

رفع استطاعة أنابيب نقل المشتقات النفطية عن طريق تخفيض المقاومة الهيدروليكية عند الجريان المضطرب

د.م. ماهر سعادة*

م. باسل سليمان العلي**

ملخص:

يرتفع الطلب على وقود التدفئة شتاءً ويزداد معه استيراد المحروقات ولا يعود خط الأنابيب باستطاعته القصوى والمسموح التشغيل عندها قادراً على تلبية الحاجة المتزايدة للمحروقات.

برزت فكرة رفع استطاعة أنابيب نقل المشتقات عن طريق تخفيض المقاومة الهيدروليكية عند الجريان المضطرب لتجنب تكاليف مد خطوط نقل مشتقات جديدة أو تكاليف النقل البري بالصهاريج وما يترافق مع ذلك من أزمات واختناقات وهدر وتلوث ناجم عن التعبئة والتفريغ.

تؤدي إضافة كمية قليلة من خافض الاحتكاك قابل للانحلال بالمشتق النفطي المنقول بالأنبوب إلى انخفاض واضح في المقاومة الهيدروليكية للخط ويتطلب ذلك انحلال متجانس للبوليمر داخل السائل وهذا ما يؤدي إلى زيادة استطاعة الأنابيب.

يهدف البحث إلى تخفيض المقاومة الهيدروليكية لأنابيب نقل المازوت السوري عن طريق إضافة خافضات احتكاك معينة قابلة للانحلال في المازوت بكميات قليلة ولا تؤثر على مواصفاته وقد تم التوصل إلى رفع استطاعة خط الأنابيب بمقدار 25% عند إضافة 100 PPM من خافض الاحتكاك.

Abstract:

The demand for the heating fuel oil increases in winter such that the pipeline at its ultimate and allowable operating capacity couldn't be able to cover the increasing demand for fuel oil.

The idea of increasing the capacity of oil products pipelines was arise by reducing of hydraulic resistance during the turbulent flow to avoid costs of constructing new pipelines or costs of high way transport of fuel oil by tanks that usually accompanied with problems, jams, waste and pollution caused by charge and discharge.

Adding little amounts of friction reducer soluble in fuel oil, transported by pipeline, leads to a clear reduction of hydraulic resistance of pipeline and that needs homogeneous solubility of polymer in liquid so that the capacity will raised.

The target of the research is to reduce the hydraulic resistance of the Syrian fuel oil pipelines by adding small amounts of friction reducers soluble in fuel oil and don't affect its properties and it was achieved 25% increment of the pipeline throughput by adding 100 PPM of the friction reducer.

مقدمة:

تعاني خطوط نقل المشتقات النفطية في القطر بشكل عام من كونها قد أنشئت منذ عشرات السنين وبأن حالتها الفنية غير جيدة وتعاني من التآكل الشديد في بعض مقاطعها ما يمنع إمكانية زيادة استطاعتها عبر زيادة الضغوط العاملة في محطات الضخ وهذا ما يحول دون القدرة على تلبية الحاجة المتزايدة للمحروقات نتيجة ازدياد الطلب.

تبرز بالتالي فكرة تخفيض المقاومة الهيدروليكية (λ) عند الجريان المضطرب للسوائل النيوتونية لما لها من انعكاسات كبيرة على رفع استطاعة أنظمة النقل أو تخفيض الضغط من جهة و بالتالي توفير في الطاقة من جهة أخرى.

يأتي الاهتمام بموضوع تخفيض المقاومة عند الجريان المضطرب بسبب أن معظم جريانات النفط الخام النيوتوني أو المنتجات النفطية ضمن الأنابيب هي جريانات مضطربة. [1,2,4] كان العالم الألماني هاجن (Hugoniot) أول من افترض وجود نظامين لحركة السائل عام (1854) [3,5] ، وقد قام فيما بعد عدد من العلماء بدراسة هذا الموضوع، كان منهم المهندس الفيزيائي الإنكليزي رينولدز (Reynolds) عام (1883) حيث أثبت بالتجربة صحة افتراض هاجن كما بيّن أنه عند ظروف معينة يمكن الانتقال من أحد نظامي الجريان إلى النظام الآخر وبالعكس [5].

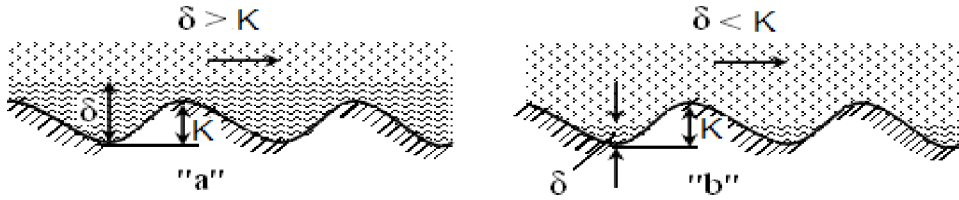
بناء على ما تقدم فقد اعتبر أنه بالقرب من جدار المجرى توجد طبقة رقيقة من السائل سماكتها (δ) تكون السرعة فيها قليلة حيث تكون الحركة في حدود هذه الطبقة قريبة من الخطية، تدعى هذه الطبقة بالغشاء الطبقي أو الغشاء اللزج (Viscous Sub layer) تكون سماكتها صغيرة جداً تتراوح من جزء من مئة أو من ألف من عمق التيار أو من قطر الأنبوبة [1,2] . مع زيادة عدد رينولدز تقل سماكة الغشاء الطبقي التي يمكن أن تتحدد من العلاقة التالية [10]:

$$\delta = \frac{300 \cdot v}{v} \dots\dots\dots (1)$$

حيث:

v : معامل اللزوجة الحركية. ، v : السرعة المتوسطة.

يتميز السطح الداخلي للأنابيب بعدم استوائه ولذلك فهو ليس مطلق الملساء، ولتقييم عدم استواء جدران الأنبوبة أدخل مفهوم خشونة الجدار (Wall Roughness) كما هو موضح في الشكل رقم (1).

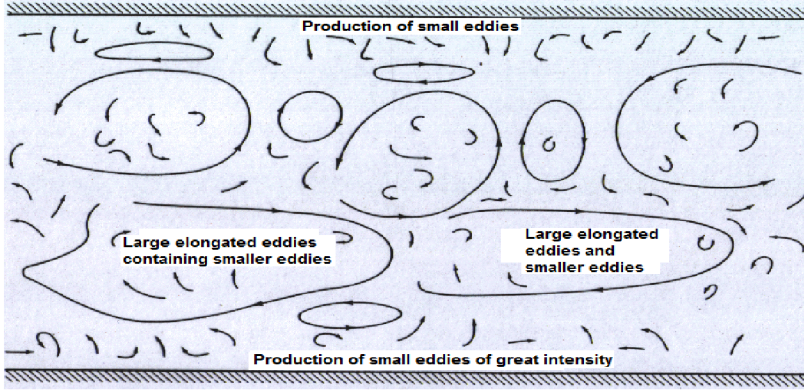


الشكل (1) يوضح العلاقة بين الغشاء الطبقي و خشونة جدار الأنبوب

يسمى الارتفاع المتوسط لبروزات عدم الاستواء (K) بالخشونة المطلقة (Absolute Roughness) للجدران، وحسب العلاقة بين قيم سماكة الغشاء الطبقي (δ) والخشونة المطلقة (K) للجدار يتم التمييز عند نظام الجريان المضطرب بين ما يلي: [2,8,9,10]

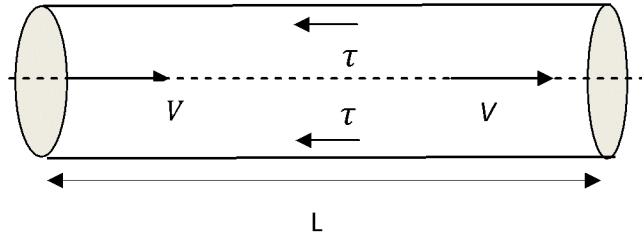
- جدران ملساء هيدروليكيًا (Hydraulically Smooth Walls)، عندما تكون $(\delta > K)$ حيث تختفي بروزات الخشونة داخل الغشاء الطبقي وقد اتضح في هذه الحالة أن ضياع الضغط بالاحتكاك (h_L) لا يتعلق بخشونة الجدار، شكل (1-a).
- جدران خشنة هيدروليكيًا (Hydraulically Rough Walls)، عندما يكون $(\delta < K)$ ، في هذه الحالة لا تغطي بروزات الخشونة، مما يؤدي إلى إثارات إضافية للتدفق تؤثر على قيمة فاقد الطاقة عند حركة السائل، في هذه الحالة لوحظ أن (h_L) تتعلق بخشونة الجدار، شكل (1-b).

تتشكل عند الجريان المضطرب ملايين الدوامات الصغيرة (Small eddies) عند الجدار الداخلي للأنبوب، الشكل (2) كما تتشكل بعض الدوامات الكبيرة في مركز التيار مما يرفع قيمة ضياع الطاقة بالاحتكاك. يلاحظ أثناء حركة السائل أنه تبعاً لقيمة عدد رينولدز، يمكن أن تعمل الأنبوبة الواحدة كأنبوبة ملساء هيدروليكيًا (عند القيم الصغيرة لعدد رينولدز) وخشنة هيدروليكيًا (عند القيم الكبيرة لعدد رينولدز). [1,2,10]



الشكل (2) تشكل الدوامات (Eddies) داخل الأنبوب

يخسر السائل في الأنبوب عند حركته جزءاً من طاقته الميكانيكية للتغلب على المقاومة الهيدروليكية المتمثلة بقوة الاحتكاك فالسائل يبدي أثناء تحريكه قوى إجهادات (τ) تدعى قوى الإجهادات (أو قوى الاحتكاك) وهي تتجه بعكس اتجاه قوة الضغط، وكي يتابع السائل الجريان لابد من القضاء على قوى الإجهاد (τ) للجريان، شكل (3). وهذا ما يستوجب صرف قوة ضغط (Δp) حتى يستمر السائل بالحركة. مما سبق يمكن كتابة شرط لحظة التوازن بين قوة الضغط وقوة المقاومة:



شكل رقم (3) قوى الاحتكاك على جدران الأنبوب

حيث تؤثر قوى الاحتكاك على محيط الأنبوب بينما قوى الضغط على مقطع الأنبوب وبالتالي نحصل على معدل الضغط الضائع اللازم لانتقال السائل بمقدار L من المعادلة :

$$\Delta p = \frac{2L \cdot \tau}{r} \dots \dots \dots (2)$$

يمكن كتابة المعادلة (2) لتربط بين الإجهاد الأولي للجريان τ_0 والضغط الأولي للجريان ΔP_0 وهو الضغط اللازم للقضاء على τ_0 .

$$\Delta p_0 = \frac{2L \cdot \tau_0}{r} \dots \dots \dots (3)$$

كما هو ملاحظ فإن الضياع الرئيسي للطاقة ينجم عن مقاومة الاحتكاك ومن هنا أتت فكرة توفير الطاقة عن طريق تخفيض المقاومة الهيدروليكية في حال المحافظة على الغزارة أو رفع استطاعة الأنابيب (أي زيادة Q) في حال المحافظة على نفس مستوى صرف الطاقة.

