مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (31) العدد (5) 2009
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (31) No. (5) 2009

المشاكل المرافقة لاستخدام الفيول الثقيل على السفن في تشغيل محركات الديزل

الدكتور بسام حمود*

(قُبِل للنشر في 2009/4/20)

□ الملخّص □

يعتبر الوقود من أهم العوامل التي تحدد التكاليف الاستثمارية للسفينة، وهو يشكّل أحد الأسباب المهمة لحدوث مشاكل لدى استثمار المحرك. لتشغيل محركات السفن يسود استخدام الفيول بسبب رخصه النسبي، لكن ذلك يسبب مشاكل عديدة مرتبطة بصعوبة معالجته ورداءة مواصفاته. ويُتَوقع مستقبلاً استمرار انخفاض مواصفات الفيول بسبب ارتفاع نسبة المواد الخفيفة التي تنتجها أجهزة تكرير النفط الحديثة عبر استخدام التحطيم الحراري والتحفيزي، وما يرافق ذلك من تردٍّ في مواصفات بقايا التكرير التي تشكل الجزء الأكبر من الفيول.

لذلك خُصِّص هذا البحث لعرض أهم المشاكل الناتجة عن استخدام الفيول في محركات السفن بدءاً بالتخزين والتنقية، مروراً بالنقل بين الخزانات المختلفة، وصولاً إلى حقن الفيول وحرقه في المحرك.

في نهاية البحث اقترحت توصيات لمواجهة المشاكل المعروضة وقواعد دقيقة للتعامل مع الفيول، إذا تم تطبيقها فإنه يمكن تحقيق الوفر المنشود باستخدام هذا الوقود الرخيص، وتكييف محركات الديزل البحرية مع الظروف المتغيرة الناشئة.

الكلمات المفتاحية: محركات الديزل البحرية، الفيول، معالجة الوقود

(دراسة مرجعية غير محكّمة)

* أستاذ مساعد – قسم الهندسة البحرية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية –جامعة تشرين – اللاذقية– سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (31) العدد (5) 2009
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (31) No. (5) 2009

Problems of Heavy Fuels on Ships for Operation of Diesel Engines

Dr. Bassam Hammoud*

(Accepted 20 / 4 / 2009)

□ ABSTRACT □

Fuel is one of the main factors affecting the running costs of the ship and the engine operating. In ship operation, heavy fuel often dominates due to its relatively low costs, despite the problems related with its treatment complexity and bad combustion properties. It is expected further worsening of fuel properties in future because of the increase of the ratio of light products in modern refineries and deteriorating of residual fuel parameters. Therefore, this paper outlines the most problems resulting from the use of residual fuels on ship and in the engine. As conclusion, the paper suggests recommendations for facing the mentioned problems and put correct rules for the handling with fuels and adaptation of the marine diesel engines with the variable conditions.

Key words: Marine diesel engines – Residual fuels, fuel treatment.

* **Associate Professor , Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering , Tishreen University, Syria.**

مقدمة:

قبل الخوض في المشاكل المرافقة لاستخدام الفيول *fuel* في محركات السفن يجب أولاً إيضاح المقصود به. **الفيول** هو مزيج من الزيوت المتبقية *residual oils* التي تظل في وحدة تكرير النفط بعد التقطير، وهو يتضمن بالدرجة الأولى مركبات هيدروكربونية تتميز بارتفاع درجة حرارة غليانها. وتتنوع مواصفات الفيول بشكل كبير تبعاً لمصدر النفط الخام المُنتَج منه ولأساليب التكرير المستخدمة. وثمة توجه كبير إلى تكثيف عمليات تقطير النفط ورفع نسبة المستقطرات. فبينما تبلغ نسبة الزيوت المتبقية عند استخدام طرق التكرير التقليدية عند الضغط الجوي *32* إلى *57%* ، فإنها تتراوح عند استخدام الطرق الحديثة بين *12* و *25%* [1]. ومما يزيد من رداءة مواصفات هذه الزيوت المتبقية خلطها بزيوت التزليق المنتهية فعاليتها وبالمذيبات العضوية أو البقايا الكيميائية. ورغم ذلك فإن لهذا القيول جاذبية اقتصادية بسبب رخصه، مقارنةً ببقية نواتج التكرير (البنزين أو المازوت مثلاً)، ولذلك يلجأ إلى استخدامه لتشغيل محركات السفن بعد مزجه بمركبات خفيفة بقصد الحصول على لزوجة محددة للمركب الناتج. وتراوح لزوجة الفيول بين *4.5* و *55 mm^2/s (cSt)* عند الدرجة *100°C*، وقد تم تصنيفه من قبل الهيئة الدولية للمقاييس وفق *ISO 8217* منذ عام 1987 ، كما قامت الهيئة الدولية لآلات الاحتراق *CIMAC*[*] بتقسيم الفيول إلى أصناف *grades* متعددة. لهذا فإنه لدى تزويد السفينة بالوقود، يجب الاسترشاد بتعليمات منظمات المقاييس العالمية مثل *ISO8217* و *BS6843* وبالنصائح الموضوعة عام *2001* في *CIMAC* بخصوص أصناف الوقود الثقيل. ووفقاً لهذه المعطيات فإن أردأ مواصفات يمكن قبولها هي للصنفين *RMH55* (حسب *ISO8217*) و *K55* (حسب *CIMAC*) كما هو مبين في الجدول (1).

الجدول (1) المتطلبات القياسية للوقود البحري الثقيل

Requirements (1990) for residual fuels for diesel engines (as delivered)

Designation:			CIMAC A10	CIMAC B10	CIMAC C10	CIMAC D15	CIMAC E25	CIMAC F25	CIMAC G35	CIMAC H35	CIMAC K35	CIMAC H45	CIMAC K45	CIMAC H55	CIMAC K55
Related to ISO 8217 (87):		F –	RMA 10	RMB 10	RMC 10	RMD 15	RME 25	RMF 25	RMG 35	RMH 35	RMK 35	RMH 45	RMK 45	RMH 55	–
Characteristic	Dim.	Limit													
Density at 15 °C	kg/m³	max	950	975		980	991		991		1010	991	1010	991	1010
Kinematic viscosity at 100 °C [1])	cSt[2])	max	10			15	25		35			45		55	
		min[4])	6				15								
Flash point	°C	min	60			60	60		60			60		60	
Pour point	°C	max	0 / 6 [3])		24	30	30		30			30		30	
Carbon Residue	% (m/m)	max	12		14	14	15	20	18	22		22		22	
Ash	% (m/m)	max	0.10			0.10	0.10	0.15	0.15			0.15		0.15	
Total sediment after ageing	% (m/m)	max	0.10			0.10	0.10		0.10			0.10		0.10	
Water	% (V/V)	max	0.50			0.80	1.0		1.0			1.0		1.0	
Sulphur	% (m/m)	max	3.5			4.0	5.0		5.0			5.0		5.0	
Vanadium	mg/kg	max	150		300	350	200	500	300	600		600		600	
Aluminium + Silicon	mg/kg	max	80			80	80		80			80		80	
Ignition properties			see appendix, section 3												

[1]) Approximate equivalent viscosities (for information only):

Kinematic viscosity (cSt) at	100 °C	6	10	15	25	35	45	55
Kinematic viscosity (cSt) at	50 °C	22	40	80	180	380	500	700
Sec. Redwood I at	100 °F	165	300	600	1500	3500	5000	7000

[2]) 1cSt = 1 mm²/sec
[3]) Applies to region and season in which fuel is to be stored and used. (upper value winter quality, bottom value summer quality)
[4]) Recommended value only. May be lower if density is also lower. See appendix, part 3

[*] *CIMAC : Conseil International des Machines a Combustion* الهيئة الدولية لآلات الاحتراق

كذلك وضعت بعض شركات إنتاج المحركات البحرية مثل *MAN B&W* بالاعتماد على خبراتها الطويلة جداول تتضمن قيماً حدية لمواصفات الوقود لا يجوز تجاوزها، كما هو مبين في الجدول (2).

