



# الإهداء

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)  
صدق الله العظيم

من هذا المنطلق القويم تهدي هذا العمل المتواضع :  
إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين..  
سيدنا مُحَمَّد ﷺ  
إلى من جمع مجموعة من الأوراق المبعثرة في شكل مذكرة الأستاذ الفاضل تحة مُحمَّد .  
إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله إلى الوالدين الكرميين .  
إلى العائلتين الكريمتين ( غدامسي و وناس ) .  
إلى كل الإخوة والأخوات .  
إلى كل الزملاء والأصدقاء .

# كلمة شكر

نشكر الله ونحمده حمدا كثيرا مباركا على هذه النعمة الطيبة والنافعة نعمة العلم والبصيرة.  
لا بد لنا ونحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود إلى أعوام قضيناها في  
رحاب الجامعة مع أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء  
جيل الغد لتبعث الأمة من جديد...

"كن عالما .. فإن لم تستطع فكن متعلما ، فإن لم تستطع فأحب العلماء ، فإن لم تستطع فلا  
تبغضهم"

وقبل أن نمضي نقدم أسمى آيات الشكر الجزيل والامتنان والثناء الخالص والتقدير، إلى نبع  
العون إلى من وجهنا دون وهن إلى أستاذنا الفاضل المشرف محمد تخته الذي نقول له بشرك  
قول رسول الله ﷺ:

"إن الحوت في البحر ، والطير في السماء ، ليصلون على معلم الناس الخير"  
كما يشرفنا أن نتقدم بالشكر الجزيل إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة إلى الذين مهدوا  
لنا طريق العلم إلى جميع أساتذتنا الأفاضل.....

ونخص بالذكر الأستاذ الزين عبد الله و الأستاذ محمد البار سوداني

اللذين قبلا الإشراف على تقييم هذا العمل

وكذلك نشكر كل من ساعد على إتمام هذا البحث وقدم لنا العون ومد لنا يد المساعدة  
وزودنا بالمعلومات اللازمة لإتمام هذا البحث.

إلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات  
فلهم منا كل الشكر

Karima et Karima

## فهرس العناوين

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| III | ..... فهرس الأشكال            |
| IV  | ..... فهرس الجداول            |
| VII | ..... قائمة الرموز والمصطلحات |
| IX  | ..... المقدمة                 |

### الفصل الأول : الدراسة النظرية للظاهرة التبخير

|    |  |
|----|--|
| 2  | ..... (1-I) آلية التبخير   |
| 4  | ..... (2-I) قوة الشد وتأثيرها في تكوين الفقاعات                  |
| 6  | ..... (3-I) تجربة Nukyama للغليان البركي                         |
| 8  | ..... (4-I) اتران القوى على فقاعة البخار                         |
| 10 | ..... (5-I) آلية تشكل فقاعات البخار                              |
| 11 | ..... (6-I) تأثير الضغط والخواص على معامل انتقال الحرارة بالتبخر |
| 12 | ..... (7-I) تصنيف معدات التبخير                                  |
| 13 | ..... (8-I) معدلات انتقال الحرارة بالغليان                       |
| 14 | ..... (9-I) انتقال الحرارة بالغليان البركي                       |
| 18 | ..... (10-I) الغليان المُنوّى والحمل القسري                      |
| 22 | ..... (11-I) الفيض الحراري الأقصى للغليان المنوّى                |

### الفصل الثاني : الدراسة النظرية للظاهرة التكثيف

|    |  |
|----|--|
| 29 | ..... (1-II) التكثيف النقطي و التكثيف الغشائي          |
| 31 | ..... (2- II) التطبيقات العملية لظاهرة التكثيف         |
| 32 | ..... (3- II) التكثيف فوق السطوح الباردة (نظرية نوسلت) |
| 34 | ..... (4- II) التكثيف على السطوح الشاقولية             |
| 39 | ..... (5- II) التكثيف على سطح مائل                     |

|    |   |
|----|---|
| 40 | ..... (6- II) التكثيف على سطوح الأنابيب الأفقية                   |
| 43 | ..... (7- II) تسلسل المعادلات الحسابية للمكثفات                   |
| 48 | ..... (8- II) المقارنة بين التكثيف على السطوح الأفقية و الشاقولية |
| 50 | ..... (9- II) التكثيف داخل الأنابيب                               |
| 53 | ..... (10- II) الأبخرة المفردة (بخار مركب أو خليط ثابت الغليان)   |

### الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لظاهرتي التبخير و التكثيف

|    |  |
|----|--|
| 56 | ..... (1-III) مقدمة  |
| 57 | ..... (2-III) الأجهزة المستعملة في التجارب الخاصة بالتبخير و التكثيف |
| 57 | ..... (3-III) التجربة الأولى : ظاهرة التبخير وآلية الغليان           |
| 70 | ..... (4-III) التجربة الثانية : ظاهرة التكثيف و آلية التقطير         |

## فهرس الأشكال

### الفصل الأول : الدراسة النظرية للظاهرة التبخير

- 2 ..... اتجاه انتقال الحرارة (من السائل للبخار داخل الفقاعة) الشكل (1.I)
- 3 ..... وجود طبقة قريبة من السطح الساخن درجة حرارتها أكبر من درجة ..... الشكل (2.I)
- 5 ..... تأثير البلل السطحي على زاوية إتصاق الفقاعة ..... الشكل (3.I)
- 7 ..... الفيض الحراري على سطح سلك بلاتيني مسخن كهربائيا ..... الشكل (4.I)
- 9 ..... اتزان القوى على فقاعة البخار ..... الشكل (5.I)
- 16 ..... الفيض الحراري مقابل فائض الحرارة لغلين الماء المُنوّى باستخدام سلك بلاتيني (0,6 مم قطر) مسخن كهربائيا ..... الشكل (6.I)
- 16 ..... علاقة انتقال الحرارة في الغليان البركي عند ضغوط مختلفة ..... الشكل (7.I)
- 18 ..... نتائج غليان الحمل القسري الدوني ..... الشكل (8.I)
- 19 ..... علاقة تقريبية للغليان الميؤى مع الحمل القسري ..... الشكل (9.I)
- 21 ..... علاقة غليان الحمل القسري ذي التبريد الدوني (روزينو) ..... الشكل (10.I)
- 23 ..... تحول فقاعات البخار إلى العمود من البخار ..... الشكل (11.I)
- 24 ..... قمة الفيض الحراري للغليان المُنوّى عند ضغوط مختلفة ..... الشكل (12.I)

### الفصل الثاني : الدراسة النظرية للظاهرة التكتيف

- 31 ..... عمود التقطير و ملحقاته ..... الشكل (1. II)
- 32 ..... التكتيف الغشائي فوق سطح رأسي ..... الشكل (2. II)
- 33 ..... أنواع التكتيف مصنفة حسب التلامس بين البخار و المنطقة الباردة ..... الشكل (3. II)
- 35 ..... سريان التكتيف الغشائي على سطح شاقولي ..... الشكل (4. II)
- 39 ..... غشاء على أنبوب أفقية ..... الشكل (5. II)
- 40 ..... غشاء على سطح مائل ..... الشكل (6. II)
- 41 ..... غشاء على أنبوب أفقية ..... الشكل (7. II)

|    |   |               |
|----|---|---------------|
| 43 | .....شُمك غشاء التكتيف ومعامل انتقال الحرارة حول أنبوب أفقي | الشكل (8. II) |
| 43 | .....التدفق الرقائقي و الانتقالي و المضطرب                  | الشكل (9. II) |
| 44 | .....مقطع أفقي لغشاء شاقولي متساقط حول أنبوب شاقولي         | الشكل (10.II) |
| 45 | .....غشاء شاقولي متساقط حول أشكال مختلفة لأنابيب أفقية      | الشكل (11.II) |
| 48 | .....معاملات التكتيف الخاصة بجل المعادلة (58. II)           | الشكل (12.II) |
| 50 | .....مكثف ذو مرجع بالجاذبية (أفقي)                          | الشكل (13.II) |
| 50 | .....مكثف ذو مرجع بالجاذبية (شاقولي)                        | الشكل (14.II) |
| 52 | .....منحنى شبه تجريبي للتكتيف باستخدام الأنابيب الشاقولية   | الشكل (15.II) |
| 52 | .....التكتيف داخل أنابيب مكثف شاقولي                        | الشكل (16.II) |
| 54 | .....حزام البخار  | الشكل (17.II) |
| 54 | .....الفوهة المفلجة   | الشكل (18.II) |
| 54 | .....سريان لأعلى ولأسفل داخل الأسطوانة                      | الشكل (19.II) |

### الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لظاهرتي التبخير والتكتيف

|    |  |               |
|----|--|---------------|
| 57 | .....وحدة التبخير و التكتيف و وحدة القياس و التحكم لجهاز TE78  | الشكل (1.III) |
| 58 | .....مخطط الغليان الذي وضعه العالم "NUKIYAMA" سنة 1934   | الشكل (2.III) |
| 59 | .....غليان ذو الأنوية: nucleate boiling  | الشكل (3.III) |
| 60 | .....Stable film boiling المستقر   | الشكل (4.III) |
| 61 | .....يوضح عينة السلك wire specimen و الفروق بين تموضع قطبي التيار حسب الاستخدام                                      | الشكل (5.III) |
| 62 | .....قارورة الغليان و بها سلك العينة (specimen) من التنغستن و كيفية انتقال التيار الكهربائي في السلك حسب نمط الغليان | الشكل (6.III) |
| 63 | .....ظاهرة تشكل الفقاعات (ظاهرة الغليان ذو الأنوية)  | الشكل (7.III) |
| 63 | .....تغير المقاومة $r$ بدلالة درجة الحرارة للسلك $T_w$   | الشكل (8.III) |

|    |  |                |
|----|--|----------------|
| 66 | ..... يوضح تغيرات الفيض الحراري بدلالة الزائد في درجة الحرارة.                       | الشكل (9.III)  |
| 67 | ..... تغيرات معامل انتقال الحرارة بالغليان بدلالة الزائد في درجة الحرارة.            | الشكل (10.III) |
| 68 | ..... تغيرات التدفق الكتلي للبخار بدلالة الزائد في درجة الحرارة.                     | الشكل (11.III) |
| 69 | ..... تغيرات الشد السطحي للفقاعات بدلالة الزائد في درجة الحرارة حسب قطر الفقاعة..... | الشكل (12.III) |
| 71 | ..... مظهر حقيقي للطبقة القشيرية للماء السائل.....                                   | الشكل (13.III) |
| 71 | ..... مظهر طولي في العينة الأسطوانية (Cylinder Specimen).....                        | الشكل (14.III) |
| 72 | ..... تغير الكتلة الحجمية بدلالة درجة الحرارة المتوسطة لماء التبريد.....             | الشكل (15.III) |
| 73 | ..... تغير السعة الحرارية بدلالة درجة الحرارة المتوسطة لماء التبريد.....             | الشكل (16.III) |
| 74 | ..... تغير التوصيلية الحرارية بدلالة درجة حرارة شريط التكتيف.....                    | الشكل (17.III) |
| 76 | رقم Nusselt للتكتيف لعينة 1 الخاصة بالذهب بدلالة التدفق الحجمي لماء التبريد.....     | الشكل (18.III) |
| 77 | رقم Nusselt للتكتيف لعينة 2 الخاصة بالنحاس بدلالة التدفق الحجمي لماء التبريد.....    | الشكل (19.III) |
| 78 | رقم Nusselt للتكتيف لعينة 1 الذهب بدلالة الفاقد في درجة الحرارة                      | الشكل (20.III) |
| 79 | رقم Nusselt للتكتيف لعينة 2 النحاس بدلالة الفاقد في درجة الحرارة                     | الشكل (21.III) |

## فهرس الجداول

|  |   |             |
|--|---|-------------|
| 17   | قيم المعامل التجريبي $C_{sf}$ لتركيبات مختلفة بين السطح و السائل..... | جدول (1-I)  |
| 17   | قوة الشد السطحي بين بخار الماء والماء والسائل.....                    | جدول (2-I)  |
| <b>الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لظاهرتي التبخير والتكثيف</b> |   |             |
| 65   | القيم التجريبية لظاهرة الغليان ذو الأنوية.....                        | جدول(1-III) |
| 75   | القيم الخاصة بالتكثيف للعينتين.....                                   | جدول(2-III) |
| <b>الملحق A : الخواص الحراروفيزيائية</b>                         |   |             |
| 84   | الانتالي النوعية الكتلية للماء.....                                   | جدول (A)    |
| <b>الملحق B (الخواص الحراروفيزيائية للماء)</b>                   |   |             |
| 86   | الخواص الحرارو فيزيائية لسائل الماء.....                              | جدول (B)    |

## قائمة الرموز و الاصطلاحات

| الرموز      | الاصطلاحات (الرموز اللاتينية)                      | الوحدة             |
|-------------|--|--------------------|
| $A$         | المساحة.....                                       | $m^2$              |
| $C_l$       | الحرارة النوعية للسائل.....                        | $J / Kg. ^\circ C$ |
| $C_v$       | الحرارة النوعية للبخار.....                        | $J / Kg. ^\circ C$ |
| $C_f$       | الحرارة النوعية للمائع.....                        | $J / Kg. ^\circ C$ |
| $C_{sf}$    | معامل بين السطح و المائع.....                      | $J / Kg. ^\circ C$ |
| $D_0$       | القطر الخارجي لأنبوب.....                          | $m$                |
| $D_b$       | القطر المتوسط للفقاعة.....                         | $m$                |
| $d$         | قطر قطرة السائل.....                               | $m$                |
| $G_b$       | السرعة الكتلة للفقاعات.....                        | $kg/m . s$         |
| $g$         | تسارع الجاذبية.....                                | $m / s^2$          |
| $h$         | معامل الانتقال الحمل الحراري.....                  | $W/m^2 . K$        |
| $h_b$       | معامل الانتقال الحراري للغليان المنوى.....         | $W/m^2 . K$        |
| $\bar{h}_b$ | معامل الانتقال الحراري المتوسط للغليان المنوى..... | $W/m^2 . K$        |
| $h_c$       | معامل الانتقال الحراري للحمل.....                  | $W/m^2 . K$        |
| $h_{fg}$    | أنتالبي التبخر الخاص بالماء.....                   | $J / Kg$           |
| $h_r$       | معامل الانتقال الحراري بالاشعاع.....               | $W/m^2 . K^4$      |
| $h_{v,P}$   | معامل التبخر لضغط النظام.....                      | $W/m^2 . K$        |
| $h_{v,atm}$ | معامل التبخر عند الضغط الجوي.....                  | $Pa$               |
| $K_f$       | معامل التوصيل للمائع.....                          | $W/m . K$          |
| $K_l$       | معامل التوصيل للسائل.....                          | $W/m . K$          |
| $K_v$       | معامل التوصيل للبخار.....                          | $W/m . K$          |
| $Q_m$       | تدفق كتلي.....                                     | $kg/ s$            |
| $Q_v$       | تدفق حجمي.....                                     | $m^3/ s$           |
| $q$         | التيار الحراري.....                                | $W$                |
| $P_v$       | ضغط البخار.....                                    | $Pa$               |
| $Q_{max}$   | كمية الحرارة المنقولة لكل قطر الفقاعة.....         | $J$                |
| $Q_t$       | معدل انتقال الحرارة الكلي.....                     | $w$                |

|             |       |  |       |
|-------------|-------|--|-------|
| $Pa$        | ..... | ضغط المائع                                       | $P_f$ |
| $Pa$        | ..... | ضغط السائل                                       | $P_l$ |
| $Pa$        | ..... | ضغط البخار                                       | $P_v$ |
| -           | ..... | رقم رايلي (RAYLEIGH) لانتقال الحرارة بالحمل الحر | $Ra$  |
| $m$         | ..... | نصف قطر الفقاعة                                  | $r$   |
| $s$         | ..... | الزمن  | $t$   |
| $^{\circ}C$ | ..... | درجة الحرارة                                     | $T$   |
| $^{\circ}C$ | ..... | درجة حرارة السائل                                | $T_l$ |
| $^{\circ}C$ | ..... | درجة حرارة البخار                                | $T_v$ |
| $^{\circ}C$ | ..... | درجة الحرارة المتوسطة للشريط                     | $T_f$ |
| $^{\circ}C$ | ..... | درجة حرارة السطح                                 | $T_w$ |
| $m/s$       | ..... | المركبة العمودية لسرعة الارتطام                  | $V$   |

### الرموز الإغريقية

|           |       |                                    |               |
|-----------|-------|------------------------------------|---------------|
| $m^2/s$   | ..... | الانتشارية الحرارية للمائع         | $\alpha$      |
| $mol$     | ..... | معامل التمدد الحراري               | $\beta$       |
| $m$       | ..... | سمك غشاء التكتيف                   | $\delta$      |
| $J$       | ..... | حرارة التبخر                       | $\lambda$     |
| $N.s/m^2$ | ..... | اللزوجة التحريكية للمائع           | $\mu$         |
| $m^2/s$   | ..... | اللزوجة الحركية للمائع             | $\nu$         |
| $Kg/m^3$  | ..... | الكتلة الحجمية للسائل المشبع       | $\rho_l$      |
| $Kg/m^3$  | ..... | الكتلة الحجمية للبخار المشبع       | $\rho_v$      |
| $Kg/m^3$  | ..... | كثافة البخار عند درجة حرارة الغشاء | $\rho_{vf}$   |
| $N/m$     | ..... | الشدة السطحي                       | $\sigma$      |
| $Pa$      | ..... | إجهاد القص                         | $\tau$        |
| -         | ..... | معامل إشعاعية السطح                | $\varepsilon$ |
| $W$       | ..... | الاستطاعة الكهربائية لتسخين السلك  | $\omega$      |

## المقدمة

توجد المادة في الطبيعة على هيئة بخار و سائل و صلب، و يقصد بالمائع أحد الطورين بخار أو سائل، وكثيرا ما يحدث له عملية تغير الطور حيث يتم انتقال الحرارة بالحمل عند ملامسة المائع لسطح صلب شرط اختلافهما في درجة الحرارة، ففي حالة تحول المائع من الطور السائل إلى الطور البخاري تسمى هذه العملية بالتبخير، وفي حالة تحول المائع من الطور البخاري إلى سائل تسمى هذه العملية بالإسالة. و يوجد من بين الظواهر التي تحدث للمائع ظاهرة الغليان المصاحبة لعملية التبخر اللذان يشكلان عملية مركبة تسمى التبخير، وكذلك الحال بالنسبة لظاهرة التقطير المصاحبة لعملية الإسالة اللذان يشكلان معا ظاهرة مركبة و التي تسمى بالتكثيف، من هنا يمكن القول أن عملية التبخير هي عمليتين ، عملية حرارية تتمثل في التبخر و عملية ميكانيكية تتمثل في الغليان، في حين عملية التكثيف هي الأخرى عبارة عن عمليتين، عملية حرارية تتمثل في الإسالة و عملية ميكانيكية تتمثل في التقطير. و من الجدير بالذكر التفريق بين مصطلحي التكثيف و التكثف حيث أن التكثف عملية حرارية لتغير الطور من البخاري إلى الصلب و يسمى في بعض المراجع بالتكاثف، أما التكثيف فهو كما سبق ذكره على أنه عملية مركبة و معقدة.

و يتمثل الهدف الأساسي من هذا البحث في إبراز أهمية ظاهرتي التبخير و التكثيف في إنتاج الطاقة الكهربائية عن طريق المبدلات الحرارية (المراجل و المكثفات) و ذلك في بحث و استنباط العلاقات في المراجع و مقارنتها ببعضها البعض و جانب تجريبي يمس ظاهرة التبخير و التكثيف في جوانب بسيطة .

و يحتوي هذا البحث إجمالاً على ثلاثة فصول حيث نتطرق في الفصل الأول إلى دراسة ظاهرة التبخير نظرياً، حيث سوف نسرد مختلف العلاقات الخاصة بالظواهر الفيزيائية الداخلة في عملية التبخير(انتقال الحرارة، انتقال الكتلة، تغير الطور، مراحل الغليان حسب العالم نيكياما Nukiyama، أنواع الغليان، قوة الشد السطحي و تأثيرها على تشكل الفقاعة ، أنواع المبدلات، وغير ذلك... ) أما في الفصل الثاني سنهتم بالدراسة النظرية لظاهرة التكثيف حيث كذلك نتطرق إلى مختلف العلاقات الخاصة بالظواهر الفيزيائية الداخلة في عملية التكثيف (انتقال الحرارة، انتقال الكتلة، تغير الطور، نظرية نيسالت Nuselt الخاصة بالتكثيف، أنواع التكثيف ، أنواع المكثفات والمقارنة بينها...) وفي الفصل الثالث سنقوم بالدراسة التجريبية لكل من ظاهرتي التبخير و التكثيف حيث سنقوم فيما يخص التجربة الأولى -و هي التبخير- بدراسة الغليان البركي لسلك من التنغستن مغمور في سائل الماء تحت الضغط الجوي،

حيث السلك المستخدم في التجربة يعطي فقط الغليان الطبيعي و المنوى بنوعيه (الفقاعات المنعزلة ، والفقاعات المتصلة)، أما التجربة الثانية -و المتمثلة في التكتيف- فسنقوم بمقارنة عينتين من الأسطح، العينة الأولى مطلية بالذهب و الثانية مطلية بالنحاس، وذلك من أجل مقارنة ما يحدث من اختلاف في ظاهرة التكتيف من حيث النمط الذي يعتمد على طبيعة السطح المكثف، ومناقشة النتائج المتحصل عليها من خلال التجارب و في الأخير الخروج بخلاصة عامة.

# الفصل الأول

## ظاهرة التبخير

يحتوي هذا الفصل على مختلف العلاقات النظرية الخاصة بالظواهر الفيزيائية الداخلة في عملية التبخير و المتمثلة في

- (1-I) آلية التبخير.
- (2-I) قوة الشد و تأثيرها في تكوين فقاعات البخار .
- (3-I) تجربة Nukyama للغليان البركي .
- (4-I) اتزان القوى على فقاعة البخار.
- (5-I) آلية تشكل فقاعات البخار.
- (6-I) تأثير الضغط و الخواص على معامل التبخر.
- (7-I) تصنيف معدات التبخير.
- (8-I) معدلات انتقال الحرارة بالغليان.
- (9-I) انتقال الحرارة بالغليان البركي.
- (10-I) الغليان المُنَوَّى والحمل القسري .
- (11-I) الفيض الحراري الأقصى للغليان المُنَوَّى.

**تمهيد :** إن ظاهرة التبخر ظاهرة فيزيائية معقدة تحوي ظاهرتين أساسيتين ، الأولى حرارية و هي عملية التبخر، و الثانية ميكانيكية و تتمثل في ظاهرة الغليان ، و تحتاج عملية التبخر لسائل يلامس سطح صلب ساخن له درجة حرارة أكبر من درجة حرارة السائل، وللإلمام بهذه الظاهرة يجب دراسة أولاً آلية التبخر و عملية تشكل فقاعات البخار داخل وسط السائل التي تحتاج لفهم سلوك الفقاعة البخارية الملتصقة بشد سطحي مع السطح الساخن. و من الدراسات التجريبية لوحظ أن للغليان عدة أنماط تعتمد على الفرق في درجة الحرارة بين السطح الساخن والسائل من جهة وكذلك تعتمد على درجة حرارة السائل بالنسبة لنقطة التشبع، و يجب كذلك دراسة عملية التبخر من حيث تأثير الضغط و خواص السائل في معاملات انتقال الحرارة بالتبخر.

**I-1) آلية التبخر :** تخضع آلية التبخر لمفاهيم و تعاريف و فرضيات و تستند لتجارب مخبرية و هي كالتالي :

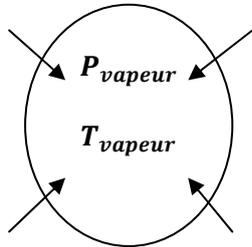
**المفهوم 1 :** عندما يتدفق بخار الماء من خلال أنبوب ساخن مغمور في بركة سائل ماء، تتكون فقاعات صغيرة من بخار السائل عند نقاط عشوائية على سطح الأنبوب (حيث لا توجد فقاعات من البخار في أماكن أخرى غير السطح)

**المفهوم 2 :** و تنتقل الحرارة من السطح الساخن للسائل المحيط بالحمل فقط.

**المفهوم 3 :** و تنتقل بعض الحرارة من السائل في اتجاه الفقاعة ،مسببة بذلك زيادة في عملية التبخر من السطح الداخلي للفقاعة إلى الفقاعة ذاتها.

**المفهوم 4:** وعندما تتكون قوة طفو كافية بين الفقاعة و السائل ،فان الفقاعة تنطلق و تتحرر من القوى التي تربطها بسطح الأنبوب ، و ترتفع إلى سطح بركة السائل.

**فرضية كلفن :** وقد افترض كلفن أن درجة حرارة السائل  $T_{liquide}$  لا بد أن تكون أعلى من درجة حرارة التشبع للبخار  $T_{vapeur}$  داخل الفقاعة كشرط لحدوث هذه الظاهرة .  $(T_l > T_v)$



$P_{liquide}$

$P_{liquide} > P_{vapeur}$

$T_{liquide}$

$\Rightarrow T_{liquide} > T_{vapeur}$

و منه الحرارة تنتقل من السائل للبخار



الشكل (1.I) : اتجاه انتقال الحرارة (من السائل للبخار داخل الفقاعة)

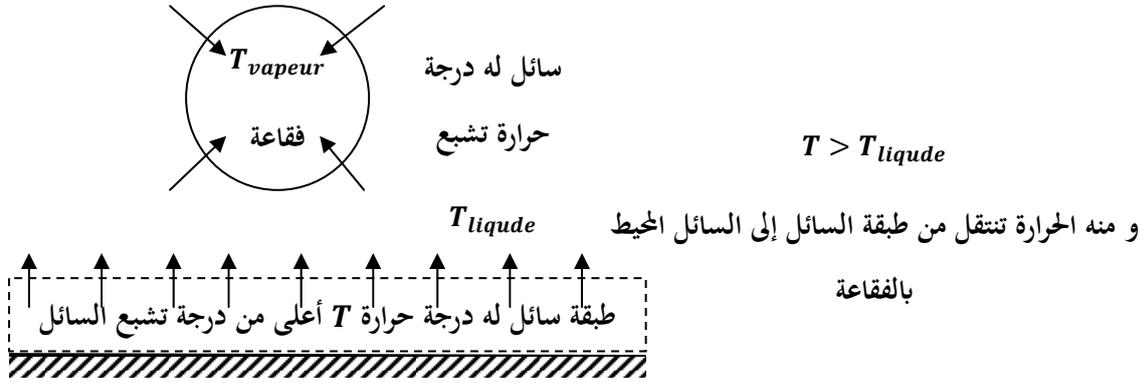
تفسير فرضية كلفن : يمكن لفرضية كلفن التحقق ، إذ أن الطبيعة الكروية للفقاعة تتسبب في إيجاد قوى سطحية للسائل على الفقاعة ، بحيث يكون ضغط التشبع داخل الفقاعة أقل من ضغط السائل المحيط بها . و نتيجة لذلك تكون درجة حرارة تشبع البخار داخل الفقاعة أقل من تلك للسائل المحيط بها ، مما يتسبب في تدفق الحرارة من السائل المحيط بالفقاعة إلى الفقاعة ذاتها.

**المفهوم 5** : و يعتمد عدد النقاط التي تتولد منها الفقاعات على ما يلي :

**أولاً** : طبيعة و نسيج سطح الأنبوب. أي : كل مادة لها فعالية معينة في إنتاج فقاعات البخار.

**ثانياً** : و تزداد بزيادة خشونة السطح . يعني : كلما زادت الخشونة زادت التواءات و التضاريس على السطح .

**المفهوم 6** : و لقد تم رصد طبقة من السائل قريبة من السطح الساخن درجة حرارتها أعلى من درجة التشبع . و تقل درجة تحمية هذه الطبقة كلما زادت درجة خشونة السطح .



**الشكل (2.I)** : وجود طبقة قريبة من السطح الساخن درجة حرارتها أكبر من درجة حرارة تشبع السائل

**المفهوم 7** : و انتقال الحرارة بالتبخير بدون استعمال تحريك ديناميكي ، عبارة عن خليط من انتقال الحرارة بالحمل

الحر من السائل إلى الفقاعات و حمل إضافي يتولد من تدفق فيض الفقاعات للأعلى في السائل .

**المفهوم 8** : و إذا كان فرق درجة الحرارة بين سطح الأنبوب و السائل المغلي بسيطاً ، فان الفقاعات تتابع ببطء ،

ويكون معدل انتقال الحرارة مساويا للحمل الحر للسائل .

عبارة رقم **Nuselt** : بالنسبة لحمل حر على أنبوب أفقي قطره الخارجي  $D_0$  رقم **Nuselt** يساوي ما يلي :

$$Nu = 0,47(Gr.Pr)^{0,25} \quad (1.I)$$

$$\Rightarrow \frac{h_c \cdot D_0}{k_f} = 0,47 \left( \left( \frac{D_0^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu_f^2} \right) \left( \frac{\mu_f C_f}{k_f} \right) \right)^{0,25} \quad (2.I)$$

و رقم Prandtl يعطى كما يلي :

$$Pr = \frac{\mu_f C_f}{k_f} = \frac{(\mu_f / \rho_f)}{(k_f / \rho_f \cdot C_f)} = \frac{v_f}{a_f} = \frac{\text{الانتشارية الحركية}}{\text{الانتشارية الحرارية}} \quad (3.1)$$

و رقم Grashof يعطى كما يلي :

$$Gr = \frac{D_0^3 \cdot \rho_f^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu_f^2} = \frac{D_0^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu_f^2 / \rho_f^2} = \frac{g \cdot D_0^3}{v_f^2} \beta \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

حيث جداء رقم Grashof و رقم Prandtl يعطي رقم Rayleigh :

$$Ra = Gr \cdot Pr = \left( \frac{g \cdot D_0}{v_f^2} \beta \cdot \Delta t \right) \left( \frac{v_f}{a_f} \right) = \frac{g \cdot D_0}{a_f \cdot v_f} \beta \cdot \Delta t \quad (5.1)$$

و حيث في المعادلة (2.1) يعبر المقدار  $h_c$  عن معامل الانتقال الحراري بالحمل الحر ، و  $\beta$  هو معامل

التمدد الحراري و كل الخواص الطبيعية يتم تقديرها عند درجة حرارة متوسطة للشريط  $T_f$  ، و تساوي :

$$T_f = \frac{(T_w + T_l)}{2}$$

يمكن حساب كمية البخار المنتج من الفقاعات المتصاعدة بالعلاقة التالية :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{ev} = h_c(T_w - T_{sat}) = \dot{m}_v L_{ev} & (a) \\ \dot{m}_v = \frac{h_c(T_w - T_{sat})}{L_{ev}} & (b) \end{cases} \quad (6.1)$$

(2-I) قوة الشد و تأثيرها في تكوين الفقاعات :

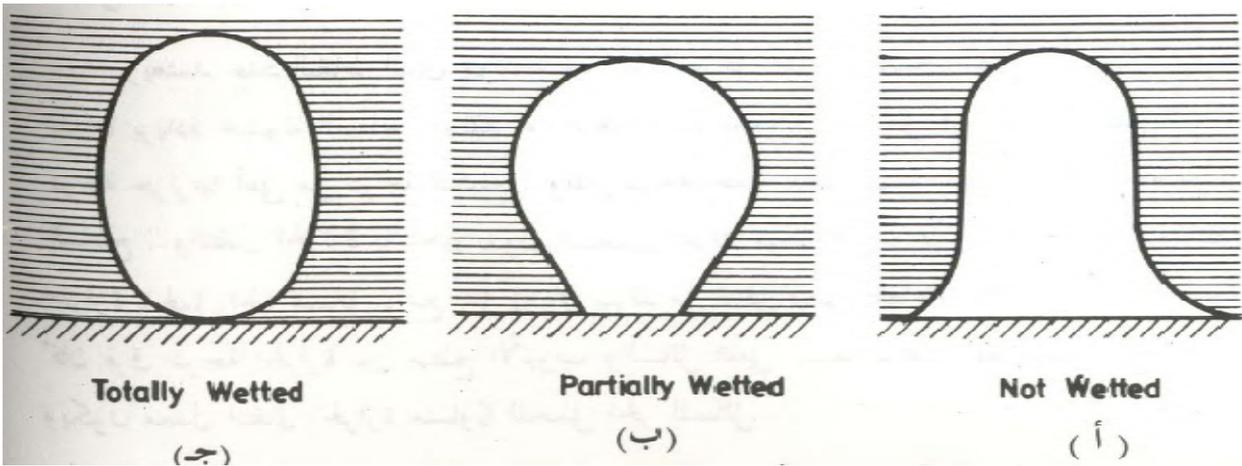
**تعريف قوة الشد :** يقع أي جزيء من الجزيئات داخل سائل ما تحت تأثير مجموعة من قوى الجذب في كافة الاتجاهات ، و محصلة هذه القوى صفر، إلا أن الجزيء الموجود على سطح السائل يتأثر بقوى فعالة صافيتها قوة تماسك تتجه إلى داخل السائل عموديا على السطح الحر. لذلك يتطلب تحريك الجزيئات إلى السطح الحر بذل عمل ضد هذه القوة المضادة و بالتالي فإن طاقة جزيئات السطح أعلى من طاقة الجزيئات الموجودة بالداخل.

الشد السطحي لسائل هو العمل الواجب بذله لجلب جزيئات من داخل السائل إلى سطحه لتكوين وحدة مساحات جديدة لهذا السطح ( $N \cdot m/m^2$ ) ، ويساوي هذا العمل عدديا القوة القابضة المماسية المؤثرة على خط و همي مرسوم على السطح طولها الوحدة ( $N/m$ ) .

و في ظاهرة الغليان يكون مفهوم الشد السطحي ذو أهمية ، والجدول التالي به مقدار الشد السطحي  $\sigma$  للماء الملامس للهواء محسوب بالوحدة  $(N/m)$  حسب درجة الحرارة :

|        |        |        |        |        |        |        |        |        |                |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| 48,9   | 37,8   | 32,2   | 26,7   | 21,1   | 15,6   | 10,0   | 4,4    | 0,0    | $T(^{\circ}C)$ |
| 0,0680 | 0,0699 | 0,0709 | 0,0718 | 0,0725 | 0,0735 | 0,0741 | 0,0750 | 0,0756 | الشد السطحي    |

أما تأثير قوة الشد السطحي على تكوين الفقاعة ونموها كأحد المؤثرات الأخرى في عملية الغليان موضح في الشكل (3,I). و من الدراسات السابقة وجد أن قوة الشد السطحي للماء الملامس للهواء تساوي  $0,0720 N/m$  عند درجة حرارة الغرفة ، في حين أن معظم المواد العضوية تتراوح قوة شدتها السطحي ما بين  $0,0020 \rightarrow 0,0030 N/m$  عند درجة حرارة الغرفة . و قوة الشد السطحي لمعظم السوائل الملامسة للأجسام المعدنية تختلف عن قيمتها عند ملامستها للهواء ، إذ إن معدل تبخر الماء أكبر من ذلك للمواد العضوية تحت نفس الظروف. وفي حالة صغر قيمة قوة الشد السطحي  $\sigma$  للسائل فإنه لا يببل السطح ، و بالتالي فإن الفقاعة الموجودة في الشكل (3.I أ) تغلق بواسطة السائل من الأعلى و ترتفع . و بالنسبة للسوائل ذات قوة الشد السطحي المتوسطة ، كما في الشكل (3.I ب) فمن الممكن أن ينشأ توازن لحظي بين الفقاعة و السطح الساخن. و في هذه الحالة يلزم تكوين فقاعات ذات حجم أكبر حتى تتمكن قوة الطفو من تحرير الفقاعة من السطح . و توضح الفقاعة الموجودة في الشكل (3.I ج) تأثير قوة الشد السطحي العالية على تكوين الفقاعة .



الشكل (3.I) : تأثير الببل السطحي على زاوية إتصاق الفقاعة .

أنواع الغليان : يعتمد هذا التصنيف على مكان تواجد السطح الساخن بالنسبة للسائل و هناك ثلاث أنواع :

1. الغليان عند ملامسة سطح لسائل : و في حالة لامس سطح ساخن سائل ما ، وتكون درجة حرارة السطح أعلى من درجة حرارة تشبع السائل ، فان الغليان يحدث . و يعتمد معدل تدفق الحرارة من السطح إلى السائل على فرق درجة الحرارة بين السطح الساخن و درجة حرارة تشبع السائل .

2. الغليان عند غمر سطح داخل سائل : و إذا كان سطح التسخين مغمورا في السائل و تحت السطح الحر للسائل

3. الغليان عند إحاطة السطح بالسائل : و إذا كان سطح التسخين يحيط بالسائل ، يوجد حالتين (أنبوب بداخله سائل أو مجرى من سطح صلب ساخن يحمل سائل يتحرك هذا السائل بسرعة و له سطح حر )

ونجد ثلاث أنواع من الغليان حسب درجة حرارة السطح الساخن بالنسبة لدرجة حرارة التشبع للسائل :

1. الغليان البركي (*pool boiling*): إذا كان درجة حرارة السطح الساخن أكبر من درجة حرارة التشبع للسائل عند الضغط المحدد في الدراسة فان العملية تسمى غليانا بركيا.

2. الغليان المشبع (*Bulk boiling*) : إذا كان درجة حرارة السطح الساخن مساوية لدرجة حرارة التشبع عند الضغط المحدد في الدراسة فتسمى العملية بالغليان المشبع.

