مجلة الهندسة والتنمية المستدامة
المجلد 23، العدد 4، تموز 2019
ISSN 2520-0917
https://doi.org/10.31272/jeasd.23.4.13

إنتقال الحرارة وهبوط الضغط خلال عملية التكثيف في أنبوب عمودي للمائع R407c

د. عدنان محمد الصفاوي[1]، *نجاح عبدالله حمد[2]

1) أستاذ مساعد، قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة الموصل، نينوى، العراق
2) طالبة ماجستير، قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة الموصل، نينوى، العراق

تاريخ التقديم 2017/11/27 تاريخ القبول 2018/4/23 تاريخ النشر 2019/7/1

الخلاصة: تضمن العمل الحالي تقديم تحليل نظري لانتقال الحرارة وهبوط الضغط وخصائص الجريان للمائع R407c خلال عملية التكثيف لنمط الجريان الحلقي في أنبوب عمودي. واستخدمت طريقة (Gauss Seidel) لحل معادلات حفظ الكتلة والزخم والطاقة المتحكمة بعملية الجريان وتمت كتابة البرنامج الحاسوبي بلغة EES(Engineering Equation Solver).وأجريت الدراسة لثلاثة أقطار للأنابيب هي (8و10و12mm)، وثلاث سرع تدفق كتلية وهي (75و100 و125kg/m^2.s)، وثلاث قيم للفرق بدرجات الحرارة بين البخار المشبع المار في الأنبوب وجدار الأنبوب وهي (2 و4 و6K). وبينت النتائج أن لتغير الفرق بدرجات الحرارة تأثير كبير في معامل انتقال الحرارة ومعظم خصائص الجريان الثنائي الطور يليه تأثير تغير سرعة التدفق الكتلية للبخار، وان أقل تأثير هو لتغير قطر الأنبوب إذ بلغ معدل نسبة الزيادة في معامل انتقال الحرارة عند صغر قطر الأنبوب من (12 mm) إلى (8 mm) 3.738% وبلغ معدل نسبة الزيادة في هذا المعامل عند زيادة سرعة التدفق الكتلي من (75 kg/m^2.s) إلى (125 kg/m^2.s) 20.516% في حين بلغ معدل نسبة النقصان في هذا المعامل عند زيادة الفرق بدرجات الحرارة من (2K) إلى (6K) 27.574% .

الكلمات الدالة: *إنتقال الحرارة، هبوط الضغط ، عملية التكثيف،جريان ثنائي الطور، أنبوب عمودي، نمط الجريان الحلقي.*

HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP THROUGH CONDENSATION OF R407c IN VERTICAL TUBE

Abstract: This work included a theoretical analysis for heat transfer, pressure drop and flow characteristics of refrigerant R407c during condensation process for the annular flow pattern in the vertical tube. The (Gauss Seidel) method was used to solve the conservation equations of mass, momentum and energy governing in the flow process, and developing a computer program in EES (Engineering Equation Solver). The study was conducted for three tube diameters which are (8,10 and 12mm), three mass flow velocities, namely, (75,100 and 125kg/m^2.s), and three values of temperature difference between the saturated vapor flowing in tube and tube wall, namely, (2,4 and 6K).The results showed that the change in temperature difference have a significant effect on a heat transfer coefficient, and on most two phase flow characteristics followed by the effect of changing the mass flow velocity of vapor, and the less the effect is the change of tube diameter. The ratio of the increase rate in heat transfer coefficient reached 3.738% when tube diameter reduced from (12mm) to (8mm) and the ratio of the rate was 20.516%when the mass flow velocity of vapor increased from (75kg/m^2.s) to (125kg/m^2.s), while the ratio of the decreasing rate when increasing the temperature difference from(2K) to (6K) 27.574%.

1. المقدمة

إن عملية تكثيف البخار وتحويله إلى سائل هي إحدى ظواهر الجريان الثنائي الطور، وتتم هذه العملية بطرح الحرارة الكامنة للتكثيف وذلك عندما يكون البخار بتماس مع سطح صلب أو مائع لهما درجة حرارة أقل من درجة

* الباحث المتابع najahabdullah8954@yahoo.com

حرارة التشبع للبخار[1].وتمر عملية التكثيف بمراحل أو أنماط عديدة تعتمد على شكل الأنبوب ومعدل التدفق والخصائص الفيزيائية لطوري المائع [2]. ويتصف الجريان في الأنبوب العمودي بتأثره بالتعجيل الأرضي، لذلك فانه يختلف عن الجريان في الأنبوب الأفقي في توزيع السائل والبخار، حيث يتجه السائل إلى الأسفل والغاز إلى الأعلى[1]، يعد الجريان الحلقي أهم مراحل الجريان ويمثل أطول نمط جريان يمر به المائع ثنائي الطور خلال عملية التكثيف في الأنابيب ، لذلك نال الاهتمام الكبير في جميع البحوث النظرية والتطبيقية. وعلى الرغم من قلة البحوث في حالة التدفق نحو الأسفل بالمقارنة مع التدفق نحو الأعلى فقد بينت بعض الدراسات وجود اتساع لنمط التدفق الحلقي نحو الأسفل بالمقارنة مع أنظمة التدفق نحو الأعلى [3].

إن أهم الخصائص التي اهتم بها الباحثون لعملية التكثيف في الأنابيب العمودية هو معامل انتقال الحرارة، حيث قام العديد من الباحثين بدراسات عملية ونظرية لأجل تحسين هذا العامل المهم، وقد قدم الباحث Carey[4]نموذجاً تحليلياً للتدفق نحو الأسفل لنمط الجريان الحلقي على معظم طول أنبوب التكثيف مع فرض أن المائع يدخل الأنبوب وهو في حالة البخار المشبع وان طبقة السائل المتكثف يكون طباقياً وتدفق البخار في المركز يكون مضطرباً وفرض أن سمك طبقة السائل المتكثف تكون صغيرة نسبة إلى قطر الأنبوب وبهذا استند في تحليل عملية التكثيف إلى نموذج نسلت العام المتمثل بالمعادلة أدناه [5] :

$$h = \left[\frac{\rho_l(\rho_l-\rho_v)\, g\, h_{lv} k_l^3}{4\mu l(T_{sat}-T_w)\, z}\right]^{1/4} \quad (1)$$

وزاد عليه تأثير إجهاد القص البيني وهبوط الضغط مع إهمال تأثير تغير كسر الفراغ في حساب هبوط الضغط على طول أنبوب التكثيف وفرض بأن خصائص مائع التشغيل ثابتة، ولاحظ بأن هبوط الضغط على طول أنبوب التكثيف يكون صغيراً واستنتج أن تحليله لا يطبق على التدفق المضطرب لطبقة السائل .

وأجرى الباحث Dalkilic[6] وزملاؤه دراسة عملية للتكثيف على شكل غشاء رقيق خلال التدفق الطباقي لمائع التثليج R134a في أنبوب عمودي أملس بقطر داخلي يتراوح بين (7-8.1mm) وطول 500mm. وأجروا تجارب التكثيف عند سرعتي التدفق الكتلية 263kg/m^2.s و29kg/m^2.s وقيم ضغط تتراوح بين(0.1-0.77Mpa)، لإيجاد قيم كل من معامل انتقال الحرارة وسمك طبقة التكثيف ومعدل التكثيف للتدفق نحو الأسفل ، بينت نتائجهم بان لإجهاد القص تأثير مهم على انتقال الحرارة في التكثيف الطباقي.واستخدموا تحليل Carey[5] (نموذج نسلت المحسن) لحساب معامل انتقال الحرارة الموضعي،واستنتجوا أن معدل تدفق كتلة البخار تكون أعلى عند مدخل الأنبوب وكذلك معامل انتقال الحرارة الموضعي بينما يكون سمك طبقة المائع المتكثف أكبر عند نهاية الأنبوب حيث يكون معامل انتقال الحرارة الموضعي أقل .

كما قام الباحثShah[7]بإجراء دراسة ضمت22 مائعاً وهي الماء وموائع تبريد هالوكربونية وموائع تبريد هيدروكاربونية ومواد عضوية أخرى، متكثفة داخل أنابيب أفقية وعمودية ومائلة للتدفق نحو الأسفل. وقام بتغطية مجموعة من المتغيرات لمدى واسع مثل أقطار الأنابيب من 2mm إلى49mm ونسبة انخفاض الضغط من 0.0008 الى 0.9 ومعدلات التدفق من 4kg/m^2.s إلى 820kg/m^2.s وأرقام رينولدز للسائل من68 إلى 85000 وأرقام برانتل للسائل من 1 إلى 18.وتوصل إلى العلاقة أدناه :

$$h = 1.32\, Re_{LS}^{-1/3}\left[\frac{\rho_l(\rho_l-\rho_v)\, g\, k_l^3}{\mu_l^2}\right]^{1/3} \quad (2)$$

حيث أن Re_{LS} يمثل رقم رينولدز للسائل ويعبر عنه بالمعادلة:

$$Re_{LS} = \frac{G\,(1-x)\,D}{\mu_l} \quad (3)$$

وبين ان معدل الانحراف لمجموعة البيانات التي تم تحليلها والتي يبلغ عددها 1189 حصل عليها من 39 مصدرا هو 14.4% .

وقدم الباحثان Zhao و[8]Liaoنموذجاً تحليلياً لتخمين تكثف البخار على شكل غشاء رقيق داخل انبوب دقيق ذي مقطع مثلث. وقد تم تقسيم التحليل لتدفق السائل والبخار خلال المقطع المثلث الى ثلاث مناطق : طبقة السائل الرقيقة على سطح الجدار، وتدفق السائل المتكثف في الزوايا، وتدفق البخار في مركز الأنبوب. ودراسة تأثير كل من القوة الشعرية (التي تنتج تنوعاً في انحناءات طبقة السائل المتكثف) وإجهاد القص البيني والمقاومة الحرارية البينية والجاذبية الأرضية وهبوط الضغط المحوري وتأثير درجات حرارة التشبع، اظهر التحليل أن معدل معامل انتقال الحرارة للبخار المتكثف داخل الأنبوب ذي المقطع المثلث أعلى من تكثف البخار داخل الأنبوب ذي المقطع الدائري لقطر الأنبوب الهيدروليكي نفسه، وخصوصا عند بداية الأنبوب. كما إن معامل انتقال الحرارة عند بداية الأنبوب يزداد مع صغر قطر الأنبوب. ويقل معامل انتقال الحرارة على نحو سريع مع زيادة طول الأنبوب للأنابيب ذات المقاطع الأصغر . وفضلا عن ذلك فقد اظهر التحليل وجود تحسن في التكثيف داخل الأنابيب ذات المقاطع المثلثة مقارنة بالأنابيب ذات المقاطع الدائرية للقطر الهيدروليكي نفسه.

كما قام الباحث Stevanovicوزملاؤه[9] بعمل نموذج للتنبؤ بهبوط الضغط للجريان الحلقي للبخار داخل الأنابيب العمودية والمائلة ، ونتيجة لوجود الاختلافات بين تغيرات الضغط المقاسة والمحسوبة توصلوا الى أن تغيرات الضغط المحسوبة على طول أنابيب المكثف تعتمد بصورة رئيسة على قيمة معامل الاحتكاك البيني للغشاء، وقد توصل إلى علاقة جديدة وهي :

$$f_i = \frac{0.079}{Re_v^{0.25}} + 46.35\frac{\delta}{D}\left[\frac{\rho_v}{\rho_l}\right]^{0.8} \quad (4)$$

إن العلاقة أعلاه تأخذ في الاعتبار تأثير مستوى الضغط (النسبة بين كثافة البخار والسائل) في معامل الاحتكاك البيني للغشاء، وتعطي نتائج ممتازة مقارنة مع البيانات التجريبية لباحثين آخرين .

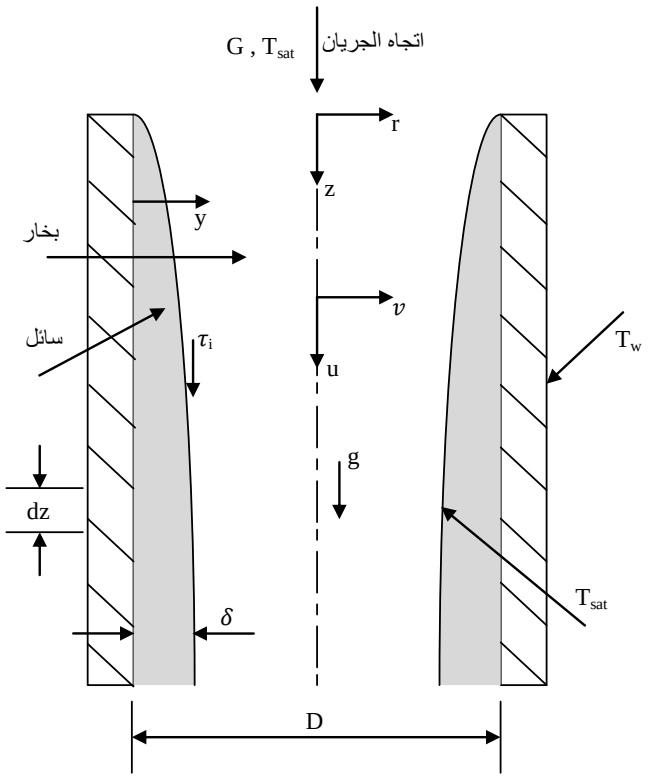
وقام الباحث Bohdal وزملاؤه [10] بدراسة تجريبية لتكثيف موائع التثليج R404A و R407C و R410A في أنبوب عمودي ذو قطر داخلي اقل من 1mm . وتضمنت الدراسة حساب معامل انتقال الحرارة الموضعي والمعدل لمدى قيم كسر الجفاف من 1 إلى 0 . وأجريت القياسات التجريبية عند قطر داخلي 0.7mm و 0.5mm وتبين من نتائج هذه الدراسة أن معامل انتقال الحرارة يعتمد ليس فقط على القطر الداخلي للأنبوب الدقيق ولكن أيضا على سرعة التدفق الكتلية وكسر الجفاف حيث تبين من نتائج هذه الدراسة ان معامل انتقال الحرارة يقل مع زيادة قطر الأنبوب الداخلي ويزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية . وان هبوط الضغط يزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية ويقل مع نقصان قيم كسر الجفاف . وتبين من خلال الدراسة ان الفرق بين النتائج المحسوبة والنتائج التجريبية لا تتعدى نسبة 20% .