الجدول (2) القيم القصوى في مواصفات الوقود البحري الثقيل

مواصفات الوقود	الواحدة	الحد الأقصى
Density الكثافة عند 15˚C	kg/m^3	≤ 1010
Kinematic Viscosity اللزوجة الحركية عند 100˚C اللزوجة الحركية عند 50˚C	*cSt (سانتي ستوكس)* *cSt*	≤ 55 ≤ 700
Flash Point نقطة الوميض	˚C	≥ 60
Pour Point نقطة الانصباب	˚C	≤ 30
Carbon residue نسبة الكربون المتبقي	*% (mass/mass)*	≤ 22
Ash الرماد	*% (mass/mass)*	≤ 0.15
Total sediment after ageing نسبة الشوائب بعد التقادم	*% (mass/mass)*	≤ 0.10
Water الماء	*% (volume/volume)*	≤ 1.0
Sulphur الكبريت	*% (m/m)*	≤ 5.0
Vanadium الفاناديوم	*mg/kg*	≤ 600
Aluminum - Silicon الألمنيوم - والسيليكون	*mg/kg*	≤ 80

القيم الواردة في الجدولين (1) و (2) هي للوقود لدى وصوله إلى السفينة، وقبل إجراء أية معالجات له. وأنواع الوقود التي تتمتع بهذه المواصفات صالحة للاستخدام لكلا النوعين من المحركات: ثنائية الشوط (كمحركات رئيسية) و رباعية الشوط (كمحركات مساعدة لتوليد الكهرباء).

وتجدر الإشارة بأن نتائج التحليل الحالية للوقود ما تزال غير كافية بشكل كامل لتقدير خصائص احتراقه، وهذا يعني بأن النتائج لدى العمل يمكن أن تعتمد على خصائص للوقود لم يتم تحديدها بعد [2]، وينطبق هذا بشكل خاص على الأنواع التي تميل لتشكيل ترسبات في حجرة الاحتراق و على ممرات الغازات في المحرك وأجزاء العنفة. وثمة أنواع من الوقود تستخدم على السفن تفوق مواصفاتها أحياناً القيم الواردة في الجدول (3)، ولكنها قليلة الانتشار في السوق.

الجدول (3) القيم القصوى لبعض مميزات الفيول المستخدم على السفن

Viscosity اللزوجة الحركية	*450 cSt/50°C*
Carbon residue الكربون المتبقي	*18%*
Sulphur الكبريت	*4%*
Vanadium الفاناديوم	*400 mg/kg*

وبسبب عدم توفر خبرات كبيرة عن كيفية احتراق هذه الأنواع فإنه في حالة استخدامها يجب مراقبة المحرك لدى التشغيل بعناية كبيرة. وعند تجاوز القيم الواردة في الجدول (2) وخاصة بالنسبة للزوجة والكثافة فإنه يجب الرجوع إلى الشركة الصانعة للمحرك للتأكد إن كان ثمة حاجة إلى تعديل جملة الوقود.

أهمية البحث وأهدافه:

يلقي هذا البحث الضوء على مشكلة تتزايد أهميتها في السنوات العشرين الأخيرة، هي تردي مواصفات الوقود وما يرافق ذلك من مشاكل قانونية وخلافات بين مزودي الوقود ومستثمر السفينة (أو مالكها) مردها إلى الوقود، ناهيك عن المشاكل الفنية الناتجة عن رداءة مواصفات الوقود وصعوبة التعامل معه. لذلك يهدف هذا البحث إلى وضع منهجية علمية يمكن الاعتماد عليها لدى التعامل مع الفيول الثقيل عبر:

1. تحديد المجالات المقبولة للمميزات المختلفة للوقود
2. تحديد الخواص الأساسية التي يجب أن تتمتع بها جملة الوقود الثقيل على السفينة
3. وضع قواعد محددة لمعالجة الفيول على السفينة (التخزين، الخلط، التنقية، التسخين، الترقيد، الضخ...إلخ).

طرائق البحث ومواده:

لُجئ في هذا البحث إلى الدراسة التحليلية ومقارنة ما تعرضه الجهات المختلفة المعنية باستخدام الفيول الثقيل على السفن، مثل المنظمات الدولية لوضع المعايير القياسية (*ISO,BS,ICS,DnV,GL*) والهيئة الدولية لمحركات الاحتراق *CIMAC* بالإضافة إلى ما أصدرته شركات صناعة المحركات البحرية (مثل *Wärtsilä، MAN& BW*) والخبرات التي جمعت بعد المشاكل المختلفة على متن السفن.

النتائج والمناقشة:

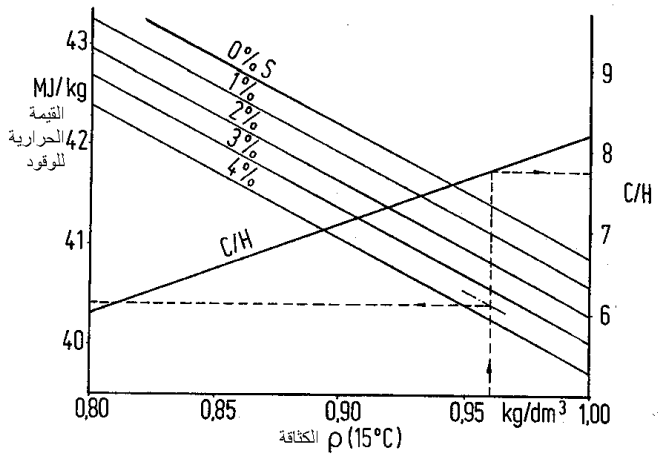
1) الخواص الفيزيائية والكيميائية للوقود التي تؤثر في تشغيل المحرك

a) اللزوجة *Viscosity*

لا يمكن الاعتماد على اللزوجة لوحدها لتقييم جودة الوقود، ولكنها مهمة بشكل خاص لتحديد أسلوب التعامل مع الوقود من ناحية الضخ والتسخين الأولي والتنقية في المنقي النابذي *centrifuging*.

b) الكثافة *Density*

بما أن الأنواع المشتقة بعمليات التكرير المكثفة المتمثلة بالتحطيم الحراري والتحفيزي *thermal and catalytic cracking* تكون ذات محتوى عالٍ من الكربون ومن السلاسل العطرية (أي أنها أثقل)، فإن ثمة ارتباطاً بين ارتفاع كثافة الوقود وتردي مواصفاته، فأنواع الوقود ذات الكثافة العالية تتضمن نسباً عالية من الكربون والإسفلت، وتكون قيمتها الحرارية أقل، كما هو مبين في الشكل (1). أما خواص الالتهاب والاحتراق للأنواع ذات الكثافة العالية فإنها تكون في الغالب أسوأ. واللزوجة المنخفضة المقترنة مع الكثافة العالية يمكن أن تكون مؤشراً على خواص التهاب *ignition* في المحرك أسوأ. من جهة أخرى تلعب الكثافة دوراً مهماً في عملية فصل الماء من الوقود في المنقيات النابذية. تقاس الكثافة عادةً عند درجات حرارة أعلى من تلك التي تعطى عندها، ثم يتم استنتاج الكثافة الموافقة للدرجة $15^{\circ}C$ ، لذلك يجب الانتباه إلى أن القيمة الناتجة قد تختلف قليلاً عن القيمة الفعلية [3].



