

كتاب إنتقال الحرارة بالغليان والتكثيف

تأليف: أسامة محمد المرضي سليمان

## كتاب إنتقال الحرارة بالغليان والتكثيف

### Textbook in Heat Transfer by Boiling and Condensation

تأليف

أسامة محمد المرضي سليمان خيال

أستاذ مساعد بقسم الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة والتقنية، جامعة وادي النيل

عطبرة ، السودان



ديسمبر 2017م

## إنتقال الحرارة بالغليان والتكثيف

## Heat Transfer by Boiling and Condensation

إعداد :

أسامة محمد المرضي سليمان

جامعة وادي النيل ، كلية الهندسة والتقنية

عظبرة – السودان

ديسمبر 2017م

## شكر و عرفان

الشكر والعرفان لله والتبريكات والصلوات على رسوله وخادمه محمد صلى الله عليه وسلم وعلى آله وصحبه وجميع من تبعه إلى يوم القيامة.

لذكرى كل من أمي الغالية خضرة درار طه، وأبي العزيز محمد المرضي سليمان، وخالتي الحبيبة زعفران درار طه الذين تعلمت منهم القيمة العظيمة للعمل واحترام الوقت وترتيبه وتدبيره.

إلى زوجتي الأولى نوال عباس عبد المجيد وبناتي الثلاث رؤى، روان وآية تقديراً لحبهم وصبرهم ومثابرتهم في توفير الراحة والسكون خاصةً عندما تتعقد وتتشابك الأمور.

إلى زوجتي الثانية لمياء عبد الله علي فزاري التي مثلَّ حبها وتضرعها إلى الله الزخم الذي دفعني للمسير في طريق البحث والمعرفة الشائك.

يودُّ الكاتب أن يتقدم بالشكر أجدله لكل من ساهم بجهده وفكره ووقته في إخراج هذا الكتاب بالصورة المطلوبة ويخص بذلك الزملاء الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة وادي النيل، وأيضاً الأخوة الأساتذة بقسم الهندسة الميكانيكية بجامعة البحر الأحمر وجامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا.

الشكر والتقدير والعرفان للبروفيسور محمود يس عثمان الذي ساهم بقدر كبير في مراجعة وإعادة مراجعة محتويات الكتاب.

أهدي هذا الكتاب لذكرى كل من بروفيسور صابر محمد صالح وبروفيسور الفاضل آدم عبد الله وبروفيسور مشارك عبد الجليل يوسف العطا وبروفيسور مشارك محي الدين إدريس حربة، الذين ساهموا في تأسيس الصرح الشامخ كلية الهندسة الميكانيكية عطبرة، رحمهم الله جميعاً وأسكنهم فسيح جناته مع الصديقين والشهداء وحسن أولئك رفيقاً.

أهدي هذا الكتاب بصفة أساسية لطلاب دبلوم و بكالوريوس الهندسة في جميع التخصصات خاصة طلاب قسم الهندسة الميكانيكية حيث يستعرض هذا الكتاب آلية عملية إنتقال الحرارة بالغليان والتكثيف. وأعبر عن شكري وامتناني إلى المهندس أسامة محمود بمركز دائية لخدمات الطباعة والنشر بمدينة عطبرة الذي أنفق العديد من الساعات في طباعة، مراجعة وإعادة طباعة هذا الكتاب أكثر من مرة. أخيراً، أرجو من الله سبحانه وتعالى أن يتقبّل هذا العمل المتواضع والذي آمل أن يكون ذو فائدة للقارئ.

## مقدمة

الحمد لله والصلاة والسلام على رسوله محمد صلى الله عليه وسلم وبعد:

إنَّ مؤلّف هذا الكتاب إيماناً منه بالدور العظيم والمقدّر للأستاذ الجامعي في إثراء حركة التّأليف والتّعريب والترجمة يأمل أن يفي هذا الكتاب بمتطلبات برامج البكالوريوس والدبلوم العام والمتوسط لطلاب وفنيي الهندسة الميكانيكية وهندسة الإنتاج أو التصنيع والهندسة الكهربائية والمدنية.

يتفق هذا الكتاب لغوياً مع القاموس الهندسي الموحد السوداني، ويُعد الكتاب مرجعاً في مجاله حيث يمكن أن يستفيد منه الطالب والمهندس والباحث ويعتبر الكتاب مقتبساً من مذكرات مؤلفه في تدريسه لهذا المقرر لفترة لا تقل عن ثلاث وعشرون عاماً.

يهدف هذا الكتاب لتأكيد أهمية تدريس مقرر إنتقال الحرارة بالغلين والتكثيف لما له من أهمية كبيرة في العديد من التطبيقات الهندسية.

يشتمل هذا الكتاب على فصلين، حيث يستعرض الفصل الأول إنتقال الحرارة بالغلين بينما يستعرض الفصل الثاني إنتقال الحرارة بالتكثيف. في نهاية كل فصل هنالك مجموعة من الأمثلة المحلولة ومسائل إضافية غير محلولة.

إنَّ الكاتب يأمل أن يُساهم هذا الجهد المتواضع في إثراء المكتبة الجامعية داخل السودان وخارجه في هذا المجال من المعرفة ويأمل من القارئ بضرورة إرسال تغذية راجعة إن كانت هنالك ثمة أخطاء حتى يستطيع الكاتب تصويبها في الطبعة التالية للكتاب.

اللهم لا سهل إلا ما جعلته سهلاً

وأنت تجعل الحزن إذا شئت سهلاً

والله ولي التوفيق

المؤلف

أسامة محمد المرضي سليمان  
قسم الهندسة الميكانيكية  
كلية الهندسة والتقنية  
جامعة واي النيل  
مارس 2017م

## المحتويات

الصفحة	الموضوع
ii	شكر و عرفان
iv	مقدمة
vi	المحتويات
<b>الفصل الأول: إنتقال الحرارة بالغليان</b>	
1	1.1 مدخل
1	1.2 الملامح الرئيسية لعمليات الغليان والتكثف
2	1.3 الظواهر المصاحبة للغليان والتكثيف
2	1.4 إنتقال الحرارة بالغليان
15	1.5 أمثلة محلولة
<b>الفصل الثاني: إنتقال الحرارة بالتكثيف</b>	
23	2.1 مناحي عامة
23	2.2 أشكال التكثف
25	2.3 تكثيف الشريحة الطباقية على لوحة رأسية
33	2.4 تكثيف الشريحة المضطرب
35	2.5 تكثيف الشريحة على أنابيب أفقية
35	2.6 تكثيف الشريحة من داخل الأنابيب الأفقية
36	2.7 تأثير وجود غازات لا متكثفة
36	2.8 أمثلة محلولة
57	2.9 ملخص نظري
58	2.10 ملخص الصيغ الرياضية
60	2.11 أسئلة نظرية
61	2.12 مسائل غير محلولة في إنتقال الحرارة بالغليان

62

2.13 مسائل غير محلولة في إنتقال الحرارة بالتكثيف

الكتب والمراجع

64

الكتب والمراجع العربية

64

الكتب والمراجع الإنجليزية

## الفصل الأول

### انتقال الحرارة بالغليان

### Heat Transfer by Boiling

#### 1.1 مدخل (Introduction):

لقد تم سابقاً في انتقال الحرارة بالحمل دراسة أنظمة متجانسة ذات طور مفرد فقط. على أيّ حال، هنالك إجراءات حمل معينة ترتبط بتغير في الطور مثل الغليان والتكثيف. بينما يتضمّن الغليان التغير من طور السائل إلى طور البخار لمادة مائعة فإنّ التكثيف يشتمل على التغير من طور البخار إلى طور السائل.

أسلوب إنتقال الحرارة بتغير الطور (i.e. عمليات الغليان والتكثيف) له تطبيقات واسعة كما مذكور أدناه:

i/ تبريد المفاعلات النووية ومحركات الصواريخ (Cooling of nuclear reactors and rocket motors)

ii/ محطات القدرة البخارية (الغلايات والمكثفات) (Boilers and condensers).

iii/ أنظمة التبريد وتكييف الهواء (المبخرات والمكثفات) (Evaporators and condensers).

iv/ صهر المعادن في الأفران (Melting of metals in furnaces).

v/ المصافي وطواحين السكر (مبادلات حرارية) (Heat exchangers) (Refineries and sugar mills)

vi/ عملية التسخين والتبريد (Process heating and cooling).

#### 1.2 الملامح الرئيسية لعمليات الغليان والتكثيف:

#### (General Features of Boiling and Condensation)

عمليات الغليان والتكثيف تتضمن الملامح الفريدة التالية:

i/ كنتيجة لتغير الطور في هذه العمليات، فإنّ إنتقال الحرارة إلى أو من المائع يمكن حدوثه بدون تأثيره على درجة حرارة المائع.

ii/ معامل انتقال الحرارة والمعدلات نتيجة للحرارة الكامنة المصحوبة بتغير الطور تكون عادة أكبر مقارنة بعملية الحمل العادية (i.e. بدون تغير في الطور).

iii/ يتم الحصول على معدل عالٍ لانتقال الحرارة بفرق درجة حرارة صغير.

### 1.3 الظواهر المصاحبة للغلين والتكثيف:

#### (Phenomena Accompanying Boiling and Condensation)

الظواهر المصاحبة للغلين والتكثيف تكون أكثر تعقيداً مقارنة بعملية الحمل العادية نتيجة للعوامل التالية:

i/ تأثيرات الحرارة الكامنة.

ii/ التوتر السطحي.

iii/ خصائص السطح والخواص الأخرى لأنظمة ذات طورين.

### 1.4 إنتقال الحرارة بالغلين (Boiling Heat Transfer):

#### مناحي عامة (General Aspects):

الغلين هو عملية إنتقال الحرارة بالحمل الذي يتضمّن تعييراً في الطور من حالة السائل إلى حالة البخار، أيضاً

يتم تعريف الغلين كتبخّر عند سطح سائل مصمت. هذا يكون ممكناً فقط عندما تزيد درجة حرارة السطح ( $t_s$ )

عن درجة حرارة التشبع المقابلة لضغط السائل ( $t_{sat}$ ). يتم نقل الحرارة من السطح المصمت إلى السائل طبقاً

للقانون:

$$Q = hA_s = (t_s - t_{sat}) = hA_s \Delta t_e$$

حيث،  $\Delta t_e = (t_s - t_{sat})$  وتعرف بدرجة الحرارة الزائدة (Excess temperature)

#### 1/ تطبيقات عملية الغلين (Applications of Boiling Process):

هنالك تطبيقات لعملية الغلين يتم توضيحها في الحالات التالية:

i/ إنتاج البخار (لتوليد القدرة وللعمليات الصناعية ولتسخين الفراغ) في محطات القدرة البخارية والنووية.

ii/ امتصاص الحرارة في أنظمة التبريد وتكييف الهواء.

iii/ التقطير وتنقية السوائل (Distillation and refining)

iv/ التركيز، التجفيف وتجفيف الأطعمة والمواد.

(Concentration, dehydration and drying foods and materials)

v/ تبريد الماكينات مثل المفاعلات النووية ومحركات الصواريخ حيث يتم إزالة كميات كبيرة من الحرارة في حجم صغير نسبياً (تكون معدلات فقدان عاليه ك  $10^8 w/m^2$  ويكون معدل إنتقال الحرارة في الغلاية الحديثة في حدود  $2 \times 10^5 w/m^2$ ).

## 2/ أشكال ظاهرة إنتقال الحرارة بالغليان (Types of Heat Transfer by Boiling):

ظاهرة انتقال الحرارة بالغليان يمكن أن تحدث في الأشكال التالية:

### i/ الغليان الحوضي (Pool Boiling):

في هذه الحالة يكون السائل فوق السطح الساخن هو في الأساس راكد وحركته قرب السطح تكون نتيجة للحمل الحر والخلط الناشئ من نمو الفقاعات وانفصالها (Bubble growth and detachment). يحدث الغليان الحوضي في غلايات البخار التي تعمل بالحمل الطبيعي.

### ii/ الغليان بالحمل القسري (Forced Convection Boiling):

في هذه الحالة يتم استحثاة حركة السائل بوسائل خارجية (وايضاً بالحمل الطبيعي وبخلط الفقاعات المستحثة). يتم ضخ السائل وإجباره على السريان. هذا النوع من الغليان في غلايات الماء الأنبوبية (Water tube boiler) بحمل قسري.

### iii/ التبريد تحت درجة التكثف او الغليان الموضعي (Sub – Cooled or Local Boiling):

في هذه الحالة تكون درجة حرارة السائل أسفل درجة حرارة التشبع، وتتكون الفقاعات في محيط سطح الحرارة (Vicinity of heat surface). تتكثف هذه الفقاعات بعد رحلة مرور قصيرة في السائل الذي يملك درجة حرارة أقل من درجة حرارة نقطة الغليان.

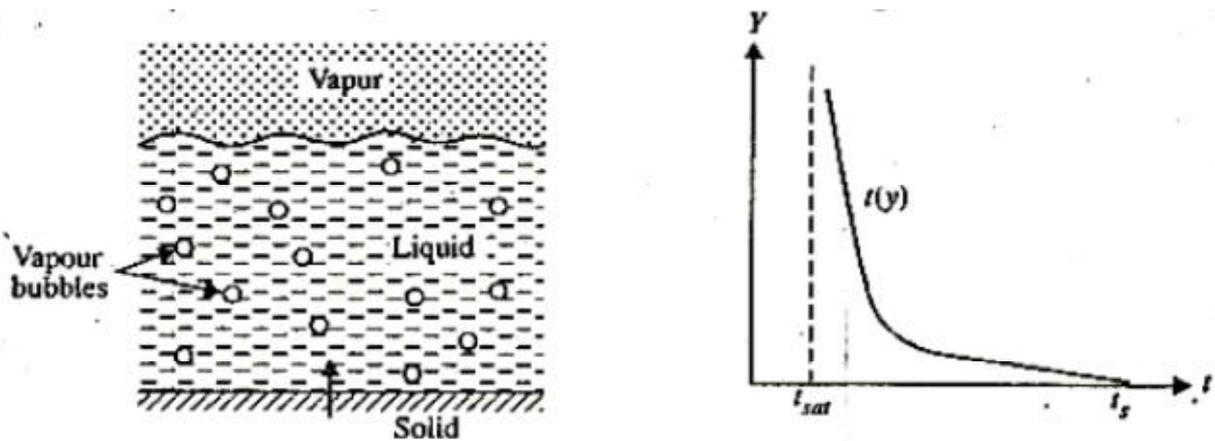
### iv/ الغليان المشبع (Saturated Boiling):

في هذه الحالة تزيد درجة حرارة السائل على درجة حرارة التشبع. فقاعات البخار المتكونة عند السطح المصمت (السطح البيني سائل – مصمت) يتم دفعها خلال السائل بتأثيرات الطفو وتهرب في الحال من السطح الحر (السطح البيني سائل – بخار).

### 3/ مناطق الغليان أو أنظمة الغليان (Boiling Regimes):

تعتمد عملية الغليان على طبيعة السطح، الخواص الفيزيائية الحرارية (Thermo – physical properties) للمائع وديناميكيات فقاعة البخار. نتيجة لإشراك عدد كبير من المتغيرات، فإن المعادلات العامة التي توصف عملية الغليان لا تكون متاحة. بالرغم من ذلك، فقد تمَّ عمل تقدم ملحوظ في الوصول إلى فهم فيزيائي لآلية الغليان.

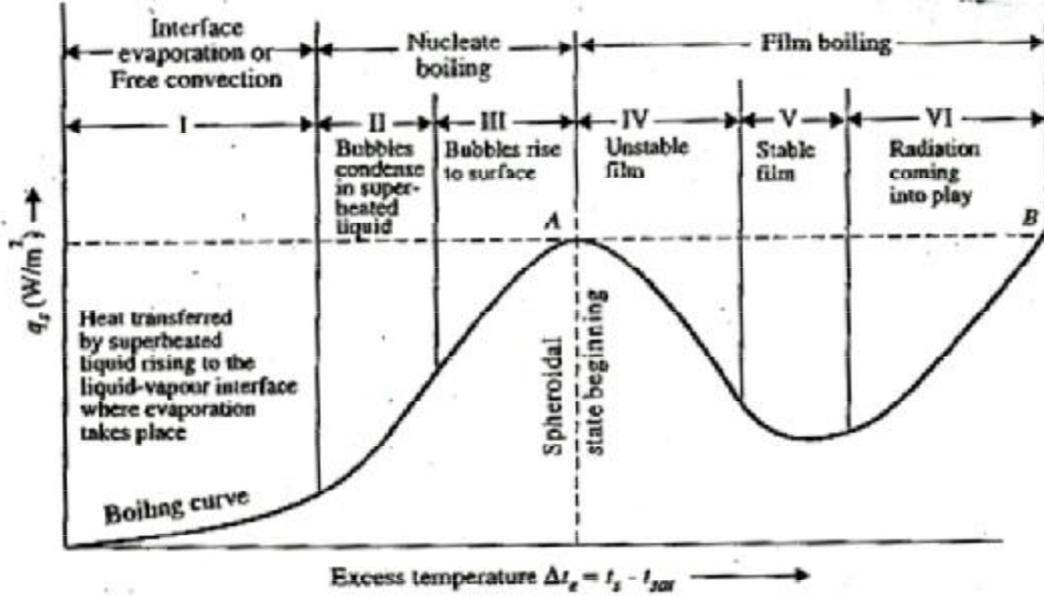
الشكل (1.1) أدناه يوضِّح توزيع درجة الحرارة في غليان حوضي مشبع بسطح بيني لسائل – بخار. يُلاحظ من الشكل وبالرغم من أن هنالك إنخفاض حاد في درجة حرارة السائل القريب من السطح المصمت، فإن درجة الحرارة خلال معظم السائل تظل أعلى قليلاً من التشبع. نتيجة لذلك فإنَّ الفقاعات المتولدة عند السطح البيني لسائل مصمت ترتفع ويتم نقلها عبر السطح البيني لسائل – بخار. إذا كانت ظاهرة الغليان ناتجة من الغليان الحوضي أو من الغليان بالحمل القسري، فإن هنالك ثلاث أنظمة غليان (تبخر سطح بيني، غليان تنوي (Nucleate boiling)، وغليان شرانحي (Film boiling) تكون متحدة مع فيض حرارة متزايد تدريجياً، كما موضِّح في الشكل (1.2). تم الحصول على هذا المنحنى المحدد بواسطة سلك من البلاتين مسخن كهربائياً، ومغمور في حوض ماء (عند درجة حرارة التشبع) وذلك بتغيير درجة حرارة سطحه وقياس فيض حرارة السطح  $q_s$  (Surface heat flux).