3. الغليان الدوني أو المحلي (*subcooled or local boiling*) : إذا كان درجة حرارة السطح الساخن أقل من درجة حرارة التشبع للسائل عند الضغط المحدد في الدراسة ، فتسمى غليانا محليا أو دونيا .

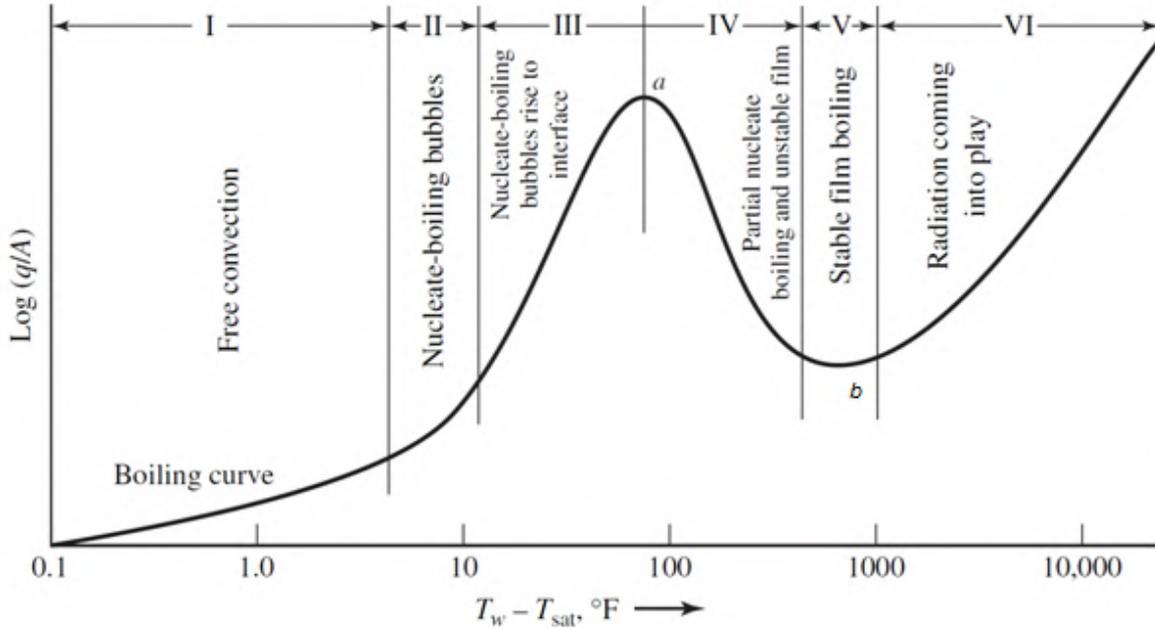
3-I تجربة Nukiyama للغليان البركي : و يوضح شكل (4.I) الأطوار المختلفة للغليان البركي ، حيث بيانات الفيض الحراري لسلك بلاتيني مسخن بتيار كهربائي و مغمور في الماء ، مرسومة في الشكل مقابل الفرق بين درجتي حرارة السطح و تشبع السائل  $(T_w - T_{sat})$  .

تفسير المنحني : المنحني منقسم لستة مناطق

- المنطقة I : تكون تيارات الحمل الحر مسؤولة عن حركة السائل بالقرب من السطح الساخن . و يكون السائل القريب من السطح المعدني في هذه المنطقة ذو درجة حرارة أعلى بقليل من درجة التشبع ، و بالتالي يتبخر بمجرد صعوده إلى السطح الحر .

- المنطقة II : تبدأ الفقاعات في التكون على سطح السلك الساخن ، و تبرد في السائل بعد انفصالها من السطح المعدني . و تمثل هذه المنطقة بداية الغليان المُنَوَّى (الغليان ذو الأنوية و نقصد بالأنوية أن الفقاعة المكتملة تكون لها نواة من البخار) . و يصير مستوى الطاقة في السائل الملاصق للسلك الساخن عاليا بدرجة تكفي لانفصال بعض الجزيئات عن الجزيئات المحيطة بها ، وتشكل نويات بخارية تنمو باطراد و تصبح في النهاية فقاعات بخارية. و تحدث

هذه العملية توافقيا في عدد من النقاط المفضلة على سطح السلك الساخن . وفي البداية ، تكون فقاعات البخار صغيرة و تتكاثف أثناء صعودها في السائل قبل أن تصل إلى السطح الحر للبركة . ولكن بزيادة الزائد الحراري يزداد كل من عدد الفقاعات و حجمها [9].



شكل (4.I) : الفيض الحراري على سطح سلك بلاتيني مسخن كهربائيا .

- المنطقة III : و بزيادة الزائد الحراري تزداد سرعة تكون الفقاعات التي تصعد إلى سطح السائل حيث تنهار هناك ، و يتضح هذا في المنطقة III . و تتمكن هذه الفقاعات في النهاية من الوصول إلى سطح السائل . و هذا هو ما توضحه المنطقة III بالشكل المذكور أعلاه .

- المنطقة IV : و إذا استمرت الزيادة في الفاض الحراري بين السطح الساخن و تشبع السائل ، فان معدل إنتاج الفقاعات يزداد بدرجة كبيرة ، و تتجمع هذه الفقاعات مكونة بذلك طبقة بخار أو بطانية بخار تغطي السطح الساخن ، و تمنع دخول السائل الطازج و احتلال مكانه على السطح الساخن . ويسبق هذه الخطوة ارتفاع البخار إلى سطح السائل على هيئة أعمدة بخارية مستمرة بدلا من فقاعات منفصلة . وبعد تشكل غطاء البخار حول السطح الساخن يصبح من الضروري انتقال الحرارة من السطح خلال هذا الغطاء قبل أن تصل إلى السائل وحتى تستمر عملية الغليان. و بسبب صغر قيمة موصلية طبقة البخار فان المقاومة الحرارية لغطاء البخار المتكون تكون عالية ، و ينتج عن ذلك نقص في الفيض الحراري مع زيادة الزائد الحراري ، و تتضح هذه الظاهرة في المنطقة IV ، و التي تسمى بمنطقة الغليان الغشائي أو الفيلمي . وتمثل هذه المنطقة عملية انتقال من الغليان المُنَوَّى إلى الغليان الغشائي وهي منطقة غير مستقرة.

- المنطقة V : ويتكون الغليان الغشائي المستقر في المنطقة V، وفيها تكون درجة حرارة السطح اللازمة عالية لإنتاج غليان غشائي مستقر.

- المنطقة VI : وعند توفر شروط الاستقرار لغشاء البخار ، فان جزءا كبيرا من الحرارة المفقودة من السطح ينتقل نتيجة الإشعاع الحراري كما هو موضح بالمنطقة VI .

النقاط المحرجة في المنحني : و تتضح كيفية نشأة غطاء البخار في الشكل (I. 4) . فعند النقطة a فان حالة السلك المسخن كهربائيا تكون غير مستقرة ، إذ إن أية زيادة صغيرة في الزائد الحراري  $\Delta T_s$  عند هذه النقطة ينتج عنها نقص في الفيض الحراري للغليان . ولكن في نفس الوقت يجب أن يبدد السلك نفس الفيض الحراري ، وإلا فان درجة حرارته سوف ترتفع ، وينتج عن ذلك أن تتحرك عملية الغليان إلى أسفل منحني الغليان . وسوف يعود التوازن طبيعيا عند النقطة b فقط في منطقة الغليان الغشائي . وعند هذه النقطة ، تكون درجة الحرارة قد فاقت درجة حرارة انصهار السلك فيحدث احتراق . أما إذا تناقصت الطاقة الكهربائية المغذية للسلك عند النقطة a ، فيمكن أن نلاحظ الغليان المُنَوَّى الجزئي ومنطقة الغليان الغشائي غير المستقر . وفي منطقة الغليان المُنَوَّى ، فان الفقاعات تنشأ عن طريق تمدد الغازات الحبيسة ، أو الأبخرة الموجودة في التجاويف الموجودة في السطح ، وتنمو الفقاعات حتى تبلغ حجما معيناً يعتمد على قوة الشد السطحي عند السطح البيني للسائل و البخار و الضغط ودرجة الحرارة. واعتمادا على قيمة الزائد الحراري فان الفقاعات قد تنهار على السطح ، أو تتمدد وتنفصل عن السطح لتنهار في السائل دون الصعود للأعلى ، أما إذا كانت قيمة الزائد الحراري عالية بالدرجة الكافية ، فسوف تتمكن الفقاعات من الصعود إلى سطح السائل الحر قبل أن تنهار هناك . وعند مشاهدة ظروف الغليان المحلي فيمكن تفسير آلية انتقال الحرارة المبدئية على أنها نتجت عن الإثارة المركزية عند سطح انتقال الحرارة ، والذي يسبب معدلات انتقال الحرارة العالية التي لوحظت أثناء عملية الغليان وفي حالة الغليان المشبع للسائل فمن الممكن أن تنفصل الفقاعات من السطح الساخن بسبب تأثير قوة الطفو وتتحرك في داخل السائل ، وفي هذه الحالة ، يتأثر معدل انتقال الحرارة بكل من الاضطراب أو الإثارة التي تسببها الفقاعات ، وكذلك انتقال الطاقة بواسطة البخار إلى بدن السائل .

**I-4) اتران القوى على فقاعة البخار :** و لقد أثبتت التجارب أن الفقاعات لا تكون دائما في حالة اتران ديناميكي حراري مع السائل المحيط بها ، بمعنى أن البخار داخل الفقاعة لا يكون بالضرورة عند نفس درجة حرارة السائل المحيط بها . ويمكن دراسة حالة الفقاعة الكروية الموجودة في الشكل (I.5) ، حيث يجب أن تتوازن قوى الضغط على مساحة مقدارها  $\pi r^2$  وتعمل قوة الشد السطحي على طول بيبي مقداره  $2\pi r$  . وينتج عن اتران القوى مايلي

$$\pi r^2 (P_v - P_l) = 2\pi r \sigma \quad (7.1)$$

$$\boxed{(P_v - P_l) = \frac{2\sigma}{r}} \quad (8.1)$$

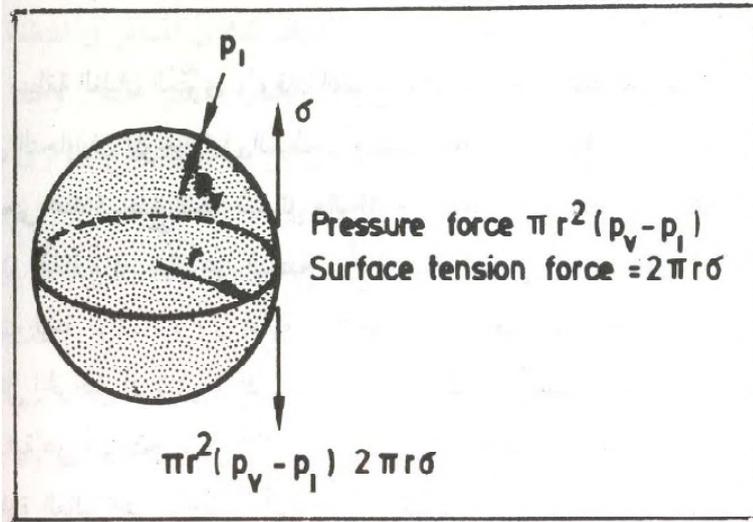
حيث

$P_v$  يمثل الضغط داخل فقاعة البخار في حالة عدم التبلل و التبلل الجزئي.

$\sigma$  شد السطح البيني للسائل و البخار

$P_l$  يمثل ضغط السائل

$r$  نصف قطر الفقاعة



شكل (5. I) : اتزان القوى على فقاعة البخار

حالات الفقاعة بعد التحرر من السطح الساخن :

حالة 1 (ثبات حجم الفقاعة) : و يمكننا دراسة حالة فقاعة في حالة اتزان قوى الضغط  $P_v = P_l$ ، بمعنى أن هذه الفقاعة لا تنمو و لا تنهار . وعليه أيضا اعتبار أن  $(T_v = T_l)$  ، أي أن درجة حرارة البخار داخل الفقاعة  $T_v$  مساوية لدرجة حرارة التشبع  $T_{sat}$  المناظرة للضغط  $P_l$  .

حالة 2 (نقصان حجم الفقاعة) : فإذا كانت درجة حرارة السائل  $T_l$  هي درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط السائل  $T_{sat}$  ، و كانت أقل من درجة الحرارة داخل الفقاعة  $T_v$  ، أي  $(T_v > T_l)$  ومنه فان الحرارة سوف تنتقل من داخل الفقاعة إلى خارجها ، مما يؤدي إلى تكثف البخار داخلها و بالتالي انهيارها . وهذا هو تفسير الظاهرة التي تحدث عندما تنهار الفقاعات على السطح الساخن أو في بدن السائل.

حالة 3 (زيادة حجم الفقاعة) : ويجب على الفقاعات أن تستقبل الحرارة من السائل حتى تنمو ويزداد حجمها، وتنطلق إلى أعلى سطح السائل الحر . وهذا يستوجب أن يكون السائل محمي بحيث تكون درجة حرارة السائل أعلى من درجة حرارة البخار داخل الفقاعة يعني  $(T_v < T_l)$ .

و الحالة الأكثر حدوثا هي الحالة 1 ، أما الحالة 3 يطلق عليها اسم الحالة شبه المستقرة ، و لقد تم ملاحظة هذه الحالة معمليا ، ونسب إليها نمو الفقاعة بعد انفصالها من السطح الساخن في مناطق الغليان المُنَوَّى . ويمكن مشاهدة عدة مراحل لعملية الغليان إذا غمرنا سلكا نحاسيا أفقيا (يسخن من أحد أطرافه ) في محلول أيزوبروبانول ، وبسبب وجود التدرج أو الانحدار الحراري نتيجة تسخين طرف واحد من السلك فمكنا أن نلاحظ عدة مراحل متزامنة للغليان.

ويمكن التحكم في درجة حرارة الطرف الآخر بحيث تكون درجة حرارة السطح هناك أعلى قليلا من درجة حرارة بدن السائل بحيث يتولد غليان بالحمل الحر عند هذا الطرف . وتزداد درجة الحرارة ، بطبيعة الحال ، كلما اتجهنا إلى ناحية الطرف المسخن ، وبالتالي يمكن أن تتولد في هذه المنطقة عملية غليان مُنَوَّى . ومع زيادة درجة الحرارة بعد تجاوز هذه المنطقة يمكن للغليان أن يتحول تدريجيا على طول السلك الساخن إلى مرحلة الغليان الغشائي عند الطرف الساخن . ويزيادة درجة حرارة السطح تدريجيا ، عن طريق زيادة التسخين عند مقطع الغليان المُنَوَّى ، يمكن أن تبدأ الفقاعات المنفصلة في الالتحام ، بعد ذلك يتحول الغليان إلى النوع الانتقالي ، وفي النهاية عند ارتفاع درجة الحرارة إلى مستوى معين يصبح المقطع مغطى تماما بغشاء من البخار ، بعد ذلك يبدأ البخار في الانطلاق من السطح الساخن على هيئة فقاعات كبيرة الحجم [5].

ويمكن الحصول على شكل (I. 4) عن طريق الزيادة التدريجية في درجة حرارة سطح سلك نحاسي  $T_w$  مثلا . إذا ارفعت درجة الحرارة  $T_w$  ببطء ثم ثبتت ، فمن الممكن الوصول إلى أي نقطة من المنحني في هذا الشكل . أما إذا تم رفع قيمة الطاقة الكهربائية المستخدمة في تسخين السلك النحاسي  $\omega$  ببطء ، فانه لن يمكن الاحتفاظ بنقط متزنة بين النقطتين a و b . وفي مثل هذه الحالة ، فإن زيادة الفيض الحراري عن قيمته الحرجة عند النقطة b سوف تؤدي إلى انتقال تدميري سريع إلى نقطة الغليان الغشائي ، عندها يمكن أن تصل قيمة فائض الحرارة إلى درجة كافية لصهر سطح الغليان .

**I-5) آلية تشكل فقاعات البخار :** وعملية نمو فقاعة هي عملية غاية في التعقيد . وبالرغم من هذا ، فانه يمكن إعطاء تفسير كفي عن آلية هذه العملية. و تحدث عند انتقال الحرارة من السائل إلى السطح البيني للسائل و البخار. وتبعاً لذلك يحدث التبخر عند السطح ، وينشأ عن ذلك زيادة في الحجم الكلي للبخار . وإذا افترضنا أن ضغط

السائل قد ظل ثابتا ، فمن معادلة اتزان الفقاعة الكروية ، نجد أن الضغط داخل الفقاعة يتناقص . وبانخفاض الضغط داخل الفقاعة ، يحدث انخفاض مناظر في درجة حرارة البخار، وبالتالي ينتج فرق في درجة الحرارة بين السائل و البخار ، إذا ظلت الفقاعة موجودة في نفس الموضع من السائل . وعلى كل ، فان الفقاعة سوف ترتفع إلى أعلى تاركة السطح الساخن ، وكلما ارتفعت أكثر تناقصت درجة حرارة السائل . وبمجرد دخول الفقاعة إلى منطقة ذات درجة حرارة أقل من درجة حرارة البخار داخل الفقاعة ، فان الحرارة سوف تنتقل إلى خارج الفقاعة التي تنهار عندئذ. وبالتالي فمن الممكن أن تصل عملية نمو الفقاعة إلى حالة اتزان عند أحد المواضع داخل السائل . أما إذا كان السائل محمي بدرجة كافية ، فان الفقاعات تكون لديها الفرصة للوصول إلى سطح السائل الحر قبل أن تنهار .

وهناك جدل وخلاف على كيفية تكون الفقاعات بدقة على السطح الساخن . يمكن أن يلعب السطح من حيث الخشونة ونوعية المعدن دورا رئيسيا في عملية تكون ونمو الفقاعة على سطح الانتقال الحراري . وليس هناك حتى الآن حل متفق عليه بخصوص هذه العملية وما زالت القضية قيد البحث المركز . ولقد وجد الباحثون أن عوامل كثيرة تؤثر في انتقال الحرارة بالغليان مما جعل مهمة الوصول إلى معادلة أو معادلتين بسيطتين لتفسير هذه الظاهرة أمرا عسيرا للغاية . أما هذه العوامل فهي كما يلي:

1- طبيعة السطح وتوزيع الفقاعات .

2- الخواص الطبيعية للمائع ، كقوة الشد السطحي ومعامل التمدد ومعامل اللزوجة.

3- تأثير فرق درجة الحرارة على تولد الفقاعات وانطلاقها .

وقبل تقديم علاقات معينة لحساب انتقال الحرارة بوساطة آلية الغليان ، يمكن أن يقترح مراجعة ما سبق ذكره وربطه بما يمكن ملاحظته من مشاهدة تجربة بسيطة للغليان . وكمثال عن ذلك ، يمكن أن نشاهد ما يحدث مثلا في عملية الغليان داخل قدر مملوءة بالماء فوق موقد منزلي حتى نحصل على الإحساس اللازم لتفهم عملية الغليان

**I-6) تأثير الضغط و الخواص على معامل انتقال الحرارة بالتبخير:** إن أغلب ما يحدث في الطرق الموجودة لحساب التبخر من البرك لا يشتمل على أكثر استخدام المعاملات التي تم الحصول عليها للسوائل المختلفة عند الضغط الجوي . فإذا كان معامل التبخر من البركة قد تم تسجيله عند الضغط الجوي ، فانه يمكن تطبيق تلك المعاملات في حالة الضغوط دون الجوية باستخدام معادلة جاكوب jakob

$$h_{v,P} = h_{v,atm} \left( \frac{P}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9.1)$$

أما في حالة الضغوط فوق الجوية حتى 37,15 جوي فيمكن تطبيق المعادلة التالية

$$h_{v,P} = h_{v,atm} \left( \frac{P}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (10.I)$$

حيث  $h_{v,P}$ ،  $P$  يمثلان معامل التبخر و الضغط للحالة الجديدة على التوالي .

وحيث إن ظاهرة تغطية (*blanketing*) السطح الساخن تنتج بسبب تجمع فقاعات البخار ، فان الضغط المؤثر على منظومة الغليان يعتبر عاملا هاما في تحديد حجم الفقاعات. وحتى الآن لم يتم الربط بين تأثير اللزوجة وقوة الشد السطحي للسوائل على معاملات تبخيرها عند الضغط الجوي بدلالة القيم المطلقة لهاتين الخاصيتين. ومن التجارب العملية لسوائل موجودة حول أنابيب تحت تأثير ضغوط متغيرة ، أمكن لكل من كرايدر و فينالبورجو (*Cryder & Finalborgo*) أثناء تجاربهم عند فيض حراري منخفض ، أن يحصلوا على مجموعة من المنحنيات ذات الانحدار المنتظم عند رسم النتائج بدلالة  $h_{v,P}$  بالمقابلة مع  $\Delta T_w$  . وكانت معادلتهم المتوسطة هي:

$$\log \left( \frac{h_{v,atm}}{h_{v,P}} \right) = 0,015(T_{atm} - T) \quad (11.I)$$

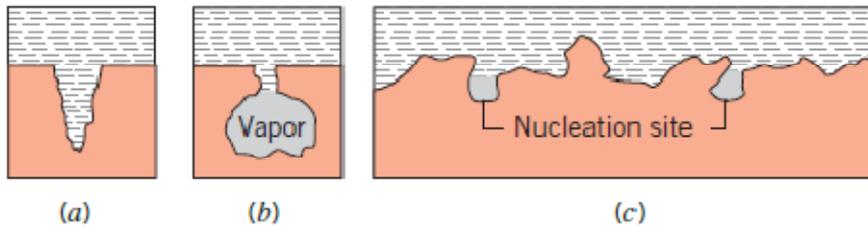
$$\frac{h_{v,P}}{h_{v,atm}} = \exp (0,015(T - T_{atm}))$$

حيث  $T$ ،  $h_{v,P}$  يمثلان معامل التبخر و درجة الحرارة ، على التوالي ، عند الظروف الجديدة للغليان .

**I-7) تصنيف معدات التبخير :** هناك نوعان رئيسان لمعدات التبخير ذات الأنابيب ، والتي تستعمل عادة في الصناعة . وهذه تكون إما غلايات أو مبادلات حرارية مبخرة . و الغلايات عبارة عن أجهزة أنبوبية يوجه إليها اللهب مباشرة ، ووظيفتها الأولى تحويل طاقة الوقود إلى حرارة كامنة للتبخر . أما المبادلات الحرارية المبخرة فهذه لا تتعرض للهب بأي شكل ، ولكنها تستعمل لتحويل الحرارة الكامنة أو الحرارة المحسوسة لمائع ما إلى حرارة كامنة لتبخير مائع آخر . وإذا ما استخدم مثل هذا المبادل في تزويد الطاقة الحرارية اللازمة عند قاع أحد أعمدة التقطير (بميت يكون الناتج بخار الماء أو غيره) ، فانه يسمى في هذه الحالة مرجل إعادة الغلي . أما إذا ما استخدم هذا المبادل بعيدا عن عمود التقطير فانه يسمى عادة بالمبخر . وربما يكون الشائع من هذه المبخرات هو المبادل الأفقي العادي أو أحد أنواعه المعدلة ، وفي مثل هذه الظروف ، فمن الممكن أن يتم التبخير إما داخل الأسطوانة أو داخل الأنابيب . وإذا كان البخار يستخدم في المبادل كوسيط تسخين ، فان تأثير وجود الهواء مع نواتج التكتيف الساخنة في تكوين الصدا يجعل من المستحسن أن يتم التبخير داخل الأسطوانة بدلا من داخل الأنابيب [8].

**8-I) معدلات انتقال الحرارة بالغليان :** يعتمد معدل انتقال الحرارة في منطقة الغليان المُنَوَّى بدرجة كبيرة على درجة الاضطراب الناتجة عن تولد الفقاعات في المنطقة الملاصقة للسطح الساخن . وتتكون الفقاعات عن طريق تمدد الغازات أو البخار المحتبس في الشقوق و الفجوات الصغيرة الموجودة على السطح المعدني الساخن . ويعتمد سلوك الفقاعات على درجة حرارة السائل و ضغطه وكذلك على قوة الشد السطحي عند السطح البيئي للسائل و البخار كما هو موضح في الشكل :

(a) فجوة مبللة بدون بخار ، (b) فجوة غير مبللة لها مدخل فيها بخار، (c) سطح خشن به فجوات منتجة للبخار



وللربط بين النتائج التجريبية للغليان المُنَوَّى ، تستخدم نسب لا بعدية لتوضيح درجة الاضطراب و حركة الخلط أثناء عملية الغليان. ويأخذ أحد هذه النسب شكل عدد رينولدز  $Re_b$  ، الذي يتم الحصول عليه باستخدام قيمة القطر المتوسط للفقاعات  $D_b$  و السرعة الكتلية للفقاعات  $G_b$  ولزوجته السائل  $\mu_l$  بالشكل التالي :

$$Re_b = \frac{D_b V_b}{\nu_l} = \frac{D_b V_b}{\mu_l / \rho} = \frac{D_b (\rho V_b)}{\mu_l} = \frac{D_b G_b}{\mu_l} \quad (12. I)$$

ويسمى هذا بعدد رينولدز للفقاعة الذي يستخدم في حساب عدد نوسلت بتطبيق المعادلة التالية

$$Nu_b = \frac{D_b \bar{h}_b}{k_l} = \phi(Re_b) \psi(Pr_l) \quad (13. I)$$

حيث  $Pr_l$  هو عدد برانتل للسائل المشبع وكذلك  $h_b$  هو معامل الانتقال الحراري للغليان المُنَوَّى ، ويعرف كما يلي :

$$\bar{h}_b = \frac{q}{A. \Delta T_x} \quad (14. I)$$

وحيث إن قيمة فائض درجة الحرارة أثناء الغليان المُنَوَّى تمثل جهد درجة الحرارة  $\Delta T_x$  المؤثر فعليا، لذلك فهي تحل محل فرق درجة الحرارة بين السطح الساخن و السائل  $\Delta T_w$  ، و الذي يستخدم في تعريف معامل انتقال الحرارة بالحمل .

**تلخيص :** الحمل الطبيعي بين السلك و السائل يعتبر حمل تبخر و يعرف بمعامل التبخر  $h_v$ .

الحمل القسري بين نقطتين الأولى ساخنة و الثانية باردة على مستوى السائل يعتبر حمل غليان  $h_b$ .

**9-I) انتقال الحرارة بالغليان البركي :** بإتباع الأسلوب الذي انتهج في تحليل عمليات انتقال الحرارة التي تعتمد في المائع وحيد الطور ، فان معدل انتقال الحرارة المصاحب للمنطقة II إلى المنطقة VI في الشكل (4-I) يمكن التعبير عنه بدلالة المعامل المتوسط لانتقال الحرارة بالغليان كما يلي

$$q_c = h_b(T_w - T_{sat}) \quad (15.I)$$

ويجب ملاحظة أن فائض درجة الحرارة  $(T_w - T_{sat})$  قد استخدم في هذه المعادلة. وعلى عكس ما يوجد في الحمل القسري من عدم اعتماد قيمة معامل الحمل  $h$  على فرق درجة الحرارة  $(T_w - T_\infty)$  ، فإننا نجد أن قيمة المعامل  $h_b$  دائما على علاقة وثيقة بفائض درجة الحرارة  $(T_w - T_{sat})$  . ولهذا السبب نجد أن بعض التقارير التجريبية تربط نتائج الانتقال الحراري بالغليان مباشرة بدلالة  $q_c$  بدلا من  $h_b$ .

وبالرغم من وجود جدل شديد بصدد دقة المعادلات الموجودة للغليان المُنَوَّى، فان العديد من منحنيات التصميم قد استخدم في وضع مواصفات أجهزة ومعدات الانتقال الحراري. وبسبب وجود خطر التهديد باحترق السطح الساخن في العديد من الأجهزة التي تستخدم انتقال الحرارة بالغليان ، فان عامل الأمان في التصميم يأتي في المرتبة الأولى ، بينما يأتي أمر الكفاءة بعد ذلك .

وباستعمال نتائج التجارب المعملية كدليل ، واستخدام فروض لتبسيط عملية الغليان البركي يمكن استعمال

شكل معدل للمعادلة رقم (13.I) كما يلي

$$\boxed{\frac{C \cdot \Delta T_x}{L_{ev} Pr^{1,7}} = C_{sf} \left( \frac{(q/A)}{\mu_l \cdot L_{ev}} \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}} \right)^{0,33}} \quad (16.I)$$

$$\frac{q/A}{\mu_l \cdot L_{ev}} \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}} = \frac{1}{(C_{sf})^{1/3}} \cdot \left( \frac{C \cdot \Delta T_x}{L_{ev} Pr^{1,7}} \right)^3$$

$$\log \left( \frac{q/A}{\mu_l \cdot L_{ev}} \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}} \right) = 3 \log \left( \frac{C \cdot \Delta T_x}{L_{ev} Pr^{1,7}} \right) - \frac{1}{3} \log(C_{sf})$$

حيث

$C$  : الحرارة النوعية للسائل المشبع  $J/Kg \cdot K$  ،  $\Delta T_x$  : فائض درجة الحرارة  $K$

$q/A$  : الفيض الحراري  $w/m^2$  ،  $L_{ev}$  : الحرارة الكامنة للتبخير  $J/Kg$

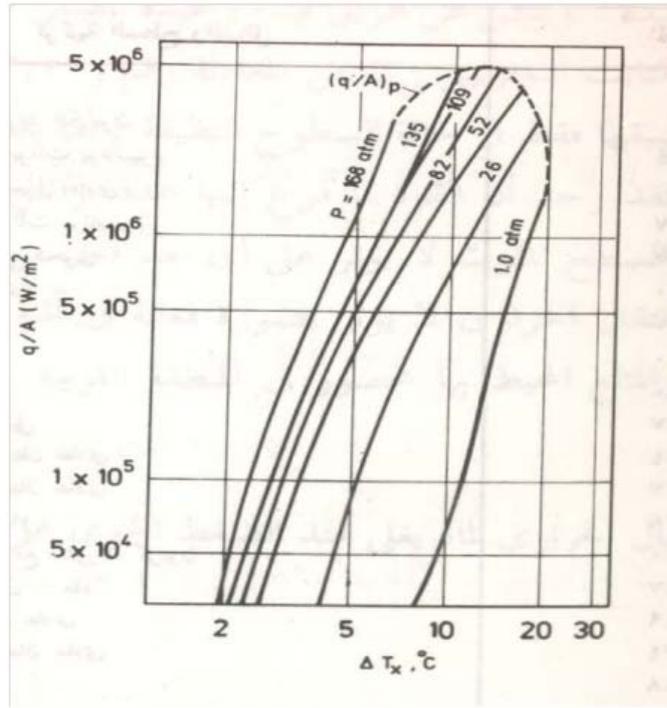
$g$  : الجاذبية الأرضية  $m/s^2$  ،  $\rho_l$  : الكتلة الحجمية للسائل المشبع  $Kg/m^3$

$\rho_v$  : الكتلة الحجمية للبخار المشبع  $Kg/m^3$  ،  $\mu_l$  : معامل لزوجة السائل  $N \cdot s/m^2$

$\sigma$  : قوة الشد السطحي  $N/m$  ،  $Pr$  : عدد برانتل للسائل

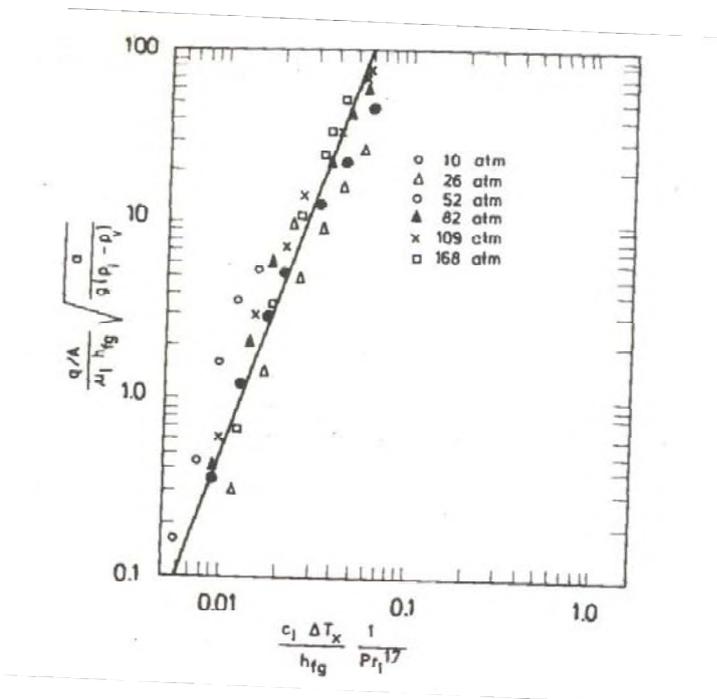
$C_{sf}$  : ثابت تجريبي تعتمد على طبيعة سطح التسخين  $S$  و المائع المستعمل  $f$  معا.

وتعتمد قيمة الثابت التجريبي  $C_{sf}$  على الخشونة السطحية لسطح الغليان وعلى قابلية السطح للبلل بوساطة مائع ماء، و يجب أن تحدد قيمته تجريبيا لكل حالة سطح ومائع على حدة. ويوضح شكل (6.I) النتائج التجريبية للغليان البركي للماء ، باستخدام سلك بلاتيني صغير عند ضغوط تشبع مختلفة ، ويوضح شكل (7.I) الارتباط بين هذه النتائج بالمعادلة (16.I) ، بحيث يكون ميل أو انحدار المستقيم المار من خلال النقطة التجريبية دالا على قيمة الثابت  $C_{sf}$  . وفي الشكل المذكور ، فان انحدار المستقيم يساوي 3 ، بما يعطي قيمة الثابت  $C_{sf} = 0,013$  من القيمة  $-\log(C_{sf})$  في المنحني ، وعن طريق هذا الثابت التجريبي يمكن ربط النتائج العملية ظروف الضغط من 1 إلى 150 جويا بصورة مرضية ، ويوضح الجدول التالي قيم المعاملات وتوافقيات السائل و سطح الانتقال الحراري المختلفة في الجدول (1-I) . أما جدول (2-I) فانه يوضح بعض القيم المختارة لقوة الشد السطحي بين السائل و البخار للماء عند مستويات مختلفة من درجات الحرارة [3].



شكل (6.I) : الفيض الحراري مقابل الفائض في درجة الحرارة لغليان الماء المُنَوَّى باستخدام سلك بلاتيني

(0,6 مم قطر) مسخن كهربائيا .