كما قام الباحثان Arslan و Eskin [11] بدراسة تجريبية في تكثيف بخار مائع التثليج النقي R134a داخل أنبوب عمودي أملس ، حيث أن مقطع الاختبار مصنوع من أنبوب نحاسي مع قطر داخلي 7.52mm وطول 1m . وأجريت الاختبارات التجريبية لسرع تدفق كتلية في نطاق 75_20 $kg/m^2.s$ مع ضغط التشبع بين 5.8 bar و 7 bar والفرق في درجة الحرارة بين البخار المشبع والجدار الداخلي للأنبوب (1-7 K) ومدى تغير كسر الجفاف في مقطع الاختبار من 0.1 إلى 0.4 . ومن خلال البيانات التجريبية تم تحليل تأثير سرعة التدفق الكتلية وضغط التشبع والفرق في درجة الحرارة بين مائع التثليج والجدار الداخلي للأنبوب (ΔT) على أداء انتقال الحرارة . وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن معدل معامل انتقال الحرارة بالتكثيف يقل مع زيادة ضغط التشبع او الفرق في درجة الحرارة (ΔT) . وفي ظل ظروف التشغيل نفسها ، تبين ان معدل معامل انتقال الحرارة بالتكثيف يزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية . ووفقا للنتائج التي تم الحصول عليها ، يلاحظ نقصان في معدل معامل انتقال الحرارة بالتكثيف عند زيادة الفرق في درجة الحرارة بين البخار المشبع والجدار الداخلي للأنبوب .

يهدف البحث الحالي إلى تقديم تحليل نظري لانتقال الحرارة وهبوط الضغط وخصائص الجريان للمائع R407c أثناء عملية التكثيف لنمط الجريان الحلقي في أنبوب عمودي، ومعرفة تأثير تغير قطر الأنبوب ومعدل التدفق الكتلي للبخار والفرق بين درجة حرارة التشبع للبخار ودرجة حرارة سطح الأنبوب في معامل انتقال الحرارة وهبوط الضغط وسمك طبقة المائع المتكثف وكسر الجفاف وكسر الفراغ وسرعتي طور السائل والبخار ومعدل تدفق كتلتي السائل والبخار وطول أنبوب التكثيف.

2. النموذج الفيزيائي

يوضح الشكل(1)النموذج الفيزيائي للجريان الحلقي لمائع ثنائي الطور خلال عملية التكثيف للتدفق نحو الأسفل داخل أنبوب عمودي بطول (L) وقطر(D). يدخل البخار المشبع في مدخل الأنبوب عندما(z=0) بدرجة حرارة (T_{sat}) وسرعة تدفق كتلية(G)، إذ تحدد (T_{sat}) خصائص البخار الداخل وتكون درجة حرارة سطح الأنبوب (T_w) اقل من درجة حرارة البخار المشبع(T_{sat}) ونتيجة الفرق في درجة الحرارة بين البخار المشبع وسطح الأنبوب تستمر عملية التكثيف على طول الأنبوب، إذ يتكون غشاء رقيق من المائع المتكثف على السطح الداخلي للأنبوب بسمك (δ) ويبدأ بالجريان بشكل مماس لمحيط السطح الداخلي للأنبوب، إذ إن سمك طبقة المائع المتكثف يكون متماثلاً على جدار الأنبوب كون الجريان عموديا وحلقيا [12]، لذلك بالإمكان افتراض حصول التكثيف على صفيحة عمودية وبذلك يمكن تطبيق معادلات حفظ الكتلة والزخم والطاقة بالإحداثيات الديكارتية(x وy وz) [13].



الشكل(1): مخطط توضيحي يبين جريان المائع المتكثف داخل أنبوب عمودي.

يستند التحليل الرياضياتي للنموذج الفيزيائي إلى الفرضيات الآتية:

1- جريان المائع المتكثف داخل الأنبوب منتظم وطباقي وأحادي الأبعاد .
2- مائع التكثيف نقي ويخضع لقانون اللزوجة (μ_l du/dy).
3- درجة حرارة جدار الانبوب ثابتة وتساوي (T_w) .
4- كافة الخصائص الفيزيائية للبخار والسائل تكون ثابتة ماعدا الكثافة في معادلة حفظ الزخم[14].
5- درجة حرارة سطح غشاء المائع المتكثف ثابتة على السطح البيني الفاصل بين البخار والغشاء المتكثف وتساوي درجة حرارة التشبع للبخار(T_{sat}).
6- سمك طبقة المائع المتكثف صغير جدا نسبة الى قطر الأنبوب لذلك فان تأثير الشد السطحي والانحناءات مهمل وبذلك يمكن تطبيق المعادلات الحاكمة الخاصة بالطبقة المتاخمة على صفيحة عمودية[13].
7- سمك طبقة التكثيف رقيقة جدا وبهذا يكون انتقال الحرارة بواسطة التوصيل من سطح طبقة السائل المتكثف إلى جدار الأنبوب، ويهمل انتقال الحرارة بواسطة الحمل في طبقة السائل لصغره[14].

واستنادا إلى الفرضيات أعلاه فان المعادلات الحاكمة آنفة الذكر في النظام الديكارتي تكون بالشكل الآتي :

معادلة حفظ الكتلة :

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

معادلة حفظ الزخم بالاتجاه المحوري :

$$\mu_l \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\rho_l - \rho_v)g - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

معادلة حفظ الطاقة :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

ولحل المعادلات الحاكمة تطبق الظروف الحدية الآتية :

-عند جدار الأنبوب :

$$y = 0 \quad (8) \; ; \; u = v = 0 \quad (8a) \; ; \; T = T_w \quad (8b)$$

-عند السطح البيني للبخار وغشاء السائل :

$$y = \delta \quad (9) \; ; \; \mu_l \frac{du}{dy} = \tau_i \quad (9a) \; ; \; T = T_{sat} \quad (9b)$$

-عند مدخل الأنبوب :

$$z = 0 \quad (10); \delta = 0 \quad (10a); u = 0 \quad (10b); x = 0 \quad (10c); \alpha = 0 \quad (10d)$$

-عند نهاية الجريان الحلقي في الأنبوب[15]:

$$z = L \quad (11) \; ; \; x = 0.2 \quad (11a)$$

1.2. معامل انتقال الحرارة

إن توزيع درجة الحرارة على سمك طبقة السائل يمكن إيجاده من تكامل المعادلة (7) وعند الظروف الحدية (8b) و(9b) ويكون بالشكل الاتي :

$$T = T_w + (T_{sat} - T_w)\frac{y}{\delta} \quad (12)$$

واستنادا إلى الفرضية (7) فإن :

$$q = k_l \left.\frac{dT}{dy}\right|_{y=\delta} \quad (13)$$

$$q = k_l \frac{(T_{sat} - T_w)}{\delta} (14)$$

وفي حالة عدم وجود مصدر حراري على سطح الأنبوب لابد ان يكون هناك توازن حراري عند السطح ويمكن التوصل الى العلاقة الآتية :

$$h\,(T_{sat} - T_w) = k_l \frac{(T_{sat} - T_w)}{\delta} (15)$$

ويصبح التعبير الرياضي لمعامل انتقال الحرارة الموضعي عند أي مقطع في الأنبوب كما يأتي :

$$h = \frac{k_l}{\delta} (16)$$

إن إيجاد معامل انتقال الحرارة الموضعي يعتمد بشكل أساسي على سمك طبقة السائل المتكثف (δ) عند أي مقطع في طول الأنبوب (z) .

2.2. سمك طبقة السائل المتكثف

لحساب سمك طبقة السائل المتكثف(δ)، يمكن إجراء التكامل للمعادلة (6) نسبة الى y وبالاستفادة من الظروف الحدية (8a) و(9a)، فإن السرعة خلال طبقة السائل تكون بالشكل الاتي :

$$u = \frac{1}{\mu_l}\left\{(\rho_l - \rho_v) - \frac{\partial P}{\partial z}\right\}\left(y\,\delta - \frac{y^2}{2}\right) + y\,\frac{\tau_i}{\mu_l} (17)$$

ويمكن ايجاد معدل تدفق كتلة السائل ($\dot{m}_l$) من إجراء عملية التكامل للمعادلة اعلاه وكما يأتي:

$$\dot{m}_l = \int_0^{\delta} \rho_l\, u\, \pi\, D\, dy (18)$$

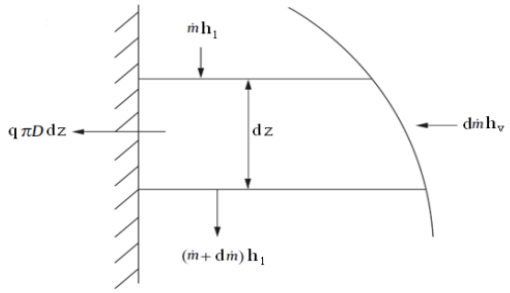
$$\dot{m}_l = \pi\, D \left[\frac{\rho_l}{\mu_l}\left\{(\rho_l - \rho_v) - \frac{dp}{dz}\right\}\frac{\delta^3}{3} + \frac{\rho_l \tau_i}{2\,\mu_l}\delta^2\right] (19)$$

وبإجراء عملية التفاضل للمعادلة أعلاه نسبة الى(δ) يصبح التعبير التفاضلي لمعدل تدفق السائل المتكثف نسبة لسمك طبقة السائل بالشكل الاتي :

$$\frac{d\dot{m}_l}{d\delta} = \pi\, D \left[\frac{\rho_l}{\mu_l}\left\{(\rho_l - \rho_v) - \frac{dp}{dz}\right\}\delta^2 + \frac{\rho_l \tau_i}{\mu_l}\,\delta\right] (20)$$

وكما ذكر انفا فان بخار المائع يدخل الأنبوب وهو في حالة التشبع، لذلك فان معادلة توازن الطاقة لشريحة رقيقة متناهية في الصغر للتكثف على شكل غشاء تكون :

$$q\,\pi\, D\, dz = h_v d\dot{m}_l (21)$$



الشكل(2): مخطط توضيحي يبين توازن الطاقة لشريحة رقيقة متناهية في الصغر للتكثف على شكل غشاء[2].

وبتعويض العلاقة (14) في المعادلة اعلاه يصبح التعبير التفاضلي لتدفق السائل نسبة إلى أي مقطع في طول الأنبوب بالشكل الاتي :

$$\frac{d\dot{m}_l}{dz} = \frac{k_l(T_{sat} - T_w)\pi D}{h_{lv}\delta} \qquad (22)$$

وبدمج المعادلة(22) مع المعادلة (20) يصبح التعبير التفاضلي لسمك طبقة السائل المتكثف نسبة إلى أي مقطع في طول الأنبوب (z):

$$\frac{d\delta}{dz} = \frac{k_l\mu_l(T_{sat} - T_w)}{\rho_l\left\{(\rho_l - \rho_v) - \frac{dp}{dz}\right\}h_{lv}\delta^3 + \tau_i\rho_l\, h_{lv}\delta^2} \quad (23)$$

ان المعادلات الحاكمة لا يمكن بواسطتها استكمال وحل النموذج الرياضياتي دون الاعتماد على معادلات تكميلية تساعد في حساب هبوط الضغط واجهاد القص البيني وغيرها لذلك سيتم عرض المعادلات المستخدمة لهذا الغرض وكما يأتي:

3.2. هبوط الضغط

إن هبوط الضغط الكلي في الأنابيب للتدفق الثنائي الطور يكون على ثلاثة أنواع أساسية، وهي هبوط الضغط الساكن الناتج عن تأثير الجاذبية الأرضية وهبوط الضغط التسارعي الناتج عن تأثير سرعة تدفق المائع وهبوط الضغط الاحتكاكي الناتج عن تأثير لزوجة السائل أي إن[16]:

$$\left[\frac{dp}{dz}\right] = \left[\frac{dp}{dz}\right]_g + \left[\frac{dp}{dz}\right]_a + \left[\frac{dp}{dz}\right]_f \quad (24)$$