الشكل (1) تأثير الكثافة على خواص الوقود

قديماً توجب عدم تجاوز كثافة الوقود للقيمة $991kg/m^3$ لدى استخدام المنقيات النابذية (قبل عام *1985* استخدم منقٍّ *purifier* و مروق *clarifier*) * أما الآن فتقبل القيمة $1010kg/m^3$ بشرط أن تركب على السفينة منقيات نابذية حديثة.

c) نقطة الوميض *Flash Point*

هي مؤشر على قابلية السوائل للاشتعال عند وجود شعلة بجوارها، وبواسطتها تتحدد شروط الوقاية من الحرائق و الانفجارات.

d) المحتوى من الكبريت *Sulfur Content*

تتم مواجهة الأثر الحات لحمض الكبريت الناتج عن الاحتراق عبر استخدام زيوت التزليق المناسبة وضبط درجة حرارة جدران حجرة الاحتراق لتكون ضمن مجالات محددة. أما الاحتراق نفسه فليس لمحتوى الوقود من الكبريت تأثير مهم عليه، باستثناء الانخفاض الطفيف للقيمة الحرارية للوقود مع ازدياد محتوى الوقود من الكبريت، (انظر الشكل *1*.

e) الكربون المتبقي *Carbon residue*

يقاس بواسطة رقم كونرادسون. ومن الثابت بأن الأنواع ذات القيمة العالية لرقم كونرادسون يمكن أن تسبب اتساخاً شديداً لمجاري غازات الاحتراق، مما يتطلب تنظيفاً أكثر وخاصة للشاحن العنفي وللمرجل الذي يعمل باستخدام غازات الاحتراق. كذلك تُربط بعض التغيرات التي تطرأ على عمليات الاحتراق التي تستدعي معايرة الضغوط القصوى، بالقيمة العالية للكربون المتبقي. هناك جزء من الكربون المتبقي يكون على شكل إسفلت، وتأثيره على عملية الاحتراق مشابه لتأثير بقايا الكربون، ناهيك عن تأثيره السلبي الإضافي على خواص زيت التزليق. وفي الحالات القصوى يمكن أن يؤدي المحتوى العالي من الإسفلت إلى تماسك الوقود لدى ضخه. إضافةً إلى ذلك يميل الوقود ذي المحتوى العالي من الإسفلت إلى تشكيل مستحلب إذا توفر الماء.

* يُقصد بالترويق سحب الشوائب الصلبة، وبالتنقية سحب الشوائب الصلبة والماء معاً

f)الماء *Water*

لا بد من سحب الماء من الوقود قبل إرساله إلى المحرك بواسطة فاصل نابذي. ويجب التركيز بشكل خاص على سحب الماء المالح، لأن بقاء الصوديوم في الوقود يمكن أن يتسبب بنشوء رواسب على الصمامات والشاحنات العنفية. وإذا لم يمكن سحب الصوديوم من الوقود فإنه ينصح بمجانسة الوقود بعد مغادرته للفاصل الدوراني.

g) الرماد *Ash*

يكون الرماد في الوقود إما على شكل شوائب صلبة أو مركبات منحلة تتضمن معادن كالفاناديوم. هناك جزء من الرماد يمكن أن يكون مصدره حبيبات التكسير بالحفز *catalytic fines* (التي تستخدم عادةً في طرق تكرير النفط الحديثة *refinery*)، وهذا النوع من الحبيبات يسبب التآكل الشديد لأجزاء المحرك التي يلامسها، لذلك يجب سحب الرماد الصلب من الوقود بأقصى درجة ممكنة عبر تركيب مصافٍ ناعمة بعد المنقيات تراوح نعومتها بين *5* و *10 μm*.

h) الفاناديوم والصوديوم

يتواجد الفاناديوم في الوقود على شكل مركبات منحلة بالوقود، وبالتالي فإنه لا يمكن سحبه. وعند تواجد الفاناديوم إلى جانب الصوديوم فإن ذلك يمكن أن يقود إلى تآكل صمامات التصريف وإلى تراكم الرواسب على سطح الشواحن العنفية. بناءً على تعليمات *ISO 8217* و *CIMAC* فإن التآكل يزداد إذا كانت النسبة الكتلية للصوديوم إلى الفاناديوم تفوق 3:1 ، وخاصةً عندما يكون المحتوى من الفاناديوم مرتفعاً. أما إذا كان المحتوى من الصوديوم والفاناديوم منخفضاً فإن أهمية النسبة السابقة تقلّ (حسب معطيات *MAN B&W* عندما يقل المحتوى من الفاناديوم عن *150 mg /kg*).

يتواجد الصوديوم في الوقود عادةً على شكل شوائب في الماء المالح، ويمكن سحبه كغيره عبر المنقيات النابذية. ولكنه يمكن أن يصل إلى المحرك على شكل ضباب ناشئ من ماء البحر ومختلط بالهواء.

الرواسب التي يسببها الفاناديوم يمكن أن تكون قاسية إلى حدّ التسبب بأضرار كبيرة لحلقة فوهات الشواحن العنفية *TC nozzle ring* ولدولاب العنفة، و الطريقة الوحيدة لإزالة رواسب الفاناديوم هي فك الأجزاء المتسخة وإزالة الرواسب عنها ميكانيكياً.

وبالنسبة للمغنزيوم (سواءٌ تواجد في الوقود أو وصل عن طريق المحسنات المضافة للزيوت والوقود *additives*) فإنه يمكن أن يرفع درجة حرارة انصهار الفاناديوم ويمنع بالتالي تشكل هذه الرواسب.

i)الألمنيوم و السيليكون

تم وضع حدود لنسب الألمنيوم والسيليكون في اللوائح القياسية (انظر الجدول *1*) بقصد تحديد القيمة القصوى المسموح بها من الحبيبات المتبقية من عملية التحفيز، وبشكل خاص SiO_2 و Al_2O_3 في الوقود. حبيبات التكسير بالحفز (كثيراً ما يطلق عليها *cat fines*) المستخدمة أثناء تكرير البترول التي يظل قسم منها في الفيول تزيد التآكل في أجزاء المحرك، لذلك يجب إنقاص كمياتها في الوقود قدر الإمكان عبر تمرير الوقود في أجهزة التنقية النابذية *centrifuging* قبل الوصول إلى المحرك.