طرق تخفيض المقاومة الهيدروليكية:

1. من أجل السائل النيوتوني عند الجريان الخطي:

من معادلة ستوكس للجريان الخطي في الأنابيب يحسب معامل المقاومة الهيدروليكية:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \dots \dots \dots (4)$$

يتضح أن المقاومة الهيدروليكية في أثناء الجريان الخطي تكون تابعة لعدد رينولدز فقط $\lambda = f(Re)$ وبالتالي ومنه يكون $\lambda = \frac{64 \cdot \nu}{v \cdot d}$ وهو ما يعكس أن تخفيض المقاومة مرتبط بشكل أساسي بتخفيض اللزوجة الذي يتم عملياً إما بالتسخين أو المزج مع سائل آخر أقل لزوجة. [2,5]

2. من أجل السائل النيوتوني عند الجريان المضطرب:

من معادلة براندل كارمان تحسب المقاومة كالتالي:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.8 \dots \dots (5)$$

المقاومة الهيدروليكية تكون تابعة لكل من عدد رينولدز والخشونة المطلقة للسطح الداخلي للأنبوب $\lambda = f(Re, K)$ وفي هذه الحالة فإنه بالإضافة إلى طرق المعالجة في مجال الجريان الخطي فإن معالجة الآثار الناجمة عن الخشونة يكون لها الأثر الأكبر في تخفيض المقاومة الذي يتمثل في معالجة الدوامات الصغيرة المتشكلة على الجدار الداخلي للأنبوب

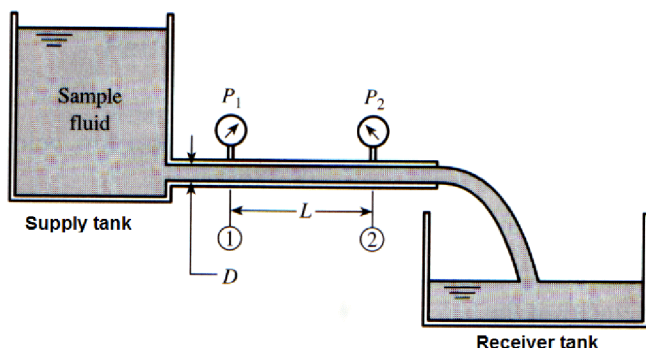
عن طريق: [2,4,8] 1. حقن جسيمات صلبة (Particles)

2. إضافة صمغ وبوليميرات (Polymers)

3. إضافة منشطات توتر سطحي (Surfactants).

4. إضافة مواد أخرى (....fiber,)

يحسب معدّل انخفاض المقاومة الهيدروليكية عند تدفق ثابت بالاستعانة بالمحطة المخبرية المبينة بالشكل (4) وذلك بحسب العلاقة التالية :



شكل رقم (4) يبين المحطة المخبرية المستعملة لدراسة تخفيض المقاومة الهيدروليكية.

$$DR = \frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s} \% \quad (Q = const) \dots \dots \dots (6)$$

حيث أن λ المقاومة الهيدروليكية وتحسب من معادلة دارسي - فيسباخ :

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \rho \dots \dots \dots (7)$$

λ_s : قيمة المقاومة الهيدروليكية قبل إضافة المادة .

λ_p : قيمة المقاومة الهيدروليكية بعد إضافة المادة .

ΔP : قيمة فرق الضغط بين النقطتين 1 و 2 التين تفصل بينهما مسافة L من الأنبوب

الواصل بين الخزانين ذو القطر الداخلي D وتعبر من خلاله مادة كثافتها ρ بسرعة V.

يعد العالم TOMS أول من أشار عام 1948 إلى أن إضافة كمية قليلة (أجزاء من المليون)

إلى تيار السائل من بوليمر قابل للاندخال ذو وزن جزيئي مرتفع يدعى مخفض المقاومة

الهيدروليكية (Friction Reducer) يؤدي إلى انخفاض واضح في المقاومة الهيدروليكية

عند الجريان المضطرب في ظاهرة أسميت بظاهرة تومس (Toms effect) وهي عملية

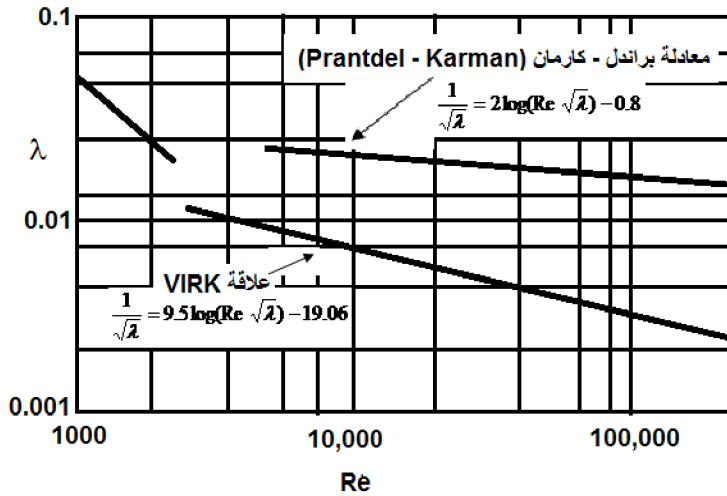
تخفيض متجانس للمقاومة الهيدروليكية (homogeneous drag reduction) كون

البوليمر المضاف يجب أن ينحل بشكل كامل ومتجانس في السائل. [8]

تراكمت الكثير من الأبحاث في هذا المجال حيث بحثت في تأثير كلاً من تركيز البوليمير و نصف قطر الأنبوب و درجة الحرارة على تخفيض المقاومة الهيدروليكية. يدعى أي هبوط في قيمة المقاومة الهيدروليكية عند نظام الجريان المضطرب وعند غزارة ثابتة بتخفيض لمقاومة (drag reduction) ، وقد أثبتت أبحاث VERK أن الحد الأعظمي لتخفيض المقاومة تصفه علاقة VIRK التالية:

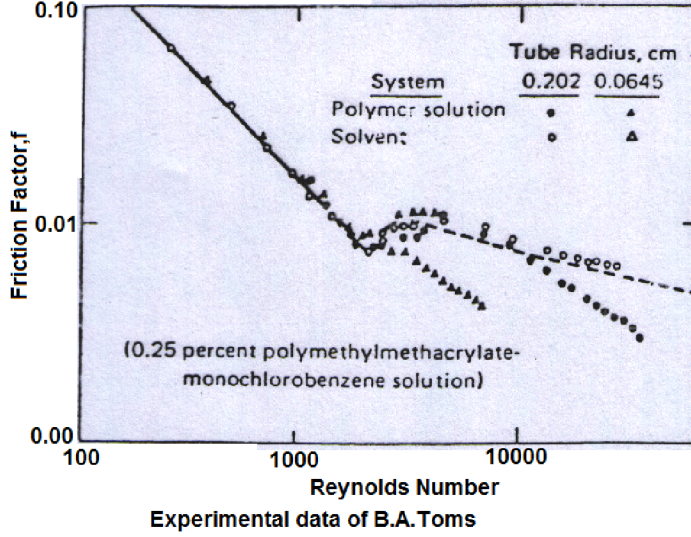
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 9.5 \cdot \log(\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}) - 19.6 \dots \dots \dots (8)$$

الشكل (5) يبين حدود علاقة المقاومة الهيدروليكية مع عدد رينولدز ويوضح الشكل خط تموضع قيم المقاومة للسائل النقي والذي يتمثل بخط معادلة براندل - كارمان وكذلك الحدود العظمى لإنخفاض المقاومة والمتمثلة بخط فيرك. [9]



الشكل (5) حدود علاقة المقاومة الهيدروليكية λ مع عدد رينولدز Re

لقد أجرى Toms تجاربه بإضافة نسبة من بولي ميثيل ميتاكريلات 0.25 % Monochlorobenzene إلى تيار مونوكلوروبنزين Polymethylmethacrylate solution وقد توصل إلى تخفيض المقاومة بنسبة 50% مقارنة مع المحلول النظيف كما هو موضح في الشكل رقم (6). [8]



الشكل (6) يبين نتائج تجربة TOMS في تخفيض المقاومة الهيدروليكية

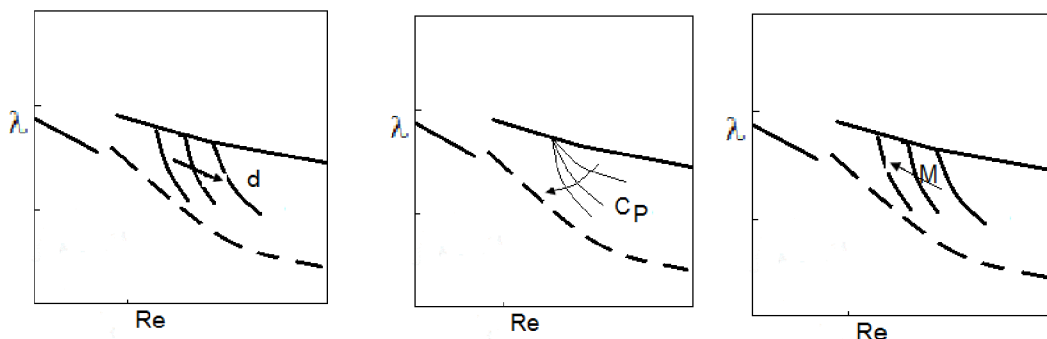
إن تحليل نتائج تومس تشير إلى:

- 1- انخفاض واضح في المقاومة الهيدروليكية وهو يزداد مع ارتفاع عدد رينولدز.
 - 2- إن انخفاض المقاومة يبدأ بشكل مبكر من أجل الأقطار الصغيرة (انزياح في نقطة البدء onset point) .
- نقطة البدء هي النقطة التي تبدأ عندها المقاومة الهيدروليكية بالانخفاض وهي تقابل بالطبع قيمة معينة لعدد رينولدز.

