مدينة الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية KACST
معهد بحوث البتروكيماويات

وقود الطائرات

د. جمال خالد الرفاعي

١٤٣٢ هـ - ٢٠١١ م

بسم الله الرحمن الرحيم

يستخدم الطيران طاقة الوقود البترولية (الهيدروكربونية) السائلة التي تتمتع بمحتوى عالي من الطاقة لكل وحدة حجم مقارنة بالوقود الغازي، كما أنها تتميز بسهولة توزيعها والتعامل معها مقارنة بالوقود الصلب، كما تتميز بتوفرها ورخص ثمنها.

تحققت القدرة على الطيران في السنوات الأولى من القرن العشرين، وذلك بتطوير محرك الاحتراق الداخلي المشابه لمحركات السيارات، وكانت تستخدم نفس الوقود. وقد قادت الحاجة المتزايدة للطاقة إلى تطوير محركات خاصة، ووقود (**جازولين**) خاص بالطائرات (Aviation gasolines) يتم تحضيره بحسب متطلباتها. ظهر في الأربعينات من القرن الماضي المحرك التوربيني (العنفي) استجابة للحاجة إلى زيادة القوة المحركة. وتم إحلال الكيروسين بدلاً من الجازولين في الطائرات التوربينية الأولى، ثم استبدل فيما بعد بالوقود النفاث الخاص بالطائرات التوربينية المتطورة. يستعرض هذا المقال وقود المحركات المكبسية (جازولين الطائرات) بشيء من الإيجاز لقلة انتشاره، بينما يستعرض بالتفصيل كل مايتعلق بوقود المحركات التوربينية أو مايسمى بالوقود النفاث.

وقود المحركات المكبسية

وقود المحركات - جازولين الطائرات- عبارة عن خلائط خاصة من خامات الجازولين، مع مضافات تستخدم للحصول على وقود عالي الأداء يمكن تصنيفه تبعاً لدرجة عدم الطّرق التي يتمتع بها. تشمل خامات خلط الجازولين نفثا بكر (غير مكسرة)، وألكيلات، وجازولين تكسير حفزي، حيث تكون النفثا عبارة عن خلائط من المركبات الهيدروكربونية المقطرة مباشرة من النفط الخام، أما الألكيلات فهي مركبات برافينية متفرعة مصطنعة أثناء عمليات التكرير، بينما تحتوي مواد الجازولين المكسرة حفزياً على مركبات حلقية عطرية. ويستخدم رباعي إثيل الرصاص (Tri Ethyl Lead- TEL) كمادة مضافة بتركيز يصل إلى ٤ مليلتر/جالون (١,٠٥٧ مل/لتر) من الوقود، وذلك بهدف زيادة خاصية منع الطّرق للوقود.

• التركيب

تـتـراوح أعـداد ذرات الكربـون في مكونات وقـود المحـركات المكبسية ما بـين ٤ (البوتان) إلى ١٠ (الديـكان) مـع توافـر أكـبر للمكونات ذات عدد ذرات الكربون (٨)، ويوضح الجدول (١) مدى تأثير مشاركة كل طائفة من الطوائف الهيدروكربونية المكونة لجازولين الطائرات على ثـلاث خصائـص أداء مهمة لهـذا الجازولين. وبمـا أن مركبـات آيـزو البرافين توافـق جيداً خصائص جازولين الطائرات الثلاثة المختارة، فإن هذه المركبات تعد مفيدة جداً، كما تعـد المركبات العطرية مفيدة لخصائص منـع الطّرق إلا أنها ضارة من ناحية السيولة تحت درجات حـرارة منخفضة، وتعد النفثينات محايدة إلى ضـارة بصورة عامة. أما البرافينات النظامية فتعد ضارة جداً باستثناء البوتان.

خاصية الجازولين	نظامي برافين	إيزوبرافين	عطريات	نفثينات
منع الدق لمزيج وقود الحالة المنخفضة	--	+/++	+/++	O / -
منع الدق لمزيج وقود الحالة المرتفعة	--	+	++	O / -
السيولة تحت درجات حرارة منخفضة	-	+/++	-	O / +

(+) تأثير مفيد، (-) تأثير ضار، (O) تأثير محايد أو بسيط.

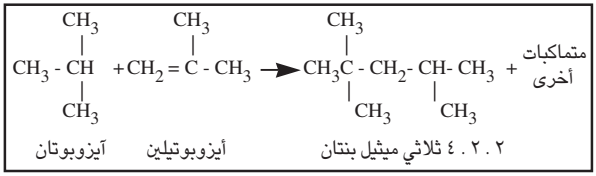
جدول(١) تأثير المساهمة المحتملة لكل طائفة هيدروكربونات على خصائص مختارة لجازولين الطائرات.

• التكرير

يتم تكرير جازولين الطائرات (Aviation Gasoline Refining) وفقاً لما يلي:

* **الألكلة** (Alkylation):

وقـد تم تطويرهـا في الثلاثينـات مـن القـرن الماضي لإنتـاج جازولـين الطائرات ذي خصائـص منع طـرق عالية، ويتـم تكريره بتفاعـل الآيزوبوتيلين مـع الآيزوبوتان بوجـود حمض قوي للحصول علـى مركبات إيزوبرافينيـة ذات أوزان جزيئية ودرجات غليـان أعلى خاصة مركبـات ثلاثي ميثيل البنتان، ويعـد ٢ ، ٢ ، ٤ ثلاثي مثيل البنتان (آيزوأوكتـان) المتماكـب الأكثر توفراً في هذه العملية، وهو الذي يتمتع - بحسب تعريفه - بعدد أوكتان مقداره ١٠٠ وذلك حسب المعادلة أدناه:



* **خلـط جازولـين الطائـرات** : ويتـم تحضـيره بخلـط مكونـين أو أكـثر للوصول إلى الخصائص المرغوبة .

• **الاستهلاك**

بلـغ استهلاك جازولـين الطائرات قيمـاً حرجة أثنـاء ومع نهاية الحـرب العالمية الثانيـة ، حيـث بلغ إنتاج الحلفاء منه ما يزيد عن ٢٥مليـون جالون يومياً . وبعد سنتين من الحرب انخفض الإنتاج بصـورة حادة إلى ٥ ملايين جالون /يومياً.

