

الباب السابع
تطبيقات في
انتقال الحرارة

Chapter Seven

Heat Transfer Applications

- 7.0 مقدمة.
- 1.7 التبخير.
- 2.7 خصائص السائل.
- 3.7 الصلبيات الحادية والمتعددة التأثير.
- 4.7 أنواع المبخرات.
- 5.7 أداء المبخرات الأنبوبية.
- 6.7 التصادية المبخر.
- 7.7 طاقة المبخر.
- 8.7 ارتفاع درجة الغليان وقاعدة دوهرنغ.
- 9.7 الموازنة الحرارية لمبخر أحادي التأثير.
- 10.7 المبخرات متعددة التأثير.
- 11.7 عملية التجفيف.
- 12.7 انتقال الحرارة والكتلة.
- 13.7 فترات التجفيف.
- 1.13.7 فترة المعدل الثابت.
- 2.13.7 التجفيف بواسطة التكوير الخالي.
- 3.13.7 فترة المعدل الهابط.
- 14.7 حساب معدل التجفيف للفترتين الثابتة والهابط.
- 15.7 للترطيب وأبراج تبريد المياه.
- 16.7 انتقال الحرارة في أوعية الخلط.
- 17.7 تمارين في الباب السابع.

بصورة عامة فإن جميع العمليات التي تنجز من قبل المهندس الكيميائي تتضمن إنتاج أو امتصاص الطاقة على هيئة حرارة. إن القوانين التي تتحكم بانتقال الحرارة وأنواع الأجهزة التي تسيطر على جريان الحرارة هي ذات أهمية كبرى. هذا الجزء يتناول بعض تطبيقات انتقال الحرارة في العمليات الهندسية والصناعية ومن أمثلتها التبخير والتجفيف.

1.7 التبخير Evaporation

إن التبخير هو عملية تركيز لمحلول يتكون من مذاب غير قابل للتطاير ومذيب متطاير وعادة ما يكون المذيب المتطاير هو الماء. إن الغرض من عملية التبخير هو الحصول على محلول مركز من المذاب غير المتطاير. تجرى عملية التبخير عن طريق فصل جزء من المذيب بتعريضه للحرارة وتحويله إلى بخار أي تبخيره حيث يزداد تركيز المذاب في قطعة المذيب المتبقية. إن التبخير يختلف عن التجفيف في أن المتبقي هو محلول مركز سائل وفي بعض الأحيان مادة لزجة أكثر من كونه مادة صلبة وهو يختلف عن التقطير في كون البخار المساعد من المزيج السائل في حالة التبخير هو مكون أحادي وحتى لو كان البخار مزيجاً، لا توجد محاولات في عملية التبخير لفصل هذا البخار المتحرر إلى أجزاء وهو يختلف عن التبلور Crystallization في الحقيقة المؤكدة وهي حدوث تركيز للمحلول المبخر دون ظهور بلورات crystals. في حالات أخرى مثل تبخير لمحلول ملحي Brine لإنتاج ملح معروف، فإن الحد الفاصل بين عمليتي التبخير والتبلور يكون بعيداً عن الدقة. التبخير في بعض الأحيان ينتج محلول عالق أو ملاط Slurry من بلورات في المحلول المتبقي المشبع.

في التبخير عادةً ، المحلول المتبقي السائل يكون هو المنتج ذو القيمة والبخار الصاعد يكتف وي طرح كمنتج عرضي.في إحدى الحالات الخاصة على أية حال يكون العكس هو الصحيح.فغالباً ما يتم تبخير الماء الحاوي على مواد معدنية ليعطي ماء منتج خالي من المعادن يستخدم كمادة مغذية أو لمتطلبات عمليات خاصة أو للاستهلاك البشري.هذه التقنية تعرف بتقطير الماء ولكنها من الناحية التكنولوجية تعتبر عملية تبخير.تم تطوير عمليات التبخير التي تتعامل مع حجوم كبيرة واستخدمت لاسترجاع الماء الصالح للشرب من ماء البحر.هنا يكون الماء المتكاثف هو المنتج المرغوب وسيتم فقط الاستفادة من جزء من المياه المسحوبة من البحر وتحويلها إلى ماء الشرب أما الباقي فيعاد إلى البحر.

2.7 خصائص السائل Liquid Characteristics

إن عملية التبخير تتأثر بخصائص السائل المتبقي Mother Liquor والتي تحتاج إلى قرار وخبرة في تصميم وتشغيل المبخرات التي توسع هذه العملية من مبدأ لانتقال الحرارة البسيط إلى عملية فصل فنية.إن بعض الخصائص المهمة في السوائل المبخرة هي كالتالي:-

(1) التركيز Concentration: على الرغم من أن السائل الرقيق الذي يتم ضخه إلى المبخر قد يكون مخففاً بدرجة كافية ليحتفظ بخواص مشابهة لخواص الماء ولكن حالما يزداد تركيزه فإن المحلول يصبح فريداً بشكل أكثر. تزداد كثافة ولزوجة ومحتوى المواد الصلبة في المحلول حتى يصبح المحلول مشبعاً أو يصبح المحلول المتبقي لزجاً من الحرارة المنتقلة بشكل كافي.إن الغليان المستمر للمحلول المشبع سيسبب تكون البلورات والتي يجب إزالتها من المحلول لأنها تسبب انسداد الأنابيب.إن نقطة الغليان للمحلول ربما ترتفع

أيضاً بشكل يجلب الانتباه حال زيادة محتوى المواد الصلبة لذلك فإن درجة غليان المحلول المركز قد تكون أعلى من درجة غليان الماء عند نفس الضغط.

(2) تكوّن الرغوة أو الإرغاء Foaming: بعض المواد خاصة المواد العضوية تميل لتكوين رغوة خلال عملية التبخير وقد تصاحب تلك الرغوة المتكونة الثابتة البخار الصاعد والخارج من المبخر مما يسبب ظهور السحب أو ما يدعى بظاهرة التندية entrainment. وفي حالات كثيرة سوف تفقد كتلة كبيرة من السائل المطلوب تركيزه بسبب الغليان أو بسبب خروجها مع البخار.

(3) الحساسية لدرجة الحرارة Temperature Sensitivity: بعض المواد الكيميائية الدقيقة مثل المنتجات الصيدلانية والأغذية تتلف عند تعرضها للحرارة أو عند تسخينها إلى درجات حرارة معتدلة لفترات زمنية قصيرة نسبياً. ولغرض تركيز مثل تلك المواد يجب استخدام تقنية خاصة لخفض درجة حرارة السائل ووقت التسخين.

