكل السابق بل تنحرف عن هذا السلوك ، وتظهر تغيرات حادة في خط معدل الاحتراق. هذا النوع من الوقود يسمى Plateau or mesa propellant . يمكن تفسير هذه الظاهرة بسرعة تآكل الرابط أكبر من تآكل المؤكسد في ضغط معين كما هو مبين في الشكل(5):



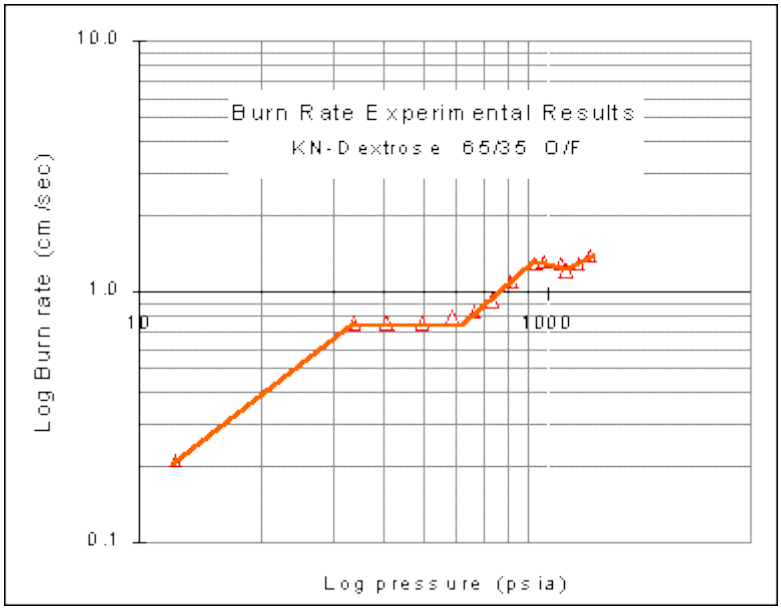
الشكل(5) لوغاريتم الضغط مع لوغاريتم سرعة الاحتراق [5]

وهناك تفسير آخر هو أن بعض نواتج الاحتراق قد تتجمع وتؤخر انتقال الحرارة إلى السطح عند الضغوط العالية.

الشكل(6) و الشكل(7) يبين تجربة معدل الاحتراق للوقود الدافع KNDX و KNSB التي تظهر هذا السلوك بشكل واضح.



الشكل(6) سرعة الاحتراق لوقود السوربيتول–نترات البوتاسيوم



الشكل (7) معدل الاحتراق لوقود ديكتروز–نترات البوتاسيوم [6]

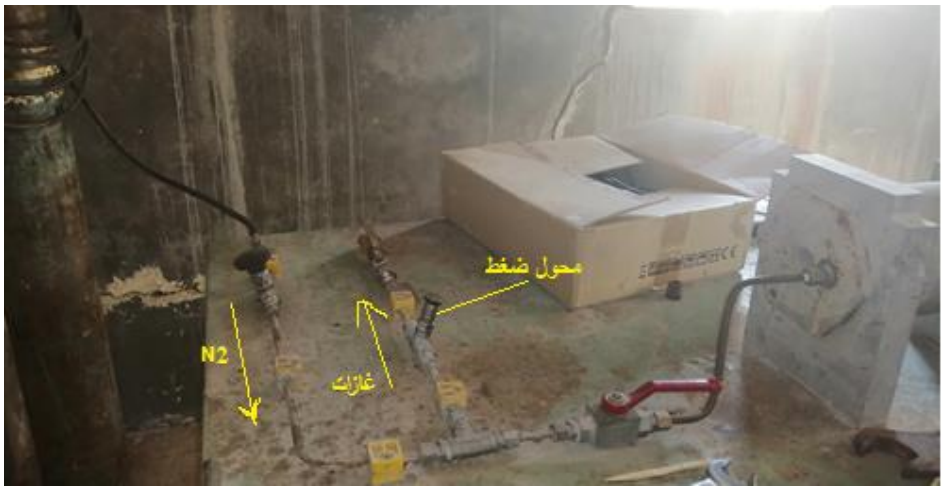
حيث: KNDX تمثل وقود نترات البوتاسيوم ـ ديكتروز

KNSB تمثل وقود نترات البوتاسيوم ـ سوربيتول

4–طريقة قياس معدل الاحتراق عملياً لوقود Ap–polyester:

تم تصنيع جهاز قياس معدل الاحتراق الوقود محلياً وبشكل مسبط ضمن الإمكانيات المتوفرة. الجهاز عبارة عن أسطوانة معدنية سماكة جدارها 3cm وبقطر داخلي 30cm وقطر خارجي 36cm وطول الأسطوانة من الخارج 49cm، قادرة على تحمل الضغوط العالية حتى 200 bar على الأقل، كما هو مبين بالشكل(8) والشكل(9).