إن هبوط الضغط الساكن الناتج عن الجاذبية الأرضية يتأثر بشكل عام بزاوية ميل الأنبوب ويمكن التعبير عنه بالمعادلة الاتية [16] :

$$\left[\frac{dp}{dz}\right]_g = -\rho_v\, g\, \sin\theta \quad (25)$$

وحيث أن زاوية ميل الأنبوب في التدفق نحو الأسفل للأنبوب العمودي هي (θ=-π/2)لذلك يكون هبوط الضغط الساكن بالصيغة[16] :

$$\left[\frac{dp}{dz}\right]_g = \rho_v\, g \quad (26)$$

وإن هبوط الضغط التسارعي يعتمد بالدرجة الأساس على معامل كسر الفراغ (α) ومعامل كسر الجفاف (x) ويعبر عنه بالمعادلة [4] :

$$\left[\frac{dp}{dz}\right]_a = - G^2 \frac{d}{dz}\left[\frac{x^2}{\rho_v \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l (1-\alpha)}\right] (27)$$

أما هبوط الضغط الاحتكاكي فيعتمد بالدرجة الأساس على نمط التدفق داخل الأنبوب ، ويعبر عنه للتدفق الحلقي داخل الأنبوب بالمعادلة الاتية [4]:

$$\left[\frac{dp}{dz}\right]_f = - \frac{4\,\tau_i}{D - 2\,\delta} (28)$$

4.2. إجهاد القص البيني ومعامل الاحتكاك البيني

إن إجهاد القص البيني لتدفق البخار في التكثف على شكل غشاء رقيق يجعل سمك طبقة المائع المتكثف رقيقة وبالتالي يؤدي الى زيادة معامل انتقال الحرارة[1]. وفي نمط التدفق الحلقي فان البخار يتدفق في مركز الأنبوب بينما يتدفق السائل قرب الجدار الداخلي للأنبوب ونتيجة لخشونة الجدار فان تدفق السائل سيكون أبطا من البخار الذي سيتدفق بسرعة عالية نسبيا وهنا يقوم إجهاد القص البيني بمنع تدفق البخار بسرعة اكبر من السائل وبالتالي فان هذه العملية ستؤدي إلى فقدان في الضغط للجريان الثنائي الطور[17]. ولكون لزوجة طور السائل اكبر بكثير من اللزوجة لطور البخار وسمك طبقة الغشاء المتكثف رقيقة ومعدل سرعة البخار في المركز اكبر بكثير من سرعة السائل عند السطح البيني، لذلك فان تدفق البخار في المركز يمكن إن يعتبر تقريبا تدفق أحادي الطور في الأنبوب الدائري، مع اعتبار سرعة البخار عند السطح البيني تساوي صفر . وبهذا فان إجهاد القص البيني يمكن ان يحسب بالاعتماد على العلاقة التقليدية لمعامل الاحتكاك لجريان احادي الطور وكما يأتي [4]:

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_v u_v^2 (29)$$

وإن سرعة البخار هي :

$$u_v = \frac{\dot{m}_v}{\rho_v A_v} (30)$$

ويعد معامل الاحتكاك البيني واحد من أهم المفاهيم التي تؤثر على التدفق الثنائي الطور في الأنبوب ،حيث ان هناك موجات سوف تتكون عندما يمر طور البخار ملاصقا لطور السائل وينتج عنها نوع من المقاومة التي تعرقل التدفق ونتيجة لهذه العرقلة يحدث فقدان في الضغط[17]. ويمكن حساب معامل الاحتكاك البيني من المعادلة[9]:

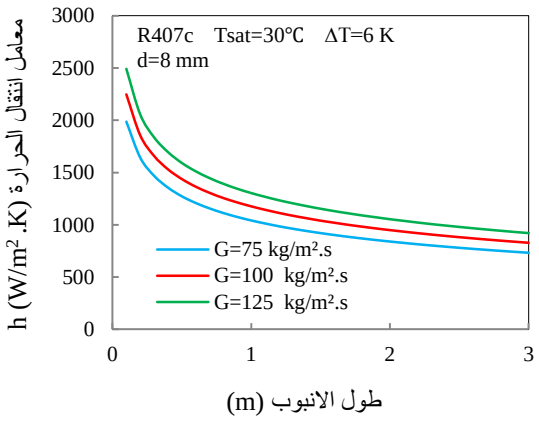
$$f_i = \frac{0.079}{Re_v^{0.25}} + 46.35 \frac{\delta}{D}\left[\frac{\rho_v}{\rho_l}\right]^{0.8} (31)$$

3. النتائج والمناقشة

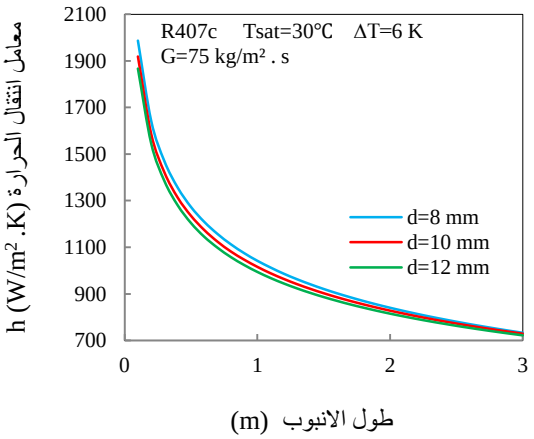
لمعرفة تأثير بعض العوامل التي تم اختيارها وهي قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية والفرق بين درجة حرارة التشبع للبخار ودرجة حرارة جدار الأنبوب في معامل انتقال الحرارة وهبوط الضغط وخصائص الجريان للمائع R407c، تم اختيار قيم مختلفة لقطر الأنبوب وهي (8و10و12mm) وسرع تدفق كتلية (75و100 و125kg/m^2.s) وفرق في درجة حرارة التشبع للبخار ودرجة حرارة سطح الأنبوب (2و4 و6K) ودرجة حرارة تشبع البخار 30°C ، وتشغيل البرنامج المعد لحساب كل من معامل انتقال الحرارة وهبوط الضغط وخصائص الجريان على طول الأنبوب للحصول على النتائج. وتم استعمال برنامج حل المعادلات الهندسية (EES) وقد

استعملت طريقة كاوس_سيدل (Gauss_Seidel) لحل المعادلات وتم تقسيم الأنبوب الى عدة مقاطع يبلغ طول المقطع الواحد (1mm).

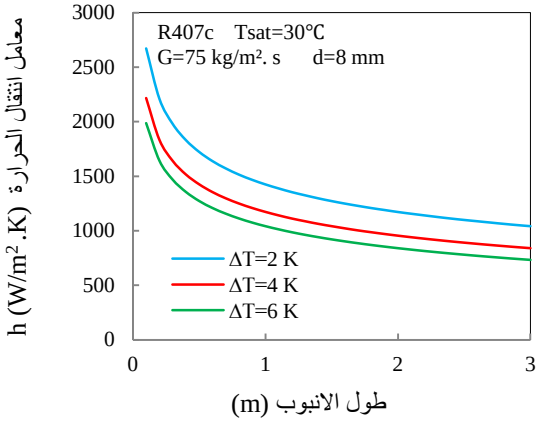
توضح الأشكال (3.a و3.b و3.c) انخفاض معامل انتقال الحرارة بالتكثيف على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب ، وسبب ذلك هو مع تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب في اتجاه التدفق فان سمك طبقة المائع المتكثف على محيط السطح الداخلي للأنبوب سوف تزداد وتؤدي إلى زيادة المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة من منطقة البخار إلى المنطقة الأبرد(الجدار)، ممّا يؤدي إلى تقليل معامل انتقال الحرارة. وفضلا عن ذلك، كلما تتقدم عملية التكثيف فان سرعة البخار تقل مما يؤدي الى نقصان إجهاد القص البيني الواقع بين سطحي البخار والسائل. إن التأثير التراكمي للعاملين المذكورين اعلاه (زيادة المقاومة الحرارة ونقصان إجهاد القص) يسهم في التقليل من معامل انتقال الحرارة بالتكثيف وهذا يتوافق مع النتائج التي حصل عليها الباحث Dalkilic[6].يوضح الشكل (3.a) تغير قيم معامل انتقال الحرارة بالتكثيف على طول الأنبوب لأقطار مختلفة، ويلاحظ من الشكل أن معامل انتقال الحرارة بالتكثيف يزداد مع نقصان قطر الأنبوب حيث بلغ معدل نسبة الزيادة لهذا المعامل 1.959%للأنبوب الذي قطره (8mm) عن الأنبوب الذي قطره (10mm) وبلغت هذه الزيادة 3.738% عن الأنبوب الذي قطره (12mm). وهذا يعود الى نقصان معدل تدفق كتلة السائل المتكثف مع صغر قطر الأنبوب وهذا يتفق مع النتائج المستحصلة عند تطبيق المعادلة (22) وبالتالي نقصان سمك طبقة المائع المتكثف. وبما ان معامل انتقال الحرارة الموضعي للتكثيف يقل مع زيادة سمك طبقة المائع المتكثف كما هو واضح من المعادلة (16) لذلك يزداد معامل انتقال الحرارة مع نقصان قطر الأنبوب . كما ان معامل انتقال الحرارة بالتكثيف على طول الأنبوب يزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية للمائع المتكثف وهذا واضح في الشكل (3.b) اذ بلغ معدل نسبة الزيادة 9.861% لسرعة التدفق الكتلية ($125kg/m^2.s$) عن سرعة التدفق الكتلية ($100kg/m^2.s$) وبلغت هذه الزيادة 20.516% عن سرعة التدفق الكتلية ($75\ kg/m^2.s$). ويعود ذلك الى زيادة سرعة البخار الداخلة مع زيادة سرعة التدفق الكتلية ممّا أدى إلى زيادة إجهاد القص ونقصان سمك طبقة المائع المتكثف والى زيادة معامل انتقال الحرارة وهذا يتحقق ايضا عند تطبيق المعادلة (23). كذلك فان معامل انتقال الحرارة بالتكثيف على طول الأنبوب يتأثر باختلاف الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب، اذ يلاحظ من الشكل(3.c) ان زيادة الفرق بين درجة حرارة التشبع للبخار ودرجة حرارة سطح الأنبوب يؤدي الى نقصان قيم معامل انتقال الحرارة إذ بلغ معدل نسبة النقصان 19.357% عند تغير الفرق في درجات الحرارة من(2K) إلى(4K) في حين بلغ النقصان 27.574% عند تغير الفرق من (2K) الى (6K). والسبب في ذلك يتعلق بمدى تطور سمك غشاء السائل المتكثف داخل الانبوب، إذ إن تقليل الفرق بين درجتي الحرارة للبخار وسطح الأنبوب يعمل على تقليل سمك المائع المتكثف ويجعل عملية انتقال الحرارة تحدث في مساحة اصغر و تؤدي بالمقابل الى زيادة معامل انتقال الحرارة . وقد توصل الباحثانZhao و Liao [8] وكذلك الباحثSoliman (كما ذكر من قبلهما) الى تصرف مماثل عند تغير قطر الانبوب وسرعة التدفق الكتلية والفرق بدرجات الحرارة .



b



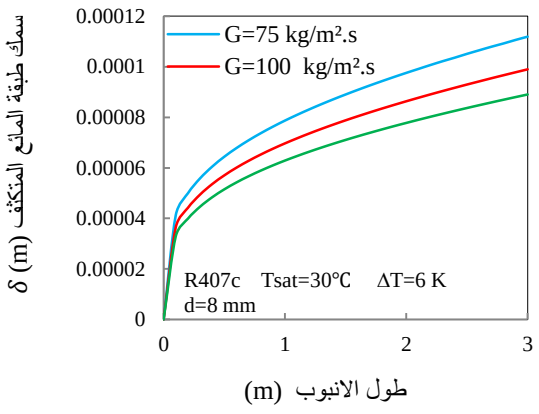
a



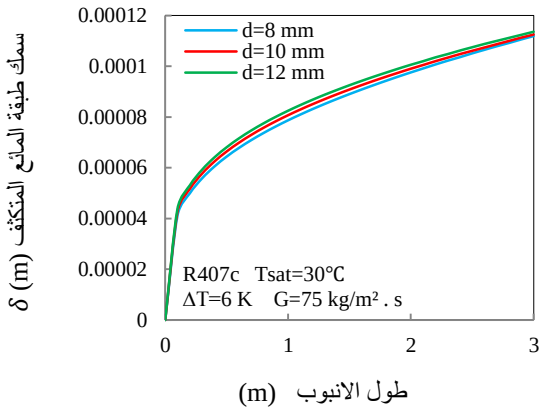
c

الشكل (3): تغير معامل انتقال الحرارة على طول الأنبوب ،(a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب.