كما يمكن تحسين عملية تنقية الوقود من هذه الشوائب المعدنية عبر تركيب مصافٍ ناعمة بعد جهاز التنقية النابذية تصل نعومتها إلى*5* حتى *10 μm*.

j)خواص الاشتعال *Ignition Quality*

لا تتضمن معطيات التحليل العملية المألوفة أية مؤشرات مباشرة عن خواص اشتعال الوقود *ignition* واحتراقه *combustion* وينطبق هذا القول حتى على المؤشرات والمعايير الحديثة لتقييم الوقود. ولكن رغم عدم وجود بارامتر للوقود يعتبر أساسياً في تقييم الاشتعال (بشكل خاص إذا كان المحرك يمتلك نسبة انضغاط عالية)، فإن ارتفاع كثافة الوقود المترافق بانخفاض لزوجته يشير في معظم الأحوال إلى رداءة الاشتعال، وفي بعض الحالات (القليلة) وصلت رداءة الاشتعال إلى حد عدم تمكن المحرك من الاستمرار في العمل المستقر [4].

ولما كان من غير الممكن حساب الرقم السيتاني *CN* لتقييم جودة احتراق الفيول، فقد انتشر في الثمانينيات من القرن العشرين استخدام صيغ حسابية تعتمد على اللزوجة والكثافة، كما هو الحال في:

- مؤشر *CCAI* (*Calculated Carbon Aromacity Index*) المقترح من شركة شل بالتعاون مع منتجي المحركات والذي يحسب كما يلي:

$$CCAI = \rho_{15} - 81 - 141 \,.\, log\, log\, (\upsilon_{50} + 0.85) - 81$$

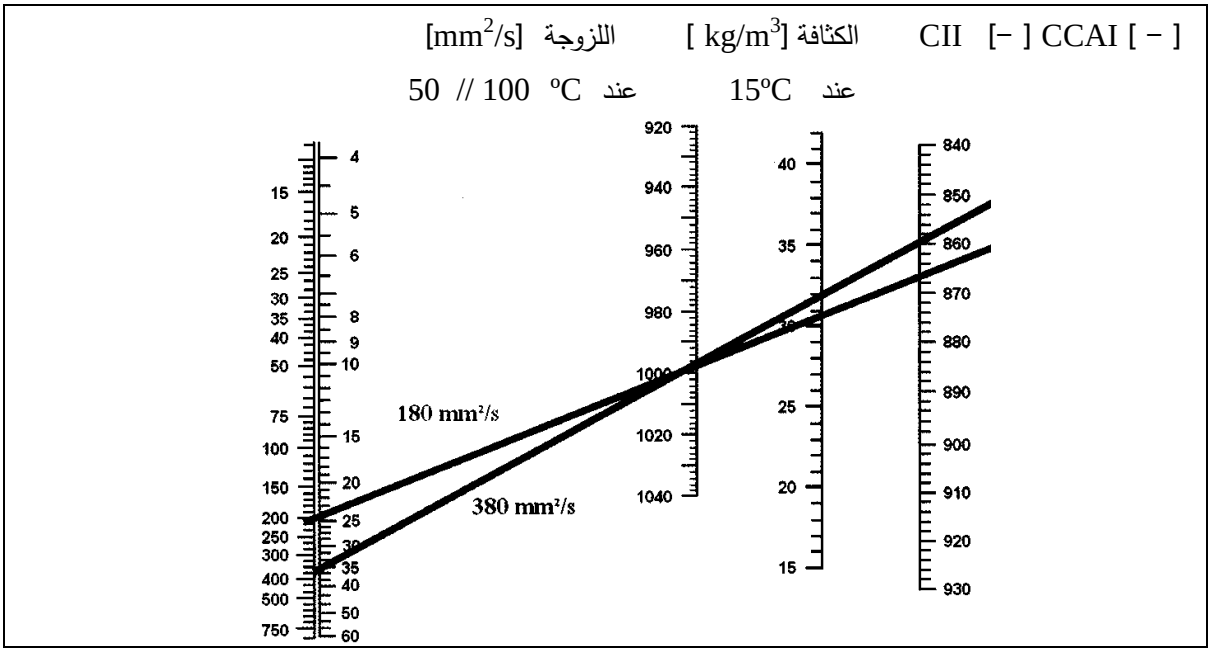
- مؤشر *CII* (*Calculated Ignition Index*) الذي وضعته هيئة *BP* ويحسب كما يلي:

$$CII = (270.795 + 0.1038 \times t) - 0.254565 \times \rho_{15} + 23.708 \,.\, log\, log\, (\upsilon + 0.8)$$

حيث: ρ_{15} الكثافة عند الدرجة 15 ˚C بالـ [kg/m^3]

υ_{50} اللزوجة عند الدرجة 50˚C بالـ [cSt]

كما وضعت مخططات لحساب المؤشرين السابقين بسهولة كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2) مخطط لتحديد قيمة كل من CCAI و CII

كانت الغاية من ذلك التنبؤ بشكل تقريبي عن خواص الاشتعال للوقود البحري. ولكن الدراسات والأبحاث العديدة اللاحقة أثبتت عدم فعالية الصيغتين المذكورتين في إعطاء صورة حقيقية عن خواص اشتعال الوقود في جميع الحالات.

أتاحت الدراسات التي أجريت بالتعاون مع معاهد اختبار الوقود الوصولَ إلى مؤشرات تعكس خواص اشتعال الوقود بدرجة أعلى من الدقة. وفي الآونة الأخيرة طورت أجهزة اختبار تعتمد على تقانة الاحتراق بثبوت الحجم، وهي تستخدم في الوقت الحاضر لاختبار الوقود البحري في عدد من مخابر الوقود ومصانع محركات الديزل البحرية.

و يمكن الآن بواسطة استخدام أنواع معيارية من الوقود تحويل فترة تأخر الاشتعال في المحرك *ignition delay* إلى مؤشر مرتبط بالرقم السيتاني. كما يسمح حساب تابع الاحتراق *rate of heat release* باستنتاج العمليات الحقيقية لانطلاق الحرارة وبالتالي تقييم جودة احتراق الوقود *Combustion* [5].

تبين نتائج الاختبارات تنوع وتعدد المؤشرات المتعلقة باشتعال الوقود واحتراقه في محركات الديزل، وارتباطها بالتركيب الكيميائي للوقود المختبر، ولكن هذه النتائج لا تعكس توابع الاحتراق في محركات الديزل الفعلية، لأن الاختبارات أجريت عند درجات حرارة وضغوط أدنى من الواقع.

في المحركات الحديثة التي تمتلك نسب انضغاط عالية لا تكون الفروق بين أنواع الوقود السيئة والجيدة كبيرة بالمستوى الذي تم الحصول عليه من اختبارات الوقود.

2) تحضير الفيول ومعالجته

I. استقرار الوقود الثقيل *Stability of Heavy Fuel*

تختلف مواصفات الوقود الثقيل بشكل كبير تبعاً لمواصفات النفط الخام الذي أنتج منه ولأساليب تكريره. وكثيراً ما يجري خلط أنواع مختلفة من بقايا التكرير مع الوقود الخفيف لإنتاج الفيول، مما يسبب أحياناً ظاهرة عدم التآلف *incompatibility* أي عدم الاختلاط بشكل جيد، وهذا يجعل الوقود الناتج غير مستقر، لذلك فإن عملية الخلط على متن السفينة يجب تجنبها قدر الإمكان.

إن خلط أنواع غير متآلفة من الوقود في صهاريج السفينة يمكن أن يؤدي إلى نشوء كميات كبيرة من الحمأة *sludge* التي تخرج لا حقاً من المنقيات النابذية، أو إلى انسداد هذه المنقيات *blocking*.