شكل (1.1) غليان حوضي بسطح بيني لسائل – بخار

/i تبخر السطح البيني (Interface Evaporation):

يوجد تبخر السطح البيني (عملية التبخر بدون تكون فقاعات) في المنطقة I التي تُعرف بمنطقة الحمل الحر. هنا تكون درجة الحرارة الزائدة،  $\Delta t_e$  صغيرة جداً وتساوي  $5^\circ C$ ، في هذه المنطقة يكون السائل القريب من السطح محمّصاً قليلاً، تقوم تيارات الحمل بتدوير السائل ويحدث التبخر عند سطح السائل.



شكل (1.2) منحنى الغليان للماء

/ii الغليان بالتنوؤ (Nucleate Boiling):

يوجد هذا النوع من الغليان في المناطق II و III. بالزيادة في قيمة  $\Delta t_e$  (درجة الحرارة الزائدة) يبدأ تكون الفقاعات على سطح السلك عند نقاط موضعية معينة. تتكثف الفقاعات في السائل قبل الوصول إلى سطح السائل. حقيقة هذه هي المنطقة II التي يبدأ عندها الغليان التنوؤي. بزيادة إضافية في  $\Delta t_e$  تتشكل الفقاعات بسرعة أكبر وترتفع إلى سطح السائل متسببة في تبخر سريع، كما مبين في المنطقة III. هكذا يتم تمييز الغليان التنوؤي بتكوّن فقاعات عند مواقع التنوؤ وتقليبات السائل الناتجة (Resulting liquid agitation). تقلب الفقاعات يستحث (ينتج) خلطاً لكمية كبيرة من المائع وهذا بدوره يفوق لزيادة ملحوظة في فيض الحرارة ومعامل انتقال الحرارة بالغليان. (المعدّة المستخدمة في الغليان يجب تصميمها لتشتغل في هذه المنطقة فقط).

يوجد الغليان التنبؤي حتى قيمة لـ  $\Delta t_e$  مساوية لـ  $50^\circ C$ . فيض الحرارة الأقصى المعروف بفيض الحرارة الحرج يحدث عند النقطة A (أنظر للشكل (1.2)) ويكون بمقدار  $1 \text{ Mw/m}^2$ .

### iii/ الغليان الشرائحي (Film Boiling):

يتكون الغليان الشرائحي من المناطق IV ، V و VI . سلوك زيادة فيض الحرارة بزيادة درجة الحرارة الزائدة الملاحظ حتى المنطقة III يتم عكسه في المنطقة IV (التي تسمى بمنطقة الغليان الشرائحي). هذا ناتج عن التكون السريع جداً للفقاعات التي تغطي سطح التسخين وتمنع السائل الطازج الداخل من أخذ مكانه. تندمج الفقاعات في الحال وتكوّن شريحة بخار تغطي السطح بأكمله. بما أنّ الموصلية الحرارية لشريحة البخار تكون أقلّ من تلك للسائل فإنّ فيض الحرارة ينخفض بنحو  $\Delta t_e$ . خلال مدى درجة الحرارة  $50^\circ C < \Delta t_e < 150^\circ C$  تتفاوت الحالات بين غليان تنبؤي وغليان شرائحي ويسمى الطور بالغليان الإنتقالي (Transition boiling)، الغليان الشرائحي غير المستقر أو الغليان الشرائحي الجزئي (المنطقة IV). بالزيادة الإضافية في  $\Delta t_e$  يتم استقرار شريحة البخار وتتم التغطية الكاملة لسطح التسخين ببطانية بخار (Vapour blanket) ويكون فيض الحرارة هو الأدنى كما موضح في المنطقة V. درجات حرارة السطح المطلوبة لإعداد شريحة مستقرة تكون عالية وتحت هذه الأحوال (الشروط) يتم فقد مقدار كبير من الحرارة بواسطة السطح نتيجة للإشعاع كما موضح في المنطقة VI. يمكن ملاحظة ظاهرة غليان الشريحة المستقر عندما تسقط نقطة من ماء على مقعد ساخن أحمر. لا تتبخر هذه النقطة في الحال ولكنها ترقص قليلاً على المقعد؛ هذا ناتج عن تكوّن شريحة بخار مستقرة عند السطح البيني بين السطح الساخن وقطرة السائل.

### iv/ فيض الحرارة الحرج أو نقطة الحريق (Critical Heat Flux or Burnout Point):

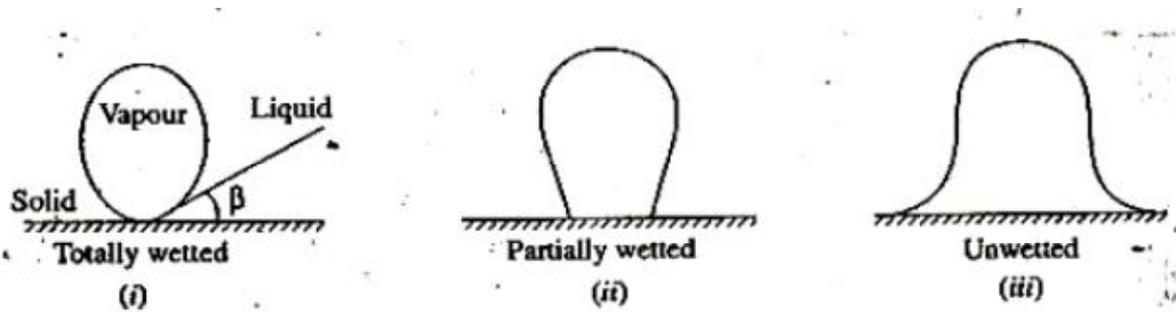
فيض الحرارة الحرج أو نقطة الحريق (النقطة A) في الشكل (2) هي نقطة فيض الحرارة القصوى على منحني الغليان التي يبدأ عندها الانتقال من الغليان التنبؤي إلى الغليان الشرائحي. تسمى هذه النقطة أيضاً بأزمة الغليان (Boiling crisis) بما أنّ عملية الغليان خلف هذه النقطة تكون غير مستقرة ما لم يتم الوصول إلى النقطة B. تكون درجة الحرارة عند النقطة B عالية جداً وهي عادة فوق درجة انصهار المصمت. (Above the melting of the solid)، بحيث إذا كان تسخين السطح المعدني ليس محدداً بالنقطة B، فإنه

من المحتمل تحطم المعدن أو حتى انصهاره (لهذا السبب فإن النقطة A غالباً ما يصطلح بتسميتها أزمة الغليان أو نقطة الإحتراق).

### v/ شكل الفقاعة ومقاسها (Bubble Shape and Size Consideration):

يتأثر معدّل إنتقال الحرارة في الغليان التنبوي كثيراً بطبيعة وحال سطح التسخين والتوتر السطحي (الشّد السطحي) (Surface tension) عند السطح البيني لمصمت - سائل (شكل، مفاًس أو زاوية ميل الفقاعات، على أيّ حال، لا تملك تأثيراً كبيراً على معدّل إنتقال الحرارة). يشير الشّد السطحي على القدرة الترتيبية (wetting capability) للسطح مع السائل (i.e. شّد سطحي منخفض، يعني سطح عالي الترتيب) وهذا يؤثر على زاوية التلامس بين الفقاعة والسطح المصمت. إذا كان السطح ملوثاً فستتأثر خصائصه الترتيبية التي تؤثر في الحال على مفاًس وشكل فقاعات البخار.

إذا كان الشّد السطحي للسائل منخفضاً فإنه يميل لترطيب السطح بحيث تندفع الفقاعة بواسطة السائل وترتفع. يقوم السائل بقص الفقاعات (shear off the bubbles) مما يتسبب في تحويل شكلها إلى كروي أو بيضاوي (globular or oval) كما موضّح في الشكل (1.3) (i) (سطح مرطب كلياً). في حالة سائل تملك شّد سطحي متوسط (intermediate surface tension) (سطح مرطب جزئياً) يمكن أن يوجد هنالك توازناً لحظياً (momentary balance) بين الفقاعات والسطح المصمت بحيث يكون من الضروري تكوين فقاعات أكبر قبل أن تستطيع قوة الطفو (buoyant force) من تحريرها من السطح؛ شكل الفقاعة يتم توضيحه في الشكل 1.3(ii).



شكل (1.3) أشكال نموذجية لفقاعات بخار

على السطح غير المرطب (unwetted surface) [الشكل 1.3(iii)]، تنتشر الفقاعات مكونة اسفيناً (wedge) بين الماء وسطح التسخين بالتالي تسمح لقوى هايدروستاتيكية (hydrostatic forces) بمقاومة فعل الطفو.

تكوّن الفقاعة كما موضّح في الشكل 1.3(i) يعطي معدّل إنتقال حرارة عالي مقارنة بأشكال الفقاعة الموضّح في الشكل 1.3(ii) و 1.3(iii) .

وجد أنّ إضافة بعض المواد لخفض الشد السطحي يكون لديها نفس تأثير توفير سطح مرطب وتعطي معدلات متزايدة لإنتقال الحرارة.

### vi/ نمو الفقاعة وإنهيارها (Bubble Growth and Collapse):

من التجارب يتم ملاحظة أنّ الفقاعات لا تكون على الدوام في حالة اتزان ديناميكي حراري (thermodynamic equilibrium) بسائل محيط. لا يكون البخار داخل الفقاعة بالضرورة عند نفس درجة الحرارة مثل السائل. إعتبر القوى التي تعمل على فقاعة بخار كروية كما موضّح في الشكل (1.4)؛ قوى الضغط على الفقاعة يجب أن تتوازن بالشد السطحي عند السطح البيني بخار – سائل. هكذا

$$\pi r^2 (p_v - p_l) = 2\pi r \cdot \sigma \quad (1.1)$$

$$\text{أو} \quad p_v - p_l = \frac{2\sigma}{r} \quad (1.2)$$

حيث،

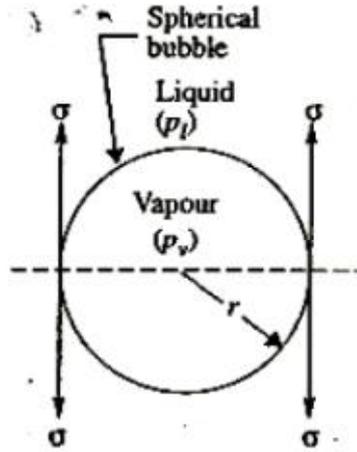
$$p_v = \text{ضغط البخار في داخل الفقاعة}$$

$$p_l = \text{ضغط السائل فوق سطح الفقاعة}$$

$$\sigma = \text{الشد السطحي لسطح بيني بخار – سائل}$$

يمكن اعتبار البخار كغاز مثالي حيث يمكن استخدام معادلة (Clay Peron) التي تعطي أدناه:

$$\frac{dp}{p} = \frac{h_{fg}}{RT^2} dT \quad (1.3)$$



شكل (1.4) توازن القوى على فقاعة بخار كروية

حيث،  $h_{fg}$  = الحرارة الكامنة للتبخير.

من قانون الغاز المثالي:

$$\frac{P}{RT} = \rho_v$$

(حيث  $R$  = ثابت الغاز او البخار ؛  $\rho_v$  = كثافة البخار المتكوّن)

بتعويض المعادلة عاليه في المعادلة (1.3) وبإعادة الترتيب، نحصل على:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{h_{fg} \cdot \rho_v}{T}$$

$$\text{أو} \quad \frac{p_v - p_l}{T_v - T_{sat}} = \frac{h_{fg} \cdot \rho_v}{T_{sat}} = \frac{p \cdot h_{fg}}{RT_{sat}} \quad (1.4)$$

حيث،

$T_v$  درجة حرارة البخار في داخل الفقاعة.

$T_{sat}$  درجة حرارة التشبع للبخار في داخل الفقاعة عند  $\rho_v$ .

من المعادلات (1.2) و (1.4) نحصل على:

$$T_v - T_{sat} = \frac{2\sigma}{r} \left[ \frac{R}{P} \cdot \frac{T_{sat}^2}{h_{fg}} \right] \quad (1.5)$$

تقترح المعادلة عالية الآتي: إذا كان  $(T_l - T_{sat}) > (T_v - T_{sat})$  فإن فقاعة بنصف قطر  $r$  ستتمو أو ستنفجر.  $T_l$  هي درجة الحرارة المحيطة بالفقاعة.

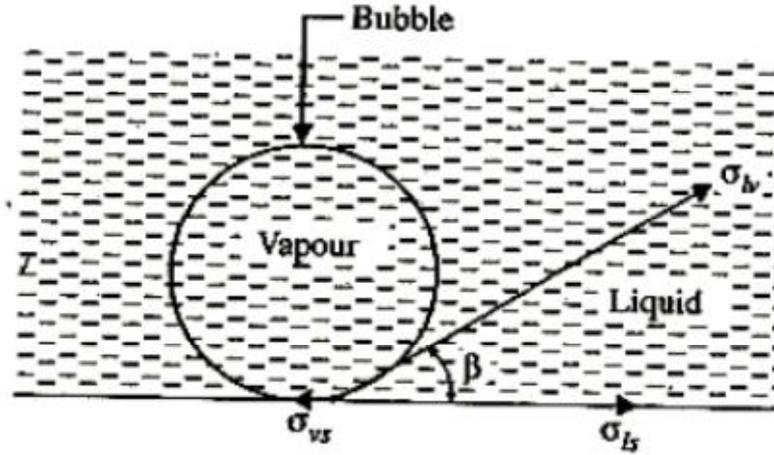
### vii / القطر الحرج للفقاعة (Critical Diameter of Bubble):

بالرجوع للشكل (1.5)، يعتمد القطر الأقصى للفقاعة المتكوّنة على سطح التسخين على المتغيرات التالية:

$$\sigma_{lv} = \text{الشـد بين السائل والبـخار.}$$

$$\sigma_{ls} = \text{الشـد بين السائل والسطح المصمت.}$$

$$\sigma_{vs} = \text{الشـد بين البخار والسطح المصمت.}$$



شكل (1.5) القطر الحرج لفقاعة

$\beta$  = الزاوية المتكوّنة بواسطة الفقاعة كما موضح في الشكل (1.5).

$\phi_c$  = القطر الأقصى أو الحرج للفقاعة.

$g(\rho_l - \rho_v)$  = قوة الطفو (buoyancy force).

هكذا،

$$d_c = \int \left[ \beta, \sigma_{lv}, g(\rho_l - \rho_v), \frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ls}} \right]$$

باستخدام تقنية التحليل البعدي، نتحصل على:

$$d_c = C \cdot \beta \left[ \frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ls}} \right] \sqrt{\frac{\sigma_{lv}}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1.6)$$

حيث  $C$  هو ثابت يتم عموماً حسابه بنتائج مختبرية.

قيمة  $C = 0.0148$  لفقاعة الماء.

### vii/ العوامل المؤثرة على الغليان التنبؤي (Factors Affecting Nucleate Boiling):

يتأثر الغليان التنبؤي بالعوامل التالية:

#### 1/ شكل المادة وحال سطح التسخين:

#### (Material Shape and Condition of the Heating Surface)

يعتمد معامل انتقال الحرارة بالغليان كثيراً على مادة سطح التسخين، تحت أحوال متطابقة للضغط وفرق درجة

الحرارة تكون مختلفاً لمعادن مختلفة (كمثال يكون للنحاس قيمة أعلى من الفولاذ، الزنك والكروم).

تتأثر أيضاً معدلات انتقال الحرارة بحالة سطح التسخين. يُعطى السطح الخشن نقل حرارة أفضل مما إذا كان

السطح أملساً أو مطلياً (تضعف النعومة ميل المعدن للترطيب).

يؤثر شكل سطح التسخين أيضاً على نقل الحرارة.

#### 2/ خواص السائل (Liquid Properties):

من التجارب يتم ملاحظة زيادة مقاس الفقاعة بالزوجة الديناميكية للسائل. بزيادة مقاس الفقاعة ينخفض تردد

تكوّن الفقاعة الذي ينتج عنه خفض في إنتقال الحرارة.

إضافياً، فالموصلية الحرارية العالية للسائل تحسّن معدّل إنتقال الحرارة.

#### 3/ الضغط (Pressure):

يؤثر الضغط على معدّل نمو الفقاعة وأيضاً يؤثر بدوره على فرق درجة الحرارة ( $t_s - t_{\infty}$ ) مسيئاً سريان

حرارة. لسائل في حالة غليان، فإنّ فيض الحرارة الأقصى المسموح به يزيد أولاً بالضغط حتى يتم الوصول

إلى ضغط حرج وينخفض من بعد.

#### 4/ التقليب الميكانيكي (Mechanical Agitation):

أوضحت التجارب أن معدّل إنتقال الحرارة يزيد بزيادة درجة التقليل.

### viii / الإرتباط المتبادل للغليان (Boiling Correlation):

في إنتقال الحرارة بالغليان، تكون القوة القائدة هي درجة الحرارة الزائدة، التي تعطى بالمعادلة:

$$\Delta t_e = t_s - t_{sat} \quad (1.7)$$

تكون المعادلة الحاكمة لعملية الغليان هي،

$$Q = hA \Delta t_e$$

حيث  $h$  هي معامل شريحة الغليان.