العوامل المؤثرة على تخفيض المقاومة الهيدروليكية:

- 1- عدد رينولدز Re : كلما ارتفع عدد رينولدز كلما ارتفع معدل انخفاض المقاومة DR . [8]
- 2- تركيز البوليمر في السائل C_p : يزداد معدل انخفاض المقاومة DR طردياً مع ازدياد تركيز البوليمر دون أن تتغير نقطة البدء Onset point حتى يصل التركيز إلى قيمة حدية يبدأ بعدها معدل انخفاض المقاومة بالتراجع مع زيادة تركيز البوليمر. [10]
- 3- قطر الأنبوب الداخلي D_i : يلعب ازدياد قطر الأنبوب دوراً بارزاً في انتقال نقطة البدء إلى أعداد رينولدز أعلى أي أن انخفاض المقاومة يبدأ بالأقطار الصغيرة أولاً. [10]

4- الوزن الجزيئي للبوليمير M : كلما كان الوزن الجزيئي للبوليمير المستخدم مرتفعاً كلما انتقلت نقطة البدء إلى أعداد رينولدز أدنى وهذا يعاكس من حيث النتيجة أثر القطر على معدل انخفاض المقاومة. [10] والشكل رقم (7) يوضح تأثير العوامل السابقة على معدل تخفيض المقاومة الهيدروليكية حيث تدل الأسهم على اتجاه ارتفاع قيم العوامل D , C_p , M . تجدر الإشارة إلى أهمية عملية تحضير المحلول البوليميري وطريقة إضافته إذ أن لعملية المزج تأثيراً كبيراً على النتيجة كما تشير التجارب أن لعمر البوليمير دوراً بارزاً ففعالية البوليمير حديث التصنيع أفضل من ذاك الذي مضى على تصنيعه زمناً.



شكل رقم (7) يبين العوامل المؤثرة على تخفيض المقاومة الهيدروليكية.

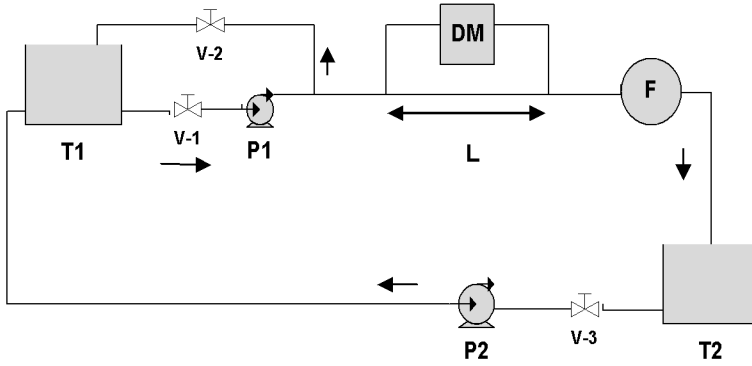
الهدف من إجراء البحث: تخفيض المقاومة الهيدروليكية عند ضخ المازوت السوري عبر محطة مخبرية، صممت وصنعت خصيصاً لهذا الغرض، عن طريق إضافة خافضات احتكاك قابلة للانحلال بالمازوت وتحديد التركيز الأمثل منها الذي يعطي انخفاضاً أعظماً في قيمة المقاومة الهيدروليكية.

المحطة المخبرية: الشكل رقم (8) يوضح المحطة المخبرية التي تم إجراء تجارب تخفيض المقاومة من خلالها وهي تتكون من:

1- خزانان (T_1 , T_2) سعة 200 لتر لكل منهما.

2- ثلاثة صمامات (V_1 , V_2 , V_3) متوضعة كما هو مبين في الشكل.

- 3- مضختان طاردتان مركبتان: تؤمن المضخة P_1 غزارة ثابتة في الأنبوب الأفقي القطر الداخلي (1.905 cm) وطول منطقة القياس الأفقية $L = 3M$ ويتم التحكم بغزارتها من خلال الصمامين V_1 و V_2 والمضخة P_2 تعمل على إعادة السائل من الخزان T_2 إلى الخزان T_1 من خلال الصمام V_3 .
- 4- مقياس ضغط تفاضلي رقمي (DM) ترتبط نهايته مع نهايات منطقة القياس الأفقية وهو من نوع (Omega HHP91- Heavy duty differential manometer ± 2000 mbar ; Resolution= 0.01 mbar)
- 5- مقياس تدفق رقمي (F) نوع (Yuanheng Digital diesel flow meter capacity: 1÷100 L/min; $\pm 1\%$ accuracy)



شكل رقم (8) محطة تخفيض المقاومة الهيدروليكية

طريقة العمل:

أجريت تجارب على المازوت النقي (بدون إضافات) بدايةً بهدف التأكد من جاهزية المحطة ودقتها، حيث تم تمرير المازوت النقي (بدون إضافات) ذو المواصفات المرفقة بالجدول (1) بواسطة المضخة في الأنبوب المتوضع بشكل أفقي ثم تم قياس التدفق و فرق الضغط ΔP عند تدفقات مختلفة بحيث بدأ القياس من التدفقات المنخفضة

التي يقابلها فرق قليل في الضغط وتدرجت حتى تدفقات أعلى والتي يقابلها قيم كبيرة في فرق الضغط بين نقطتي القياس. تم حساب عدد رينولدز Re من معادلة رينولدز:

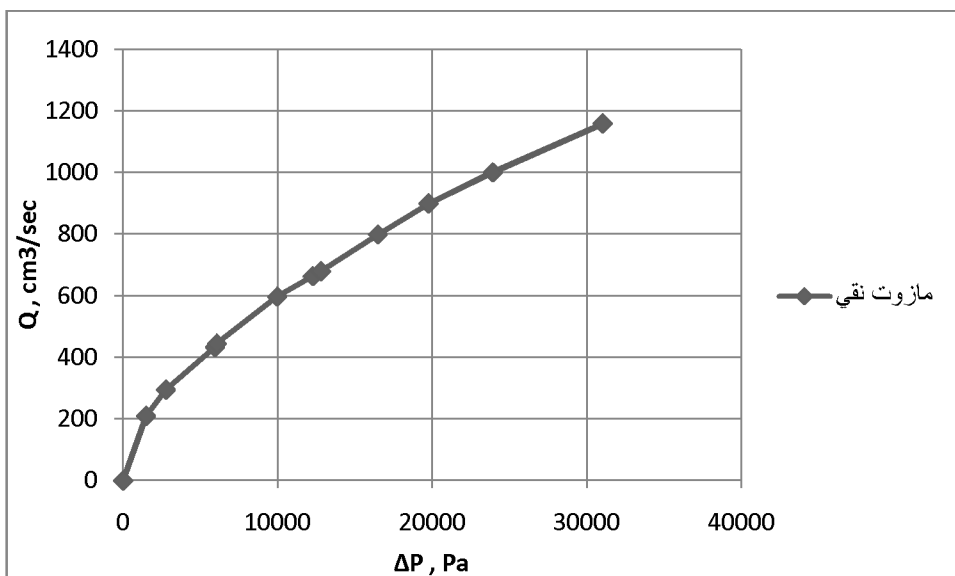
$$Re = \frac{V \cdot D_i}{\nu} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_i \cdot \nu} \dots \dots \dots (9)$$

كما تم حساب قيمة المقاومة الهيدروليكية λ المقابلة لعدد رينولدز من خلال معادلة دارسي - فيسباخ (7). أجريت التجارب عند درجة حرارة 15°C .

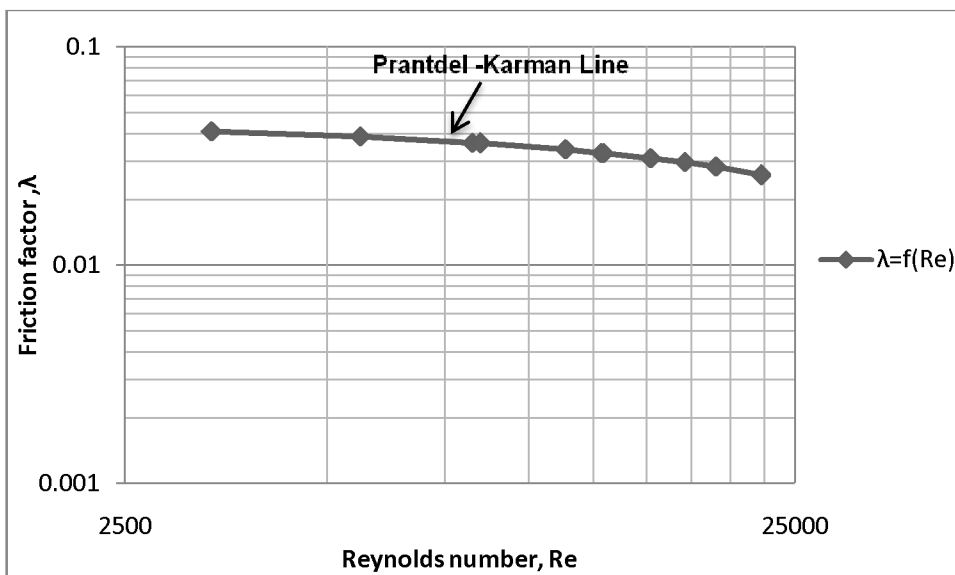
طريقة الفحص	متطلبات	خصائص
ASTM D1290/90	860	الوزن النوعي Kg/M^3 بدرجة 15°C
ASTM- D-93	65	درجة الوميض $^\circ\text{C}$
ASTM - D 445	3.50	اللزوجة c.St عند 15°C
ASTM - D 1266	0.6	نسبة الكبريت الكلي % وزنا
ASTM- D 611	68	درجة الإنبيلين $^\circ\text{C}$
ASTM 97	- 1	درجة الانصباب $^\circ\text{C}$
ASTM - D 2709	0.02	الماء والرواسب %
ASTM - D 189	0.07	راسب الكربون % وزنا

جدول رقم (1) يبين مواصفات المازوت المستخدم في التجارب

تم رسم منحنى الجريان (علاقة الغزارة مع فرق الضغط) في الشكل رقم (9) و رسم علاقة المقاومة الهيدروليكية λ مع عدد رينولدز Re في الشكل رقم (10).



