

## دراسة حول تحسين خواص تدفق النفط

عبدالمهيمن أحمد علي وتاج الأصفياء مبارك بركات

قسم الهندسة الكيميائية، كلية الهندسة - جامعة الخرطوم

**المستخلص:** الخام الذي ينتج في الحقول النفطية يعتبر التغذية الأساسية للمصافي، حيث يتم تكريره لإنتاج المشتقات المختلفة. عملية التكرير في المصفاة تتم بصورة مستمرة لذلك يجب توفير الخام بواسطة نقله بخطوط الأنابيب حيث يلعب تدفق الخام الدور الأكبر في ذلك. لهذا السبب يتم تحسين خواص انسيابه حتى لا تحدث مشاكل في عملية النقل بسبب تجمع جزيئات الخام في شكل كتل متركمة. اهتم البحث بدراسة بعض الخواص التي تؤثر على تدفق الخام في خطوط الأنابيب ومن ثم تحسين هذه الخواص وتمت الدراسة على ثلاث خامات متوفرة في السودان وهي خام الفولة، مزيج النيل و مزيج دار. اللزوجة هي الخاصية التي تؤثر على انسيابية الخام بشكل كبير كما أن خام الفولة هو الأعلى لزوجة من بين الخامات قيد الدراسة لذلك تم اختياره لدراسة بعض طرق تحسين تدفق الخام وتم اختيار ثلاث طرق منها وهي: التسخين، التسخين مع التخفيف بواسطة الكيروسين والتسخين مع إضافة مادة مساعدة لتخفيض اللزوجة وتقليل نقطة الإنسكاب. وجد أن أفضل طريقة من الناحية الاقتصادية والفنية من بين الطرق الثلاث قيد الدراسة هي التسخين مع التخفيف بواسطة الكيروسين بإضافة 15% حجماً من الكيروسين وتسخينه لدرجة حرارة 61 درجة مئوية. إذا تمت مقارنة الطرق الثلاث قيد الدراسة مع تحسين التدفق بواسطة وحدة تكسير اللزوجة والتي تستخدم حالياً لخام الفولة، نجد أن وحدة تكسير اللزوجة هي الطريقة الأفضل وذلك نسبة لتكلفة نقل الكيروسين العالية إلى الحقول بواسطة الناقلات التجارية.

### 1. المقدمة

يعتبر النفط في الوقت الحاضر أحد المصادر الرئيسية للطاقة الكامنة، وبشكل هاجساً لدى مصممي إستراتيجيات وسياسيات التنمية الاقتصادية والإجتماعية في معظم بلدان العالم، مما دفع هذه البلدان إلى إستثمار أموال طائلة في محاولتها الرامية إلى إستغلال هذا المصدر الحيوي المهم جداً.

النفط أو البترول كلمة مشتقة من الأصل اللاتيني "بيترا" والذي يعني صخر و"أوليوم" والتي تعني زيت ويطلق عليه أيضاً الزيت الخام، كما أن له الإسم الشائع "الذهب الأسود" وهو عبارة عن مركب هيدروكربوني، سائل، بني غامض او بني مخضر، يوجد في الطبقة العليا من القشرة الأرضية. يختلف في مظهره وتركيبه و تفاوته بشدة من مكان لآخر [1].

ان هيدروكربونات السلاسل البرافينية والنفتية والأروماتية هي المركبات الأساسية الداخلة في تركيب البترول (80 - 90 %) [2]. كما توجد فيه علاوة على ذلك، كميات ضئيلة من المركبات الأكسجينية والكبريتية و النتروجينية و بعض المعادن الأخرى. و تتحدد خواص البترول الفيزيائية و الكيميائية بنسبة المركبات الداخلة في تركيبه.

الخواص الكيميائية و الفيزيائية الأكثر أهمية [4]: الكثافة و الثقل النوعي، درجة الكثافة النوعية (API°)، اللزوجة، درجة الوميض، نقطة الإنسكاب، نسبة الكربون المتبقي، محتوى الأملاح، المحتوى الكبريتي، المعادن و المحتوى المائي.