وقد أدى تطور الطيران التجاري مع استخدام الطيران الحربي إلى زيادة تدريجية مـرة ثانيـة حتـى ١٤ مليـون جالون /يوميـاً عـام ١٩٥٧م . ثم عـاد الإنتـاج ليتناقص تدريجياً مع ظهـور وتطور المحركات التوربينية كبديل للمحـركات المكبسية المستخدمة في الطائـرات الحربية، وفيما بعد في الطائرات التجارية، ليصل إلى ٥ ملايين جالون/ يوميـاً في عـام ١٩٧٠م. وفي عـام ١٩٩٩م بلـغ إجمـالي إنتـاج جازولـين الطـائرات في الولايات المتحدة ٠,٨ مليون جالون يومياً ، وهي كمية صغيرة جداً مقارنة بإنتاج الوقود التوربينـي (٧٠مليون جالون /يومياً) . وقد قدر الاستخدام العالمي لجازولين الطائرات سنة ١٩٩٦م بحوالي ٢,٢مليون جالون/يومياً.

وقود الطائرات التوربينية

بدأ استخدام وقـود الطائرات التوربينية (Aviation turbine fuels). العنفية من قبل كل من القوات الجوية البريطانية والألمانية في العمليات الحربية مع نهايات الحرب العالميـة الثانية. كانت المحركات البريطانية آنذاك تعمل على كيروسين الإنارة المحتوي علـى ١٪ زيت تزليق خفيف (زيت محرك نفـاث) ، بينما استخدمت المحركات الألمانية خليطـاً من الجازولـين وأجزاء تقطير أثقل ذات مجال غليان أكـثر اتساعاً. وقد توقف تطوير الوقود في ألمانيا مع نهاية الحرب.

بعـد الحـرب العالميـة الثانية بـدأت القـوات الجويـة الأمريكية باستخـدام وقود منخفـض الأوكتان متسع مجال الغليان (Wide-cut fuel)، وهو بصورة أساسية عبارة عن خليط هيدروكربوني يمتد ضمن مجالات غليان الجازولين والكيروسين . كما اعتمد اختيـاره على توفـره بكميات أكبر مـن الجازولين أوالكيروسـين بمفردهما ، خاصة في

فـترة الحرب، وقد وجد فيما بعد أن الوقود النفاث متسع مجال الغليان يتمتع بمميزات تشغيلية أقل مقارنة بالوقود الكيروسيني ، وذلك للأسباب التالية:

- ضياع أكبر للوقود بسبب التبخر عند ارتفاعات عالية.
- زيادة خطورة نشوب الحريق أثناء التعامل معه على الأرض.
- حدوث تحطم الطائرات المزودة بالوقود متسع مجال الغليان.

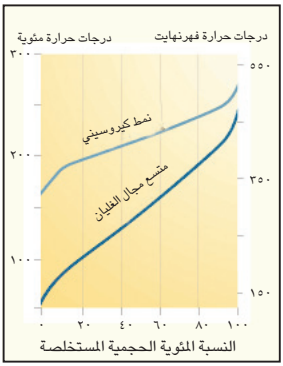
لأجـل ذلـك بـدأت القوى الجويـة بالعـودة إلى الوقود مـن النمـط الكيروسيني في سبعينات القرن الماضي، وقد تم التحول من الوقود متسع مجال الغليان (JP-4) إلى النوع الكيروسينـي (JP-8) واسع النظـام، كما استخدمت البحرية الأمريكيـة نوعاً من الوقود الكيروسينـي مرتفع نقطة الوميض (JP-5) ، على حامـلات الطائرات من أجل اعتبارات السلامـة منـذ مطلع خمسينـات القرن الماضـي. مع تطـور صناعة الطائـرات النفاثة التجارية في خمسينات القرن الماضي، تم اختيار الوقود الكيروسيني لملائمة مواصفاته. ومـع أن الوقود النفـاث واسع مجال الغليـان (Jet-B) لايزال مستخدمـا في بعض مناطق كنـدا وألاسكا شديدة البرودة لملائمته لذلـك ، إلا أن أصناف الوقود الكيروسيني تبقى هـي المهيمنة في بقية أنحاء العالم. يستخدم الوقـود (Jet- A) في الولايات المتحدة ، بينما يستخدم معظم ماتبقى من دول العالم الوقود (Jet A-1)، حيث يتمتع الوقود الأخير بنقطة تجمـد قصوى أقـل مما هي عليه بالنسبة للوقود الأول ٤٧°م تحـت الصفر للوقود (Jet A) و٤٠° م تحـت الصفر للوقود(Jet A-1) . ممـا يجعل الـوقود (Jet A-1) أفضل في حالة الرحلات الدولية الطويلة وخاصة في المسارات القطبية أثناء فصل الشتاء. يعود اختيار وقود الـ (Jet A) في الولايات المتحدة لانخفاض تكلفته وتوفره ، وقد أظهرت التجربة عبر السنين أنه مناسب للاستخدام في الولايات المتحدة وخاصة للرحلات الداخلية.

- **تكوين وقود الطائرات التوربيني**

يتكـون وقـود الطيران التوربيني مـن خليط لكثير من المركبـات الهيدروكربونيـة – أكثر من ألف مادة– يصعب فصلها بتقنيات التحليل الحديثة.