ويمكن تجنب عدم تجانس مكونات الوقود في خزان الخدمة اليومية عبر إعادة تدوير محتويات الخزان في المنقِّي النابذي. ويجري هذا على حساب المزايا التي يمكن الحصول عليها بجعل التدفق ضمن المنقي منخفضاً.

II. معالجة الفيول

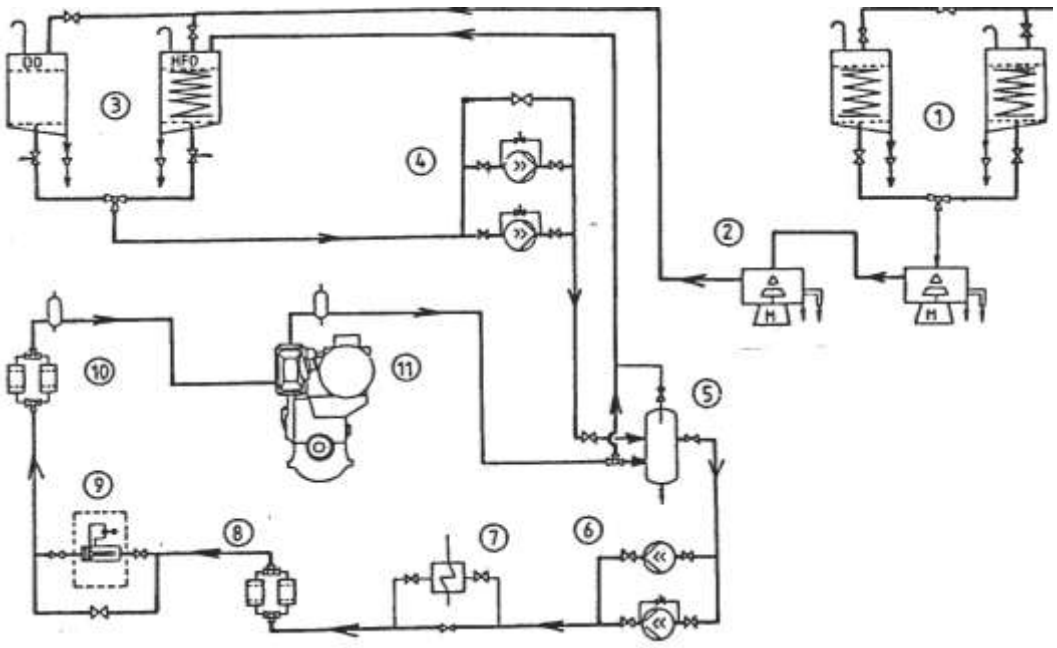
يجب معالجة الفيول على متن السفينة قبل استخدامه، وثمة تفاصيل كثيرة تتعلق ببنية جملة الوقود يمكن الرجوع إليها في منشورات *CIMAC* أو بعض المراجع [6]. وعملياً فإن جميع الخصائص المتعلقة باستثمار الوقود ترتبط بمواصفاته الأولية لدى استقدامه إلى السفينة.

يجدر بالذكر أن المعطيات المقدمة من الاختبارات المعيارية تفيد بالدرجة الأولى في ضبط عمليات المعالجة التي تُجرى على السفينة، أما قيمتها العملية بالنسبة للمستثمر فهي منخفضة، لأنه لا بدّ من العودة إلى تعليمات تشغيل المحرك. أي أن المعيار التصميمي الأهم هو قدرة المحرك على التكيف مع أنواع الوقود المتاحة تجارياً، بشرط أن تجري معالجتها على السفينة بشكلٍ مناسب. لذلك لابد من توفر جملة لمعالجة الوقود مصممة بشكل جيد. المتطلبات

العامة الدنيا لجملة الوقود معروفة وهي موضوعة بحيث تلبي ما هو ضروري لضمان معالجة مناسبة للوقود وفق المعايير الأساسية.

من الطبيعي أن تشغيل جملة تحضير الوقود هي من مسؤوليات المستثمر، وبأن الحصول على نتائج جيدة يتطلب توفر أمرين اثنين هما: جملة تحضير للوقود جيدة والتشغيل الدقيق والسليم للجملة.

تتألف جملة الوقود من محطة التنقية (بما فيها المنقيات النابذية) وجملة التزويد بالوقود المضغوط، ويبين الشكل (3) جملة نمطية لتغذية المحرك الرئيسي ومحركات المولدات الكهربائية بالوقود.



الشكل (3) جملة التزويد بالوقود

1- خزان ترسيب الوقود الثقيل ، 2- المنقيات ، 3- خزان الوقود اليومي ، 4- مضخة التغذية بالوقود ، 5- خزان تبديل الوقود ، 6- مضخة رفع ضغط الوقود ، 7- مسخن نهائي للوقود، 8- مصافٍ ، 9- منظم اللزوجة ، 10- مصافٍ ناعمة ، 11- المحرك الرئيسي.

III. قواعد التعامل مع الفيول في المنقيات النابذية

يجب التعامل مع الوقود سواءٌ أكان وقود ديزل *Diesel Oil (DO)* أو وقوداً ثقيلاً *Fuel Oil (HFO) Heavy* باعتباره عرضةً للتلوث خلال مسار نقله إلى السفينة، لذلك يجب تنظيفه للتخلص من الشوائب الصلبة والسائلة قبل الاستخدام. الشوائب الصلبة في الوقود هي بالدرجة الأولى الصدأ *rust* والأتربة *dust* وحبيبات التحفيز المتبقية من عمليات تكرير النفط *Cat Fines*.

أما الشوائب السائلة فهي الماء سواء المالح منه أو العذب. يمكن أن تسبب الشوائب الموجودة في الوقود أضراراً لمضخات جملة الوقود ولصماماتها، وقد تسبب ازدياد معدل تآكل بطانات الأسطوانات وتلف مقاعد صمامات تصريف الغازات. وفي حال استخدام وقود غير منظف بشكلٍ كافٍ يحدث اتساخ لممر غازات الاحتراق ولشفرات الشواحن العنفية.

لا يمكن ضمان التنظيف الفعال إلا عبر استخدام منقيات نابذية، لذلك يجب أن تلبي سعة المنقي المركب *capacity* المعدلات المطلوبة. وللحصول على تنظيف مثالي فإنه من الأهمية بمكان تشغيل المنقي بلزوجة منخفضة للوقود قدر الإمكان، ويتحقق هذا عبر تشغيل المسخن الأولي للمنقي من أجل الحصول على أعلى درجة حرارة مسموح بها. من أجل أنواع الوقود التي تزيد لزوجتها عن $180cSt$ عند درجة الحرارة $50^{\circ}C$ من المهم المحافظة على أعلى درجة حرارة ممكنة في المسخن الأولي وهي $98^{\circ}C$.