شكل رقم (9) منحنى الجريان للمازوت النقي (بدون إضافات)



شكل رقم (10) يبين علاقة المقاومة الهيدروليكية مع عدد رينولدز للمازوت بدون إضافات.

يتبين من الشكل رقم (9) أن المنحنى يكون أفقياً عند الجريان الخطي وسرعان ما يتحول إلى منحنى عند الجريان المضطرب.

يتبين من الشكل (10) أن النقاط التجريبية للمقاومة الهيدروليكية قد توضع على خط براندل- كارمان كما هو متوقع وهذا ما يشير إلى أن المحطة متوازنة وصالحة للعمل (تم رسم المجال المضطرب فقط لأنه يمثل هدف الدراسة).

مراحل العمل:

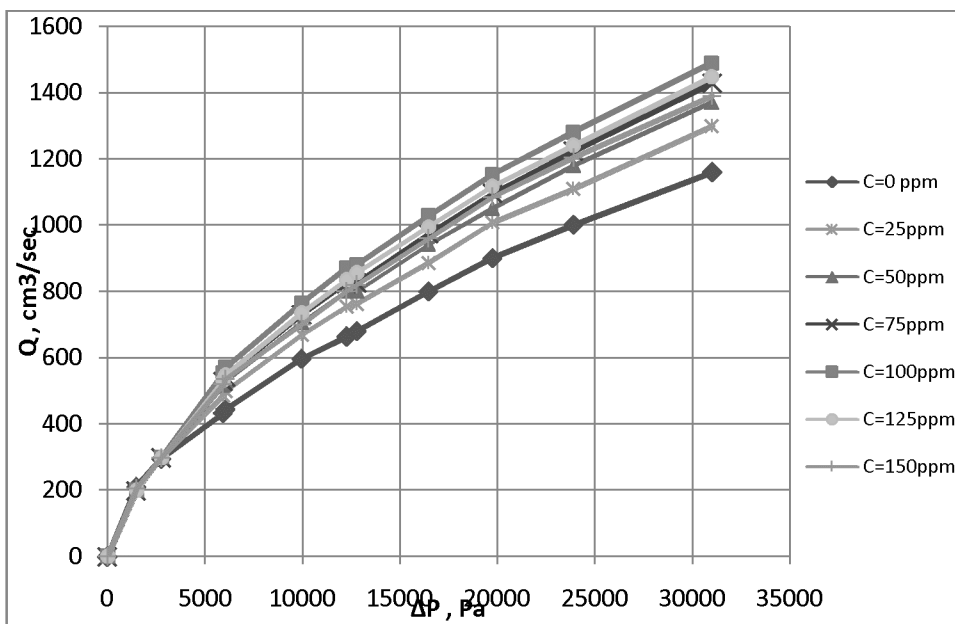
تؤخذ الكمية المقررة من مخفض الاحتكاك وتذاب مع كمية كافية من مذيب هيدروكربوني ثم يمدد المزيج بالمازوت ويحرك جيداً لتأمين انحلال متجانس وبذلك يصبح سائل خافض الاحتكاك جاهزاً للاستعمال حيث يضاف بحسب التركيز المطلوب ويحرك المزيج بصورة كافية بحيث ينحل ويتوزع بشكل متجانس في المازوت قيد الدراسة ثم يقاس التدفق وفرق الضغط المقابل ابتداءً من التدفقات الصغيرة وحتى العالية.

ترسم منحنيات الجريان ($Q-\Delta P$) ومنحنيات علاقة المقاومة الهيدروليكية بعدد رينولدز للمازوت النظيف ثم للمازوت عند كل تركيز لمخفض الاحتكاك المستخدم.

أجريت في هذه الدراسة ثلاث سلاسل من التجارب بهدف المقارنة والتوصل إلى الإضافة الأفضل والتركيز الأمثل وهي:

أولاً (تجارب خافض الاحتكاك نوع (Conoco- FR) :

يستخدم خافض الاحتكاك نوع Conoco-FR عادة كخافض احتكاك في أنابيب نقل المازوت من شركة CONOCO الأمريكية. يضاف خافض الاحتكاك Conoco-FR إلى المازوت النظيف بمعدل تركيز 25ppm ويمزج الخليط جيداً وتجرى القياسات وتكرر بخطوة قدرها 25ppm حتى تركيز 150 ppm لخافض الاحتكاك في المازوت عند درجة حرارة ثابتة (15°C) ويرسم منحنى الجريان.



شكل رقم (11) يبين منحنيات الجريان للمازوت النقي وللمازوت المضاف له نسب مختلفة من مخفض الاحتكاك

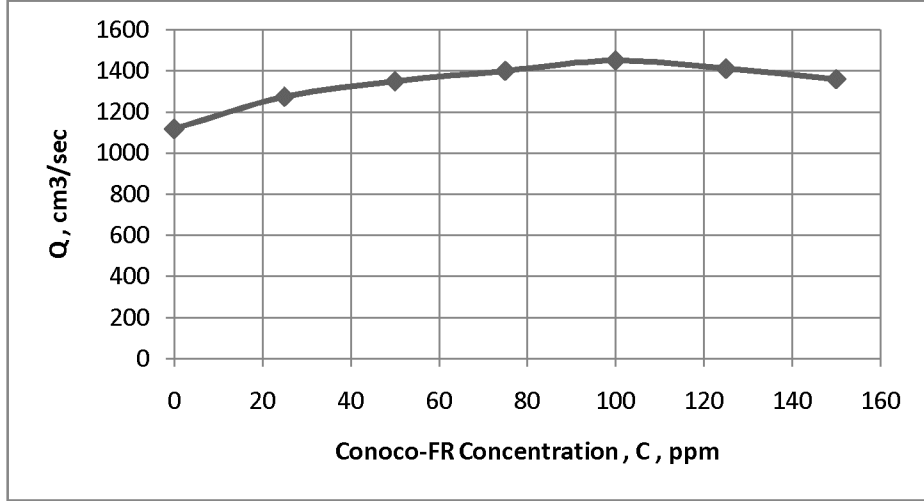
Conoco- FR

يلاحظ من الشكل أعلاه ما يلي:

- 1- إزباداً ملحوظاً في تدفق السائل مع ثبات الضغط بعد إضافة مخفض الاحتكاك ، وابتداءً من معدل تدفق معين.
- 2- لا تأثير للمضافة على معدل التدفق عند الجريان الصفحي (الجزء المستقيم من المنحنيات)

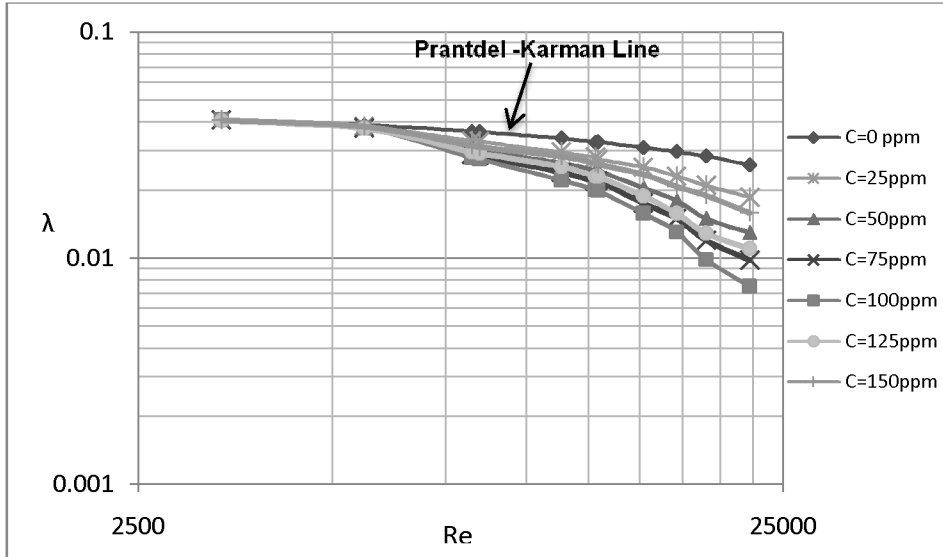
3- يوجد تركيز مثالي لخافض الاحتكاك يقابله أعلى معدل لزيادة التدفق ($C = 100$) وأن أي زيادة في تركيز المادة المضافة بعد التركيز المثالي يؤثر سلباً حيث لوحظ تراجعاً في معدل التدفق. (أجريت التجارب حول التركيز الحرج بخطوة تركيز 5ppm لتحديده بشكل دقيق).