يـتراوح عـدد ذرات الكربون في مكونـات الوقود النفاث الكيروسيني ما بين ٨ و ١٦، بينما يتراوح عددها في الوقود النفاث واسع مجال الغليان ما بين ٥ إلى ١٥، ويظهر الشكل (١) منحنيات غليان نموذجية لكل من الوقود النفاث الكيروسيني والوقود النفاث واسع

مجـال الغليان. تحتوي معظم المركبـات الهيدروكربونية الموجـودة في الوقـود النفـاث على مركبـات بارافينية أو نفثينيـة أو عطرية. وتختلف مواد الوقود النفاث التي لها نفس النوع عن بعضها البعض بسبب احتوائها على نسب مختلفـة من هذه الأصناف الثلاثـة من المركبات، وذلك بحسب مواصفات كل صنف على النحو التالي:



شكل(١) منـحـنيـات تـقـطـير (D86)

*** نقطة الغليان والتجمد:**

ويلاحـظ ارتفاع نقطة الغليـان بازدياد عدد ذرات الكربون في مركبات الصنف الواحد. أما المركبات التي لهـا نفس عدد ذرات الكربون فيكون ترتيب ازديـاد نقطة الغليان في نفس الصنف على النحـو التـالي: آيزو بارافين ، بارافين نظامي (n-Paraffin)، نفثين ، وعطري ، جدول (٢). تـزداد نقطة التجمد بازدياد عدد ذرات الكربـون في كل صنف، لكنها تتأثر بقوة بشـكل الجـزيء. تتجمـد (تتبلور) البرافينـات النظاميـة والعطريات غـير المحتويـة على متبـادلات عند درجـات حـرارة أعلـى بكثـير مـن المركبات الأخـرى ذات نفس العدد مـن ذرات الكربـون بسبـب شكلها الهندسي الـذي يسمح لها بالتجمع مـع بعضهـا بسهولة ضمـن تركيب بلوري.

اسم المركب	صيغته	صنفه	نقطة غليانه	نقطة تجمده
أوكتان نظامي	C_8H_{18}	n- برافين	١٢٥,٧°م	-٥٦,٨°م
٢- ميثل الهبتان	C_8H_{18}	آيزوبرافين	١١٧,٦°م	-١٠٩°م
١-ميثل-١- إثيل حلقي البنتان	C_8H_{16}	نفثين	١٢١,٥°م	-١٤٣,٨°م
إثيل حلقي الهكسان	C_8H_{16}	نفثين	١٣١,٨°م	-١١١,٣°م
أورتوكزيلين	C_8H_{10}	عطري	١٤٤,٤°م	-٢٥,٢°م
بارا - كزيلين	C_8H_{10}	عطري	١٣٨,٤°م	+١٣,٣°م
سيس - ديكالين	$C_{10}H_{18}$	نفثين	١٩٥,٨°م	-٤٣°م
تترالين	$C_{10}H_{12}$	عطري	٢٠٧,٦°م	-٣٥,٨°م
نفثالين	$C_{10}H_8$	عطري	٢١٧,٩°م	+٨٠,٣°م
دوديكان نظامي	$C_{12}H_{26}$	برافين	٢١٦,٣°م	-٩,٦°م
٢- مثيل أونديكان	$C_{12}H_{26}$	آيزوبرافين	٢١٠°م	-٤٦,٨°م
١- إثيل نفتالين	$C_{12}H_{12}$	عطري	٢٥٨,٣°م	-١٣,٨°م
نظامي هكسيل البنزين	$C_{12}H_{18}$	عطري	٢٢٦,١°م	-٦١°م
هكساديكان نظامي	$C_{16}H_{34}$	n- برافين	٢٨٦,٩°م	+١٨,٢°م
مثيل بنتاديكان	$C_{16}H_{34}$	آيزوبرافين	٢٨١,٦°م	-٧°م
نظامي ديسيل البنزين	$C_{16}H_{26}$	عطري	٢٩٧,٩°م	-١٤,٤°م

جدول (٢) نقاط غليان وتجمد مركبات الوقود النفاث الهيدروكربونية.

*** محتوى المادة من الطاقة** : ويزداد للمركبات التي لها نفس عدد ذرات الكربون بالنسبة لوحـدة الـوزن لكل صنف، حيث يكون محتوى العطريات الأقل ثـم النفثينات ثم البرافينات الأعلـى، وعلى أساس حجمي يكـون الترتيب معكوساً، حيث تتمتـع البرافينات بأقل محتوى مـن الطاقة بينما تتمتع العطريات بأعلى محتوى من الطاقة. تنطبق هذه العلاقة على مواد الوقـود ، فمواد الوقود الأخف (الأقل كثافـة) ، مثل الجازولين، تتمتع بقيم حرارة أعلى على

أساس وزني، بينما تتمتع مواد الوقود الأثقل (الأعلى كثافة)، مثل الديزل، بقيم حرارة أعلى على أساس حجمي.

* **اللزوجة** : وترتبط بعدد ذرات الكربون أكثر من ارتباطها بصنف الهيدروكربون. فمن أجل عدد ذرات كربون معين، تتمتع النفثينات بصورة عامة بلزوجة أعلى بقليل مما هي عليه في البارافينات أو العطريات. ويلخص الجدول (٣) العلاقة بين صنف الهيدروكربون وخصائص الوقود النفاث الحاوي عليه. فيلاحظ أن البرافينات النظامية تتمتع بمحتويات طاقة حجمية قليلة وبخصائص تدفق ضعيفة جداً تحت

خاصية الوقود النفاث	بارافين نظامي	آيزو بارافين	نفثين	عطري
محتوي الطاقة وزنياً	+	+	O	−
محتوى الطاقة حجمياً	−	−	O	+
جودة الاحتراق	+	+	+	−
السيولة تحت درجات حرارة منخفضة	−−	+/O	+	−/O

(+) تأثير مفيد، (−) تأثير ضار، (O) تأثير محايد أو بسيط.

جدول (٣) درجة مساهمة كل صنف هيدروكربوني في خصائص مختارة للوقود النفاث.

درجة حرارة منخفضة. بينما تتمتع العطريات بمحتويات طاقة حجمية جيدة جداً، ولكن جودة احتراقها منخفضة ، وخصائص تدفقها ضعيفة تحت درجات حرارة منخفضة. أما الآيزوبرافينات والنفثينات فتتمتع بخصائص متوسطة تقع بين تلك الخاصة بالبرافينات النظامية والعطريات.