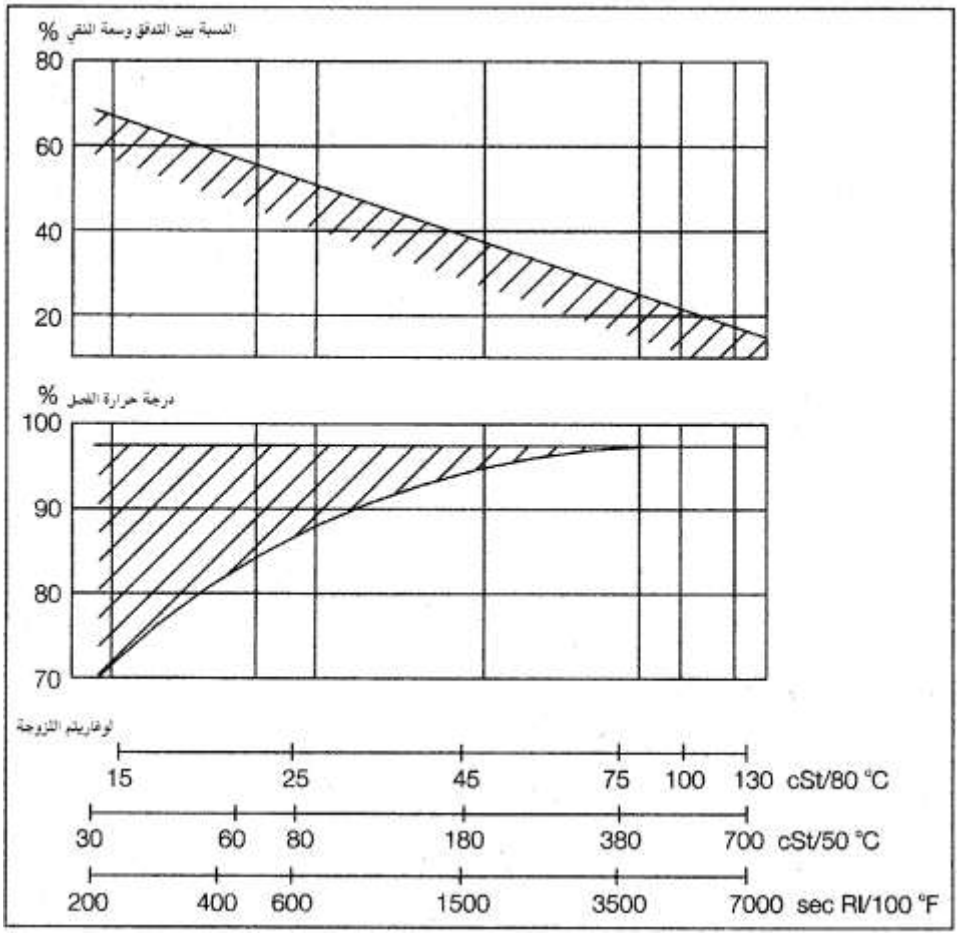
يمكن إبقاء الوقود في المنقي أطول فترة ممكنة عبر معايرة معدل تدفق الفيول في المنقي، بحيث يتوافق مع كمية الفيول اللازمة للمحرك بلا تدوير زائد في المنقي. وبالتالي يجب أن يعمل المنقي لمدة 24 ساعة في اليوم إلا في أوقات تنظيفه. وتُفضَّل المنقيات المزودة بمضخات تغذية تقارب سعتها متطلبات المحرك.

بالنظر إلى رداءة مواصفات الوقود في الوقت الحاضر، فإنه يجب عدم الاستهانة بصيانة المنقيات، كما توجد أهمية خاصة لعملية معايرة المنقي المزود ببراغي معايرة أو أقراص دوارة ولعملية سحب الماء منه. عادةً تحدد كتيبات خدمة المنقيات بدقة الأجزاء والبراغي والأقراص التي يجب استخدامها للمعايرة تبعاً لكثافة الوقود. الحل العملي المألوف هو استخدام منقيين على الأقل لتنظيف الوقود، بحيث يعملان على التسلسل أو التوازي. وقد بينت نتائج العمل التجريبي بأن أفضل أسلوب لتنقية أنواع الفيول المنتشرة في الوقت الحاضر، وخاصةً فيما يتعلق بحبيبات التحفيز المتبقية من عمليات تكرير النفط هو استخدام المنقيات على التسلسل [7] ، أي عندما يوجد منقٍ *purifier* يليه مروِّق *clarifier*. ينطبق هذا على الأنواع القديمة، أما المنقيات الحديثة (التي أنتجت في الثمانينيات من القرن الماضي) التي تعمل بشكل آلي فهي مناسبة لأنواع الوقود التي تفوق كثافتها $991\ kg/m^3$ عند $15^{\circ}C$ بشرط الالتزام الشديد بدقة بتعليمات الشركة الصانعة للمنقي.

إذا كانت سعة المنقي المتوفر منخفضة لدى ارتفاع اللزوجة، وكان ثمة أكثر من منقٍّ، فإن التشغيل على التوازي للمنقيات يصبح الطريقة المناسبة للمحافظة على تدفق منخفض ضمن المنقي. ولكن وعلى ضوء التعليمات والنتائج المذكورة أعلاه، فإنه يجب النظر بجدية إلى موضوع تركيب تجهيزات حديثة تناسب خصائص الوقود المستخدم حالياً، وتراعي تعليمات التدفق. ولتحديد سعة المنقي فإنه يُنصَح باتباع توجيهات منتج المنقي، والاستفادة من المنحنيات المبينة في الشكل (*4*) باعتبارها دليلاً [8].

IV. التعامل مع الوقود ذي الكثافة العالية

نظراً لتضمن بعض جداول المواصفات القياسية للوقود *standers* لأصنافٍ *grades* ليس للكثافة وفقها حدود (انظر الجدول 1)، وبناءً على حقيقة أن الحدّ التقليدي للكثافة $991\ kg/m^3$ عند $15^{\circ}C$ (هو الصنف *H55* وفق *CIMAC* و الصنف *RMH55* وفق *ISO8217(87)*) يتم تجاوزه أحياناً من قبل بعض مزودي الوقود، فقد تم إدخال بعض التحسينات التي تسمح بمعالجة أنواع الوقود ذات الكثافة الأعلى.



الشكل (4) مثال على تعليمات منتج للمنقيات يبين النسبة بين تدفق الوقود القادم من المنقي والتدفق المطلوب للمحرك

بما أن حدود الكثافة المستخدمة تعطى بالدرجة الأولى لضمان ضبط عمل المنقي *purifier* ، فقد تم إدخال مروقات *clarifier* ذات سحب آلي للحمأة *sludge*، أي أنه يمكن دعم المنقيات بواسطتها.

باستخدام مثل هذه التجهيزات، فإن فصل الماء من الوقود بشكل جيد أصبح ممكناً، حتى لأنواع الوقود التي تصل كثافتها إلى $1010\ kg/m^3$ عند $15\,^{\circ}C$، لذلك اختيرت هذه القيمة كحد أقصى للكثافة في أصناف الوقود ذات الكثافة العالية.

V. التعامل مع عينات الاختبار

-***سحب العينات:*** حتى يمكن التأكد من امتلاك الوقود المقدم للمواصفات التي تم الاتفاق عليها مع مزود السفينة بالوقود، فإنه يُنصح بأخذ عينة واحدة على الأقل من كل صهريج وقود. ولضمان أن العينة تمثل كل الفيول المخزن في الصهريج، فإنه يجب سحب عينة من أنبوب تزويد السفينة في بداية العملية، وأخرى في منتصفها وثالثة في نهايتها.

-***تحليل العينات:*** كثيراً ما تكون مواصفات العينة المستلمة من شركة التزويد بالوقود غير مطابقة لمواصفات الوقود المقدم فعلاً، لذلك من المناسب التحقق من الخواص الأساسية للفيول الثقيل المعروض مثل الكثافة واللزوجة

ونقطة الانصباب. وإذا لم تتطابق هذه القيم مع القيم المطلوبة فثمة خطر عدم ملاءمة درجة حرارة التسخين الأولي المقترحة للمنقي وللحقن ضمن أسطوانات المحرك.