(4) تكوّن القشور Scale: بعض المحاليل تكون قشور على سطوح التبادل الحراري مما يعمل على تقليل معامل انتقال الحرارة الإجمالي وانسداد سطوح التبادل الحراري مما يستدعي إيقاف عملية التبخير وإزالة القشور من تلك السطوح وسنتناول هذا الموضوع بالتفصيل فيما بعد.

(5) مواد الإنشاء Materials of Construction: تصنع المبادلات عادة من مادة الحديد الكربوني ويمكن استخدام بعض المواد مثل النحاس، النيكل، الحديد المقاوم أو الألمنيوم. لما كانت كلفة هذه المواد عالية لذلك يكون من الضروري في بعض الأحيان الحصول على معدلات عالية لانتقال الحرارة لخفض الكلفة الأولية للمعدة.

بعض خصائص السائل الأخرى قد تعتمد من قبل مصمم المبخر. بعض من هذه الخواص هي الحرارة النوعية، حرارة التركيز، نقطة التجمد، تحرر الغاز عند الغليان، السمية، المواد الخطرة القابلة للانفجار، الإشعاعية وضروريات عملية التعقيم. بسبب هذا الاختلاف في خصائص السائل المتبقي، فإن العديد من تصاميم المبخرات قد تم تطويرها وأن اختيار نوع المبخر سوف يعتمد بشكل رئيسي على خصائص المحلول المتبقي.

3.7 العمليات الأحادية والمتعددة التأثير

Single and Multiple Operations

معظم المبخرات تسخن بواسطة البخار المتكاثف على الأنابيب المعدنية. وعادة ما تسيل المادة المطلوب تبخيرها داخل الأنابيب. في العادة يكون البخار عند ضغط واطى وبالتحديد عند ضغط 3 atm abs. غالباً ما يكون السائل المغلي عند ضغط فراغي معتدل وعند ضغوط قد تصل إلى قيمة 0.05 atm abs. إن خفض درجات الغليان لسائل سيعمل على زيادة فرق درجة الحرارة بين البخار والسائل المغلي وبذلك سيزيد من معدل انتقال الحرارة في المبخر.

عند استخدام مبخر أحادي فإن البخار الناتج من السائل المغلي سوف يكثف وي طرح كفضلات. هذه الطريقة تدعى التبخير الأحادي التأثير أو ما يصطلح على تسميته Single – Stage Evaporation وبالرغم من بساطته فإنه يستهلك البخار بشكل غير كف. كمثال لتبخير 1 كجم من الماء من محلول سنحتاج لكمية مقدارها 1 – 1.3 كجم من بخار الماء لإنجاز هذا العمل ولكن إذا تم ضخ البخار الناتج من المبخر الأول إلى خزان بخار الماء لمبخر ثاني ثم إرسال البخار الناتج من الثاني إلى مكثف فإن هذه العملية تدعى المزدوجة التأثير Double – Effect. إن الحرارة في البخار الأصلي سوف يعاد استخدامها في المؤثر الثاني والتبخير المنجز بواسطة وحدة كتلة البخار المغذي إلى المؤثر الأول سوف يكون مضاعفاً. يمكن إضافة مؤثرات أخرى بنفس

النمط. إن الطريقة العامة لزيادة التبخير لكل كيلوجرام من بخار الماء باستخدام سلسلة من المبخرات بين مصدر تجهيز البخار وبين المكثف تدعى التبخير متعدد المؤثرات Multiple – Effect Evaporation.

4.7 أنواع المبخرات Types of Evaporators

إن الأنواع الرئيسية من المبخرات الأنبوبية والتي تستخدم البخار للتسخين هي:

1.4.7 المبخرات العمودية الطويلة الأنبوب

Long Tube Vertical Evaporators

وتتكون من الأنواع التالية:-

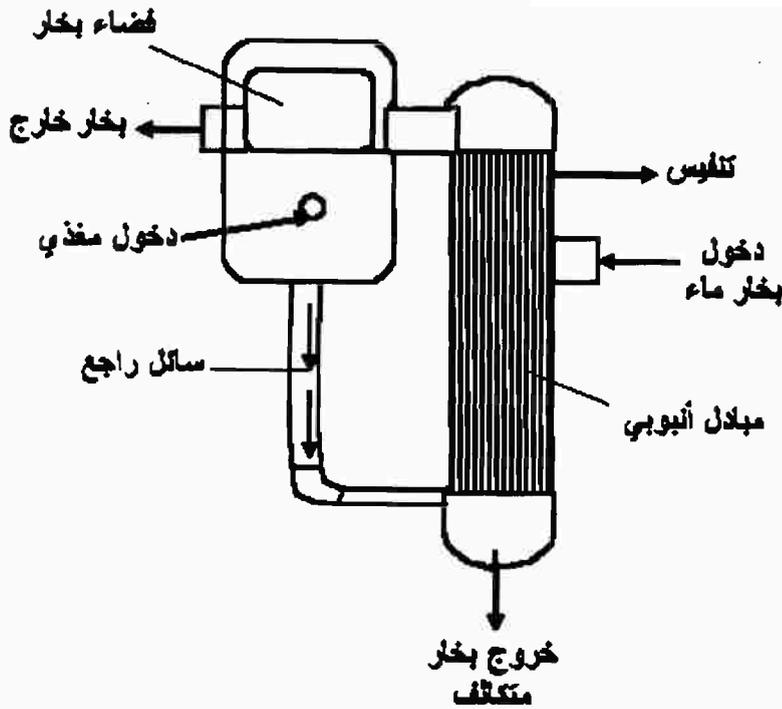
1.1.4.7 للجريان الصاعد (الطبقة المتسلقة Climbing Film Evaporators)

2.1.4.7 للجريان النازل (الطبقة الساقطة Falling Film Evaporators)

3.1.4.7 الدوران القسري Forced Circulation Evaporators

2.4.7 المبخرات ذات الطبقة الهائجة Agitated – Film Evaporators

يتكون النوع الأول من المبخرات من (1) مبادل أنبوبي يدخل بخار في غلافه والسائل المركز يكون في الأنابيب. (2) فاصل أو فضاء للبخار لإزالة قطرات السائل نتيجة التندية أو تكوّن السحب. (3) ساق رجوع السائل من الفاصل في حالة استخدام وحدة دوران كما يوضحه الشكل (7 – 1) أدناه.