### 2. تصنيف النفط

لنظام تصنيف النفط أهمية كبيرة حيث أنه يسمح بتحديد إتجاه تكرير البترول فيما بعد و قائمة أنواع المنتجات و جودتها وكذلك مكان تسويقها وسعرها، سعر برمبل النفط يعتمد بشدة على درجته و التي تحدد بعوامل مثل الثقل النوعي أو API و محتواه من الكبريت وغيره والتي تفصيلها فيما يلي.

#### 1.2 تصنيف النفط الكيميائي [6]

ويتخذ التركيب الهيدروكربوني كأساس للتصنيف الكيميائي للبترول. أقترح تقسيم النفط كيميائياً إلى عدة مجموعات هي (ميثاني أو برفيني، نفثيني، أروماتي، ميثاني نفثيني، ميثاني نفثيني أروماتي و نفثيني أروماتي):

- النفط الخام البرافيني والذي يحتوي على مجموعة الهيدروكربونات الأليفاتية الخطية (البرافينية) بنسبة لا تقل عن 75% ، و عادة ما يتبقى الشمع منه بعد تقطيره.

- نפט النفط الخام ويحتوي على مجموعة الناقلين بنسبة 70 % أو أكثر وبعض المركبات الأروماتية العطرية.
- النفط الإسفلتي وتكون نسبة المواد العطرية فيه أكثر من 60 % ، وتزيد فيه نسبة الكبريت وتنخفض كمية المنتجات الخفيفة أثناء تقطيره.
- النفط المختلط ويحتوي على كميات مختلفة من الأنواع السابقة، وهو أكثر الأنواع إنتشاراً. كما يجدر بالذكر أن وجود أي من الأنواع الثلاثة المذكورة منفرداً نادر الحدوث.

## 2.2 تصنيف النفط الفيزيائي

وتستخدم أيضاً طرق تصنيف النفط طبقاً للخواص الفيزيائية حسب كثافته ودرجة كثافته النوعية [API°] عند 15°م [7] كالاتي وكما موضح في الجدول رقم ( 2 ) يُلاحظ أن مزيج النيل من ناحية درجة الكثافة النوعية يعتبر من الخامات الخفيفة لانه يقع في المدى من 30 – 40 اما بالنسبة لخام الفولة ومزيج دار فتعتبر من الخامات الثقيلة لان درجة الكثافة النوعية فيها 19.7 تقع في المدى من 10 – 21 ولكنها تقارب الخامات المتوسطة والتي مداها من 21 – 30.

جدول رقم(2). تصنيف النفط حسب كثافته ودرجة كثافته النوعية [6]

حالة النفط	الكثافة النوعية (SG)	درجة الكثافة النوعية (API)
ثقل جداً	أكبر من 1	أقل من 10
ثقل	0.928 – 1	21 – 10
متوسط	0.876 – 0.928	30 - 21
خفيف	0.825 – 0.876	40 - 30
خفيف جداً	أقل من 0.825	أكبر من 40

## 3.2 تصنيف النفط حسب جودة المنتج [2]

ويصنف النفط كذلك حسب جودة المنتجات التجارية التي يُحصل عليها. وينقسم البترول طبقاً لهذا التصنيف حسب إحتوائه على الكبريت { قليل الكبريت ( حلو أو مسكر) وهو الذي يحتوي على نسبة كبريت أقل من 0.5 % بالوزن، وكبريتي ( مر) ويحتوي على أكثر من 0.5% بالوزن من الكبريت}. كما في الجدول رقم (1) الخامات الثلاث ( الفولة، مزيج دار ومزيج النيل ) تتميز بقلّة احتوائها على الكبريت حيث تعتبر من الخامات الحلوة لان نسبة الكبريت فيها بالوزن أقل من 0.5 %.

## 3. خواص الخامات السودانية

هنالك ثلاث عينات من الخامات السودانية ( دار، الفولة ومزيج النيل) تم الحصول على النتائج المعملية ( شهر ابريل عام 2010 ) لخواص هذه العينات من وزارة الطاقة والتعدين. وكانت النتائج كما في الجدول رقم ( 1 ). ويمكن القول بان خصائص الخام السوداني تختلف بإختلاف الحقول ولكن بصفة عامة يمكن تلخيص أهم سماته فيما يلي. الخام السوداني متوسط الكثافة ويقارب الخام الخفيف ويقع تحت تصنيف الخامات البرافينية الشمعية C18 - . ويمتاز الخام السوداني بقلّة نسبة الكبريت فيه وهو من أفضل خامات الشرق الأوسط في هذه الخاصية. كما يمتاز بوجود مواصفات مشتق الديزل لإرتفاع الرقم السيتاني. عموماً يعتبر هذا الخام ذا خواص مميزة من الناحية السوقية ولكن تكمن مشاكله في النقل والسكب والتي تؤثر خاصية اللزوجة فيه، اي النقل والسكب،

بصورة واضحة. عليه تم التركيز في هذا البحث على كيفية تحسين هذه الخاصية في خام الفولة ذو اللزوجة الأعلى وبالتالي تحسين نقله وسكبه.