-***التحقق من دقة تحليل العينات:*** رغم توفر تجهيزات عديدة لتحليل عينات الوقود، فإنه يُنصَح بالاستعانة بمعاهد التحليل المتخصصة لضمان الحصول على نتائج تحليل دقيقة وتفصيلية.

VI. المعالجة الإضافية للفيول

في الجملة التقليدية يعيق وجود كميات كبيرة من الماء والحمأة عمل المروق، لذلك يُستَخدَم منقٍّ كخطوة أولى في أية عملية تنظيف. وبتوفر الأجهزة الآلية لسحب الحمأة، فقد أصبح يمكن الاستغناء عن المنقي، إذ يعتبر سحب الأجسام الصلبة هو الهدف الأساسي في عملية معالجة الفيول.

قد لا يكون وجود كميات كبيرة من المياه والحمأة في الوقود ضاراً بحد ذاته، ولكن وجودهما يعيق عملية التخلص من الحبيبات الصلبة الموجودة في الوقود عند استخدام المنقيات النابذية. لذلك تم تطوير أجهزة أخرى لدعم عمل المنقيات تشمل:

-***المجانِسات*** *Homogenizers :* تستخدم لتشتيت أية مياه أو حمأة تبقى في الوقود بعد مغادرة المنقيات. اختيار موقع المجانس بعد المنقي يجعل الماء العذب (الذي لم يسحب في المنقي) عديم الخطر على المحرك ويتيح تقبل الوقود مهما كانت كثافته. وقد تلعب عملية المجانسة دوراً إيجابياً في مواجهة بعض مشاكل عدم التآلف التي لا يمكن التنبؤ بحدوثها من خلال مواصفات الوقود. وتتوفر أنواع مختلفة منها مجانسات فوق صوتية *ultrasonic* وأخرى ميكانيكية *mechanical* . ولكن إذا ركبت المجانسات قبل المنقيات النابذية فإنها يمكن أن تخفّض فعالية عملية التنقية وبالتالي ستقل نظافة الوقود المرسل إلى المحرك. فالصوديوم (الموجود في الماء المالح) لن يسحب من الوقود، والمواد الخادشة سوف تتجزأ إلى حبيبات صغيرة جداً يصعب على المنقي فصلها، وسيكون لها أثر سيئ يسبب تآكل أجزاء المحرك. لذلك لا ينصح بتركيب المجانِسات قبل المنقي النابذي.

-***المصافي الناعمة:*** *Fine Filters* تُوضع بعد المنقيات النابذية مباشرة أو على خط التغذية المؤدي إلى المحرك، بقصد التخلص من أية حبيبات صلبة لم يسحبها المنقي، وتكون الشبكة شديدة النعومة (حتى $5\ \mu m$). ومن المستحسن وضع المجانس قبل المصفاة الناعمة لأن ذلك يخفض خطر انسداد المصفاة بفعل احتمال تجمع (تكتل) قطع الإسفلت الموجود في الوقود.

-***السكب من وعاء إلى آخر بقصد الترويق:*** *super decanters* : يمكن اعتبار هذه الطريقة من ناحية المبدأ بمثابة مروقات أفقية *horizontal clarifier* تعمل على سحب الحمأة قبل التنقية العادية بالطرد المركزي، والغرض منها هو الوقاية من انسداد المنقي.

3) تصميم جملة الوقود

جملة الوقود المبينة في الشكل *(3)* ضرورية لدى التعامل مع وقود عالي اللزوجة، حيث تلزم عندئذٍ درجات حرارة عالية للتسخين الأولي، كما يجب أن تكون الخطوط المؤدية من المحرك إلى الخط الراجع بدورها ذات درجة حرارة مرتفعة نسبياً.

يجب أن يكون ضغط الوقود عند المحرك (عند مضخة تغذية المحرك بالوقود) حوالي *8 bar* ، أي أن يكون ضغط مضخة تغذية المحرك *10 bar*، وبهذه الطريقة يتوفر احتياطي ضغط لمنع انطلاق العناصر الطيارة من الوقود *gasification* وتحاشي حدوث تكهف في جملة الوقود في حال وصول درجة حرارة التسخين الأولي إلى *150˚C*.

لضمان تذرير صحيح للوقود، فإن درجة حرارته يجب أن تعاير وفقاً للزوجته. ودرجة الحرارة غير المناسبة يمكن أن تؤثر على الاحتراق وتسبّب تآكل بطانات الأسطوانات والحلقات المكبسية وإتلاف مقاعد صمامات التصريف. وإذا كانت درجة حرارة التسخين شديدة الانخفاض فإنه سيقابلها لزوجة عالية جداً للوقود، وسيلزم ضغط حقن عالٍ جداً، مما يؤدي إلى نشوء إجهادات ميكانيكية شديدة الارتفاع في جملة الوقود.

في معظم التجهيزات يجري التسخين بواسطة البخار، وتجري المحافظة على اللزوجة ضمن مجال معين بواسطة منظم اللزوجة *Viscosity Regulator* الذي يضبط عملية التغذية بالبخار.

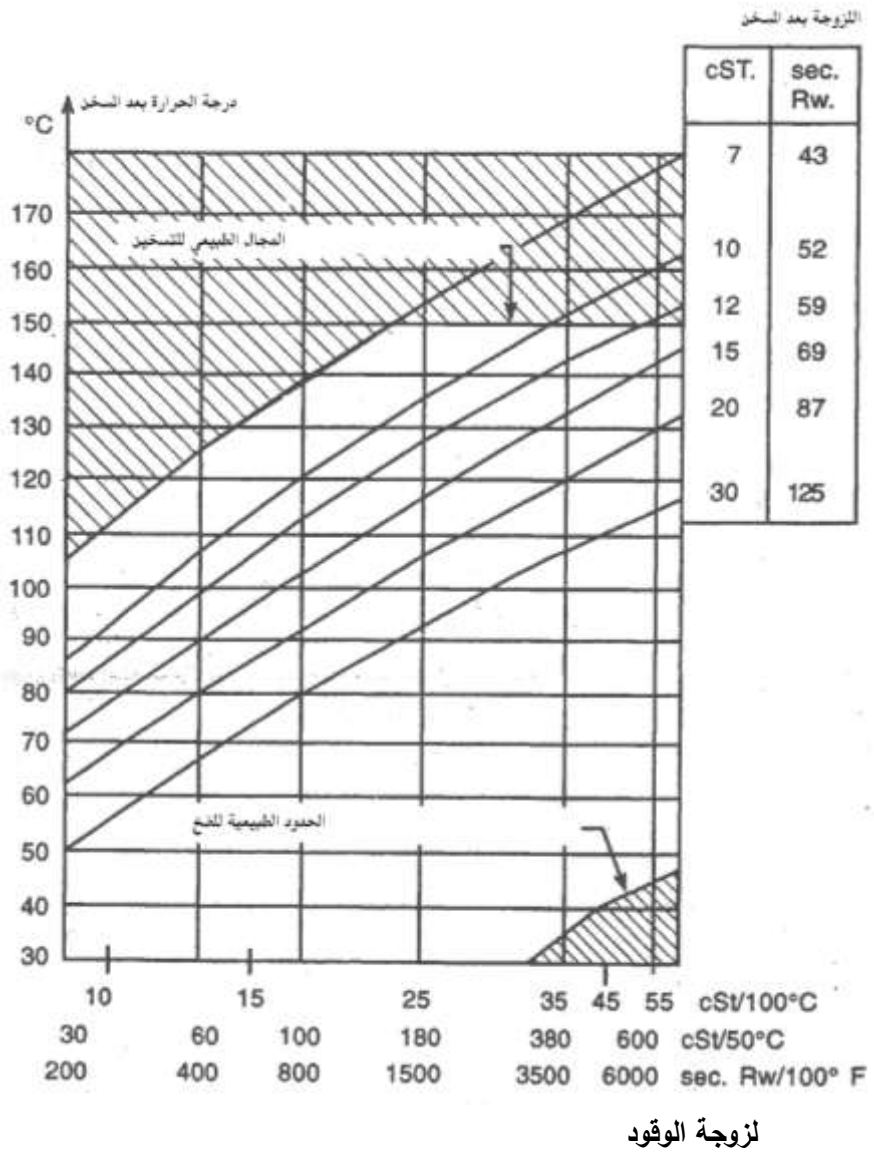
بناءً على العلاقة بين اللزوجة ودرجة حرارة الوقود، فقد تلزم درجة حرارة تصل إلى *150˚C* كما هو مبين على الشكل (5)، الذي يبين درجة حرارة التسخين اللازمة للحصول على لزوجة مناسبة لحقن الوقود. تراوح اللزوجة التي ينصح بها بعد المسخن بين *10* و *15 cSt*، ولكن خبرات الخدمة أظهرت أن لزوجة الوقود قبل المضخة ليست عاملاً مهماً جداً، ولهذا السبب فلا مانع من وصول اللزوجة إلى القيمة *20 cSt* بعد المسخن. ولتجنب الاتساخ السريع للمسخن فإن درجة الحرارة يجب ألا تفوق *150˚C*.