- **التكرير**

يتم تكرير وقود الطيران التوربيني (Aviation Turbine Fuel Refining) من البترول باستخدام طريقة فيشر - تروبش، وتشمل أهم منتجات تكرير خام البترول: وقود النقل (الجازولين والوقود النفاث ووقود الديزل وجازولين الطائرات)، وغاز البترول المسيل (LPG)، ووقود التسخين، وزيت التزليق، و الشمع، والأسفلت.

- **المادة الخام** (Raw Material)

وهي عبارة عن خامات بترولية عالية الوزن النوعي تحتوي على كميات أكبر من المنتجات الخفيفة وكميات أقل من الكبريت والنيتروجين ، مما يجعلها سهلة التكرير . وبصورة عامة تتألف كل أنواع النفط الخام بالدرجة الأولى من هيدروكربونات بارافينية ونفثينية وعطرية ، وتحتوي كل طائفة من هذه المركبات على مجال واسع جداً من الأوزان الجزيئية.

* **عمليات التكرير** (Refining Processes) : وتنقسم إلى ثلاثة أقسام:

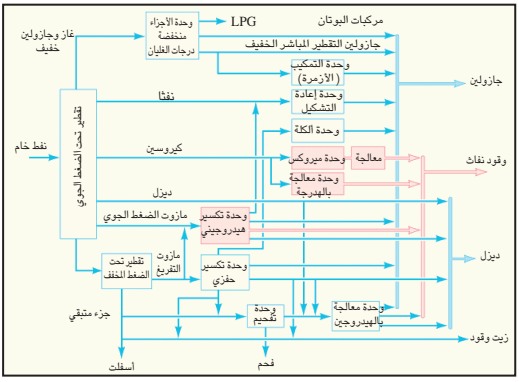
- **عمليـات الفصل** : (Separation Processes) : وتعـد عملية التقطير أكثرها شيوعاً، حيث يتم فصل لقيم هذه العمليات إلى مكونين أو أكثر بالاعتماد على بعض الخصائص الفيزيائية، مثل درجة الغليان.

- **عمليـات التحسـين** (Upgrading Processes): حيـث يتم تحسـين نوعية المادة من خـلال تفاعـلات كيميائية لنـزع أي مركبات موجودة بكميات نـزرة غير مرغوب فيها. ومن عمليات التحسين الأكثر شيوعاً المستخدمة للوقود النفاث عملية التحلية، والمعالجة بالهيدروجين، والمعالجة بالصلصال.

- **عمليـات التحويـل** (Conversion Processes) : حيـث يتم تغيير التركيب الجزيئي للّقيـم ، عـن طريق تكسـير الجزيئات الكبـيرة إلى جزيئـات صغيرة ، مثـل: التكسير الحفزي،والتكسير الهيدروجيني.

• التكرير الحديث

تتم عمليـات التكرير الحديث (Modern refining)، بتقديم النفط الخام إلى عمود التقطـير حيث يتم فصل منتجات التقطير المباشر وهـي: الجازولين الخفيف والثقيل، والكيروسـين، والديزل وذلك تحت الضغط الجوي ، شـكل (٢) . ويتم تقطير المنتجات السفليـة الموجودة في عمود الضغط الجوي تحت ضغط منخفض للحصول على المازوت (gasoils) كلقيـم للتكسـير الحفـزي المائـع (FCC) أو للتكسـير الهيدروجيني. ويمكن معالجـة المـازوت هيدروجينياً لخفض مستويـات الكبريـت والنيتروجـين فيـه لتحسـين أداء عمليـات الـ (FCC). يمكـن للوقـود النفـاث المنتج بواسطـة المصفـاة أن يكـون بكاملـه منتـج تقطـير مباشر أو منتـج نـاتج عـن المعالجـة الهيدروجينيـة، أو أن يكـون



شكل (٢): رسم تخطيطي لمصفاة حديثة.

ناتجاً عن خلط منتج التقطير المباشر مع منتج المعالجة الهيدروجينية أو منتج التكسير الهيدروجينـي. كمـا يمكن إضافة كميـات قليلة من مكونات الجازولـين الثقيل. ويمكن لكيروسـين التقطير المباشر الناتج عـن نفط خام قليل محتوى الكبريت أن يحقق جميع مواصفـات الوقود النفاث. إلا أن كيروسين التقطير المباشر يتم تحسينه عادة بمعالجة ميروكـس (Merox)، المعالجـة بالطـين، أو بالمعالجة الهيدروجينية قبـل أن يباع على هيئـة وقود نفـاث. ويجب على المكررأن يقـوم بخلط المنتجات المتوفـرة بهدف التوصل إلى كل متطلبات الأداء والمتطلبات الاقتصادية. وقد تم تطوير برامج حاسوبية متطورة لتقدير وضبط عمليات التكرير بما في ذلك مرحلة الخلط النهائي.

• خصائص الأداء

بما أن الوظيفة الأساسية لوقود الطيران التوربيني (الوقود النفاث) هي تقديم الطاقة للطائـرة فإن محتوى الطاقة وجودة الاحتراق سيمثـلان مفتاح خصائص أداء الوقود. وتوجد أيضاً خصائص أداء مهمة أخرى مثل الثبات، التزليق، السيولة، قابلية التطاير، عدم قابلية التآكل والنظافة. وإضافة إلى كونه مصدراً للطاقة، يستخدم الوقود كسائل هيدروليكي في أنظمة التحكم بالمحرك وكمبرد لبعض مكونات نظام الوقود.