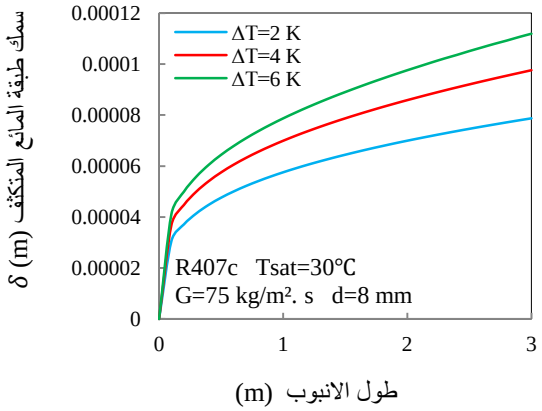
توضح الأشكال (4.a و4.b و4.c) أن سمك طبقة المائع المتكثف تزداد على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب ، وسبب هذا انه كلما تتقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب فان معدل تدفق البخار وسرعة البخار يقلان وهذا يؤدي إلى زيادة معدل تدفق كتلة السائل وبالتالي إلى زيادة سمك طبقة المائع المتكثف .ويلاحظ من الشكل (4.a) ازدياد سمك طبقة المائع المتكثف على طول الأنبوب مع زيادة قطر الأنبوب حيث بلغ معدل نسبة الزيادة في سمك طبقة المائع المتكثف لأنبوب قطره (12mm) عن الأنبوب الذي قطره (10mm) هو 1.76% وبلغت هذه الزيادة 3.606% للأنبوب الذي قطره (12mm) عن الذي قطره (8mm). وذلك لان ازدياد قطر الانبوب يؤدي الى ازدياد مساحة المقطع الذي يتدفق فيه البخار ويؤدي ذلك الى نقصان سرعة البخار لنفس سرعة التدفق وبالتالي نقصان إجهاد القص البيني وهذا بدوره يؤدي الى زيادة سمك طبقة المائع المتكثف . كما ان سمك طبقة المائع المتكثف على طول الانبوب تزداد مع نقصان سرعة التدفق الكتلية كما هو واضح في الشكل (4.b) حيث بلغ معدل نسبة الزيادة في سمك طبقة المائع المتكثف لسرعة تدفق كتلية ($75kg/m^2.s$)11.128%عن السمك لسرعة التدفق ($100kg/m^2.s$) كما بلغت هذه الزيادة 19.57% عن السمك لسرعة تدفق ($125kg/m^2.s$). والسبب في ذلك يعود الى ان معدل تدفق البخار يقل مع نقصان سرعة التدفق الكتلية وهذا يؤدي إلى نقصان سرعة البخار وبالتالي نقصان إجهاد القص البيني ثم الى زيادة سمك طبقة المائع المتكثف . أما تأثير الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الانبوب في سمك طبقة المائع المتكثف على طول الانبوب فهو واضح في الشكل (4.c)، اذ يلاحظ ازدياد سمك طبقة المائع المتكثف مع ازدياد الفرق بدرجات الحرارة وبلغ معدل نسبة الزيادة 17.568%عن تغير الفرق بدرجات الحرارة من (2K) الى (4K) بينما تصبح هذه الزيادة 26.758% عند تغير الفرق من (2K) الى (6K). ويعزى ذلك الى زيادة معدل تدفق كتلة السائل على طول الانبوب مع زيادة الفرق في درجات الحرارة وهذا يتحقق من المعادلة (22).



b



a



c

الشكل(4):تغير سمك طبقة المائع المتكثف على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب.

إن تغير هبوط الضغط على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب، موضح في الأَشكال (5.a و5.b و5.c).ويلاحظ من الأَشكال وجود زيادة في هبوط الضغط في مدخل الأنبوب الى مدى معين من طول الأنبوب ثم يبدأ بالنقصان (الإشارة السالبة لهبوط الضغط تعني أن تأثير محصلة هبوط الضغط الكلي لكل من مركبات قيمه الثلاثة هبوط الضغط الساكن وهبوط الضغط التسارعي وهبوط الضغط الاحتكاكي تكون عكس اتجاه الجريان كما في المعادلة 24 وبتعويض المعادلات 26 و27 و28). إذ بلغت أقصى قيمة لهبوط الضغط (-334.7 Pa/m) عند نقطة تبعد (0.6 m) عن مدخل الأنبوب الذي قطره (8 mm) و (-116.1 Pa/m) عند نقطة تبعد (0.9 m) عن مدخل الأنبوب الذي قطره (10 mm) . في حين بلغت قيمة هبوط الضغط (18.82 Pa/m) عند نقطة تبعد (1.1 m) عن مدخل الأنبوب الذي قطره (12 mm) . إن سبب الزيادة في قيم هبوط الضغط عند بداية عملية التكثيف مع أخذها الإشارة السالبة يعود إلى إن المائع معظمه في حالة بخار وبذلك تكون سرعته عالية ويؤدي ذلك إلى زيادة إجهاد القص الذي بدوره يعمل على زيادة هبوط الضغط الاحتكاكي الذي يسبب في تقليل الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي . أما سبب نقصان هبوط الضغط في الطول المتبقي من الأنبوب فيعزى إلى أن تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب يؤدي إلى زيادة معدل تدفق كتلة السائل ، وهذا يؤدي إلى نقصان معدل تدفق كتلة البخار مما يؤدي إلى نقصان سرعة طور البخار على طول الأنبوب ، الذي يؤدي إلى نقصان إجهاد القص البيني على طول الأنبوب وهذا يقلل من هبوط الضغط الاحتكاكي وبالتالي فان هبوط الضغط الساكن بتأثير الجاذبية الأرضية الذي تكون مركبة تأثيره باتجاه الجريان أي نحو الأسفل ذا تأثير اكبر في قيمة محصلة هبوط الضغط الكلي اكبر من قيمة هبوط الضغط الاحتكاكي وبالتالي فان هبوط الضغط الكلي تقل قيمته في الطول المتبقي من أنبوب التكثيف الحلقي وهذا يسبب في زيادة الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي. وقد توصل الباحث Stevanovic وزملاؤه [9] إلى تصرف مماثل كما تبين من نتائجهم، وكذلك توصل الباحثان Zhao وLiao [8] والباحث Soliman (كما ذكر من قبلهما) إلى تصرف مماثل عند تغير قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية والفرق بدرجات الحرارة .

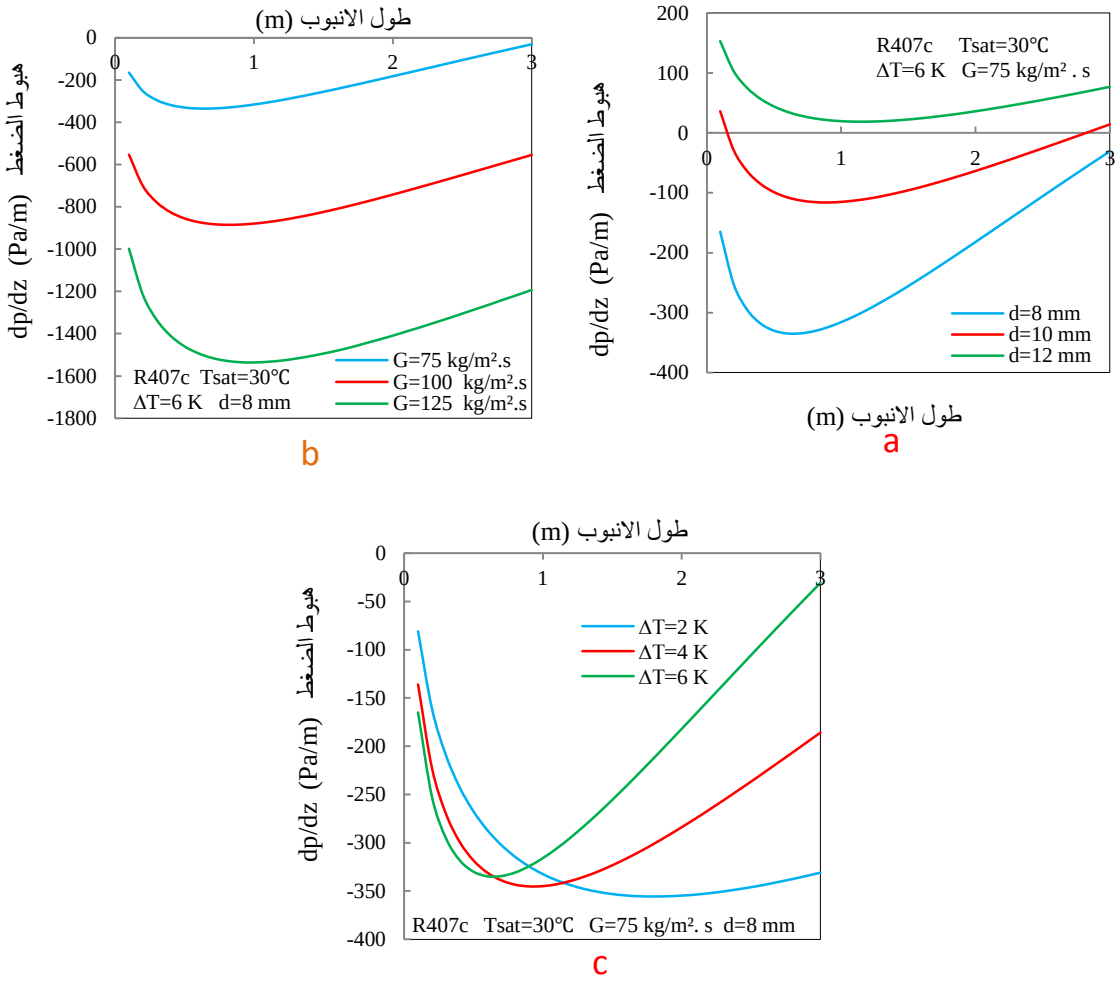
ولمعرفة تأثير تغير قطر الأنبوب في هبوط الضغط يمكن النظر إلى الشكل (5.a) وملاحظة زيادة هبوط الضغط على طول الأنبوب مع نقصان قطر الأنبوب إذ بلغ معدل نسبة الزيادة في هبوط الضغط لأنبوب قطره (8 mm) عن الأنبوب الذي قطره (10 mm) 70.119% في حين بلغ معدل النقصان 95.073% للأنبوب الذي قطره (12 mm) عن الذي قطره (8 mm) وهذا يعود إلى أن اختيار قطر للأنبوب أصغر ولسرعة التدفق الكتلية الداخلة نفسها يجعل سرعة البخار تزداد ويزداد معها إجهاد القص الذي يزيد من الضغط الاحتكاكي، كما يلاحظ من الشكل أن قيم هبوط الضغط للأقطار الثلاثة تقع ضمن ثلاثة مديات مختلفة حيث للأنبوب الذي قطره (8mm) فان قيم هبوط الضغط تكون جميعها سالبة وبلغت أقصى قيمة لهبوط الضغط (-334.7 Pa/m) عند نقطة تبعد (0.6 m) عن مدخل الأنبوب . ويعود السبب إلى كون جميع قيم هبوط الضغط سالبة لان تأثير مركبة هبوط الضغط الاحتكاكي هو الذي يسود على طول أنبوب التكثيف الحلقي . أما سبب زيادة قيم هبوط الضغط في مدخل الأنبوب

إلى نقطة تبعد (0.6m) عن مدخل الأنبوب فهذا يعود كما ذكر سابقا إلى أن المائع معظمه في حالة بخار وهذا يزيد من سرعة طور البخار وبالتالي زيادة إجهاد القص البيني وهذا يؤدي إلى زيادة هبوط الضغط الاحتكاكي الذي تأثيره عكس اتجاه الجريان نحو الأعلى وبالتالي يقل الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي، أما هبوط الضغط على طول الأنبوب المتبقي من بعد النقطة (0.6m) فيلاحظ نقصان في قيم هبوط الضغط وهذا يعود إلى أن سرعة طور البخار تقل نتيجة نقصان معدل تدفق كتلة البخار خلال تقدم عملية التكثيف وبالتالي نقصان قيمة هبوط الضغط الاحتكاكي وهنا يسود تأثير هبوط الضغط الساكن نتيجة الجاذبية الأرضية الذي يكون تأثيره باتجاه الجريان نحو الأسفل وبالتالي يزداد الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي .أما عند زيادة قطر الأنبوب فيلاحظ من الشكل (5.a) أن قطر الأنبوب الأكبر (12mm) تكون قيم هبوط الضغط له موجبة وذلك المعادلة (24) وبتعويض المعادلات (26 و27 و28) فان قيمة مركبة هبوط الضغط الساكن نتيجة الجاذبية الأرضية التي يكون تأثيرها باتجاه الجريان أي نحو الأسفل هي السائدة في حساب قيمة هبوط الضغط الكلي ولذلك يأخذ القيمة الموجبة . أما سبب نقصان قيمة هبوط الضغط في مدخل الأنبوب إلى نقطة تبعد (1.1m) عن مدخل الأنبوب ، يعود إلى كون المائع الداخل معظمه في حالة البخار وهذا يزيد من سرعة طور البخار وبالتالي زيادة إجهاد القص البيني وزيادة هبوط الضغط الاحتكاكي حسب المعادلة (3-30) الذي يكون تأثيره عكس اتجاه الجريان وبذلك تقل قيمة هبوط الضغط الكلي . بينما تزداد قيمة هبوط الضغط الكلي في الطول المتبقي من بعد النقطة (1.1m) عن مدخل الأنبوب يعود إلى نقصان معدل تدفق كتلة البخار نتيجة تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب وبالتالي نقصان سرعة طور البخار ونقصان إجهاد القص البيني وبالتالي نقصان هبوط الضغط الاحتكاكي المعادلة (28) . وهنا يسود تأثير هبوط الضغط الساكن نتيجة الجاذبية الأرضية وبالتالي زيادة هبوط الضغط الكلي حسب المعادلة (24) وهذا يزيد الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي . بينما لقطر الأنبوب (10mm) فان أقصى قيمة لهبوط الضغط بلغت (-116.1 Pa/m) عند نقطة تبعد (0.9 m) عن مدخل الأنبوب ويلاحظ من الشكل (5.a) أن ما قبل هذه النقطة يكون السائد تأثير مركبة هبوط الضغط الاحتكاكي الذي يكون تأثيره نحو الأعلى عكس اتجاه الجريان ، لكون البخار الداخل معظمه في حالة البخار كما ذكر سابقا وهذا يزيد من قيم هبوط الضغط الكلي وبالتالي يقل الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي ، أما ما بعد النقطة (0.9 m) من مدخل الأنبوب فان السائد يكون هبوط الضغط الساكن نتيجة الجاذبية الأرضية ويقل هبوط الضغط الكلي وبالتالي يزداد الضغط على طول التدفق السفلي لنمط التكثيف الحلقي داخل الأنبوب العمودي .