بما أنه ليس هنالك حلاً تحليلياً متاحاً لإنتقال الحرارة بالغليان نتيجة للسلوك الصعب للمائع، يتم استخدام معادلات

أو علاقات تجريبية للحسابات الهندسية، يتم إعطاء بعض منها في العناوين الجانبية التالية:

### 1/ الغليان الحوضي التنووي (Nucleate Pool Boiling):

i/ لغليان حوضي تنووي ينصح Rosenhow بالإرتباط التبادلي التالي:

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[ \frac{C_{PL} \cdot \Delta t_e}{C_{SL} \cdot h_{fg} \cdot pr_l^n} \right]^3 \quad (1.8)$$

حيث:

$$q_s = \text{فيض حرارة السطح } w/m^2$$

$$\mu_l = \text{لزوجة السائل } kg/ms$$

$$h_{fg} = \text{المحتوى الحراري للتبخّر } J/kg$$

$$\rho_l = \text{كثافة السائل المشبّع } kg/m^3$$

$$\rho_v = \text{كثافة البخار المشبّع } kg/m^3$$

$$\sigma = \text{الشد السطحي للسطح البيني سائل - بخار } N/m$$

$$C_{PL} = \text{الحرارة النوعية للسائل المشبّع } J/kgk$$

$$\Delta t_e = \text{درجة الحرارة الزائدة } = (t_s - t_{sat})$$

$C_{SL}$  = ثابت المائع السطحي (يتم تحديده من بيانات مخبرية)

$n$  = ثابت آخر يعتمد على السائل والسطح؛ للماء  $n = 1$ ، بينما لسوائل أخرى  $n = 1.7$ .

قيمة  $C_{SL}$  يتم إعطاؤها في الجدول (1.1) أدناه:

جدول (1.1) قيم  $C_{SL}$  لغليان حوضي

S. No.	Liquid – surface	$C_{SL}$
1	Water – copper	0.013
2	Water – brass	0.060
3	Water – platinum	0.013
4	Water – ground and polished stainless steel	0.008
5	Water – mechanically polished stainless steel	0.013
6	Benzene – chromium	0.010
7	Ethanol – chromium	0.0027
8	n-pentane – chromium	0.0150
8	n-pentane – copper	0.003
10	Isopropyl alcohol – copper	0.00225

ii/ اقترح Jacob الارتباط المتبادل التالي للغليان التتوي عند ضغط جوي على لوح مستو وبفيض حرارة منخفض.

$$Nu = 0.16(Gr.Pr)^{0.33} \quad (1.9)$$

iii/ للغليان التتوي على لوح مستوي رأسي، يكون الارتباط المتبادل لـ Jacob بالصورة:

$$Nu = 0.61(Gr.Pr)^{0.25} \quad (1.10)$$

2/ فيض الحرارة الحرج للغليان الحوضي (Critical Heat Flux for Nucleate Pool Boiling):

على منحنى الغليان يكون فيض الحرارة الحرج نقطة هامة. من المرغوب فيه دائماً تشغيل عملية الغليان قريباً من هذه النقطة. اقترح Zuber في العام 1958م التعبير التالي لمثل هذه الحالة:

$$q_{sc} = 0.18(\rho_v)^{1/2}h_{fg}[g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (1.11)$$

يكون التعبير المعطى مستقلاً عن لزوجة المائع، الموصلية، والحرارة النوعية.

### 3/ الغليان الحوضي الشريحي (Film Pool Boling):

في الغليان الشريحي المستقر، ينشأ إنتقال الحرارة من كلٍ من الحمل والإشعاع. إقترح Bromley في العام 1950 م الإرتباط المتبادل التالي للغليان الشريحي من السطح الخارجي لأنابيب أفقية:

$$(h)^{4/3} = (h_{conv.})^{4/3} + h_{rad.} (h)^{1/3} \quad (1.12)$$

المعادلة (1.12) متعبة ومرهقة في حلها بالتالي يمكن كتابتها في حدود خطأ مقداره  $\pm 5\%$  كالآتي:

$$h = h_{conv.} + \frac{3}{4} h_{rad} \quad (1.13)$$

يتم إعطاء المعامل الحلمي،  $h_{conv.}$  (في غياب الإشعاع) بـ

$$h_{conv.} = 0.62 \left[ \frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0.4 C_{pv} \Delta t_e)}{\mu_v D \Delta T_e} \right]^{1/4} \quad (1.14)$$

حيث D هو القطر الخارجي للأنبوب. يتم تقييم خواص البخار في المعادلة عاليه عند درجات حرارة المتوسط الحسابي للسطح والتشبع.

معامل انتقال الحرارة الإشعاعي،

$$h_{rad} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \epsilon (T_s^4 - T_{sat}^4)}{(T_s - T_{sat})} \quad (1.15)$$

حيث  $\epsilon$  هو إنبعائية المصمت.

### 1.5 أمثلة محلولة (Solved Examples):

مثال (1):

سلك بقطر 1.2mm وبطول 200mm يتم غمره أفقياً في ماء عند 7bar . يحمل السلك تياراً مقداره 135A بجهد مسطّ مقداره 2.18v . إذا تمَّ إعداد سطح السلك عند  $200^\circ\text{C}$  ، أحسب:

i/ فيض الحرارة، و

ii / معامل انتقال الحرارة بالغليان.

الحل: بمعلومية:

$$I = 135A, L = 200mm, d = 1.2mm = 0.0012m, t_s = 200^{\circ}C, v = 2.18v$$

i / فيض الحرارة،  $q$ :

يتم إعطاء دخل الطاقة الكهربائية للسلك بـ

$$Q = VI = 2.18 \times 135 = 294.3w$$

مساحة سطح السلك،

$$A = \pi dl = \pi \times 0.0012 \times 0.2 = 7.54 \times 10^{-4}m^2$$

$$\therefore q = \frac{Q}{A} = \frac{294.3}{7.54 \times 10^{-4}} = 0.39 \times 10^6 w/m^2 = 0.39Mw/m^2$$

ii / معامل انتقال الحرارة بالغليان،  $h$ :

$$q = h(t_s - t_{sat}) \text{ و } t_{sat} = 164.97^{\circ}C, \quad 7bar \text{ مقابلاً لـ}$$

$$\text{أو } h = \frac{q}{(t_s - t_{sat})} = \frac{0.39 \times 10^6}{(200 - 164.97)} = 11133.3w/m^2^{\circ}C$$

مثال (2):

سلك كهربائي بقطر 1.25mm وبطول 250mm يتم وضعه أفقياً ويُغمر في ماء عند الضغط الجوي. للسلك

جهد مسطّط مقداره 18v ويحمل تياراً مقداره 45A . احسب:

i / فيض الحرارة، و

ii / درجة الحرارة الزائدة.

يتم إعطاء الإرتباط المتبادل التالي لماء مغلي على سطح مغمور أفقياً:

$$h = 1.58 \left[ \frac{Q}{A} \right]^{0.75} = 5.62(\Delta t_e)^3, w/m^2^{\circ}C$$

الحل: بمعلومية:

$$I = 45A, L = 250mm = 0.25m, d = 1.25mm = 0.00125m, v = 18V$$

i/ فيض الحرارة،  $q$  :

دخل الطاقة الكهربائية إلى السلك،

$$Q = VI = 18 \times 45 = 810w$$

مساحة سطح السلك،

$$A_s = \pi dl = \pi \times 0.00125 \times 0.25 = 9.817 \times 10^{-4}m^2$$

$$\therefore q = \frac{Q}{A} = \frac{810}{9.817 \times 10^{-4}} = 0.825 \times 10^6 w/m^2 = 0.825Mw/m^2$$

ii/ درجة الحرارة الزائدة،  $\Delta t_e$  :

مستخدماً الإرتباط المتبادل،

$$1.58 \left[ \frac{Q}{A} \right]^{0.75} = 5.62 (\Delta t_e)^3$$

$$\text{أو } 1.58(0.825 \times 10^6)^{0.75} = 5.62(\Delta t_e)^3$$

مثال (3):

سلك من النيكل بقطر 1mm وبطول 400mm ، يحمل تياراً يتم غمره في حمام ماء يكون مفتوحاً إلى الضغط الجوي. أحسب الجهد عند نقطة الإحتراق إذا كان السلك عند هذه النقطة يحمل تياراً مقداره 190A.

الحل: بمعلومية:

$$I = 190A, L = 400mm = 0.4m, d = 1mm = 0.001m$$

الخواص الفيزيائية الحرارية للماء عند  $100^{\circ}C$  هي:

$$\rho_L = (\rho_f) = 958.4kg/m^3, \rho_v = 0.5955kg/m^3, h_{fg} = 2257kj/kg,$$

$$\sigma = 58.9 \times 10^{-3}N/m$$

الجهد عند نقطة الإحتراق،  $V_b$  :

عند الإحتراق، i.e. نقاط فيض الحرارة الحرج، يكون الإرتباط المتبادل كالاتي:

$$q_{sc} = 018(\rho_v)^{1/2} h_{fg} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4}$$

$$= 0.18(0.5955)^{1/2} \times 2257 \times 10^3 [9.81 \times 58.9 \times 10^{-3} (958.4 - 0.5955)]^{1/4}$$

$$= 1.52 \times 10^6 \text{ w/m}^2 = 1.52 \text{ Mw/m}^2$$

دخل الطاقة الكهربائي للسلك،

$$Q = V_b \times I$$

$$\text{أو } q = \frac{Q}{A} = \frac{V_b \times I}{A} = q_{sc}$$

$$\text{أو } V_b = \frac{A \times q_{sc}}{I} = \frac{\pi dl \times q_{sc}}{I} = \frac{\pi \times 0.001 \times 0.4 \times (1.52 \times 10^6)}{190}$$

$$\text{أو } V_b = 10.05V$$

مثال (4):

يتم غلي ماء بمعدّل  $25 \text{ kg/h}$  في طوة من النحاس الملمّع (polished copper pan)، بقطر  $280 \text{ mm}$ ، عند ضغط جوي. مفترضاً حالات غليان تنوؤي، أحسب درجة الحرارة للسطح الأسفل للطوة.

الحل: بمعلومية:

$$D = 280 \text{ mm} = 0.28 \text{ m}; m = 25 \text{ kg/h}$$

خواص الماء عند الضغط الجوي هي:

$$C_{PL} = 4220 \text{ j/kgK}; \rho_v = 0.5955 \text{ kg/m}^3; \rho_L = 958.4 \text{ kg/m}^3; t_{sat} = 100^\circ \text{ c};$$

$$n = 1 \text{ (للماء)}$$

$$\mu_L = 279 \times 10^{-6}; \sigma = 58.9 \times 10^{-3} \text{ N/m}; h_{fg} = 2257 \text{ kj/kg}; pr_i = 1.75$$

درجة حرارة السطح السفلي،  $t_s$  :

$$\Delta t_e = t_s - t_{sat}$$

درجة الحرارة الزائدة

لغليان تنوؤي مفترض، يتم إعطاء الارتباط المتبادل التالي:

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[ \frac{C_{PL} \cdot \Delta t_e}{C_{SL} \cdot h_{fg} \cdot pr_l^n} \right]$$

لطوبة النحاس الملمع،  $C_{SL} = 0.013$

$$\text{أو } \Delta t_e = \left[ \frac{q_s}{\mu_l \cdot h_{fg}} \left\{ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right\}^{0.5} \right]^{0.335} \left[ \frac{C_{SL} \cdot h_{fg} \cdot pr_l}{C_{PL}} \right]$$

$$q_s = \text{فيض الحرارة السطحي} = \frac{Q}{A} = \frac{mh_{fg}}{A}$$

حيث  $m =$  معدّل تبخّر الماء.

$$\begin{aligned} \therefore \Delta t_e &= \left[ \frac{254544}{279 \times 10^{-6} \times 2257 \times 10^3} \left\{ \frac{58.9 \times 10^{-3}}{9.81(958.4 - 0.5955)} \right\}^{0.5} \right]^{0.335} \\ &\quad \times \left[ \frac{0.013 \times 2257 \times 10^3 \times 1.75}{4220} \right] \\ &= [404.23 \times 0.0025]^{0.333} \times 12.16 = 12.2 \end{aligned}$$

$$i.e. \Delta t_e = t_s - t_{sat} = 12.2$$

$$\text{أو } t_s = 12.2 + t_{sat} = 12.2 + 100 = 112.2^\circ C$$

مثال (5):

ماء عند ضغط جوي يتم غليه في طوة من النحاس الملمّع (polished copper pan). يكون قطر الطوة

$350mm$  ويتم الحفاظ عليها عند  $115^\circ C$ . أحسب التالي:

i / قدرة الموقد (burner).

ii / معدّل التبخر (rate of evaporation).

iii / فيض الحرارة الحرج لهذه الحالات.

الحل: بمعلومية:

$$t_{sat} = 100^{\circ}C, \quad t_s = 115^{\circ}C, \quad D = 350mm = 0.35m$$

الخواص الفيزيائية الحرارية للماء (من الجدول) عند  $100^{\circ}C$  هي:

$$\rho_l = \rho_f = 958.4kg/m^3; \rho_v = 0.5955kg/m^3; C_{PL} = C_{Pf} = 4220j/kgk$$

$$\mu_L = \mu_f = 279 \times 10^{-6}NS/m^2; pr_l = pr_f = 1.75; h_{fg} = 2257kj/kg$$

$$n = 1; \sigma = 58.9 \times 10^{-3}N/m$$

$$\Delta t_e = t_s - t_{sat} = 115 - 100 = 15^{\circ}C \quad \text{درجة الحرارة الزائدة}$$

i / قدرة الموقد لإعداد الغليان: (power of the burner to maintain boiling)

كما في منحنى الغليان، لـ  $\Delta t_e = 15^{\circ}C$  ، سيحدث غليان حوضي تنوؤي ولهذا يتم استخدام الإرتباط المتبادل

التالي:

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[ \frac{C_{PL} \cdot \Delta t_e}{C_{SL} \cdot h_{fg} \cdot pr_l^n} \right]^3$$

لطوة النحاس الملمعة،  $C_{SL} = 0.013$

بتعويض القيم في المعادلة عاليه، نحصل على

$$q_s = 279 \times 10^{-6} \times (2257 \times 10^3) \left[ \frac{9.81(958.4 - 0.5955)}{58.9 \times 10^{-3}} \right]^{0.5}$$

$$\times \left[ \frac{4220 \times 15}{0.013 \times 2257 \times 10^3 \times 1.75} \right]^3$$

$$= 629.7 \times 399.4 \times 1.873$$

$$= 471.06 \times 10^3 w/m^2 = 471.06kw/m^2$$

معدّل إنتقال الحرارة بالغليان (قدرة الموقد) يتم إعطاؤه بـ

$$Q = 471.06 \times \frac{\pi}{4} \times (0.35)^2 = 45.32kw$$

ii / معدّل التبخر،  $m_w$  :

تحت أحوال الحالة المستقرة، فإنّ جميع الحرارة المضافة للطوة ستتسبّب في تبخر الماء. عليه

$$Q = m_w \times h_{fg}$$

$$m_w = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{45.32 \times 10^3}{2257 \times 10^3} = 0.02kg/s = 72kg/h$$

iii / فيض الحرارة الحرج،  $q_{sc}$  :

$$\begin{aligned} q_{sc} &= 0.18(\rho_v)^{1/2} h_{fg} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \\ &= 0.18(0.5955)^{1/2} \times 2257 \times 10^3 [9.81 \times 58.9 \times 10^{-3} (958.4 - 0.5955)]^{1/4} \\ &= 1.52 \times 10^6 w/m^2 = 152Mw/m^2 \end{aligned}$$

مثال (6):

عنصر تسخين من معدن مجلد (مكسو) (metal clad) بقطر  $10mm$  وبإنبعاثية  $0.92$  يتم غمره أفقياً في حمّام ماء. إذا كانت درجة حرارة سطح المعدن  $260^\circ C$  تحت أحوال (شروط) الغليان المستقر، أحسب فقد القدرة لكل وحدة طول للسخان. إفترض أنّ الماء يكون معرّضاً للضغط الجوي ويكون عند درجة حرارة منتظمة.

الحل: بمعلومية:

$$t_s = 260^\circ C, \quad \epsilon = 0.92, \quad D = 10mm = 0.01m$$

الخواص الفيزيائية الحرارية للماء عند  $100^\circ C$  من الجدول هي:

$$\rho_l = \rho_f = 958.4kg/m^3; h_{fg} = 2257kj/kg$$

الخواص الفيزيائية الحرارية للبخر عند  $260^\circ C$  من الجدول هي:

$$\rho_v = 4.807kg/m^3; C_{pv} = 2.56kj/kgk; k = 0.0331w/mK$$

$$\mu_v = \mu_g = 14.85 \times 10^{-6} NS/m^2$$

القدرة المبددة لكل وحدة طول للسخان: (power dissipation per unit length for the heater)

$$\Delta t_e = t_s - t_{sat} = 260 - 100 = 160^\circ C$$

كما في منحنى الغليان، عند  $\Delta t_e = 160^\circ C$  ، يكون هنالك شروط غليان حوضي شرانحي في هذه الحالة،

يكون إنتقال الحرارة ناتجاً من كل من الحمل والإشعاع.