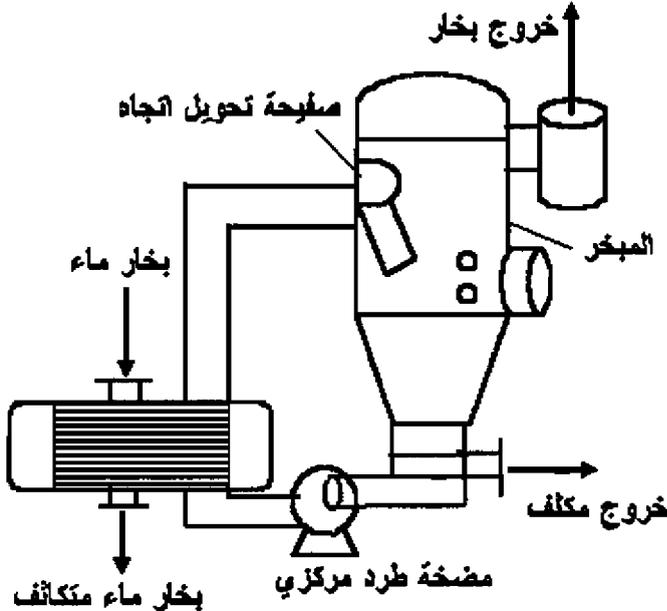
الشكل (7 - 1) مبخر أنبوبي طويل ذو طبقة متسلقة

تتمتع المبخرات العمودية ذات الأنابيب الطويلة بكفاءة عالية في تركيز السوائل التي لها ميل لتكوين الرغوة. أما النوع الثاني وهو المبخر ذو الطبقة الساقطة فيستخدم لتركيز المواد ذات الحساسية العالية للحرارة مثل عصير البرتقال الذي يحتاج لأقل وقت من التعرض لسطح حراري وهذا يمكن عمله في مبخرات من ذلك النوع التي يدخل السائل فيها من القمة ويسيل نزولاً باتجاه الأنابيب المسخنة وينرك المبخر من الأسفل. البخار المتحرر من السائل سوف يحمل إلى الأسفل أيضاً ويخرج من قاع الوحدة. تبدو هذه المبخرات ظاهرياً كمبادلات حرارية طويلة الأنابيب مع وجود فاصل للسائل والبخار عند القاع وموزع للسائل عند القمة. إن المشكلة الرئيسية في مبخرات الطبقة الساقطة هي توزيع السائل بشكل غير منتظم داخل الأنابيب وهذا يمكن التغلب عليه بوضع مجموعة من صفائح معدنية مثقبة بعناية فوق ألواح الأنابيب بإدخالها في نهايات الأنابيب لإجبار السائل على الجريان بانتظام خلال كل أنبوب أو

بواسطة ما يعرف بالتوزيع الشعاعي أو العنكبوتي Spider Distribution أي تكوين أذرع إشعاعية يشتت خلالها المغذي عند معدل ثابت على السطح الداخلي لكل أنبوب مع عدم الاستغناء عن الخيار البديل الآخر وهو استعمال فوهة رذاذ فردي داخل كل أنبوب وعندما يسمح بإعادة الدوران دون تلف السائل يمكن تسهيل توزيع السائل بواسطة التدوير المعتدل على قمة الأنابيب. هذا سيعمل على تجهيز حجم جريان كبير خلال الأنابيب مما هو عليه الحال في الجريان الأحادي المرور الموضح في النوع الأول. المبخرات ذات الطبقة الساقطة التي لا تحتوي على إعادة دوران وذات أوقات استبقاء قصيرة يمكنها أيضاً التعامل مع المنتجات الحساسة التي لا يمكن تركيزها بطريقة أخرى. ويمكن استخدامها أيضاً لتركيز السوائل اللزجة.

أما الصنف الثالث من النوع الأول من المبخرات وهو مبخرات التدوير القسري فيختلف من المبخرات ذات التدوير الطبيعي في أن النوع الأول يدخل السائل فيه داخل الأنابيب عند سرعة جريان تتراوح من 0.3 - 1.2 م/ثانية أي 1 - 4 قدم / ثانية فتزداد سرعته الخطية حال تكون البخار داخل الأنابيب لذلك بشكل عام تكون معدلات انتقال الحرارة مقنعة. مع السوائل اللزجة على أية حال يكون معامل انتقال الحرارة الإجمالي في التدوير الطبيعي منخفض نسبياً ويمكن الحصول على معدلات أعلى في الدوران القسري كما موضح في الشكل (7 - 2). هنا تستخدم مضخة طرد مركزي لإرغام السائل على دخول الأنابيب بسرعة تتراوح من 2 - 5.5 م/ثانية (6 - 18 قدم/ثانية). الأنابيب في هذه الحالة تكون عند ضغط استاتيكي كافي لضمان عدم حصول غليان داخل الأنابيب وسوف يصبح السائل محمماً حال انخفاض الضغط الاستاتيكي خلال جريان السائل من المسخن إلى فضاء البخار ثم يومض خلال مزيج من السائل والبخار ويرش من فتحة الخروج للمبادل قبل دخوله إلى هيكل المبخر.

إن مزيج البخار والسائل سوف يرتطم بصفحة عاكسة في فضاء البخار حيث يعود السائل إلى مدخل المضخة والبخار يترك قمة المبخر إلى مكثف أو إلى المؤثر اللاحق. إن جزء من السائل الذي يترك الفاصل سوف يسحب باستمرار كمحلول مركز.



الشكل (2 - 7) مبخر ذات تدوير قسري

5.7 أداء المبخرات الأنبوبية

Performance of Tubular Evaporators

يقاس أداء المبخر بواسطة الطاقة وهي عدد الكيلوجرامات المبخرة في الساعة أما الاقتصادية Economy فهي عدد الكيلوجرامات من الماء المبخر لكل كيلوجرام من بخار الماء الذي يضخ للوحدة وتكون الاقتصادية في المبخر الأحادي التأثير أقل من الواحد الصحيح وتكون قيمتها أكبر في المبخرات متعددة التأثير.

6.7 اقتصادي المبخر Evaporator's Economy

تحدد هذه الخاصية باحتساب عدد المؤثرات ولغرض هذا الإنجاز من المفروض أن يتم اعتماد انثالبيا البخار إلى المؤثر الأول والذي سيؤثر بدوره على عدد المؤثرات الأخرى ولذلك سوف يعتمد مبدأ الموازنة الحرارية للمبخرات الأحادية والمتعددة التأثير وسنأتي على ذكر كل حالة بصورة منفردة وبالنظر لصعوبة قياس معاملات انتقال الحرارة الفردية داخل المبخر فإن النتائج العملية قد أعطت تلك الأرقام بدلالة المعاملات الإجمالية وهي كما موضحة في الجدول (1 - 7) للموضح أنناه.