4) الجوانب العملية

تزود معظم محركات الديزل البحرية ذات سرعات الدوران المنخفضة بصمامات حقن للوقود غير مبردة، وهذا يسمح بالعمل المستقر باستخدام الفيول، نظراً لتوفر إمكانية تدوير الوقود الثقيل المسخن عبر أنابيب الوقود المضغوطة وصمامات الوقود حتى عند الشروع بإيقاف المحرك. وينطبق أحياناً نفس الشيء على المحركات المساعدة.

نظراً للاختلاف الكبير بين كلفة وقود الديزل والفيول الثقيل وبسبب خطورة عدم التآلف عند تشكيل مزيج من زيت الديزل والفيول فإنه ينصح بأن تعمل المحركات الرئيسية والمساعدة على الوقود الثقيل خلال جميع الأزمنة الممكنة بصرف النظر عن الحمولة المطبقة على المحرك. وإذا لزم الانتقال إلى وقود الديزل، كما هو الحال عند الحاجة لصيانة رئيسية لجملة الوقود، أو عند التوقف لفترة طويلة أو توجب استخدام أنواع من الوقود ذات محتوى منخفض جداً من الكبريت لأسباب بيئية، فإنه يمكن إبدال الفيول الثقيل في الجملة والانتقال إلى زيت الديزل، بشرط أن يتم التبديل وفق الإجراءات المحددة حتى إذا كان المحرك متوقفاً عن العمل عبر العودة إلى كتيب خدمة المحرك.

عند الشروع في إيقاف المحرك عن العمل، فإن تدوير الوقود المسخن في جملة الوقود لا يتطلب الوصول إلى اللزوجة المنخفضة اللازمة عند الحقن. لذلك ولتوفير البخار فإنه يمكن تخفيض درجة حرارة التسخين بحدود *20˚C*، بحيث يمتلك الوقود الذي يجري تدويره لزوجة قدرها *30 cSt*.



الشكل (5) مثال على مخطط لتسخين الفيول البحري وفقاً للزوجته [6]

أما في محركات المولدات الكهربائية فإن الاستعداد للإقلاع المفاجئ يتطلب المحافظة على اللزوجة ضمن المجالات المحددة، بحيث يمكن الإقلاع وتوليد الكهرباء في الحال. لذلك يجب رفع درجة الحرارة إلى القيم المطلوبة كما في الشكل (5) قبل ثلاثين دقيقة من الإقلاع المتوقع [9] .

وكما أشرنا سابقاً، فإن درجة حرارة التسخين يجب ألا تزيد عن 150°C، وعند الإقلاع بواسطة زيت الديزل فلا داعي لاستخدام جملة التسخين المرافقة للوقود الثقيل.

الاستنتاجات والتوصيات:

- إن خلط أنواع غير متآلفة من الوقود في صهاريج السفينة يمكن أن يؤدي إلى نشوء كميات كبيرة من الحمأة *sludge* تخرج لا حقاً من المنقيات النابذية، أو إلى انسداد هذه المنقيات.

- لدى تجاوز القيم الواردة في الجدول (*2*) وخاصة بالنسبة للزوجة والكثافة فإنه يجب الرجوع إلى الشركة الصانعة للمحرك للتأكد إن كان ثمة حاجة إلى تعديل جملة الوقود.

- من أجل أنواع الوقود التي تزيد لزوجتها على *180cSt* عند درجة الحرارة *50˚C* من المهم المحافظة على أعلى درجة حرارة ممكنة في المسخن الأولي وهي *98˚C*.

- بينت نتائج العمل التجريبي بأن أفضل أسلوب لتنقية أنواع الفيول المنتشرة في الوقت الحاضر، وخاصةً بما يتعلق بحبيبات التحفيز المتبقية من عمليات تكرير النفط *Cat fines* هو استخدام المنقيات على التسلسل.

- أظهرت خبرات العمل مع الفيول، بأن لزوجة الوقود قبل المضخة ليست عاملاً مهماً جداً، ولهذا السبب فلا مانع من وصول اللزوجة إلى القيمة *20 cSt* بعد المسخن.

- لتجنب الاتساخ السريع للمسخن وانطلاق المركبات الطيارة من الوقود *gasification* ، فإن درجة حرارة تسخين الفيول يجب ألا تتجاوز القيمة *150˚C*.

المراجع:

1.MOLLENHAUER, K. *Handbuch Dieselmotoren.* 2. Auflage, Springer Verlag, Germany, 2002, 126 – 135.

2. MEIER-PETER, H. *Handbuch Schiffsbetriebstechnik*. 1.Auflage, Seehafen Verlag, Germany, 2006, 157-165.

3. WOODYARD , D. *Pounder's Marine Engines*, seventh edition, Butturworth Heinemann, England, 2001,200 – 204.

4. SJÖBERG, H. *Combustion studies and endurance tests on low ignition quality fuel oils*, Transactions (TM) of the Institute of Marine Engineering, London 1987, 2 - 10.

5. SUN, X. *Performance Evaluation of low Heat Rejection Engines*, Transactions of ASME, 116 , October 1994, 758 – 764.

6. GROTH, K. *Brennstoffe fuer Dieselmotoren heute und morgen*. Expert Verlag Germany, 1989. 108 – 127.

7. ALFA- LAVAL – Marine Power, FOPX Separation System for HFO, Sweden 2007.

8. http/www.manbw.com (Fuel oil Heating Chart).

9. http/www.wärtsilä.com (Ship Power System).