ويلاحظ من الشكل (5.b) تأثير تغير سرعة التدفق الكتلية في هبوط الضغط الكلي والذي يبين زيادة هبوط الضغط على طول الأنبوب مع زيادة سرعة التدفق الكتلية ولقطر الأنبوب نفسه وبلغ معدل نسبة الزيادة في هبوط الضغط لسرعة تدفق كتلية ($125\ kg/m^2.s$) 45.995% عن سرعة تدفق كتلية ($100\ kg/m^2.s$) كما بلغت هذه الزيادة 84.901% عن سرعة التدفق الكتلية ($75\ kg/m^2.s$) . إذ يلاحظ انه كلما تقل قيمة سرعة التدفق الكتلية عن ($100\ kg/m^2.s$) فان السائد يكون تأثير مركبة هبوط الضغط الساكن الناتج عن الجاذبية الأرضية وهذا يؤدي إلى نقصان قيم هبوط الضغط الكلي على طول الأنبوب وبالتالي زيادة الضغط على طول أنبوب التكثيف الحلقي للتدفق السفلي . وهذا يعود إلى أن اختيار سرعة تدفق كتلية اقل لنفس قطر الأنبوب يجعل سرعة البخار تقل ويقل معها إجهاد القص البيني الذي يقلل من تأثير قيمة هبوط الضغط الاحتكاكي وبالتالي يسود تأثير هبوط الضغط الساكن. أما عند زيادة قيمة سرعة التدفق الكتلية عن ($100\ kg/m^2.s$) فان السائد يكون تأثير مركبة هبوط الضغط الاحتكاكي وهذا يؤدي إلى زيادة قيم هبوط الضغط الكلي على طول الأنبوب وبالتالي نقصان الضغط على طول أنبوب التكثيف الحلقي للتدفق نحو الأسفل ، وهذا يعود إلى أن اختيار سرعة تدفق كتلية اكبر لنفس قطر الأنبوب يجعل سرعة البخار تزداد ويزداد معها إجهاد القص البيني الذي يزيد من تأثير قيمة هبوط الضغط الاحتكاكي وبالتالي يسود تأثيره في هبوط الضغط الكلي، وهذا ما توصل إليه أيضا الباحث Stevanovic وزملاؤه [9] .

أما تأثير الفرق بدرجات الحرارة بين درجة حرارة التشبع للبخار ودرجة حرارة جدار الأنبوب في هبوط الضغط على طول الأنبوب فهو واضح في الشكل (5.c) إذ يلاحظ زيادة هبوط الضغط على طول الأنبوب مع نقصان الفرق في درجات الحرارة، كما ويلاحظ أنه بنقصان الفرق في درجات الحرارة يكون السائد تأثير مركبة هبوط الضغط الاحتكاكي وهذا يؤدي إلى زيادة هبوط الضغط الكلي على طول الأنبوب إذ بلغ معدل نسبة الزيادة 6.666% عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من (4 K) الى (2 K) في حين بلغ معدل نسبة الزيادة 24.284% عند تغير الفرق من (6 K) إلى (2 K)؛ وذلك لأن نقصان الفرق في درجات الحرارة يؤدي إلى نقصان معدل تدفق

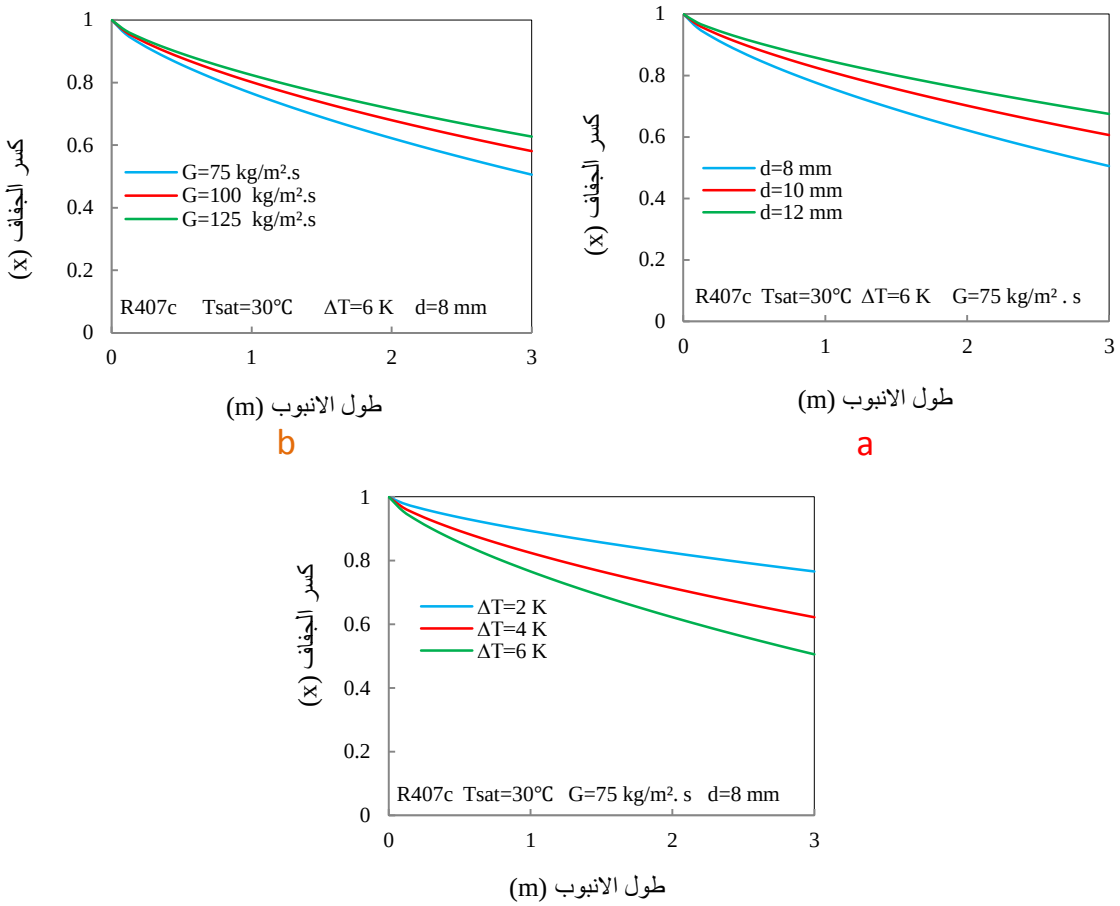
كتلة السائل المتكثف مما يؤدي إلى زيادة معدل تدفق البخار وهذا يؤدي إلى زيادة سرعة طور البخار التي تؤدي إلى زيادة هبوط الضغط الاحتكاكي . أما عند زيادة الفرق في درجات الحرارة فان التأثير السائد يكون لمركبة هبوط الضغط الساكن نتيجة الجاذبية الأرضية وهذا يؤدي إلى نقصان قيم هبوط الضغط الكلي على طول الأنبوب وبالتالي زيادة الضغط على طول أنبوب التكثيف الحلقي للتدفق نحو الأسفل .



الشكل(5):تغير هبوط الضغط على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

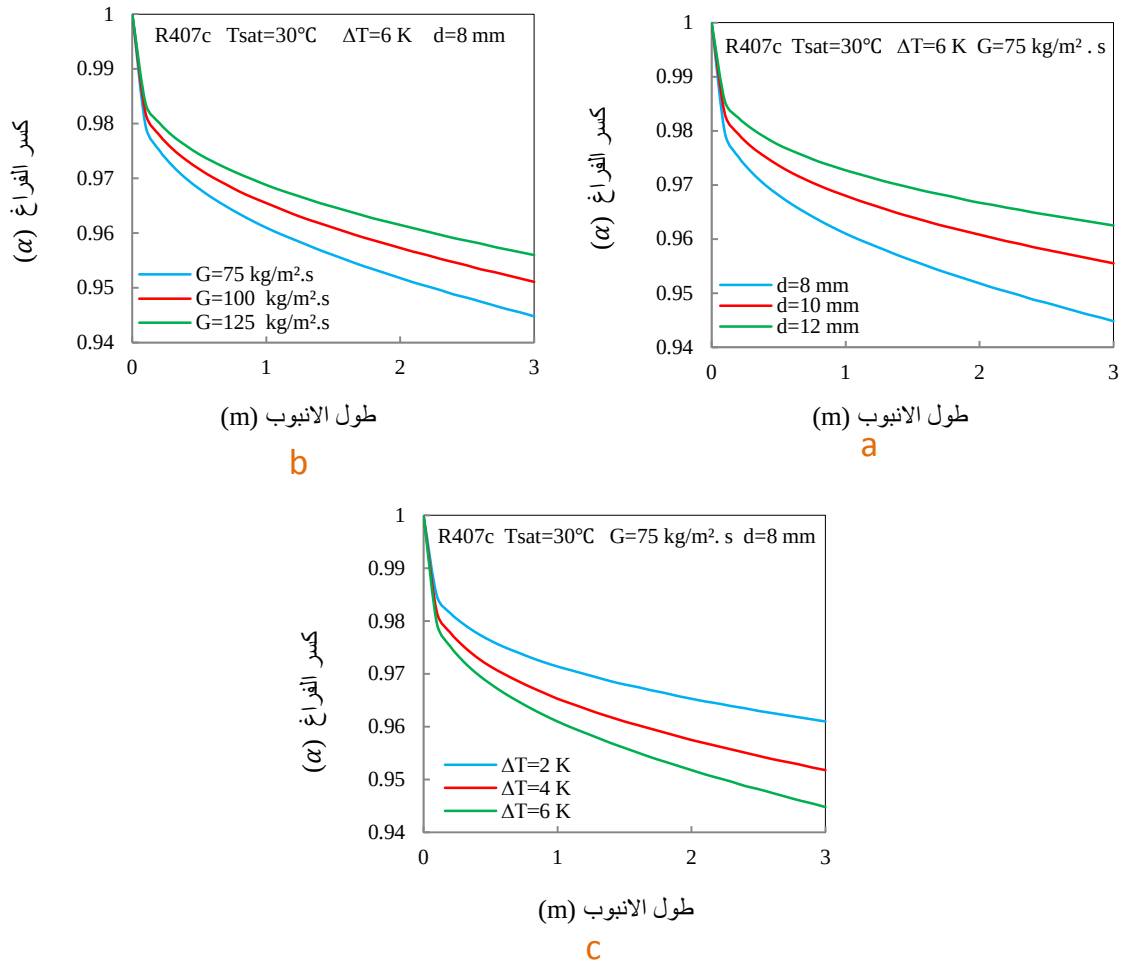
يلاحظ من الأشكال (6.aو6.bو6.c) نقصان كسر الجفاف على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الانبوب والسبب في ذلك هو نقصان معدل تدفق كتلة البخار خلال تقدم عملية التكثيف إذ يعرف كسر الجفاف بأنه النسبة بين كتلة البخار إلى الكتلة الكلية للمائع.وبالنظر الى الشكل (6.a) يمكن ملاحظة زيادة في كسر الجفاف على طول الأنبوب مع ازدياد قطر الأنبوب حيث بلغ معدل نسبة الزيادة في كسر الجفاف للأنبوب الذي قطره (12mm) 5.442% عن الأنبوب الذي قطره (10mm) وبلغت هذه الزيادة 13.597%للأنبوب الذي قطره (12mm) عن الأنبوب الذي قطره (8mm)، حيث ان زيادة قطر الأنبوب تؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار لنفس سرعة التدفق الكتلية. ومن الشكل (6.b) يلاحظ زيادة كسر الجفاف على طول الأنبوب مع زيادة سرعة التدفق الكتلية وبلغ معدل نسبة الزيادة لسرعة التدفق($125kg/m^2.s$) عن سرعة التدفق($100kg/m^2.s$) هو3.848% وعن سرعة التدفق($75kg/m^2.s$) بلغ معدل نسبة الزيادة 10.034%وهذا يعود إلى زيادة معدل تدفق كتلة البخار لنفس قطر الأنبوب عند زيادة سرعة التدفق الكتلية وبالتالي زيادة كسر الجفاف. ويوضح الشكل (6.c) زيادة كسر الجفاف على طول الأنبوب مع نقصان الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب اذ بلغ معدل نسبة الزيادة في كسر الجفاف عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من(6K) الى (4K) هو9.868% وعند تغير الفرق بدرجات الحرارة من(6K) الى (2K) بلغ معدل نسبة الزيادة

18.893%، وذلك لان نقصان الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى نقصان معدل تدفق كتلة السائل المتكثف وبالتالي زيادة معدل تدفق كتلة البخار وهو ما يؤدي الى زيادة كسر الجفاف .