معامل إنتقال الحرارة،  $h$  (التقريبي) يتم حسابه من المعادلة:

$$h = h_{conv.} + \frac{3}{4} h_{rad}$$

معامل إنتقال الحرارة الحلمي،

$$h_{conv.} = 0.62 \left[ \frac{k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0.4 C_{pv} \Delta t_e)}{\mu_v D \Delta t_e} \right]^{1/4}$$

$$= 0.62 \left[ \frac{(0.0331)^3 \times 4.807(958.4 - 4.807) \times 9.81 \times (2257 \times 10^3 + 0.4 \times 2.56 \times 10^3 \times 160)}{14.85 \times 10^{-6} \times 0.01 \times 160} \right]^{1/4}$$

$$\text{أو } h_{conv.} = 395.84 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

معامل إنتقال الحرارة بالإشعاع،

$$h_{rad} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \epsilon (T_s^4 - T_{sat}^4)}{(T_s - T_{sat})}$$

$$= \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 0.92 [(260 + 273)^4 - (100 + 273)^4]}{[(260 + 273) - (100 + 273)]}$$

$$\text{أو } h_{rad} = 20 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$\therefore h = 395.84 + 20 = 415.84 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

بالتالي تبديد الحرارة لكل وحدة طول للسخان،

$$= h \times (\pi D \times L) \times (260 - 100)$$

$$= 415.884 \times \pi \times 0.01 \times 160 = 2090 \text{ w/m} = 2.09 \text{ kw/m}$$

## الفصل الثاني

### إنتقال الحرارة بالتكثيف

## Condensation Heat Transfer

### 2.1 مناحي عامة (General Aspects):

عملية التكثيف هي معكوس عملية الغليان. يحدث التكثيف متى ما تلامس بخار مشبّع مع سطح تكون درجة حرارته أقل من درجة حرارة التشبّع المقابلة لضغط البخار. كلما يتكثف البخار، تتحرر الحرارة الكامنة ويكون هنالك إنتقال للحرارة إلى السطح. يمكن أن يحصل السائل المتكثف على تبريد تحت درجة التكثف بالتلامس مع السطح البارد وهذا يمكن أن يتسبب أنياً في بخار أكثر يتكثف على السطح المعرض أو على البخار السائل المتكثف المتكون مسبقاً.

### 2.2 أشكال التكثف (Forms of Condensation):

إعتماداً على حالة السطح البارد، يمكن أن يحدث التكثيف بطريقتين محتملتين: التكثف الشريحي والتكثف بالتنقيط.

#### 1/ التكثف الشريحي (Film Condensation):

إذا كانت المادة المتكثفة تميل لترطيب السطح وبالتالي تكون شريحة سائلة، بالتالي فإنّ عملية التكثيف تُعرف بالتكثيف الشريحي. في هذا الإجراء، يتم نقل الحرارة من البخار إلى الوسيط البارد خلال شريحة من المادة المتكثفة متكوّنة على السطح. ينساب السائل أسفل سطح التبريد تحت فعل النّفاث وتتمو الطبقة بإتصال في سمكها بسبب الأبخرة المتكثفة حديثاً. تعطي الشريحة المتصلة مقاومة حرارية وتفحص إنتقال حرارة متقدم (إضافي) بين البخار والسطح.

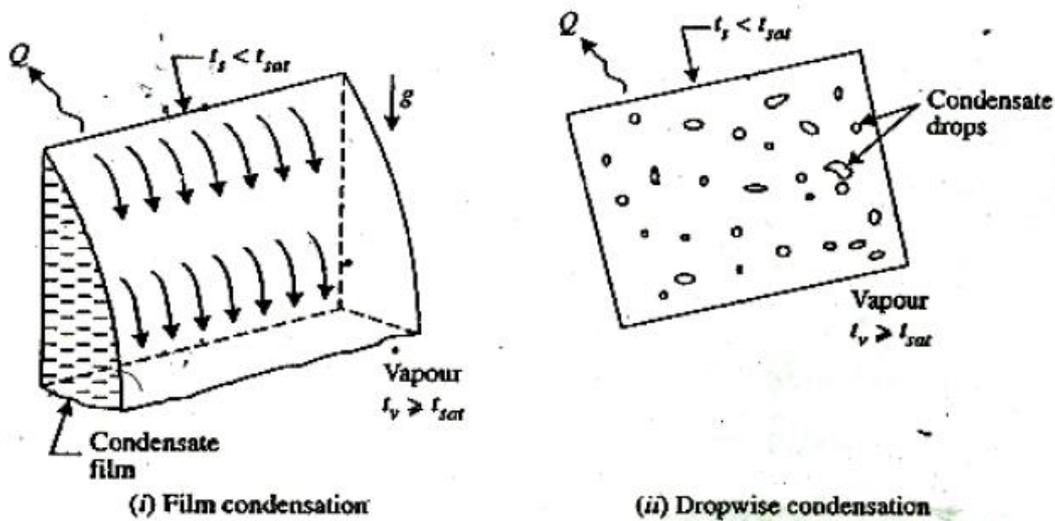
إضافياً، يحدث إنتقال الحرارة من البخار إلى السطح البارد خلال الشريحة المتكوّنة على السطح. يتم نقل الحرارة من البخار إلى المادة المتكثفة المتكوّنة على السطح بالحمل ويتم نقلها إضافياً من الشريحة المتكثفة إلى سطح التبريد بالتوصيل. هذا الأسلوب المتحد لإنتقال الحرارة بالتوصيل والحمل يخفّض معدلات إنتقال الحرارة بصورة كبيرة (مقارنة مع التكثيف بالنقط). هذا هو السبب في أنّ معدلات إنتقال الحرارة بالتكثيف الشريحي تكون

أقل من تلك للتكثف التناطقي.

## 2/ التكثف بالنقط (Drop wise Condensation):

في التكثف بالنقط يتكثف البخار في شكل نقاط صغيرة من السائل بمقاسات متنوعة والتي تهبط اسفل السطح في صورة عشوائية. تتكون النقاط في الشقوق والحفر الموجودة على السطح، تنمو في حجمها، تبعد أو تنفصل عن السطح، تصطدم بنقاط أخرى وفي الحال تسيل خارج السطح بدون تكوين شريحة تحت تأثير التناقل. الشكل 2.1(ii) يوضح التكثف بالنقاط على لوحة رأسية.

في هذا النوع من التكثيف فإن جزءاً كبيراً من مساحة السطح المصمت يتم تعريضها مباشرة لبخار بدون شريحة عازلة للسائل المتكثف، نتيجة لذلك يتم إنجاز معدل إنتقال حرارة أعلى (إلى مقدار  $750\text{kw/m}^2$ ). يُلاحظ حدوث التكثف بالنقط إما على أسطح ذات لمعان عالٍ أو على أسطح ملوثة بالشوائب مثل الأحماض الدهنية والمركبات العضوية. هذا النوع من التكثيف يُعطي معامل إنتقال حرارة عموماً من 5 إلى 10 أضعاف أكبر من ذلك بالشريحة. بالرغم من أن التكثيف بالتناقل يتم تفضيله على التكثيف بالشريحة إلا أنه من الصعوبة بمكان إنجازها أو إعداده. هذا لأن معظم الأسطح تصبح رطبة بعد تعريضها لأبخرة متكثفة على فترة من الزمن. يمكن الحصول على التكثيف بالتناقل تحت أحوال مسيطر عليها بمساعدة إضافات محسنة للمادة المتكثفة ولأغلفة سطح مختلفة (surface coatings).

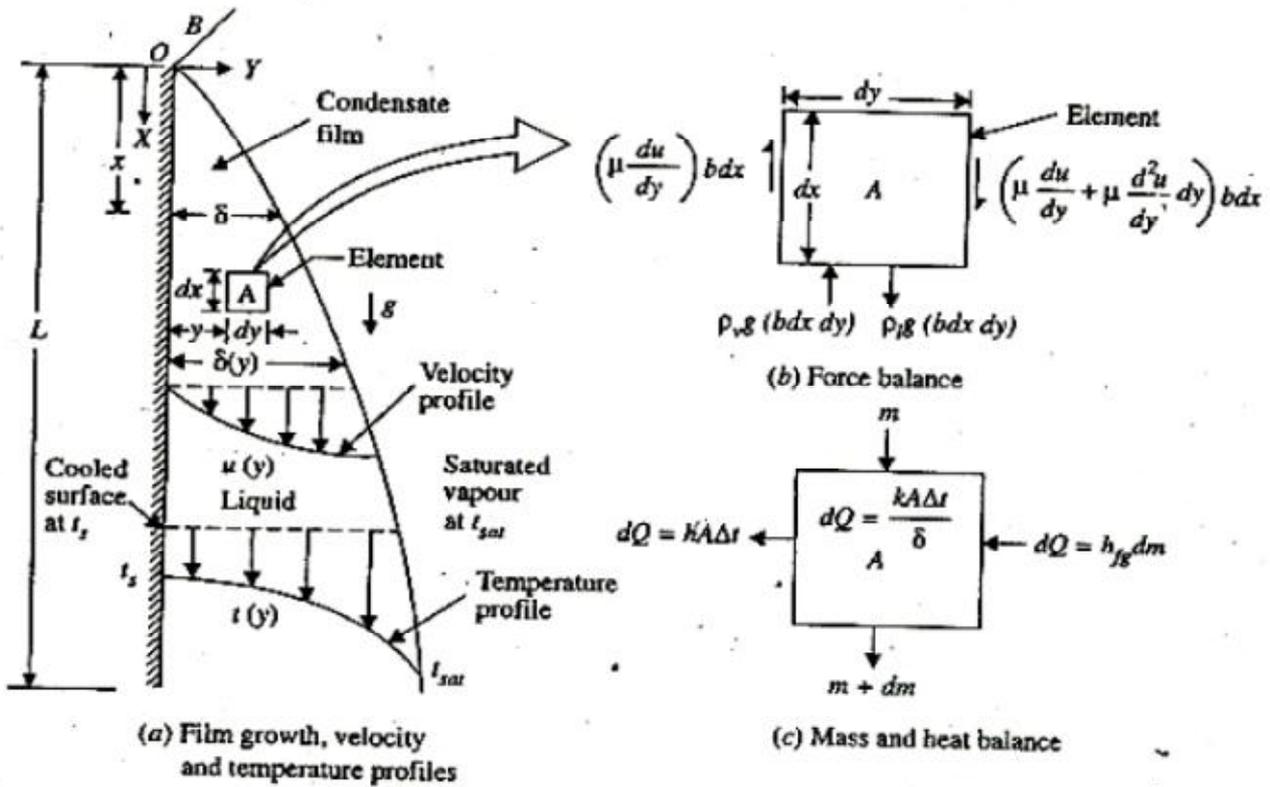


شكل (2.1) التكثيف الشريحي والتكثيف بالتنقيط على سطح رأسي

2.3 تكثيف الشريحة الطباقية على لوحة رأسية:

(Laminar Film Condensation on a Vertical Plate)

يمكن عمل تحليل للتكثيف الشريحي على لوحة رأسية على خطوط تم إعدادها بواسطة Nusselt (1916). ما لم تكون سرعة البخار عالية جداً أو شريحة السائل سميكة جداً، فسوف تكون حركة المادة المتكثفة طباقية (laminar). سيكون سمك شريحة المادة المتكثفة دالة في معدّل تكثف البخار والمعدّل الذي تُزال به المادة المتكثفة من السطح. سمك الشريحة على سطح رأسي سيزيد تدريجياً من أعلى إلى أسفل كما موضّح في الشكل (2.2).



شكل (2.2) تكثف شريحي على لوحة مستوية رأسية

تحليل (Nusselt) لتكثف الشريحة أوجد الإفتراضات المبسطة التالية:

1. شريحة السائل المتكوّنة تنساب تحت فعل التناقل.
2. يكون سريان المادة المتكثفة طباقياً وخواص المائع ثابتة.

3. تكون شريحة السائل في تلامس حراري جيّد مع سطح التبريد وبالتالي يتم أخذ درجة الحرارة داخل الشريحة مكافئة لدرجة حرارة السطح  $t_s$ . إضافياً، تكون درجة الحرارة عند السطح البيني لسائل – بخار مكافئة لدرجة حرارة التشبع  $t_{sat}$  عند الضغط السائد.

4. يتم إفتراض أنّ القص اللزج وقوى التناقل تعمل على المائع، عليه يتم تجاهل القوة اللزجة المتعامدة وقوى القصور الذاتي.

5. يكون إجهاد القص عند السطح البيني لسائل – بخار صغير بحيث يتم تجاهله. هذا يعني أنه لا يوجد ميل سرعة (velocity gradient) عند السطح البيني لسائل – بخار،

$$\left[ i. e., \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=\delta} = 0 \right]$$

6. يكون إنتقال الحرارة عبر الطبقة المتكثفة بتوصيل خالص ويكون توزيع درجة الحرارة خطياً.

7. يكون البخار المتكثف نظيف كلياً وحر من الغازات، الهواء والشوائب اللامتكثفة.

8. يتم إعتبار الإشعاع بين البخار وشريحة السائل؛ المرگبة الأفقية للسرعة عند أي نقطة في شريحة السائل؛ وتقوَس الشريحة صغيرة جداً بحيث يتم تجاهلها.

إعتبر عملية تكثيف شريحي تحدث على سطح لوحة رأسية مستوية كما موضّح في الشكل (2.2). يتم أيضاً رسم نظام الإحداثيات على الشكل. تكون نقطة الأصل 'o' عند الطرف العلوي للوحة، يقع المحور  $x$  بطول السطح الرأسي بالإتجاه الموجب لـ  $x$  مقاساً لأسفل ويكون المحور  $y$  متعامداً معه. إرتفاع اللوح الرأسي  $l$ ، العرض  $b$ ، و  $\delta$  ترمز لسماك الشريحة على بعد  $x$  من الأصل. سمك شريحة السائل الذي يكون صفراً عند الطرف العلوي للوحة يزيد تدريجياً عندما يحدث تكثيف إضافي عند السطح البيني لسائل – بخار ويصل لقيمته القصوى عند الطرف السفلي للوحة.

أجعل،  $\rho_l =$  كثافة شريحة السائل.

$\rho_v =$  كثافة البخار.

$\rho_f g =$  الحرارة الكامنة للتكثف.

$$k = \text{موصلية شريحة السائل.}$$

$$\mu = \text{اللزوجة المطلقة لشريحة السائل.}$$

$$t_s = \text{درجة حرارة السطح.}$$

$$t_{sat} = \text{درجة حرارة تشبع البخار عند الضغط السائد.}$$

### (a) توزيع السرعة (Velocity Distribution):

لإيجاد تعبير لتوزيع السرعة  $u$  كدالة للبعد  $y$  من سطح الجدار، دعنا نعتبر اتزاناً بين قوى التناقل واللزوجة على حجم ابتدائي (أولي)  $(bdx dy)$  لشريحة السائل،

$$\rho_l g(bdx dy) - \rho_v g(bdx dy) = \text{قوة التناقل على العنصر} \quad (i)$$

قوة القص اللزج على العنصر،

$$= \mu \frac{du}{dy} (bdx) - \left[ \mu \frac{du}{dy} + \mu \frac{d^2u}{dy^2} dy \right] (bdx) \quad (ii)$$

بمساواة المعادلتين (i) و (ii) نحصل على،

$$\rho_l g(bdx dy) - \rho_v g(bdx dy) = \mu \frac{du}{dy} (bdx) - \left[ \mu \frac{du}{dy} + \mu \frac{d^2u}{dy^2} dy \right] (bdx)$$

$$\frac{d^2u}{dy^2} = \frac{-(\rho_l - \rho_v)g}{\mu} \quad (2.1)$$

بالتكامل نحصل على،

$$\frac{du}{dy} = \frac{-(\rho_l - \rho_v)g}{\mu} y + c_1$$

بالتكامل مرة أخرى، نحصل على،

$$u = \frac{-(\rho_l - \rho_v)(y^2/2)g}{\mu} c_1 y + c_2$$

تكون الشروط الحدودية كما يلي:

$$\text{عند } u = 0, y = 0$$

$$\frac{du}{dy} = 0, \quad y = \delta \quad \text{عند}$$

باستخدام هذه الشروط الحدودية، نحصل على القيم التالية لـ  $c_1$  و  $c_2$  ،

$$c_1 = \frac{(\rho_l - \rho_v)g\delta}{\mu} \quad \text{و} \quad c_2 = 0$$

بتعويض قيم  $c_1$  و  $c_2$  نحصل على الشكل الجانبي للسرعة (velocity profile).

$$u = \frac{(\rho_l - \rho_v)g}{\mu} \left[ \delta y - \frac{y^2}{2} \right] \quad (2.2)$$

$$\text{أو} \quad u = \frac{(\rho_l - \rho_v)g \cdot \delta^2}{\mu} \left[ \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

المعادلة (2.3) هي الشكل الجانبي للسرعة المطلوبة.

يتم إعطاء متوسط سرعة السريان  $u_{mean}$  للشريحة السائل على بعد  $y$  بالمعادلة،

$$u_m = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} u \, dy$$

$$= \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \frac{(\rho_l - \rho_v)g \cdot \delta^2}{\mu} \left[ \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \right] dy$$

$$\text{أو} \quad u_m = \frac{(\rho_l - \rho_v)g \cdot \delta^2}{3\mu} \quad (2.4)$$

(b) معدّل سريان الكتلة (Mass Flow Rate):

معدّل سريان الكتلة للمادة المتكثفة خلال أيّ وضع  $x$  للشريحة يتم إعطاؤه بـ:

الكثافة  $\times$  مساحة السريان  $\times$  متوسط سرعة السريان  $(u_m)$  = معدل سريان الكتلة  $(m)$

$$\text{أو} \quad m = \frac{(\rho_l - \rho_v)g \cdot \delta^2}{3\mu} \times b \cdot \delta \times \rho_l = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v)g \cdot b \cdot \delta^2}{3\mu} \quad (2.5)$$

عليه، يكون سريان الكتلة دالة في  $x$  ؛ هذا بسبب أنّ سمك الشريحة  $\delta$  يكون أساسياً معتمداً على  $x$  .