* **محتوى الطاقة** (Energy Content): وهي عبارة عن الحرارة الصادرة عن احتراق كمية معلومة من الوقود تحت ظروف نوعية خاصة نوعية). وتعتمد كمية الحرارة الناتجة على الماء المتشكل خلال عملية الاحتراق. فإذا كان الماء قد تكثف إلى الطور السائل معطياً حـرارة التبخر، فإن الطاقة المتحررة في هذه العلمية تدعى محتوى الطاقة الإجمالي. أما إذا بقـي الماء على هيئة غازية، فإن محتـوى الطاقة الصافي يكون أقل من ذلك. وبما أن المحركات تطرح الماء على هيئة بخار فإن محتوى الطاقة الصافي هو القيمة المناسبة التي يمكـن أن نقـارن بواسطتها أنواع الوقـود. يمكن التعبير عن محتـوى الطاقة إما بطريقة وزنيـة (الطاقة الناتجة عـن حرق وحدة وزن من الوقـود)، أو بطريقة حجمية. ووحدات القياس الدوليـة المستخدمة هي: ميجا جول/كيلوجـرام (MJ/kg)، وميجا جول/ لتر (MJ/L). في الولايـات المتحـدة، الوحـدة الوزنيـة هي الوحدات الحراريـة البريطانية لـكل رطل إنجليزي ((Btu / lb)، والوحدة الحجمية هـي الوحدات الحرارية البريطانية لـكل جالـون (Btu / ga). وبما أن محتوى المركبـات الهيدروكربونية من الطاقة يختلف

فيما بينها ، فإن تكوين الوقود النفاث له بعض التأثير على محتوى الطاقة. ويمكن التنبؤ بهذا التأثير من خلال كثافة الوقود التي تختلف أيضاً تبعاً لتكوينه . وبصورة عامة تتمتع أصنـاف الوقود النفاث الأقل كثافة بمحتوى طاقة وزني أعلى، أما أصناف الوقود النفاث الأكـثر كثافة فتتمتع بمحتوى طاقة حجمـي أعلى، وكوقود للطائرات يفضل الوقود الأعلى كثافـة ذو المحتـوى الطاقي الحجمي الأعلـى ، أو الوقود الأقل كثافـة ذو المحتوى الطاقي الوزني الأعلى . ويساعد الوقود الأول على الطيران لفترات زمنية أطول.

* **مميـزات الاحـتراق** (Combustion Characteristics) : وتتحقـق بضبـط تدفق الوقـود ، وذَرّهِ لجعـل كفـاءة الاحـتراق أعظم مايمكـن، وإنتاج أقل كميـة من الدخان والرواسـب الكربونيـة، والغـازات المؤكسـدة جزئياً مثـل أول أكسيد الكربـون، وكذلك شـدة الإشعـاع المنبعث من اللهب حيث يؤثر نوع الوقود على كل ذلك. تتشكل في المحرك النفاث أثناء عملية الاحتراق دقائق صغيرة محتوية على الكربون . تستمر هذه الدقائق بالاحتراق طالما أنها تمر عبر اللهب ويتم استهلاكها كلياً تحت ظروف مناسبة . ويؤدي توهـج هذه الدقائق في قسم الاحتراق إلى إطلاق أشعة تحت حمراء يسبب امتصاصها مـن قبل جـدران الحارق حـدوث شقوق وإخفاقـات مبكرة للمحرك . كمـا يمكن لهذه الدقائـق - إن لم يتـم استهلاكها كلياً من قبل اللهب - أن تكون خطـرة إذا اصطدمت أو لامسـت شفرات التوربين والأجزاء الثابتة من المحـرك ، مما يسبب تآكلها . كما يمكن لرواسب الكربون أن تسد فتحات جدار الحارق التي تؤمن هواءً ممدداً لقسم الاحتراق ممـا يؤدي لإحداث فوضى في نمط تدفق منتجـات الاحتراق. تشكل مواد الوقود الغنية بالمحتـوى العطري - خاصـة الوقود الغني بالنفثالينات - كميـات أكثر من هذه الدقائق المحتويـة علـى الكربون . وبمـا أن هذه الدقائق ذات خطر كبير لـذا يتم ضبط المحتوى العطـري ومحتوى النفثالينات الإجمـالي للوقود النفاث . ويؤدي المـزج الأفضل للوقود والهواء إلى حدوث احتراق أكمل وأفضل، وبالتالي خفض كمية الكربون.

* **الثبـات** (Stability) : وهـو عبـارة عن ثبـات خصائص الوقود، إمـا أثناء التخزين أوأثنـاء الاستعمـال، أي أن الوقـود الثابت هـو الوقود الذي لاتتغـير خصائصه عندما يتعرض لدرجات حـرارة مرتفعة في المحرك (ثبات حـراري) . ينتج عدم ثبات الوقود النفـاث عن التفاعلات الكيميائية متعـددة الخطوات ، مثل تفاعلات الأكسدة . وتكون

منتجـات التفاعـل الأولية عبـارة عن هيدروبيروكسيـدات وبيروكسيـدات، وتبقى هذه المنتجـات ذائبة في الوقود، لكنهـا قد تهاجم وتخرب بعض إلاستوميرات نظام الوقود . كمـا تؤدي تفاعلات أخـرى إلى تشكل أصماغ ذوابة ودقائق غير ذوابة يمكنها أن تسد مصـافي الوقود وأن تترسب على سطوح أنظمة وقود الطائـرة ، مؤدية إلى تضييق هذه المسارات، ولتحسين ثبات الوقود يضاف له مواد مانعة للتأكسد.

* **التزليقية** (Lubricity): وهي عبارة عن:

– تزليق هيدروديناميكي: وفيه تقوم طبقة المزلق الرقيق بمنع السطوح المتحركة المتقابلة مـن التماس فيمـا بينها. وتوفر السوائـل ذات اللزوجة الأعلى تزليقـاً هيدروديناميكياً أكـبر، مقارنة بمـا توفره السوائـل ذات اللزوجة المنخفضة. تصمم المحـركات النفاثة للعمـل على مـواد وقود نفاث ضمـن مجال لزوجة عاديـة ، وبالتالي توفر مـواد الوقود النفاث النموذجية تزليقاً هيدروديناميكياً مناسباً.

– تزليـق رقيق: ويصبح مهماً عند فشل التزليـق الهيدروديناميكي ، والمزلقات الرقيقة عبـارة عن مركبات تشكل بالتصاقها على السطوح المعدنية طبقة واقية مضادة للتآكل، ويعـد الوقـود النفاث الناتج عن التقطـير المباشر (اللاتكسيري) مزلقـاً رقيقاً جيداً ، بسبـب احتوائه على كميات نزره من مركبات محتوية على أكسجين ونيتروجين وكبريت . ويـؤدي إضافـة كمية ضئيلة ـ تصل إلى عشرة اجزاء مـن مليون ـ من مضاف محسن للتزليق إلى وقود ضعيف التزليق إلى أن يصبح تزليقه مقبولاً.