شكل (7.I) : علاقة انتقال الحرارة في الغليان البركي عند ضغوط مختلفة

جدول (I-1) : قيم المعامل التجريبي  $C_{sf}$  لتركيبات مختلفة بين السطح و السائل [3]

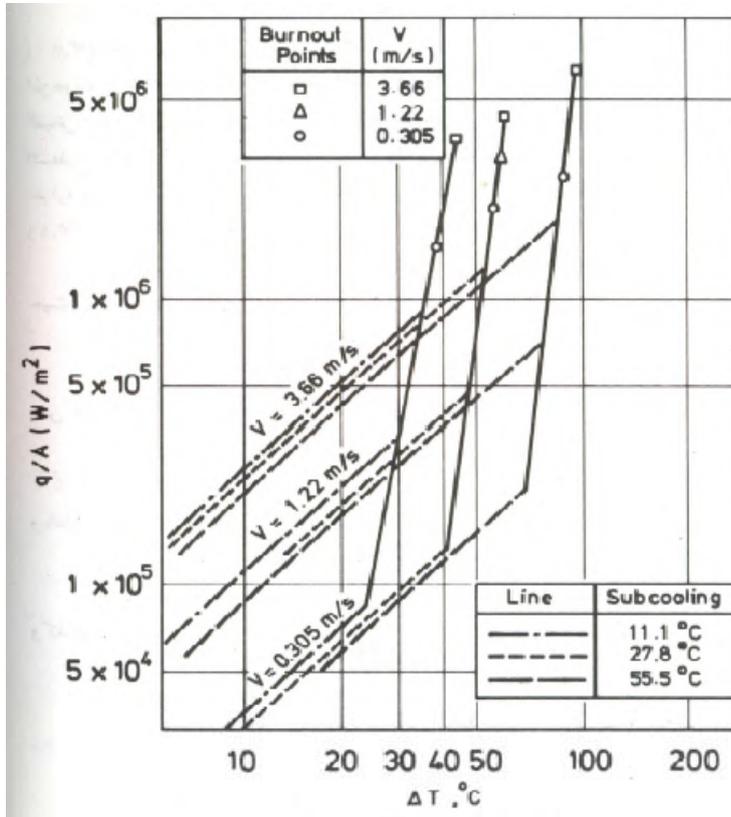
| المعامل $C_{sf}$ | تركيبية السطح و السائل         | المعامل $C_{sf}$ | تركيبية السطح و السائل    |
|------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
| 0.0070           | نحاس مصقول _ رابع كلوريد كربون | 0.013            | نحاس_ماء                  |
| 0.0147           | نحاس ميرفن مصقول _ ماء         | 0.013            | نحاس_رابع كلوريد الكربون  |
| 0.0074           | نحاس مجلخ _ بنتان عادي         | 0.0054           | نحاس_35% كربونات بوتاسيوم |
| 0.0049           | نحاسي مصقول _ بنتان عادي       | 0.003            | نحاس_ بيوبيل كحول عادي    |
| 0.0068           | نحاس محزز _ ماء                | 0.0027           | نحاس_5% كربونات بوتاسيوم  |
| 0.0080           | صلب لا يصدأ _ ماء              | 0.0025           | نحاس_ ايزوبروبيل كحول     |
| 0.0058           | صلب لا يصدأ ذو نقر _ ماء       | 0.0150           | كروم_ بنتان عادي          |
| 0.0133           | صلب لا يصدأ معالج _ ماء        | 0.0130           | بلاطين_ ماء               |
| 0.0132           | صلب لا يصدأ مصقول _ ماء        | 0.0100           | كروم _ بنزين              |
| 0.0127           | نيكل مصقول _ بنتان عادي        | 0.0060           | نحاس_أصفر ماء             |
| 0.0128           | نحاس مصقول _ ماء               | 0.0027           | كروم_ كحول ايثيلي         |
| 0.0130           | تنغستن _ ماء                   | 0.0154           | نحاس مصقول _ بنتان عادي   |

جدول (I-2) : قوة الشد السطحي بين بخار الماء والماء السائل [3].

| الشد السطحي ( $\times 10^3 N/m$ ) | درجة حرارة التشبع ( $^{\circ}C$ ) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 75.6                              | 0                                 |
| 72.6                              | 20                                |
| 69.4                              | 40                                |
| 66.0                              | 60                                |
| 62.5                              | 80                                |
| 58.8                              | 100                               |
| 48.2                              | 150                               |
| 37.6                              | 200                               |
| 26.4                              | 250                               |
| 14.7                              | 300                               |
| 3.7                               | 350                               |
| 0.0                               | 374.1                             |

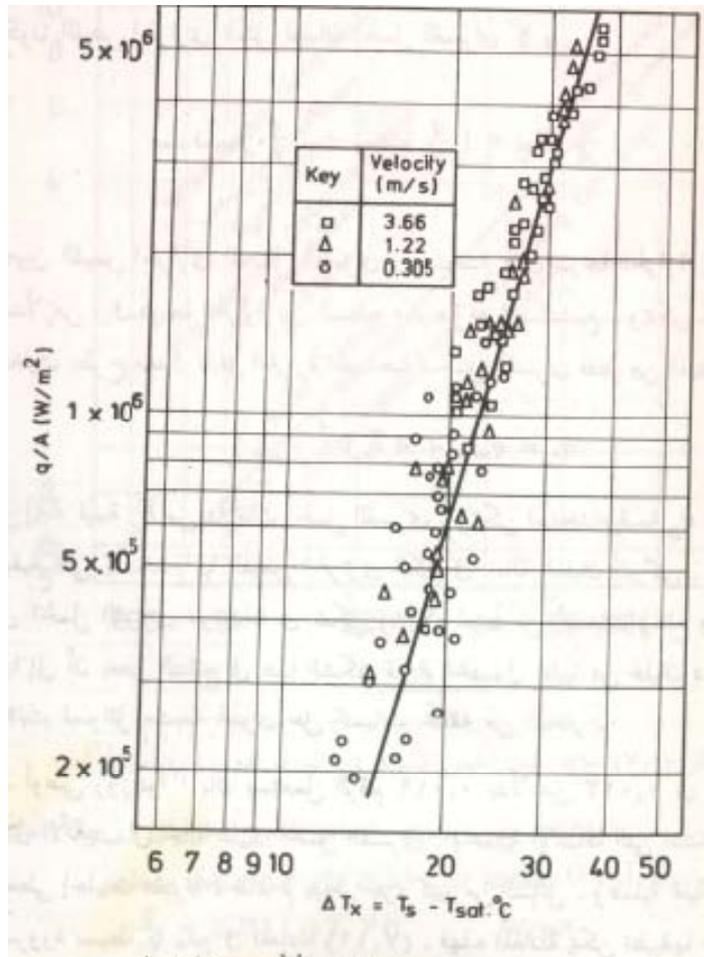
وتتميز الرابطة أو العلاقة السابقة والتي تسمى بعلاقة روزينو Rohsenow [3]. بأن أداء الانتقال الحراري لأي سائل/سطح ما في حالة الغليان المُنوَّى عند أي ضغط وأي فيض حراري يمكن التنبؤ به عن طريق إجراء تجربة وحيدة. ويمكن عن طريق قيمة وحيدة للفيض الحراري وقيمة فائض درجة الحرارة المناظرة تحديد قيمة الثابت التجريبي  $C_{sf}$  من المعادلة رقم (16.I). ومن الجدير بالذكر أن المعادلة (16.I) يمكن تطبيقها فقط في حالة السطوح النظيفة . أما بالنسبة لحالة وجود تلوث على سطح الانتقال الحراري ، فلقد وجد أن القوة المرفوع إليها عدد برانتل تتغير ما بين (0,8 – 2,0) ، هذا في حين أن مثل هذا السطح الملوث لا يؤثر على أي حد آخر من حدود المعادلة (16.I) ، و الشكل الفراغي لسطح الانتقال الحراري لا يؤثر بصورة فعالة في آلية الغليان المُنوَّى ، لأن تأثير حركة الفقاعة على ظروف المائع المحيط بها محصور في المنطقة القريبة جدًا من السطح المعدني .

**10-I الغليان المُنوَّى والحمل القسري (فوق مجرى أو داخل أنبوب) :** عندما يتدفق سائل ما فوق سطح ذي درجة حرارة  $T_w$  أعلى من درجة حرارة تشبع السائل  $T_{sat}$  ، و عندما يمر سائل ما من خلال مجرى أو قناة درجة حرارة جدرانها أعلى من درجة حرارة تشبع السائل و فإن غليان الحمل القسري يحدث في هذه القناة . ويوضح شكل (8.I) بعض النتائج العملية للحمل القسري ذي التبريد الدوني في الأنابيب والمجاري .



شكل (8.I) : نتائج غليان الحمل القسري الدوني

ويمثل المحور الشاقولي في شكل (8.I) الفيض الحراري ، في حين يمثل المحور الأفقي فرق درجة الحرارة بين درجة حرارة السطح الساخن  $T_w$  وبدن السائل  $T_l$ . وتمثل الخطوط المقطعة (في الشكل المذكور) حالات الحمل القسري عند سرعات مختلفة ودرجات تبريد دوبي متنوعة ، بينما تمثل الخطوط الكاملة الانحراف عن الحمل القسري والذي نتج عن الغليان السطحي . وبعد بدء الغليان ، فإن درجة حرارة السطح لا تعتمد بصورة عملية على سرعة المائع ، ويوضح هذا أن تأثير عملية التحريك والإثارة التي تحدثها الفقاعات أكبر بكثير من الاضطراب المصاحب للحمل القسري بدون غليان ، ونتائج الفيض الحراري الموجودة بالشكل (8.I) مرسومة في شكل (9.I) بدلالة فرق درجة الحرارة [3].



شكل (9.I) : علاقة تقريبية للغليان المُنَوَّى مع الحمل القسري.

ويتضح أن المنحنى الناتج في هذا الشكل يماثل ذلك الموجود في الشكل (6.I) فيما يخص الغليان المُنَوَّى في بركة سائل عند درجة حرارة التشبع . ويظهر هذا التماثل في عمليات الغليان مع الحمل الطبيعي وبدونه ، إذ إن الفيض

الحراري في كليهما يعتمد على فائض درجة الحرارة . ويمكن حساب الفيض الحراري الكلي في غليان الحمل القسري بإضافة الفيض الحراري للغليان الموضح في المعادلة (16.I) إلى الفيض الحراري للحمل القسري الموضح كالتالي :

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (17.I)$$

وبالتالي يكون الفيض الحراري الكلي للحمل القسري كما يلي :

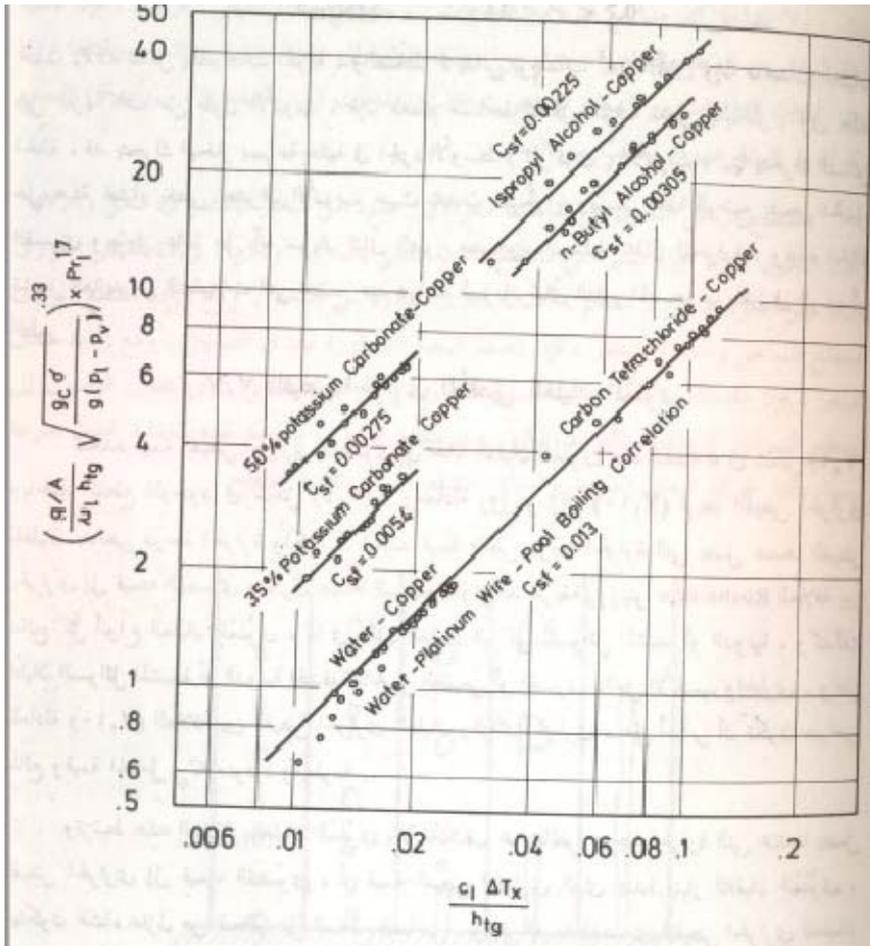
$$\left(\frac{q}{A}\right)_{total} = \left(\frac{q}{A}\right)_{boiling} + \left(\frac{q}{A}\right)_{forced\ conv} \quad (18.I)$$

ولتعيين الفيض الحراري للحمل القسري ، يستخدم فرق درجة الحرارة بين السطح وبدن السائل ، بدلا من فرق درجة الحرارة بين السطح ودرجة حرارة التشبع. ويمكن تحديد قيمة الفيض الحراري للغليان بطرح معدل تدفق الحرارة المصاحبة للحمل القسري فقط من الفيض الكلي للحرارة

$$q_b = q_{total} - \bar{h}_c \cdot A(T_w - T_l) \quad (19.I)$$

حيث يمكن إيجاد قيمة  $\bar{h}_c$  من علاقات الحمل القسري ، ويمكن استخدام قيمة  $q_b$  في المعادلة السابقة بنفس الكيفية التي يستخدم بها الفيض الحراري الكلي في حالة الغليان البركي . ونتائج مثل هذه الإضافة إلى الحمل القسري موضحة في شكل (10.I) لعدد من تجمعات المائع والسطح. وتجد الإشارة هنا إلى أن بعض النتائج في هذا الشكل قد تم الحصول عليها من غليان دوني ، بينما النتائج الأخرى كانت لسوائل مشبعة تحتوي على كميات مختلفة من البخار .

وقد أوصى روزينو [3] بأن يستعمل الرقم 0,019 بدلا من 0,023 في المعادلة (17.I) للتدفق خلال الأنابيب في حالة غليان الحمل القسري . وعملية الإضافة التي استخدمت في المعادلة (18.I) تعطي إجابات مقبولة ، طالما لم يتبخر جزء كبير من السائل . وعملية غليان الحمل القسري ليست بالضرورة بسيطة كما يبدو في المعادلة (18.I). فهذه المعادلة يمكن تطبيقها عموما في حالات الحمل القسري ، حيث تكون درجة حرارة بدن السائل دونية بالنسبة لدرجة حرارة التشبع ، أو بمعنى آخر لغليان الحمل القسري المحلي. وبمجرد الوصول إلى درجة التشبع ، أو ظروف الغليان الكلي للسائل ، فإن ظروف الغليان تتغير بسرعة . في هذه الظروف ، توجد ظاهرة غليان مُنَوَّى متطورة تماما ولا تعتمد على سرعة التدفق أو تأثير الحمل القسري.



شكل (10.I) : علاقة غليان الحمل القسري ذي التبريد الدوني (روزينو)

وهناك العديد من العلاقات التي وضعت لحساب الفيض الحراري في حالة الغليان المتطور تماما. ولقد اقترح ماك آدمز [4] العلاقة التالية لغليان الماء تحت ضغط منخفض :

$$\frac{q}{A} = 2.253(\Delta T_x)^{3.85} \frac{W}{m^2} \quad 2 < P < 7 \text{ bar} \quad (20.I)$$

كما أن Levy قد اقترح العلاقة التالية لغليان الماء عند الضغوط المرتفعة :

$$\frac{q}{A} = 0.061(\Delta T_x)^3 \frac{W}{m^2} \quad 7 < P < 140 \text{ bar} \quad (21.I)$$

حيث  $\Delta T_x$  تقاس بالدرجات المئوية ، والضغط  $P$  يقاس بوحدة  $Mpa$  ، حيث  $1Mpa = 10bar$  . وإذا ما حدث الغليان على جزء كاف من طول الأنبوب ، فإن معظم مساحة التدفق سوف تغطي بالبخار. وفي هذه الحالة ، قد يتحرك البخار بسرعة عالية في الجزء الأوسط (المركزي) للأنبوب ، بينما يتحرك السائل على هيئة غشاء

يغطي جدران الأنبوب ، حيث يحدث التبخر . ويسمى هذا الوضع بتبخر الحمل القسري ويعامل عادة على أنه سريان ثنائي الطور مصحوب بعملية انتقال للحرارة. وهذه الحالة تشمل العديد من التعقيدات التي تتضح عند دراسة السريان ثنائي الطور المصحوب بتغير في الطور.

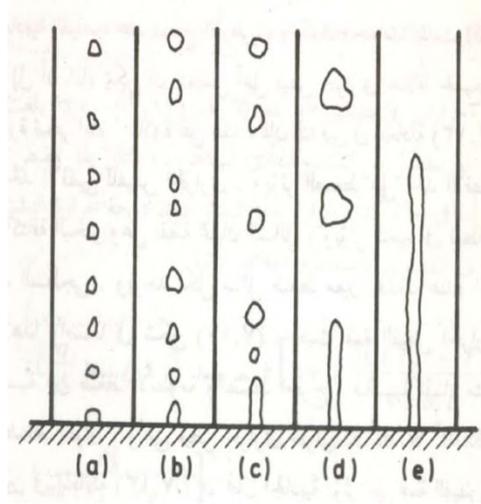
**11-I) الفيض الحراري الأقصى للغليان المنوي :** تتحدد قيمة الفيض الحراري القصوى في حالة الغليان المنوي عند النقطة a في الشكل (4.I) وبالخط المقطع الموجود في الشكل (6.I) ومعادلة روزينو رقم (16.I) تربط الفيض الحراري للغليان بفائض درجة حرارة ولكنها لا تحدد قيمة فائض درجة الحرارة التي يصل عندها الفيض الحراري إلى قيمته القصوى ويحترق عندها السطح وتوحد طريقة روزينو Roshsenow العلاقة بين نتائج كل أنواع الغليان المنوي بما في ذلك الغليان البركي للسوائل المشبعة أو الدونية وكذلك غليان السوائل المشبعة أو الدونية المتدفقة بالحمل الطبيعي أو القسري داخل الأنابيب والمجاري . وتمثل المعادلة (16.I) العلاقة بين الفيض الحراري للغليان والزائد الحراري. على أساس أن تكون خواص المائع وقيمة المعامل  $C_{sf}$  متوفرة ومعلومة.

وترتبط هذه العلاقة بالغليان المنوي. و لا تكشف عن فائض في درجة الحرارة التي عندها يصل الفيض الحراري إلى قيمته القصوى ، أو قيمة الفيض الحراري الذي عنده ينهار الغليان المنوي ، ويتكون غشاء عازل من البخار على السطح الساخن . وتمثل القيمة القصوى للفيض الحراري للغليان المنوي عاملا هاما في عمليات التصميم . من حيث كفاءة انتقال الحرارة وزيادة عوامل الأمان في التشغيل . ويجب دائما استبعاد أي احتمال لوجود السطوح الساخنة في منطقة الغليان الغشائي ، وخاصة بالنسبة للمعدات والأجهزة الحرارية ذوات كفاءة الأداء العالية . وبالرغم من عدم وجود نظرية مقنعة للتنبؤ بقيمة معامل انتقال الحرارة بالغليان ، فإنه يمكن التنبؤ بدرجة دقة مقبولة ، بظروف الفيض الحراري القصوى في الغليان البركي المنوي.

إن نظرة فاحصة للشكل (4.I) توضح أن الشكل يتكون أساس من منطقتين رئيسيتين ، ففي المنطقة الأولى ، والتي تنتمي إلى كثافات الفيض الحراري المنخفضة ، تتصرف الفقاعات ككيان قائم بذاته ، ولا يتداخل أي منها مع غيره من الفقاعات. ولكن مع زيادة الفيض الحراري ، فإن عملية إزالة البخار من السطح الساخن تتحول من عملية متقطعة إلى عملية متصلة ودائمة ، وكلما ازداد تواتر انبعاث الفقاعات من السطح الساخن تداخلت الفقاعات الفردية المنعزلة ، وبدأت في التجمع مكونة في النهاية عمودا مستمرا من البخار.

وتتضح مراحل التحول من فقاعات منعزلة إلى عمود من البخار المستمر في شكل (11.I) وعند التحول، فإن جزءا يسيرا من السطح يكون مغطى بالبخار . ولكن ، بزيادة الفيض الحراري يزداد قطر عمود البخار ، وتتكون أعمدة

أخرى مجاورة من البخار . ومع زيادة المقطع الموازي للسطح الساخن والمملوء بالبخار ، فإن أعمدة البخار المتجاورة تبدأ في التداخل . ومع زيادة معدل التبخر ، فإن المسافات الشاغرة بين أعمدة البخار سوف تحمل السائل الذي يحاول الوصول إلى السطح الساخن للاحتفاظ بالتوازن الكتلي عند سطح التبخر . ونتيجة لهذه العملية تحدث سرعة نسبية عالية لحركة البخار الصاعد والسائل المندفع لأسفل ناحية السطح [3].



شكل (11.I) : تحول فقاعات البخار إلى عمود من البخار .

ونصل إلى نقطة الفيض الحراري القصوى عندما تكون سرعة السائل بالنسبة لسرعة البخار كبيرة جدا ، بحيث تتسبب أية زيادة في هذه السرعة في سحب أعمدة البخار للسائل بعيدا عن السطح الساخن ، أو أن يسحب السائل البخار ناحية السطح الساخن . ويتضح أن كلا الاحتمال سوف يكون مصحوبا بتغير في قيمة الفيض الحراري . وبدراسة متطلبات أتران السطح الموجود بين السائل وغشاء البخار في الغليان المنوي المشبع توصل زوبر Zuber [2] . إلى المعادلة التحليلية الآتية لقيمة الفيض الحراري القصوى (Btu/hr.sq ft). حيث

$$1 \frac{Btu}{hr} = 0.293 \text{ Watt} \Rightarrow 1 \text{ Btu/hr.sq ft} = \frac{0.293 \text{ Watt}}{(0,3048)^2 \text{ m}^2} = 3,154 \text{ W/m}^2$$

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{max} = \frac{\pi}{24} \rho_v L_{ev} \left[ \frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left( \frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l} \right)^{1/2} \quad (22.I)$$

حيث  $\sigma$  تمثل قوة الشد السطحي بين السائل والبخار . ولقد وجد أن المعادلة (22.I) تتفق نتائجها بدرجة كبيرة مع التجارب العملية . وبوجه عام ، يمكن القول بأن نوعية السطح المعدني لا تؤثر في القيمة القصوى للفيض الحراري ،

في حين قد تؤثر درجة نظافة السطح في القيمة القصوى للفيض الحراري ، إذ تتسبب السطوح الملوثة في زيادة قدرها 15% من قيمة السطوح النظيفة.

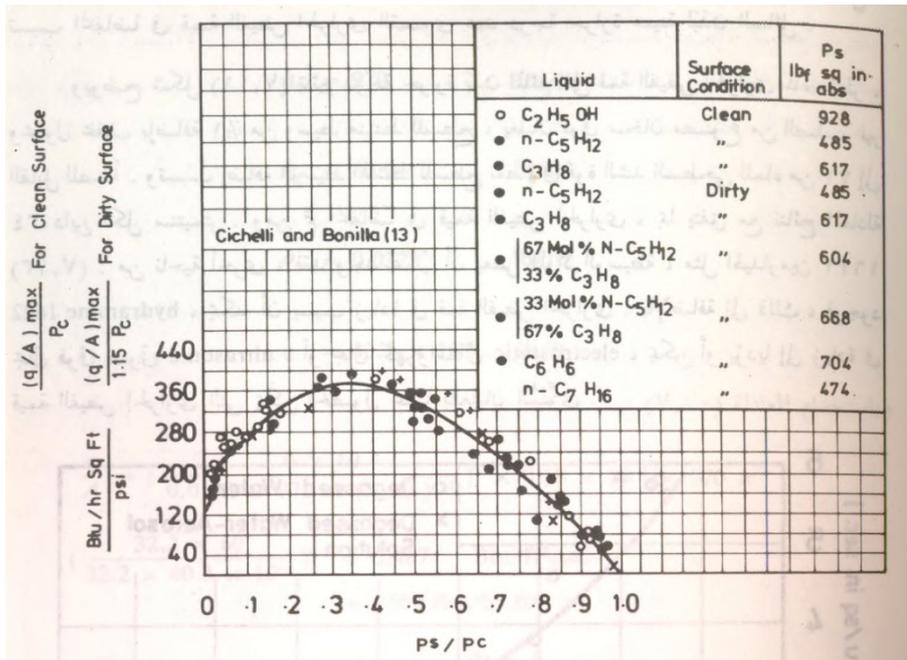
ولقد اقترح روزينو ، وجريفيث Rohsenow & Griffith [3] العلاقة المبسطة التالية :

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{max} = 143 \rho_v L_{ev} \left(\frac{g}{g_o}\right)^{0.25} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1\right)^{0.6} \quad (23.I)$$

حيث  $g_o$  تمثل الجاذبية القياسية عند سطح الأرض ، وتكون وحدات الثابت

$$143 \frac{ft}{hr} = 143 \cdot \frac{(0.3)m}{(3600) s} = 0,0119 m/s$$

وتشير المعادلة (23.I) إلى أن الماء يمكن أن يتحمل أعلى فيض حراري خلافا لجميع السوائل المعروفة ، بسبب ارتفاع حرارة تبخر الماء. علاوة على هذا، فإن التدقيق في المعادلة (23.I) يوحي بطرق عديدة بزيادة الحد الأقصى للفيض الحراري . ويؤثر الضغط على الحد الأقصى للفيض الحراري بسبب تأثيره على كثافة البخار وعلى نقطة غليان السائل. ويؤثر التغيير في نقطة الغليان على حرارة التبخير وقوة الشد السطحي . ويوجد لكل سائل ضغط معين يحدث عنده الحد الأقصى للفيض الحراري . و يبدو هذا واضحا في الشكل (18.I) حيث قمة الفيض الحراري للغليان المنوّى مرسومة بدلالة النسبة بين ضغط الأنظومة والضغط الحرج .



شكل (12.I) : قمة الفيض الحراري للغليان المنوّى عند ضغوط مختلفة.

فبالنسبة للماء مثلاً، يكون الضغط الأمثل هو 102 ضغط جوي ، وأعلى فيض حراري حوالي  $6,8 \cdot 10^6 \frac{W}{m^2K}$  ويوضح الحد الموجود بين قوسين في المعادلة (23.I) أن مجال الجاذبية يؤثر على قمة الفيض الحراري . ويرجع ذلك إلى أنه في مجال قوى معين ، فإن السائل ، نتيجة زيادة كثافته يكون معرضاً لقوة أكبر بالنسبة لكل وحدة حجم من الطور البخاري . وحيث أن هذه القوى تعمل على السطح الفاصل بين الطورين ، مما يسبب فصل الوجهين عن بعضهما البعض ، فإن أية زيادة في قوة المجال كما هو الحال في القوة الطاردة المركزية الكبيرة مثلاً ، سوف تتسبب في زيادة القابلية للانفصال وتزيد من قمة الفيض الحراري . وعلى العكس من ذلك ، فقد أثبتت التجارب أن النقص في مجال الجاذبية ينتج عنه نقص قمة الفيض الحراري بما يتماشى مع المعادلة رقم (23.I) . إذا بلغت قوة مجال الجاذبية صفراً ، فإن البخار لن ينفصل عن السطح المعدني الساخن ، وبالتالي يقل الفيض الحراري حتى يصل إلى الصفر أيضاً. أما في حالة كون حرارة بدن السائل دون درجة حرارة التشبع ، فيمكن حساب قيمة الفيض الحراري القصوى باستخدام العلاقة الآتية :

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{max} = \left(\frac{q}{A}\right)_{max.sat} + \left[1 + \left[\frac{2k(T_{sat} - T)}{\sqrt{\pi\alpha_l L}}\right] \frac{24}{\pi L_{ev}\rho_v} \left[\frac{\rho_v^3}{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}\right]\right]^{\frac{1}{4}} \quad (24.I)$$

حيث المعامل :

$$L = \frac{\pi}{3} \sqrt{2\pi} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}\right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\rho_v^2}{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (25.I)$$

حيث  $\alpha_l$  تمثل الانتشارية الحرارية thermal diffusivity للسائل ، أما  $\left(\frac{q}{A}\right)_{max.sat}$  فيمكن تحديدها من المعادلة (16.I)، وتجد الإشارة هنا إلى أن الغازات غير المتكثفة والسطوح غير المبللة يمكن أن تسبب انخفاضاً في قيمة الفيض الحراري القصوى عند درجة حرارة معينة لبدن السائل .

حيث تأثير درجة حرارة بدن المائع على قمة الفيض الحراري لماء مقطر ، ومحلول مخفف بإضافة 1% من وسيط منشط للسطح ، بغليان فوق سخان مصنوع من الصلب الغير القابل للصدأ . وتسبب إضافة الوسيط المنشط

للسطح نقصا في قوة الشد السطحي للماء  $(34.10^3 \rightarrow 72.10^3)N/m$  . ومن ثم انخفاضاً في قيمة الفيض الحراري ، بما يتفق مع نتائج المعادلة (22.I) . من ناحية أخرى ، فقد وجد عملياً أن بعض المواد الوسيطة ، مثل الهيدرامين hydramine 1622 ، يمكنه أن يسبب زيادة في قيمة الفيض الحراري . بالإضافة إلى ذلك ، فوجود مجال فوق صوتي ultrasonic ، أو مجال كهروستاتيكي electrostatic ، يمكن أن يؤدي إلى زيادة في قيمة الفيض الحراري التي يمكن الحصول عليها بالغليان المنوي.

## خلاصة الفصل :

و في الفصل الثالث الخاص بالجانب التجريبي سوف نقوم بحساب المقادير التالية :

**خطوة 1 :**  $\nu_f$  و  $\beta$  و  $\rho_f$  و  $C_f$  و  $k_f$  عند درجة الحرارة المتوسطة  $T_f$  باستعمال نماذج شبه تجريبية أصلها جداول تجريبية ونماذج رياضية . وكذلك حساب الحرارة النوعية للتبخير  $L_{ev}$  عند  $T_f$  . و الجداول مع النماذج موضحة في الملحق 1 .

**خطوة 2 :** نستنتج المقادير التالية :  $Pr$  من المعادلة (3.I) ، و  $Gr$  من المعادلة (4.I) و  $Ra$  من المعادلة (5.I) ، وكذلك قيمة المقدار  $Nu$  من المعادلة (1.I) ، ومنه يمكن استنتاج قيمة معامل الانتقال الحراري بالتبخير من المعادلة (2.I) .

**خطوة 3 :** نحسب من المعادلة (6.I) قيمة الفيض  $\dot{Q}_{ev}$  بدلالة الزائد في درجة الحرارة  $(T_w - T_{sat})$  و ندونه في جدول بعد القيام بتجربة الغليان في الفصل الثالث. وبنفس الطريقة يمكن حساب كمية البخار المنتج من الفقاعات المتصاعدة في كل الزائد في درجة الحرارة  $(T_w - T_{sat})$  وتدوينها في نفس الجدول.

**خطوة 4 :** في المعادلة (8.I) نحسب قيمة  $\sigma$  الشد السطحي بدلالة  $P_l$  و  $P_v$  اللذان يحسبان في درجات الحرارة التالية :  $P_l$  عند درجة حرارة التشبع  $T_{sat}$  و  $P_v$  عند درجة حرارة السطح الساخن في حالة عدم التبلل (Not Watted) الموضحة في الشكل (3.I) .

ملاحظة عامة : بالنسبة للدراسة التجريبية سوف تتم فقط على الغليان البركي لسلك من التنغستن مغمور في سائل الماء تحت الضغط الجوي. أما الغليان في مجرى أو داخل أنبوب لم نتطرق لها على أمل أن تكون في دراسات لاحقة. و التفاصيل موجودة في الفصل الثالث التجريبي.

# الفصل الثاني

## دراسة نظرية لظاهرة التكثيف

يحتوي هذا الفصل على مختلف العلاقات النظرية الخاصة بالظواهر

الفيزيائية الداخلة في عملية التكثيف و المتمثلة في

- 1-II) التكثيف النقطي و التكثيف الغشائي.
- 2- II) التطبيقات العملية لظاهرة التكثيف.
- 3- II) التكثيف فوق السطوح الباردة (نظرية نوسلت).
- 4- II) التكثيف على السطوح الشاقولية .
- 5- II) التكثيف على سطح مائل.
- 6- II) التكثيف على سطوح الأنابيب الأفقية.
- 7- II) تسلسل المعادلات الحسابية للمكثفات.
- 8- II) المقارنة بين التكثيف على السطوح الأفقية و الشاقولية.
- 9- II) التكثيف داخل الأنابيب (المكثفات الأفقية).
- 10- II) الأبخرة المفردة (بخار مركب أو خليط ثابت الغليان).

**تمهيد :** يوجد المائع في الطبيعة على هيئة بخار، أو سائل ، وتسمى عملية تحويل المائع من الطور السائل إلى الطور البخاري بالتبخير، في حين تسمى عملية تحويل البخار إلى سائل بالإسالة. و من هنا يمكن القول أن عملية التكثيف هي عمليتين ، عملية حرارية تتمثل في الإسالة و عملية ميكانيكية تتمثل في التقطير . و هناك تماثل بين كميات الحرارة المتبادلة في كل من عمليتي التبخر والإسالة لوحدة الكتل من مائع ما ، و عند ثبوت الضغط فإن تحول المائع النقي من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية يتم عند درجة حرارة محددة، تسمى بدرجة حرارة التشبع أو درجة حرارة اتزان هذا الضغط ، و لما كان انتقال الحرارة مرتبط بعملية تحويل البخار إلى سائل يتم عادة عند ضغط ثابت أو شبه ثابت في العمليات الصناعية لذلك فإن عملية تبخير المركبات المفردة و تكثيفها يتم عادة عند درجة حرارة ثابتة أي إيزوترمية ، و في حالة عزل البخار بعد تكونه و منع الاتصال بينه و بين السائل ، فإن كمية الحرارة المنتقلة إلى البخار سوف تؤدي حتما إلى تحميته . أثناء عملية التخمية ، يكون سلوك البخار مشابها للغازات الأخرى.

أما إذا كانت العملية تتضمن تكثيف خليط من عدة أبخرة، بدلا من بخار مفرد ، فإن التغيير لا يتم من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة عند درجة حرارة ثابتة رغم تثبيت الضغط. و تختلف المعالجة العامة للخليط من الأبخرة في بعض الوجوه ، عن المعالجة الخاصة بالمركبات المفردة ، وسوف تتم دراسة هذا الموضوع لاحقا على أساس قاعدة الأطوار التي وضعها ويلارد جيبس.

أما معدلات انتقال الحرارة أثناء عملية التكثيف فتختلف تبعا لإتباع أي من الآيتين الفيزيائيتين ، واللتين سوف يتم ذكرهما لاحقا . و نعني بذلك التكثيف النقطي والتكثيف الغشائي . و يتأثر معامل التكثيف الغشائي بتضاريس السطح الذي تتم عليه عملية التكثيف ، و بوضع المكثف أفقيا كان أم شاقوليا . وعلى الرغم من التعقيدات الواضحة في عملية التكثيف إلا أنه يجب دراستها دراسة رياضية مباشرة.

## II-1) التكثيف النقطي و التكثيف الغشائي : لتعريف هذين النوعين من التكثيف لدينا المفاهيم التالية :

**المفهوم 1 :** عندما يلامس بخار نقي مشبع سطحاً بارداً ، وليكن سطحاً خارجياً لأنبوب مثلاً ، فإن هذا البخار تقع له إسالة ويكون نقطة من السائل على سطح الأنبوب.

**المفهوم 2 :** و من المحتمل ألا تكون هناك التصاق لنقاط السائل على السطح البارد لذا فبدلاً من أن تنتشر النقاط على سطح الأنبوب على هيئة غشاء من السائل ، نجد أنها تنزلق وتسقط تاركة سطحه المعدني مكشوفاً ، وهكذا. أي أن السطح تتكون عليه نقاط متتابعة من البخار المكثف .وتسمى عملية التكثيف هذه بالتكثيف النقطي.

**المفهوم 3 :** وفي معظم الحالات سرعان ما يتكون غشاء تكثيفي يمكن تمييزه بوضوح ، في هذه الحالة فإن أي بخار إضافي يتجه نحو السطح البارد لابد له أن يسال على الغشاء المتكثف (السائل الذي يغطي السطح)، بدلا من أن يتكثف مباشرة على سطح الأنبوب البارد. مثل هذه الآلية يطلق عليها آلية التكثيف الغشائي.

**المفهوم 4 :** ولا توجد علاقة فيزيائية بين آليتي التكثيف النقطي و التكثيف الغشائي وبين كمية البخار المتكثفة لكل وحدة مساحة من السطح البارد . وعليه فمن الخطأ الاعتقاد بأن التكثيف الغشائي هو مرحلة انتقالية من التكثيف النقطي.

**المفهوم 5 :** وبسبب تكون الغشاء السائل ( نواتج التكثيف ) وعزله لسطح الأنبوب من عملية التكثيف . ومن ثم يكون معامل انتقال الحرارة في عملية التكثيف النقطي من أربعة إلى ثمانية أمثال مثيله في عملية التكثيف الغشائي .

**المفهوم 6 :** ومن المعروف أن بخار الماء هو البخار الوحيد النقي الذي يمكنه أن يتكثف بطريقة التكثيف النقطي في ظل توافر شروط معينة لحدوثه . مثل هذه الشروط موضحة بأعمال كل من (درو - Drew) و (ناجل - Nagle) و (سميث - Smith) . وتتوفر هذه الشروط بالدرجة الأولى بسبب وجود أوساخ على السطح ، أو باستعمال ملوثات تلتصق بالسطح . ولقد قام (ناجل - Nagle) بتحديد أنواع المواد التي تحدث على حدوث التكثيف النقطي لبخار الماء ، على الرغم من أن إستعمال مثل هذه المواد قد ينتج عنه وجود شوائب في البخار .

**المفهوم 7 :** ويحدث التكثيف النقطي أيضا في حالة تكثيف عدة مركبات آنيا كخليط غير قابل للمزج ، كما هو الحال في بخار الماء لهيدروكربونات . وعادة ما يحدث في فترات عديدة ، أثناء تشغيل مكثفات البخار ، أن تبدأ آلية التكثيف بالنوع الغشائي ، ثم تعود في مراحل متأخرة إلى التكثيف الغشائي مرة أخرى .

**المفهوم 8 :** و لصعوبة التحكم في نوعية آلية التكثيف فإنه ليس من المألوف في حسابات التكثيف أن تستخدم القيم العالية لمعاملات انتقال الحرارة ، والتي يمكن الحصول عليها أثناء تجارب التكثيف النقطي.

#### فرضيات :

**فرضية 1 :** ومن الطبيعي أن يكون ضغط التشبع في بدن البخار أعلى من ضغط تشبع السائل المتكثف الأبرد والملاصق لسطح الأنبوب ويكون فرق الضغط بين بدن البخار وغشاء التكثيف بمثابة الجهد اللازم لدفع البخار بمعدل عال من بدن البخار نحو غشاء التكثيف.