كلما يتواكب السريان من  $x$  إلى  $(x + \delta x)$  تنمو الشريحة من  $\delta$  إلى  $(\delta + d\delta)$  بسبب المادة المتكثفة الإضافية. كتلة المادة المتكثفة المضافة بين  $x$  و  $(x + \delta x)$  يمكن حسابها بتفاضل المعادلة (2.5) بالنسبة لـ  $x$  (أو  $\delta$ ).

$$\begin{aligned} dm &= \frac{d}{dx} \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)g \cdot b \cdot \delta^3}{3\mu} \right] dx \\ &= \frac{d}{dx} \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)g \cdot b \cdot \delta^3}{3\mu} \right] \frac{d\delta}{dx} dx \\ dm &= \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)g \cdot b \cdot \delta^2}{\mu} \right] dx \quad (2.6) \end{aligned}$$

(2) فيض الحرارة (Heat Flux):

معدّل سريان الحرارة في الشريحة ( $dQ$ ) يكافئ معدّل تحرير الطاقة نتيجة للتكثيف عند السطح. هكذا،

$$dQ = h_{fg} \cdot dm = h_{fg} \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)g \cdot b \cdot \delta^2}{\mu} \right] ds \quad (2.7)$$

طبقاً لإفتراضنا فإنّ إنتقال الحرارة عبر طبقة المادة المتكثفة يكون بالتوصيل الخالص، بالتالي،

$$dQ = \frac{k(bdx)}{\delta} (t_{sat} - t_s) \quad (2.8)$$

بتوحيد المعادلتين (2.7) و (2.8)، نحصل على،

$$\frac{h_{fg} \rho_l(\rho_l - \rho_v)g \cdot b \cdot \delta^2}{\mu} \cdot ds = \frac{k(bdx)}{\delta} (t_{sat} - t_s)$$

$$\text{أو} \quad \delta^3 \cdot ds = \frac{k \mu}{\rho_l(\rho_l - \rho_v)gh_{fg}} (t_{sat} - t_s) dx$$

بتكامل المعادلة عاليه نحصل على،

$$\frac{\delta^4}{4} = \frac{k \mu}{\rho_l(\rho_l - \rho_v)gh_{fg}} (t_{sat} - t_s)x + c_1$$

بتعويض الشرط الحدودي:  $\delta = 0$  عند  $x = 0$  ينتج  $c_1 = 0$  بالتالي:

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

توضِّح المعادلة (2.9) أن سمك شريحة الحرارة تزيد بزيادة الجذر الرابع للبعد أسفل السطح، تكون الزيادة إلى حدٍ ما سريعة عند الطرف العلوي للسطح الرأسي وثبطيء من بعد.

(d) معامل إنتقال الحرارة الشريحي: (Film Heat Transfer Coefficient)

طبقاً لفرضية (Nusselt) يكون سريان الحرارة من البخار إلى السطح بالتوصيل من خلال شريحة السائل. عليه،

$$dQ = \frac{k(bdx)}{\delta} (t_{sat} - t_s) \quad (i)$$

أيضاً يمكن التعبير عن سريان الحرارة بـ

$$dQ = h_x (b dx) (t_{sat} - t_s) \quad (ii)$$

حيث  $h_x$  هو معامل إنتقال الحرارة الموضعي.

من المعادلات (i) و (ii) نحصل على،

$$\frac{k(bdx)}{\delta} (t_{sat} - t_s) = h_x (b dx) (t_{sat} - t_s)$$

$$\text{أو} \quad h_x = \frac{k}{s} \quad (2.10)$$

توضِّح المعادل (2.10) أنه عند نقطة محدّدة على سطح انتقال الحرارة، يكون معامل الشريحة  $h_x$  متناسباً طردياً مع الموصلية الحرارية  $k$  ومنتاسباً عكسياً مع سمك الشريحة  $\delta$  عند تلك النقطة.

بتعويض قيمة  $s$  من المعادلة (2.9)، نحصل على،

$$h_x = \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4\mu x (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.11)$$

معامل إنتقال الحرارة الموضعي عند الطرف السفلي للوحة،  $x = l$  i. e.

$$h_l = \left[ \frac{k^3 \rho^2 g h_{fg}}{\mu \mu h_l (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.12)$$

يُلاحظ أنّ معدّل التكثيف لإنتقال الحرارة يكون أكبر عند الطرف العلوي للوحة من ذلك عند الطرف السفلي.

يمكن الحصول على القيمة المتوسطة بتكامل القيمة الموضعية للمعامل (المعادلة (2.11)) كما يلي:

$$\begin{aligned} \bar{h} &= \frac{1}{l} \int_0^l h_x dx \\ &= \frac{1}{l} \int_0^l \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4\mu x (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} dx = \frac{1}{l} \int_0^l \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4\mu (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \int_0^l x^{-\frac{1}{4}} dx \\ &= \frac{1}{l} \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4\mu (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \left[ \frac{x^{(-\frac{1}{4}+1)}}{-\frac{1}{4}+1} \right]_0^l \end{aligned}$$

$$\text{أو} \quad \bar{h} = \frac{4}{3} \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4\mu l (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.13)$$

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h_l = \frac{4}{3} \times \frac{k}{\delta_l}$$

حيث  $h_l$  هو معامل إنتقال الحرارة الموضعي عند الحافة السفلى للوح.

هذا يوضّح أنّ معامل إنتقال الحرارة المتوسط يكون مقداره  $\frac{4}{3}$  مرة معامل إنتقال الحرارة الموضعي عند لحافة

الخلفية للوحة (trailing edge).

يتم عادة كتابة المعادلة (2.13) في الصورة،

$$\bar{h} = 0.943 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{\mu l (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.14)$$

حل (Nusselt) الذي تمَّ إشتقاقه عاليه هو حل تقريبي بما أنَّ النتائج المختبرية أوضحت أنها تنتج نتائج تكون تقريباً حوالي 20% أقلَّ من القيم المقاسة. إقترح M<sub>c</sub> Adams استخدام قيمة مقدارها 1.13 في محل المعامل 0.943 بالتالي،

$$\bar{h} = 1.13 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{\mu l (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.15)$$

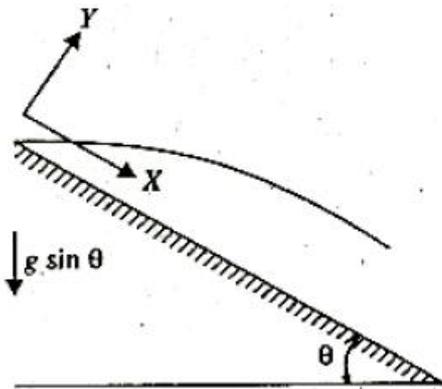
بينما يتم استخدام المعادلة عاليه يمكن ملاحظة أنَّ جميع خواص السائل يتم تقييمها عند درجة الحرارة  $t_{sat}$  ويجب تقييم  $h_{fg}$  عند  $t_{sat}$ . إنتقال الحرارة الكلي إلى السطح،

$$Q = h A_s (t_{sat} - t_s) \quad (2.16)$$

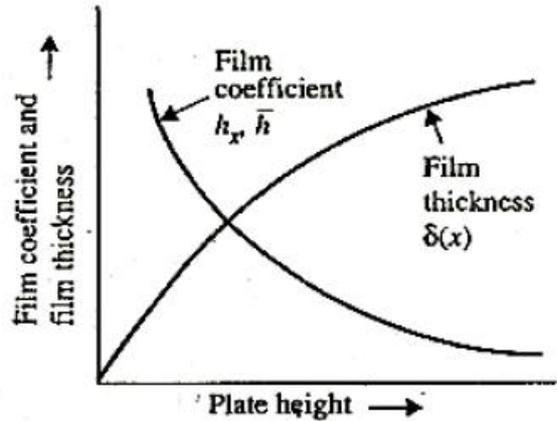
معدّل التكثيف الكلي،

$$m = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{h A_s (t_{sat} - t_s)}{h_{fg}} \quad (2.17)$$

الشكل (2.3) أدناه يوضّح تفاوت سمك الشريحة ومعامل الشريحة مع ارتفاع اللوحة.



شكل (2.4) التكتّف على سطح مائل



شكل (2.3) تفاوت سمك الشريحة ومعامل الشريحة مع ارتفاع اللوحة

يزيد سمك الشريحة بزيادة ارتفاع اللوحة. ينقص معدّل إنتقال الحرارة بزيادة ارتفاع اللوحة بما أنَّ المقاومة الحرارية تزيد بزيادة سمك الشريحة.

(e) سطح لوحة مستو مائل (Inclined Flat Plate Surface):

لأسطح مستوية مائلة، يتم إحلال التسارع التثاقلي  $g$  في المعادلة (2.15) بـ  $g \sin \theta$  حيث  $\theta$  هي الزاوية بين السطح والأفقي (أرجع للشكل (2.4)). يتم تعديل المعادلة (2.15) كالآتي:

$$h_{inclined} = 1.13 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 (g \sin \theta) h_{fg}}{\mu l (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.18)$$

$$\text{أو} \quad h_{inclined} = h_{vertical} \times (\sin \theta)^{\frac{1}{4}} \quad (2.19)$$

يتم تطبيق المعادلة (2.19) فقط لحالات تكون فيها  $\theta$  صغيرة، وهي غير قابلة للتطبيق بالمرّة للوحة أفقية.

2.4 تكثيف الشريحة المضطرب (Turbulent Film Condensation):

عندما تكون اللوحة التي يحدث عليها التكثيف طويلة أو عندما تكون شريحة السائل قوية بكفاية، يمكن أن يصبح سريان المادة المتكثفة مضطرباً. ينتج عن الإضطراب معدلات إنتقال حرارة أعلى بما أنّ الحرارة الآن لا تنتقل فقط بالتكثيف إنما أيضاً بالإنتشار الدوامي (eddy diffusion). يمكن التعبير عن قانون الإنتقال (transition criterion) بدلالات رقم رينولدز الذي يتم تعريفه بـ :

$$Re = \frac{\rho_l u_m D_h}{\mu_l}$$

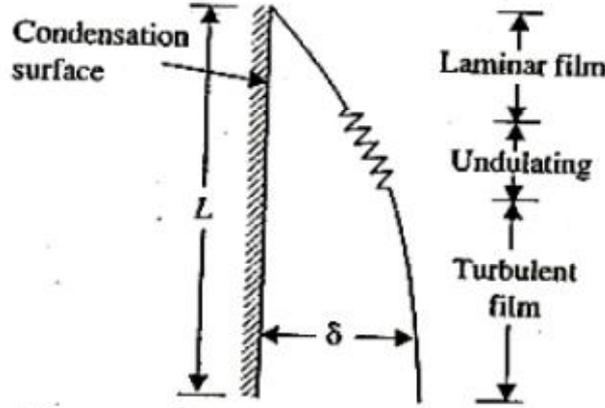
حيث،  $D_h$  = القطر الهيدروليكي

$$D_h = 4 \times \frac{\text{مساحة المقطع العرضي لسريان السائل}}{\text{المحيط المرطب}} = \frac{4A}{p}$$

متوسط سرعة السريان  $u_m$

$$Re = \frac{\rho_l \times u_m \times 4A_c}{p \times \mu_l} = \frac{4m}{p \mu_l} \quad (2.20)$$

حيث،  $m = \rho A u_m u_m$



شكل (2.5) مناطق التكثف الشريحي على سطح رأسي

للوحه رأسيه بوحده عمق،  $p = 1$  ، يتم التعبير عن رقم رينولدز في بعض الأحيان بدلالات معدّل سريان الكتلة

لكل وحدة عمق للوحه  $\tau$  ، بحيث أنّ

$$Re = \frac{4\tau}{\mu_e} \quad (2.21)$$

بـ  $\tau = 0$  عند أعلى اللوحه و  $\tau$  تزيد مع  $x$  .

أيضاً يمكن ربط رقم رينولدز بمعامل إنتقال الحرارة كما يلي:

$$Q = \bar{h} A_s (t_{sat} - t_s) = \dot{m} h_{fg}$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{\bar{h} A_s (t_{sat} - t_s)}{h_{fg}}$$

$$Re = \frac{4\bar{h} A_s (t_{sat} - t_s)}{h_{fg} \rho \mu_l} \quad (2.22)$$

للوحه،  $A = L \times B$  و  $p = B$  ، حيث  $L$  و  $B$  هما إرتفاع وعرض اللوحه على الترتيب.

عليه،

$$Re = \frac{4\bar{h} L (t_{sat} - t_s)}{h_{fg} \mu_l} \quad (2.23)$$

عندما تزيد قيمة  $Re$  عن 1800 (تقريباً)، سيظهر الإضطراب في شريحة السائل.

لـ  $Re > 1800$  ، يمكن إستخدام الإرتباط المتبادل التالي:

$$\bar{h} = h_{turb} = 0.0077 \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)k^3 g}{\mu_l^2} \right]^{\frac{1}{3}} (R_l)^{0.4} \quad (2.24)$$

### 2.5 تكثيف الشريحة على أنابيب أفقية (Film Condensation on Horizontal Tubes):

تحليل Nusselt لتكثيف شريحي طباقى على أنابيب أفقية يقود إلى العلاقات التالية:

$$\bar{h} = 0.725 \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)k^3 gh_{fg}}{\mu_l (t_{sat} - t_s) D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.25)$$

لأنبوب أفقي مفرد،

$$\bar{h} = 0.725 \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)k^3 gh_{fg}}{N \mu_l (t_{sat} - t_s) D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.26)$$

لأنبوب أفقي بعدد  $N$  أنبوب موضوعة مباشرة واحدة فوق الأخرى في الإتجاه الرأسى.

حيث،  $D =$  القطر الخارجى للأنبوب.

### 2.6 تكثيف الشريحة من داخل الأنابيب الأفقية (Film Condensation Inside Horizontal Tubes):

هنالك تطبيقات هندسية عديدة في تكثيف البخار داخل الأنابيب مثل المكثفات المستخدمة في التبريد وأنظمة

تكثيف الهواء والعديد من الصناعات الكيماوية والبتروكيماوية. ما يحدث داخل هذه الأنابيب معقد جداً بما أن

معدّل السريان الإجمالى للبخار يؤثر بقوة على معدّل إنتقال الحرارة وأيضاً على معدّل التكثيف على الجدران.

أوصى (Chato) في العام 1962م بإستخدام الإرتباط المتبادل التالى لسرعات منخفضة في داخل أنابيب أفقية

(تكثيف مواد التبريد) (Condensation of refrigerants).

$$\bar{h} = 0.555 \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)k^3 gh'_{fg}}{\mu_l D (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.27)$$

$$\text{حيث } , h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} c_{pl} (t_{sat} - t_s) \quad (2.28)$$

تقتصر المعادلة (2.28) على رقم رينولدز لبخار منخفض بحيث أنّ

$$Re_v = \left[ \frac{\rho_v u_{mv} D}{\mu_v} \right] < 3500$$

حيث يتم تقييم  $Re_v$  عند حالات الدخول إلى الأنابيب.

## 2.7 تأثير وجود غازات لا متكثفة (غير قابلة للتكثف):

### (Influence of the Presence of Non Condensable Gases)

وجود غاز غير متكثف مثل الهواء في بخار يمكن تكثفه ينتج تأثيراً خطيراً على معامل إنتقال الحرارة. لقد لوحظ أنه حتى في وجود نسبة مئوية حجمية للهواء في بخار فإنَّ معامل إنتقال الحرارة بالتكثيف ينخفض بأكثر من 50%. هذا يرجع لحقيقة أنه عندما يتكثف بخار يحتوي على غاز غير قابل للتكثف، فإنَّ هذا الغاز يُترك عند السطح. أيّ تكثيف إضافي عند السطح سيحدث فقط بعدما ينتشر البخار القادم خلال هذا الغاز الغير قابل للتكثف الذي يتم تجميعه في محيط السطح (collected in the vicinity of surface). يعمل الغاز غير القابل للتكثف المجاور للسطح كمقاومة حرارية لعملية التكثيف. ينخفض معدّل التكثيف بصورة كبيرة عندما يتلوّث البخار القابل للتكثف ولو بمقدار صغير جداً من الغازات غير القابلة للتكثف.

بما أن حضور غاز غير قابل للتكثف في بخار متكثف يكون غير مرغوباً فيه، فإنَّ الممارسة العملية في التصميم يجب أن تشمل على تنفيس الغاز غير القابل للتكثف بأقصى ما يمكن.

## 2.8 أمثلة محلولة (Solved Examples):

### مثال (1):

ناقش الأنواع المختلفة لعمليات التكثيف للبخار على سطح مصمت.

### الحل:

متى ما تلامس بخار مشبّع مع سطح عند درجة حرارة منخفضة يحدث التكثيف.

هنالك أسلوبان للتكثيف:

- التكثيف بالشريحة: حيث يرطب التكثيف السطح مكوناً شريحة متصلة تُغطي السطح بأكمله.

- التكثيف بالنقط: حيث يتكثف البخار في شكل نقاط صغيرة بأحجام متفاوتة تهبط أسفل السطح بصورة عشوائية.

يحدث التكثيف بالشريحة عموماً على أسطح غير ملوثة. في هذا النوع من التكثيف تنمو الشريحة التي تغطي السطح بأكمله في السمك كلما تحركت أسفل السطح بالنتقال. هنا يوجد ميل حراري في الشريحة (thermal gradient) وبالتالي فهي تعمل كمقاومة لإنتقال الحرارة.

في التكثيف النقطي هنالك جزء كبير من مساحة اللوحة يتعرض مباشرة للبخار جاعلاً معدلات إنتقال الحرارة أعلى كثيراً (5 إلى 10 أضعاف) عن تلك في التكثيف الشريحي.

بالرغم من أنه يتم تفضيل التكثيف النقطي على التكثيف الشريحي لكن من الصعوبة بمكان إنجازهُ أو إعداده. هذا بسبب أن معظم الأسطح تصبح مرطبة عندما يتم تعريضها لبخار متكثف لفترة من الزمن. يمكن الحصول على التكثيف النقطي تحت أحوال مسيطر عليها بمساعدة إضافات معينة للمادة المتكثفة ولتغطيات سطح مختلفة (various surface coating)، ولكن لم يتم إثبات فائدتها التجارية حتى الآن (commercial viability). لهذا السبب فإن معدلات التكثيف المستخدمة يتم تصميمها على أساس التكثيف الشريحي.