جدول (1 - 7) معاملات انتقال الحرارة الإجمالية لأنواع المبخرات

معامل انتقال الحرارة الإجمالي U		نوع المبخر
Btu / hr . ft ² . °F	W / m ² . °C	
500 - 200	2500 - 1000	مبخر التدوير الطبيعي
1000 - 400	5000 - 2000	مبخر التدوير النسري
400	2000	مبخر طبقة هزاة ،مسائل نيوتوني
300	1500	لزوجة 1 cP
120	600	لزوجة 1 P
		لزوجة 100 P

7.7 طاقة المبخر Evaporator's Capacity

إن معدل انتقال الحرارة q خلال سطح تسخين لمبخر يعطى بواسطة التعريف الموضح في المعادلة التالية:-

$$\frac{dq}{dA} = U \Delta T = U (T_h - T_c) \quad (1 - 7)$$

وهو ناتج عن ضرب ثلاثة كميات في بعضها، أولهما مساحة سطح انتقال الحرارة وثانيهما هو معامل انتقال الحرارة الإجمالي U والثالث هو الفرق بدرجات الحرارة ويمكن مكاملة المعادلة (7 - 1) لتصبح كما يلي:-

$$q = U A \Delta T \quad (2-7)$$

فإذا دخل المغذي للمبخر وهو بدرجة غليان مقابلة للضغط المطلق في فضاء البخار، فإن جميع الحرارة المنتقلة خلال سطح التسخين ستكون متوفرة للتبخير وطاقة المبخر سوف تتناسب مع q . إذا كان المغذي بارداً فإن الحرارة المطلوبة لتسخينه إلى درجة غليانه ستكون كبيرة جداً وستخفض طاقة المبخر عند قيمة معينة لـ q تبعاً لذلك حيث تصبح الحرارة المستخدمة للتسخين غير كافية للتبخير وبالمقابل إذا كان المغذي عند درجة حرارة فوق درجة الغليان في فضاء البخار، فإنه سيتم تبخر جزء من المغذي تلقائياً بواسطة التوازن الأديباتيكي مع ضغط فضاء البخار وتكون طاقة المبخر أكبر من تلك المقابلة لقيمة q . هذه العملية تدعى التبخير الوميضي Flash Evaporation.

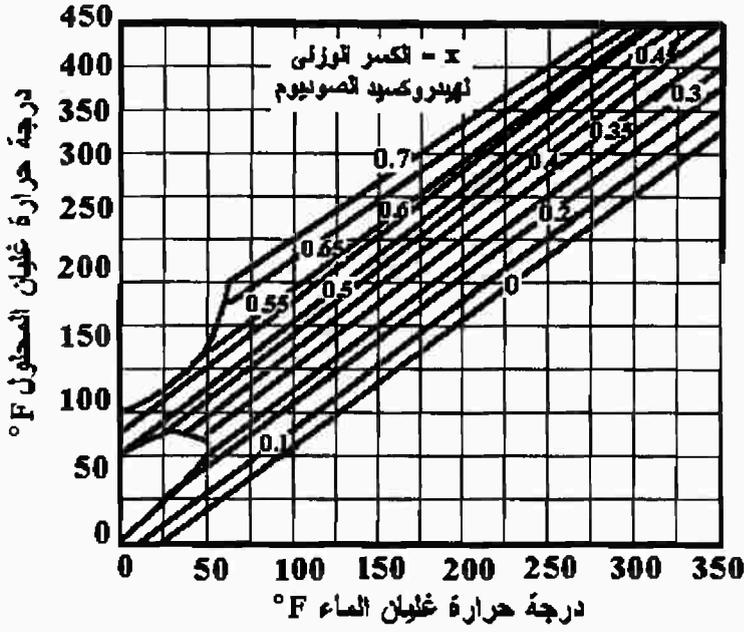
إن الانحدار الفعلي في درجة الحرارة عبر سطح التسخين يعتمد على المحلول المطلوب تبخيره، الفرق في الضغط بين مصدر البخار وفضاء البخار فوق السائل المغلي وعمق السائل فوق سطح التسخين. في بعض المبخرات تؤثر سرعة السائل داخل الأنابيب على الانحدار بدرجة الحرارة لزيادة الخسارة في الاحتكاك في الأنابيب مما يسبب زيادة في الضغط الفعال للسائل. عندما تكون للمحلول نفس خواص الماء النقي، يمكن قراءة نقطة غليانه من جداول البخار إذا كان الضغط معلوماً كما يمكن معرفة درجة حرارة البخار المتكاثف. في المبخرات الفعلية على أية حال تتأثر نقطة غليان المحلول بعاملين هما: ارتفاع نقطة الغليان وارتفاع السائل.

8.7 ارتفاع درجة الغليان وقاعدة دوهرنغ

Boiling Point Elevation and Duhring's Rule

إن الضغط البخاري للمحاليل المائية هو أقل من الضغط البخاري للماء عند نفس درجة الحرارة. ولذلك لضغط معين فإن درجة غليان محلول ما تكون أعلى من درجة غليان الماء النقي. الزيادة في قيمة نقطة الغليان للمحلول عن الماء تدعى بارتفاع درجة الغليان أو ما يدعى (BPE) أي (Boiling Point Elevation) للمحلول وهو مقدار صغير للمحاليل المخففة ومحاليل المواد العضوية الغروية ولكنها ربما تكون كبيرة من حيث القيمة أي بحدود 80°C (144°F) للمحاليل المركزة وأملاح المواد غير العضوية. إن BPE يجب أن تطرح من فرق درجة الحرارة التي تستخرج من جداول البخار.

للمحاليل القوية يجب إيجاد قيمة BPE من قانون تقريبي يعرف باسم قاعدة دوهرنغ والذي يبين أن نقطة الغليان لمحلول معين هي دالة خطية لنقطة الغليان للماء النقي عند نفس الضغط مما ينتج عنه خط مستقيم. يمكن الحصول على عدة خطوط مختلفة عند تراكيز مختلفة. عبر مدى واسع من الضغوط فإن القاعدة لن تكون دقيقة ولكن عند مدى معتدل فإن الخطوط تكون قريبة جداً من الخط المستقيم على الرغم من كونها ليست متوازية بالضرورة. الشكل رقم (7 - 3) هو عبارة عن مجموعة من خطوط دوهرنغ لمحاليل من هيدروكسيد الصوديوم في الماء. إن استخدام هذا الشكل موضح بمثال. إذا كان الضغط فوق محلول من هيدروكسيد الصوديوم تركيزه 25 % والذي تكون فيه درجة غليان الماء هي 180°F (82.2°C) وعند إسقاط هذه النقطة من المحور الأفقي x باتجاه عمودي على الخطوط وعند تقاطع هذا المسقط مع تركيز 25 % لهيدروكسيد الصوديوم ثم السير باتجاه أفقي ناحية المحور الرأسي y سوف نجد أن نقطة الغليان للمحلول عند هذا الضغط هي 200°F (93.3°C). إن فرق درجة الغليان لهذا المحلول هي 20°F (11.1°C) عند هذا الضغط.