بهدف إعطاء فكرة أوضح عن تغير الغزارة بالعلاقة مع تغير تركيز خافض الاحتكاك تم رسم تغير الغزارة مع تغير تركيز الإضافة عند فرق ضغط ثابت $\Delta p = 30000 \text{ pa}$ والنتائج مبينة على الشكل (12)



شكل رقم (12) يبين تأثير تركيز مخفض الاحتكاك على التدفق عند فرق ضغط ثابت مقداره $\Delta P = 30000 \text{ Pa}$

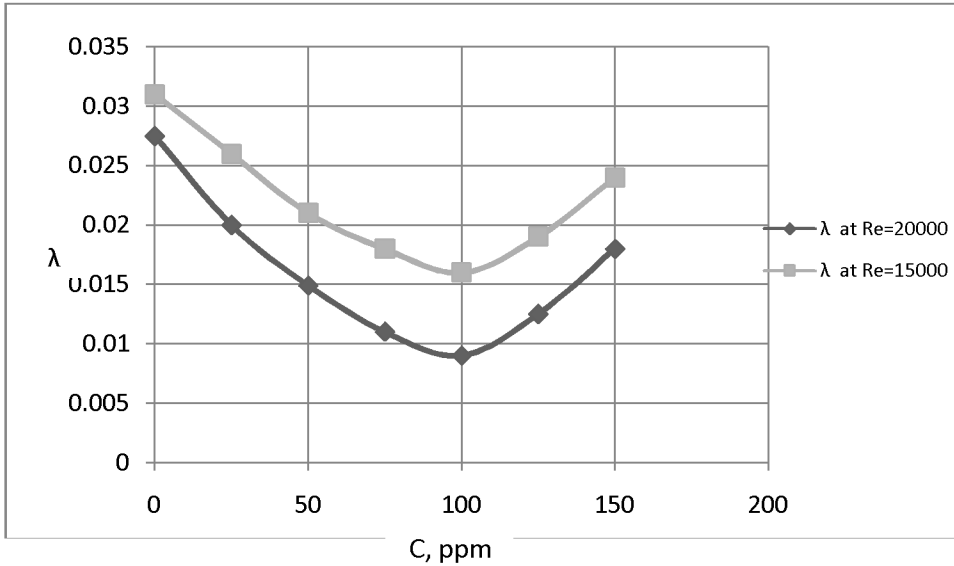
من الشكل رقم (12) يلاحظ إزدیاداً واضحاً في الغزارة يبلغ ذروته عند التركيز 100ppm لتتراجع الغزارة عند قيم أعلى من هذا التركيز مما يشير إلى أن التركيز السابق يمثل التركيز المثالي. تم حساب Re عند كل تدفق و حساب λ من معادلة دارسي فيسباخ وتم رسم العلاقة $\lambda = f(\text{Re})$ والشكل رقم (13) يمثل النتائج.



شكل رقم (13) يبين العلاقة $\lambda = f(\text{Re})$ عند تراكيز مختلفة من مخفض الاحتكاك Conoco - FR

يلاحظ من الشكل رقم (13) ما يلي:

- 1- انخفاض واضح في معامل المقاومة الهيدروليكية ابتداءً من عدد رينولدز 6000 حيث تسمى هذه النقطة نقطة البدء (onset point)
 - 2- يزداد معدل انخفاض المقاومة مع زيادة تركيز المضافة Conoco-FR ابتداءً من التراكيز الدنيا حتى يصل قيمته العظمى عند التركيز 100ppm من خافض الاحتكاك (التركيز المثالي).
 - 3- مع زيادة التركيز عن القيمة المثالية يلاحظ تراجع في معدل انخفاض المقاومة الهيدروليكية.
 - 4- يلاحظ ثبات نقطة البدء لكافة التراكيز.
- من أجل توضيح التغير السابق في المقاومة تم رسم علاقة المقاومة مع تغير تركيز المضافة Conoco-FR عند عددي رينولدز $Re = 15000$, $Re = 20000$ والنتائج موضحة في الشكل (14)



شكل رقم (14) يبين علاقة المقاومة الهيدروليكية مع تركيز مخفض الاحتكاك عند قيم محددة لعدد رينولدز

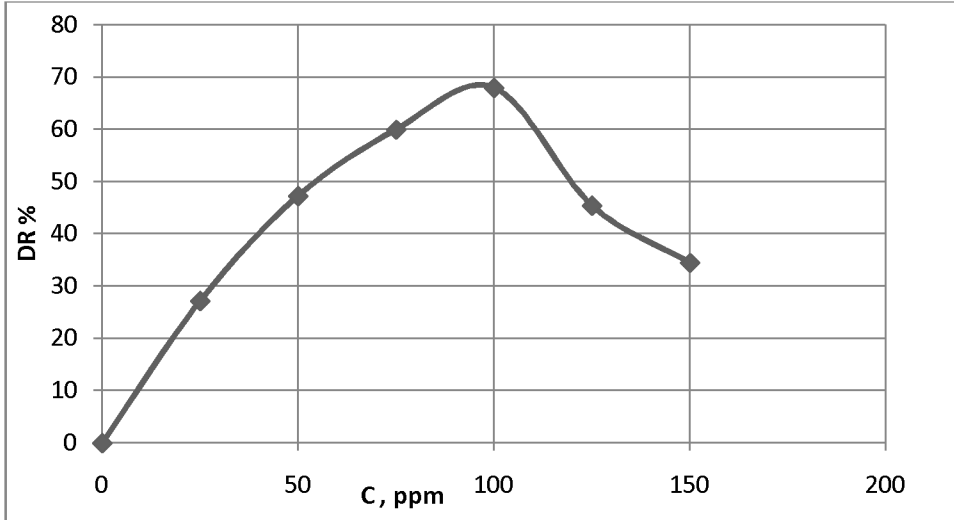
يلاحظ من الشكل رقم (14) ما يلي:

1- انخفاض واضح في قيمة المقاومة الهيدروليكية يبدأ مع كميات قليلة من المضافة Conoco-FR ويزداد مع زيادة التركيز ليصبح أعظماً عند التركيز 100ppm، مما يشير أن التركيز 100ppm هو الأفضل (المثالي) وهذا ما يتفق ومناقشة منحنيات الجريان حيث بلغت الغزارة ذروتها عند نفس التركيز.

2- مع زيادة تركيز المضافة عن التركيز المثالي يلاحظ ازدياد في قيم المقاومة.

3- يلاحظ زيادة في انخفاض المقاومة مع زيادة عدد رينولدز.

لإعطاء فكرة أوضح عن نسبة الإنخفاض في المقاومة الهيدروليكية بحسب معدل انخفاض المقاومة (الإحتكاك) Drag Reduction DR من المعادلة رقم (5) حيث تم حساب معدل انخفاض المقاومة عند عدد رينولدز $Re = 20000$ عند إضافة تراكيز مختلفة للمضافة Conoco-FR والنتائج مبينة في الشكل (15)



شكل رقم (15) يبين العلاقة بين تركيز مضافة Conoco - FR و معدل انخفاض المقاومة عند عدد رينولدز $Re=20000$

يلاحظ من الشكل رقم (15) أن معدل تخفيض المقاومة بلغ 68% عند التركيز المثالي $C=100$ PPM ومن ثم يعود لينخفض عند زيادة هذه القيمة.

ثانياً تجارب خافض الاحتكاك نوع (PMD- FR) :

تم تحضير هذه المضافة مخبرياً وهي تتركب من نسب معينة من المواد التالية:

1- Dodecyl benzene ($C_{18}H_{30}$) , $M= 246.44$ g/mol)

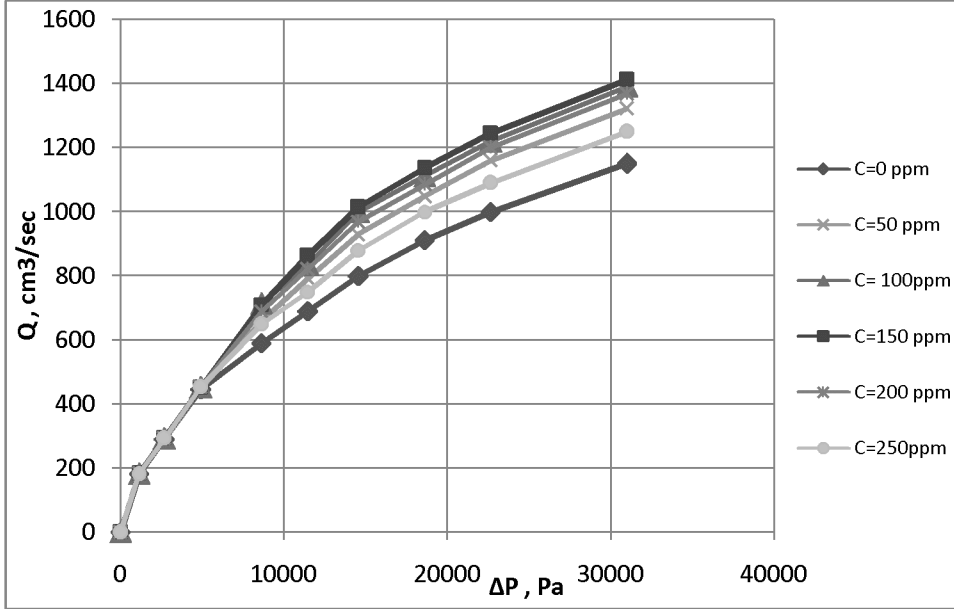
2- Poly methyl metacrylate(High molecular Weight)

3- Polyisobutyl methacrylate (High molecular Weight)

4- 2-Amino-1-butanol ($C_4 H_{11} NO$, $M= 89.14$ g/mol)

5- Ether 6- Fuel oil

أجريت التجارب بنفس الترتيب كما في السلسلة الأولى ومثلت النتائج بمنحنيات بيانية وبداية تم تمثيل منحنى الجريان للمازوت عند نسب مختلفة من مضافة PMD في الشكل رقم (16).