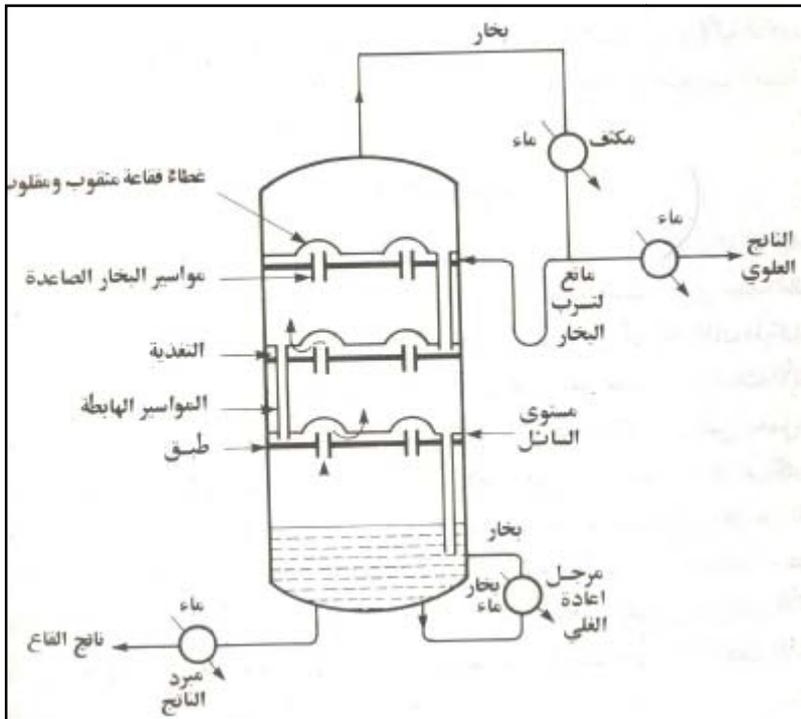
**فرضية 2 :** أما عن مقاومة انتقال الحرارة بالانتشار من بدن البخار إلى سطح التكثيف، فقد وجد أنها صغيرة بالنسبة إلى مقاومة سُمك الغشاء المتكثف . وفي الواقع فإن الحالة الأخيرة هي التي تحدد مدى فعالية المقاومة، بالإضافة إلى أن سرعة انتقال حرارة التكثيف خلال هذا الغشاء هي التي تحدد معامل التكثيف.

**فرضية 3 :** الشكل النهائي لمعادلة معامل التكثيف الذي يمكن الحصول عليه من خلال التحليل البعدي لعملية التكثيف ، حيث يكون متوسط معامل التكثيف  $\bar{h}$  دالة في خصائص الغشاء المتكثف  $k, \rho, g, L, \Delta T, L_{ev}$

وتمثل  $Lev$  الحرارة الكامنة للتبخير. ولقد استطاع نوسلت  $Nusselt$  أن يستنبط العلاقات النظرية لآلية التكثيف الغشائي، وكانت النتائج التي توصل إليها على درجة عالية من التطابق مع نتائج التجارب العملية.

**نتيجة :** و مما سبق سوف يتم التعرض في هذا الفصل لحسابات المكثفات تحت ظروف عديدة ، اعتمادا على معاملات الانتقال الحراري الملازمة لآلية التكثيف الغشائي فقط . ومن حسن الحظ ، أن ظاهرة التكثيف الغشائي يسهل تحليلها رياضياً ، وأن طبيعة التكثيف على سطح بارد يمكن اعتبارها ذاتية الانتشار .

**II-2) التطبيقات العملية لظاهرة التكثيف :** من المألوف في الصناعات الكيميائية أن يتم فصل خليط من السوائل عن طريق إزالة المركبات ذوات درجات الغليان المنخفضة عن ذوات درجات حرارة الغليان العالية بالتقطير. وفي حالة المحاليل عديدة المركبات، فإن كلا منها يكون ذا ضغط جزئي محدد بالإضافة إلى أن أكثر تلك المركبات تطايراً لا يمكن أن يفصل بالغليان عن بقية المحلول دون أن يحمل معه بعضاً من المركبات الأثقل ذوات درجات الغليان العالية . وتكون نسبة المركبات الأثقل في هذه الحالة - أي التي تحمل في بداية غليان المحلول - أقل من تلك الموجودة في المحلول الأصلي قبل بداية الغليان. وإذا تم تكثيف البخار الناتج من الغليان في هذه الحالة، وتم غلي ناتج التكثيف عند درجات أقل من تلك المطلوبة للمحلول الأصلي ، فإن نسبة المركبات المتطايرة في ناتج الغليان سوف تزداد. وتتابع عمليات الغليان والتكثيف على هذا النمط، يمكن الحصول على كميات نقية من المركب الأكثر تطايراً. وبناء على ذلك، فإن عملية فصل المركبات بالتقطير تبدأ بالغليان الجزئي ثم بتكثيف للأبخرة الناتجة عن الغليان.



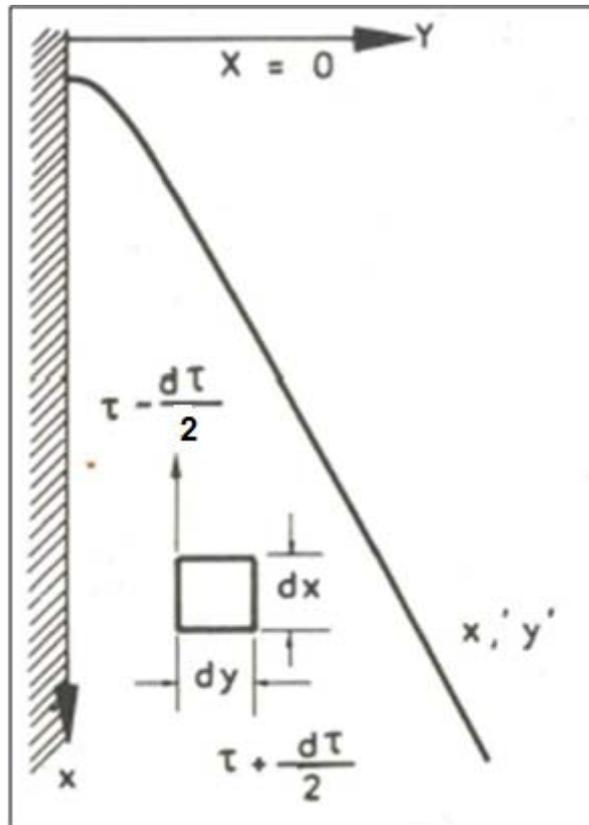
الشكل (1.II) : عمود التقطير و ملحقاته.

ومن المهم ملاحظة أن درجة حرارة التكثيف داخل المكثف هي التي تحدد ضغط تشغيل عمود التقطير ، لوجود علاقة ثابتة بين درجة حرارة تشبع البخار وضغطه . إضافة إلى ذلك يجب أن يكون تكثيف الناتج العلوي للعمود داخل المكثف عند درجة حرارة مناسبة ، حيث يمكن إزالة حرارته الكامنة باستخدام مياه التبريد .

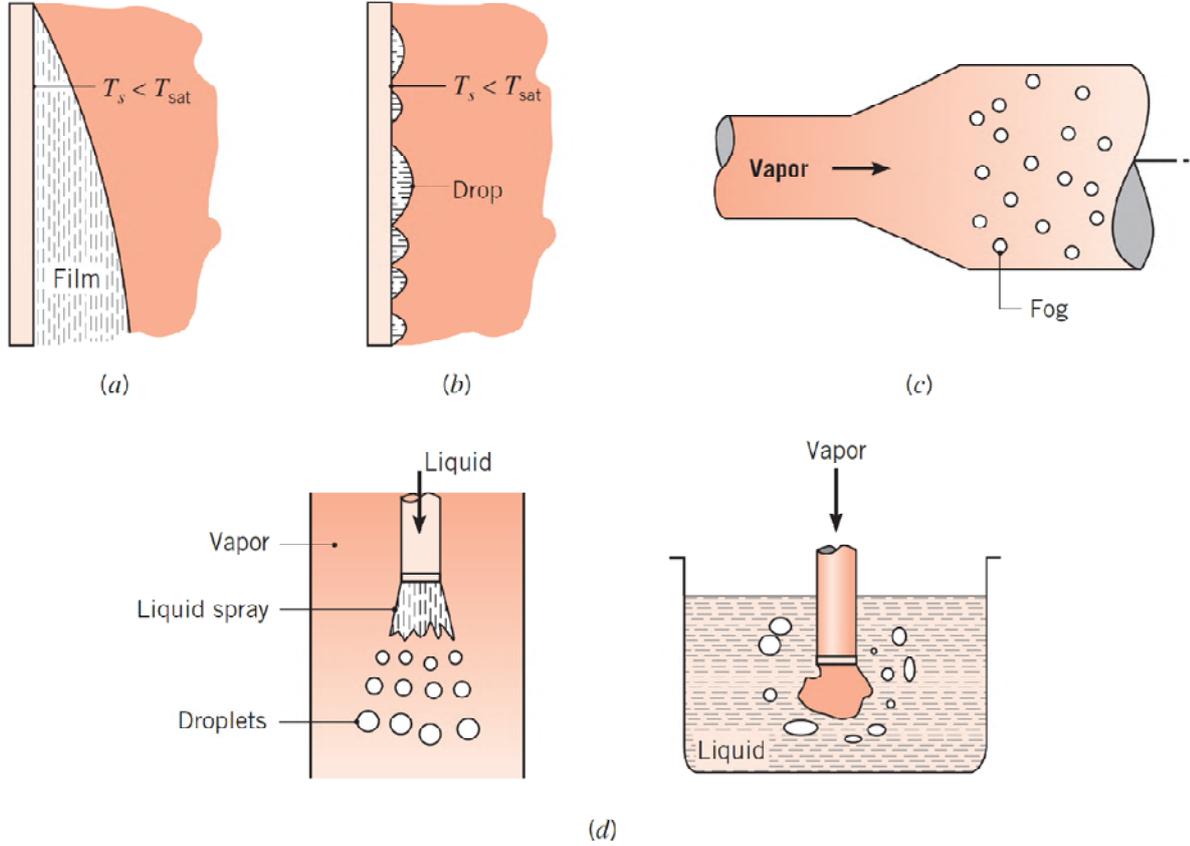
ومن ناحية أخرى ، يعتمد حجم السائل المكثف على الفرق بين درجة حرارة التكثيف والمدى المؤثر لمياه التبريد ، وإذا ما قاربت درجة حرارة التكثيف المدى المؤثر لدرجة حرارة التبريد عند الضغط الجوي فلا بد من رفع ضغط التقطير ومن ثم يزداد الفرق في درجات الحرارة وصولاً إلى قيمة الفرق المطلوب في درجة الحرارة .

وفي صناعة توليد القدرة لا يستعمل اصطلاح المكثف السطحي إلا في التجهيزات الأنبوبية التي تستعمل في تكثيف بخار الماء كما في حالة عوادم التوربينات و المكينات . والتوربينات البخارية مصممة على أن تعطي شغلا ميكانيكيا باستعمال الطاقة الحرارية . وللحصول على أعلى درجة تحويل للطاقة داخل التوربينة يستوجب الأمر طرد بخار العادم عند درجات حرارة منخفضة. وإذا ما طرد عادم التوربين إلى الجو تكون اقل درجة حرارة ممكنة للعادم هي  $100^{\circ}\text{م}$  أما إذا طرد البخار إلى مكثف مملح فإن درجة حرارة عادم التوربين قد تصل إلى حوالي  $24^{\circ}\text{م}$  أو اقل. وهكذا يتحول فارق الطاقة الحرارية المخزونة في البخار بين درجتي 24 ،  $100^{\circ}\text{م}$  إلى شغل ميكانيكي .

**II- 3) التكثيف فوق السطوح الباردة (نظرية نوسلت) :** عندما يتكثف بخار ما على سطح شاقولي بارد، فإن نواتج التكثيف تكوّن غشاءً على السطح ، كما هو موضح في الشكل (2.II)، ومع استمرار عملية التكثيف يستمر انتقال الحرارة إلى السطح عبر هذا الغشاء بالتوصيل [7].



الشكل (2.II) : التكثيف الغشائي فوق سطح شاقولي



الشكل (3.II): أنواع التكثيف مصنفة حسب التلامس بين البخار و المنطقة الباردة

(a) تكثيف شريطي على سطح بارد شاقولي ، (b) تكثيف نقطي على سطح بارد شاقولي ، (c) تكاثف متجانس أو تشكيل ضباب ناتج من نقصان الضغط نتيجة للتوسع ، (d) تلامس مباشر بين البخار و سائل بارد

تفسير الشكل (3.II) : نلاحظ أنواعا من عمليات التكثيف ، حيث الأنواع (a) و (b) يحتاجان لسطح بارد، أما النوع (c) ينتج بسبب انخفاض الضغط الذي بدوره يسبب انخفاض في درجة الحرارة ، لكن النوع (d) فهو ناتج من تلامس البخار بسائل بارد إما يتم بضغط السائل أو ضغط البخار.

أما في حالة وجود سطح بارد يمكن افتراض أن نزول الغشاء من أعلى السطح إلى أسفله يتم على شكل انسياب رقائقي، ويؤثر سُمك هذا الغشاء تأثيراً كبيراً في معدل التكثيف ، إذ أن الحرارة المنتقلة إلى السطح البارد من عملية التكثيف تواجه مقاومة أثناء مرورها خلال سُمك الغشاء المتكون ، وغالباً ما تكون مقاومة هذا الغشاء لانتقال حرارة التكثيف عالية جداً بالنسبة لبقية المقاومات ، ويكون هذا الغشاء دالة في سرعة التدفق عبر الغشاء ، و التي تتغير بتغير زاوية ميل السطح عن الوضع الشاقولي ، حيث إن قوة التدفق تكون تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية بالدرجة الأولى وفي حالة كون السطح البارد شاقولي ، فإن سُمك الغشاء يزداد من أعلى السطح البارد إلى أسفله ، و لهذا السبب فإن معامل تكثيف البخار فوق سطح شاقولي يتناقص من القمة إلى القاع . وللحصول على معامل

عال للتكتيف يجب أن لا يكون ارتفاع السطح كبيراً جداً. وسرعة التدفق لكميات متساوية من نواتج التكتيف دالة في لزوجة نواتج التكتيف ، بمعنى أنه كلما انخفضت اللزوجة قل سُمك الغشاء . وحيث إن لزوجة السوائل تقل قيمتها بزيادة درجة الحرارة . فإن معامل التكتيف يزداد بزيادة درجة حرارة التكتيف.

ولقد أجرى نوسلت Nusselt في عام 1916م دراسة تحليلية لعملية التكتيف سابقة الذكر باستخدام الفرضيات التالية

**الفرضية 1:** الحرارة المنتقلة إلى السطح البارد أثناء التكتيف هي الحرارة الكامنة للتبخر  $L_{ev}$  فقط (أو بمعنى آخر الإسالة) .

**الفرضية 2:** إزالة نواتج التكتيف الغشائي من على السطح تتم بواسطة التدفق الرقائقي فقط ، وتنتقل الحرارة خلال الغشاء بالتوصيل .

**الفرضية 3:** يكون سُمك غشاء التكتيف عند أي مقطع دالة في متوسط سرعة التدفق ، وبالإضافة إلى كمية نواتج التكتيف المارة عند هذا المقطع .

**الفرضية 4:** تكون سرعة كل طبقة من طبقات الغشاء على حدى دالة في العلاقة بين قوة القص الناتجة من الاحتكاك و ثقل الغشاء .

**الفرضية 5:** كمية نواتج التكتيف تتناسب طردياً مع كمية الحرارة المنقولة إلى السطح ، والتي تعتمد بدورها على سُمك الغشاء وفرق درجة الحرارة بين البخار و السطح البارد .

**الفرضية 6:** يكون سُمك الغشاء على درجة كبيرة من النحافة ، بحيث يكون تدرج درجة الحرارة خلاله خطياً .

**الفرضية 7:** تقاس الخواص الفيزيائية لنواتج التكتيف عند متوسط درجة حرارة الغشاء .

**الفرضية 8:** يكون السطح البارد نظيفاً وناعماً نسبياً .

**الفرضية 9:** تكون درجة حرارة سطح المعدن البارد ثابتة .

**الفرضية 10:** يمكن إهمال تأثير درجة تقوس الغشاء .

**II- 4) التكتيف على السطوح الشاقولية :** يمكن التعبير عن معدل الحرارة التي تمر خلال البخار إلى السطح البارد

عبر نواتج التكتيف ، و الموضح في الشكل (4.II) ، لكل وحدة مساحات كالتالي

$$\frac{Q_t}{A} = \frac{k(T_v - T_w)}{\delta} = L_{ev} \dot{m} = h(T_v - T_w) \quad (1. II)$$

حيث  $L_{ev}$  تمثل الحرارة الكامنة للتبخر (لإسالة) لوحدة الكتلة ،  $\dot{m}$  كمية نواتج التكتيف المتكونة بالنسبة لوحدة

المساحات ،  $\delta$  هو سُمك غشاء التكتيف عند النقطة ذات الإحداثيات  $x$  و  $y$  ، كما هو موضح في الشكل

(4.II) ، بينما بقية الرموز تحمل المعاني الدالة عليها كما هو مبين في الرموز . ويقدر معدل تكتيف البخار بالمعادلة

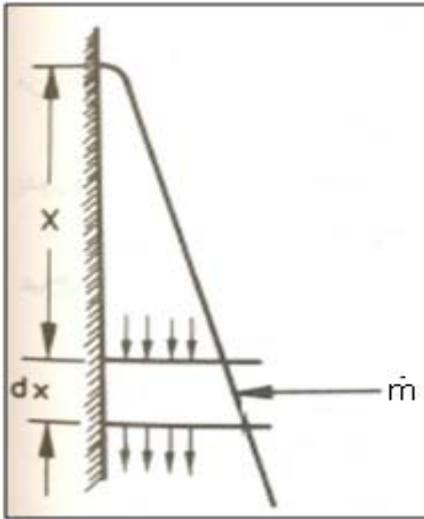
الآتية:

$$\dot{m} = \frac{k(T_v - T_w)}{L_{ev} \delta} = \frac{k \cdot \Delta T}{L_{ev} \delta} \quad (2. II)$$

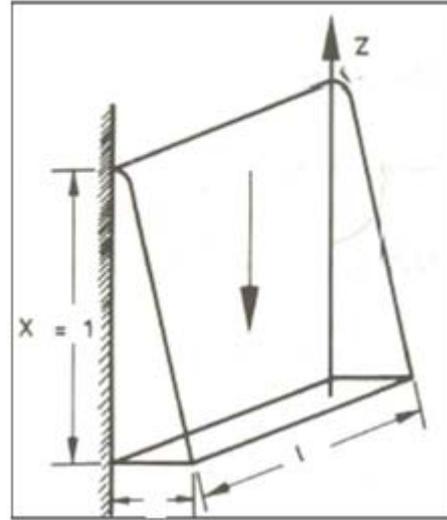
يتدفق السائل نازلاً على السطح الشاقولي بسرعة تتغير قيمتها من الصفر ، عند السطح البيني للغشاء والسطح البارد وتزداد أفقيًا في اتجاه السطح البيني للبخار و سطح الغشاء الخارجي ، كما تزداد السرعة أيضًا في الاتجاه الشاقولي ، كلما اتجهنا من أعلى السطح البارد إلى أسفله .

ولندرس مثلاً ، مكعبًا صغيرًا من السائل ذا وحدة عمق  $dz = 1$  ، و بالتالي يكون حجمه مساويًا  $1 \cdot dx \cdot dy$  ، وموجود داخل الغشاء المتحرك كما في الشكل (4.II) ، وتوجد على جانب المكعب المواجه للسطح البارد الشاقولي قوة مماسية مؤثرة شاقولياً إلى أعلى ، وتحاول أن تحافظ على وضع المكعب في مكانه . أما على الجانب المقابل و البعيد عن السطح البارد ، فتوجد قوة مماسية بسبب زيادة سرعة السائل تؤثر شاقولياً لأسفل . فإذا رمزنا إلى محصلة القوى الشاقولية المتجهة لأعلى ، و المؤثرة على المكعب بالرمز  $\tau$  ، فان القوتين لوحدة السطح المؤثرتين على وجهي المكعب هما :

$$\tau + \frac{d\tau}{2} \quad \tau - \frac{d\tau}{2} \quad (3 . II)$$



( ب )



( أ )

الشكل (4.II) : سريان التكثيف الغشائي على سطح شاقولي

على التوالي ، وتتعاقد محصلة القوى المماسية لأعلى مع القوة الجاذبية الأرضية المؤثرة لأسفل كشرط لحدوث الاتزان على المكعب .

$$\rho g(dx \cdot dy \cdot 1) - \left( \tau - \frac{d\tau}{2} \right) (dx \cdot 1) + \left( \tau + \frac{d\tau}{2} \right) (dx \cdot 1) = 0 \quad (4 . II)$$

وبالنسبة لوحدة المساحات  $dx \cdot dz = 1$  فإن

$$\rho \cdot g = -\frac{d\tau}{dy} \quad (5. II)$$

ومن المألوف أن يُعبّر عن جهد القص بالمعادلة التالية

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (6. II)$$

وينتج أن

$$\frac{d\tau}{dy} = \mu \frac{d^2u}{dy^2} = -\rho \cdot g \quad (7. II)$$

وباعتبار أن قيمة  $\frac{\rho}{\mu}$  ثابتة ينتج أن

$$\frac{d^2u}{dy^2} = -\rho g / \mu = -\frac{g}{(\mu/\rho)} = -\frac{g}{\nu} \quad (8. II)$$

و بالتكامل مرتين ينتج أن

$$u = -\frac{g}{2\nu} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (9. II)$$

حيث كلاً من  $C_1, C_2$  ثابتين ويتحتم إيجاد قيمتهما، وبما أن السائل يلاصق السطح فإن سرعة التدفق في اتجاه السطح  $u = 0$  عند السطح  $y = 0$  ومنها ينتج أن قيمة الثابت  $C_2 = 0$  أما على الحدود الخارجية للغشاء (السطح البيني للبخار و السائل) فلا توجد قوى مماسية (قص)، ومن تعريف جهد القص، وعندما تكون  $y = \delta$  ينتج أن

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_{y=\delta} = 0 = -\frac{g}{\nu} \delta + C_1, \quad C_1 = \frac{g}{\nu} \delta \quad (10. II)$$

وبالتالي تكون السرعة عند أي نقطة تساوي

$$u = \frac{g}{\nu} \left( \delta \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) \quad (11. II)$$

$$u = \frac{g}{\nu} \delta^2 \left( \left(\frac{y}{\delta}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 \right) = \frac{g}{\nu} \delta^2 \left( (\eta) - \frac{1}{2} (\eta)^2 \right) \quad (12. II)$$

وعلى مسافة مقدارها  $x$  مقاسة من قمة السطح الشاقولي حيث يبدأ التكتيف، فإن السرعة المتوسطة للتدفق يمكن أن يُعبّر عنها كالتالي باعتبار عرض السطح يساوي  $L = 1$

$$\bar{u} = \frac{1}{\delta \cdot 1} \int_0^{\delta} u (1 \cdot dy) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} u dy = \frac{g}{3\nu} \delta^2 \quad (13. II)$$

و التدفق الحجمي للسريان الشاقولي عبر السطح  $dz \cdot dy = 1 \cdot dy$  معرف بالشكل :

$$Q_v = \int_0^\delta u dy dz = \int_0^\delta u dy = \bar{u} \cdot (\delta \cdot 1) = \frac{g}{3\nu} \delta^3 \quad (14. II)$$

حيث  $(\delta \cdot 1)$  يمثل سطح انتقال الحجم شاقوليا .

وإذا زادت المسافة لتصبح  $x + dx$  كما هو بالشكل (4.II) ، فمن المتوقع أن تزداد كمية البخار المتكثف ، ويمكن عن طريق استخدام قيمة  $\bar{u}$  من المعادلة (13. II) ، وضربها في  $\rho$  ، ثم إجراء تفاضل بالنسبة إلى  $x$  ، أن تُحدّد قيمة زيادة التكثيف في المسافة من  $x$  إلى  $x + dx$

$$d(Q_m) = d(\rho \cdot Q_v) = d\left(\frac{\rho g}{3\nu} \delta^3\right) = \frac{\rho g}{\nu} \delta^2 d\delta \quad (15. II)$$

هذه الزيادة في كمية البخار المتكثف يتم استخلاصها من بدن البخار ، ويتم تكثيفها على سطح الغشاء.

$$\frac{d(Q_m)}{dz \cdot dx} = \frac{d(\rho \cdot Q_v)}{1 \cdot dx} = \dot{m} \Rightarrow d(Q_m) = \dot{m} \cdot dx \quad (16. II)$$

يمكن تعريف  $\dot{m}$  كمية نواتج التكثيف المتكونة على وحدة المساحات ، و عن طريق المعادلة (2. II) بدلالة الحرارة المنقولة أثناء التكثيف كما يلي :

$$\dot{m} = \frac{k(T_v - T_w)}{L_{ev} \delta} \quad (17. II)$$

و بالتعويض عن  $\dot{m}$  في المعادلة (15. II) بالقيمة الناتجة من المعادلة (2. II) نحصل على الآتي :

$$\frac{k(T_v - T_w)}{L_{ev} \delta} dx = \frac{\rho g}{\nu} \delta^2 d\delta \quad (18. II)$$

$$(T_v - T_w) dx = \left(\frac{\rho g L_{ev}}{k\nu}\right) \delta^3 d\delta \quad (19. II)$$

وبتكامل هذه المعادلة في حدود ضيقة للتكامل ، مع اعتبار أن قيمة كل من  $(T_v - T_w)$  ،  $k$  ،  $\nu$  ،  $L_{ev}$  ،  $\rho$  ، ثابتة وعندما تصبح  $x = 0$  لدينا  $\delta = 0$  فإن

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\rho g L_{ev}}{k\nu}\right) \delta^4 = (T_v - T_w) x + cte ; \quad cte = 0 (x = 0 ; \delta = 0)$$

وينتج أن

$$\delta = \left( \left(4 \frac{k\nu}{\rho g L_{ev}}\right) (T_v - T_w) x \right)^{\frac{1}{4}} \quad (20. II)$$

وتكون قيمة معامل انتقال الحرارة عبر طبقة التكثيف على بعد مسافة  $x$  من قمة السطح البارد لكل وحدة

مساحات بينية و الموضحة بالمعادلة (1. II) ، كما يلي :

$$\frac{Q_t}{A} = \frac{k(T_v - T_w)}{\delta} = L_{ev} \dot{m} = h(T_v - T_w) \quad (21. II)$$

$$\frac{Q_t}{A} = h(T_v - T_w) \Rightarrow h = h_x = \frac{\frac{Q_t}{A}}{(T_v - T_w)} = \frac{k}{\delta} \quad (22. II)$$

و بالتعويض عن قيمة  $\delta$  من المعادلة (20 . II) ينتج أن :

$$h_x = \frac{k}{\left( \left( 4 \frac{k\nu}{\rho g L_{ev}} \right) (T_v - T_w) x \right)^{\frac{1}{4}}} = \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{4\nu (T_v - T_w)} \right)^{1/4} \frac{1}{x^{1/4}}$$

$$\boxed{h_x = \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{4\nu (T_v - T_w)} \right)^{1/4} \frac{1}{x^{1/4}}} \quad (23. II)$$

أما كمية الحرارة المنقولة عبر سمك غشاء التكتيف من قمة السطح الشاقولي إلى  $x$  ، فتكون كالتالي

$$Q_x = \int_0^x h_x (T_v - T_w) dx = \int_0^x \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{4\nu (T_v - T_w)} \right)^{1/4} (T_v - T_w) x^{-1/4} dx$$

$$Q_x = \frac{4^{3/4}}{3} \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu} \right)^{1/4} [(T_v - T_w) x]^{3/4} \quad (24. II)$$

و بالتالي فإن قيمة متوسط معامل انتقال الحرارة بين النقطتين المذكورتين هي :

و تذييل الرموز بالحرف يعني أن القيمة للخاصية المعنية قد تم حسابها عند درجة حرارة الغشاء والتي يمكن حسابها كالتالي

$$\bar{h}_\ell = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell h_x dx = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell \frac{dQ_x}{(T_v - T_w)} = \frac{1}{(T_v - T_w)\ell} \int_0^\ell dQ_x = \frac{(Q_x)_{x=\ell}}{(T_v - T_w)\ell}$$

$$\Rightarrow \bar{h}_\ell = \left( \frac{4}{3} \right)^{3/4} \frac{\left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu} \right)^{1/4} [(T_v - T_w)\ell]^{3/4}}{(T_v - T_w)\ell}$$

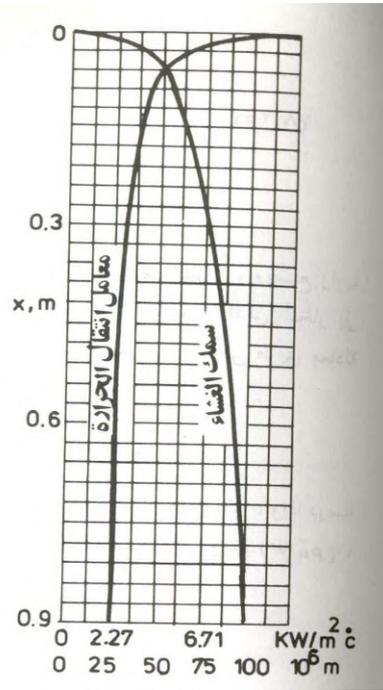
$$\boxed{\bar{h}_\ell = 0.943 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu (T_v - T_w)\ell} \right)^{1/4}} \quad (25. II)$$

كل القيم الخاصة المعنية قد تم حسابها عند درجة حرارة الغشاء  $T_f$  والتي يمكن حسابها كالتالي

$$T_f = \frac{1}{2} (T_v + T_w) \quad (26. II)$$

وكذلك نرمز للفرق بين درجة حرارة البخار و السطح البارد بـ :  $\Delta T = (T_v - T_w)$  و يجدر الإشارة إلى أنه قد أهملت قيمة الجهد الناتج عن مرور البخار المشبع فوق السطح البيني للبخار و غشاء التكثيف . وسوف يتبع هذا الأسلوب فيما يأتي من تحليلات . ويمكن في أي الأحوال إضافة مثل هذا الجهد إلى التحليل

السابق ، وفي الحقيقة يكون مقدار هذا الجهد ذو قيمة صغيرة ، ولا يؤثر كثيراً في مجرى الحسابات ، والتغير الذي يطرأ على كل من سُمك غشاء التكثيف ومعامل انتقال الحرارة المحلي يتضح من الشكل (II . 5) ، ويبدو فيه أن شكل المنحنيات يشابه سُمك الغشاء و عند تطبيق المعادلة (II . 20) من أجل السمك  $\delta$  و المعادلة (II . 23) من أجل معامل انتقال الحرارة المحلي [1].



الشكل (II. 5) : غشاء على أنبوب أفقية.

**II - 5) التكثيف على سطح مائل :** إذا درسنا مكعباً من السائل يميل بزاوية مقدارها  $\alpha$  على الوضع الشاقولي كما في الشكل (II. 6) وتكون مركبة قوة الجاذبية التي تؤثر على المكعب في اتجاه السطح ، تساوي  $\rho g \sin \alpha$  ،

وبالتالي تصبح المعادلة (II . 4) كما يلي

$$\rho g \sin \alpha (dy dx . 1) - \left( \tau - \frac{d\tau}{2} \right) (dx . 1) + \left( \tau + \frac{d\tau}{2} \right) (dx . 1) = 0 \quad (II . 27)$$

وبالنسبة لوحدة المساحات  $dx dz = 1$

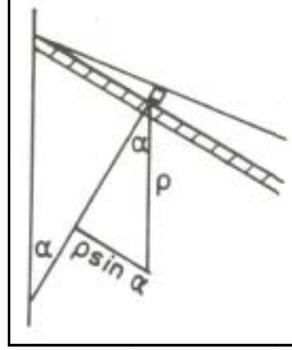
$$\rho g \sin \alpha = - \frac{d\tau}{dy} = \frac{d}{dy} \left( \mu \left( \frac{du}{dy} \right) \right) \quad (II . 28)$$

وتصبح المعادلة (II . 8) كالتالي

$$\frac{d^2u}{dy^2} = -\frac{g\rho}{\mu} \sin \alpha \quad (29 . II)$$

وأيضًا المعادلة (9 . II) تصير و هي لا تختلف كثيرا عن المعادلة (9 . II) فقط أن الحالة الشاقولية  $\alpha = 90^\circ$

$$u = -\frac{g}{2\nu} y^2 \sin \alpha + C_1 y + C_2 \quad (30 . II)$$



الشكل (6.II): غشاء على سطح مائل

وعند بداية عملية التكثيف على السطح البارد، حيث تكون  $y = 0$  لا توجد أية سرعات بطول السطح، فإن

$$u = 0 \quad , \quad C_2 = 0$$

$$y = \delta \quad , \quad (du/dy) = 0$$

وينتج أن

$$C_1 = \frac{g\delta}{2\nu} \sin \alpha$$

وتصير المعادلة (13 . II) كالتالي

$$\bar{u} = \frac{g\delta^2}{3\nu} \sin \alpha \quad (31 . II)$$

وأيضًا المعادلة (25 . II) تصبح

$$\bar{h}_\ell = 0.943 \left[ \frac{k^3 \rho g L_{ev} \sin \alpha}{\nu \Delta T \cdot \ell} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (32 . II)$$

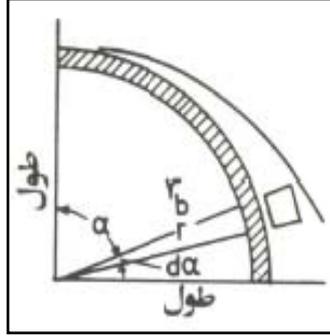
**6- II) التكثيف على سطوح الأنابيب الأفقية :** إذا درسنا مكعبًا أبعاده بالنسبة لوحدة الأطوال  $z = 1$  موجود

عند نصف قطر  $r$ ، ويصنع زاوية مقدارها  $\alpha$  مع الشاقول، كما هو موضح بالشكل (7.II)، فيمكن حساب

معدل تدفق البخار إلى غشاء التكثيف خلال المساحة  $ds = dz \cdot r \cdot d\alpha = 1 \cdot r \cdot d\alpha$ ، عندما يكون

سُمك الغشاء يساوي  $\delta$ ، عن طريق معادلة انتقال الحرارة بالتوصيل كما يلي

$$\dot{m}(dx.1) = \frac{k(T_v - T_w)}{L_{ev} \delta} r. d\alpha \quad (33 . II)$$



الشكل (7.II) : غشاء على أنبوب أفقية.