الشكل (3 - 7) خطوط دوهرنغ لنظام هيدروكسيد الصوديوم - الماء

9.7 الموازنة الحرارية لمبخر أحادي التأثير

Enthalpy Balances For Single - Effect Evaporator

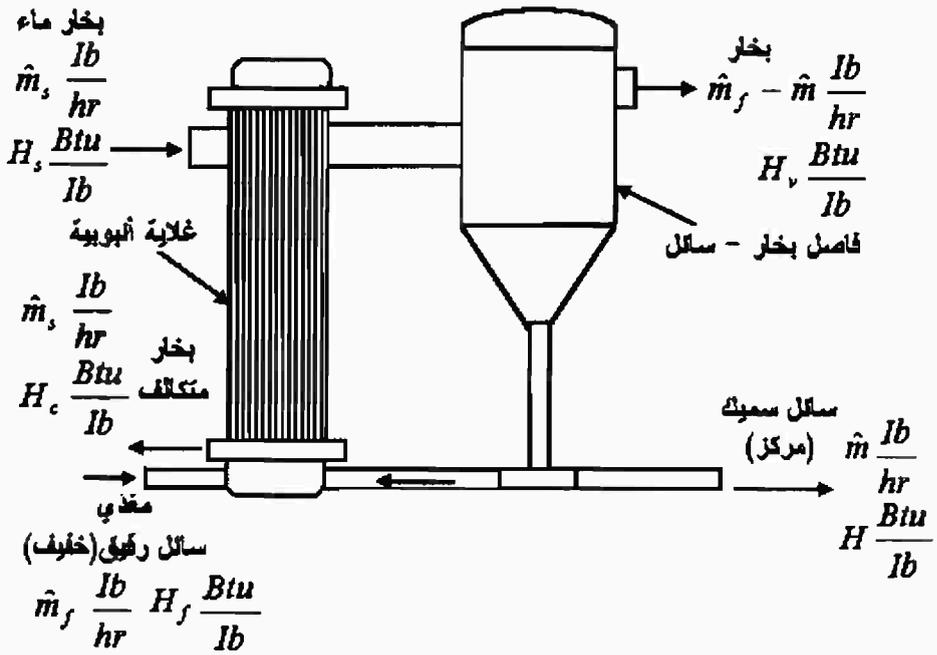
في المبخّر الأحادي التأثير تنتقل الحرارة الكامنة لتكثيف البخار خلال سطح التسخين لتبخير الماء من المحلول المغلي. يتطلب الأمر إجراء موازنتين حراريتين واحدة للبخار وواحدة للبخار أو السائل.

الشكل (4 - 7) يبين مبخّر أحادي التأثير عمودي الأنبوب، إن معدل جريان البخار والسائل المتكاثف هو \dot{m}_r وللسائل الخفيف أو المغذي هو \dot{m} وللسائل المركز هو \dot{m} . إن معدل جريان البخار إلى المكثف يفرض عدم ترسب مواد صلبة من السائل هو $(\dot{m}_r - \dot{m})$ ولتكن T_s هي درجة حرارة تكثف البخار و T هي درجة غليان السائل في المبخّر و T_r هي درجة حرارة المغذي.

وبفرض عدم وجود تسرب أو نضح أو تندية فإن جريان المواد المتكاثفة الأخرى يعتبر مهملاً وأن الفقدان الحراري من المبخّر يمكن إهماله أيضاً وأن

بخار الماء الداخل إلى ملف التسخين هو محمص Superheated وأن المتكاثف من هذا البخار سوف يخرج من ذلك المبخر وعند تلك الظروف فإن الفرق بين انثالبي البخار والمتكاثف هو λ_s وهي حرارة تكاثف البخار فإن الموازنة الحرارية للبخار سينتج عنها ما يلي:-

$$q_s = \hat{m}_s (H_s - H_c) = \hat{m}_s \lambda_s \quad (3-7)$$



الشكل (4 - 7) الموازنة المادية والحرارية للمبخر

حيث أن:-

q_s = معدل الحرارة المنتقل خلال سطح التسخين من البخار.

H_s = الانثالبي النوعية للبخار.

H_c = الانثالبي النوعية للبخار المتكاثف.

λ_s = الحرارة الكامنة للبخار المتكاثف.

\hat{m}_s = معدل جريان البخار.

أما الموازنة الحرارية لجانب السائل فتعطي بالمعادلة التالية:-

$$q = (\hat{m}_f - \hat{m}) H_v - \hat{m}_f H_f + \hat{m} H \quad (4-7)$$

حيث أن:-

q = الحرارة المنقولة من سطح التسخين إلى السائل.

H_v = الانثالبي النوعية لبخار.

H_f = الانثالبي النوعية للمغذي الرقيق.

H = الانثالبي النوعية للسائل السميك.

وفي غياب الفقدان في الحرارة فإن الحرارة المنقولة من البخار إلى سطح التسخين تساوي تلك الحرارة المنقولة من سطح التسخين إلى السائل الرقيق أي أن:

$$q = \hat{m}_s \lambda_s = (\hat{m}_f - \hat{m}) H_v - \hat{m}_f H_f + \hat{m} H \quad (5-7)$$

إن كل من H و H_f و H_c تعتمد على خصائص المحلول المطلوب تركيزه. وللمحاليل التي لا يوجد فيها تأثير لحرارة التخفيف على الموازنة الحرارية فيها فإن تلك الموازنة عبر المبخر الأحادي التأثير يمكن أن تحسب من الحرارة النوعية ودرجات الحرارة للمحاليل وسوف تكون q معدل انتقال الحرارة متكونة من q_f وهي الحرارة المطلوب انتقالها إلى السائل الرقيق لتغيير درجة حرارته من T_f إلى درجة الغليان T و q_v وهي كمية الحرارة المطلوبة لإحداث التبخير ولذلك فإن:-

$$q = q_f + q_v \quad (6-7)$$

وإذا تم فرض الحرارة النوعية ثابتة عند تغير درجات الحرارة من T_f إلى T
فإن:-

$$q_f = \hat{m}_f C_{p_f} (T - T_f) \quad (7-7)$$

$$q_v = (\hat{m}_f - \hat{m}) \lambda_v \quad (8-7)$$

حيث أن:-

C_{p_f} = الحرارة النوعية للسائل الرقيق.