شكل رقم (16) يبين منحنى جريان المازوت عند نسب مختلفة من PMD- FR

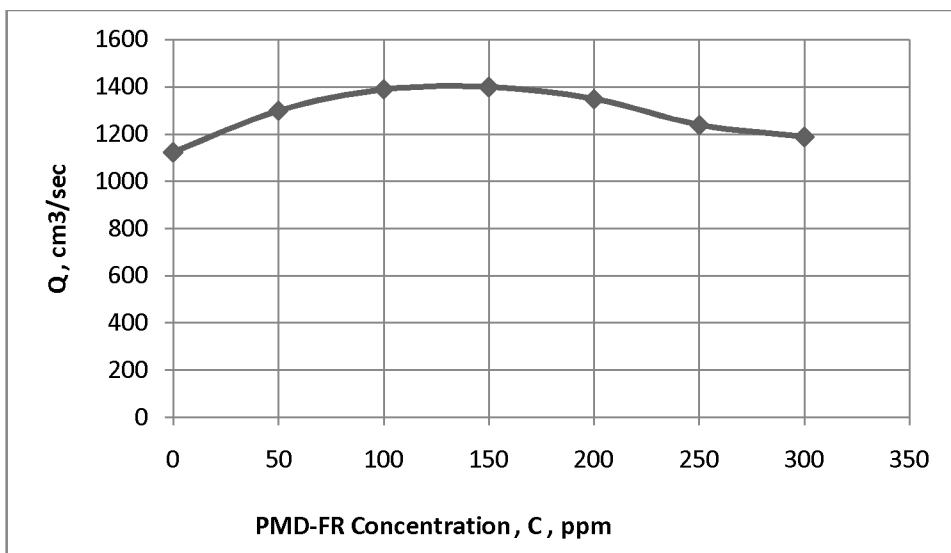
يلاحظ من المنحنى رقم (16) ما يلي:

- 1- أنه بعد إضافة خافض الاحتكاك ، وابتداءً من معدل تدفق معين (حوالي 500 cm^3/sec)، يزداد تدفق السائل مع ثبات الضغط بشكل ملحوظ.

2- لا تأثير للمضافة على التدفق عند الجريان الصفحي وقسم من الجريان المضطرب.

3- التركيز المثالي للمخفض 150 PPM وينخفض معدل زيادة التدفق بعد هذه القيمة.

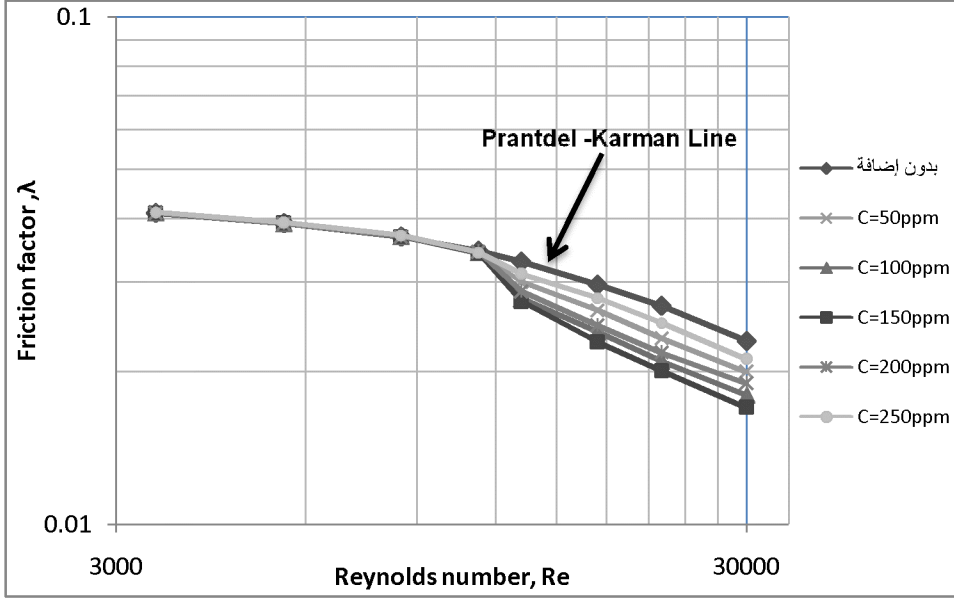
الشكل (17) يبين تغير الغزارة Q عند إضافة نسب مختلفة من مضافة PMD عند فرق ضغط ΔP ثابت.



شكل رقم (17) يبين تأثير تغير تركيز PMD-FR على قيمة الغزارة عند فرق ضغط ثابت $\Delta P = 30000$ Pa

يلاحظ من الشكل رقم (17) إزدياداً واضحاً في الغزارة يبلغ ذروته عند التركيز 150ppm و يقابل الزيادة في التركيز بعد هذه القيمة تراجعاً في معدل زيادة الغزارة مما يشير إلى ان التركيز السابق يمثل التركيز المثالي.

الشكل رقم (18) يبين علاقة عدد رينولدز المحسوب عند كل تدفق مع معامل المقاومة الهيدروليكية المحسوب من علاقة دارسي - فيسباخ وذلك عند نسب مختلفة من مضافة خافض الاحتكاك PMD-FR.



شكل رقم (18) يبين علاقة معامل المقاومة الهيدروليكية مع عدد رينولدز عند تراكيز مختلفة من PMD-FR

يلاحظ من الشكل رقم (18) ما يلي:

1- انخفاض واضح في معامل المقاومة الهيدروليكية ابتداءً من $Re=11000$

تقريباً و بالتالي تكون هذه النقطة هي نقطة البدء (onset point).

2- يزداد معدل انخفاض المقاومة مع زيادة تركيز المضافة PMD-FR ابتداءً من

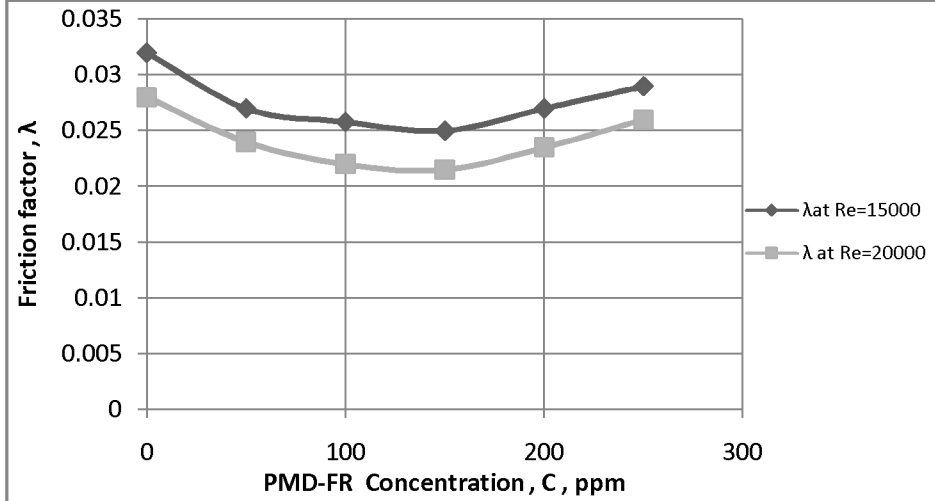
التراكيز الدنيا حتى يصل قيمته العظمى عند التركيز 150ppm (التركيز

المثالي) ويتراجع معدل الانخفاض مع زيادة التركيز عن التركيز المثالي.

3- ثبات نقطة البدء لكافة التراكيز .

نتائج حساب تغير قيمة معامل المقاومة الهيدروليكية عند إضافة نسب مختلفة من

مضافة PMD-FR عند أعداد رينولدز مختلفة مبينة في الشكل رقم (19).

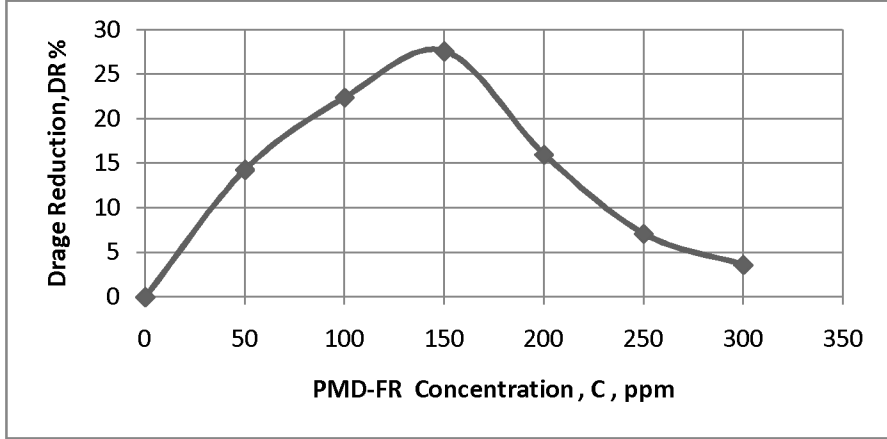


شكل رقم (19) يبين تأثير تركيز المضافة PMD-FR على معامل المقاومة الهيدروليكية عند Re=15000, 20000

يلاحظ من الشكل رقم (19) ما يلي:

- 1- انخفاض واضح في قيمة المقاومة الهيدروليكية يبدأ مع كميات قليلة من المضافة PMD-FR ويزداد مع زيادة التركيز ليصبح أعظمياً عند التركيز 150ppm مما يشير أن هذا التركيز هو الأفضل (المثالي) وها ما يتفق ومناقشة منحنيات الجريان حيث بلغت الغزارة ذروتها عند نفس التركيز .
 - 2- مع زيادة تركيز المضافة عن التركيز المثالي يلاحظ ازدياد في قيم المقاومة.
 - 3- زيادة انخفاض المقاومة مع زيادة عدد رينولدز .
- نتائج حساب معدل انخفاض المقاومة الهيدروليكية % DR عند إضافة نسب مختلفة من المضافة PMD-FR عند عدد رينولدز Re=20000 مبينة في الشكل رقم (20).
- يلاحظ من الشكل رقم (20) ما يلي:

- 1- ازدياد في معدل انخفاض المقاومة عند إضافة كميات قليلة جداً من المضافة PMD-FR حيث بلغت أعلى معدل عند التركيز 150ppm تقريباً.
- 2- بلغ معدل التخفيض في المقاومة حوالي 27 %
- 3- زيادة التركيز عن التركيز المثالي يؤدي إلى تراجع في معدل انخفاض المقاومة .