جدول رقم (1). بعض خواص الخامات السودانية [3] \*\* غير متوفرة لغرض البحث

الخواص (التجربة)	مزيج النيل	الفولة	مزيج دار	الوحدة
الكثافة عند 15 °م	0.8648	0.9353	0.9026	kg/L
API	32.04	19.7	19.7	Degree
الماء	0.75	2.3	0.25	حجم%
رقم الحامض الكلي	0.396	8.82	3.68	mg KOH/g
كمية الكربون المتبقي	4.8	7.32	8.1	وزن%
نقطة الوميض	30	48	47.5	°م
نقطة الإنسكاب	33	12	39	°م
المحتوى الكبريتي	0.073	0.1	0.099	وزن%
محتوي الأملاح	174	35	7	mg/L
محتوى الشمع	32.4	9.3	16.8	وزن%
اللزوجة الحركية عند 100 °م	10.01	111.8	31.39	mm <sup>2</sup> /s
محتوى الأسفلتي	0.05	0.01>	0.15	وزن%
الصوديوم (Na)	16	0.012	15.4	mg/kg
البوتاسيوم (K)	76	9.3	**	mg/kg
النحاس (Cu)	1 >	0.6	**	mg/kg
الرصاص (Pb)	1 >	0.4	**	mg/kg
الحديد (Fe)	1.8	0.012	30.6	mg/kg
النيكل (Ni)	7.4	0.073	16.5	mg/kg
الفاناديوم (V)	1.7	0.003	0.6	mg/kg
الزرنيخ (As)	1 >	**	**	mg/kg

#### 4. طرق تحسين إنسيابية الخام [9]

تبين أن هنالك طرق مختلفة لمعالجة إنسيابية الخام ، تشمل هذه الطرق مزج النفط الخام الثقيل بمشتق اخر خفيف، النقل بواسطة الماء والتي تتم بضخ النفط ضمن خاتم مائي او بما يسمى بالوسادة المائية. كما ان المعالجة الحرارية او الكيميائية بواسطة الضغط او من خلال وحدة تكسير اللزوجة [ 8 ] لها اثر كبير في معالجة درجة اللزوجة العالية. في الجزء التالي سيتم تفصيل الدراسة العملية لبعض من هذه الطرق بغرض تحسين جريان الخام في خطوط الأنابيب.

#### 1.4 المواد والطرق المستخدمة

##### 1.1.4 مقدمة

يضح خام الفولة من وحدة المعالجة المركزية بمعدل 40 ألف برميل/ اليوم والتي تعادل 0.0884 متر<sup>3</sup> / الثانية في خط أنابيب بقطر 0.61 متر وطول 723 كيلومتر. يتميز خام الفولة بأنه ذو لزوجة عالية جداً ( 111 مل/ 2م / ث عند درجة حرارة 100 °م كما في الجدول رقم (1) وهذه الخاصية تسبب مشاكل عديدة أثناء نقله من وحدة المعالجة المركزية بالحقول الى ( مصفاة الخرطوم ). نظراً إلى ذلك هدفت الدراسة الى محاولة التغلب على تلك الصعوبات باستخدام طرق مختلفة من المعالجات والتي سيتم تطبيقها على الخام من خلال تجارب عملية وذلك بغرض تحسين الخواص الفيزيائية له وبالتالي تحسين ظروف إنسيابه، وهذه الطرق التي سنتم دراستها هي المعالجة الحرارية للخام، تسخين الخام بعد إضافة الكيروسين بنسب مختلفة ومعالجة الخام بإضافة ( PPD ) وهي عبارة عن مادة مقللة لنقطة الإنسكاب ومساعدة في تخفيض اللزوجة.