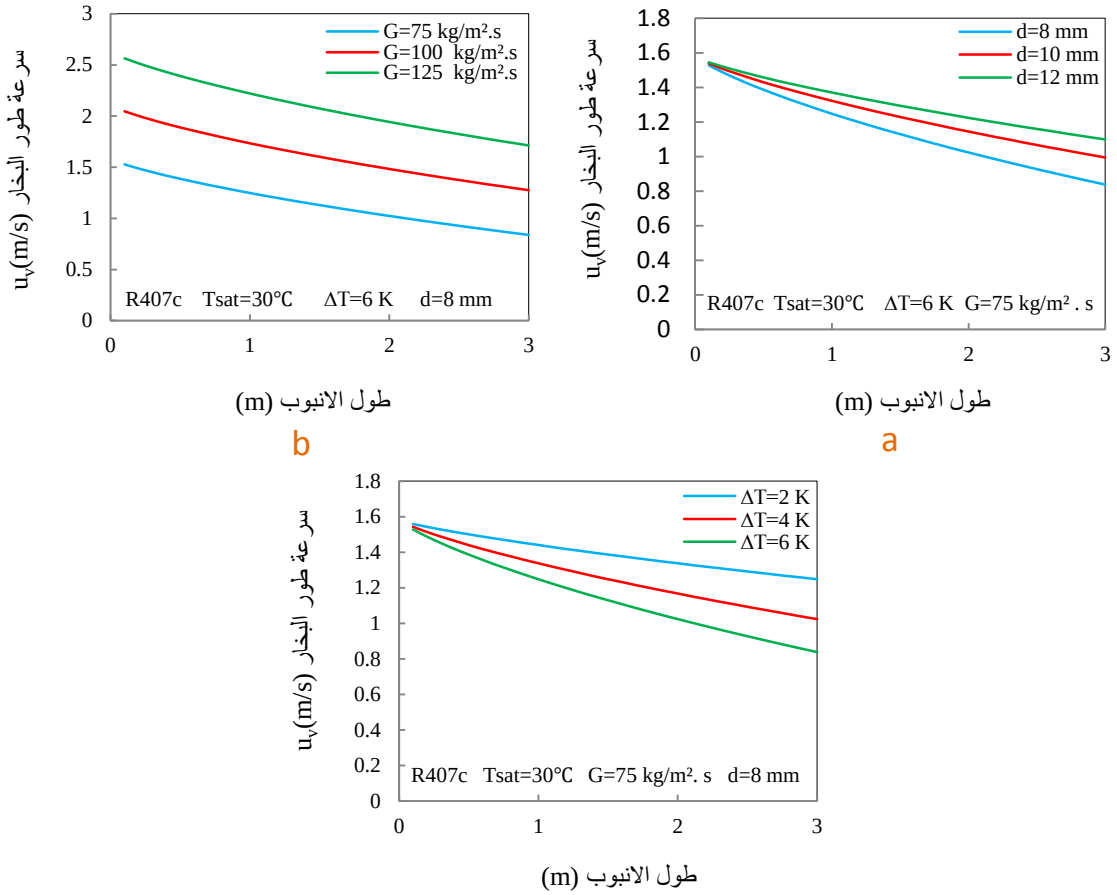
الشكل(6):تغير كسر الجفاف على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

والأشكال (7.a7.b7.c) توضح نقصان كسر الفراغ على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب، والسبب في ذلك هو نقصان مساحة المقطع الذي يتدفق فيه البخار خلال تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب إذ يعرف كسر الفراغ بأنه النسبة بين مساحة مقطع البخار المتدفق إلى المساحة الكلية للمقطع. يلاحظ من الشكل (7.a) زيادة كسر الفراغ على طول الأنبوب مع ازدياد قطر الأنبوب إذ بلغ معدل الزيادة في كسر الفراغ للأنبوب الذي قطره (12mm) عن الأنبوب الذي قطره (10mm) هو 0.526% وبلغ معدل نسبة الزيادة 1.31% عن الأنبوب الذي قطره (8mm) وذلك لان زيادة قطر الأنبوب تؤدي الى زيادة مساحة المقطع الذي يتدفق فيه البخار. كما ان كسر الفراغ على طول الأنبوب يزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية كما هو واضح في الشكل (7.b) اذ بلغ معدل نسبة الزيادة لسرعة التدفق($125kg/m^2.s$) 0.372% عن سرعة التدفق($100kg/m^2.s$) وعن سرعة التدفق ($75kg/m^2.s$) بلغ معدل نسبة الزيادة 0.86%وسبب ذلك يعود الى ان زيادة سرعة التدفق الكتلية تؤدي إلى نقصان سمك طبقة المائع المتكثف وهذا يؤدي الى زيادة مساحة المقطع الذي يتدفق فيه البخار، ولذا فان كسر الفراغ يزداد .يتضح في الشكل(7.c) زيادة كسر الفراغ على طول الأنبوب مع نقصان الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الانبوب وبلغ معدل نسبة الزيادة في كسر الفراغ عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من(6K) الى (4K) هو 0.501% وبلغ معدل نسبة الزيادة 1.181% عند تغير الفرق من (6K) الى (2K)، وذلك لان نقصان الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى نقصان معدل تدفق كتلة السائل المتكثف وبالتالي الى نقصان سمك طبقة المائع المتكثف وهذا يؤدي الى زيادة مساحة المقطع الذي يتدفق فيه البخار وبالتالي الى زيادة كسر الفراغ.



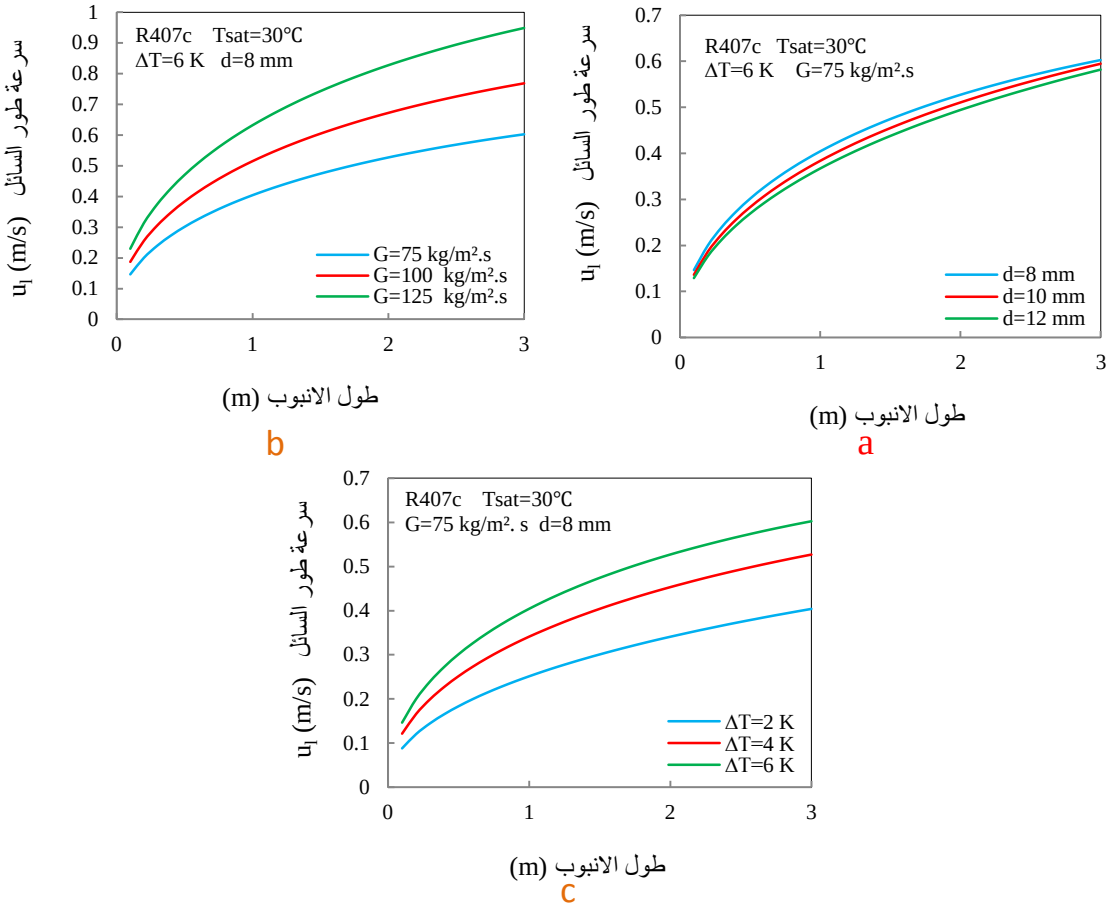
الشكل(7):تغير كسر الجافعلى طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

إن الأشكال (8.a و8.b و8.c) توضح نقصان سرعة طور البخار على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب والسبب في ذلك هو نقصان معدل تدفق كتلة البخار خلال تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب وهذا واضح في المعادلة (30). ان سرعة طور البخار على طول الانبوب تزداد مع زيادة قطر الأنبوب كما مبين في الشكل (8.a) اذ بلغ معدل نسبة الزيادة 5.109% للأنبوب الذي قطره (12mm) عن الأنبوب الذي قطره (10mm) في حين بلغ معدل نسبة الزيادة 12.893% للأنبوب الذي قطره (12mm) عن الأنبوب الذي قطره (8mm)،ويعزى السبب الى ان زيادة قطر الأنبوب يؤدي الى زيادة المساحة الكلية للأنبوب لنفس سرعة التدفق وبالتالي إلى زيادة كتلة البخار الكلية الداخلة وهذا يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار، ممّا يؤدي الى زيادة سرعة طور البخار .كما ان سرعة طور البخار على طول الأنبوب تزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية كما هو واضح في الشكل (8.b)وبلغ معدل نسبة الزيادة لسرعة التدفق ($125kg/m^2.s$) عن سرعة التدفق($100kg/m^2.s$) هو22.882% وعن سرعة التدفق($75kg/m^2.s$) بلغ معدل نسبة الزيادة 45.743%،وسبب ذلك يعود الى ان زيادة سرعة التدفق الكتلية لنفس قطر الأنبوب يؤدي الى زيادة كتلة البخار الكلية الداخلة وهذا يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار وبالتالي الى زيادة سرعة طور البخار. ويوضح الشكل (8.c) زيادة سرعة طور البخار على طول الأنبوب مع نقصان الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب حيث بلغ معدل نسبة الزيادة في سرعة طور البخار عند تغير الفرق بدرجات الحرارة (6K) الى (4K) هو 9.734% وعند تغير الفرق من(6K) الى (2K) بلغ معدل نسبة الزيادة 18.555%،وذلك لان نقصان الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى نقصان معدل تدفق كتلة السائل المتكثف كما هو واضح في المعادلة(22) وبالتالي زيادة معدل تدفق كتلة البخار والذي يؤدي الى زيادة سرعة طور البخار.



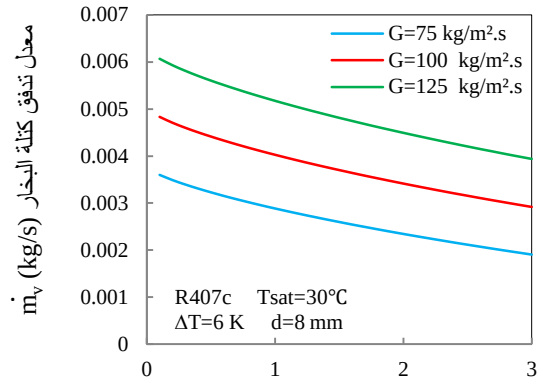
الشكل(8):تغير سرعة طور البخار على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

ان الزيادة في سرعة طور السائل على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب تلاحظ في الأشكال (9.a9وb.9وc.9) وذلك بسبب نقصان معدل تدفق كتلة البخار خلال تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب وبالتالي زيادة معدل تدفق كتلة السائل والذي يؤدي الى زيادة سرعة طور السائل.يوضح الشكل (9.a) كذلك زيادة سرعة طور السائل على طول الأنبوب مع صغر قطر الأنبوب حيث بلغ معدل نسبة الزيادة في سرعة طور السائل عند صغر قطر الأنبوب من(12mm) الى (10mm) هو 3.73% وعند تغير قطر الأنبوب من (12mm) الى (8mm) بلغ معدل نسبة الزيادة 7.618%، وسبب ذلك انه مع صغر قطر الأنبوب فان مساحة البخار الكلية تقل وهذا يؤدي الى نقصان معدل تدفق كتلة البخار وبالتالي فان معدل تدفق كتلة السائل يزداد ويؤدي الى زيادة سرعة طور السائل . ويلاحظ من الشكل (9.b) زيادة سرعة طور السائل على طول الأنبوب مع زيادة سرعة التدفق الكتلية وبلغ معدل نسبة الزيادة لسرعة تدفق ($125kg/m^2.s$) عن سرعة تدفق ($100kg/m^2.s$) هو 18.666% وعن سرعة تدفق ($75kg/m^2.s$) بلغ معدل نسبة الزيادة 36.21%، والسبب هوان معدل تدفق كتلة البخار يزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية لنفس قطر الأنبوب وهذا ما يؤدي الى زيادة سرعة طور البخار وبالتالي فان قيمة إجهاد القص البيني تزداد وهذا بدوره يؤدي الى زيادة سرعة طور السائل وهذا يتحقق من المعادلة (17). أما تأثير زيادة الفرق بين درجة حرارة البخار المشبع ودرجة حرارة سطح الأنبوب في سرعة طور السائل فهو واضح في الشكل (9.c) اذ يلاحظ زيادة سرعة طور السائل بزيادة الفرق بدرجات الحرارة اذ بلغ معدل نسبة الزيادة في سرعة طور السائل عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من (2K) الى (4K) هو 25.474% وعند تغير الفرق بدرجات الحرارة من (2K) الى (6K) بلغ معدل نسبة الزيادة 36.462%، وذلك لان زيادة الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة السائل المتكثف ويؤدي بالتالي الى زيادة سرعة طور السائل .