ونتيجة لعملية التكثيف، فلا بد أن نتوقع زيادة في سمك الغشاء الساقط على السطح المائل ، وإذا درسنا كمية تفاضلية من نواتج التكثيف ، فإن الزيادة خلال مساحة التكثيف  $r. d\alpha$  تكون مساوية لـ  $Q_m = (\rho \bar{u} \delta)$  ، تصبح المعادلة (16 . II) كالتالي

$$d(\rho \bar{u} \delta) = \frac{\rho g}{3\nu} d(\delta^3 \sin \alpha) = \dot{m}. dx \quad (34 . II)$$

وبالتعويض في المعادلة (18 . II) نحصل على

$$\frac{k(T_v - T_w)}{L_{ev} \delta} r. d\alpha = \frac{\rho g}{3\nu} d(\delta^3 \sin \alpha) \quad (35 . II)$$

$$\left( \frac{3\nu k(T_v - T_w) r}{\rho g L_{ev}} \right) . d\alpha = \delta d(\delta^3 \sin \alpha) \quad (36 . II)$$

وبالترميز للثابت  $M$  :

$$M = \left( \frac{3\nu k(T_v - T_w) r}{\rho g L_{ev}} \right) \quad (37 . II)$$

$$M. d\alpha = \delta d(\delta^3 \sin \alpha) \quad (38 . II)$$

وبإجراء عملية التفاضل نحصل على

$$M. d\alpha = \delta(3\delta^2 \sin \alpha d\delta + \delta^3 \cos \alpha d\alpha) \\ \Rightarrow M. d\alpha = (3\delta^3 \sin \alpha d\delta + \delta^4 \cos \alpha d\alpha) \quad (39 . II)$$

وبفرض أن  $Z = \Psi^4 = \delta^4 / M$  وبالتعويض في المعادلة (39 . II) نحصل على ما يلي

$$d\alpha = \left( \frac{3}{4} \sin(\alpha) \right) dz + (z \cos(\alpha)) d\alpha \\ \frac{3}{4} \sin(\alpha) \frac{dz}{d\alpha} + z \cos(\alpha) - 1 = 0 \quad (40 . II)$$

وهذه المعادلة تفاضلية خطية ، ويكون حلها كالتالي

$$Z = \frac{1}{\sin^{4/3} \alpha} \left( \frac{4}{3} \int \sin^{1/3} \alpha \, d\alpha \right) + C_3 \quad (41. II)$$

وعندما تكون  $\alpha = 0$  تصبح  $C_3 = 0$  والحل يصبح

$$Z = \frac{4}{3} \frac{1}{\sin^{4/3} \alpha} \int \sin^{1/3} \alpha \, d\alpha \quad (42. II)$$

ويمكن تعيين قيمة هذا التكامل لقيم متغيرة من  $\alpha$  باستخدام الطرق البيانية ، وبالتعويض في المعادلة (40 . II) ينتج أن :

$$\delta = \Psi M^{1/4} = \Psi \left[ \frac{3\nu k(T_v - T_w)r}{\rho g L_{ev}} \right]^{1/4} \quad (43. II)$$

وكما هو واضح في المعادلة (22 . II) فإن

$$h_x = k/\delta$$

نتيجة : ويتناقص سُمك طبقة التكتيف قليلا بزيادة الزاوية  $\alpha$  من صفر إلى  $5^\circ$  ثم يزداد السمك بعد ذلك بزيادة  $\alpha$  بانتظام إلى أن تتعثر طبقة التكتيف إلى نقط متناثرة . و أثناء التزايد المنتظم للغشاء ، تكون قيمة معامل انتقال الحرارة المحلي عند أي نقطة كالتالي

$$h_\alpha = \frac{k}{\delta} = \frac{1}{\Psi} \left[ \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{3\nu(T_v - T_w)r} \right]^{1/4} \quad (44. II)$$

وتصبح القيمة المتوسطة لمعامل انتقال الحرارة كجزء محصور بين الزاويتين  $\alpha_1$  ،  $\alpha_2$  كما يلي :

$$\bar{h}_\alpha = \frac{k}{M^{1/4}(\alpha_2 - \alpha_1)} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{\Psi} \quad (45. II)$$

وباستخدام إحدى الطرق البيانية ، وبالتعويض عن قيمة  $D_0$  للقطر الخارجي للأنبوب، نحصل على القيمة التالية لمعامل انتقال الحرارة

لمجال الزاوية من صفر إلى  $90^\circ$

$$\bar{h}_{D_0} = 0,860 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu(T_v - T_w)D_0} \right)^{1/4} \quad (46. II)$$

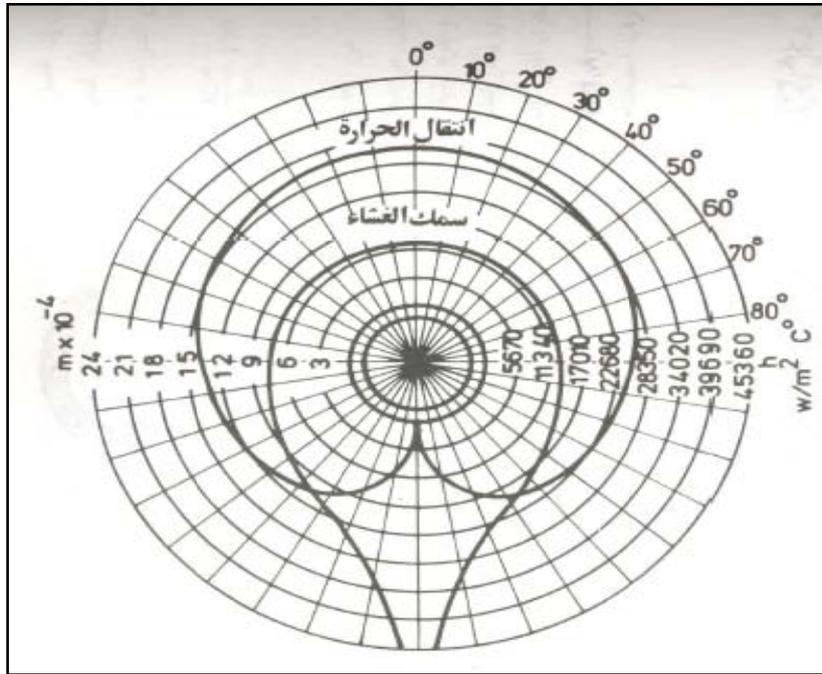
لمجال الزاوية من  $90^\circ$  إلى  $180^\circ$

$$\bar{h}_{D_0} = 0,589 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu(T_v - T_w)D_0} \right)^{1/4} \quad (47. II)$$

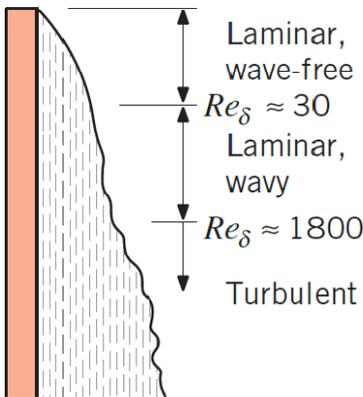
وبفرض وجود تماثل بين نصفى الأنبوب يصبح متوسط قيمة معامل انتقال الحرارة ، على محيط الأنبوب كله كالتالي:

$$\bar{h}_{D_0} = 0,725 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu(T_v - T_w)D_0} \right)^{1/4} \quad (48. II)$$

ويوضح الشكل (8.II) التغيير في سُمك الطبقة الغشائية لنواتج التكثيف ، ومعامل انتقال الحرارة لبخار الماء على سطح أنبوب أفقي ، ويعتمد معامل انتقال الحرارة على مقاومة غشاء التكثيف لانتقال الحرارة بالتوصيل ، كما سبق ذكره



شكل (8.II) : سمك غشاء التكثيف ومعامل انتقال الحرارة حول أنبوب أفقي



شكل (9.II) : التدفق الرقائقي

و الانتقالي و المضطرب

II- 7) تسلسل المعادلات الحسابية للمكثفات : لقد وجد ماك آدامز Mc Adams أثناء تحليله لنتائج العديد من الباحثين النتائج التالية :

نتيجة 1 : أن قيمة معامل التكثيف لبخار الماء على الأنابيب الشاقولية تزيد بمقدار 75 في المائة عن القيمة النظرية له ، والتي تم حسابها باستخدام المعادلة (25. II) .

نتيجة 2 : يوجد توافق بين القيمة النظرية والقيمة العملية للتكتيف ذي التدفق الرقائقي .

نتيجة 3 : استنتج أنه عندما يتدفق سائل ما من أعلى سطح أنبوب شاقولي إلى أسفله فمن المؤكد أن يكون التدفق قرب أعلى الأنبوب من النوع الرقائقي .

نتيجة 4 : كلما اتجهنا إلى أسفل الأنبوب تزداد كمية المتكثف ، ولذلك نجد أن التدفق عند مقطع ما أسفل قمة الأنبوب يتحول إلى تدفق مضطرب .

نتيجة 5 : يمكن تحليل النتائج في مثل هذه الحالات عن طريق معرفة قطر الأنبوب ، وطوله ، ولزوجة السائل ، وكمية البخار المتكثف .

نتيجة 6 : يكون التدفق عند أي مقطع أفقي للأنبوب مشابهاً للتدفق الحلقي بين أنبوبتين لمبادل حراري مزدوج الأنابيب ، إلا أن السطح الخارجي لغشاء التكتيف لا يكون محددًا بأنبوب خارجي .

الدراسة التحليلية لعملية التكتيف على أنبوب شاقولي :

ومن المعلوم أنه في حالة استخدام المبادل الحراري يكون القطر المكافئ لمسار التدفق مساوٍ لأربعة أضعاف نصف القطر الهيدروليكي ، أي إن :

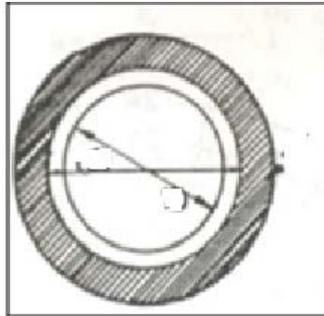
$$D_e = 4r_h \quad ; \quad Re = \frac{D_e u}{\nu} = \frac{D_e (\rho u)}{(\rho \nu)} = \frac{D_e \dot{m}}{\mu} \quad (49 . II)$$

حيث  $\dot{m} = \rho u$  و تمثل تدفق كمية السائل بالنسبة لوحدة السطوح .

وبالنسبة للأنبوب الشاقولي كما هو موضح في الشكل (10.II) يكون  $D_e = 4A_f/P$  ، حيث  $A_f$  هو سطح التدفق المحجوز من طرف السائل و  $P$  هو المحيط المبلل ، و بفرض أن تدفق التكتيف لكل ثانية بالنسبة لكل أنبوب يساوي  $\dot{m} = \dot{m}_t/N_t$  حيث  $N_t$  تمثل إجمالي عدد الأنابيب و  $\dot{m}_t$  التدفق الإجمالي ، فإن :

$$\dot{m} = \dot{m}_t / A_f$$

$$Re = \frac{D_e \dot{m}}{\mu} = \frac{\left(\frac{4A_f}{P}\right) (\dot{m}_t / A_f)}{\mu} = \frac{4\dot{m}_t}{\mu P} \quad (50 . II)$$



شكل (10.II) : مقطع أفقي لغشاء شاقولي متساقط حول أنبوب شاقولي

وإذا كان تحميل التكتيف لكل وحدة أطوال (التدفق الكتلي للمتكتف بالنسبة لوحدة الأطوال التابعة للمحيط ) هو

$$\dot{q} = \dot{m}/P \Rightarrow Re = \frac{4\dot{m}}{\mu P} = \frac{4\dot{q}}{\mu} \quad (51. II)$$

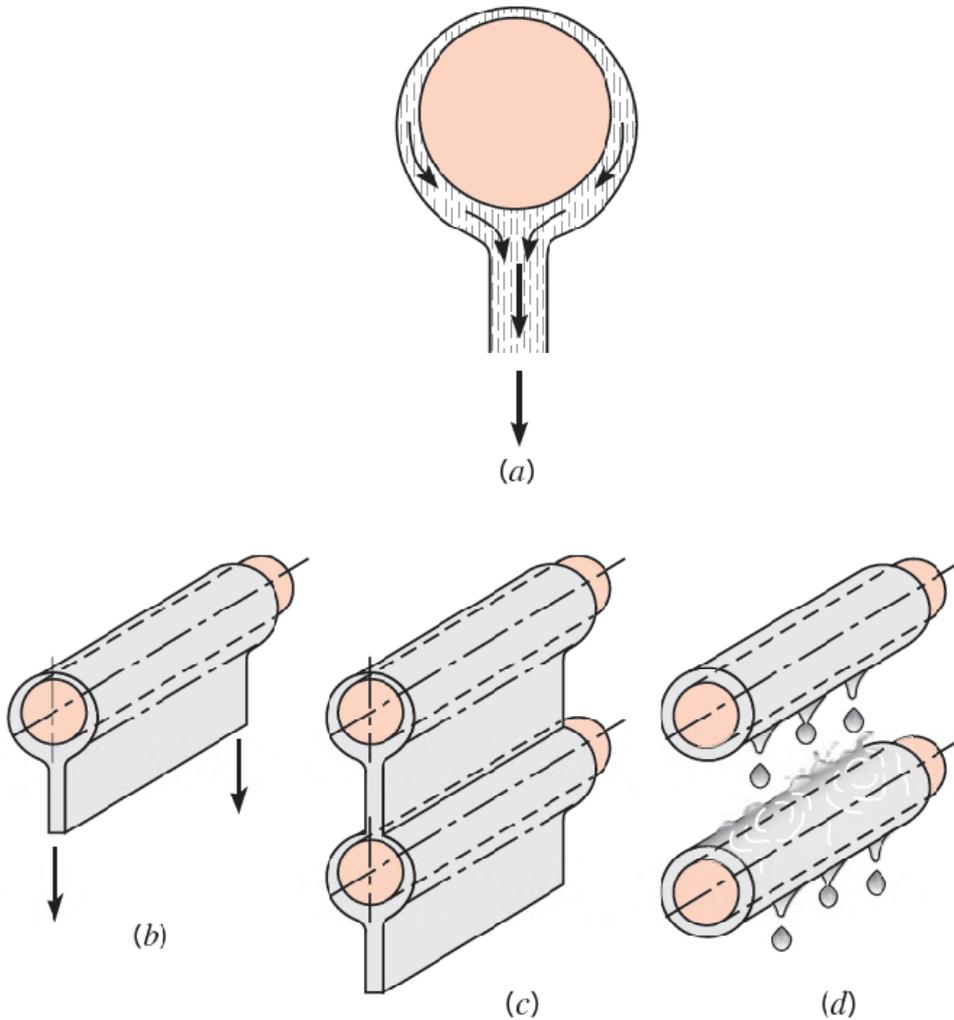
فإن الحمل الحراري الإجمالي المحسوب لكل مساحة السطح البارد هو :

$$Q = L_{ev} \dot{m}$$

$$\bar{h} = \frac{Q}{A_s \Delta T} = \frac{L_{ev} \dot{m}}{(P\ell) \Delta T} = \frac{L_{ev} \dot{q}}{\ell \Delta T} \Rightarrow \frac{L_{ev}}{\ell} \frac{1}{\Delta T} = \frac{\bar{h}}{\dot{q}} \quad (52. II)$$

وبالتعويض في المعادلة (10. II) ينتج أن

$$\bar{h} = 0,943 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu \ell \Delta T} \right)^{1/4} = 0,943 \left( \frac{k^3 \rho g \bar{h}}{\nu \dot{q}} \right)^{1/4} \quad (53. II)$$



شكل (11. II) : غشاء شاقولي متساقط حول أشكال مختلفة لأنابيب أفقية

(a) حول كرة ، (b) حول أنبوب واحد أفقي ، (c) حول مجموعة من أنابيب الأفقية مشكلة ورقة تقطير

مستمرة

(d) حول مجموعة من أنابيب الأفقية مشكلة تقطير نقطي غير مستمر

وبضرب الطرف الأيمن في  $(4\mu/4\mu)^{1/4}$  تصير المعادلة كالتالي

$$\bar{h} = 0,943 \left( \frac{k^3 \rho g \bar{h} 4\mu}{\nu \dot{q} 4\mu} \right)^{1/4}$$

$$\bar{h} = 0,943 \left( \frac{4k^3 \rho g \bar{h} \mu}{(\mu/\rho) \dot{q} 4\mu} \right)^{1/4} = 0,943 \left( \frac{4k^3 \rho^2 g \mu}{\mu^2 4\dot{q}} \right)^{1/4} \bar{h}^{1/4}$$

$$\bar{h} \cdot \bar{h}^{-1/4} = \bar{h}^{3/4} = 0,943 \left( \frac{4k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{1}{(4\dot{q}/\mu)} \right)^{1/4}$$

لدينا  $Re = 4\dot{q}/\mu$  ، ونرفع طرفي المعادلة للأس  $4/3$  فينتج :

$$\bar{h} = (0,943)^{4/3} \left( \frac{4k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{1}{(Re)} \right)^{1/3}$$

$$\bar{h} = (0,943)^{4/3} (4)^{1/3} \left( \frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{1}{(Re)} \right)^{1/3}$$

$$\boxed{\bar{h} = 1,47 \left( \frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right)^{1/3} (Re)^{-1/3}} \quad (54. II)$$

وبالنسبة للأنابيب الأفقية فإن المعادلة (54. II) تصير كالتالي

$$\boxed{\bar{h} = 1,51 \left( \frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right)^{1/3} (Re)^{-1/3}} \quad (55. II)$$

حيث إن تحميل التكتيف للأنبوبة المفردة الأفقية  $\dot{q}'$  (التدفق الكتلي لوحدة الأطوال الموافق لطول الأنبوب) يساوي

$$\dot{q}' = \frac{\dot{m}}{\ell \cdot N_t} \quad (56. II)$$

وباستخدام تحميل التكتيف المناظر و الموضح بالمعادلة (51. II) ، أو المعادلة (56. II) ، تبعاً للحالة تحت

الدراسة ، فيمكن تمثيل المعادلتين (54. II) ، (55. II) كما يلي

$$\bar{h} \left( \frac{\mu^2}{k^3 \rho^2 g} \right)^{1/3} = 1,47 (4\dot{q}/\mu)^{-1/3} = 1,51 (4\dot{q}'/\mu)^{-1/3} \quad (57. II)$$

و منه يصبح  $\dot{q}' < \dot{q}$  ، ولكي يصبح  $\dot{q}' = \dot{q}$  يجب أن نقترح الافتراضات التالية :

من الجدير بالملاحظة أن كلاً من المعادلتين (54. II) ، (55. II) قد تم استنباطها لحالة التكتيف على سطح

أنبوب مفرد . وإذا تمت عملية التكتيف على سطح حزمة من الأنابيب الشاقولية ، فإن وجود بقية أنابيب الحزمة لا

يؤثر في قيمة الافتراضات التي اعتمد عليها الاستنباط السابق ، والذي يمكن تطبيقه عملياً على أي أنبوب من

أنابيب الحزمة . أما إذا كانت أنابيب الحزمة مرتبة في مستوى أفقي فإن السائل المكثف على الأنابيب العلوية يتقطر فوق الأنابيب التالية لها أو الأدنى منها ، ويتسبب في إيجاد قيمة تناسب عكسيا بين  $\dot{q}'$  ,  $N_t^{2/3}$  بدلاً من  $N_t$  وفي مثل تلك الحالات فإنه من المألوف استخدام قيمة فرضية لأنابيب الأفقية (و قد أثبتت تجريبياً) كما يلي

$$\dot{q}' = \dot{m}/\ell N_t^{2/3} \quad (58. II)$$

يمثل الشكل (12.II) الحل البياني للمعادلة (58. II) و لاستعمال هذا الشكل يشترط أن يكون التدفق في غشاء التكتيف من النوع الرقائقي وبالتالي يناظر قيمة متوسطة لعدد رينولدز Re بين 2100 إلى 1800 للسائل المكثف . وإذا كانت الحالة تتضمن تكتيف بخار الماء عند الضغط الجوي فإن المعادلة (57. II) تشابه المعادلة المعطاة تجريبياً بوساطة ماك آدمز Mc Adams كما يلي :

للأنابيب الأفقية (حيث  $D_0$  القطر الخارجي للأنبوب الأفقي):

$$\bar{h}_{D_0} = \frac{3100}{D_0^{1/4} \Delta T^{1/3}} \quad (59. II)$$

للأنابيب الشاقولية (حيث  $\ell$  طول الأنبوب الشاقولي):

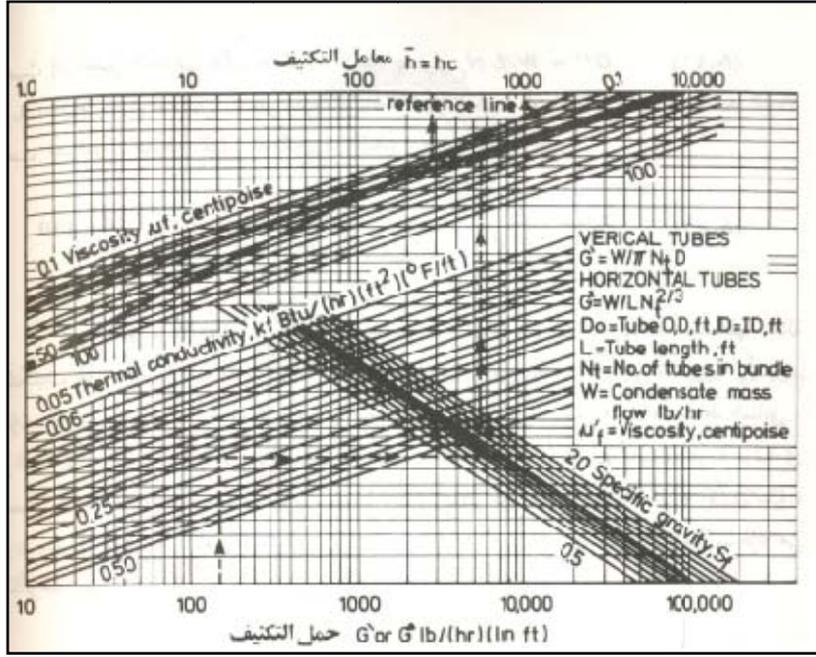
$$\bar{h}_\ell = \frac{4000}{\ell^{1/4} \Delta T^{1/3}} \quad (60. II)$$

حيث  $\Delta T$  تتراوح بين 5 إلى 85 درجة مئوية.

**خلاصة 1:** يمكن استخدام المعادلات (54. II) ، (55. II) ، (57. II) لحسابات التكتيف في المكثفات ذات الصدفية الأسطوانية والأنابيب (Shell and tube heat exchanger) حيث يتم التكتيف على سطح الأنابيب الباردة داخل فراغ الصدفية الأسطوانية. وفي مثل تلك المكثفات ، تثبت حزام أنابيب ذات ألواح أو حواجز اعراضية لمسار البخار. ففي المكثفات الأفقية لا يؤثر وجود تلك الحواجز الاعراضية على قيمة معاملات التكتيف، حيث أنها لا تعتمد على السرعة الكتلية للبخار، في حين أن هذه الحواجز تؤثر على آلية تجميع السائل المتكثف على سطح أنابيب المكثفات الشاقولية ، بالإضافة إلى ذلك ، تختلف درجة حرارة سطح الأنبوب (في المكثفات ذات مسارات الأنابيب المتعددة ) عند كل نقطة في كل مسار ، بينما يفترض ثبوتها في التحليل النظري السابق.

**خلاصة 2 :** يصعب عمل التصحيح المطلوب لحالة وجود حواجز (مكثف أفقي أو شاقولي) أثناء إجراء الحسابات النظرية للحالة ، إلا إذا تمت معالجة كل جزء صغير من السطح في كل مسار على حدى. وهذا يتطلب، في حد ذاته، مجهوداً إضافياً كبيراً جداً. و من حسن الحظ إنه عند استعمال درجة حرارة متوسطة فعالة للسطح كله تكون نسبة الخطأ منخفضة جداً ، مما لا يبرر استعمال الحسابات المطلوبة المعقدة.

خلاصة 3 : بالإضافة إلى ذلك، فإن طريقة تركيب و تصميم مثل تلك المكثفات الشاقولية ذات الألواح الاعتراضية تُحسِّن الوضع كثيراً. وحيث إن ثقب الأنابيب الموجودة في الألواح الاعتراضية تكون عادة أكبر من القطر الخارجي للأنابيب المارة في الثقب بحوالي 0.80 ملليمتر فإن ذلك السماح يمنع سُمك غشاء التكثيف من أن يزيد عن 0.40 ملليمتر، بعد أن يرتطم الغشاء الساقط باللوح الاعتراضي، ومثل هذا الوضع مرغوب فيه بطبيعة الحال ماعدا في حالات تحميل التكثيف العالي لأنابيب المكثف ، حيث يزداد سُمك الغشاء بسرعة و يتحول إلى تدفق مضطرب.



شكل (12.II) : معاملات التكثيف الخاصة بحل المعادلة (II . 58) .

II-8) المقارنة بين التكثيف على السطوح الأفقية و الشاقولية : من المعروف أن معاملات التكثيف لكمية معلومة من البخار على سطح أنبوب ما، تتأثر بدرجة كبيرة بوضع ذلك الأنبوب داخل حزمة المكثف. ففي حالة المكثفات الشاقولية مثلاً يتكثف حوالي 60% من البخار على النصف العلوي لسطح الأنبوب. وبضم المعادلات (II . 25) ، (II . 48) نحصل على النسبة بين المعاملات النظرية للتكثيف على الأنابيب الأفقية و الشاقولية

كما يلي

$$\frac{\bar{h}_\ell}{\bar{h}_{D_0}} = \frac{0,725 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu (T_v - T_w) D_0} \right)^{1/4}}{0,943 \left( \frac{k^3 \rho g L_{ev}}{\nu (T_v - T_w) \ell} \right)^{1/4}} = \frac{0,725}{0,943} \left( \frac{\ell}{D_0} \right)^{1/4} = 0.769 \left( \frac{\ell}{D_0} \right)^{1/4}$$

$$\frac{\bar{h}_\ell}{\bar{h}_{D_0}} = 0.769 \left( \frac{\ell}{D_0} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (61. II)$$

من هذه المقارنة النظرية يمكن أن نقارن أداء المكثفات في الوضيعتين الشاقولية و الأفقية و ندعم المقارنة بتجارب معملية، والنتائج كما يلي :

**نتيجة 1 :** نظريا لكي يتساوى  $\bar{h}_\ell$  و  $\bar{h}_{D_0}$  يجب أن يتوفر قيمة للكسر التالي :

$$\frac{\ell}{D_0} = 2,86 \quad (62. II)$$

**نتيجة 2 :** مثلا فإن معاملات التكتيف على أنبوب أفقي قطره 19 مليمتر، وطوله 480 سنتيمتر يجب أن يعادل أكثر من ثلاثة أضعاف المعامل في حالة وضعه الشاقولي (الأفقي أفضل من الشاقولي في انتقال الحرارة) وبفرض أن تدفق الغشاء المكثف رقائقياً على كل السطح. ولكن الحقيقة ليست على هذه الدرجة من التميز بسبب التغيرات التي تطرأ على الوضع في كلتا الحالتين. مثال على ذلك ، تحوُّل التدفق في الغشاء المتكون على الأنبوب الشاقولي من الحالة الرقاقية إلى الحالة المضطربة.

**نتيجة 3 :** وفي حالة تكتيف بخار العادم المطرود من توربينة بخارية ، حيث يكون ضغط البخار المطرود أقل كثيراً من الضغط الجوي، حوالي  $0,05 atm$  ، فإن مساحة السطوح لتلك المكثفات قد تتراوح من 900 إلى 5400 متر مربع للمكثف الواحد ، وتصل أطوال الأنابيب المستخدمة إلى 7,5 متر. هذه المكثفات الضخمة تصمم باستخدام قيمة عالية للمعامل الكلي لانتقال الحرارة ، والتي قد تصل إلى  $4,5 KW/m^2.K$  وغالباً ما يتم إنشاء هذه المكثفات أفقياً لتسهيل عملية توزيع البخار ، وإزالة السائل المكثف من الأسطوانة.

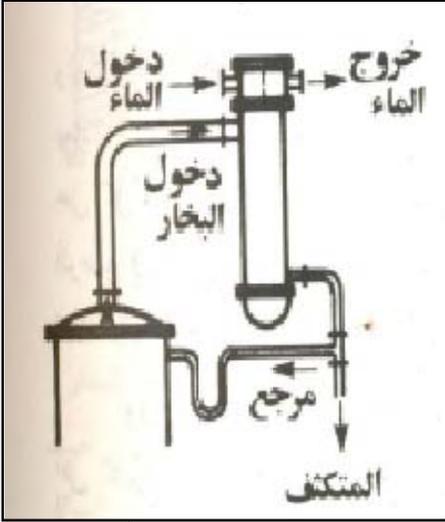
**نتيجة 4 :** وفي حالة استخدام مكثف ما على أحد أعمدة التقطير ، فلا بد من مراعاة بعض العوامل المحددة ، والتي لا بد من أخذها في الاعتبار. ونموذج ترتيبات مثل هذا المكثف موضحة بالشكل (13.II) وفيها يرجع السائل المعاد إلى عمود التقطير تحت تأثير الجاذبية الأرضية ولا بد أن يكون ارتفاع المكثف  $Z_1$  كافياً لتوليد الضغط الثقالي المطلوب لإعادة السائل المكثف (المعاد) إلى عمود التقطير خلال عازل منع التسرب .

**نتيجة 5 :** وفي حالة استخدام مكثف شاقولي لنفس الغرض كما في الشكل (14.II) يتضح أن مثل هذا المكثف لا يتناسب مع طريقة إعادة السائل المكثف بتأثير الجاذبية الأرضية ، إلا إذا تم رفعه عالياً ، أعلى من قيمة عمود التقطير، الذي يمكن أن يكون طويلاً جداً بذاته.

**نتيجة 6 :** إن أعمال الصيانة والدعامات الإنشائية المطلوبة للمكثف الشاقولي ربما تكون باهظة التكاليف ، وعلى درجة عالية من الصعوبة في التنفيذ.

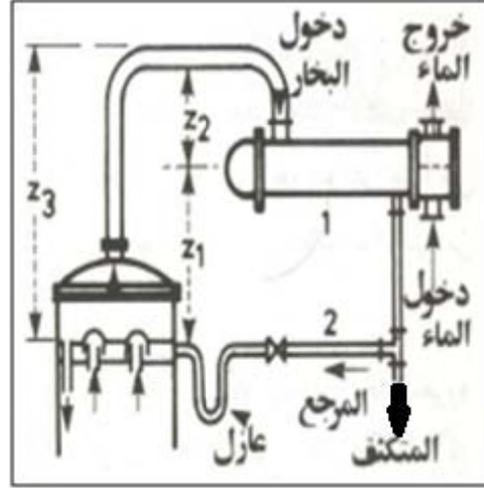
**نتيجة 7 :** أما إذا كان المطلوب ليس فقط تكتيف البخار العلوي فإن التبريد الدوني لنواتج التكتيف ، في هذه الحالة يكون استخدام المكثفات الشاقولية مناسباً لتحقيق مثل ذلك الهدف. وعملية التبريد الدوني تعني تبريد السائل

المكثف إلى درجة حرارة أقل من درجة حرارة التكثيف ، ويحدث هذا عادة وبصورة متكررة عندما يكون البخار المعالج عبارة عن سائل متطاير مطلوب تخزينه . ويمكن عن طريق التبريد الدوني تفادي الفاقد الحراري الذي قد ينجم عن عمليات التبخير أثناء عملية التخزين الابتدائية. والجمع بين عملية التكثيف والتبريد الدوني في وحدة واحدة يلغي الحاجة إلى مبرد منفصل للمنتجات المكثفة.



شكل (II.14) :

مكثف ذو مرجع بالجاذبية (شاقولي)



شكل (II.13) :

مكثف ذو مرجع بالجاذبية (أفقي)

## II-9) التكثيف داخل الأنابيب

أولاً (المكثفات الأفقية): إن استخدام التكثيف داخل الأنابيب له أهداف يحققها وهي الهدف 1 : إن المعادلات التي سبق استنباطها يمكن أن تعطي نتائج جيدة عند تطبيقها على عمليات التكثيف على السطوح الخارجية للأنابيب ، ولم تظهر فروق كبيرة للمكثفات الصناعية إلا في حالات قليلة. ولا تتم كل عمليات التكثيف خارج الأنابيب كما سبق ، ولكن قد يكون السائل المتكثف ذو طبيعة تآكلية بالنسبة للمعادن، أو أن تكون هناك ضرورة لاستعادة الحرارة الكامنة من البخار المتكثف، لاستخدامه في عمليات التسخين الابتدائية لتغذية عمود التقطير مثلاً. ويستحسن في تلك الحالة أن يتم التكثيف على السطح الداخلي للأنابيب بدلاً من سطحها الخارجي، وهنا لا يمكن تطبيق المعادلات التي أستنبطت في هذا الفصل.

فرضية: نفترض أن كمية متساوية من البخار تتكثف داخل كل أنبوب من أنابيب المسار بدون تغيير في معامل التكثيف من أنبوب إلى آخر، هذا من ناحية ويرجع ذلك إلى عدم تأثير أي أنبوب على الآخر، كما هو الحال في التكثيف خارج الأنابيب ، حيث تتناثر نواتج التكثيف من أي أنبوب إلى الأنابيب التي تليه في الصفوف الشاقولية. مواصفات التكثيف داخل الأنابيب الأفقية: فبينما يكون معامل التكثيف ثابتاً بطول الأنبوب في حالة التكثيف على سطحه الخارجي ، فإن معامل التكثيف يتغير في حالة التكثيف داخل الأنبوب، حيث يتجمع السائل المتكثف

في قاع الأنبوب ويزداد سمك طبقة السائل المتكثف بزيادة طول الأنبوب. وتمثل هذه الطبقة مقاومة عالية لانتقال الحرارة أكبر بكثير من تلك المفترضة في استنباطات المعادلات السابق ذكرها. والمعلومات النظرية المتوافرة عن مثل هذا الوضع قليلة ، بحيث لا تسمح بتحليل مناسب له ولقد وجد انه بالإمكان إيجاد قيمة معامل الغشاء تقريبا باستخدام المعادلة (55 . II)، إذا تم حساب  $(\dot{q}')$  و التي تساوي نظريا قيمة  $m/\ell N_t$  باستبدالها بمعادلة تحميل التكتيف الافتراضي كالتالي:

$$\dot{q}' = \frac{\dot{m}}{\ell(0,5N_t)} \quad (63 . II)$$

ولهذه المعادلة ميزة خاصة عند تكتيف البخار في الأنبوب الداخلي لمبادل حراري مزدوج الأنابيب. و عند حدوث التكتيف داخل أنابيب مكثف متعدد المسارات، فيستحسن إيجاد قيمة متوسطة لمعامل غشاء التكتيف لكل مسار على حدة، لأن نواتج التكتيف في المسار الأول سوف تحمل خلال المسار الثاني بوساطة أي عدد من الأنابيب السفلية في المسار، ويحتمل أن تمتلئ أي من هذه الأنابيب بالسائل المتكثف، وبالتالي لا يكون هناك مجالا لتكتيف أي بخار إضافي بها. وفي هذه الحالة تتم الحسابات على أساس التجربة والخطأ، حتى نحصل على التحميل الحقيقي للتكتيف لكل أنبوب في كل مسار [6].

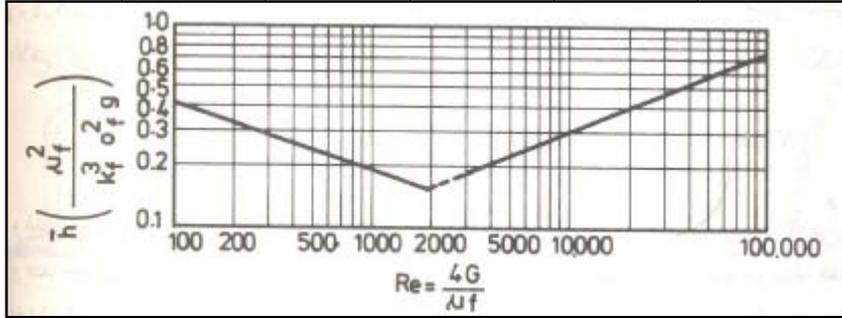
**مواصفات التكتيف داخل الأنابيب الشاقولية :** تكون آلية التكتيف داخل الأنابيب الشاقولية مشابهة تقريبا لآلية التكتيف خارج الأنابيب الشاقولية بفرض إهمال التداخل بين غشاء التكتيف والألواح الاعتراضية. وفي كلتا الحالتين يزداد سمك التكتيف ويستمر نموه أثناء نزوله أسفل سطح الأنبوب من الداخل أو الخارج. ونتيجة لذلك، فهناك احتمال لتغيير نوع التدفق من النوع الرقائقي إلى النوع المضطرب ، عند ارتفاعات معينة مابين القمة والقاع للأنبوب ويتناقص المعامل المحلي للتكتيف باستمرار من القمة متجها إلى أسفل الأنبوب حتى مكان حدوث التغير في نوع التدفق من رقائقي إلى مضطرب بعد حدوث هذا التحول يزداد معامل التكتيف طبقا لما هو معروف عن طبيعة آلية انتقال الحرارة بالحمل القسري.

ولقد توصل كولبرن *Coloburn* بطريقة شبه تجريبية إلى ربط تأثير التدفق الانسيابي أو الرقائقي على الجزء العلوي من طول الأنبوب، بتأثير التدفق المضطرب حتى الطول المناظر للقيمة  $4\dot{q}'/\mu = 2100$  ويستلزم ذلك اختيار معامل انتقال حرارة بالحمل القسري تكون قيمته عند نقطة تغيير نوع التدفق متساوية لكل من التكتيف المستنبط بمعادلة نوسلت والتدفق المضطرب. بعد هذا حصل كولبرن على المعامل المتوسط للتكتيف على طول الأنبوب عن طريق تعديل قيمة المعامل المتوسط للجزء العلوي ، ومعامل انتقال الحرارة للتدفق المضطرب على الجزء السفلي من طول الأنبوب ، أما إذا كانت  $4\dot{q}'/\mu > 2100$ ، فإن قيمة المعاملات المتوسطة للتكتيف على كل الأنبوب يمكن حسابها من الشكل (15 . II) والذي يشمل أيضا القيم التي أوصى بها ماك آدمز .

أما معامل التكتيف في المسافة من قمة الأنبوب وحتى المقطع الذي يحدث عنده تغير نوع التدفق فيمكن حسابه باستخدام الاستنباط شبه التجريبي الذي أجراه نوسلت ، والذي يقوم على أساس أن مثل هذا التغير يتم عند

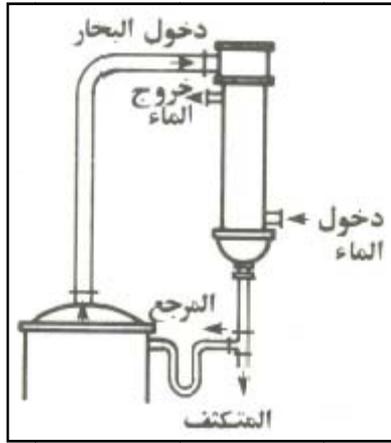
المسافة تسمى  $X_c$  مقاسة من قمة الأنبوب فإنها تساوي بالأقدام ما يلي عند تكثيف بخار الماء، ثم تطبق المعادلات (10 . II)، (20 . II)، وإذا افترضنا أن هذه

$$X_c = \frac{2668 L_{ev} \mu^{5/3}}{\rho^{2/3} k g^{1/3} (T_v - T_w)} \quad (64 . II)$$



شكل (15.II) : منحنى شبه تجريبي للتكثيف باستخدام الأنايب الشاقولية.

وعند وجود دليل على أن تغير نوع التدفق يحدث قيم  $4\dot{q}/\mu > 1400$  كما هو الحال في الأبخرة العضوية، فإنه لا بد من ضرب قيمة  $X_c$  في النسبة بين القيمة المعدلة  $4\dot{q}/\mu$  وقسمتها على 1400. وبطبيعة الحال فعند استخدام مكثف شاقولي يتم فيه التكثيف داخل الأنايب، فإن هذا المكثف سوف يشتمل على مسار واحد للأنايب كما هو موضح بالشكل (16 . II).



شكل (16.II) : التكثيف داخل أنابيب مكثف شاقولي

حسابات المكثف : يفضل تصنيف أنواع المكثفات بحسب العمليات التي تتم بداخلها بدلاً من تصنيفها تبعاً لموقع العملية أو الأداء المطلوب منها ، فغالبا ما تستخدم المكثفات - إلى جانب عملية التكثيف - في عملية إزالة التحمية من البخار أو إحداث تبريد دوبي لنواتج التكثيف، وبذلك تلغى الحاجة إلى استخدام أسطوانات خاصة لانتقال الحرارة المحسوسة. وطريقة تصنيف المكثفات التي تدل على تعديل أو تمييز في حساباته عن الآخرين تتم بالطريقة التالية

## II - 10) الأبخرة المفردة (بخار مركب أو خليط ثابت الغليان) :

- أ- بخار مشبع : تكثيف كلي أو جزئي على السطح الخارجي للأنبوب.
- ب- بخار مسخن : إزالة التخمية والتكثيف من السطح الخارجي للأنابيب.
- ج- بخار مشبع : تكثيف وتبريد دولي على السطح الخارجي للأنابيب.
- د- تكثيف داخل الأنابيب : إزالة التخمية والتكثيف والتبريد الدولي.
- هـ- تكثيف بخار الماء : يمكن استعمال تكثيف داخلي أو خارجي.