## مثال (2):

بخار مشبّع عند  $t_{sat} = 90^{\circ}C$ ،  $(p = 70.14 \text{ k pa})$  يتكثف على السطح الخارجي لأنبوب رأسي بطول  $1.5m$  وقطر خارجي  $(OD) 2.5m$  يتم إعداده عند درجة حرارة منتظمة  $\tau_{\infty} = 70^{\circ}C$ . بإفترض تكثيف شريحي (film condensation) أحسب:

(i) معامل الإنتقال الموضعي عند أسفل الأنبوب، و

(ii) معامل إنتقال الحرارة المتوسط على الطول الكلي للأنبوب.

خواص الماء عند  $80^{\circ}C$  هي:

$$k_l = 0.668 \text{ w/mK}, \rho_l = 974 \text{ kg/m}^3, h_{fg} = 2309 \text{ kj/kg}, \mu_l = 0.335 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

$$\rho_v \ll \rho_l$$

الحل:

بمعلومية:

$$L = 1.5m, t_{sat} = 90^{\circ}C (p = 70.14 \text{ kpa}), t_s = 90^{\circ}C, D = 2.5 \text{ cm} = 0.025m$$

خواص الماء عند  $80^{\circ}C$  ؛  $\rho_l = 974 kg/m^3$  ؛  $\left(t_f = \frac{90+70}{2} = 80^{\circ}C\right)$  ؛  $k = 0.668 w/mk$  ؛

$$\rho_v \ll \rho_l ; \mu = 0.335 \times 10^{-3} kg/ms ; h_{fg} = 2309 kJ/kg$$

(i) معامل إنتقال الحرارة الموضعي،  $h_x$  :

بالترميز المعتاد، يتم إعطاء معامل إنتقال الحرارة الموضعي لتكثيف الشريحة

$$h_x = \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4 \mu x (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

∴ معامل إنتقال الحرارة الموضعي عند أسفل الأنبوب،  $x = 1.5m$  ، هو

$$h_l (= h_{1.5}) = \left[ \frac{(974)^2 \times (0.668)^3 \times 9.81 \times (2309 \times 10^3)}{4 \times 0.335 \times 10^{-3} \times 1.5 (90 - 70)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

(بما أن  $\rho_v \ll \rho_l$ )

$$= \left[ \frac{6.4053 \times 10^{15}}{40.2} \right]^{\frac{1}{4}} = 3552.9 w/m^2 \cdot ^{\circ}C \text{ (Ans.)}$$

(ii) معامل إنتقال الحرارة المتوسط،  $\bar{h}$  :

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h_l = \frac{4}{3} \times 3552.9 = 4737.2 w/m^2 \cdot ^{\circ}C \text{ (Ans.)}$$

مثال (3):

بخار مشبّع عند  $120^{\circ}C$  يتكثف على أنبوب رأسي بقطر خارجي  $2cm$  وبطول  $20cm$  . يتم إعداد جدار

الأنبوب عند درجة حرارة  $119^{\circ}C$  . أحسب معامل إنتقال الحرارة المتوسط وسمك الشريحة المتكثفة عند قاعدة

الأنبوب. افترض أن حل Nusselt يكون صحيحاً. معطى:

$$k_w = 0.686 w/mK ; h_{fg} = 2202.2 kJ/kg ; \rho_w = 943 kg/m^3 , p_{sat} = 1.98 bar$$

$$\mu = 237.3 \times 10^{-6} Ns/m^2$$

الحل:

من حل Nusselt ، نحصل على،

$$\delta = \left[ \frac{4t \mu (t_{sat} - t_s) x}{\rho_e (\rho_e - \rho_v) g h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\delta_l = \left[ \frac{4 \times 0.686 \times 237.3 \times 10^{-6} \times (120 - 119) \times 0.2}{(943)^2 \times 9.81 \times 2202.2 \times 10^3} \right]^{\frac{1}{4}}$$

بتجاهل بالمقارنة مع  $\rho_l$

$$= \left[ \frac{0.0001302}{1.92 \times 10^{13}} \right]^{\frac{1}{4}} = 5.1 \times 10^{-5} m \text{ or } 0.051 mm \text{ (Ans.)}$$

الآن،

$$h_l = \frac{k}{\delta_l} = \frac{0.686}{0.051 \times 10^{-3}} \approx 13451$$

∴ معامل إنتقال الحرارة المتوسط،

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h_l = \frac{4}{3} \times 13451 = 17934.67 w/m^2 K \text{ (Ans.)}$$

مثال (4):

زعنف تبريد رأسي تقريباً كلوح مستو إرتفاعه  $40cm$  يتم تعريضه لبخار مشبّع عند ضغط جوي

$(t_{sat} = 100^\circ c, h_{fg} = 2257kj/kg)$  . يتم إعداد الزعنف عند درجة حرارة مقدارها  $90^\circ c$  . أحسب

التالي:

(i) سمك الشريحة عند أسفل الزعنف،

(ii) معامل إنتقال الحرارة الإجمالي،

(iii) معدّل إنتقال الحرارة بعد إشراك تصحيح (M<sub>c</sub> Adam).

تكون خواص المائع كالاتي:

$$\rho_l = 965.3kg/m^3, k_l = 0.68w/m^\circ c, \mu_l = 3.153 \times 10^{-4}Ns/m^2$$

يمكن إستخدام العلاقات التالية:

$$\delta_x = \left[ \frac{4k_l \mu_l (t_{sat} - t_s) x}{gh_{fg} \rho_l (\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\bar{h} = \frac{3}{4} \frac{k}{\delta_l}$$

الحل:

بمعلومية:

$$h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, t_{sat} = 100^\circ \text{C}, L = 60 \text{ cm} = 0.6 \text{ m}, \mu_l = 3.153 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$$

$$k_l = 0.68 \text{ W/m}^\circ \text{C}, e_l = 965.3 \text{ kg/m}^3, t_s = 90^\circ \text{C}$$

(i) سمك الشريحة عند الحافة السفلية للزعنف،  $\delta_l$ :

$$\delta_x = \left[ \frac{4k_l \mu_l (t_{sat} - t_s) x}{gh_{fg} e_l (e_l - e_v)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{أو } \delta_x = \left[ \frac{4k_l \mu_l (t_{sat} - t_s) l}{gh_{fg} e_l^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

بما أن  $\rho_v \ll \rho_l$

$$= \left[ \frac{4 \times 0.68 \times 3.153 \times 10^{-4} (100 - 90) \times 0.4}{9.81 \times 2257 \times 10^3 \times (965.3)^2} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[ \frac{34.305 \times 10^{-4}}{2.063 \times 10^{13}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= 0.0001136 \text{ m} = 0.1136 \text{ mm (Ans.)}$$

(ii) معامل إنتقال الحرارة الإجمالي،  $\bar{h}$ :

$$\bar{h} = \frac{4}{3} \frac{k_l}{\delta_l} = \frac{4}{3} \times \frac{0.68}{0.0001136} = 7981.22 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ \text{C (Ans.)}$$

(iii) معدّل إنتقال الحرارة بتصحيح (M<sub>c</sub> Adam):

بتصحيح ( $M_c$  Adam)، تكون قيمة  $\bar{h}$  أكبر أو أعلى بمقدار 20% . بالتالي يكون معدّل إنتقال الحرارة بعد

إشراك تصحيح ( $M_c$  Adam) لوحدة عرض هو:

$$Q = 1.2 \times 7981.22 (0.4 \times 1) \times (100 - 90)$$

$$= 38309.8 \text{ w/m or } 38.3098 \text{ kw per unit width (Ans.)}$$

مثال (5):

لوحة رأسية بارتفاع  $500\text{mm}$  ويتم إعدادها عند  $30^\circ\text{C}$  يتم تعريضها لبخار مشبّع عند الضغط الجوي. أحسب التالي:

(i) معدّل إنتقال الحرارة، و

(ii) معدّل المادة المتكثفة لكل ساعة لكل متر من عرض اللوحة لتكثيف الشريحة.

خواص شريحة الماء عند متوسط درجة الحرارة هي:

$$\mu = 434 \times 10^{-6} \text{kg/ms}; k = 66.4 \times 10^{-2} \text{w/m}^0\text{c}; \rho = 980.3 \text{kg/m}^3;$$

$$h_{fg} = 2257 \text{kJ/kg}$$

إفترض أنّ كثافة البخار تكون صغيرة مقارنة مع تلك للمادة المتكثفة.

الحل:

بمعلومية:

$$t_s = 30^\circ\text{C}; B = 1\text{m}; L = 500\text{mm} = 0.5\text{m}$$

(i) معدّل إنتقال الحرارة لكل متر عرض،  $Q$ :

$$\bar{h} = 0.943 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{\mu L (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= 0.943 \left[ \frac{\rho_l^2 k^3 g h_{fg}}{\mu L (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

(بتجاهل  $\rho_v \ll \rho_l$  بما أنّ  $\rho_v \ll \rho_l$ )

$$\begin{aligned} \text{أو } \bar{h} &= 0.943 \left[ \frac{(980.3)^2 \times (66.4 \times 10^{-2})^3 \times 9.81 \times (2257 \times 10^3)}{434 \times 10^{-6} \times 0.5(100 - 30)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= 0.943 \left[ \frac{6.229 \times 10^{12}}{0.0152} \right]^{\frac{1}{4}} = 4242.8 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= \bar{h} A(t_{sat} - t_s) = h \times (L \times B)(t_{sat} - t_s) \\ &= 4242.8 \times (0.5 \times 1)(100 - 30) = 148498 \text{ w} \\ &= \frac{148498 \times 3600}{1000} = 53459 \times 10^3 \text{ kj/h} \end{aligned}$$

(ii) معدّل المادة المتكثفة لكل متر عرض،  $m$  :

$$m = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{53459 \times 10^3}{2257} = 236.86 \text{ kg/h} \quad (\text{Ans.})$$

مثال (6):

لوحة رأسيّة بارتفاع  $350\text{mm}$  وبعرض  $420\text{mm}$  ، عند  $40^\circ\text{C}$  يتم تعريضها لبخار مشبّع عند 1 ضغط جوي. أحسب الآتي:

(i) سمك الشريحة عند أسفل اللوحة،

(ii) السرعة القصوى عند أسفل اللوحة،

(iii) فيض الحرارة الكلي إلى اللوحة.

إقترض أنّ كثافة البخار تكون صغيرة مقارنة بتلك للمادة المتكثفة.

الحل:

بمعلومية:

$$L = 350\text{mm} = 0.35\text{m} ; t_{sat} = 100^\circ\text{C} ; t_s = 40^\circ\text{C} ; B = 420\text{mm} = 0.42\text{m}$$

سيتم تقييم الخواص عند درجة حرارة الشريحة ؛ i.e. متوسط  $t_s$  و  $t_{sat}$  .

$$t_f = \frac{100 + 40}{2} = 70^\circ C ;$$

إضافياً يتم تقييم  $h_{fg}$  عند  $100^\circ C$

الخواص عند  $70^\circ C$  هي:

$$\mu = 0.4 \times 10^{-3} kg/ms; k = 0.667 w/m^\circ C; \rho_l = 977.8 kg/m^3; h_{fg} = 2257 kJ/kg$$

(i) سمك الشريحة عند أسفل اللوحة،  $\delta$  :

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{g \rho_l^2 h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

بتجاهل  $\rho_v$  ، بما أن  $\rho_v \ll \rho_l$  (معطى)

$$\delta \text{ أو } \delta = \left[ \frac{4 \times 0.667 \times 0.4 \times 10^{-3} (100 - 40) \times 0.35}{9.81 \times 2257 \times 10^3 \times (977.8)^2} \right]^{\frac{1}{4}} = 1.8 \times 10^{-4} m = 0.18 mm$$

(في هذه الحالة  $x = l = 0.35 m$   $\therefore$ )

(ii) السرعة القصوى عند أسفل اللوحة،  $u_{max}$  :

$$u = \frac{(\rho_l - \rho_v) g}{\mu} \left[ \delta_y - \frac{y^2}{2} \right]$$

بتجاهل  $\rho_v$  ،

$$= \frac{\rho_l g}{\mu} \left[ \delta_y - \frac{y^2}{2} \right]$$

عند  $y = \delta$  ،  $u = u_{max}$  عليه،

$$u_{max} = \frac{\rho_l g \delta^2}{2\mu} = \frac{977.8 \times 9.81 (1.8 \times 10^{-4})^2}{2 \times 0.4 \times 10^{-3}} = 0.388 m/s \text{ (Ans.)}$$

(iii) فيض الحرارة الكلي إلى اللوحة،  $Q$  :

$$\bar{h} = 0.943 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{\mu L (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\bar{h} = 0.943 \left[ \frac{\rho_l^2 k^3 g h_{fg}}{\mu L (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{أو } \bar{h} = 0.943 \left[ \frac{(977.8)^2 \times 0.667^3 \times 9.81 \times (2257 \times 10^3)}{0.4 \times 10^{-3} \times 0.35 (100 - 40)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$= 0.943 \left[ \frac{6.282 \times 10^{12}}{8.4 \times 10^{-3}} \right]^{\frac{1}{4}} = 4931.35 \text{ w/m}^{\circ}\text{C}$$

يتم إعطاء فيض الحرارة الكلي بـ ،

$$Q = \bar{h} A (t_{sat} - t_s) = \bar{h} \times (L \times B) (t_{sat} - t_s)$$

$$= 4931.35 \times 0.35 \times 0.42 \times (100 - 40)$$

$$= 43494 \text{ w or } 43.494 \text{ kw} \quad (\text{Ans.})$$

مثال (7):

لوحة راسية مستوية (مسطحة) في شكل زعنفة إرتفاعها 600mm وتكون معرضة لبخار عند الضغط الجوي.

إذا تمَّ إعداد سطح اللوحة عند  $60^{\circ}\text{C}$  ، أحسب الآتي:

(i) سمك الشريحة عند الحافة الخلفية للشريحة، (trailing edge)

(ii) معامل إنتقال الحرارة الإجمالي ،

(iii) معدّل إنتقال الحرارة، و

(iv) معدّل سريان الكتلة للمادة المتكثفة.

إفترض حالات سريان طباقى (laminar flow conditions) ووحدة عرض اللوحة.

الحل: بمعلومية:

$$t_s = 100^\circ c ; L = 600mm = 0.6m$$

خواص البخار عند الضغط الجوي هي:

$$\rho_v = 0.596kg/m^3 ; h_{fg} = 2257kj/kg ; t_{sat} = 100^\circ c$$

خواص البخار المشبع عند متوسط درجة حرارة الشريحة ( $\dot{m}ft$ ) هي:  $t_f = \frac{100+60}{2} = 80^\circ c$  ،

$$\mu = 355.3 \times 10^{-6}Ns/m^2 , k = 67.413 \times 10^{-2}w/m^\circ c , \rho_l = 9718kg/m^3$$

(i) سمك الشريحة عند الحافة الخلفية للوحة،  $\delta$  (عند  $x = L = 0.6m$ ):

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\delta_l = \left[ \frac{4 \times 67.413 \times 10^{-2} \times 355.3 \times 10^{-6} (100 - 60) \times 0.6}{971.8(971.8 - 0.596) \times 9.81 \times (2257 \times 10^3)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{أو } \delta_l = \frac{0.02299}{2.08972 \times 10^{13}} = 1.82 \times 10^{-4}m = 0.182mm \text{ (Ans.)}$$

(ii) معامل إنتقال الحرارة الإجمالي ،  $\bar{h}$ :

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h_l = \frac{4}{3} \frac{k}{\delta_l} = \frac{4}{3} \times \frac{67.413 \times 10^{-2}}{1.82 \times 10^{-4}} = 4938.68 w/m^2^\circ c$$

مستخدمًا تصحيح (M<sub>c</sub> Adam) الذي يزيد بمقدار 20% عن نتيجة (Nusselt)

(iii) معدّل إنتقال الحرارة،  $Q$ :

$$Q = \bar{h} A_s (t_{sat} - t_s) = h \times (L \times B) (t_{sat} - t_s)$$

$$= 5926.4(0.6 \times 1) \times (100 - 60) = 142233.6w$$

(iv) معدّل سريان الكتلة للمادة المتكثفة،  $m$ :

$$m = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{142233.6}{2257 \times 10^3} = 0.063 \text{ kg/s or } 226.8 \text{ kg/h (Ans.)}$$

دعنا الآن نفحص ما إذا كان السريان طباقياً أم لا.

$$Re = \frac{4m}{\mu B} = \frac{4 \times 0.063}{355.3 \times 10^{-6} \times 1} = 709.26 < 1800$$

هذا يوضِّح أن فرضية سريان طباقى صحيحة.