الشكل (8) جهاز قياس معدل الاحتراق



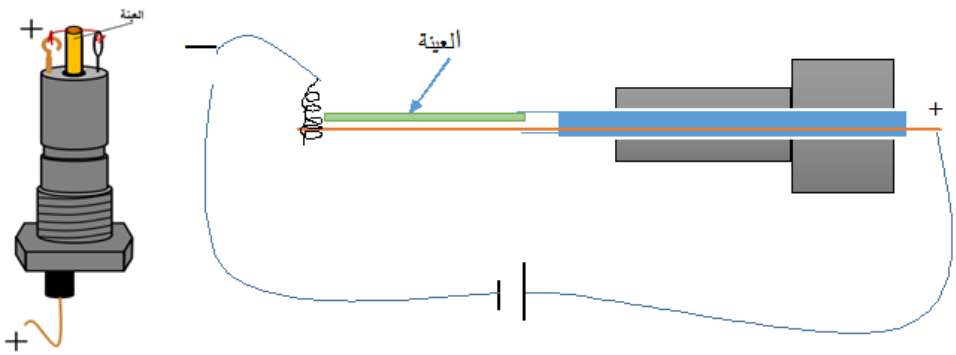
الشكل (9) يوضح توصيلات الجهاز

له فتحة واحدة لدخول وخروج الغازات، وهذا الخط يتفرع الى فرعين وعلى كل فرع صمام للفتح والإغلاق عند اللزوم، أحد هذين الفرعين موصول مع أسطوانة غاز الآزوت ذات الضغط العالي حوالي 200 bar ومركب على الأسطوانة مخفض ضغط للحصول على الضغط المطلوب وإغلاق الصمام عند الوصول إلى هذا الضغط .

وعلى الفرع الآخر موجود محول ضغط (transducer) وظيفته نقل القراءات لمجمع بيانات (data acquisition) الموصول مع الحاسب .

وبذلك يمكن قراءة تغيرات الضغط داخل حجرة الاحتراق مع الزمن.

الحجرة من الداخل تتألف من برغي مسدس M20 بداخله ثقب لإمرار سلك



الشكل (10) ربط العينة كهربائياً

نحاسي معزول داخل البرغي فقط وهو يمثل القطب الموجب، بينما جسم الحجرة موصول مع القطب السالب. كما يوجد وشيعة من التنغستين بحيث تتوهج بمجرد وصل التيار الكهربائي. بالإضافة إلى وجود بطارية تيار مستمر على الأقل 12v.

أما عينة الوقود فهي اسطوانية الشكل تم تصنيعها من وقود البوليستر وذات طول 10cm وقطر 1cm، حيث تم تصنيع 4 عينات بقطر واحد.

يتم إدخال العينة المصنعة رقم (1) إلى أسطوانة التجربة وبتماس مباشر مع وشيعة الإشعال المبينة بالشكل(10)، ثم يتم فتح صمام أسطوانة غاز الآزوت الموصولة مع الجهاز حتى يصبح الضغط داخل أسطوانة التجربة 20 bar، ونغلق صمام غاز الآزوت، بالمقابل فإنه يوجد صمام آخر على الخط الموصول مع محول الضغط الموصول بدوره مع الحاسب حيث نأخذ القراءة منه. عندها نوصل الكهرباء إلى الوشيعة فتبدأ عينة الوقود بالاشتعال ويظهر ذلك بشكل واضح من قراءات الضغط على الحاسب التي تتغير بشكل طفيف بسبب صغر العينة التي تنتج غازات بحجم قليل ويمكن إهمال التغير بالضغط الناتج. نعيد التجربة السابقة للعينات 4 ,3 ,2 عند الضغوط 140,40,120 كما هو مبين بالجدول(1).

الشكل(11) يبين العينة داخل قبل وبعد نزع القالب(أنبوب بلاستيكي)

لحساب a وn في المعادلة (1) نحتاج إلى أربع تجارب على الأقل حتى نحصل على معادلتين بمجهولين، في الجدول(1) يبن حساب a وn الناتجة عن التجارب السابقة.