## خليط الأبخرة (تطبيق قاعدة الأطوار)

أ- المخاليط الثنائية.

ب- خليط أبخرة ذو مجال تكثيف واسع : مثل البترول.

ج- مخاليط الأبخرة المكونة لنواتج تكثيف غير قابلة للمزج.

د- بخار مفرد أو أبخرة مصحوبة بغازات غير قابلة للتكثيف.

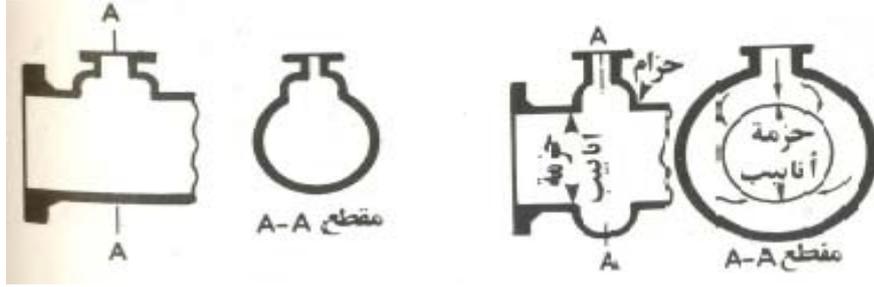
هـ- مخاليط أبخرة وغازات غير قابلة للتكثيف، ومكونة لنواتج تكثيف غير قابلة للمزج.

وفي جميع الحالات من أ-د فإن غالبية المكثفات تكون نماذج مُعدّلة من المبادل الحراري طراز 1-2، ويمكن تسميتها بالمكثفات 1-2. واستعمال هذا المبادل الحراري لمكثف يتطلب عمل احتياطات لزيادة مقطع المدخل، حتى لا يتعرض البخار لهبوط كبير في الضغط عند دخوله أسطوانة المكثف. ويمكن تحقيق هذا الهدف بإحدى الطرق الثلاث الآتية:

أولاً: بإدخال البخار عن طريق حزام بخار كما في الشكل (II . 17).

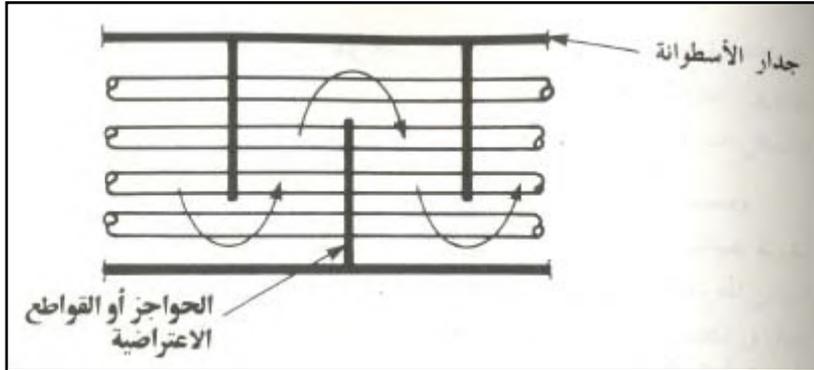
ثانياً: عن طريق استخدام أسطوانة ذات فوهة مفلجة كما في الشكل (II . 18).

ثالثاً: بالطريقة التي تتلخص في إزالة بعض الأنابيب من حزمة الأنابيب القريبة من فتحة المدخل للأسطوانة. وبالرغم من أن عملية التكثيف تؤدي إلى نقص كبير في حجم البخار المستعمل، إلا أنها تتم تقريبا عند ضغط ثابت، عدا فاقد الضغط، نتيجة للاحتكاك بدءاً من فوهة المدخل وحتى فوهة المخرج. وفي حالة المكثفات الأفقية ذات الألواح الاعتراضية والمقطع الدائري المعتاد، يفضل أن يكون سريان مائع التبريد والبخار جنباً إلى جنب وليس لأعلى ولا أسفل، كما في الشكل (II . 19).



شكل (17.II) : حزام البخار.

شكل (18.II) : الفوهة المفلجة.



شكل (19.II) : سريان لأعلى ولأسفل داخل الأسطوانة.

## الفصل الثالث

### الدراسة التجريبية لظاهرة التبخير و التكثيف

يحتوي هذا الفصل على مختلف التجارب الداخلة في عملية التبخير و التكثيف ، و المتمثلة في

- تجربة 1 : ظاهرة التبخير و آلية الغليان .
- تجربة 2 : ظاهرة التكثيف و آلية التقطير.

**III-1) مقدمة :** في هذا الفصل سوف نقوم بتجربتين أساسيتين الأولى في التبخير و الثانية في التكثيف، أما الأولى التي تخص التبخير سوف تكون باستعمال سلك من التنغستن له أبعاد معينة على شكل أسطوانة مغمورة في حوض من الماء المقطر و بتغذية كهربائية لها فرق كمون و شدة تيار معلومتين لحساب الحرارة (الفيض الحراري) انطلاقا من الإستطاعة الكهربائية ، و كذلك حساب المقاومة الكهربائية التي لها علاقة مباشرة بدرجة حرارة السلك  $T_w$  ، و منه يمكن حساب المقادير الفيزيائية للماء عند درجة الحرارة المتوسطة ، التي بدورها تعطينا قدرة لحساب المقادير الفيزيائية الأخرى عند هذه الدرجة ، و نستطيع من خلال هذه المقادير أن نحلل ما يحدث من ظواهر في عملية التبخير كأمطاط الغليان و معامل انتقال الحرارة بالتبخير و غير ذلك .

أما التجربة الثانية التي تخص ظاهرة التكثيف فسوف تجرى في نفس الجهاز لكن بطريقة مختلفة، حيث أن الجهاز يحوي أسطوانتين الأولى مطلية بالذهب و الثانية مطلية بالنحاس ، وذلك من أجل مقارنة ما يحدث من اختلاف في ظاهرة التكثيف من حيث النمط الذي يعتمد على طبيعة السطح المكثف، ومن جهة أخرى يمكن حساب درجة الحرارة للسطح البارد  $T_w$  باستعمال ماء بارد يسري داخل كل من الأسطوانتين، حيث نقوم بحساب درجة حرارة المدخل و المخرج لماء التبريد، و منه يمكن حساب درجة حرارة السطح انطلاقا من متوسط درجة حرارة المدخل والمخرج، و كذلك نعلم أن درجة حرارة البخار و الماء المقطر هي نفسها والتي تساوي  $T_{sat} = 100^\circ\text{C}$  عند الضغط الجوي، و درجة حرارة شريط الماء المسال على السطح تساوي متوسط درجتي الحرارة بين  $T_w$  و  $T_{sat}$  . وفي آخر تحليل للتجربة يمكن حساب المقادير الفيزيائية لتحليل التجربة .

**III-2) الأجهزة المستعملة في التجارب الخاصة بالتبخير و التكثيف:** نستعمل في التجارب جهاز يسمى TE78 تابع لشركة TQ و هو موضح في الشكل التالي : به وحدة التبخير و التكثيف و وحدة القياس و التحكم



شكل (III.1) : وحدة التبخير و التكثيف و وحدة القياس و التحكم لجهاز TE78

### III-3) التجربة الأولى : ظاهرة التبخير وآلية الغليان

**III-3-1) الهدف :** تهدف التجربة لتحقيق ما يلي :

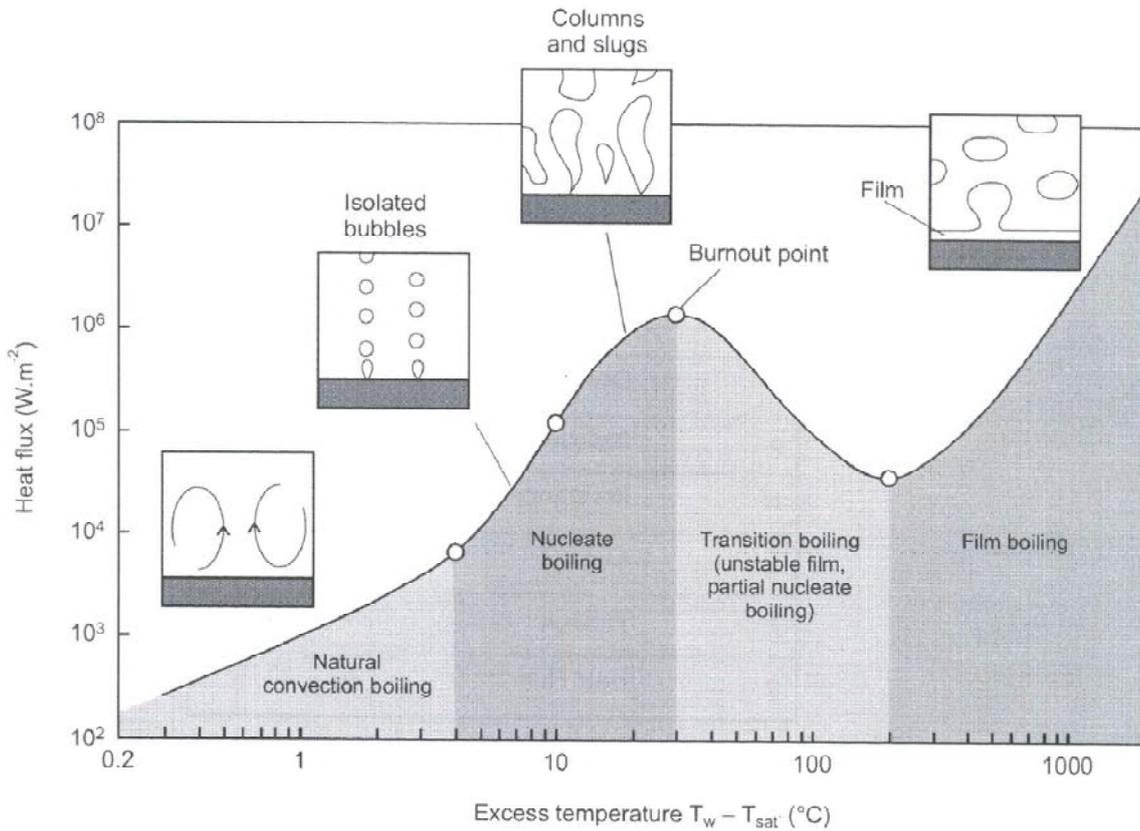
1. التعرف على آلية الغليان بجوار سطح ساخن.
2. التعرف على مراحل الغليان حسب درجة حرارة السطح الساخن.
3. إيجاد العلاقة بين التدفق الحراري للتبخير و درجة حرارة السطح الساخن.
4. حساب المقادير اللابعديّة لظاهرة التبخير .
5. حساب معامل انتقال الحرارة بالغليان.
6. حساب تأثير قطر الفقاعة على الشد السطحي.

III-3-2) الجانب النظري الخاص بالتجربة الأولى (التبخير) : لفهم الجانب التجريبي يجب فهم الجانب النظري كما هو مشروح في الفصل الأول.

(انتقال الحرارة بالغليان) : عند وجود مرجل أو سطح ساخن يلامس السائل يتشكل لنا بخار بما يسمى ظاهرة التبخير (*évaporation*) ، وفي هذه الحالة السطح الساخن من الممكن أن يكون سلك مغمور في الماء السائل مثلا ومنه ينطلق البخار، وعند زيادة الحرارة المتدفقة من السلك الساخن يتشكل لنا عدة أنماط من الغليان حسب المخطط الذي وضعه العالم "*NUKIYAMA*" سنة 1934 ، و كما رأينا في الفصل الأول ، و هو تغير التدفق الحراري (الفيض الحراري) المنتقل من السطح الساخن  $q$  محسوب بالوحدة  $W/m^2$  بدلالة الفرق في درجة الحرارة بين السطح  $T_w$  و درجة حرارة التشبع  $T_{sat}$  للبخار والسائل عند ضغط معين مثلا عند الضغط الجوي تكون  $T_{sat} = 100^\circ C$ ، ومنه نستنتج أن المنحني في المخطط هو الدالة التالية :

$$q = f(T_w - T_{sat})$$

و تجربتنا تمت تحت الضغط الجوي.



شكل (2.III): مخطط الغليان الذي وضعه العالم "*NUKIYAMA*" سنة 1934

و يمكن توضيح مراحل التبخير كما يلي :

حيث نسمي  $(T_w - T_{sat})$  الفائض (الزائد) في درجة الحرارة (Excess temperature) .

مرحلة 1 : حمل الغليان الحر (الطبيعي) Natural convection boiling:

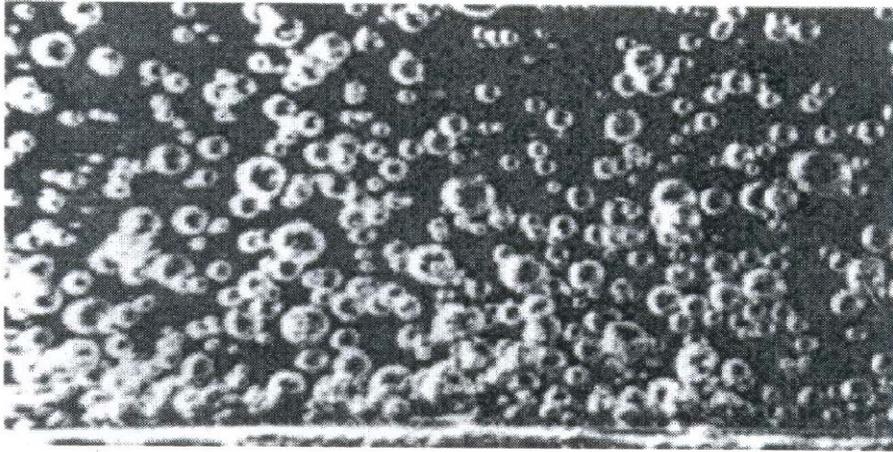
حسب الشكل تتم بين  $0 \leq (T_w - T_{sat}) \leq 4^\circ C$  ، وهي حركة دورانية خفيفة للمائع بدون وجود فقاعات السائل البارد ينزل حتى يلامس السطح الساخن ثم يرتفع عند حصوله على درجة حرارة أكبر و هكذا.

مرحلة 2 : غليان مُبرّد : sub-cooled boiling

و هذه الظاهرة تحدث بين  $4 \leq (T_w - T_{sat}) \leq 10^\circ C$  ، ويظهر عندها ظهور فقاعات ذات أنوية (nucleate bubbles) و غير ملتصقة ببعضها البعض (معزولة عن بعضها) (isolated bubbles) .

مرحلة 3 : غليان ذو الأنوية : nucleate boiling

و هذه الظاهرة تحدث بين  $10 \leq (T_w - T_{sat}) \leq 30^\circ C$  ، ويظهر عندها أعمدة (columns) من الفقاعات على شكل رصاصات (slugs).



شكل(3.III) : غليان ذو الأنوية: nucleate boiling

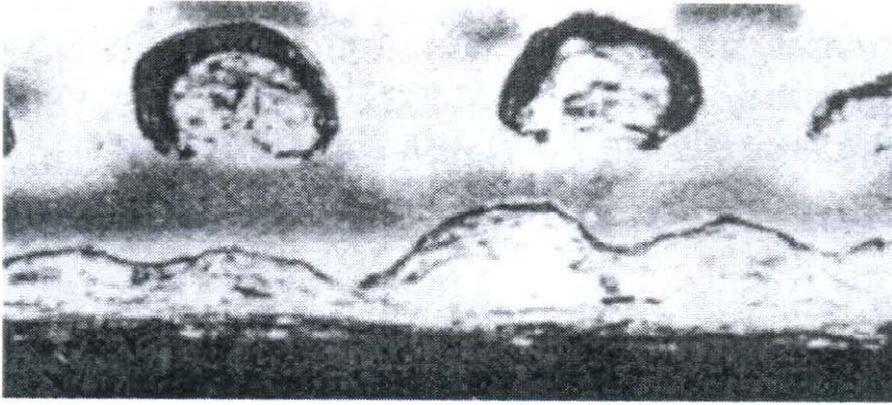
- و نعتبر المرحلة 2 هي بداية للمرحلة 3 ، لذلك في المخطط اندمجنا في مرحلة واحدة تسمى مرحلة الغليان ذو الأنوية التي تحدث في المجال التالي  $4 \leq (T_w - T_{sat}) \leq 30^\circ C$  .
- تزداد الحرارة المنتقلة من السطح الساخن إلى الماء حتى الوصول إلى نقطة تسمى "نقطة نهاية الحرق" و هي "burnout point" و بعدها تبدأ مرحلة أخرى.

مرحلة 4 : الغليان الانتقالي: transition boiling:

و تحدث في المجال  $30 \leq (T_w - T_{sat}) \leq 200^\circ C$  ، و يتشكل فيها شريط غليان غير مستقر يحوي جزئيا غليان ذو أنوية (unstable film/partial nucleate boiling)، ينخفض فيها التدفق الحراري إلى نقطة نسميها النقطة الدنيا لانتقال الحرارة (Low point heat transfer)، وهي النقطة المثلى إقتصاديا و التي تعطي شريطا للغليان ذو كفاءة، وهي بداية المرحلة التالية.

مرحلة 5 : الغليان الشريطي المستقر: Stable film boiling:

و تحدث في المجال  $200 \leq (T_w - T_{sat}) \leq \infty$  ، و يتشكل فيها شريط غليان مستقر . و لا يمكن الوصول إلا لقيمة محددة من درجة الحرارة  $T_w$ .



شكل(4.III): الغليان الشريطي المستقر: Stable film boiling

**III-3-3) مبدأ العمل:** يعتمد على تسخين سلك من التنغستن بالكهرباء و حساب درجة حرارته و الحرارة المنتقلة منه إلى الماء و مشاهدة مراحل الغليان و شكل الفقاعات المتشكلة أثناء عملية الغليان و التبخير.

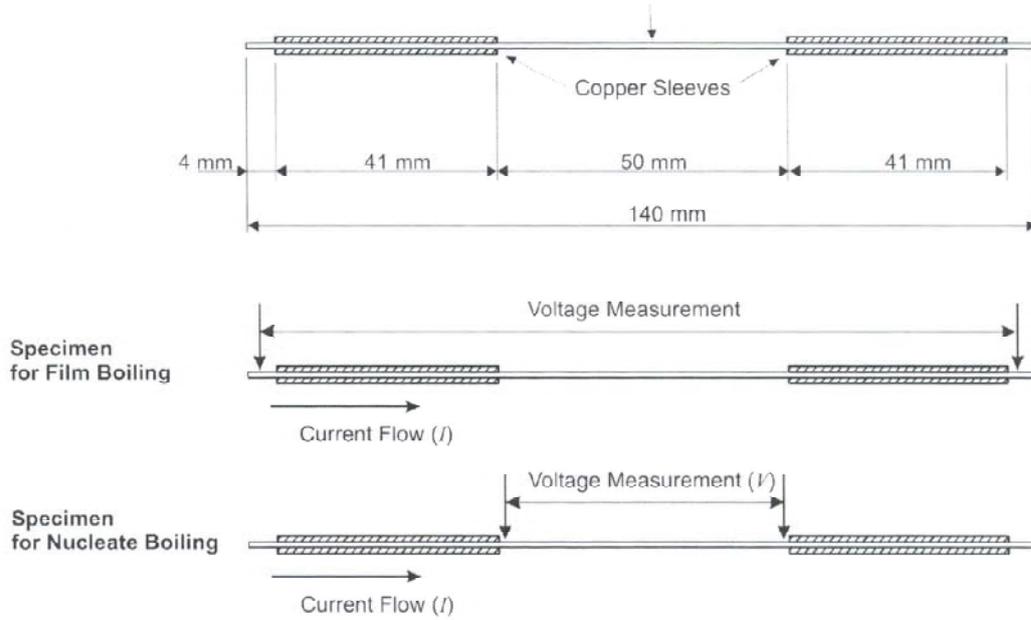
و يعتمد على بعض المخططات المرسومة لحساب درجة الحرارة انطلاقا من معرفة المقاومة الخاصة بالتنغستن ، بعد ذلك يتم تحليل النتائج ببرنامج EXCEL و رسم المنحنيات المطلوبة ببرنامج ORIGIN.

**1\_ طريقة حساب التدفق الحراري  $q$  :**

و هو محسوب بالجول بالنسبة لوحد المساحة لوحد الزمن .

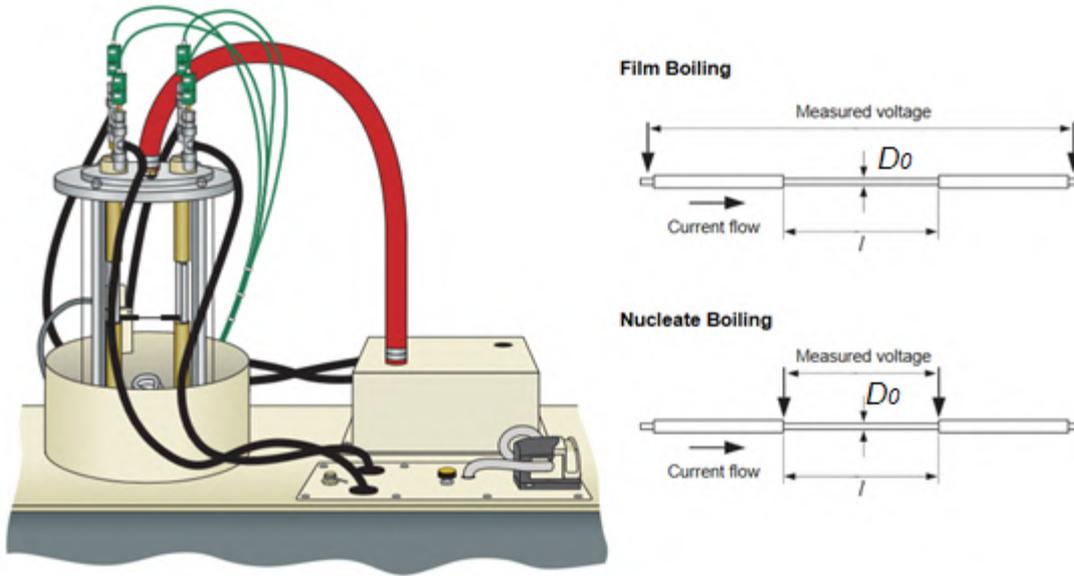
إن عينة السلك **wire specimen** يُسَخَّن بالتيار الكهربائي و تتحول الطاقة الكهربائية إلى حرارية ، ومنه الطاقة الحرارية بالواط هي جداء فرق الكمون في شدة التيار الكهربائي ، وعند قسمة هذا الجداء على مساحة السلك الجانبية (شكل أسطواني) نحصل على  $q$  التدفق الحراري لوحدة المساحة :

$$q = \frac{V.I}{S} = \frac{V.I}{\pi \cdot D_0 \cdot l}$$



شكل (5.III) : يوضح عينة السلك wire specimen و الفروق بين تموضع قطبي التيار حسب الاستخدام

و في حالة التجربة هذه نستخدم الشكل الثاني الخاص بالغليان ذو الأنوية



شكل(III.6) : يوضح قارورة الغليان و بها سلك العينة (specimen) من التنغستن و كيفية انتقال التيار الكهربائي في السلك حسب نمط الغليان .

2\_طريقة حساب درجة حرارة السطح الساخن  $T_s$  :

و هذا من أجل حساب  $(T_w - T_{sat})$  الفائض في درجة الحرارة (**Excess temperature**)

أولاً : نحسب المقاومة الكهربائية للسلك : باستخدام قانون أوم

$$R = \frac{V}{I} (\Omega)$$

ثانياً : نحسب المقاومة الكهربائية للسلك : باستخدام العلاقة التالية

$$r = R \cdot \frac{A}{l} (\Omega \cdot m)$$

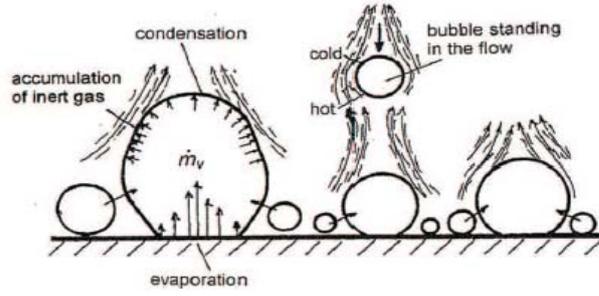
و من المقاومة نستخرج درجة الحرارة  $T_s$  للسلك المصنوع من التنغستن من شكل(III-9)، أو بالعلاقة التالية:

$$T_s = (4.10^9 r - 200) ^\circ C$$

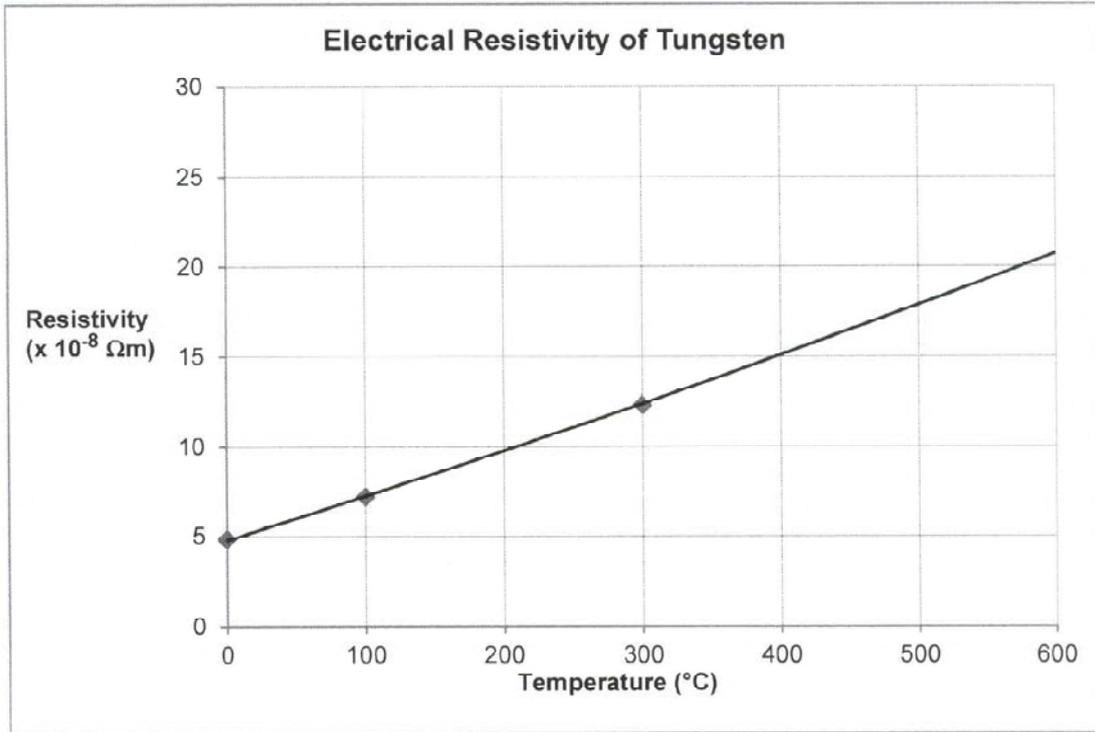
مع العلم أن الطول الفعلي لفرق الكمون يتعلق بنوعية السلك المستعمل :

حالة 1 : سلك خاص بالغليان المنوى  $l = 50mm$  .

حالة 2 : سلك خاص بالغليان الشريطي  $l = 140mm$



شكل (7.III) : ظاهرة تشكل الفقاعات (ظاهرة الغليان ذو الأنوية)



شكل (8.III) : شكل يوضح تغير المقاومة  $r$  بدلالة درجة الحرارة للسلك  $T_w$

III-3-4) الإجراءات المتبعة في التجربة : تتبع الخطوات التالية

خطوة 1 : نربط وحدة القياس و التحكم لجهاز TE78 و جهاز الكمبيوتر مع جهاز الواجهة التي تحول القيم

التجريبية للكمبيوتر و المسمى (Versatile Data Acquisition System) VDAS :

و جهاز VDAS هو من النوع التالي : و له برنامج مرفق يثبت على الكمبيوتر.



**خطوة 2 :** نملاً زجاجة الغليان التابعة لوحدة الغليان و التبخير الجهاز ب 3.5 لتر من الماء المقطر.

**خطوة 3 :** نشغل وحدة القياس و التحكم.

**خطوة 4 :** نشغل المسخن HEATER لمدة تتراوح بين 5 إلى 10 دقائق حتى نرى بعض الفقاعات تتصاعد من المقاومة الكهربائية ثم نطفئ المسخن.

**خطوة 5 :** نشغل التيار الكهربائي المار عبر عينة السلك بفتح SPECIMEN .

**خطوة 6 :** نفتح البرنامج الخاص بالجهاز على الكمبيوتر، ثم نضغط على أمر connecte the device

**خطوة 7 :** نزيد في فرق الكمون ب 0.1 فولط ثم نلاحظ الظاهرة و نعيينها في خانة boiling type

**خطوة 8 :** ثم نفتح الأمر star timed data acquisition ، ونعين زمن كل عينة ب 30 ثانية و نضبط على 35 قراءة ، ونشغل العداد .

**خطوة 9 :** نزيد في فرق الكمون بمقدار 0.02 فولط كل 30 ثانية ثم نلاحظ ظاهرة الغليان و تشكل الفقاعات .

وهكذا حتى نصل إلى فرق كمون يساوي 1 فولط تقريبا و نتوقف. لأن السلك لا يتحمل أكثر من ذلك.

**خطوة 11 :** نعالج المعطيات في الجدول التالي:

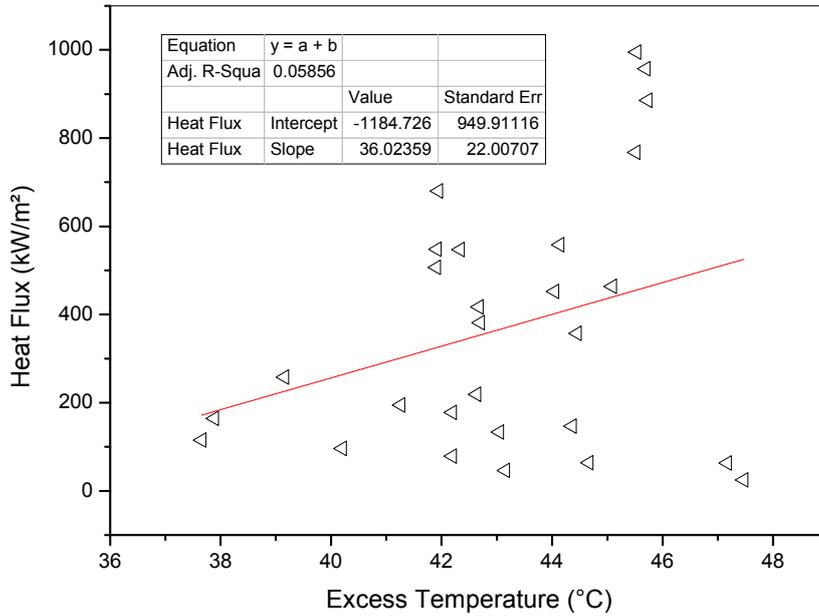
| Wire Dimensions |                    |                            |                                 | Experimental Data                       |                      |                      | Calculated Parameters |                   |                                |                |                   |
|-----------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|---|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|----------------|-------------------|
| Time (s)        | Diameter, $d$ (mm) | Effective length, $l$ (mm) | Surface Area (mm <sup>2</sup> ) | Cross-sectional Area (mm <sup>2</sup> ) | Specimen Voltage (V) | Specimen Current (A) | Description           | Heat Transfer (W) | Heat Flux (kWm <sup>-2</sup> ) | Resistance (Ω) | Resistivity (Ωmm) |
|                 |                    |                            |                                 |   |                      |                      |                       |                   |                                |                |                   |

الطريقة اليدوية في أخذ المعطيات : يمكن الاعتماد على القراءات المباشرة من وحدة القياس أو الكمبيوتر و تدوينها في جدول .