* **السيولـة** (Fluidity): وهـي تدفـق الوقـود بحرية من خزانات الوقـود الموجودة في الأجنحـة إلى المحرك من خلال نظام وقود الطائرة، ونظراً لأن الوقود النفاث يتعرض إلى درجـات حرارة منخفضة جداً عند ارتفاعات عالية، وخاصة عند المسارات الجوية القطبيـة في أوقات الشتاء، وكذلك على الأرض في المناطق شديدة البرودة، فإنه يجب أن يحتفـظ بسيولته في جميـع هذه الحالات وتحت هذه الظـروف، وإلا فإن تدفقه إلى المحـركات سوف يتناقص أو يتوقف، لذلك يجب أن تحتـوي مواصفات الوقود على حد علوي للزوجة ، وعلى نقطة تجمد منخفضة مناسبة.

* **التطايريـة** (Volatilit): وهـي قدرة الوقـود على التبخر قبل حرقه ، ومـع أن ميل الوقود للتطايـر يـؤدي لزيادة تبخره من الخزانـات الأرضية وخزانات الطائـرات ، كما يؤدي لازدياد

اشتعاليتـه وخطورتـه داخل أو خارج الخزان. فـإن التطايرية تعد من أهـم الفروق بين الوقود النفـاث الكيروسيني والوقود النفاث واسع مجال الغليان، حيث يعد الوقود النفاث الكيروسيني عمليـاً غـير طيار ، فهو يتمتع بضغـط بخار رايد (Reid) مقـداره ١ كيلو باسكال (Kpa) (أي ٠.14 psi)، أمـا الوقود النفاث واسع مجـال الغليان فيتمتع بضغط بخار رايد مقداره ٢١ كيلو باسكال (أي 3 psi). ويعتبر الوقود النفاث واسع مجال الغليان مناسباً أكثر لاستخدامات المناخ البارد بسبب تمتعه بلزوجة ونقطة تجمد أقل مما هو عليه الوقود النفاث الكيروسيني.

* **منـع التآكليـة** (Corrosivity): حيث يجـب أن لايؤدي تماس الوقود لتـآكل أي من مواد أنظمـة وقود الطائرة . وفي الحالة النموذجية تستخدم خزانات وقود من الألمنيوم . كما تحتوي أنظمـة الوقود أيضـاً على الفولاذ ومعادن أخـرى . كما يمكن لخزانات الوقـود أن تحتوي على مـواد مانعة للتسرب، وطـلاءات. ويقوم صانعو الهيكل والمحرك باختبـار مكثف على أي مادة قبـل الموافقة على استخدامها في نظام الوقود لمعرفة مـدى انسجامها مع هذا الوقود. من أهم المركبـات الأكالة الموجـودة في الوقود النفاث الأحماض العضوية والمركبتانـات، وتضع جميع المواصفـات أرقامـاً حديـة لهذه المركبـات بسبب ضررهـا . يسبب الكبريت الموجـود في جميع المركبـات العضوية تآكل شفرات العنفة عند درجة حـرارة مرتفعة ، وخاصة بوجود الصوديوم . كمـا تسبب تـآكلاً عاماً حتى عند تراكيـز منخفضة، مما يؤكد الحاجـة لنزعها بالكامل من الوقود.

- **نظافة الوقود**

تعنـي نظافـة الوقـود (Fuel Cleanliness) غياب الدقائق الصلبـة ، والماء الحر مـن الوقود ، حيث يمكن للدقائـق والصدأ والأوساخ أن تؤدي لانسداد مرشحات الوقود وزيادة إجهاد مضخة الوقود ، ولذلك يتم تنظيف الوقود وفقاً لما يلي:

* **فصـل المـاء** (Water separation): حيـث يدخل الماء في وقـود الطائرات من عدة مصادر خاصة نتيجة لتكثف الرطوبة عليه عندما يكون بارداً . ويشكل الماء الحر أو غير الممتـزج خطراً كبيراً في الطائرات، حيـث إنه يتجمد عند درجات حرارة تقل عن صفر مئويـة، ممـا يؤدي إلى سد الفتحات أو المصافي أو المرشحـات . كما أن وجود الماء يقود إلى نمـو الميكروبات في الأجزاء الراكدة من نظـام الوقود، لذلك يبذل جهد كبير لنزع كل المياه غير الممتزجة بواسطة فواصل ترشيح قبل تعبئة الطائرة بالوقود.

* **تثبيـط النمـو الميكروبـي** (Microbial Growth lnhibition) : وذلـك بإزالـة الكائنات الدقيقـة الحية (بكتيريا وفطريات) الموجودة بصورة دائمة في الهواء والماء. وتعـد المـواد الصلبة المتشكلـة بواسطة النمو الحيـوي شديدة الفعاليـة في سد مصافي الوقود. كمـا تولّد بعض الكائنات الدقيقة الحية منتجات ثانوية حمضية يمكنها تسريع تـآكل المعدن. وبما أن معظم الكائنات الحية تحتـاج إلى مياه حرة لكي تنمو، فإن النمو الحيـوي يتركز عادة في المنطقة بين سطحي الماء والوقود. وتتغذى هذه الكائنات الحية علـى الوقود والماء ومغذيات أساسية محددة مثل الفوسفور الذي يجب خفضه للحد من النمـو الحيوي. كما تشجع درجات الحرارة فوق العادية على النمو الحيوي. تعد الوقاية أفضل وسيلة للحد من التلوث الميكروبي، وذلك بجعل كمية الماء الحر في خزانات الوقود أقل ما يمكن. أما عندما تكون نسبة الكائنات الحية مرتفعة، فإنه يمكن استخدام مادة متلفـة للحياة (biocide) تحت ظروف محددة. مع نـزع الكتلة الحية المتجمعة لتجنب انسداد المرشحات.