4-1عوامل الأمان الواجب اتخاذها أثناء التجربة:

حفاظاً على سلامة الأشخاص القائمين على التجربة وحفاظاً على التجهيزات المستخدمة يجب اتباع تعليمات السلامة والأمان التالية:

a. ضغط حجرة التجربة إلى ضغط أكبر من الضغط الأعظمي للتجربة لمدة لا تقل عن نصف ساعة.
b. وجود حاجز من البيتون المسلح بين المُجرب وحجرة التجربة.
c. مراقبة التجربة عن طريق آلات تصوير بسيطة ذات تقريب جيد.
d. وضع حجرة التجربة على طاولة وليس على الأرض، بحيث يكون المُجرب وهو جالس أخفض من حجرة التجربة.
e. عند الانتهاء من كل تجربة يجب تنفيس الضغط ببطء شديد ولاسيما التجريب عند الضغوط العالية.
f. يجب على المُجرب ارتداء حمايات للأذن من الضجيج في أثناء التجربة.

5-النتائج والمناقشة:

الضغط والزمن تم الحصول عليها من قراءات الحاسب، ببنما معدل الاحتراق فيتم حسابه من:

$$r_b = \frac{L_b}{t_b}$$

حيث:

L_b طول العينة (cm).

t_b زمن احتراق العينة (sec).

كما هو مبين بالجدول(1).

الجدول(1) معدل الاحتراق مقابل الضغط

العينة	الضغط *bar*	الزمن *sec*	r_b *cm/sec*
1	20	19.84	0.503
2	140	15.07	0.663
3	40	17.99	0.555
4	120	15.41	0.648
5	50	17.39	0.575

بعد أخذ $r_o = 0$ تصبح المعادلة:

$$r_b = aP_c^{\,n}$$

بتعويض معدل الاحتراق والضغط المقابل له من الجدول (1) الناتج عن التجربة نحصل على أربع معادلات:

$$0.503 = a(20)^n \dots\dots (2)$$
$$0.663 = a(140)^n \dots\dots (3)$$
$$0.555 = a(40)^n \dots\dots (4)$$
$$0.648 = a(120)^n \dots\dots (5)$$

أصبح لدينا أربع معادلات بمجهولين وبالتالي من كل معادلتين يمكن حساب قيمة a وn ونأخذ الوسطي لهما للحصول على قيمة أدق كما هو مبين بالجدول(2)

الجدول(2) قيم a وn النهائية

	a	n
عينة 1+2	*0.3304*	0.1409
عينة 3+4	*0.3298*	0.1410
الوسطي	*0.330*	0.*142*

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة (1) كما يلي:

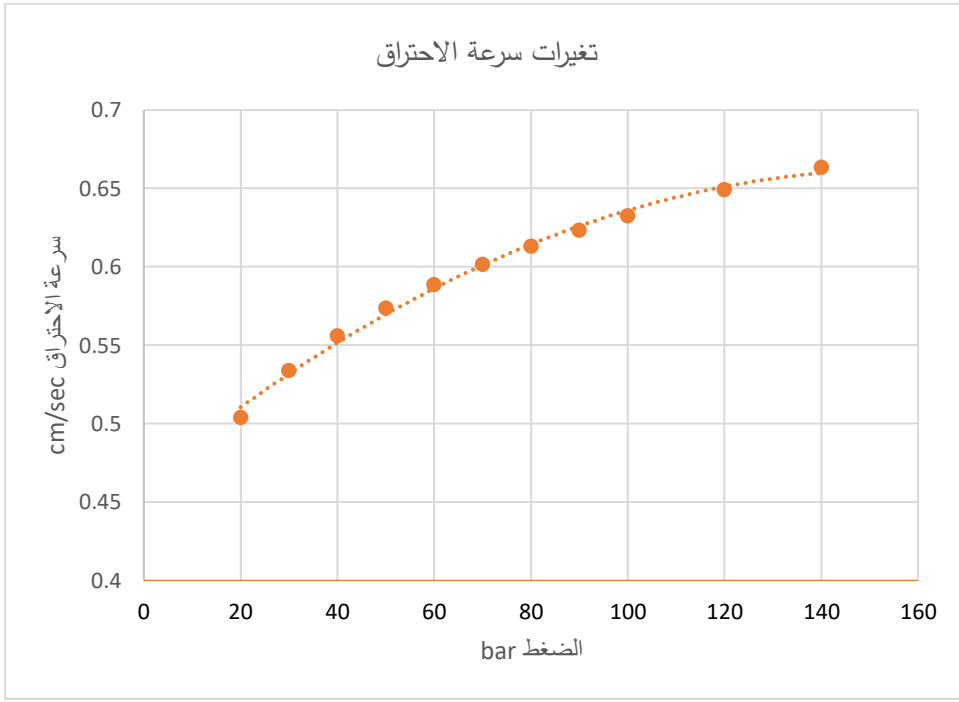
$$r_b = aP_c^{\,n} = 0.33P_c^{\,0.142}$$