شكل رقم (20) يبين تأثير تركيز المضافة PMD-FR على معدل انخفاض المقاومة الهيدروليكية عند

Re=20000

ثالثاً (تجارب خافض الاحتكاك (PIB-FR):

تم تحضير مضافة خافض احتكاك Friction reducer أخرى يدخل في تركيبها مواد مذابة وأخرى مبعثرة (Dispersant) وأخرى بوليميرية ذات وزن جزيئي مرتفع بنسب مختلفة حيث سميت المضافة (PIB- Friction reducer) وتتألف من:

1- Polyisobutylene (High molecular Weight)

2- Ether

3- Fuel oil

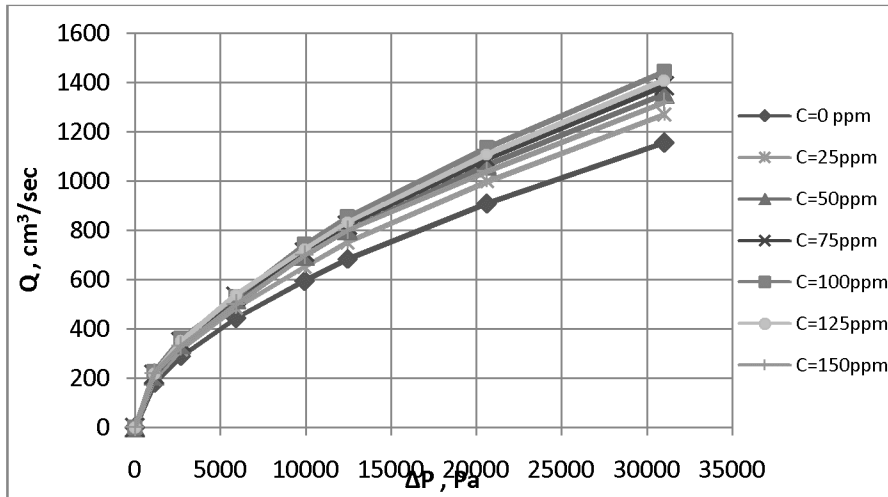
4- Dispersant

بدايةً كان لا بد من معرفة تأثير هذه المضافة بتركيزها المدروسة على مواصفات المازوت المنقول حيث أوضحت الاختبارات الأساسية للمازوت ذو التركيز 150ppm من المادة المضافة أنه لا تأثير واضح لهذه الإضافة على كل من الكثافة ، درجة الوميض ، درجة الإنيلين ، نسبة الكبريت الكلي ، الماء والرواسب. بينما لوحظ ارتفاع طفيف جداً في اللزوجة وراسب الكربون مع بقائها ضمن الحدود المسموح بها مع انخفاض في درجة الانصباب كما هو مبين في الجدول رقم (2).

طريقة الفحص	المادة		خصائص
	مازوت بتركيز 150 PPM	مازوت نقي	
ASTM D1290/90	0.859	860	الوزن النوعي Kg/M^3 بدرجة 15°C
ASTM- D-93	65	65	درجة الوميض $^\circ\text{C}$
ASTM - D 445	3.52	3.50	اللزوجة c.St عند 15°C
ASTM - D 1266	0.6	0.6	نسبة الكبريت الكلي % وزنا
ASTM- D 611	68	68	درجة الإنيلين $^\circ\text{C}$
ASTM 97	- 3	- 1	درجة الانصباب $^\circ\text{C}$
ASTM - D 2709	0.02	0.02	الماء والرواسب %
ASTM - D 189	0.071	0.07	راسب الكربون % وزنا

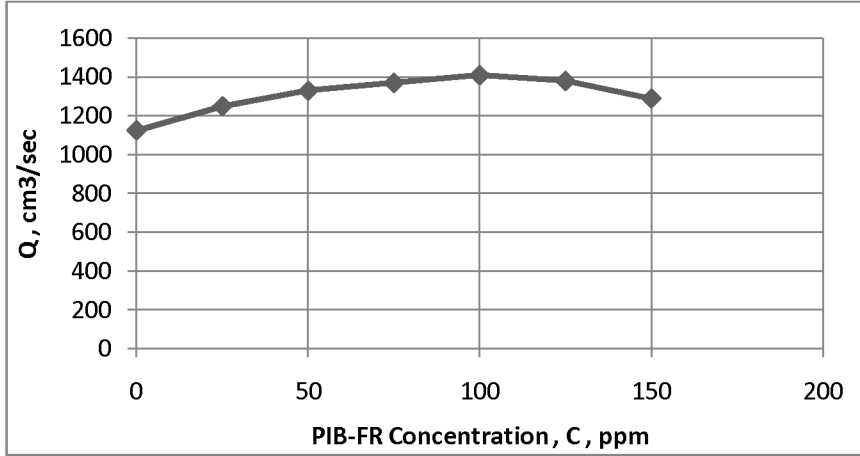
جدول رقم (2) يبين مدى تأثير مواصفات المازوت ذو التركيز 150 PPM من مخفض الاحتكاك PIB-FR

تم رسم منحنى الجريان عند نسب مختلفة للمضافة والنتائج مبينة على الشكل (21)



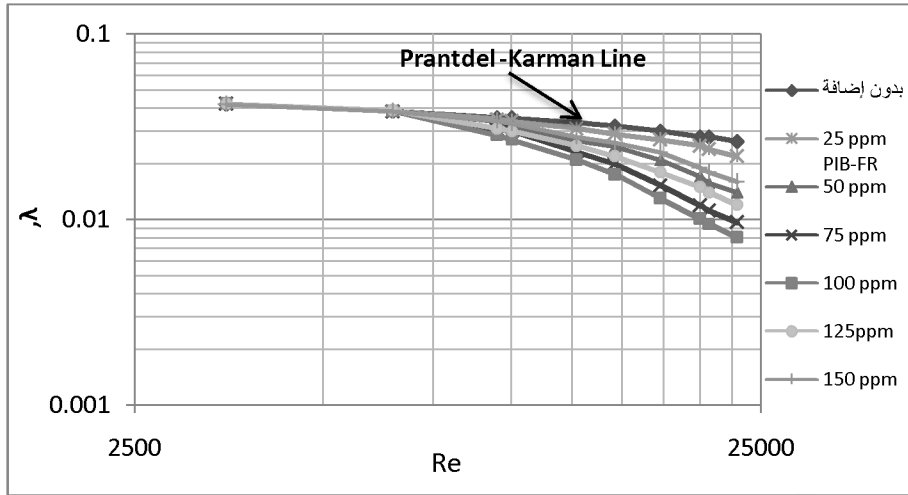
شكل رقم (21) يبين منحنى الجريان عند تراكيز مختلفة من PIB-FR

يلاحظ من الشكل (21) ازدياد التدفق طردياً مع زيادة تركيز مخفض الإحتكاك بعد بلوغ الجريان المضطرب حداً معيناً وعند التدفق حوالي $300 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ويلاحظ أيضاً أن التركيز المثالي للمخفض هو 100 PPM بحيث ينخفض معدل التدفق بعد بلوغ التركيز قيمته المثالية. والشكل (22) يبين علاقة التدفق مع تركيز مضافة PIB-FR.



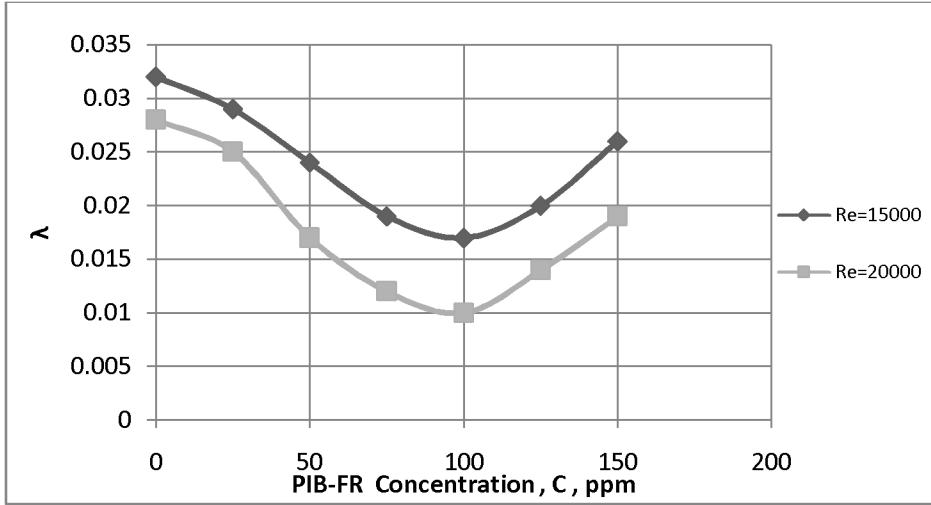
شكل رقم (22) يبين تغير التدفق عند تراكيز مختلفة من PIB-FR عند فرق ضغط ثابت $\Delta P = 30000 \text{ Pa}$

يلاحظ من الشكل (22) أن التركيز المثالي هو 100PPM وأن معدل الزيادة في الغزارة بلغ 25% عنده. العلاقة $\lambda = f(\text{Re})$ عند تراكيز مختلفة من PIB مبينة في الشكل رقم (23).



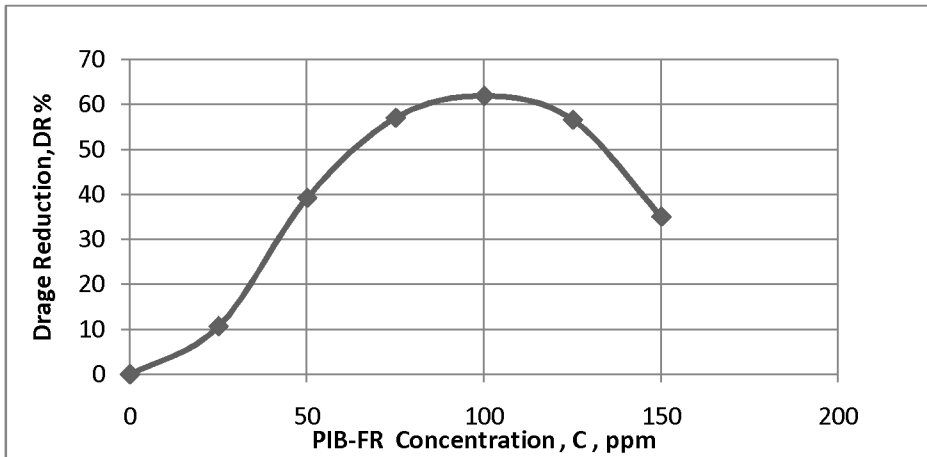
شكل رقم (23) يبين علاقة المقاومة الهيدروليكية بعدد رينولدز عند تراكيز مختلفة من مضافة PIB-FR

يلاحظ من الشكل (23) انخفاضاً واضحاً في معامل المقاومة الهيدروليكية ابتداءً من عدد رينولدز 7500 وتكون هذه النقطة هي نقطة البدء وقيمة التركيز المثالي 100ppm حيث تعود قيمة المقاومة للانخفاض مع زيادة التركيز عن 100PPM. يبين الشكل (24) تغير قيمة المقاومة عند قيم مختلفة لعدد رينولدز مع تغير تركيز PIB-FR.