λ_v = الحرارة الكامنة لتبخير السائل السميك

وإذا تم إهمال الارتفاع في نقاط الغليان فإن $\lambda_v = \lambda_f$ وهي الحرارة الكامنة لتبخير الماء عند الضغط المتواجد في فضاء البخار وبذلك يصبح شكل المعادلة (7-6) بعد تعويض المعادلتين (7-7) و (8-7) فيها وعند إهمال حرارة التخفيف بالشكل التالي:-

$$q = \hat{m}_f C_{p_f} (T - T_f) + (\hat{m}_f - \hat{m}) \lambda \quad (9-7)$$

وإذا كانت T_f أكبر من T فإن الحد $C_{p_f} (T - T_f)$ سيكون سالباً ويكون صافي الطاقة المطلوب تجهيزه للمبخر هو بواسطة السائل الرقيق ويعرف هذا المصطلح بالتبخير الومضي (Flash Evaporation). أما عند اعتبار حرارة التخفيف للمحلول حيث تكون بقيمة لا يمكن معها تجاهلها فإنه يجب استخدام منحنى (الانثالبيا - التركيز) الموضح في الشكل (7-5) لحساب قيم H_f و H في المعادلة (7-5) والذي يوضح تمثيل بياني للانثالبيا مقابل التركيز لمحاليل هيدروكسيد الصوديوم - الماء.

مثال 7 - 1: استخدم مبخر أحادي التأثير لتركيز محلول كميته 20,000 Ib/hr (9070 كجم/ساعة) تركيزه 20 % من هيدروكسيد الصوديوم إلى 50 % إن ضغط البخار المجهز هو $20 \text{ Ib}_f / \text{in.}^2$ (1.37 atm) وأن الضغط في فضاء البخار 100 mmHg ($1.93 \text{ Ib}_f / \text{in.}^2$). إن معامل انتقال الحرارة الإجمالي $250 \frac{\text{Btu}}{\text{hr. ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$ ($1400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$) وأن درجة حرارة المغذي كانت حوالي 100°F (37.8°C). أحسب كمية البخار المطلوبة واقتصادية المبخر ومساحة سطح انتقال الحرارة المطلوب

الحل: إن كمية الماء المبخر يمكن الحصول عليها من الموازنة المادية. إن المغذي يحتوي على $\frac{80}{20} = 4$ باوند من الماء لكل باوند صلب والسائل بعد التركيز يحتوي على $\frac{50}{50} = 1$ أي باوند من الماء لكل باوند صلب أي أن الكمية المبخرة من الماء = $4 - 1 = 3$ باوند ماء لكل باوند مادة صلبة أو:-
 $12,000 = 0.2 \times 20,000 \times 3$ باوند/ساعة.

إن معدل جريان السائل السميك أو المركز هو: $8,000 = 12,000 - 20,000$ باوند/ساعة

موازنة وضغط البخار Steam Consumption

من خلال التعامل مع المحاليل المركزة لهيدروكسيد الصوديوم، فإن حرارة التخفيف لا يمكن التغاضي عنها لذا فإن معدل انتقال الحرارة يتم إيجاده من المعادلة (7 - 5) والشكل (7 - 3). إن درجة حرارة التبخير لمحلول مركز من 50 % عند ضغط 100 mm Hg يمكن الحصول عليه من جداول البخار في الملحق رقم 1 وعليه فإن:-

درجة غليان الماء عند ضغط 100 mmHg = 124°F (جداول البخار).

درجة غليان المحلول = 197°F (الشكل 7 - 3).

$$.73 \text{ } ^\circ\text{F} = 124 - 197 =$$

الفرق بدرجات الغليان

ومن الشكل (7 - 5) نوجد المحتوى الحراري (الانثاليبيا) للمغذي والسائل المركز.

$$\text{للمغذي عند } 100 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ الحاوي على } 20\% \text{ مواد صلبة فإن: } H_f = 55 \frac{\text{Btu}}{\text{Ib}}$$

$$\text{للسائل المركز عند } 197 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ الحاوي على } 50\% \text{ مواد صلبة}$$

$$\text{فإن: } H = 221 \frac{\text{Btu}}{\text{Ib}}$$

ويمكن إيجاد المحتوى الحراري للبخار الذي يخرج من المبخر من جداول البخار. إن المحتوى الحراري (الانثاليبيا) لبخار الماء المحمص عند $197 \text{ } ^\circ\text{F}$ وضغط 1.93 Ib/in.^2 هو 1149 Btu / Ib .

إن حرارة التبخير للبخار λ عند ضغط فراغي مقداره 20 psig من جداول البخار تساوي $7,939 \text{ Btu / Ib}$. يمكن الآن حساب معدل انتقال الحرارة وضغط البخار من المعادلة (7 - 5) حيث أن:-