$$lnr_b = nlnP_c + lna$$

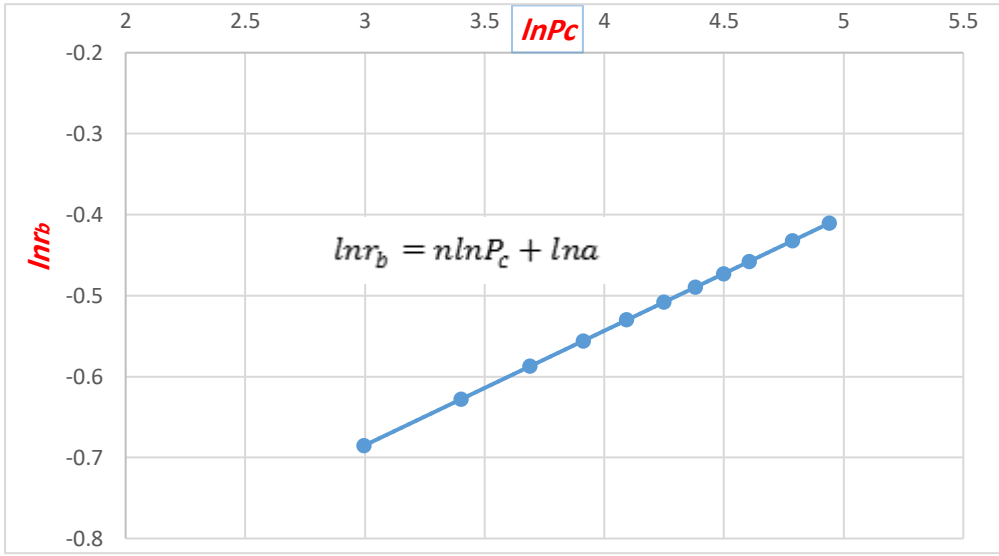
$$y = mx + b$$

هذه العلاقة التجريبية خاصة بكل وقود وتبقى ثابتة للوقود الواحد مالم نغير بالخواص الفيزيائية والكيميائية له، وهي مهمة جداً في بداية كل تصميم للوقود الدافع، ولا يمكن الاستغناء عنها لأنها تعطينا رؤية جيدة عن تركيب وخواص الوقود المراد تصنيعه.

وبرسمها نجد:



الشكل(11) سرعة الاحتراق مع الضغط



الشكل(12) لوغاريتم سرعة الاحتراق مع لوغاريتم الضغط

العينات التي تم تجريبها كانت عينات نهائية، أي أن النسب المئوية لتركيب الوقود المستخدم تم الوصول لها، حيث تم القيام بعشرات التجارب لقياس معدل الاحتراق حتى الوصول الى قيم مناسبة للتصميم. وأكثر ما يؤثر على معدل الاحتراق هو نسبة المؤكسد المستخدم أي نسبة بيركلورات الامونيوم (AP) وأيضاً حجم حبيباته. حيث إن التركيب الكيميائي للوقود المناسب لمعدل الاحتراق الناتج من التجارب السابقة هو:

الجدول(2) تركيب وقود البوليستر

المادة	النسبة المئوية الوزنية%
بوليستر	29
اكسيد الحديد	0.4
بودرة المنيوم	5.6
بيركلورات الأمونيوم(AP)	65
المجموع	100

هذا الجدول يبين النتائج التي تم الوصول لها بعد حساب معدل الاحتراق، حيث كانت المتغيرات بشكل رئيسي هي مادة (AP) والبوليستر، وهناك حدود لهذه المتغيرات تتعلق بمدى استيعاب البوليستر السائل لمادة (AP) الصلبة أو ما يسمى بعامل الملء، بحيث نحصل بعد خلط المواد الأولية على قوام للمادة النهائية قابلة للعجن جيداً حتى تصبح متجانسة تماماً.