III-3-5) تحليل النتائج : بعد إجراء التجربة حصلنا على القيم المدونة في الجدول التالي :

جدول(III-1) : القيم التجريبية لظاهرة الغليان ذو الأنوية

| Time (min) | Experimental Data    |                      |              | Calculated Parameters         |                  |                     |           |             |           |
|------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------------------|------------------|---------------------|-----------|-------------|-----------|
| Time (s)   | Specimen Voltage (V) | Specimen Current (A) | Boiling type | Heat Flux (W/m <sup>2</sup> ) | Resistance (ohm) | Resistivity (ohm.m) | Area Temp | Excess Temp | film Temp |
| 0          | 0                    | 0                    | -            | 0                             | 0                | 0                   | 0         | 0           | 50        |
| 30         | 0.1                  | 3.9                  | -            | 3310.42                       | 0.025641         | 2.27E-07            | 706.67    | 606.67      | 403.33    |
| 60         | 0.13                 | 6.9                  | -            | 7613.95                       | 0.0188406        | 1.67E-07            | 466.2     | 366.2       | 283.1     |
| 90         | 0.15                 | 9.4                  | -            | 11968.42                      | 0.0159574        | 1.41E-07            | 364.26    | 264.26      | 232.13    |
| 120        | 0.17                 | 11.9                 | -            | 17171.72                      | 0.0142857        | 1.26E-07            | 305.14    | 205.14      | 202.57    |
| 150        | 0.19                 | 14.1                 | -            | 22740.01                      | 0.0134752        | 1.19E-07            | 276.48    | 176.48      | 188.24    |
| 180        | 0.21                 | 15.3                 | -            | 27272.73                      | 0.0137255        | 1.21E-07            | 285.33    | 185.33      | 192.67    |
| 210        | 0.17                 | 17.3                 | Nucleate     | 24963.92                      | 0.0098266        | 8.69E-08            | 147.47    | 47.47       | 123.73    |
| 240        | 0.23                 | 23.7                 | Nucleate     | 46269.42                      | 0.0097046        | 8.58E-08            | 143.16    | 43.16       | 121.58    |
| 270        | 0.27                 | 27.7                 | Nucleate     | 63483.58                      | 0.0097473        | 8.62E-08            | 144.66    | 44.66       | 122.33    |
| 300        | 0.27                 | 27.5                 | Nucleate     | 63025.21                      | 0.0098182        | 8.68E-08            | 147.17    | 47.17       | 123.59    |
| 330        | 0.3                  | 31                   | Nucleate     | 78940.67                      | 0.0096774        | 8.55E-08            | 142.19    | 42.19       | 121.1     |
| 360        | 0.33                 | 34.3                 | Nucleate     | 96078.43                      | 0.009621         | 8.51E-08            | 140.2     | 40.2        | 120.1     |
| 390        | 0.36                 | 37.7                 | Nucleate     | 115202.44                     | 0.0095491        | 8.44E-08            | 137.66    | 37.66       | 118.83    |
| 420        | 0.39                 | 40.2                 | Nucleate     | 133078.69                     | 0.0097015        | 8.58E-08            | 143.04    | 43.04       | 121.52    |
| 450        | 0.41                 | 42.1                 | Nucleate     | 146515.58                     | 0.0097387        | 8.61E-08            | 144.36    | 44.36       | 122.18    |
| 480        | 0.43                 | 45                   | Nucleate     | 164247.52                     | 0.0095556        | 8.45E-08            | 137.88    | 37.88       | 118.94    |
| 510        | 0.45                 | 46.5                 | Nucleate     | 177616.5                      | 0.0096774        | 8.55E-08            | 142.19    | 42.19       | 121.1     |
| 540        | 0.47                 | 48.7                 | Nucleate     | 194287.41                     | 0.0096509        | 8.53E-08            | 141.26    | 41.26       | 120.63    |
| 570        | 0.5                  | 51.6                 | Nucleate     | 218996.69                     | 0.0096899        | 8.57E-08            | 142.64    | 42.64       | 121.32    |
| 600        | 0.54                 | 56.3                 | Nucleate     | 258059.59                     | 0.0095915        | 8.48E-08            | 139.15    | 39.15       | 119.58    |
| 630        | 0.64                 | 65.7                 | Nucleate     | 356913.67                     | 0.0097412        | 8.61E-08            | 144.45    | 44.45       | 122.23    |
| 660        | 0.66                 | 68.1                 | Nucleate     | 381512.61                     | 0.0096916        | 8.57E-08            | 142.7     | 42.7        | 121.35    |
| 690        | 0.69                 | 71.2                 | Nucleate     | 417010.44                     | 0.009691         | 8.57E-08            | 142.67    | 42.67       | 121.34    |
| 720        | 0.72                 | 74                   | Nucleate     | 452253.63                     | 0.0097297        | 8.60E-08            | 144.04    | 44.04       | 122.02    |
| 750        | 0.73                 | 74.8                 | Nucleate     | 463492.06                     | 0.0097594        | 8.63E-08            | 145.09    | 45.09       | 122.55    |
| 780        | 0.76                 | 78.6                 | Nucleate     | 507053.73                     | 0.0096692        | 8.55E-08            | 141.9     | 41.9        | 120.95    |
| 810        | 0.79                 | 81.6                 | Nucleate     | 547186.15                     | 0.0096814        | 8.56E-08            | 142.33    | 42.33       | 121.17    |
| 840        | 0.79                 | 81.7                 | Nucleate     | 547856.72                     | 0.0096695        | 8.55E-08            | 141.91    | 41.91       | 120.96    |
| 870        | 0.8                  | 82.2                 | Nucleate     | 558186.91                     | 0.0097324        | 8.60E-08            | 144.14    | 44.14       | 122.07    |
| 900        | 0.88                 | 91                   | Nucleate     | 679738.56                     | 0.0096703        | 8.55E-08            | 141.94    | 41.94       | 120.97    |
| 930        | 0.94                 | 96.2                 | Nucleate     | 767574.91                     | 0.0097713        | 8.64E-08            | 145.51    | 45.51       | 122.76    |
| 960        | 1.01                 | 103.3                | Nucleate     | 885603.94                     | 0.0097773        | 8.64E-08            | 145.73    | 45.73       | 122.86    |
| 990        | 1.05                 | 107.4                | Nucleate     | 957219.25                     | 0.0097765        | 8.64E-08            | 145.7     | 45.7        | 122.85    |
| 1020       | 1.07                 | 109.5                | Nucleate     | 994525.08                     | 0.0097717        | 8.64E-08            | 145.53    | 45.53       | 122.76    |



شكل (9.III) : يوضح تغير الفيض الحراري بدلالة الزائد في درجة الحرارة

ملاحظات خاصة المنحني في شكل (9.III) :

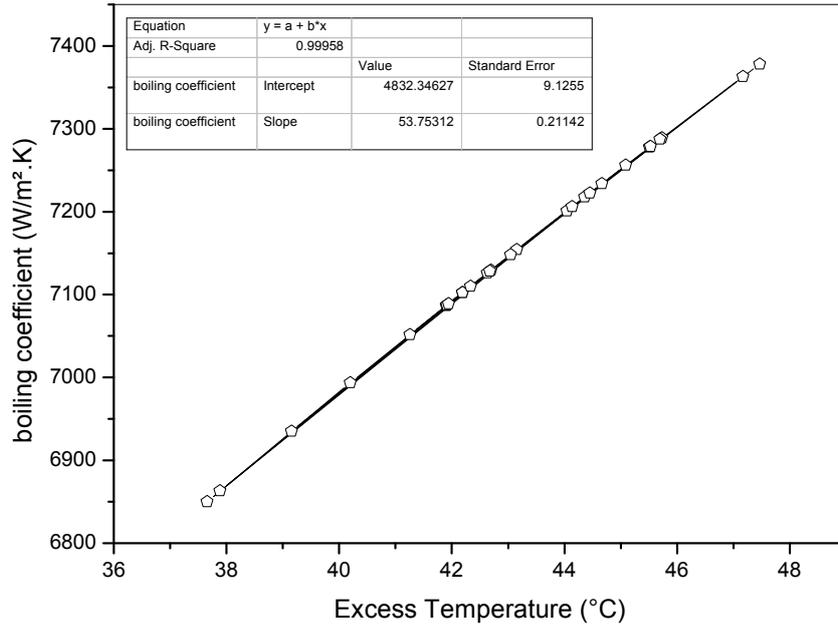
نلاحظ أنه كلما زادت قيمة الزائد في درجة الحرارة زادت قيمة التدفق الحراري

النتيجة : من خلال الملاحظة نستنتج وجود علاقة طردية بين التدفق الحراري و الزائد في درجة الحرارة كما هو موضح

في المعادلة (6.I)(a) في الفصل الأول ، وهذا المنحني التجريبي جزء من منحني Nukiyama الخاص بالمرحلة II و III في المنحني التابع للشكل (4.I) في الفصل الأول الخاص بالتبخير . و المعادلة هي :

$$\dot{Q}_{ev} = h_c(T_w - T_{sat}) = \dot{m}_v L_{ev} \quad ; \quad \text{الحمل الطبيعي في المنطقة I}$$

$$\dot{Q}_{ev} = h_b(T_w - T_{sat}) = \dot{m}_v L_{ev} \quad ; \quad \text{الحمل القسري في المنطقة III, II}$$



شكل (10.III) : يوضح تغيرات معامل انتقال الحرارة بالغليان بدلالة الزائد في درجة الحرارة

ملاحظات خاصة المنحني في شكل (10.III) :

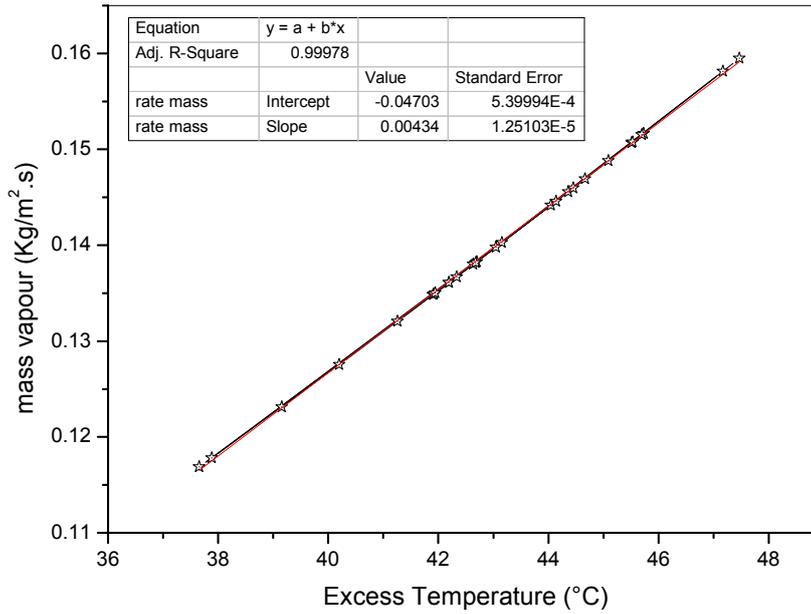
نلاحظ أنه كلما زادت قيمة الزائد في درجة الحرارة  $\Delta T_w$  زادت قيمة معامل انتقال الحرارة بالغليان  $h_b$

النتيجة : من خلال الملاحظة نستنتج وجود علاقة طردية بين معامل انتقال الحرارة بالغليان  $h_b$  و الزائد في درجة الحرارة  $\Delta T_w$

كما هو موضح في المعادلة (14.I) في الفصل الأول :

$$\bar{h}_b = \frac{q}{A \cdot \Delta T_x} = \frac{q}{A \cdot \Delta T_w} = 4832,34627 + 53,75312 \cdot \Delta T_w$$

حيث  $\Delta T_x$  هي الفرق الافتراضي بين نقطتين تتحرك بينهما الفقاعة ، و  $\Delta T_w$  هو أكبر فرق يمكن الحصول عليه في وسط السائل، لذلك نعوض  $\Delta T_x$  بالفرق  $\Delta T_w$  الذي يمثل الزائد في درجة الحرارة.



شكل(11.III) : يوضح تغيرات التدفق الكتلي للبخار بدلالة الزائد في درجة الحرارة

ملاحظات خاصة المنحني في شكل(11.III) :

نلاحظ أنه كلما زادت قيمة الزائد في درجة الحرارة زادت قيمة التدفق الكتلي للبخار

النتيجة : من خلال الملاحظة نستنتج وجود علاقة طردية بين التدفق الكتلي للبخار و الزائد في درجة الحرارة

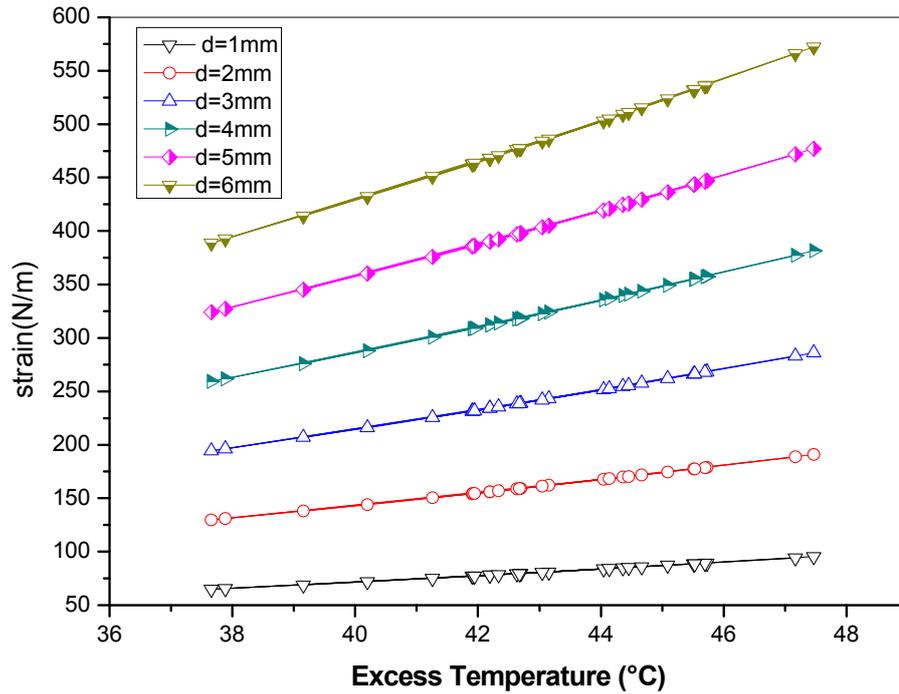
كما هو موضح في المعادلة (6.I)(b) في الفصل الأول

$$\dot{m}_v = \frac{h_c(T_w - T_{sat})}{L_{ev}} = -0.04703 + 0.00434 \cdot \Delta T_w$$

حيث  $L_{ev}$  الحرارة الكامنة للتبخير (سائل مشبع يتحول إلى بخار مشبع) عند درجة الحرارة المتوسطة بين درجة حرارة السطح  $T_w$  و درجة التشبع  $T_{sat}$  عند الضغط المقاس  $P_{sat}$ .

كمية البخار القصوى  $\dot{m}_v(max)$  المنتجة من طرف سلك طوله  $l = 50mm$  و قطره  $D_0 = 1mm$  ، أي مساحة جانبية تساوي :  $S = l \cdot \pi D_0 = 5\pi \cdot 10^{-5} m^2$  :

$$\dot{m}_v(max) = S \cdot \dot{m}_v = (5\pi \cdot 10^{-5}) \cdot (0,16) = 2,5 \cdot 10^{-5} kg/s = 1,5 g/min$$



شكل (12.III) : يوضح تغيرات الشد السطحي للفقاعات بدلالة الزائد في درجة الحرارة حسب قطر الفقاعة

ملاحظات خاصة المنحني في شكل (12.III) :

نلاحظ أنه كلما زادت قيمة الزائد في درجة الحرارة زادت قيمة الشد السطحي ، و نلاحظ كذلك أنه كلما زادت قيمة قطر الفقاعة زادت قيمة الشد السطحي

النتيجة : من خلال الملاحظة نستنتج وجود علاقة طردية بين الشد السطحي و الزائد في درجة الحرارة من جهة

ومن جهة أخرى وجود علاقة طردية بين الشد السطحي وقطر الفقاعة كما هو موضح في المعادلة (8. I)

في الفصل الأول ، وهي كالتالي :

$$(P_v - P_l) = \frac{2\sigma}{r} \Rightarrow \sigma = \frac{1}{2}r(P_v - P_l)$$

### III-4) التجربة الثانية : ظاهرة التكثيف و آلية التقطير

III-4-1) الهدف : تهدف التجربة لتحقيق ما يلي :

1. التعرف على ظاهرة التكثيف على جدار بارد.
2. اختلاف نوعية الجدار في نقل الحرارة الخاصة بالتكثيف.
3. استعمال بعض قوانين انتقال الحرارة في حساب حرارة التكثيف.

III-4-2) الجانب النظري الخاص بالتجربة الثانية (التكثيف) :

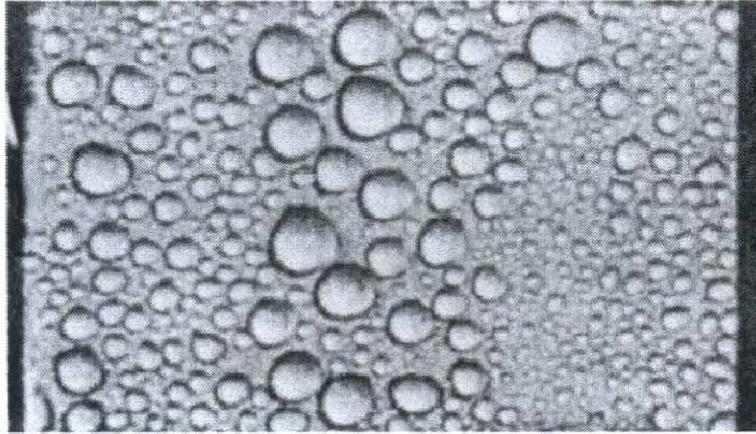
فرضيات: التكثيف بجوار صفيحة مستوية طولها  $l$ .

- 1) نعتبر البخار بخار نقي تماما من السائل، وفي حركة مستقرة ومشبع في درجة حرارة  $T_{sat}$  وتحت ضغط  $P_{sat}$ .
- 2) درجة حرارة  $T_p$  ثابتة على مستوى سطح الصفيحة.
- 3) طبقة الماء السائل تتحرك إلى الأسفل بفعل قوة الجاذبية الأرضية، وتكون هذه الطبقة رقيقة (قشرية pellicular)
- 4) سريان الماء السائل المكثف ذو نمط رقائقي.
- 5) يحرر البخار المكثف حرارة لاتونية، والسائل المُشكَّل يبرد تحت درجة حرارة أقل من  $T_{sat}$ . والحرارة تكتسبها الصفيحة بالتوصيل فقط وتنتقل عبر الطبقة القشرية.

III-4-3) مبدأ العمل: يعتمد على تسخين الماء إلى درجة الغليان و حساب درجة حرارة ماء التكثيف في

المدخل والمخرج و حساب حرارة التكثيف انطلاقا من اختلاف درجات حرارة المدخل والمخرج لماء التكثيف.

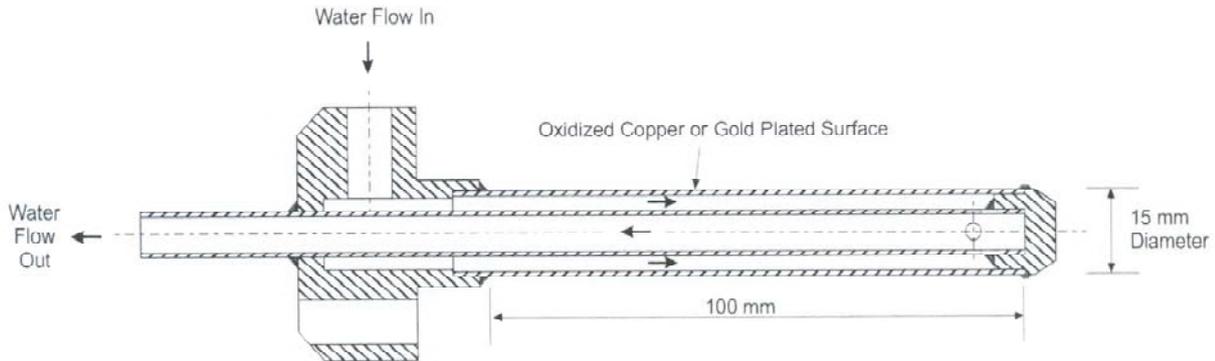
و يعتمد على بعض المخططات المرسومة لحساب التوصيلية والكتلة الحجمية والسعة الحرارية للماء بدلالة درجة حرارته وحساب التدفق الحجمي لماء التكثيف، بعد ذلك يتم تحليل النتائج ببرنامج EXCEL و رسم المنحنيات المطلوبة ببرنامج ORIGIN.



شكل (13.III) : مظهر حقيقي للطبقة القشرية للماء السائل

### 1\_ خصائص ماء التكثيف :

العينات الأسطوانية : لتكثيف البخار على السطح البارد كان لابد من إصاق السطح بنظام تبريد، ونظام التبريد في هذه التجربة عبارة عن عينة أسطوانية لها الشكل التالي :



شكل (14.III): مظهر طولي في العينة الأسطوانية (Cylinder Specimen)

توضع العينة شاقوليا داخل زجاجة التبخير، و السطح الخارجي مطلي بمادة معدنية، ولدينا نوعين من العينة :

### العينة 1 : طبقة مذهبة Gold plated

### العينة 2 : نحاس أحمر متأكسد Oxidized Cooper

يدخل الماء البارد من المدخل (Water flow in) و تقاس درجة حرارته بـ  $T_{in}$ .

ويخرج من المخرج (Water flow out) بدرجة حرارة أكبر في القيمة نسبيا  $T_{out}$ .

|                    |  |        |
|--------------------|--|--------|
| Cylinder Specimens | 1 Gold Plated - 3 Microns thick<br>1 Oxidized Copper |        |
|                    | Outside Diameter                                     | 15 mm  |
|                    | Effective Length                                     | 100 mm |

2\_التدفق الحجمي لماء التكثيف : في وحدة القياس و التحكم نقرأ  $\dot{V}$  التدفق الحجمي للماء و الذي يتم ضبطه حسب الطلب، و التدفق الحجمي محسوب بالتر لكل دقيقة.

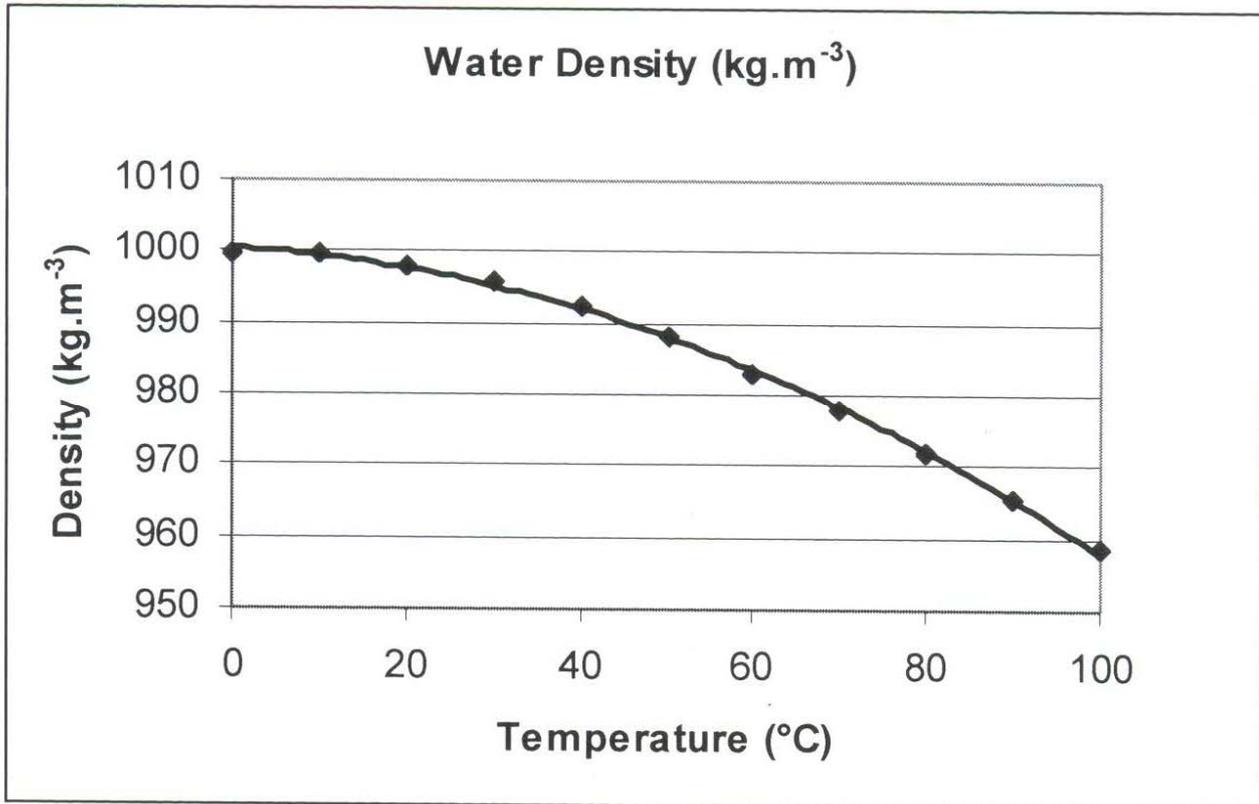
يتم تحويل الوحدة إلى متر مكعب لكل ثانية بقسمة القيمة المقروءة على العدد  $60 \times 1000$  كما يلي

$$\dot{V}[m^3/s] = \frac{\dot{V}[L/min]}{60 \times 1000}$$

3\_التدفق الكتلي لماء التكثيف : نضرب التدفق الحجمي  $\dot{V}[m^3/s]$  في الكتلة الحجمية للماء  $\rho[kg/m^3]$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

و هي محسوبة عند درجة الحرارة المتوسطة بين المدخل و المخرج  $T_{moy} = (T_{out} + T_{in})/2$  حسب المخطط التالي



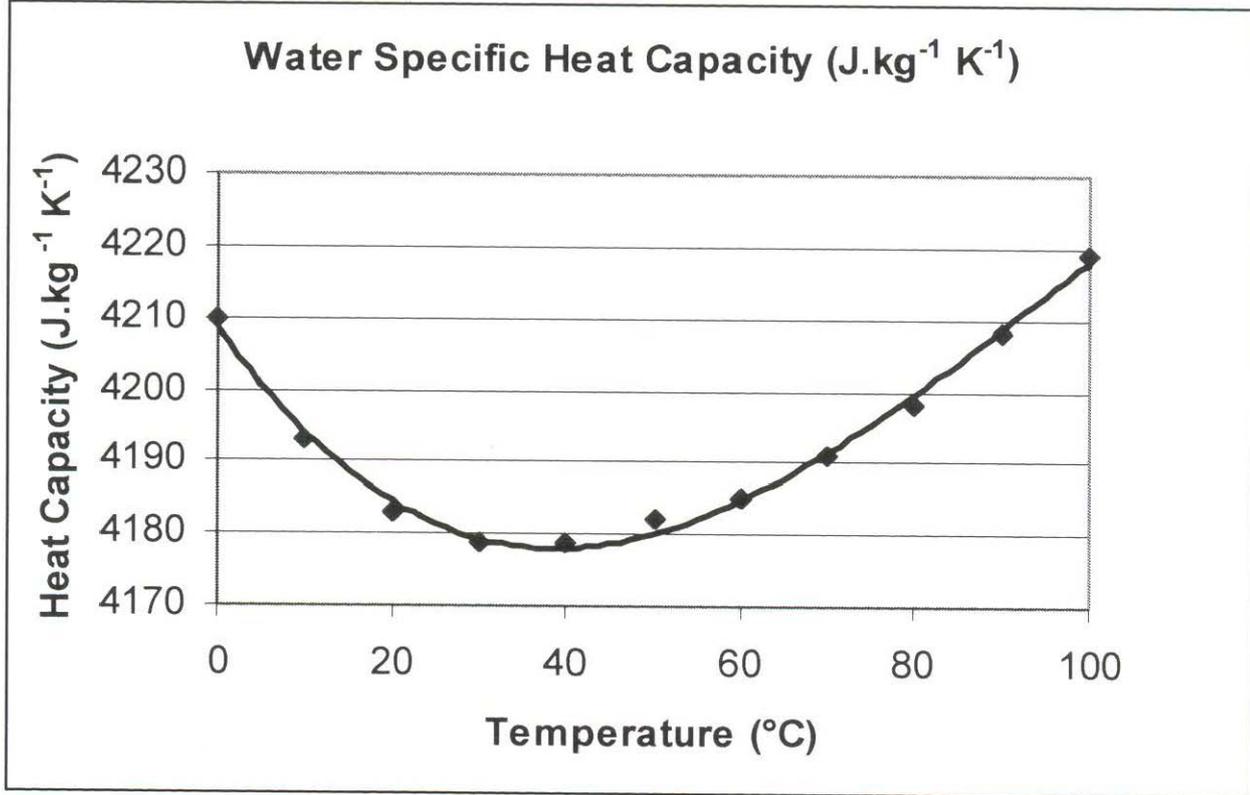
شكل (III.15): تغير الكتلة الحجمية بدلالة درجة الحرارة المتوسطة لماء التبريد

4\_ الحرارة المنتقلة بالتكثيف : و هي محسوبة بالواط ، حيث ان الماء البارد الخاص بالتكثيف يمتص هذه الحرارة و ترتفع درجة حرارة مخرجه، وبفضل وجود السعة الحرارية للماء عند درجة الحرارة المتوسطة بين المدخل و المخرج يمكن كتابة العلاقة التالية :

$$T_{moy} = (T_{out} + T_{in})/2$$

$$\dot{Q} = \dot{m}.C.(T_{out} - T_{in})$$

و السعة الحرارية  $C$  محسوبة بالمخطط التالي :



شكل(16.III): تغير السعة الحرارية بدلالة درجة الحرارة المتوسطة لماء التبريد

5\_ معامل الانتقال الحراري الخاص بالتكثيف : و هي محسوبة بالواط على متر مربع لكل تغير في درجة الحرارة يساوي 1 درجة مئوية و يخص البخار المتكثف على السطح الخارجي للعينه الأسطوانية و يحسب بالعلاقة التالية :

$$h = \frac{\text{Heat Transfer Rate}}{\text{Specimen Area} \times \text{Temperature Drop}} = \frac{\dot{Q}}{S.(T_{sat} - T_{moy})}$$

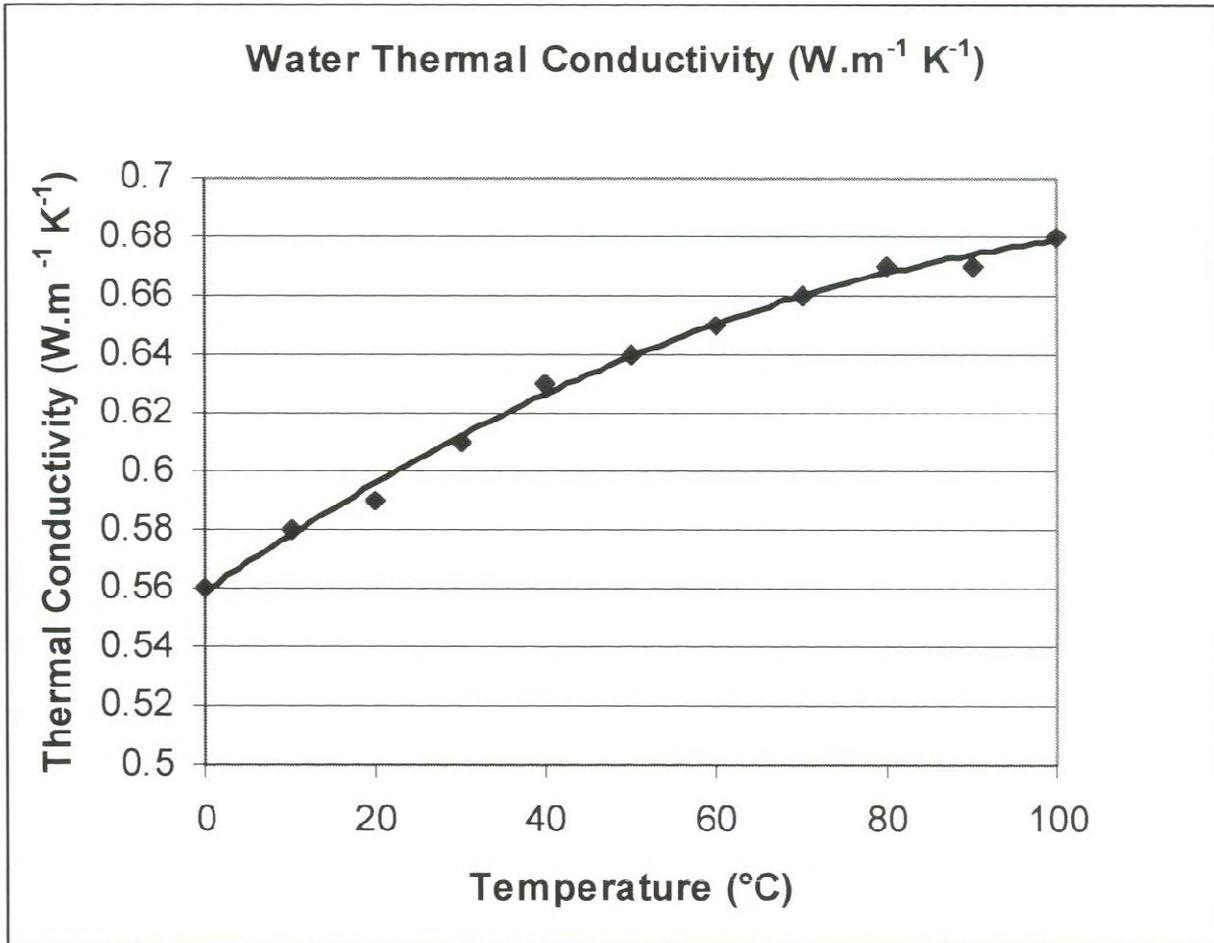
السطح  $S$  هو مساحة السطح الخارجي للعينه الأسطوانية، والفرق في درجة الحرارة يكون بين درجة التشبع للبخار  $T_{sat}$  و درجة حرارة السطح الخارجي التي نعتبرها عمليا تساوي القيمة المتوسطة  $T_{moy}$

6\_رقم نوسالت (Nusselt) الخاص بالتكثيف : و هو مقدار لا بعدي يحسب بالعلاقة التالية :

$$Nu_l = \frac{\text{Heat Transfer Coefficient} \times \text{Specimen Length}}{\text{Thermal Conductivity of Water}} = \frac{h \cdot l}{\lambda}$$

و يمكن الاعتماد على نوسالت المحسوب بالقطر بدلا من الطول .

التوصيلية الحرارية للماء المتكثف محسوبة بالمخطط التالي:



شكل (17.III): تغير التوصيلية الحرارية بدلالة درجة حرارة شريط التكثيف

7\_درجة حرارة شريط التكثيف هي القيمة المتوسطة بين درجة حرارة البخار المشبع  $T_{sat}$  و درجة حرارة السطح الخارجي التي تساوي عمليا القيمة المتوسطة بين المدخل والمخرج الخاص بالماء البارد داخل العينة  $T_{moy}$ ، و منه درجة حرارة شريط التكثيف هي :

III-4-4) الإجراءات المتبعة في التجربة :

خطوة 1 : نربط وحدة القياس و التحكم لجهاز TE78 و جهاز الكمبيوتر مع جهاز الواجهة التي تحول القيم التجريبية للكمبيوتر و المسمى (Versatile Data Acquisition System) VDAS :

خطوة 2 : نملأ خزان الماء بـ 6.5 لتر من الماء المقطر ، وكذلك نملأ زجاجة الجهاز بـ 3.5 لتر من الماء المقطر .

خطوة 3 : نشغل وحدة القياس .

خطوة 4 : نشغل المسخن HEATER لمدة تتراوح بين 5 إلى 10 دقائق حتى نرى بعض الفقاعات تتصاعد من المقاومة الكهربائية و نترك المسخن يشتغل حتى إنهاء التجربة .

خطوة 5 : نشغل المضخة على وحدة التحكم بالأمر pump، ونضبط التدفق على 0.1 لتر في الدقيقة .

خطوة 6 : ندون قيم التدفق ودرجات الحرارة  $T_{in}$  و  $T_{out}$  في الجدول 1 .

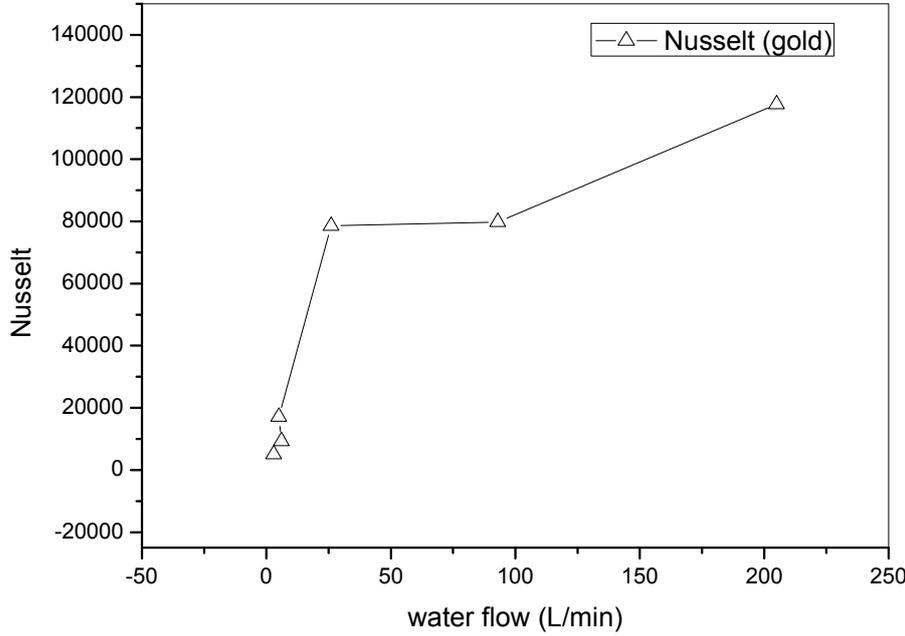
خطوة 7 : نعيد التجربة بتغيير التدفق قليلا و هكذا حتى نكمل القياسات الخاصة بالعينة الاسطوانية 1

خطوة 8 : نغير موضع المزدوجات الحرارية في العينة الاسطوانية 2 ، و نعيد نفس الخطوات 5، 6، 7،

الطريقة اليدوية في أخذ المعطيات : يمكن الاعتماد على القراءات المباشرة من وحدة القياس أو الكمبيوتر و تدوينها في الجدول ، ونحرك المزدوجات الحرارية الخاصة بالعينتين في كل قراءة لربح الوقت .