#### 2.1.4 العينات المعملية

عينة من خام الفولة أخذت من خزانات وحدة التحكم المركزية في يوم 2010/7/5 بمقدار 35 لتر والتي تعادل 35 دسم<sup>3</sup>. و عينة من الكيروسين وأخذت كمنتج من مزيج النيل بمقدار 4.5 دسم<sup>3</sup>. هذا بالإضافة لعينة من مادة تقليل اللزوجة التجارية (PPD) بمقدار 500 جزء من المليون.

#### 3.1.4 الطريقة

يتم قياس اللزوجة الكينماتيكية بواسطة جهاز قياس اللزوجة الكينماتيكية في درجات حرارة مختلفة لمعرفة تأثيره على العينات التالية :

خام الفولة.

خام الفولة المخفف الكيروسين.

خام الفولة المعالج بإضافة مادة (PPD).

وبعد ذلك يتم حساب قيم رقم رينولدز (Re) من قيم الكثافة واللزوجة المقاسة بالمعادلة التالية:

$$Re = \rho d v / \mu = d v / \gamma \quad (1)$$

حيث أن:

$\gamma$ : اللزوجة الكينماتيكية ( سنتى ستوك )

$\rho$ : كثافة العينة ( كيلوجرام / متر مكعب )

$d$ : القطر الداخلي للأنبوب المراد الضخ فيه = 0.6 متر.

$\mu$ : اللزوجة الديناميكية ( نيوتن ثانية / متر مربع ).

$v$ : متوسط سرعة الخام في الأنبوب،  $v = Q/A$

$Q$ : معدل السريان لخام الفولة خلال خط أنابيب الفولة

( بافتراض أنه قيمة ثابتة ).

$A$ : مساحة مقطع الأنبوب،  $A = \pi d^2 / 4$

#### 4.1.4 نتائج الإختبار

نتائج الإختبار موضحة في الجدول رقم (3) لخام الفولة المعالج بالتسخين، الجدول رقم (4) لخام الفولة المعالج بالتخفيف بواسطة الكيروسين و الجدول رقم (5) خام الفولة المعالج بإضافة PPD. وقد تم حساب رقم رينولدز من قيم اللزوجة الكينماتيكية المقاسة بالمعادلة (3) حيث أن قطر الأنبوب معروف 0.61 متر ومتوسط سرعة سريان الخام بالأنبوب تساوي 0.3025 متر \ الثانية و يمكن إيجادها بالمعادلة رقم (4) حيث معدل سريان الخام يساوي 0.0884 متر<sup>3</sup>/ثانية و مساحة مقطع الأنبوب تساوي 0.2922 متر<sup>2</sup> من المعادلة رقم (5).

#### 5.1.4 تحليل النتائج

نتائج القياسات المعملية مبينة بالجدول 3، 4 و 5 وقد تم تحليلها بيانياً كما في الشكل رقم (1)، الشكل رقم (2) والشكل رقم (3)، مع ملاحظة الفرق في مقياس الرسم.

ثبت أن المعالجة الحرارية للخام لوحدها لا تساعد كثيراً في تحسين إنسياب الخام للوصول للإنسياب المضطرب (  $Re > 2100$  ) رقم رينولدز)) فحتى عند درجة حرارة 80 °م كان الإنسياب بطئاً ولكنه تحسن قليلاً عند إضافة ( PPD ) مع التسخين فعند درجة حرارة أقل من 80 °م وصل الإنسياب الى الإنسياب المضطرب ولكنه تحسن تحسناً ملحوظاً عند إضافة الكيروسين مع التسخين بنسب مختلفة فعند إضافة 5 % من الكيروسين وصل للإنسياب المضطرب عند درجة حرارة أقل من 75 °م وعند إضافة 15 % وصل للإنسياب المضطرب عند درجة حرارة 61 °م وعند إضافة 25 % وصل للإنسياب المضطرب عند درجة حرارة أقل من 50 °م وعند إضافة 35 % وصل للإنسياب المضطرب عند درجة حرارة أقل من 45 °م. ومن هذا نجد أن إضافة الكيروسين أفضل من PPD ونسبة 15 % أنسب نسبة لإضافة الكيروسين فعند 35% نحتاج الى كمية كبيرة من الكيروسين فهي قد تكون غير عملية في هذه الحالة ومكلفة من الناحية الاقتصادية.