شكل رقم (24) يبين تغير المقاومة الهيدروليكية عند Re=15000, 20000 مع تغير تركيز المضافة PIB-FR

الشكل (25) يعبر عن تغير قيمة معدل انخفاض المقاومة مع تغير تركيز PIB-FR.



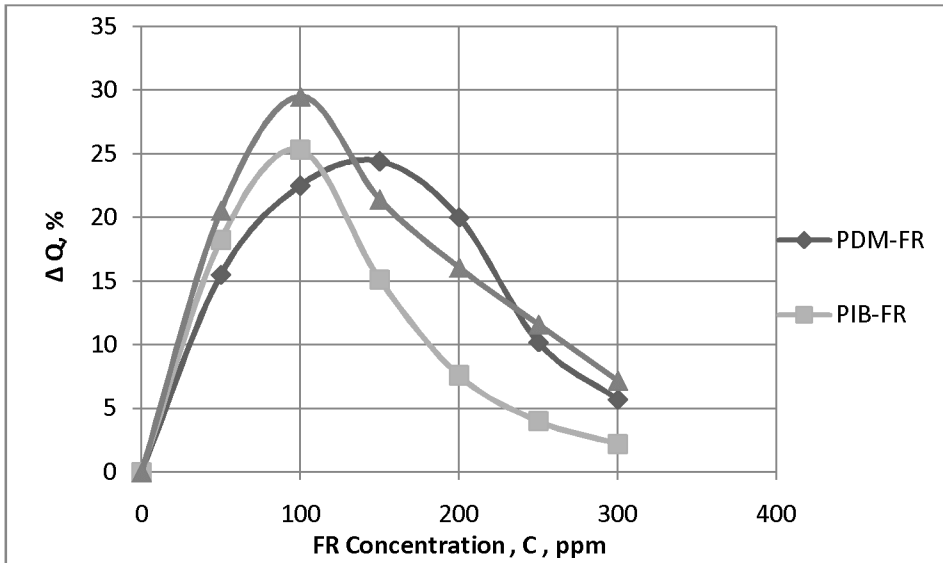
شكل رقم (25) يبين علاقة معدل انخفاض المقاومة مع تغير تركيز PIB-FR

يلاحظ من الشكلين (24) و (25) انخفاضاً في قيمة المقاومة مع زيادة تركيز خافض الاحتكاك PIB-FR ، حيث يبلغ قيمته العظمى عند تركيز 100ppm ويلاحظ أيضاً ازدياداً في معدل انخفاض المقاومة مع ازدياد عدد رينولدز. إن الازدياد في معدل انخفاض المقاومة يبدأ عند إضافة كميات قليلة جداً من PIB-FR حيث بلغت أعلى معدل عند التركيز 100ppm تقريباً و بلغ معدل التخفيض في المقاومة حوالي 62 %.

بهدف المقارنة بين المضافات الثلاث تم رسم بعض البيانات في لوحة واحدة .

الشكل (26) يوضح التغير المئوي للغزارة بالنسبة للمضافات الثلاثة عند فرق الضغط مقداره $\Delta P = 30000 \text{ Pa}$ والذي يتم حسابه من العلاقة التالية:

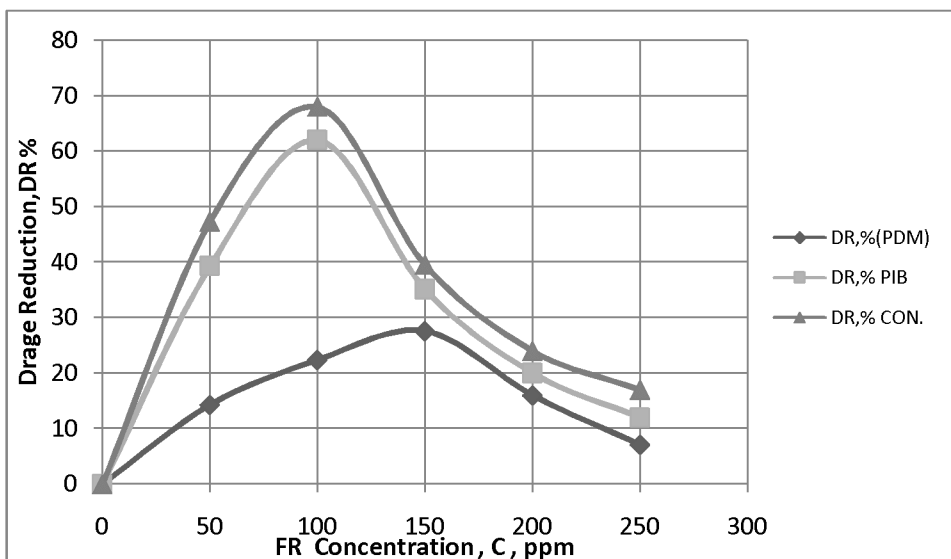
Q_s - الغزارة قبل إضافة خافض الاحتكاك ، Q_p - الغزارة بعد إضافة خافض الاحتكاك.



شكل رقم (26) يبين التغير المئوي للغزارة عند استخدام تراكيز مختلفة من المضافات الثلاثة عند فرق ضغط

30000 Pa

الشكل رقم (27) يبين معدل انخفاض المقاومة الهيدروليكية عند تراكيز مختلفة من المضافات الثلاث.



شكل رقم (27) يبين معدل انخفاض المقاومة عند تراكيز مختلفة من المضافات الثلاث

النتائج:

1- تعتبر المضافة Conoco-FR الأفضل من حيث الزيادة في الغزارة ومعدل انخفاض المقاومة الهيدروليكية التي تقدمها و تليها المضافة PIB-FR ثم PDM-FR.

2- بلغت فعالية مضافة PIB-FR حوالي 90% من فعالية مضافة Conoco-FR علماً أن لهما نفس التركيز المثالي 100 PPM.

3- لم يسبب استخدام تراكيز قليلة من PIB-FR أي تغير ملحوظ في مواصفات المازوت (جدول رقم 2) مما يجعل من هذه المضافة مخفضاً جيداً للاحتكاك وذلك لرفع استطاعة خطوط أنابيب نقل المازوت السوري.

4- تفسر ظاهرة انخفاض معدل تخفيض المقاومة الهيدروليكية بعد بلوغ التركيز المثالي بأنه بدءاً من التركيز الأولي لخافض الاحتكاك في المازوت النقي تتوجه جزيئاته نحو جدار الأنبوبة وتتبط الدوامات الصغيرة ويتعمق هذا الفعل مع زيادة تركيز المضافة في السائل وحتى التركيز المثالي الذي يقابل تثبيطاً أعظمياً للدوامات الصغيرة ، وبعد ذلك التركيز فإن أي زيادة في تركيز المادة المضافة سيؤدي إلى زيادة لزوجة المازوت وبالتالي تراجع في معدل انخفاض المقاومة.

5- إن الزيادة في الغازرة تعني أيضاً تخفيضاً في الضغط عند غازرة ثابتة فمثلاً لتحقيق غازرة مقدارها $900 \text{ cm}^3/\text{sec}$ (شكل 21) يلزم فرق ضغط قدره 20000 pa ولكن مع إضافة 100ppm من خافض الإحتكاك PIB-FR مثلاً ترتفع الغازرة إلى cm^3/sec 1125 عند نفس فارق الضغط وهذه الغازرة الجديدة تتحقق عند فرق ضغط 29000 pa بدون إضافة ما يعني توفير في الطاقة بمعدل 30% تقريباً ، ومع إضافة 100PPM من Conoco-FR (شكل 11) ترتفع الغازرة إلى إلى $1150 \text{ cm}^3/\text{sec}$ عند نفس فارق الضغط وهذه الغازرة الجديدة تتحقق عند فرق ضغط 30000 pa بدون إضافة ما يعني توفير في الطاقة بمعدل 33.3% .

المراجع باللغة العربية:

- 1- أ. د. ماهر سعادة، 1997 - نقل وتخزين النفط. منشورات جامعة البعث - كلية الهندسة البترولية والكيميائية.
- 2- أ. د. ماهر سعادة، د. جان سعد، 2009 - ميكانيك الموائع. منشورات جامعة البعث - كلية الهندسة البترولية والكيميائية.

المراجع باللغة الانكليزية:

- 3- Kane R. S (1990) "Viscous drag reduction in boundary layers "Progr. in Astronautics and Aeronautics.P.433.
- 4- Lumley, J. L. 1973 Drag reduction in turbulent flow by polymer additives. J. Polymer Sci. Macromol.rev7.
- 5- Merkle C. L. (1990) " Viscous drag reduction in boundary layers" . Progr. in Astronautics and Aeronautics.P.351..
- 6- Saadeh M. & Strehlow A.,1993 – The Influence of The Injection System on Drag Reduction. Rheologica Acta 32:398-404.
- 7- Saadeh M., Strauss K. & Schneider T., 1997- A Combined PIV/LIF-System for The Measurement of Heterogeneous Drag Reduction Effects in A Pipe Flow. Experiments in Fluids 22 (1997) 292-299.
- 8- Toms, B. A. 1949 Some observation on the flow of linear polymer solution through straight tubes at large Reynolds numbers. Int. congress Rheology. Amsterdam, II. p.p. 135 – 141.
- 9- Virk P. S , , 1971 ,“ Drag reduction in pipes “ Journal of fluid mechanics , vol. 45, P.225
- 10- Warholic, M. D., Massah, H. & Hanratty, T. J. 2010 Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing. Exps. Fluids 27, 461–472.