مثال (8):

أنبوب رأسي بقطر خارجي  $60 \text{ mm}$  وبطول  $1.2 \text{ m}$  يتم تعريضه لبخار عند ضغط جوي. يتم إعداد السطح

الخارجي للأنبوب عند درجة حرارة مقدارها  $50^\circ \text{ C}$  بتدوير ماء بارد خلال الأنبوب. أحسب التالي:

(i) معدّل سريان الحرارة إلى مادة التبريد، و

(ii) معدّل تكثيف البخار (rate of condensation of steam)

الحل: بمعلومية:

$$t_s = 50^\circ \text{ C}, L = 1.2 \text{ m}, D = 60 \text{ mm} = 0.06 \text{ m}$$

بافتراض أن شريحة التكثيف تكون طباقية (رقائقية) وغياب الغازات الغير قابلة للتكثف.

$$mft, t_f = \frac{100 + 50}{2} = 75^\circ \text{ C}, \text{ متوسط درجة حرارة الشريحة}$$

الخواص الفيزيائية الحرارية (thermo-physical properties) للماء عند  $75^\circ \text{ C}$  هي:

$$\rho_l = 975 \text{ kg/m}^3, \mu_l = 375 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2, k = 0.67 \text{ w/m}^\circ \text{ C}$$

خواص البخار المشبع عند  $t_{sat} = 100^\circ \text{ C}$  هي:

$$\rho_v = 0.596 \text{ kg/m}^3, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

(i) معدّل سريان الحرارة،  $Q$ :

لتكثيف طباقى (رقائقي) على سطح رأسي.

$$\begin{aligned}
 Q &= \bar{h} A_s (t_{sat} - t_s) = \bar{h} \times (\pi DL) (t_{sat} - t_s) \\
 &= 4627.3 \times (\pi \times 0.06 \times 1.2) \times (100 - 50) = 52333.5 \\
 &= 52.333 \text{ kw} \quad (\text{Ans.})
 \end{aligned}$$

(ii) معدّل تكثيف البخار،  $m$  :

يتم إعطاء معدّل التكثيف بـ

$$m = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{52333.5}{2257 \times 10^3} = 0.0232 \text{ kg/s} = 83.52 \text{ kg/h} \quad (\text{Ans.})$$

دعنا نفحص فرضية شريحة تكثيف طباقية بحساب  $Re$  ،

$$Re = \frac{4m}{P \mu_l} = \frac{4 \times 0.0232}{\pi D \times 375 \times 10^{-6}} = \frac{4 \times 0.0232}{\pi \times 0.06 \times 375 \times 10^{-6}} = 1312.85$$

بما أنّ  $Re (= 1312.85) < 1800$  ، بالتالي يعتبر السريان طباقياً.

مثال (9):

أنبوب أفقي بقطر خارجي  $20\text{mm}$  يتم تعريضه لبخار جاف (dry steam) عند  $100^\circ\text{C}$  . يتم إعداد سطح الأنبوب عند  $84^\circ\text{C}$  بتدوير ماء خلاله. أحسب معدّل تكوّن المادة المتكثفة لكل متر طول من الأنبوب.

الحل: بمعلومية:

$$t_{sat} = 100^\circ\text{C} , t_s = 84^\circ\text{C} , D = 20\text{mm} = 0.02\text{m}$$

$$mft = t_f = \frac{100 + 84}{2} = 92^\circ\text{C}$$

متوسط درجة حرارة الشريحة ،

خواص السائل المشبّع عند  $92^{\circ}C$  هي :

$$\rho_l = 963.4 \text{ kg/m}^3, \mu_l = 306 \times 10^{-6} \text{ Ns/m}^2, k = 0.677 \text{ W/m}^{\circ}C$$

خواص البخار المشبّع عند  $t_{sat} = 100^{\circ}C$  هي:

$$\rho_v = 0.596 \text{ kg/m}^3, \quad h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

معدّل تكوّن المادة المتكثفة لكل متر طول من الأنبوب ،  $m$  :

يتم إعطاء معامل إنتقال الحرارة المتوسط ب :

$\bar{h}$

يكون معدّل إنتقال الحرارة لكل وحدة طول هو ،

$$\frac{Q}{L} = \bar{h} \times \pi D \times (t_{sat} - t_s)$$

$$= 11579.7 \times \pi \times 0.02 \times (100 - 84) = 11641.2 \text{ W}$$

معدّل تكوّن المادة المتكثفة لكل متر طول من الأنبوب،

$$\frac{m}{L} = \frac{Q/L}{h_{fg}} = \frac{11641.2}{2257 \times 10^3} = 5.157 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = 18.56 \text{ kg/h} \quad (\text{Ans.})$$

مثال (10):

مكثف بخار (steam condenser) يتكوّن من مصفوفة مربعة من عدد 625 أنبوب أفقي، كل بقطر  $6 \text{ mm}$  يتم تركيبه عند غطاء العادم لتوربينة بخار. تكون الأنابيب معرّضة لبخار مشبّع عند ضغط  $15 \text{ k pa}$  . إذا تمّ

إعداد سطح الأنبوب عند  $25^{\circ}C$  ، أحسب الآتي:

(i) معامل إنتقال الحرارة، و

(ii) المعدل الذي يتكثف به البخار لكل وحدة طول من الأنابيب.

إفترض تكثيف شريحي على الأنابيب وغياب الغازات غير القابلة للتكثف.

الحل: بمعلومية:

$$t_s = 25^{\circ}C , \quad D = 6\text{mm} = 0.006\text{m}$$

بالنسبة لضغط مقداره  $15\text{kPa}$  ، فإن الخواص المقابلة للبخار (من الجدول) هي:

$$t_{sat} = 54^{\circ}C , \rho_v = 0.098\text{kg/m}^3 , h_{fg} = 2373\text{kJ/kg}$$

خواص الماء المشبع عند درجة حرارة الشريحة  $t_f = \frac{54+25}{2} = 39.5^{\circ}C$  هي:

$$\rho_l = 992\text{kg/m}^3 , \mu = 663 \times 10^{-6}\text{Ns/m}^2 , k = 0.631\text{W/m}^{\circ}C$$

بما أن الأنابيب التي يتم ترتيبها في مصفوفة مربعة، بالتالي، فإن عدد الأنابيب الأفقية في عمود رأسي هي:

$$N = \sqrt{625} = 25$$

(i) معامل إنتقال الحرارة،  $\bar{h}$  :

معامل إنتقال الحرارة المتوسط لبخار يتكثف على جانب الأنابيب الأفقية يتم إعطاؤه بـ:

(ii) المعدل الذي يتكثف عنده البخار لكل وحدة طول ،  $m$  :

معدل التكثيف للأنبوب المفرد للمصفوفة لكل متر طول هو:

$$m_1 = \frac{Q}{h_{fg}} = \frac{\bar{h}\pi D(t_{sat} - t_s)}{h_{fg}}$$

$$= \frac{4845.6 \times \pi \times 0.006(54 - 25)}{2373 \times 10^3} = 1.116 \times 10^{-3} \text{kg/s.m}$$

معدّل التكثيف للمصفوفة الكاملة هو

$$m = 625 \times m_1 = 625 \times 1.116 \times 10^{-3} = 0.6975 \text{kg/s.m (Ans.)}$$

مثال (11):

لوحة مربعة بطول ضلع مقداره  $750\text{mm}$  ، عند درجة حرارة  $28^\circ\text{C}$  ويتم تعريضها لبخار عند  $8.132\text{kpa}$  . أحسب التالي:

(i) سمك الشريحة ، معامل إنتقال الحرارة الموضعي ومتوسط سرعة السريان للمادة المتكثفة عند مسافة مقدارها  $400\text{mm}$  من أعلى اللوحة.

(ii) معامل إنتقال الحرارة المتوسط وإنتقال الحرارة الكلي من جميع اللوحة،

(iii) معدّل تكثيف البخار الكلي، و

(iv) معامل إنتقال الحرارة إذا كانت اللوحة مائلة بزاوية مقدارها  $25^\circ$  مع المستوى الأفقي.

الحل: بمعلومية:

$$x = 400\text{mm} = 0.4\text{m}, t_s = 28^\circ\text{C}, L = B = 750\text{mm} = 0.75\text{m}$$

إفترض تكثيف شريحة بسريان طباقى.

خواص البخار المشبّع عند  $8.132\text{kpa}$  (أو  $0.08132\text{bar}$ ) هي:

$$t_{sat} = 42^\circ\text{C}, \rho_v = 0.0561\text{kg/m}^3, h_{fg} = 240\text{kJ/kg}$$

$$t_f = \frac{42 + 28}{2} = 35^\circ\text{C}, \text{متوسط درجة حرارة الشريحة}$$

خواص الماء المشبّع عند  $35^\circ\text{C}$  هي:

$$\rho_l = 993.95\text{kg/m}^3, k = 62.53 \times 10^{-2}\text{w/m}^\circ\text{C}, \mu = 728.15 \times 10^{-6}\text{kg/ms}$$

(i)  $u_m, h_x, \delta_x$  عند مسافة  $400\text{mm}$  من أعلى اللوحة:

سمك الشريحة عند بعد  $x$  من الحافة العلوية للوحة يتم إعطاؤه بـ:

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\delta \text{ أو } \delta = \left[ \frac{4 \times 62.53 \times 10^{-2} \times 728.15 \times 10^{-6} (42 - 28) \times x}{993.95 (993.95 - 0.0561) \times 9.81 \times (2402 \times 10^3)} \right]^{\frac{1}{4}} = 1.819 \times 10^{-4} (x)^{1/4}$$

عند  $x = 0.4m$  ،

$$\delta_x = 1.819 \times 10^{-4} \times (0.4)^{1/4} \simeq 1.45 \times 10^{-4} m \simeq 0.145 mm \text{ (Ans.)}$$

عند  $x = l = 0.75m$  ،

$$\delta_l = 1.819 \times 10^{-4} \times (0.75)^{1/4} \simeq 1.69 \times 10^{-4} m \simeq 0.169 mm \text{ (Ans.)}$$

معامل إنتقال الحرارة الموضعي،

$$h_x = \frac{k}{\delta_x} = \frac{62.53 \times 10^{-2}}{1.45 \times 10^{-4}} = 4312.41 w/m^2 \text{ } ^\circ C$$

سرعة السريان المتوسطة للمادة المتكثفة ،

$$u_m = \frac{(\rho_l - \rho_v) g \cdot \delta^2}{3 \mu}$$

$$u_m = \left[ \frac{(993.95 - 0.0561) \times 9.81 \times (1.45 \times 10^{-4})^2}{3 \times 728.15 \times 10^{-6}} \right] =$$

(ii) معامل إنتقال الحرارة المتوسط ،  $(\bar{h})$  :

$$\bar{h} = \frac{4}{3} \cdot \frac{k}{\delta_l} = \frac{4}{3} \times \frac{62.53 \times 10^{-2}}{1.69 \times 10^{-4}} = 4933.33 w/m^2 \text{ } ^\circ C$$

(حيث  $\delta_l =$  سمك الشريحة عند أسفل اللوحة).

باستخدام تصحيح (M<sub>c</sub> Adam) ،

$$\bar{h} = 1.2 \times 4933.33 = 5920 w/m^2 \text{ } ^\circ C$$

إنتقال الحرارة الكلي من جميع اللوحة ،  $Q$  :

$$Q = \bar{h} A_s (t_{sat} - t_s) = \bar{h} \times (L \times B) (t_{sat} - t_s)$$

$$= 5920 \times (0.75 \times 0.75) \times (42 - 28) = 46620 \text{ w} \quad (\text{Ans.})$$

(iii) معدّل تكثيف البخار الكلي،  $m$  :

$$m = \frac{Q}{h_{fg}}$$

$$\text{أو } m = \frac{46620}{2402 \times 10^3} = 0.0194 \text{ kg/s or } 69.87 \text{ kg/h} \quad (\text{Ans.})$$

(iv) معامل إنتقال الحرارة إذا كانت اللوحة مائلة بزاوية مقدارها  $25^\circ$  مع المستوى الأفقي،  $h_{inclined}$  :

$$h_{inclined} = h_{vertical} \times (\sin \theta)^{1/4}$$

$$= 5920 \times (\sin 25)^{1/4} = 4773.2 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Ans.})$$

هنا نفحص نوع السريان،

$$Re = \frac{4m}{\mu B} = \frac{4 \times 0.0194}{728.15 \times 10^{-6} \times 0.75} = 142 < 1800$$

بالتالي يكون الإفتراض صحيحاً.

مثال (12):

لوحة رأسية بارتفاع  $3.2\text{m}$  يتم إعدادها عند  $54^\circ\text{C}$  ويتم تعريضها إلى بخار عند ضغط جوي. أحسب معدّل إنتقال الحرارة لكل وحدة عرض.

الحل: بمعلومية:

$$t_{sat} = 100^\circ\text{C} , \quad t_s = 54^\circ\text{C}, \quad B = 1\text{m}, \quad L = 3.2\text{m}$$

معدّل إنتقال الحرارة لكل وحدة عرض:

لكي يتم تحديد ما إذا كانت شريحة المادة المنكثفة رقائقية أم مضطربة يجب فحص رقم رينولدز.

$$t_f = \frac{100 + 54}{2} = 77^\circ\text{C}, \text{ متوسط درجة حرارة الشريحة}$$

خواص المادة المنكثفة عند  $77^\circ\text{C}$  هي:

$$\mu_l = 365 \times 10^{-6} \text{Ns/m}^2, \quad k = 668 \times 10^{-3} \text{w/m}^\circ\text{C}$$

$$\rho_l = \frac{1}{1.027 \times 10^{-3}} = 973.7 \text{ kg/m}^3$$

خواص البخار المشبع عند  $t_{sat} = 100^\circ \text{C}$  هي:

$$\rho_v = 0.596 \text{ kg/m}^3, \quad h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

بافتراض أن السريان يكون مضطرباً تكون المعادلات المرتبطة كالاتي:

$$Re = \frac{4\bar{h}L(t_{sat} - t_s)}{h_{fg} \cdot \mu_l}$$

$$\bar{h} = 0.0077 \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)k^2g}{\mu L(t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{3}} (Re)^{0.4}$$

بتقادي  $\bar{h}$  من هذه المعادلات، نحصل على الشرط الذي سيجعل السريان مضطرباً، إذا كان،

$$0.00296 \left[ \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_v)k^3g(t_{sat} - t_s)^3l^3}{\mu_l^5 (h_{fg})^3} \right]^{\frac{5}{9}} > 1800$$

$$0.00296 \left[ \frac{973.7(973.7 - 0.596)(668 \times 10^{-3})^3 \times 9.81 \times (100 - 54)^3 \times (3.2)^3}{(365 \times 10^{-6})^5 (2257 \times 10^3)^3} \right]^{\frac{5}{9}}$$

$$\text{أو } 0.00296 \left[ \frac{8.837 \times 10^{12}}{74.48} \right]^{5/9} = 4144.8 > 1800$$

عليه تكون الشريحة مضطربة كما تم إفتراضها و  $Re = 4144.8$

$$\therefore \bar{h} = 0.007 \left[ \frac{973.7(973.7 - 0.596)(668 \times 10^{-3})^3 \times 9.81}{(365 \times 10^{-6})^2} \right]^{\frac{1}{3}} \times (4144.8)^{0.4}$$

$$= 0.0077 \times (2.0797 \times 10^{13})^{1/3} \times 27.99 = 5866.62 \text{ w/m}^2 \text{ } ^\circ \text{C}$$

معدل إنتقال الحرارة لكل وحدة عرض،

$$Q = \bar{h} A_s(t_{sat} - t_s)$$

$$= 5866.62 \times (3.2 \times 1)(100 - 54) = 863566 \text{ w/m} = 863.566 \text{ kw/m} \quad (\text{Ans.})$$

مثال (13):

يتم تصميم مكثف لتكثيف  $1800\text{kg/h}$  من البخار الجاف والمشبّع عند ضغط  $10\text{kpa}$ . يتم إستخدام مصفوفة مربعة من عدد 400 أنبوبة كلٍ بقطر  $8\text{mm}$ . إذا تمَّ إعداد درجة حرارة سطح الأنبوب عند  $24^\circ\text{C}$ ، أحسب الآتي:

(i) معامل إنتقال الحرارة، و

(ii) طول كل أنبوب مستخدماً ممراً مفرداً.

الحل: بمعلومية:

$$t_s = 24^\circ\text{C}, \quad B = 8\text{mm} = 0.008\text{m}, \quad m = 1800\text{kg/h}$$

(i) معامل إنتقال الحرارة،  $\bar{h}$ :

بالنسبة لـ  $10\text{kpa}$  ( $0.1\text{bar}$ )، من الجدول، خواص البخار الجاف والمشبّع هي:

$$t_{sat} = 45.8^\circ\text{C}, \quad \rho_v = \left(\frac{1}{v_g}\right) = 0.0676\text{kg/m}^3, \quad h_{fg} = 2393\text{kJ/kg}$$

خواص البخار المشبّع عند متوسط درجة حرارة الشريحة  $t_f = \frac{45.8+24}{2} = 35^\circ\text{C}$  هي:

$$\rho_l = 993.95\text{kg/m}^3, \quad \mu = 728.15 \times 10^{-6}\text{Ns/ms}, \quad k = 62.53 \times 10^{-2}\text{w/m}^0\text{C}$$

بما أنّ الأنابيب التي يتم ترتيبها في مصفوفة، عليه يكون عدد الأنابيب الأفقية في العمود الرأسي هو:

$$N = \sqrt{400} = 20$$

معامل إنتقال الحرارة المتوسط لبخار يتكثف على جانب أنابيب أفقية يتم إعطاؤه بـ:

$\bar{h} =$  أو

(ii) طول كل أنبوب بإفتراض ممراً مفرداً،  $L$  :

معدّل إنتقال الحرارة،

$$Q = \bar{h} A_s (t_{sat} - t_s)$$

$$\text{أو } mh_{fg} = \bar{h}(400 \times \pi DL)(t_{sat} - t_s)$$

$$\frac{1800}{3600} \times (2393 \times 10^3) = 4983.39 \times (400 \times \pi \times 0.008 \times L)(45.8 - 24)$$

$$1196500 = 1092147.3L$$

$$L = \frac{1196500}{1092147.3} = 1.09m \quad (\text{ans.})$$

مثال (14):

السطح الخارجي لدارة (طارة) اسطوانية بقطر  $350mm$  يتم تعريضه لبخار مشبّع عند  $2.0bar$  للتكثيف. إذا تمّ إعداد درجة حرارة سطح الطارة عند  $80^\circ C$  ، أحسب التالي:

(i) طول الطارة،

(ii) سمك الطبقة المتكثفة لتكثيف  $70kg/h$  من البخار.