**جدول رقم (3). تأثير التسخين على خام الفولة**

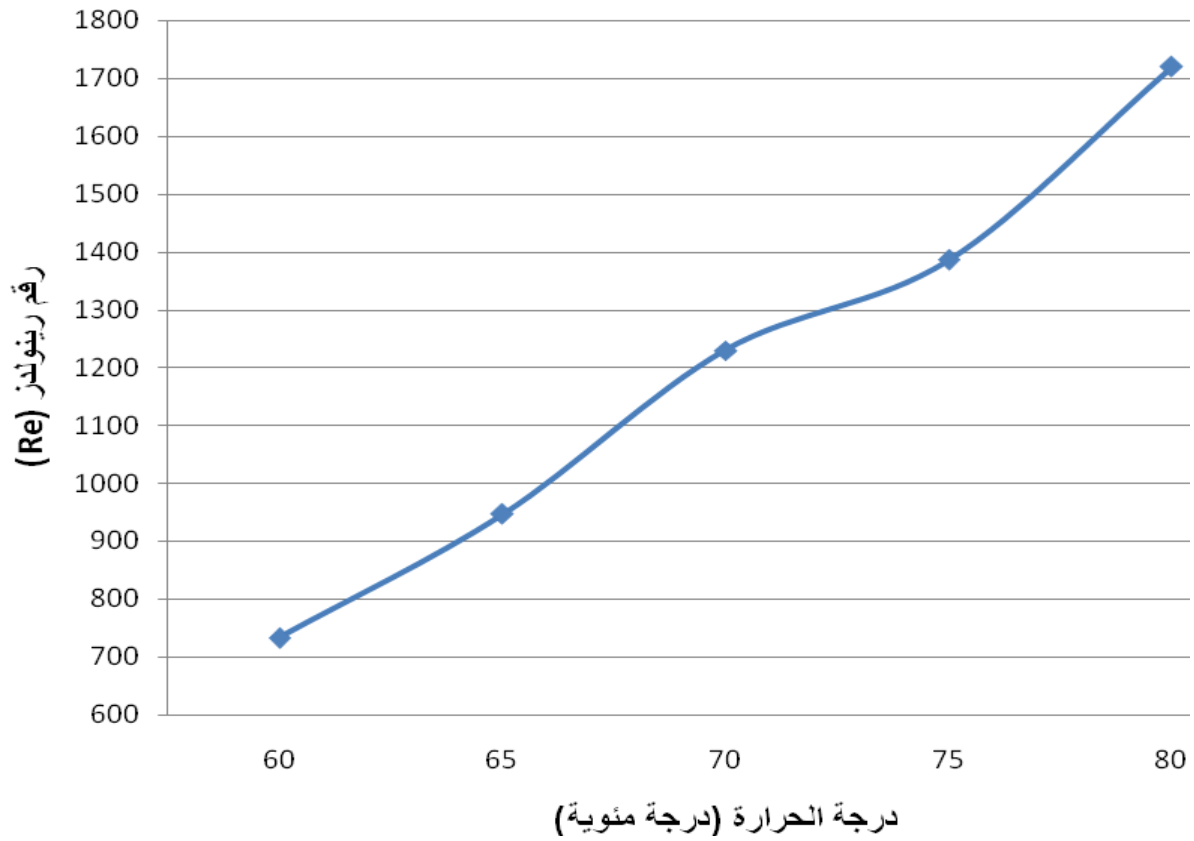
رقم رينولدز	درجة الحرارة ( م° )
× 1027.327	60
× 1029.466	65
× 1031.2292	70
× 1031.3862	75
× 1031.7195	80