لا يوجد دراسة مرجعية خاصة لهذا الوقود، وإنما يوجد دراسات لوقود آخر مثل وقود بولي يورتان(PU) والجدول(2) يبين قيم a وn له.

الجدول(2) معامل معدل الاحتراق وأس الضغط لوقود بولي يورتان

a	n
0.3541	0.2604

بتعويض قيم a وn في العلاقة(1) نجد :

$$r_b = 0.3541 P_c^{\,0.2604}$$

وبالتالي ممكن حساب معدل الاحتراق عند نفس الضغوط المحسوبة لوقود البوليستر من أجل مقارنة معدل الاحتراق مع وقود البولي يورتان.

الجدول(4) معدل الاحتراق لوقود(PU)

r_b cm/sec	الضغط (bar)
0.772528	20
1.282265	140
0.925342	40
1.231813	120
0.9807	50

هذه النتائج لوقود بولي يورتان(PU) تصل فيه نسبة المؤكسد (AP) الى 71% وزناً وهذا مالا يمكن الوصول إليه في وقود البوليستر لأن عامل الملء له قليل، ونلاحظ

الفرق الكبير في قيم معدل الاحتراق، التي تحتاج إلى ضغوط عمل عالية وبالتالي إلى غلاف محرك صارخي يتحمل هذه الضغوط، وهذا ما لا يمكن الحصول عليه لعدم توفره، بالإضافة الى عدم توفر المواد الأولية لوقود البولي يورتان، فمثلا معدل الاحتراق لوقودPU عند الضغط 50bar على افتراض أنه ضغط العمل هو 0.9807cm/sec المقابل لضغط العمل لوقود البوليستر الذي معدل احتراقه 0.575cm/sec، وهذا فارق كبير في معدل الاحتراق الذي سوف يقابله ارتفاع في ضغط العمل الذي سيصل الى 200bar ولا يمكن إيجاد أنبوب يتحمل هذا الضغط في الظروف الحالية.

ولذلك فإن وقود البوليستر ممكن أن يحل محل وقود البولي يورتان بالرغم من تدني مواصفاته.

أيضاً الجدول(5) يبين إحدى الدراسات لمعدل الاحتراق مقابل الضغط لوقود نترات البوتاسيوم كمؤكسد بنسبة 65% و سكر السوربتول كوقود بنسبة 35%. نلاحظ قرب هذه النتائج مع نتائج هذا البحث مع ارتفاع في سرعة الاحتراق قليلاً عن وقود البحث. ولذلك يمكن استخدام هذا الوقود كوقود دافع بسبب معدل احتراقه المنخفض.

الجدول(5) يبين معدل الاحتراق لوقود نترات البوتاسيوم – سوربتول

r_b cm/sec	الضغط (bar)
0.308	1
0.537	9.8
0.573	10
0.577	19.9
0.577	21. 5
0.610	30.6
0.666	40.5
0.725	51.0
0.774	61.1
0.722	71.2
0.876	103.8

6-الاقتراحات:

بهذه الطريقة استطعنا حساب معدل احتراق وقود البوليستر بواسطة عينات بسيطة وغير مكلفة، وبذلك تم توصيف الوقود والوصول إلى تركيب الوقود الاولي، ومنه يمكن إكمال الطريق إلى ما يسمى بالتصنيع العياري، وهو تصنيع عينات أكبر لتعمل عند ضغط العمل (الضغط المناسب للعينة الحقيقة) والتي يتم تصميمها عند معدل احتراق وضغط مناسبين كما هو مبين بالدراسة السابقة، إذاً من المهم جداً قياس معدل الاحتراق للوقود الدافع لتوفير المال والجهد والوقت وللتأكد من نتائج العينة الحقيقة بمطابقتها مع العينة التجريبية.

المراجع:

1. http://www. Crawford burner -Wikipedia.com

2. http://www. Richard Nakka's Experimental Rocketry Site.com
3. Hayyri Yaman,2013. "experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid propellants". published by Elsevier Ltd.
4. Garima GUPTA,et al.,2015 . "Various Methods for the Determination of the Burning Rates of Solid Propellants " .Central European Journal of Energetic Materials, 12(3), 593-620
5. Matthew T. Vernacchia, 2017." Development, Modeling and Testing of a Slow-Burning Solid Rocket Propulsion System"
6. W. Venner Saul (5439), Mark C. Grubelich (6916), Michael J. Hargather. "Rocket Engine Test System for Development of Novel Propulsion Technologies". New Mexico Institute of Mining and Technology.