III-4-5) تحليل النتائج : جدول (III-2) القيم الخاصة بالتكثيف للعينتين

| specimen        | water flow | inlet Temp | outlet Temp | Temp diff | Mean Temp | film Temp | water density | water capacity | conductivity | Mass flow | Rate Heat Transfer (W) | heat transfer coeff(W/m <sup>2</sup> .K) | Nusselt-d  | Nusselt-l   |
|-----------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-----------|---------------|----------------|--------------|-----------|------------------------|--|------------|-------------|
| gold plated     | 3          | 37.50      | 54.40       | 16.90     | 45.95     | 27.03     | 990           | 4180           | 0.630        | 0.050     | 3496.78                | 31947.19                                 | 760.6475   | 5070.9830   |
|                 | 6          | 39.10      | 54.80       | 15.70     | 46.95     | 26.53     | 989           | 4181           | 0.635        | 0.099     | 6491.96                | 58908.04                                 | 1391.5284  | 9276.8559   |
|                 | 5          | 38.90      | 77.50       | 38.60     | 58.20     | 20.90     | 983           | 4184           | 0.650        | 0.082     | 13229.74               | 111502.23                                | 2573.1285  | 17154.1898  |
|                 | 26         | 43.10      | 77.90       | 34.80     | 60.50     | 19.75     | 982           | 4185           | 0.655        | 0.426     | 61973.82               | 514839.63                                | 11790.2204 | 78601.4696  |
|                 | 93         | 74.20      | 85.60       | 11.40     | 79.90     | 10.05     | 973           | 4195           | 0.670        | 1.508     | 72124.26               | 534550.75                                | 11967.5541 | 79783.6941  |
|                 | 205        | 82.20      | 90.20       | 8.00      | 86.20     | 6.90      | 968           | 4205           | 0.677        | 3.307     | 111258.69              | 796696.67                                | 17652.0680 | 117680.4535 |
| Oxidized Cooper | 80         | 28.20      | 67.10       | 38.90     | 47.65     | 26.18     | 988           | 4181           | 0.637        | 1.317     | 214252.28              | 1934907.25                               | 45562.9651 | 303753.1008 |
|                 | 77         | 37.60      | 70.40       | 32.80     | 54.00     | 23.00     | 985           | 4182           | 0.650        | 1.264     | 173393.81              | 1501245.11                               | 34644.1179 | 230960.7859 |
|                 | 76         | 50.90      | 75.10       | 24.20     | 63.00     | 18.50     | 983           | 4187           | 0.655        | 1.245     | 126163.63              | 1032013.33                               | 23633.8931 | 157559.2875 |
|                 | 97         | 58.50      | 79.20       | 20.70     | 68.85     | 15.58     | 978           | 4188           | 0.659        | 1.581     | 137068.09              | 1082429.83                               | 24638.0084 | 164253.3892 |
|                 | 102        | 63.20      | 81.30       | 18.10     | 72.25     | 13.88     | 975           | 4192           | 0.660        | 1.658     | 125763.14              | 973549.62                                | 22126.1277 | 147507.5183 |
|                 | 130        | 66.70      | 81.90       | 15.20     | 74.30     | 12.85     | 972           | 4194           | 0.666        | 2.106     | 134254.67              | 1027000.73                               | 23116.0901 | 154107.2674 |



شكل (18.III): تغير رقم Nusselt للتكثيف لعينة 1 الخاصة بالذهب بدلالة التدفق الحجمي لماء التبريد

ملاحظات خاصة المنحني في شكل (18.III) :

نلاحظ أنه كلما زادت قيمة التدفق الحجمي لماء التبريد داخل العينة الأسطوانية زاد من قيمة رقم Nusselt

النتيجة : من خلال الملاحظة نستنتج وجود علاقة طردية بين Nusselt و التدفق الحجمي حسب العلاقات النظرية التالية التي تدعم مصداقية التجارب :

$$\dot{Q} = \dot{m}_w C_w (T_{out} - T_{in}) \quad ; \quad \dot{m}_w = \rho_w \dot{V}_w$$

$$\dot{Q} = h_c A (T_{sat} - T_w) \Rightarrow \rho_w \dot{V}_w C_w = h_c A$$

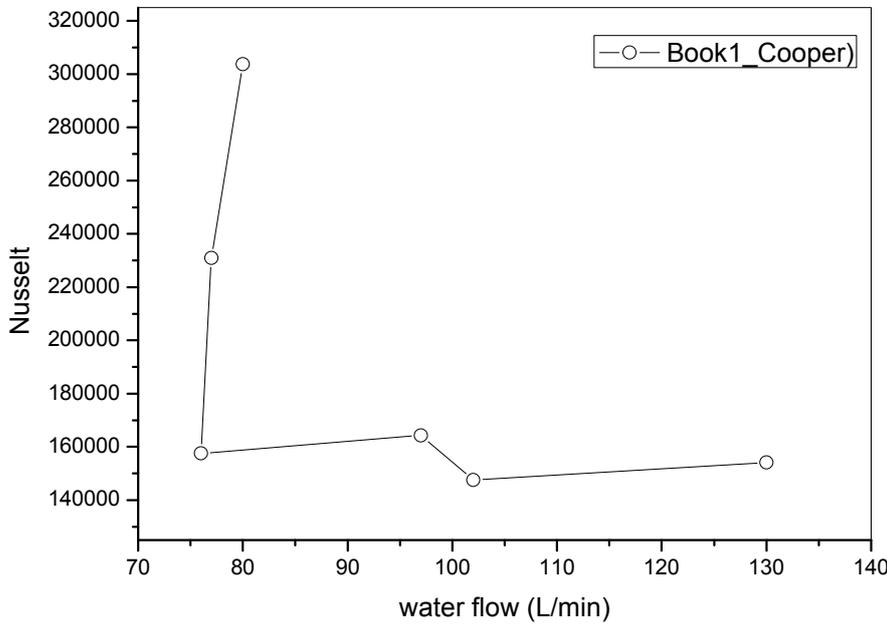
$$\text{لدينا} : h_c = \frac{\rho_w \dot{V}_w C_w (T_{out} - T_{in})}{A (T_{sat} - T_w)}$$

$$\text{و لدينا} ; Nu = \frac{h_c \cdot l}{\lambda_f}$$

$$\Rightarrow Nu = \left( \frac{\rho_w C_w}{\lambda_f} \right) \left( \frac{l}{A} \right) \left( \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{sat} - T_w} \right) \dot{V}_w$$

حسب العلاقة الأخيرة أن  $Nu$  يتناسب طرديا مع التدفق الحجمي لماء التبريد، لكن يوجد معاملين :

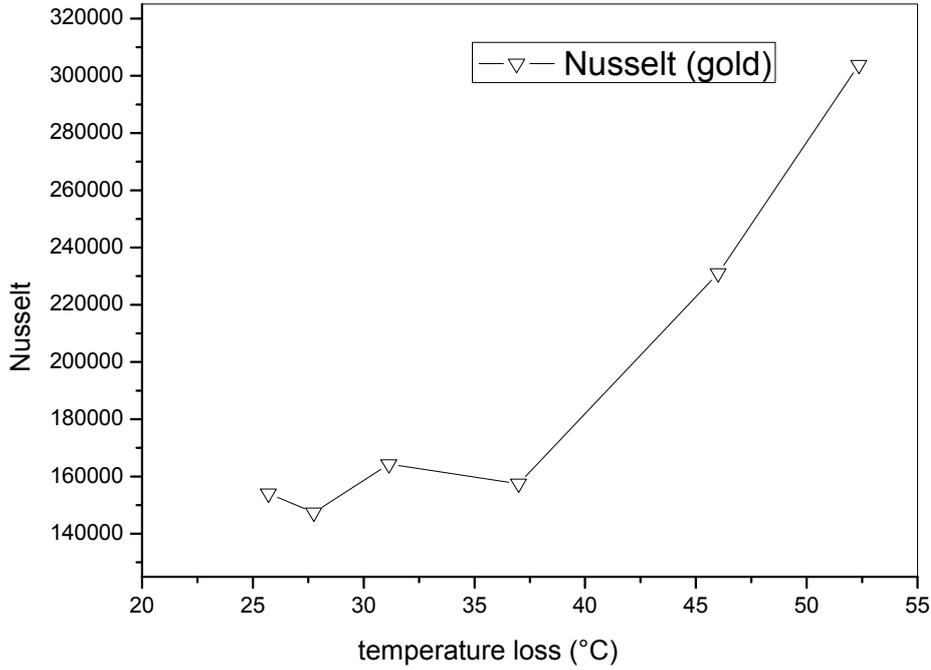
$\left( \frac{l}{A} \right)$  معامل ثابت يتعلق بأبعاد العينة ،  $\left( \frac{\rho_w C_w}{\lambda_f} \right) \left( \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{sat} - T_w} \right)$  معامل متغير بدلالة درجات الحرارة  $T_{in}$  و  $T_{out}$  و  $T_{sat}$ ، مما يجعل تغير  $Nu$  يكون غير خطي بدلالة التدفق الحجمي لماء التبريد  $\dot{V}_w$ . وهذا يؤكد أن الطبقة الذهبية تشكل عليها تكثيف نقطي كان له معامل انتقال و رقم  $Nu$  يتزايد مع التدفق .



شكل (19.III): تغير رقم Nusselt للتكثيف لعينة 2 النحاس بدلالة التدفق الحجمي لماء التبريد

ملاحظات خاصة المنحني في شكل (19.III) :

نلاحظ أنه كلما زادت قيمة التدفق الحجمي لماء التبريد داخل العينة الأسطوانية أنقص من قيمة رقم Nusselt النتيجة : وهذا يؤكد أن الطبقة النحاسية يتشكل عليها تكثيف غشائي كان له معامل انتقال و رقم  $Nu$  يتناقص مع التدفق الحجمي لماء التبريد ، وهذا يؤكد أن خشونة النحاس تلعب دور في هذه الظاهرة.



شكل(20.III): تغير رقم Nusselt للتكثيف لعينة 1 الذهب بدلالة الفاقد في درجة الحرارة

ملاحظات خاصة المنحني في شكل(20.III) :

نلاحظ أنه كلما زادت قيمة الفاقد في درجة الحرارة العينة الأسطوانية زاد من قيمة رقم Nusselt .

النتيجة : من خلال الملاحظة نستنتج وجود علاقة بين Nusselt و الفاقد في درجة الحرارة حسب العلاقات النظرية التالية التي تدعم مصداقية التجارب :

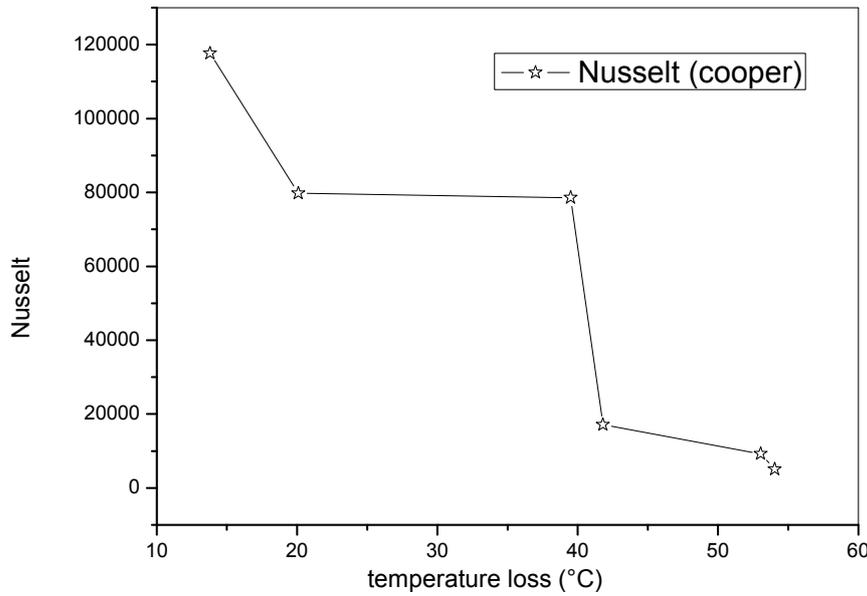
$$Nu = \frac{h_c \cdot l}{\lambda_f} ; \dot{Q} = h_c A (T_{sat} - T_w)$$

$$\dot{Q} = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{l} A (T_{sat} - T_w) = \dot{m}_w C_w (T_{out} - T_{in})$$

$$Nu = \left( \frac{l}{A} \right) \left( \frac{\dot{m}_w C_w}{\lambda_f} \right) \frac{(T_{out} - T_{in})}{(T_{sat} - T_w)}$$

حسب العلاقة الأخيرة أن  $Nu$  يتناسب مع الفاقد في درجة الحرارة  $(T_{sat} - T_w)$ ، لكن يوجد معاملين :

$\left(\frac{l}{A}\right)$  معامل ثابت يتعلق بأبعاد العينة ،  $\left(\frac{\dot{m}_w c_w}{\lambda_f}\right) \left(\frac{T_{out}-T_{in}}{T_{sat}-T_w}\right)$  معامل متغير بدلالة درجات الحرارة  $T_{in}$  و  $T_{out}$  و  $T_{sat}$  ، مما يجعل تغير  $Nu$  يكون غير خطي بدلالة الفاقد في درجة الحرارة  $(T_{sat} - T_w)$  ، وهذا يؤكد أن الطبقة الذهبية تشكل عليها تكثيف نقطي كان له رقم  $Nu$  يتزايد مع الفاقد في درجة الحرارة.



شكل (21.III) : تغير رقم Nusselt للتكثيف لعينة 2 النحاس بدلالة الفاقد في درجة الحرارة

ملاحظات خاصة المنحني في شكل (21.III) :

نلاحظ أنه كلما زادت قيمة الفاقد في درجة الحرارة العينة الأسطوانية تناقصت قيمة رقم Nusselt .

النتيجة : وهذا يؤكد حسب العلاقات الخاصة بالشكل (20.III) أن الطبقة النحاسية تشكل عليها تكثيف غشائي كان له رقم  $Nu$  يتناقص مع الفاقد في درجة الحرارة.

## الخاتمة

هذه الدراسة تركز في الأساس على محاولة فهم ظاهري التبخير و التكثيف و إبراز أهمية كل منهما في إنتاج الطاقة الكهربائية ، باستخدام دورة رانكن و المتمثلة في إنتاج البخار في المرجل عن طريق إعطاء هذا الأخير حرارة كافية لتبخير السائل ، و إعادة تكثيفه إلى سائل مرة أخرى بحيث يفقد البخار حرارة في المكثف إلى الوسط الخارجي ومن خلال هذه الحركة للمائع تُنتج الكهرباء حيث يقوم المنوب الموصول بالتوربين بتحويل الطاقة الحركية الدورانية إلى طاقة كهربائية . ومن المعلوم أن المرجل الذي يحوي المبخر يأخذ حرارته من مادة التشغيل التي يمكن أن تكون مادة عضوية كالخشب أو البترول و مشتقاته و كذلك من الممكن استخدام مادة نووية كاليورانيوم أو البلوتينيوم لتسخين مائع أولي كالصوديوم و الذي يسخن المرجل ليقوم بعملية التبخير للسائل، ومن جهة أخرى المكثف يحتاج لمياه التبريد من بحيرة أو مسطح مائي بقرب محطة توليد الطاقة الكهربائية.

وعلى ضوء النتائج المحصل عليها من خلال الدراسة في المراجع و الدراسة التجريبية، يمكننا أن نستخلص عدة نتائج تكون في المستقبل مرجعا مهمًا لدراسات المستقبلية .

### الدراسة النظرية و التجريبية للتبخير بينت النتائج التالية :

- **نتيجة 1 :** تخضع آلية التبخير لفرضيات متعددة من أهمها فرضية كلفن التي تنص على أن درجة حرارة السائل  $T_{liquide}$  لابد أن تكون أعلى من درجة حرارة التشبع للبخار  $T_{vapeur}$  داخل الفقاعة كشرط لحدوث هذه الظاهرة .  $(T_l > T_v)$ .
- **نتيجة 2 :** بالنسبة للحمل الناتج من التبخر له طبيعة حمل حر بحيث عبارة  $Nusselt$  تكون بدلالة رقم  $Rayleigh$ . ويعبر عنه بمعامل انتقال  $h_p$ .
- **نتيجة 3 :** بالنسبة للحمل الناتج من الغليان المنوي بنوعيه (فقاعات منفصلة، أو متصلة) له طبيعة حمل قسري بحيث عبارة  $Nusselt$  تكون بدلالة رقم  $Reynolds$ . ويعبر عنه بمعامل انتقال الحرارة  $h_p$ .
- **نتيجة 4 :** إن كمية البخار المنتج في الغليان  $\dot{m}_p$  تزداد كلما ازداد  $h_c$  معامل الانتقال الحراري بالحمل  $(h_p)$  للتبخير و  $h_p$  للغليان).
- **نتيجة 5 :** يكون الشد السطحي للفقاعة كبيرا كلما كان السطح الساخن غير مبلل. و يحدث انفصال الفقاعة عند انعدام قوة الشد السطحي الناتجة من التبلل الكلي للسطح. ويتم رفعها إلى الأعلى بدافعة أرخميدس.

- **نتيجة 6 :** ما دامت الفقاعة ملتصقة بالسطح الساخن فإن إنتاج البخار مستمر إلى غاية انفصالها، حيث تأخذ حجم يعتمد على الفرق في درجة الحرارة بين وسط الفقاعة و خارج الفقاعة.
- **نتيجة 7 :** يزداد معامل انتقال الحرارة بالتبخير  $h_{tp}$  مع ازدياد ضغط النظام، لكن بطريقة تختلف حسب قيمته بالنسبة للضغط الجوي، حيث يزداد بمعدل أس  $1/3$  بالنسبة للضغوط الأقل من الضغط الجوي ، أما التي أكبر من الضغط الجوي يزداد بمعدل مرفوع إلى أس  $1/6$ .
- **نتيجة 8 :** أما تصنيف معدات التبخير فتعتمد على طبيعة المادة المستخدمة في التسخين. إما أن تكون غلايات تستخدم مادة محترقة مباشرة، أو مبدلات حرارية تعمل بتسخين مائع أولي يأخذ حرارته من مادة محترقة أو ساخنة أصلا (مادة نووية).
- **نتيجة 9 :** تمثل القيمة القصوى للفيض الحراري للغليان المنوى عاملا هاما في عمليات التصميم . من حيث كفاءة انتقال الحرارة وزيادة عوامل الأمان في التشغيل. ويجب دائما استبعاد أي احتمال لوجود السطوح الساخنة في منطقة الغليان الغشائي، وخاصة بالنسبة للمعدات والأجهزة الحرارية ذات الكفاءة العالية في الأداء. وبالرغم من عدم وجود نظرية مقنعة للتنبؤ بقيمة معامل انتقال الحرارة بالغليان، فإنه يمكن التنبؤ بدرجة دقة مقبولة، بظروف الفيض الحراري القصوى في الغليان البركي المنوى.
- **نتيجة 10 :** و من العلاقات الشبه تجريبية للعالمين (Rohsonow & griffith) بوجه عام، يمكن القول بأن نوعية السطح المعدني لا تؤثر في القيمة القصوى للفيض الحراري ، و تؤثر درجة نظافة السطح – أملس أو خشن- في القيمة القصوى للفيض الحراري ، إذ تتسبب السطوح الملوثة -الخشنة- في زيادة قدرها 15% من قيمة السطوح النظيفة.
- **نتيجة 11 :** الماء يمكن أن يتحمل أعلى فيض حراري خلافا لجميع السوائل المعروفة ، بسبب ارتفاع حرارة تبخره.
- **نتيجة 12 :** ويؤثر الضغط على الحد الأقصى للفيض الحراري بسبب تأثيره على كثافة البخار وعلى نقطة غليان السائل. ويؤثر التغيير في نقطة الغليان على حرارة التبخير وقوة الشد السطحي.
- **نتيجة 13 :** إن مجال الجاذبية يؤثر على قمة الفيض الحراري فإن أية زيادة في قوة المجال سوف تتسبب في زيادة القابلية للانفصال بين السطح الساخن و البخار وتزيد من قمة الفيض الحراري . وعلى العكس من ذلك ، فقد أثبتت التجارب أن النقص في مجال الجاذبية ينتج عنه نقص قمة الفيض الحراري.

- **نتيجة 14** : بالنسبة لعلاقة Rohsenow الشبه تجريبية التي قام بها مخبريا تحدد لنا الفيض الحراري الفعلي بدلالة الزائد في درجة حرارة مع استخدام معامل  $C_{sf}$  (يسمى معامل السطح مع المائع)، والذي يعتمد على الخشونة السطحية، و يحسب مباشرة من العلاقة التجريبية بأخذ عينة واحدة.
- **نتيجة 15** : و حسب ملاحظتنا في تجربة الغليان حول سلك التنغستن، أنه كلما ازداد تواتر انبعاث الفقاعات من السطح الساخن تداخلت الفقاعات الفردية المنعزلة، وبدأت في التجمع مكونة في النهاية عمودا مستمرا من البخار.
- **نتيجة 16** : تجريبيا استنتجنا أن تغير الفيض الحراري بدلالة الزائد في درجة الحرارة  $\Delta T_W$  حول سلك التنغستن في النمط المنوى الخاص بالغليان البركي كان ذو ميل موجب.
- **نتيجة 17** : و استنتجنا تجريبيا أن تغيرات كل من معامل الغليان  $h_b$  و كمية البخار المنتج لوحدة سطح السلك  $\dot{m}_v$  بدلالة الزائد في درجة الحرارة  $\Delta T_W$  تكون خطية لها ميل موجب (النتائج في الفصل الثالث).
- **نتيجة 18** : نستنتج تجريبيا وجود علاقة طردية بين الشد السطحي  $\sigma$  و الزائد في درجة الحرارة  $\Delta T_W$  من جهة ومن جهة أخرى وجود علاقة طردية بين الشد السطحي وقطر الفقاعة  $d$ .

#### الدراسة النظرية و التجريبية للتكثيف بينت النتائج التالية :

- **نتيجة 19** : من التحليل النظري لـ Nusselt ، يعتمد حجم السائل المكثف على الفرق بين درجة حرارة التكثيف والمدى المؤثر لمياه التبريد، وإذا ما قاربت درجة حرارة التكثيف المدى المؤثر لدرجة حرارة التبريد عند الضغط الجوي فلا بد من رفع ضغط التقطير ومن ثم يزداد الفرق في درجات الحرارة وصولاً إلى قيمة الفرق المطلوب في درجة الحرارة. و هذا ما وجدناه تجريبيا.
- **نتيجة 20** : نزول الغشاء المكثف من أعلى السطح إلى أسفله يتم على شكل انسياب رقائقي، ويؤثر سُمك هذا الغشاء تأثيراً كبيراً في معدل التكثيف حيث معامل تكثيف البخار فوق سطح شاقولي يتناقص من القمة إلى القاع. و هذا ما لاحظناه في تجربة التكثيف حول العينتين (العينة 1 : مطلية بالذهب، عينة 2: مطلية بالنحاس).
- **نتيجة 21** : و أثبتت التجارب السابقة أن بخار الماء النقي هو البخار الوحيد الذي يمكنه أن يتكثف تكثيف نقطي . و من مفهوم المقاومة الحرارية التي يشكلها السائل المقطر يكون معامل انتقال الحرارة في عملية التكثيف النقطي من أربعة إلى ثمانية أمثال مثيله في عملية التكثيف الغشائي.

- **نتيجة 22 :** التحليل النظري المقارن بين التكتيف الداخلي والخارجي أكد أن معامل التكتيف ثابتا على طول الأنبوب في حالة التكتيف على سطحه الخارجي ، و تتغير قيمته في حالة التكتيف داخل الأنبوب .
- **نتيجة 23 :** من مفهوم الضغط الثقالي للسائل، فإن قوة التدفق تكون تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية بالدرجة الأولى.
- **نتيجة 24 :** و استنتج نظريا و بتدعيم من نظرية Nusselt ، و في حالة كون السطح البارد شاقولي، فإن سُمك الغشاء يزداد من أعلى السطح البارد إلى أسفله، و لهذا السبب فإن معامل تكتيف البخار فوق سطح شاقولي يتناقص من القمة إلى القاع.
- **نتيجة 25 :** أثبتت التجارب السابقة أن الحصول على معامل عال للتكتيف يجب أن لا يكون ارتفاع السطح كبيراً جداً. و أن لزوجة السوائل تقل قيمتها بزيادة درجة الحرارة ، كما أن معامل التكتيف يزداد بزيادة درجة حرارة التكتيف.
- **نتيجة 27 :** من خلال التجربة الخاصة بالتكتيف نستنتج وجود علاقة طردية بين Nusselt و التدفق الحجمي بالنسبة لعينة الذهب حيث تشكل عليها تكتيف نقطي وهذا يرجع لطبيعة العينة(ملساء) .
- **نتيجة 28 :** من خلال التجربة الخاصة بالتكتيف نستنتج وجود علاقة بين Nusselt و التدفق الحجمي بالنسبة لعينة النحاس حيث تشكل عليها تكتيف غشائي وهذا يرجع لطبيعة العينة(خشنة) .
- **نتيجة 29 :** نستنتج من تجربتنا أن الطبقة الذهبية تشكل عليها تكتيف نقطي كان له رقم  $Nu$  يتزايد مع الفاقد في درجة الحرارة.
- **نتيجة 30 :** نستنتج من تجربتنا أن الطبقة النحاسية تشكل عليها تكتيف غشائي كان له رقم  $Nu$  يتناقص مع الفاقد في درجة الحرارة.

| $T_{sat}(^{\circ}C)$ | $h_f$   | $h_g$  | $L_{ev}$ |
|----------------------|---------|--------|----------|
| 180                  | 763.22  | 2778.2 | 2014.98  |
| 185                  | 785.37  | 2782.4 | 1997.03  |
| 190                  | 807.62  | 2786.4 | 1978.78  |
| 195                  | 829.98  | 2790   | 1960.02  |
| 200                  | 852.45  | 2793.2 | 1940.75  |
| 205                  | 875.04  | 2796   | 1920.96  |
| 210                  | 897.76  | 2798.5 | 1900.74  |
| 215                  | 920.62  | 2800.5 | 1879.88  |
| 220                  | 943.62  | 2802.1 | 1858.48  |
| 225                  | 966.78  | 2803.3 | 1836.52  |
| 230                  | 990.12  | 2804   | 1813.88  |
| 235                  | 1013.62 | 2804.2 | 1790.58  |
| 240                  | 1037.32 | 2803.8 | 1766.48  |
| 245                  | 1061.23 | 2803   | 1741.77  |
| 250                  | 1085.36 | 2801.5 | 1716.14  |
| 255                  | 1109.73 | 2799.5 | 1689.77  |
| 260                  | 1134.37 | 2796.9 | 1662.53  |
| 265                  | 1159.28 | 2793.6 | 1634.32  |
| 270                  | 1184.51 | 2789.7 | 1605.19  |
| 275                  | 1210.07 | 2785   | 1574.93  |
| 280                  | 1235.99 | 2779.6 | 1543.61  |
| 285                  | 1262.31 | 2773.3 | 1510.99  |
| 290                  | 1289.07 | 2766.2 | 1477.13  |
| 295                  | 1316.3  | 2758.1 | 1441.8   |
| 300                  | 1344    | 2749   | 1405     |
| 305                  | 1372.4  | 2738.7 | 1366.3   |
| 310                  | 1401.3  | 2727.3 | 1326     |
| 315                  | 1431    | 2714.5 | 1283.5   |
| 320                  | 1461.5  | 2700.1 | 1238.6   |
| 330                  | 1525.3  | 2665.9 | 1140.6   |
| 340                  | 1594.2  | 2622   | 1027.8   |
| 350                  | 1670.6  | 2563.9 | 893.3    |
| 360                  | 1760.5  | 2481   | 720.5    |
| 370                  | 1890.5  | 2332.1 | 441.6    |
| 374.14               | 2099.3  | 2099.3 | 0        |

| $T_{sat}(^{\circ}C)$ | $h_f$  | $h_g$  | $L_{ev}$ |
|----------------------|--------|--------|----------|
| 0.01                 | 0.01   | 2501.4 | 2501.39  |
| 5                    | 20.98  | 2510.6 | 2489.62  |
| 10                   | 42.01  | 2519.8 | 2477.79  |
| 15                   | 62.99  | 2528.9 | 2465.91  |
| 20                   | 83.96  | 2538.1 | 2454.14  |
| 25                   | 104.89 | 2547.2 | 2442.31  |
| 30                   | 125.79 | 2556.3 | 2430.51  |
| 35                   | 146.68 | 2565.3 | 2418.62  |
| 40                   | 167.57 | 2574.3 | 2406.73  |
| 45                   | 188.45 | 2583.2 | 2394.75  |
| 50                   | 209.33 | 2592.1 | 2382.77  |
| 55                   | 230.23 | 2600.9 | 2370.67  |
| 60                   | 251.13 | 2609.6 | 2358.47  |
| 65                   | 272.06 | 2618.3 | 2346.24  |
| 70                   | 292.98 | 2626.8 | 2333.82  |
| 75                   | 313.93 | 2635.3 | 2321.37  |
| 80                   | 334.91 | 2643.7 | 2308.79  |
| 85                   | 355.9  | 2651.9 | 2296     |
| 90                   | 376.92 | 2660.1 | 2283.18  |
| 95                   | 397.96 | 2668.1 | 2270.14  |
| 100                  | 419.04 | 2676.1 | 2257.06  |
| 105                  | 440.15 | 2683.8 | 2243.65  |
| 110                  | 461.3  | 2691.5 | 2230.2   |
| 115                  | 482.48 | 2699   | 2216.52  |
| 120                  | 503.71 | 2706.3 | 2202.59  |
| 125                  | 524.99 | 2713.5 | 2188.51  |
| 130                  | 546.31 | 2720.5 | 2174.19  |
| 135                  | 567.69 | 2727.3 | 2159.61  |
| 140                  | 589.13 | 2733.9 | 2144.77  |
| 145                  | 610.63 | 2740.3 | 2129.67  |
| 150                  | 632.2  | 2746.5 | 2114.3   |
| 155                  | 653.84 | 2752.4 | 2098.56  |
| 160                  | 675.55 | 2758.1 | 2082.55  |
| 165                  | 697.34 | 2763.5 | 165      |
| 170                  | 719.21 | 2768.7 | 170      |
| 175                  | 741.17 | 2773.6 | 175      |

حيث :  $L_{ev} = h_{fg} = h_g - h_f$  تمثل الحرارة

النوعية للتبخير في درجة حرارة  $T_{sat}$

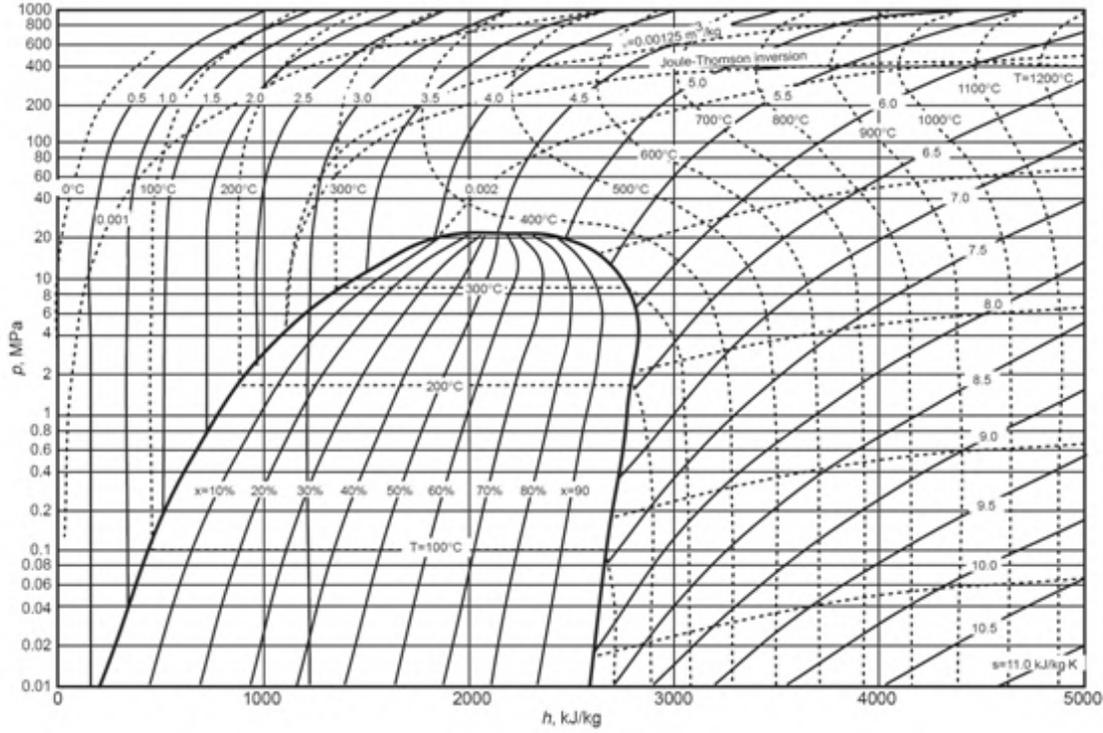
النقطة الثلاثية : درجة حرارتها  $T_{sat} = 0,01^{\circ}C$

النقطة الحرجة : درجة حرارتها  $T_{sat} = 374,14^{\circ}C$

الجدول (A) : الانتالي النوعية الكتلية للماء

( $h_f$  للسائل المشبع ،  $h_g$  للبخار المشبع )

محسوبة ب :  $KJ/Kg$



Pressure-enthalpy diagram for water. (Source: Jones, J.B. and Dugan, R.E. 1996. *Engineering Thermodynamics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, based on data and formulations from Haar, L., Gallagher, J.S., and Kell, G.S. 1984. *NBS/NRC Steam Tables*. Hemisphere, Washington, D.C.)

الشكل (A): مخطط الضغط بدلالة الانتالي النوعي للماء

النموذج النظري للحرارة النوعية للتبخير الخاصة بالماء المستعمل في الجداول التجريبية

$$L_{ev} = A + B_1 \cdot T + B_2 \cdot T^2 + B_3 \cdot T^3 - B_4 \cdot T^4 + B_5 \cdot T^5 - B_6 \cdot T^6$$

| Parameter      | Value     | Error    |
|----------------|-----------|----------|
| A              | 2476.686  | 22.50094 |
| B <sub>1</sub> | 1.51443   | 1.73814  |
| B <sub>2</sub> | -0.1258   | 0.04188  |
| B <sub>3</sub> | 0.00157   | 4.29E-04 |
| B <sub>4</sub> | -9.10E-06 | 2.12E-06 |
| B <sub>5</sub> | 2.43E-08  | 4.97E-09 |
| B <sub>6</sub> | -2.45E-11 | 4.44E-12 |

$$P(T) = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T + 273.15}\right)$$

## الملحق B (الخواص الحرارية فيزيائية للماء)

## الخواص الحرارية فيزيائية لسائل الماء

| Propriétés de l'eau à saturation |                               |   |  |                               |                                |       |
|----------------------------------|-------------------------------|---|--|-------------------------------|--------------------------------|-------|
| $\theta$                         | $\rho$                        | $c_p$   | $\lambda$  | $10^4 \cdot \mu$              | $10^7 \cdot a$                 | Pr    |
| $^{\circ}\text{C}$               | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ | $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ | $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ | $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ |       |
| 0                                | 1002                          | 4218  | 0,552  | 17,90                         | 1,31                           | 13,06 |
| 20                               | 1001                          | 4182  | 0,597  | 10,10                         | 1,43                           | 7,02  |
| 40                               | 995                           | 4178  | 0,628  | 6,55                          | 1,51                           | 4,34  |
| 60                               | 985                           | 4184  | 0,651  | 4,71                          | 1,55                           | 3,02  |
| 80                               | 974                           | 4196  | 0,668  | 3,55                          | 1,64                           | 2,22  |
| 100                              | 960                           | 4216  | 0,680  | 2,82                          | 1,68                           | 1,74  |
| 120                              | 945                           | 4250  | 0,685  | 2,33                          | 1,71                           | 1,45  |
| 140                              | 928                           | 4283  | 0,684  | 1,99                          | 1,72                           | 1,24  |
| 160                              | 910                           | 4342  | 0,680  | 1,73                          | 1,73                           | 1,10  |
| 180                              | 889                           | 4417  | 0,675  | 1,54                          | 1,72                           | 1,00  |
| 200                              | 867                           | 4505  | 0,665  | 1,39                          | 1,71                           | 0,94  |
| 220                              | 842                           | 4610  | 0,652  | 1,26                          | 1,68                           | 0,89  |
| 240                              | 816                           | 4756  | 0,635  | 1,17                          | 1,64                           | 0,88  |
| 260                              | 786                           | 4949  | 0,611  | 1,08                          | 1,58                           | 0,87  |
| 280                              | 753                           | 5208  | 0,580  | 1,02                          | 1,48                           | 0,91  |
| 300                              | 714                           | 5728  | 0,540  | 0,96                          | 1,32                           | 1,02  |

$$\rho = -0,00380 T^2 - 0,0505T + 1002,6 \quad \text{kg /m}^3$$

$$c_p = 4180 \quad \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\lambda = -9,87\cdot 10^{-6} T^2 + 2,238\cdot 10^{-3} T + 0,5536 \quad \text{W m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$a = 10^{-7} (-0,00360 T + 1,340) \quad \text{m}^2\text{s}^{-1}$$

المراجع باللغة الانجليزية

- [01] Welly,J.R.,Wicks, C.E and Wilson ,R.E.,Fundamentals of Montentum, Heat and Mass Transfer,5rd. Ed .,John Wiley & Sons,(1984).
- [02] Welty, J., Engineering Heat Transfer SI-version, John Wiley & Sons ,New York(1978).
- [03] Krith F . and Black ,W., Basic Heat Transfer ,Harper and Row Publishers, New York(1980).
- [04] Karn ,D., Process Heat Transfer, McGraw-Hill International Student edition ,New York(1950).  
Holman,J., Heat Transfer,4th ed. McGraw-Hill, New York (1976).

المراجع باللغة الفرنسية

- [05] J.F. Sacadura"Initiation aux transfert thermique" France -1977.
- [06] J.Taine & J.P.Petit "cours et données de base .Transfert thermiques"France -1995.
- [07] A.Fortier "MDF et transfert de chaleur et de masse par convection"-France -1982.  
C.E.A & E.D.F école d'été de MDF "Techniques de mesures dans les écoulements"- France-1973.

المراجع باللغة العربية

- [08] انتقال الحرارة لدار العربية للنشر و التوزيع
- [09] مبادئ انتقال الحرارة لمحمد عبد الرضا الشمدي

## الملخص

إن ظاهريتي التبخير والتكثيف لهما أهمية كبيرة في المجال الصناعي ويتجسد ذلك في إنتاج الطاقة الكهربائية (القدرة) في المراحل التي تنتجها على شكل بخار، وتقوم المكثفات هي الأخرى بإنتاجها على شكل سائل، وكما تستعمل هاتين الظاهرتين في التكثيف الهوائي (التبريد والتسخين) وغيرها من الإجراءات الحرارية و الهدف من هذه الدراسة هو محاولة فهم آلية كل من هاتين الظاهرتين و لذلك كانت التجارب تخص مبدل حراري TE78 يعمل كمرجل , حيث يقوم بعملية التبخير للماء المقطر بواسطة تسخين سلك التنغستن عن طريق مقاومة كهربائية مما سمح بملاحظة مراحل الغليان , ومن جهة أخرى يعمل كمكثف حيث يقوم بتكثيف بخار الماء على مستوى عينتين الأسطح الأولى مطلية بالذهب و الأخرى مطلية بالنحاس لمقارنة معامل التكثيف الذي يعتمد على نوعية السطح المكثف , و في الأخير يمكن استنتاج انه كلما زاد الفرق في درجة الحرارة بين السطح و المائع , زاد معامل التكثيف أو التبخير ومنه زادت كمية إنتاج السائل البخار .

## الكلمات المفتاحية :

الغليان – التبخر – مخطط نيكياما - التبخير – التكثيف- الإسالة – التقطير- نظرية نيسرالت

## Abstract :

L'évaporation Azahrita et condensation sont d'une grande importance dans le domaine industriel et est incorporé dans la production d'énergie électrique (puissance) dans la chaudière produit par la forme de vapeur qui, et les condensateurs sont également produits sous forme liquide, et utilise également ces deux phénomènes dans l'air conditionné (chauffage et refroidissement) et d'autres procédures thermique et objectif de cette étude est d'essayer de comprendre le mécanisme de chacun de ces phénomènes et donc des expériences ont été associées à un échangeur de chaleur fonctionne TE78 Kmrjel, où le processus d'évaporation de l'eau distillée en chauffant le fil de tungstène à travers la résistance électrique, ce qui permet l'observation des étapes d'ébullition, d'autre part fonctionne Kmktv H W La vapeur d'eau est intensifiée au niveau des deux échantillons à partir des premières surfaces revêtues d'autre or et revêtu de cuivre pour comparer le coefficient de condensation, qui dépend de la qualité de surface à forte intensité, et dans ce dernier peut déduire que plus la différence de température entre la surface et le fluide, l'augmentation de la condensation ou le coefficient d'évaporation et La quantité de production de liquide ou de vapeur a augmenté.

**Mots-clés:**Bouillie - évaporation - Diagramme de Nikyama - évaporation - condensation - échafaudage - distillation - Théorie du nisalt