**جدول رقم (4). تأثير التسخين على خام الفولة المعالج بإضافة 0.05 % حجماً من مادة ال PPD**

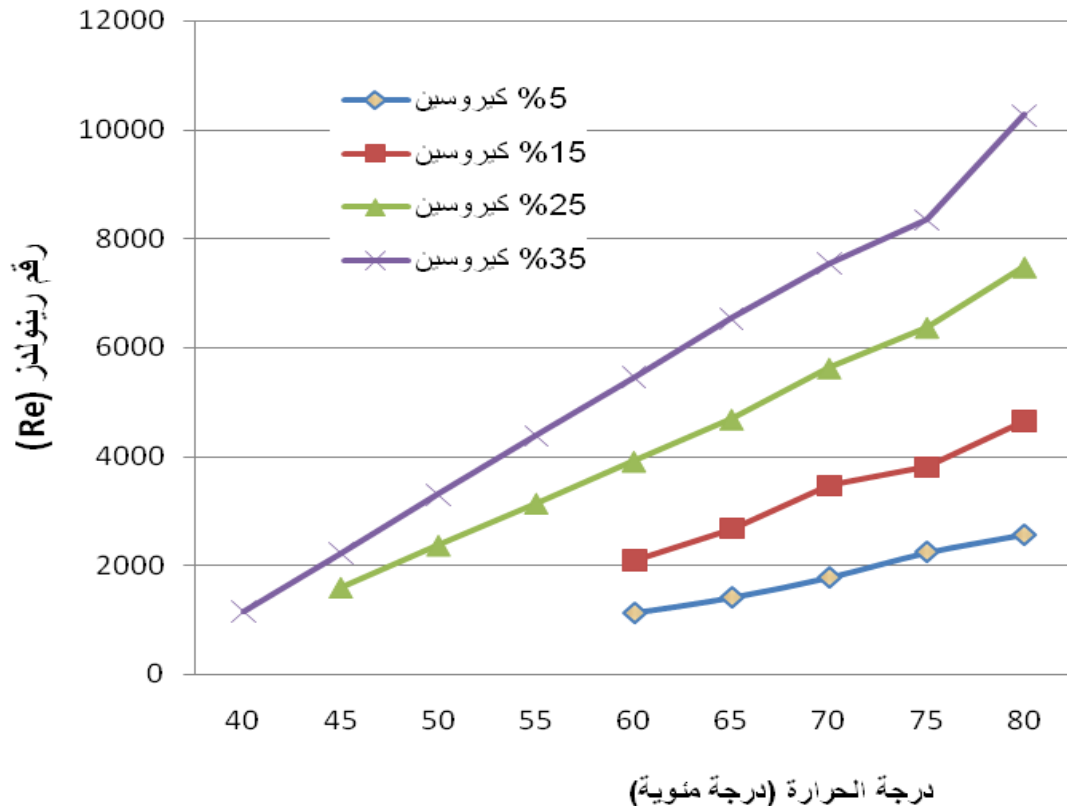
رقم رينولدز	درجة الحرارة ( م° )
× 1029.5546	60
× 1031.1919	65
× 1031.5148	70
× 1031.8636	75
× 1032.2891	80

**جدول رقم (5). تأثير التسخين على خام الفولة المعالج بالكبروسين. \*\* غير متوفره لأغراض البحث**

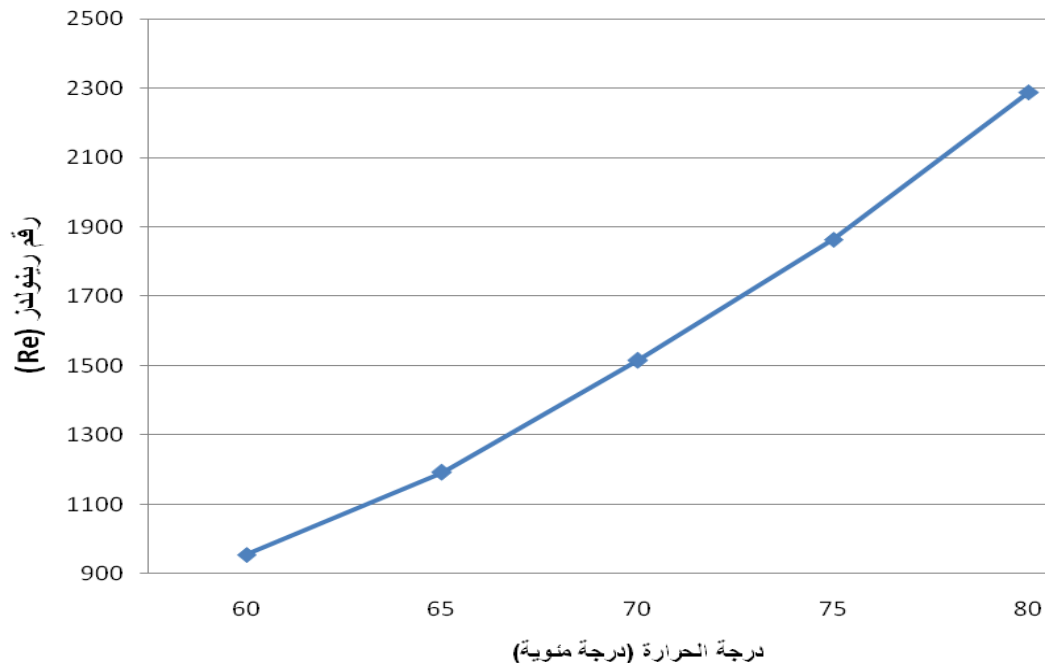
رقم رينولدز (35% كبروسين)	رقم رينولدز (25% كبروسين)	رقم رينولدز (15% كبروسين)	رقم رينولدز ( 5% كبروسين)	درجة الحرارة (درجة مئوية)
× 1031.1377	**	**	**	40
× 1032.2159	× 1031.5852	**	**	45
× 1033.2941	× 1032.384	**	**	50
× 1034.3723	× 1033.1316	**	**	55
× 1035.4505	× 1033.9048	× 1032.0925	× 1031.1195	60
× 1036.5287	× 1034.678	× 1032.6778	× 1031.403	65
× 1037.5429	× 1035.6181	× 1033.4635	× 1031.774	70
× 1038.3446	× 1036.3687	× 1033.8041	× 1032.2337	75
× 1041.0273	× 1037.4787	× 1034.6497	× 1032.5696	80