$$q = (20,000 - 8,000)(1149) + (8,000)(221) - (20,000)(55)$$

$$= 14,456,000 \text{ Btu / hr}$$

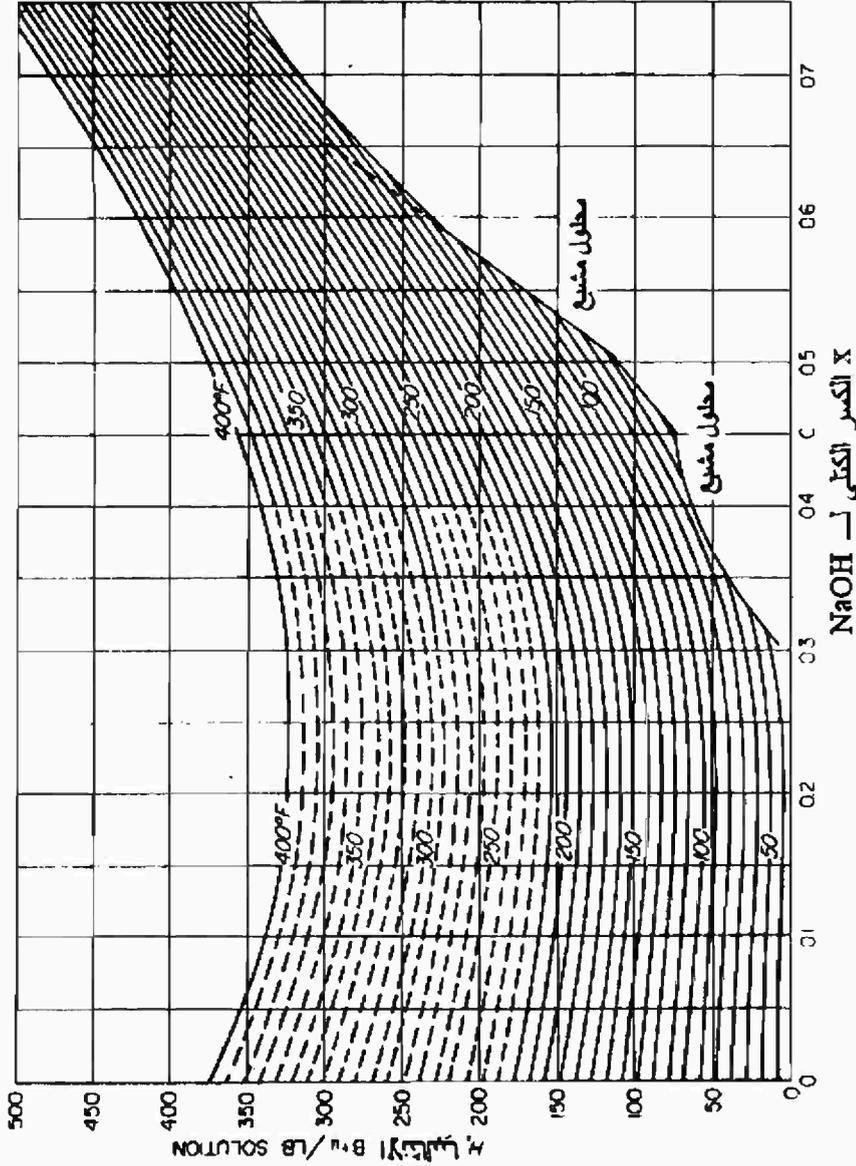
$$\therefore \hat{m}_s = \frac{14,456,000}{939} = 15,400 \text{ Ib / hr (6990 kg / hr)}$$

$$0.78 = \frac{12,000}{15,400} = \text{الاقتصادية}$$

أما بالنسبة لسطح التسخين فإن درجة حرارة تكاثف البخار هي $259 \text{ } ^\circ\text{F}$ ولذلك فإن:-

$$\text{مساحة سطح التسخين} = \frac{14,456,000}{(197 - 259) 250} = (86.4 \text{ m}^2) 930 \text{ ft}^2$$

ملاحظة: في حالة كون المحتوى الحراري للبخر H_v مبني على أساس أن البخر في حيز الغاز عند الضغط هو بخار مشبع بدلاً من بخار محمص فإن معدل انتقال الحرارة سيكون $14,036,000 \text{ Btu / hr}$ (4115.7 kW) وأن مساحة التسخين 906 ft^2 (84 m^2) وستكون نسبة الخطأ في هذه الحالة 3%.



الشكل (7 - 5)

مخطط الإنثالبي - التركيز لنظام هيدروكسيد الصوديوم - الماء

10.7 المبخرات متعددة التأثير Multiple Effect Evaporators

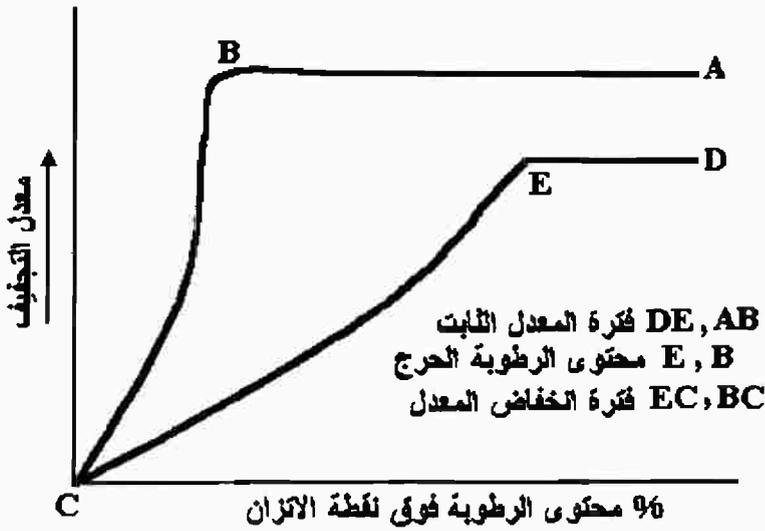
في النظام ثلاثي التأثير يستخدم البخار الذي يترك المرحلة الأولى كوسط تسخين للمرحلة الثانية ونفس الحال بالنسبة للبخار الخارج من المرحلة الثانية حيث يستخدم كوسط تسخين للمرحلة الثالثة وهكذا بالنسبة للمبخرات متعددة التأثير. إن المؤثر الأخير يربط إلى مكثف ومن ثم إلى قاذف أو طارد هواء أو Air Ejector والذي يقوم بإنشاء وخلق خلخلة في الضغط لسحب المواد غير المتكاثفة من النظام بأكمله ويضخ بخار الماء إلى المؤثر الأول عندما يكون الضغط في فضاء البخار عند أقصى قيمة أما المؤثر الأخير فيكون فيه الضغط الفراغي أقل ما يمكن وبهذه الطريقة سوف يتوزع الضغط بين البخار والمكثف على أكثر من مؤثر في مثل تلك المنظومات ويتدرج الانخفاض في الضغط كلما زاد عدد المؤثرات ليصبح أقل في الثاني عما هو عليه في الأول وهكذا. إن كل مؤثر يتصرف كأنه أحادي التأثير وكل واحد له فرق درجة حرارة خاص به خلال وسط تسخينه نسبة لمقدار الهبوط في الضغط خلاله.

11.7 عملية التجفيف Drying Process

إن عملية التجفيف هي إحدى التطبيقات المهمة لعملية انتقال الحرارة ويقصد بها الإزالة النهائية للماء من المواد الصلبة وعادة ما تتبع هذه العملية عملية التبخير أو الترشيح أو البلورة وتجرى عملية التجفيف لأسباب عدة منها:-

- 1 - تخفيض كلفة النقل.
- 2 - جعل المادة أكثر ملائمة للاستعمال اليدوي مثل المساحيق والصوابين.
- 3 - تجنب وجود الرطوبة والتي قد تؤدي إلى التآكل مثل تجفيف غاز الفحم coal gas.
- 4 - توفير خصائص مميزة كالحفاظ على الجريان الحر للملح.