• مضافات الوقود النفاث

يتـم إضافة بعض المـواد بصورة إجبارية، وبعضها بصـورة اختيارية. ويبين الجدول (٤) قائمـة بالمـواد المضافة التي ينصح باستخدامها في بعض مواصفات الوقود النفاث الرئيسـة. يعـد استخدام المواد المضافة الاختلاف الأساسي بـين الوقود النفاث التجاري والوقود النفاث الحربي. يحتوي الوقود النفاث الحربي الأمريكي على ثلاث مواد مضافة أو أكـثر ، أمـا الوقود الدولي النفـاث (Jet A-1) فيضاف إليه مبـدد إستاتي (Static Dissipator) ، كمـا يمكـن أن يحتوي أيضاً على مضاد أكسـدة. من جانب آخر لايحتوي الوقود النفاث (Jet A) عادة على أي مضاف، وأحياناً يحتوي فقط على مضاد أكسدة.

نوع المادة المضافة	Jet A (ASTM D1655)	Jet A-1 (DEF STAN 91-91)	JP- 4 (MIL-DTL 5624)	JP- 5 (MIL-DTL 5624)	JP- 8 (MIL-DTL 83133)
مانع أكسدة	مسموح	مطلوب**	مطلوب**	مطلوب	مطلوب**
مثبط المعدن	مسموح	مسموح	بالاتفاق	بالاتفاق	بالاتفاق
موصلية كهربائية/مبدد إستاتي	مسموح	مطلوب	مطلوب	بالاتفاق	مطلوب
مانع التآكل/محسن إنزلاق	غير مسموح	بالاتفاق	مطلوب	مطلوب	مطلوب
مانع تجمد نظام الوقود	بالاتفاق	بالاتفاق	مطلوب	مطلوب	مطلوب
مبيد حيوي	بالاتفاق	بالاتفاق	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح
مثبت حراري	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح	غير مسموح ++

** تعني أنه مطلوب في أي وقود أو مكون وقودي أجريت عليه عملية هدرجة، وإلا فإنه اختياري.
++ عند استخدام مضاف التثبيت الحراري في الوقود JP-8 يطلق عليه إسم JP-8+100.

جدول (٤) أنماط المضافات الموافق عليها في الوقود النفاث.

* **مانـع تجمـد نظام الوقود** : يمكن للجليـد أن يتشكل في خزانات الوقود عند درجات الحـرارة شديدة الانخفاض عند الارتفاعات العالية ، وينتج ذلـك من الماء الذائب في الوقود. وتحتوي معظم الطائرات التجارية على مسخنات عند المرشحات الرئيسة للوقود مـن أجل صهر أي جليد متشـكل. ومع ذلك فإن العديد مـن الطائرات الحربية لاتحتوي علـى هـذه المسخنات ممـا يجعلها معرضـة لانخفاض تدفـق الوقود عند تشـكل بلورات الجليـد. لذلك تستخدم مواد مانعة لتجمـد الوقود تقوم بخفض نقطة تجمده. ويستخدم ثنائـي إثيلين جليكـول أحادي ميثل إيثر (di-EGME) كمانـع لتجمد وقود الـ (Jet A ، Jet A-1) ، والوقـود الحربـي الأمريكـي. وتستخدم مادة مشابهة هـي الإيثلين جليكول أحـادي إثيل إيثر في الوقـود الروسي TS-1. كما تضاف مادة الإيثلين جليكول ثنائي مثيل إيـثر (١ ، ٢- ثنائي ميتوكسي الإيثان) وبتركيـز يتراوح بين ٠,١-٠,١٥٪ حجماً. وتكمن المشكلـة الأساسية لهذه المضافات في إمكانية استخلاصهـا بواسطة الماء الحر. ولتجنب تماسها مع الماء تتم إضافتها للوقود في المطار أو أثناء تزويد الطائرة بالوقود.

* **مثبتـات حراريـة**: يستخـدم الوقـود النفاث كوسيلـة تصريف حراريـة في المحركات التوربينيـة. وتعاني المحـركات المستخدمة في الطائرات الحربية عاليـة الأداء من إجهاد حـراري مرتفـع على الوقـود. لذلك بدأت القـوى الجوية الأمريكية في مطلـع التسعينات برنامجاً لتطوير وقود ذي ثبات حراري محسن بإدخال مجموعة مضافات تحسن الثبات الحـراري للوقود بمقدار ٥٥م° تقريباً من ١٦٣°م إلى ٢١٨°م . يعرف المضاف المستخدم باسـم (100+) ويسمـى وقود القوى الجويـة الأمريكي الحاوي على هـذا المضاف باسم (JP8 +100).

* **مضـادات أكسـدة** : يتطلب الوقود المعالج بالهيدروجـين لنزع المركبتانات (مضادات الأكسـدة الطبيعية الموجـودة في الوقود) إضافة مضادات أكسـدة، وذلك بعد معالجته بالهيدروجـين. وهـذه المضادات عبـارة عن فينولات معاقـة ثانوية وثالثيـة تكون فعالة بالدرجـة الأولى أثنـاء تخزينها وليس خـلال استخدامها تحت درجة حـرارة مرتفعة. تسمح مواصفات الـ (ASTM) باستخدام هذه المضادات ويبلغ العيار الأقصى المسموح باستخدامه منها ٢٤ملجم/لتر.

* **مخمـدات المعـدن** : وتستخدم بهدف جعل المعادن النزرة غير فعالة كيميائياً ، وذلك

بتخليبهـا وتحويلهـا إلى معقدات ثابتة، والمخمـد الوحيد المتفق علـى استخدامـه هـو: N. N ـ ثنائـي ساليسيليديـن -١، ٢- ثنائي أمينو البروبان. ويسمح باستخدامه بتركيز أقصى ٥,٧ملجم/لتر، إلا أنه لا يستخدم إلا نادراً.