الحل: بمعلومية:

$$t_s = 80^\circ C, \quad m = 70kg/h, \quad D = 350mm = 0.35m$$

بإفتراض تكثيف شريحي وسريان طبائقي:

مقابلاً لـ  $2.0 bar$  من الجدول، خواص البخار المشبّع هي:

$$t_{sat} = 120.2^\circ C, \rho_v = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{0.885} = 1.13kg/m^3, h_{fg} = 2201.6kJ/kg$$

خواص الماء المشبّع عند متوسط درجة حرارة الشريحة، هي:

$$t_f = \frac{120.2 + 80}{2} \simeq 100^\circ c$$

$$\rho_l = 956.4 kg/m^3, \mu = 283 \times 10^{-6} kg/ms, k = 68.23 \times 10^{-2} w/m^\circ c$$

(i) طول الطارة،

يتم إعطاء الشريحة عند الحافة السفلية للطارة بـ

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$\begin{aligned} \text{أو } \delta_l &= \left[ \frac{4 \times 68.23 \times 10^{-2} \times 283 \times 10^{-6} (120.2 - 80) \times L}{958.4 (958.4 - 1.13) \times 9.81 \times (2201.6 \times 10^3)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ &= \left[ \frac{0.031 L}{1.9815 \times 10^3} \right]^{\frac{1}{4}} = 1.988 \times 10^{-4} \times (L)^{\frac{1}{4}} \end{aligned}$$

يتم إعطاء معامل إنتقال الحرارة المتوسط بـ :

$$\bar{h} = \frac{4}{3} \times \frac{k}{\delta_l} = \frac{4}{3} \times \frac{68.23 \times 10^{-2}}{1.988 \times 10^{-4} \times (L)^{\frac{1}{4}}} = 3432.09 \times (L)^{-\frac{1}{4}}$$

باستخدام استنباط (M<sub>c</sub> Adam) نحصل على،

$$\bar{h} = 1.2 \times 3432.09 \times (L)^{-\frac{1}{4}} = 4118.5 \times (L)^{-1/4}$$

يتم إعطاء معدّل إنتقال الحرارة بـ

$$Q = \bar{h} A_s (t_{sat} - t_s) = m h_{fg}$$

$$\text{أو } 4118.5 \times (L)^{-\frac{1}{4}} (\pi \times 0.35 \times L) (120.2 - 80) = \frac{70}{3600} \times (2201.6 \times 10^3)$$

$$\text{أو } 182046.8 (L)^{\frac{4}{3}} = 428088.88$$

$$\text{أو } L = \left[ \frac{428088.88}{182046.8} \right]^{\frac{3}{4}} = 0.1452 m = 145.2 mm \text{ (Ans.)}$$

(ii) سمك الطبقة المتكثفة،  $\delta$  :

$$\begin{aligned}\delta &= 1.988 \times 10^{-4} \times (L)^{\frac{1}{4}} \\ &= 1.988 \times 10^{-4} \times (0.1452)^{\frac{1}{4}} = 1.227 \times 10^{-4} m \\ &= 0.1227 mm \quad (Ans.)\end{aligned}$$

دعنا نفحص ما إذا كان السريان طباقياً أم لا .

$$Re = \frac{4 m}{\mu d} = \frac{4 \times (70/3600)}{2.83 \times 10^{-6} \times (\pi \times 0.35)} = 249.9$$

بما أن  $Re (= 249.9)$  والتي هي أقل من 1800 بالتالي فإن الفرضية صحيحة.

## 2.9 ملخص نظري (Theoretical Summary):

- (1) الغليان هو عملية إنتقال حرارة حملي يتضمن تغييراً في الطور من سائل إلى بخار.
- (2) ظاهرة إنتقال الحرارة بالغليان يمكن أن تحدث بالصوّر التالية:
  - (i) غليان حوضي (pool boiling).
  - (ii) غليان بالحمل القسري (forced convection boiling).
  - (iii) غليان بتبريد تحت درجة التكثف أو غليان موضعي (sub – cooled or local boiling).
  - (iv) غليان مشبّع (saturated boiling).
- (3) أنظمة الغليان الثلاثة هي:

(i) تبخّر السطح البيني.

(ii) الغليان التنوّوي.

(iii) الغليان الشريحي.

(4) عملية التكثيف هي معكوس عملية الغليان. يمكن أن يحدث التكثف بأسلوبين محتملين:

(i) تكثيف شريحي (film condensation).

(ii) تكثيف نقطي (drop wise condensation).

إذا كانت المادة المتكثفة تميل لترطيب السطح وبالتالي تكوّن شريحة سائلة، يعرف التكثيف بالتكثيف الشريحي. في التكثيف النقطي يتكثف البخار في شكل نقيطات سائل صغيرة بأحجام مختلفة تهبط أسفل السطح بأسلوب عشوائي.

## 2.10 ملخص الصيغ الرياضية (Summary Formulate):

### A. الغليان (Boiling):

$$\rho_v - \rho_l = \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

$$T_v - T_{sat} = \frac{2\sigma}{r} \left[ \frac{R}{P} \cdot \frac{T_{sat}^2}{h_{fg}} \right] \quad (2)$$

$$d_c = C \cdot \beta \left[ \frac{\sigma_{lv}}{\sigma_{ls}} \right] \sqrt{\frac{\sigma_{lv}}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (3)$$

$$q_s = \mu_l \cdot h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{0.5} \left[ \frac{C_{pl} \Delta t_e}{C_{sl} \cdot h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad (4)$$

$$Nu = 0.16 (Gr \cdot pr)^{0.33} \quad (5)$$

لغليان تنووعي عند ضغط جوي على لوحة مستوية بفيض حرارة منخفض.

$$Nu = 0.61 (Gr \cdot pr)^{0.25} \quad (6)$$

لغليان تنووعي على لوحة مستوية رأسية.

$$q_{sa} = 0.18 (\rho_v)^{1/2} h_{fg} [g\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (7)$$

فيض الحرارة الحرج للغليان الحوضي التنووعي.

$$(h)^{4/3} = (h_{conv.})^{4/3} + h_{rad} \cdot (h)^{1/3} \quad (8)$$

في حدود خطأ مقداره  $\pm 0.5\%$   $h = h_{conv.} + \frac{3}{4} h_{rad}$

$$h_{conv.} = 0.62 \left[ \frac{k_v^3 - \rho_v(\rho_l - \rho_v)g(h_{fg} + 0.4C_{pv} \Delta t_c)}{\mu_v D \Delta t_c} \right]^{1/4}$$

$$h_{rad} = \left[ \frac{5.67 \times 10^{-8} \epsilon (T_s^4 - T_{sat}^4)}{(T_s - T_{sat})} \right]$$

**.B التكثيف (Condensation):**

$$u = \frac{(\rho_l - \rho_v) g}{\mu} \left[ \delta y - \frac{y^2}{2} \right] \quad /1$$

$$u_m = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g \cdot \delta^2}{3 \mu} \quad /2$$

$$m = \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g b \delta^3}{3 \mu} \quad /3$$

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{\rho_l (\rho_l - \rho_v) g h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad /4$$

$$h_x = \frac{k}{\delta} \quad /5$$

$$h_x = \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{4 \mu x (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad /6$$

$$\bar{h} = \frac{4}{3} h_l \quad /7$$

$$\bar{h} = 1.13 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{\mu L (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad /8$$

$$m = \frac{Q}{h_{fg}} \quad /9$$

$$h_{inclined} = (h)_{vertical} \times (\sin \theta)^{1/4} \quad /10$$

$$Re > 1800 \quad \downarrow \quad h_{turb.} = (\bar{h}) = 0.0077 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g}{\mu^2} \right]^{1/3} (Re)^{0.4} \quad /11$$

$$\bar{h} = 0.725 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{\mu_l (t_{sat} - t_s) D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad /12$$

لأنبوب أفقي مفرد

$$\bar{h} = 0.725 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 g h_{fg}}{N \mu_l (t_{sat} - t_s) D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad /13$$

لجانب أنبوب أفقي

بعدد N أنبوب موضوعة مباشرة فوق بعضها البعض في الإتجاه الرأسي.

حيث D = القطر الخارجي للأنبوب.

$$\bar{h} = 0.555 \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_v) k^3 h'_{fg}}{\mu D (t_{sat} - t_s)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad /14$$

حيث،

$$h'_{fg} = h_{fg} + \frac{5}{\delta} C_{pl} (t_{sat} - t_s)$$

## 2.11 أسئلة نظرية (Theoretical Questions)

- 1/ عرّف مصطلح الغليان.
- 2/ عدّد تطبيقات إنتقال الحرارة بالغلين.
- 3/ أشرح باختصار الآلية الفيزيائية للغلين.
- 4/ فاضل بين الغليان الحوضي والغلين بالحمل القسري.
- 5/ أشرح باختصار الأنظمة المختلفة للغلين الحوضي المشبع.
- 6/ ما هي نقطة الإحتراق؟ (burnout point)
- 7/ أشرح باختصار آلية التكثيف.
- 8/ فاضل بين آلية التكثيف الشريحي والنقطي.
- 9/ إشتق نظرية Nusselt للتكثيف الشريحي في السريان الطباقى على لوحة رأسية.
- 10/ إشتق العلاقة التالية لتكثيف شريحي طباقى على لوحة رأسية:

$$\delta = \left[ \frac{4k \mu (t_{sat} - t_s) x}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

2.12 مسائل غير محلولة في إنتقال الحرارة بالغليان:

**(Unsolved Problems in Heat Transfer by Boiling)**

1/ ماء عند ضغط جوي يتم غليانه في طوة من النحاس المصقول أو اللامع. قطر الطوة 300mm ويتم

المحافظة عليها عند درجة  $111^{\circ}C$ . أحسب الآتي:

(i) قدرة الموقد للحفاظ على الغليان.

(ii) معدّل التبخر بالـ kg/h.

خذ مواصفات الماء عند  $100^{\circ}C$  كما يلي:

$$\rho_l = 958 \text{ kg/m}^3, \rho_v = 0.597 \text{ kg/m}^3, \mu_f = 278 \times 10^{-6} \text{ kg/ms},$$

$$\sigma = 58.9 \times 10^{-3} \text{ N/m}, \text{pr} = 1.723, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, c_{pf} = 4216 \text{ J/kgK}$$

Ans. [(i) 13.664 kw, (ii) 21.8 kg/h]

2/ سلك بقطر 1mm وبطول 150mm يتم غمره أفقياً في ماء عند ضغط 7bar. يحمل السلك تياراً مقداره

131.5A بجهد مسطّ مقداره 2.15V. إذا تمت المحافظة على سطح السلك عند درجة حرارة مقدارها

$180^{\circ}C$ ، أحسب الآتي:

(i) فيض الحرارة.

(ii) معامل إنتقال الحرارة بالغليان.

Ans. [(i) 0.6Mw/m<sup>2</sup>, (ii) 39920 w/m<sup>2</sup>°c]

3/ سلك كهربى بقطر 1.5mm وبطول 200mm يُوضع أفقياً ويُغمر في ماء عند الضغط الجوي. للسلك جهد

مسطّ مقداره 16V ويحمل تياراً مقداره 40 أمبير. أحسب الآتي:

(i) فيض الحرارة، و (ii) الزيادة في درجة الحرارة

Ans. [(i) 0.679Mw/m<sup>2</sup>, (ii) 18.52°c]

4/ سلك من النيكل بقطر 1.5mm وبطول 500mm ، يحمل تياراً، يتم غمره في حمام ماء مفتوح إلى الضغط الجوي. أحسب الجهد عند نقطة الحريق إذا كان السلك عند هذه النقطة يحمل تياراً مقداره 100A .

Ans. [17.9V (approximately)]

5/ عنصر تسخين مجلّد بمعدن بقطر 8mm وبإنبعاثية 0.95 . يتم غمر العنصر أفقياً في حمام ماء. درجة حرارة سطح المعدن تحت شروط غليان الحالة المستقرة. أحسب القدرة المبدّدة لكل وحدة طول للسخان إذا تمّ تعريض الماء إلى ضغط جوي ودرجة حرارة منتظمة.

Ans. [1.75 kw/m ]

### 2.13 مسائل غير محلولة في إنتقال الحرارة بالتكثيف:

#### (Unsolved Problems in Heat Transfer by Condensation)

1/ لوح رأسي بإرتفاع 450mm ويتم المحافظة عليه عند درجة حرارة  $30^{\circ}C$  يتم تعريضه لبخار مشبّع عند الضغط الجوي. أحسب الآتي: (i) معدّل إنتقال الحرارة، و (ii) معدّل التكثيف لكل ساعة لكل متر من عرض اللوح بالتكثف الشريحي.

خواص شريحة الماء عند متوسط درجة الحرارة هي:

$$h_{fg} = 2256.9 \text{ kJ/kg}, \mu = 434 \times 10^{-6} \text{ kg/ms}, k = 66.4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^{\circ}C,$$

$$\rho = 980.3 \text{ kg/m}^3$$

Ans. [439.9 × 10<sup>3</sup> kJ/h, 218.8 kg/h]

2/ لوح رأسي في شكل زعنفة بإرتفاع 500mm ومعرض لبخار عند ضغط جوي. إذا تمّ المحافظة على سطح اللوح عند  $60^{\circ}C$  ، أحسب:

(i) سمك الشريحة عند الحافة المنقادة للشريحة،

(ii) معامل إنتقال الحرارة الإجمالي،

(iii) معدّل إنتقال الحرارة،

(iv) معدّل سريان كتلة المائع المتكثف.

إفترض حالات سريان رقائقي ووحدة عرض للوح.

Ans. [(i)0.1732mm, (ii)6227.5w/m<sup>o</sup>c, (iii)124550w, (iv)0.055kg/s]

3/ لوح رأسي بإرتفاع 2.8m يتم المحافظة عليه عند 54<sup>o</sup>C في وجود بخار مشبّع عند الضغط الجوي. أحسب معدّل إنتقال الحرارة لكل وحدة عرض.

Ans. [700kw/m]

4/ أنبوب رأسي بقطر خارجي 50mm وبطول 2m يتم تعريضه لبخار عند ضغط جوي. السطح الخارجي للأنبوب يتم المحافظة عليه عند درجة حرارة 84<sup>o</sup>C بتدوير ماء بارد خلال الأنابيب. حدّد:

(i) معدّل إنتقال الحرارة إلى عنصر التبريد،

(ii) معدّل تكثف البخار.

Ans. [(i)179kw, (ii)28.6 kg/h]

5/ أنبوب أفقي بقطر خارجي 25mm يتم تعريضه لبخار جاف عند 100<sup>o</sup>C. يتم المحافظة على درجة حرارة سطح الأنبوب عند 84<sup>o</sup>C بتدوير ماء خلال الأنبوب. أحسب معدّل تكوّن المائع المتكثف لكل متر طول من الأنبوب.

Ans. [21.94 kg/h]

6/ مكثف يتم تصميمه لتكثيف 2250kg/h من بخار جاف مشبّع عند ضغط مقداره 15kpa. يتم إستخدام مصفوفة مربعة من 400 أنبوب كل بقطر 6mm. إذا تمّ المحافظة على درجة حرارة سطح الأنبوب عند 26<sup>o</sup>C، أحسب معامل إنتقال الحرارة وطول كل أنبوب مفترضاً ممراً مفرداً.

Ans. [5205.3w/m<sup>2</sup>o c, 1.35m]

## المراجع

### الكتب والمراجع العربية:

1. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة الجزء الأول، الثاني والثالث" ، جامعة وادي النيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2000م).
2. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات انتقال الحرارة بالغليان والتكثيف الجزء الأول، الثاني" ، جامعة وادي النيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2015م).
3. أسامة محمد المرضي سليمان ، "مذكرات ديناميكا حرارية(1) و ديناميكا حرارية(2)" ، جامعة وادي النيل ، كلية الهندسة والتقنية ، قسم الهندسة الميكانيكية، (2007م).
4. برهان محمود العلي ، أحمد نجم الصبحة ، بهجت مجيد مصطفى ، " ترجمة كتاب أساسيات انتقال الحرارة" ، مديرية دار الكتب للطباعة والنش ، جامعة لموصل ، الجمهورية العراقية ،(1988م).

### الكتب والمراجع الإنجليزية:

1. Eastop and McConkey, "Applied Thermodynamics for Engineering Technologists", Longman Singapore Publishers LTD., Singapore, (1994).
2. Eastop T. D. and Croft D. R., "Energy Efficiency", Longman Publisher, (1990).
3. Rogers and Mayhew, " Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer", Longman Group Limited London and New York, Third Edition, (1980).
4. Bruges E. A. , " Available Energy and second Law Analysis " ,Academic Press ,(1959).
5. Kauzmann W., "Kinetic Theory of Gases", Benjamin, (1966).

6. Schneider P. J., "Temperature Response Charts", Wiley, (1963).

7. R. K. Rajput, "Heat and Mass Transfer", S. Chand and Company LTD., New Delhi, (2003).

### نبذة عن المؤلف:



أسامة محمد المرضي سليمان وُلِدَ بمدينة عطبرة بالسودان في العام 1966م. حاز على دبلوم هندسة ميكانيكية من كلية الهندسة الميكانيكية - عطبرة في العام 1990م. تحصل أيضاً على درجة البكالوريوس في الهندسة الميكانيكية من جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا - الخرطوم في العام 1998م ، كما حاز على درجة الماجستير في تخصص ميكانيكا المواد من جامعة وادي النيل - عطبرة في العام 2003م . قام بالتدريس في العديد من الجامعات داخل السودان، بالإضافة لتأليفه لسبع كتب باللغة العربية ولأربع كتب باللغة الإنجليزية بالإضافة لثمانية ورقات علمية منشورة في دور نشر ومجلات عالمية إلى جانب إشرافه على أكثر من مائتي بحث تخرج لكل من طلاب الماجستير، الدبلوم العالي، البكالوريوس، والدبلوم العام. يشغل الآن وظيفة أستاذ مساعد بقسم الميكانيكا بكلية الهندسة والتقنية - جامعة وادي النيل. بالإضافة لعمله كاستشاري لبعض الورش الهندسية بالمنطقة الصناعية عطبرة. هذا بجانب عمله كمدير فني لمجموعة ورش الكمالي الهندسية لخرابة أعمدة المرافق واسطوانات السيارات والخرابة العامة وكبس خراطيش الهيدروليك .