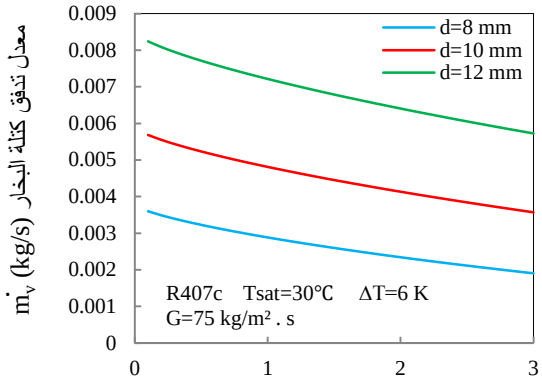


الشكل(9):تغير سرعة طور السائل على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

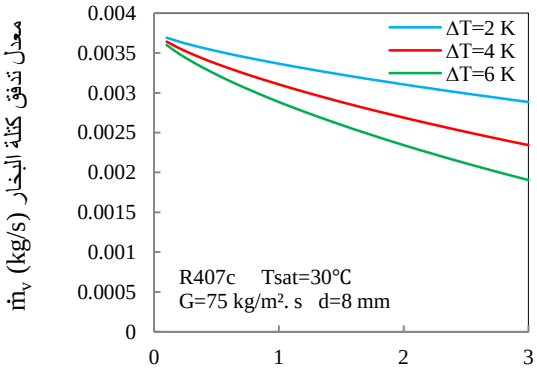
يلاحظ من الأشكال (10.a و10.b و10.c) نقصان معدل تدفق كتلة البخار على طول الأنبوب لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب بسبب نقصان معدل تدفق كتلة البخار خلال تقدم عملية التكثيف لتحول البخار المشبع إلى سائل خلال عملية التكثيف. ان زيادة قطر الأنبوب يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار على طول الأنبوب كما هو مبين في الشكل (10.a) وبلغ معدل نسبة الزيادة في معدل تدفق كتلة البخار 34.46% للأنبوب الذي قطره (12mm) عن الأنبوب الذي قطره (10mm) في حين بلغ معدل نسبة الزيادة عن الانبوب الذي قطره (8mm) هو 61.799%، بسبب زيادة مساحة مقطع تدفق البخار الداخل ويؤدي بذلك الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار لنفس سرعة التدفق الكتلية . كذلك فان معدل تدفق كتلة البخار على طول الأنبوب يزداد مع زيادة سرعة التدفق الكتلية كما هو في الشكل (10.b) اذ بلغ معدل نسبة الزيادة لسرعة التدفق ($125kg/m^2.s$) 23.182% عن سرعة التدفق ($100kg/m^2.s$) وبلغ معدل نسبة الزيادة 46.219% عن سرعة التدفق ($75kg/m^2.s$)، وذلك بسبب ازدياد معدل تدفق كتلة البخار لنفس قطر الأنبوب. ويبين الشكل (10.c) زيادة معدل تدفق كتلة البخار على طول الأنبوب مع نقصان الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب حيث بلغ معدل نسبة الزيادة عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من (6K) الى (4K) هو 10.197% وبلغ معدل نسبة الزيادة 19.521% عند تغير الفرق من (6K) الى (2K)،وذلك لان نقصان الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى نقصان معدل تدفق كتلة السائل المتكثف وبالتالي زيادة معدل تدفق كتلة البخار.



b



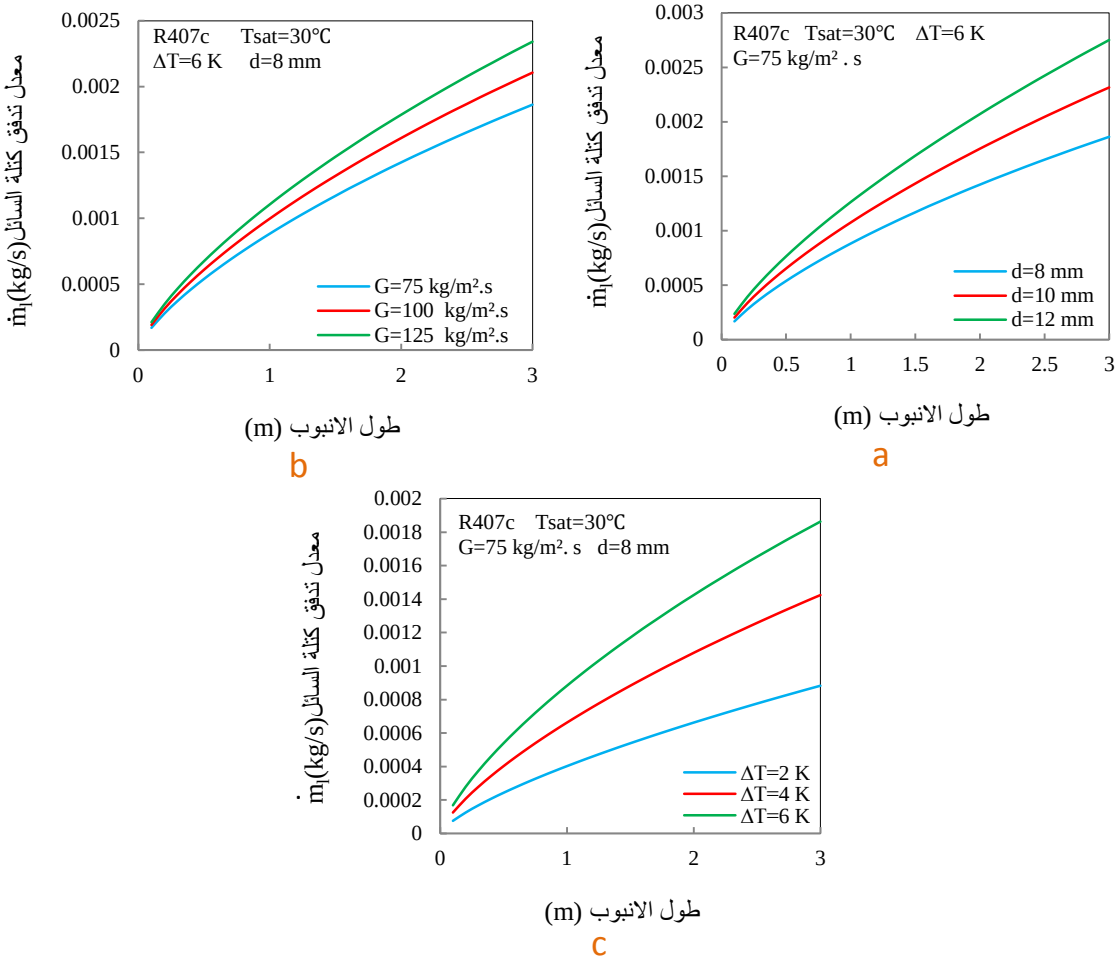
a



c

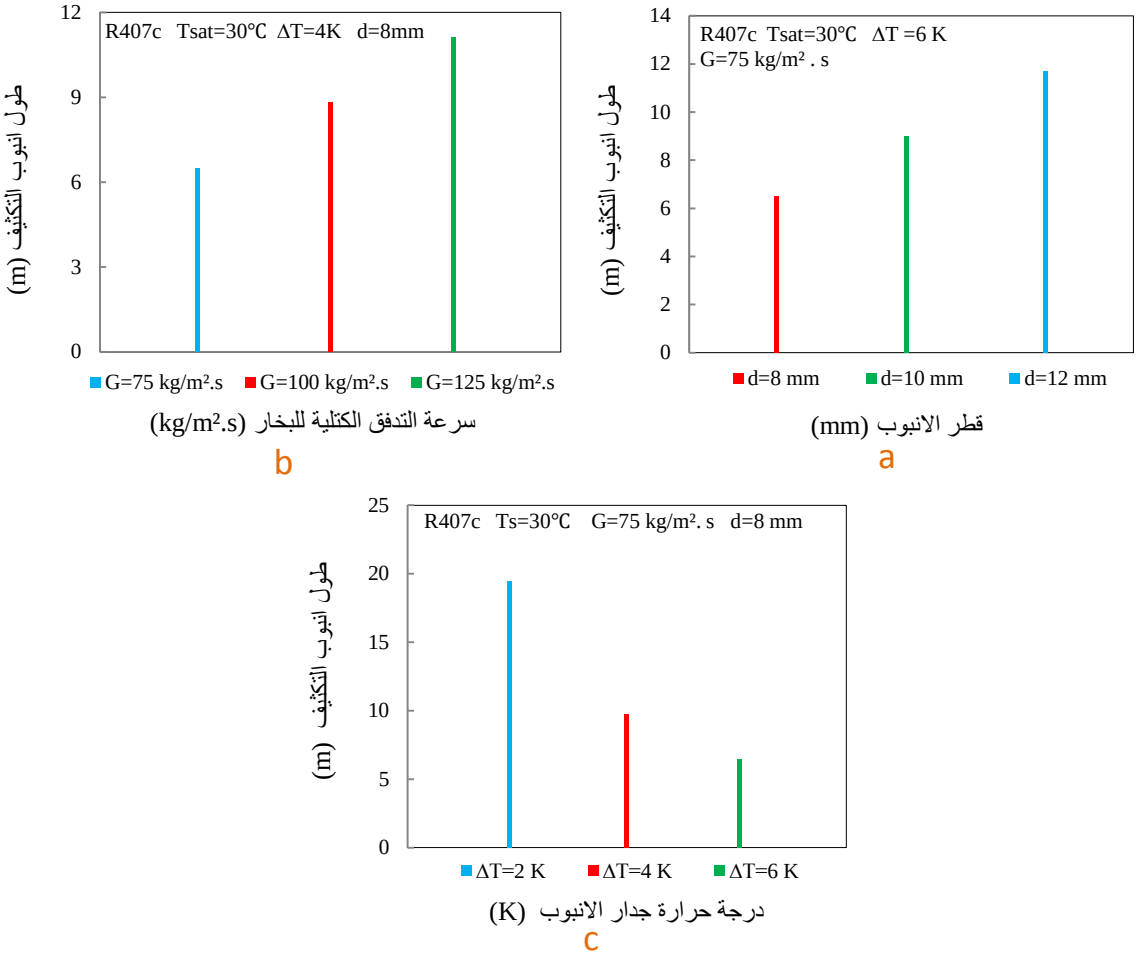
الشكل(10):تغير معدل تدفق كتلة البخار على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

ان معدل تدفق كتلة السائل على طول الأنبوب يزداد لمختلف الأقطار وسرع التدفق الكتلية والفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب كما هو واضح في الأشكال (11.a و11.b و11.c) والسبب في ذلك هو نقصان معدل تدفق كتلة البخار خلال تقدم عملية التكثيف على طول الأنبوب وبالتالي زيادة معدل تدفق كتلة السائل. ان زيادة معدل تدفق كتلة السائل على طول الأنبوب مع زيادة قطر الأنبوب يلاحظ في الشكل (11.a)اذ بلغ معدل نسبة الزيادة في معدل تدفق كتلة السائل للأنبوب الذي قطره (12mm) 15.121% عن الانبوب الذي قطره (10mm) وعن الأنبوب الذي قطره (8mm) بلغ معدل نسبة الزيادة 30.735%، وهذا يعود الى زيادة سمك طبقة المائع المتكثف مع زيادة قطر الأنبوب وبالتالي يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة السائل وهذا واضح في المعادلة (19). كما ان معدل تدفق كتلة السائل على طول الأنبوب يزداد ايضا مع زيادة سرعة التدفق الكتلية كما هو واضح في الشكل (11.b) حيث بلغ معدل نسبة الزيادة لسرعة التدفق ($125kg/m^2.s$) عن سرعة التدفق ($100kg/m^2.s$) هو 9.858% وبلغ معدل نسبة الزيادة 20.221% عن سرعة التدفق ($75kg/m^2.s$)، وسبب هذا انه مع زيادة سرعة التدفق الكتلية فان معدل تدفق كتلة البخار يزداد وهذا يؤدي الى زيادة سرعة طور البخار وبالتالي فان قيمة اجهاد القص البيني تزداد وهذا يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة السائل .كذلك فان معدل تدفق كتلة السائل على طول الأنبوب تزداد مع زيادة الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب وهذا واضح في الشكل (11.c) وبلغ معدل نسبة الزيادة عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من (2K) الى (4K) هو 38.904% وعند تغير الفرق من (2K) الى (6K) بلغ معدل نسبة الزيادة 53.915%، والسبب يعود الى ان زيادة الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى زيادة سمك طبقة المائع المتكثف وهذا ما يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة السائل المتكثف.