الشكل رقم (1). مخطط بياني لتوضيح تأثير التسخين على معدل سريان خام الفولة



الشكل رقم (2). مخطط بياني لتوضيح تأثير التسخين على معدل سريان خام الفولة المخفف بواسطة الكيروسين



الشكل رقم (3). مخطط بياني لتوضيح تأثير التسخين على معدل سريان خام الفولة المخفف بإضافة (PPD)

## 5. تقديرات التكلفة

في هذا الجزء سيتم مقارنة الطريقة المقترحة مع الطريقة المستخدمة حالياً والتي تعالج مشكلة اللزوجة العالية لخام الفولة في الحقول باستخدام وحدة تكسير اللزوجة حيث ان رقم رينولدز يساوي تقريباً 2100 [6] بعد هذه الوحدة مما يدل على ان الإنسياب مضطرب ويمكن ضخه بسهولة. تبلغ التكلفة الكلية لوحدة تكسير اللزوجة المستخدمة حالياً 21.9 مليون دولار (تقريباً) و تكلفة الأرض = 15,384.6 دولار. [3]. و سيعتمد في تقديرات التكلفة على الاسعار كما في العام 2005 كاساس ف تحديد رأس المال الكلي و تكاليف الإنتاج الكلية.

### 1.5 تكلفة الإنتاج الكلية لوحدة تكسير اللزوجة [10]

تكلفة العمالة = 25 % من تكلفة رأس المال =  $21,915,385 \times 0.2 = 5,478,846$  دولار.  
تكلفة المنافع = 10 % من تكلفة رأس المال =  $21,915,385 \times 0.1 = 2,191,538.5$  دولار.  
التكلفة الإضافية = 15 % من تكلفة رأس المال =  $21,915,385 \times 0.15 = 3,287,307$  دولار.

$$\text{تكلفة الإهلاك} = \frac{21915385}{25} = 876,615.4 \text{ دولار.}$$

التكلفة الاحتياطية = 0.05 % من تكلفة رأس المال =  $21,915,385 \times 0.05 = 1,095,769.3$  دولار.  
تكلفة الإنتاج الكلية = 12,930,071 دولار.

### 2.5 تكلفة الإنتاج الكلية عند تخفيف الخام بالكبروسين

تكلفة نقل واحد برميل من الكبروسين من مصفاة الأبيض الى وحدة المعالجة المركزية بمربع (6) بواسطة الناقلات البترولية = 7 دولار.