* **مثبطات التآكل ومحسنات التزليق:** وهي أحماض ثنائية القاعدة، تعمل كمثبطات صـدأ في الطور السائل، وتمنع الماء الحـر والأكسجين الموجودين في الوقود من أن يؤديا إلى صـدأ أو تـآكل الخزانـات والأنابيب. وتضـاف محسنات التزليـق أحياناً في المطار مباشـرة قبل تزويد الطائرة بالوقود. تبنى خزانات وخطوط أنابيب نظام توزيع الوقود النفاث في البداية من حديد غير قابل للصدأ ودون طلاء.

* **محسنـات الناقليـة الكهربائية:** حيث يكون المضافان المتفق على استخدامهما هما (Shell ASA3) و (Du Pont Stadis 450)، ويستخدمـان بنسـب ١ملجم/لتـر لـلأول، و ٣ملجم/لـتر للثاني كحد أقصى. ويؤخذ بالاعتبار عند اختيار نسبة الإضافة ازدياد ناقلية الوقود عند ارتفاع درجة حرارته والعكس عند برودته.

* **مضافـات متلفـة للحياة:** يمكن للكائنات الدقيقـة التي تتفاعل حيوياً مع المركبات الهيدروكربونيـة أن تتواجد في كل من أنظمة الوقود الأرضية أو أنظمة وقود الطائرات. وتتسبـب بعض الجراثيـم اللاهوائيـة التـي تقـوم بإرجـاع الكبريتـات إلى كبريتيـد الهيدروجـين بتآكل النحاس والفضة. كما يسبـب تشكل الأوحال، والطلاءات الفطرية، والمنتجات الثانوية الأكالة التي تؤدي لتآكل خزان الجناح، وإلى تعطل مقياس السعة. تعد مـادة (U.S. Borax Biobor JF) المـادة الوحيـدة الذوابة في الوقود المتلفة للحياة، والتـي يسمـح بها بصورة عامـة، وهـي خليط مكون من ٩٥٪ مـن الديوكسابورينـان (dioxaborinanes) و ٥٪ نفثـا. والعيـار الـذي ينصـح باستخدامه لقتـل الكائنات الدقيقة الحية هو ٢٢٦ملجم/لتر، أما العيار المستخدم للوقاية فهو ١٠٨ملجم/لتر.

* **مضافات مانعة للضباب:**

وهـي تمنع تشكل قطيرات الوقود الدقيقة اللهوبـة أثناء تحطم الطائرة مما يؤدي لخفضـ حدة الحريق. ولاتزال هذه المضافات في أطوار التجربة. وأفضل ما تم تحقيقه باستخـدام مادة (ICI. FM-9) وهي عبارة عـن بوليمر مرتفع الوزن الجزيئي وبعيار أقـل من ٠,٥٪ حجماً. وعلى الرغم من الحصول علـى خصائص مانعة للضباب إلا أن

مشاكل الاستخدام لاتزال مستمرة.

• استهلاك الوقود النفاث

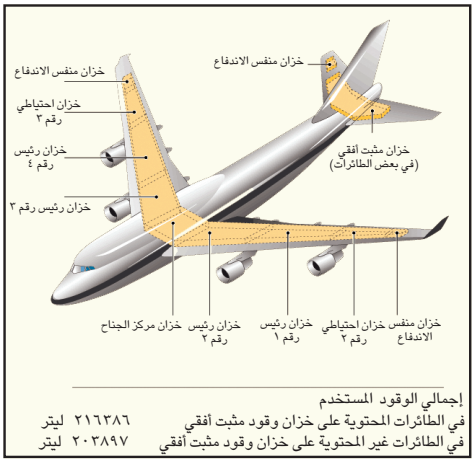
ازداد استهـلاك الوقود النفاث في الولايـات المتحدة أكثر من الضعف خلال الـ ٢٥ سنـة الماضيـة ، وذلك من ٣٢ مليون جالـون يومياً عـام ١٩٧٤م ، إلى ٧٠ مليون جالون يوميـاً سنـة ١٩٩٩م ، وقـد حدثت غالبية هذه الزيـادة منذ سنـة ١٩٨٤م. وفيما يتعلق بالاستخـدام العالمي للوقود النفاث فإن المعلومات تقتصر فقط على الفترة الواقعة بعد سنـة ١٩٨٩م، فقد وصل الاستهلاك العالمي عـام ١٩٩٨م إلى حوالي ١٧٨ مليون جالون يومياً ، أي بزيادة مقدارها حوالي ١٣٪ عما كانت عليه سنة ١٩٩٠م . ويعتبر استهلاك الولايات المتحدة الأكبر ويبلغ حوالي ٣٨٪ من الاستهلاك العالمي.

خزانات الوقود

تخزن الطائرات التجارية الوقـود في أجنحتها، ويظهر الشكل (٣) ترتيب خزانات الوقـود في طائـرة بوينغ (٧٤٧-٤٠٠) ، حيث يوجد خزانـان رئيسيان وخزان احتياطي واحد في كل جناح إضافة إلى خزان الجناح المركزي في جذع الطائرة. كما تتمتع بعض طائرات البوينغ (٧٤٧-٤٠٠) أيضاً بخزان وقود إضافي في المثبت الأفقي للذيل.

وقود الطائرات المستقبلي

يمكـن التفكـير علـى المـدى البعيـد بأنواع الوقـود الصاروخي مثـل الهيدرجـين السائـل أو الميثـان السائـل. ويتميـز كلاهما بخصائـص احتراق ممتـازة، إلا أنهـا تتطلـب أنظمة توزيـع وطرق تعامل أرضـي جديدة كلياً، إضافة إلى طائرات مختلفة جذرياً. يتميز الهيدروجين بكونـه متاحاً بصورة غـير محـدودة إلا أنـه يتطلـب معدات تصنيع جديدة.



شكل (٣): ترتيب خزانات الوقود في طائرة بوينغ (400 -747).

مع تحيات اللجنة الإعلامية
معهد بحوث البتروكيماويات
مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية
ص.ب ٦٠٨٦ الرياض ١١٤٤٢
هاتف / ٤٨٨٣٧٧٩ - فاكس / ٤٨١٣٦٧٠

مدينة الملك عبدالعزيز
للعلوم والتقنية KACST

مطابع مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية

رقم الوثيقة : 14P0017-BKT-0001-AR02