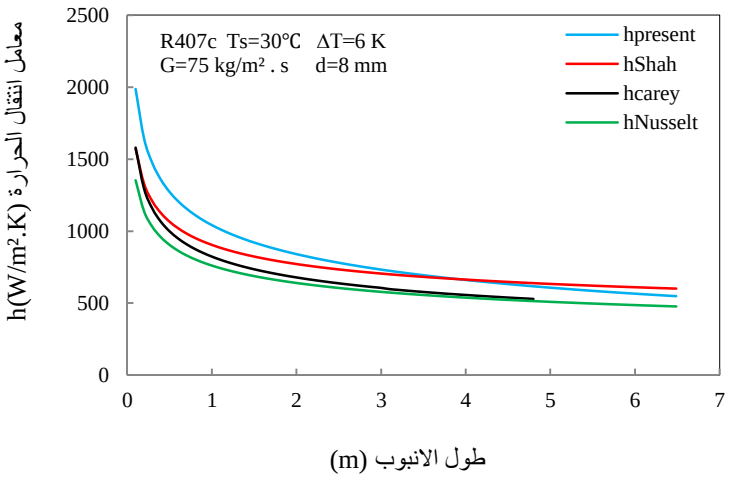
الشكل(11):تغير معدل تدفق كتلة السائل على طول الأنبوب، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

ولأهمية طول الأنبوب الذي تتم فيه عملية التكثيف الحلقي في الاستخدامات الصناعية لما في ذلك من تأثير اقتصادي فضلا عن الحجم الذي يشغله الأنبوب ، فقد تمت دراسة تأثير تغير كل من قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية والفرق بين درجة حرارة البخار وجدار الأنبوب في زيادة او نقصان طول أنبوب التكثيف الحلقي.فالشكل(12.a) يبين زيادة طول انبوب التكثيف مع زيادة قطر الأنبوب إذ بلغت نسبة الزيادة في الطول 27.702% عند تغير قطر الأنبوب من (8mm) الى (10mm) وبلغت 44.404% عند تغير قطر الأنبوب من (8mm) الى (12mm)، و يعزى ذلك الى زيادة مساحة المقطع الذي يتدفق فيه البخار الداخل وهذا يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار الداخلة الكلية بثبوت سرعة التدفق الكتلية وحيث إن كتلة البخار الداخلة تزداد فان عملية التكثيف تحتاج الى مسافة اطول حتى تستكمل وهذا يعني زيادة طول الأنبوب. ويوضح الشكل (12.b) زيادة طول انبوب التكثيف مع زيادة سرعة التدفق الكتلية وبلغ نسبة الزيادة في الطول 26.531% عند تغيرسرعة التدفق من ($75kg/m^2.s$) الى ($100kg/m^2.s$) وبلغت هذه النسبة 41.549% عند تغير سرعة التدفق من (75kg/m2.s) الى ($125kg/m^2.s$)، وهذا يعود الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار الداخلة الكلية بثبوت قطر الأنبوب؛ ولان كتلة البخار الداخلة تزداد فان عملية التكثيف تحتاج الى مسافة أطول كي تستكمل وهذا يؤدي الى زيادة طول الأنبوب .كذلك فان طول أنبوب التكثيف يزداد مع نقصان الفرق في درجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب كما في الشكل (12.c) اذ بلغت نسبة الزيادة في الطول 33.34% عند تغير الفرق بدرجات الحرارة من (6K) الى (4K) وبلغت هذه النسبة 66.676% عند تغير الفرق من (6K) الى (2K)، وذلك لان نقصان الفرق في درجات الحرارة يؤدي الى نقصان معدل تدفق كتلة السائل ممّا يؤدي الى زيادة معدل تدفق كتلة البخار ولان كتلة البخار الداخلة تزداد فان عملية التكثيف تحتاج الى مسافة اطول لإكمالها وهذا يعني زيادة طول الأنبوب المستخدم لهذه العملية.



الشكل(12):تغير طول أنبوب التكثيف، (a)لأقطار مختلفة، (b) لسرع تدفق كتلية مختلفة، (c) مع اختلاف درجة حرارة جدار الأنبوب .

لأجل التحقق من دقة النتائج المستحصلة تمت المقارنة مع نتائج باحثين آخرين قاموا بدراسات نظرية وعملية لعملية التكثيف لموائع مختلفة داخل أنابيب عمودية عند ظروف التشغيل نفسها. فقد تمت مقارنة معامل انتقال الحرارة الموضعي على طول الأنبوب للمائع R407c مع النتائج المستحصلة من تطبيق العلاقة التجريبية للباحثShah[7]وكان معدل نسبة الاختلاف (3.16%) ويمكن ان تعزى هذه الزيادة الى كون المعادلة المشار إليها هي معادلة تجريبية قد يؤثر في شكلها الخسائر غير المسيطر عليها في الحرارة. كما تمت مقارنة قيم معامل انتقال الحرارة الموضعي على طول الأنبوب للمائع نفسه مع النتائج المستحصلة من تطبيق معادلة نسلت النظرية[5] وكان معدل نسبة الاختلاف هو (20.786%). أي ان قيم معامل انتقال الحرارة التي تم الحصول عليها في هذا البحث تزيد عن القيم المحسوبة باستخدام المعادلة المذكورة بالنسبة اعلاه، ويعزى هذا الاختلاف الى ان المعادلة المذكورة أهمل فيها الباحث تأثير إجهاد القص البيني وهبوط الضغط. إذ ان هذين العاملين يتسببان في تقليل سمك طبقة السائل المتكثف (كما مر ذكره سابقا)، لذلك فان معامل انتقال الحرارة يزداد وهذا يتفق مع المعادلة (16). كذلك تمت المقارنة نفسها مع النتائج المستحصلة من تطبيق نموذج الباحث Carey[4]وكان معدل نسبة الاختلاف هو(18.365%) وهذا الاختلاف سببه ان الباحث Carey أهمل تأثير كسر الفراغ على طول الأنبوب فضلا عن ذلك فان المعادلة التي استخدمها لحساب معامل الاحتكاك البيني لا تأخذ بالحسبان تأثير مستوى الضغط (النسبة بين كثافة البخار إلى السائل).والشكل(13)يوضح نتائج المقارنة مع هؤلاء الباحثين للمائع R407c.



الشكل (13): مقارنة النتائج الحالية ونتائج كل من الباحثين Shah و Careyو Nusselt.

4. الاستنتاج

بعد تقديم التحليل النظري لانتقال الحرارة وهبوط الضغط وخصائص الجريان للمائعR407cخلال عملية التكثيف لنمط الجريان الحلقي في أنبوب عمودي ، يمكن أن نستنتج بأن معامل انتقال الحرارة الموضعي يزداد بصغر قطر الأنبوب وزيادة سرعة التدفق الكتلية بينما يقل بزيادة الفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب ، بينما يزداد سمك طبقة المائع المتكثف بزيادة قطر الأنبوب ونقصان سرعة التدفق الكتلية وزيادة الفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب ، في حين يقل معامل انتقال الحرارة الموضعي مع زيادة سمك طبقة المائع المتكثف . يسود تأثير هبوط الضغط الساكن نتيجة الجاذبية الأرضية في هبوط الضغط الكلي مع زيادة قطر الأنبوب والفرق في درجات الحرارة ونقصان سرعة التدفق الكتلية ، بينما يسود تأثير هبوط الضغط الاحتكاكي في هبوط الضغط الكلي مع نقصان قطر الأنبوب و الفرق في درجات الحرارة وزيادة سرعة التدفق الكتلية . ويزداد كلا من كسر الجفاف وكسر الفراغ بزيادة قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية ونقصان الفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب. وتزداد سرعة طور البخار بزيادة قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية ونقصان الفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب ، بينما تزداد سرعة طور السائل بصغر قطر الأنبوب وزيادة سرعة التدفق الكتلية والفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب .أما معدل تدفق كتلة البخار فيزداد بزيادة قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية ونقصان الفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب، في حين يزداد معدل تدفق كتلة السائل بزيادة قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية والفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب . بينما يزداد طول انبوب التكثيف بزيادة قطر الأنبوب وسرعة التدفق الكتلية ونقصان الفرق بدرجات الحرارة للبخار المشبع وجدار الأنبوب .

الرموز

D	قطر الأنبوب(m)
h	معامل انتقال الحرارة الموضعي$(W/m^2.K)$
T	درجة الحرارة(K)
p	الضغط(Pa)
$\dot{m}$	معدل تدفق الكتلة(kg/s)
g	ثابت التعجيل الأرضي(m/s^2)
G	سرعة التدفق الكتلية$(kg/m^2.s)$
z,L	طول الأنبوب(m)

h_{lv}	الحرارة الكامنة للتكثيف(kJ/kg)
u	السرعة بإتجاه(z(m/s
k	معامل التوصيل الحراري (W/m.K)
f	معامل الاحتكاك
q	معدل انتقال الحرارة لوحدة المساحة(W/m^2)
x	كسر الجفاف
Re	عدد رينولدز $_l$ ($GD(1-x)/\mu$)

الرموز اللاتينية

ρ	الكثافة (kg/m^3)
α	كسر الفراغ
δ	سمك طبقة السائل المتكثف(m)
θ	زاوية ميل الانبوب(deg.)
τ	اجهاد القص(N/m^2)
υ	السرعة باتجاه(m/s)
μ	اللزوجة الديناميكية(kg/m.s)
π	النسبة الثابتة

الرموز السفلية

v	بخار
l	سائل
fric	احتكاك
acc	تعجيل
grav	جاذبية
tot	كلي
i	السطح البيني
w	جدار
sat	مشبع

5. المراجع

1. Thome,J.R. (2009). *"Engineering Data Book III*" ,swiss federal institute of technology Lausanne.
2. Ghiaasiaan, S. M. (2008). *"Two –Phase Flow , Boiling and Condensation*" Cambridge University Press , Cambridge.
3. Kandlikar, S. G., Shoji, M. and Dhir, V.K. (1999).*"Handbook of Phase Change : Boiling and Condensation*" , Taylor &Francis,.
4. Carey, V. P.(1992) ,*Liquid –Vapor Phase – Change Phenomena*, Hemisphere, USA.
5. Gengel, Y. A. (2003) .*"Heat Transfer Apractical Approach"* ,McGraw_Hill Companies.
6. Dalkilic, A. S., Yildiz, S., Wongwises, S.(2009) .*" Experimental investigation of convective heat transfer coefficient during downward laminar flow condensation of*

R134a in a vertical smooth tube "; International Journal of Heat and Mass Transfer , vol.52 , pp. 142–150.

7. Shah, M. M.(2009) . *"An improved and extended general correlation for heat transfer during condensation in plain tubes"*; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,HVAC&R RESEARCH,vol.15, no.5, pp. 889–913.
8. Zhao, T. S., and Liao, Q.(2002) . *"Theoretical analysis of film condensation heat transfer inside vertical mini triangular channels "*; International Journal of Heat and Mass Transfer ,Vol.45 , pp. 2829–2842.
9. Stevanovic, V. D., Stanojevic, M., Radic, D., and Jovanovic, M.(2008) . *" Three-fluid model predictions of pressure changes in condensing vertical tubes "* ;International Journal of Heat and Mass Transfer,Vol .51 , pp. 3736–3744.
10. Dalkilic,A.S.,andWongwises, S. (2009) . *"Intensive literature review of condensation inside smooth and enhanced tubes"* ; International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.52,pp.3409–3426.
11. Bohdal, T., Kruzel, M., and Sikora, M. (2017). " *An investigation of heat transfer coefficient during refrigerants condensation in vertical pipe microchannel* " ; Journal of Mechanical and Energy Engineering , Vol.1(41), No.2, pp.163-170.
12. Arslan, G., and Eskin, N. (2015). " *Heat Transfer Characteristics for condensation of R134A in Vertical Smooth Tube* " ; Experimental Heat Transfer , Vol.28, No.5, pp.430-445.
13. Pan, Y.(2001). *" Condensation characteristics inside a vertical tube considering the presence of mass transfer, vapor velocity and interfacial shear "*; International Journal of Heat and Mass Transfer , Vol .44, pp. 4475–4482.
14. Saffari, H., and Naziri, V.(2010) . *" Theoretical modeling and numerical solution of stratified condensation in inclined tubes "*; Journal of Mechanical Science and Technology , Vol .24, No.12 , pp. 2587–2596.
15. Kandlikar, S. G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., and King, R. M. (2006) . *"Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels"*, Elsevier Ltd.
16. Lips, S., and Meyer, J. P.(2011) . *"Two-phase flow in inclined tubes with specific reference to condensation: A review"* ;International Journal of Multiphase Flow, Vol.37 , pp. 845–859.
17. Naji, A. S.(2011) . *"interfacial friction factor in horizontal and inclined annular two-phase flow in pipes"* ; Journal of Babylon University/ Pure and Applied Sciences, Vol .19, No. 2 , pp. 723–739.