كمية الخام خلال السنة =  $40,000 \times 365 = 14,600,000$  برميل/السنة.  
كمية الكبروسين المضافة = 15% من كمية الخام =  $14,600,000 \times 0.15 = 2,190,000$  دولار.  
تكلفة النقل في العام =  $2,190,000 \times 7 = 15,330,000$  دولار.  
تكلفة التسخين خلال الأنبوب في السنة 4,700,000 دولار.  
التكلفة الكلية في السنة = تكلفة النقل + تكلفة التسخين =  $15,330,000 + 4,700,000 = 20,030,000$  دولار.  
النسبة المئوية لتكاليف النقل من التكاليف الكلية للإنتاج تعادل 76.54%.  
النسبة المئوية لتكاليف النقل والتي يكون عندها تكاليف الإنتاج الكلية مكافئة لتكاليف وحدة تكسير اللزوجة تساوي 41.09%.

## 6. الخلاصة

وجد من بين الثلاث طرق التي استخدمت لتحسين سلوكية خام الفولة أن تحسينه بإضافة 15% من الكبروسين هي أفضل طريقة من ناحية إقتصادية و فنية ولكن إذا تمت المقارنة مع ما تعالج به مشكلة اللزوجة العالية لخام الفولة (111 ملم/2 ث عند درجة حرارة 100 م° كما في الجدول رقم (1) في الحقول وهي استخدام وحدة تكسير اللزوجة التي أشير إليها في الباب الثاني نجد ان الطريقة الاخيرة هي الأفضل من الناحية الإقتصادية و الفنية. وذلك ان تقديرات التكلفة عند إضافة 15% كبروسين كانت 20,030,000 دولار، أما في حالة استخدام وحدة تكسير اللزوجة كانت تقديرات التكلفة 12,930,071 دولار. وتعزى التكاليف المرتفعة عند اضافة الكبروسين او عدم الجدوى الإقتصادية الى تكاليف النقل والتي اذا انخفضت الى 8,230,071 بدلاً من 15,330,000 لتعادل التكاليف. ومن الناحية الفنية فإن ظروف المعالجة في وحدة التكسير متوفرة في مكان الحقل أما عند إضافة 15% كبروسين فنحتاج إلى توفير الكبروسين في الحقل من المصافي.



## 7. التوصيات

للدراستات المستقبلية في نفس مجال هذا البحث نوصي بأنه لا بد من إجراء دراسة لباقي الطرق التي يمكن استخدامها لتحسين سلوكية خام الفولة ثم إختيار الطريقة المثلى من الناحية التكنولوجية و الإقتصادية. نقتراح تقليل تكاليف النقل لطريقة التحسين بواسطة الكيروسين باستخدام خط من المصفاة الى الحقل ومقارنة التكاليف مع وحدة تكسير اللزوجة. لا بد من تطبيق نظام المحاكاة لتحسين خواص تدفق الخام بإستخدام الكمبيوتر مع الأخذ في الإعتبار كل الخواص التي تؤثر علي البيئة والسلامة وخطوط الأنابيب من تلوث، إشتعال و تآكل. كما نوصي بالمواصلة في استخدام وحدة تكسير اللزوجة لتحسين تدفق الخام في خطوط الأنابيب حتى يتم إكتشاف طريقة أفضل منها من الناحية الإقتصادية والفنية.

## المراجع

- [1] www.study4uae.com/vb/study4uae140/article4011/ - مايو 2011.
- [2] هندسة وصناعة تكرير البترول - ل. ايفانوف ، م. كورنييف، فيوزباشيف - الطبعة الثانية - دار " مير " للطباعة والنشر الإتحاد السوفيتي- 1974.
- [3] وزارة الطاقة والتعدين ( المؤسسة السودانية للنفط ) - ابريل 2010 .
- [4] www.personal.psu.edu./rtw1/lecture\_topics/physprop.htm - مايو 2010
- [5] مصفاة الخرطوم ، شهر مارس 2011
- [6] www.darah.org.sa/bohos/data/14/6-1.htm - مايو 2010
- [7] دراسة عمليات تكرير النفط الخام السوداني - سيف الدين محمد علي - حقل أبوجابرة ( دراسة أعدت لنيل الإجازة في الهندسة الكيميائية ) - جامعة البعث ( سوريا ) - العام 1995 - 1996 .
- [8] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/5/58/visbreaker.png - مايو 2011
- [9] http://sites.google.com/site/sypeteng/research/33 - يونيو 2010
- [10] Plant design and Economics for chemical Engineers by Max Peters, KlousTimmerhaus and RonaldsE.west - fifth edition - 2002