وهناك مدى واسع من أجهزة التجفيف المتوفرة ويتم اختيار الجهاز المناسب الذي يوفر الحل الأكثر اقتصادياً ويكون للمادة المطلوب تجفيفها الأثر الأعظم في الاختيار النهائي أي بمعنى آخر خواص المادة المطلوب تجفيفها ويجب ملاحظة أن الرطوبة (نسبة الماء الموجود في المادة الصلبة) والمطلوب إزالتها قد لا تتكون فقط من رطوبة سطحية وإنما قد تحتوي على رطوبة داخلية أيضاً أو ماء البلورة crystal water أو الاثنان معاً. لذا يلعب المكون دوراً مهماً في عملية التجفيف. إن إزالة الرطوبة السطحية وحدها هي من أبسط عمليات التجفيف على شرط أن يكون توزيع المنتج وغازات التجفيف جيداً حيث نحتاج إلى وقت استبقاء صغير أو متوسط. أما في حالة وجود رطوبة داخلية فإن استخدام ميكانيكية الانتشار تعني أن وقت الاستبقاء سيكون أطول كذلك يلعب حجم الجسيمات هنا دوراً مهماً أيضاً وأن عملية إزالة ماء البلورة يمكن حلها فقط بحساب معدل التجفيف لكل عملية. فلو أخذنا الشكل التالي (7 - 6) :-



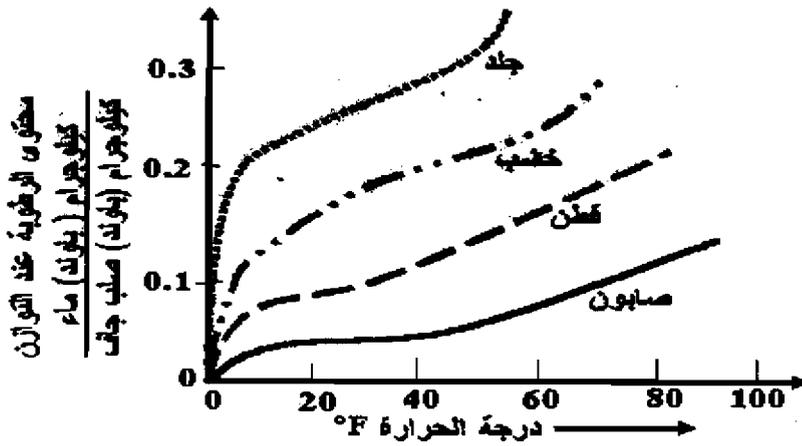
الشكل (7 - 6) منحنيات تجفيف نموذجية

حيث يبين هذا الشكل منحنيين نموذجيين لتجفيف نوعين مختلفين من المواد. وأن محتوى الرطوبة لأية مادة عند التوازن سوف يعتمد على درجة

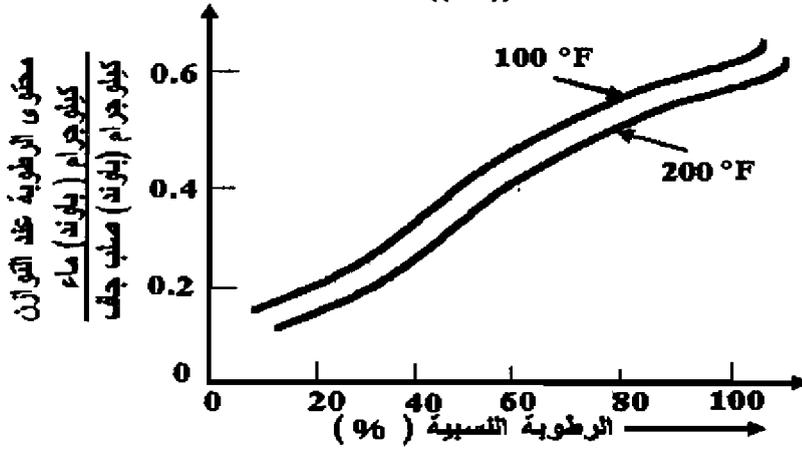
حرارة المحيط وسوف يختلف بحسب طبيعة المادة المطلوب تجفيفها فمثلاً للمواد غير المسامية وغير القابلة للذوبان مثل الرمل فسوف يكون له محتوى رطوبة قليل جداً عند التوازن بينما المواد غير العضوية مثل الخشب والجلد والأقمشة فإنها قد تحتوي قيماً عالية من الرطوبة قد تصل إلى 20 % عندما تكون الرطوبة النسبية 60 % عند درجة حرارة $20^{\circ}C$ كما موضح في الشكل رقم (7 - 7) أدناه حيث أن الاعتماد على محتوى الرطوبة عند الاتزان مع درجة الحرارة يكون مائلاً أيضاً. وعند ملاحظة منحنيات التجفيف يتضح أنه عند تجفيف المواد على شكل (سطح أو صفيحة أو كيك) فإن العامل المسيطر على العملية هو معدل انتشار الرطوبة من الكتلة المبتلة إلى السطح. ولتحسين عملية التجفيف، يجب الأخذ بنظر الاعتبار زيادة المساحة السطحية المؤثرة للمادة الداخلة وذلك لزيادة انتقال الكتلة والحرارة. ويمكن تطوير هذه التقنية في بعض الحالات لتشمل التجفيف الانتشاري الكلي في المجفف ذي الطبقة المسيلة مثلاً (Fluidized Cake) حيث يمكن جعل كل جسيمة في وضع ملامس لسطح التجفيف. إن أبسط طريقة لزيادة المساحة السطحية هي باستخدام ماكينات التشغيلية أو الرذاذ. إن المعدات سوف تصبح أكثر تعقيداً باستعمال أجهزة التكسير والبائقات مع كيكات الترشيح المبتلة والطين.

12.7 انتقال الحرارة والكتلة Heat and Mass Transfer

إن تجفيف المواد الصلبة يتضمن تزامناً لانتقال الحرارة والكتلة نتيجة تبخر السائل وانتقال الرطوبة بشكل سائل أو بخار خلال المادة الصلبة ثم البخار عبر السطح الفاصل بينهما ويكون ذلك عادةً في حالة غاز خامل وساخن. إن الحرارة تنتقل اعتيادياً إلى سطح المادة الصلبة بعدة ميكانيكيات. ربما أحدها الحمل convection من الهواء أو الهواء الساخن أو بالتوصيل conduction



((A))



((B))

الشكل (7-7) محتوى الرطوبة عند التوازن وتغيره

((A)) مع درجة الحرارة.

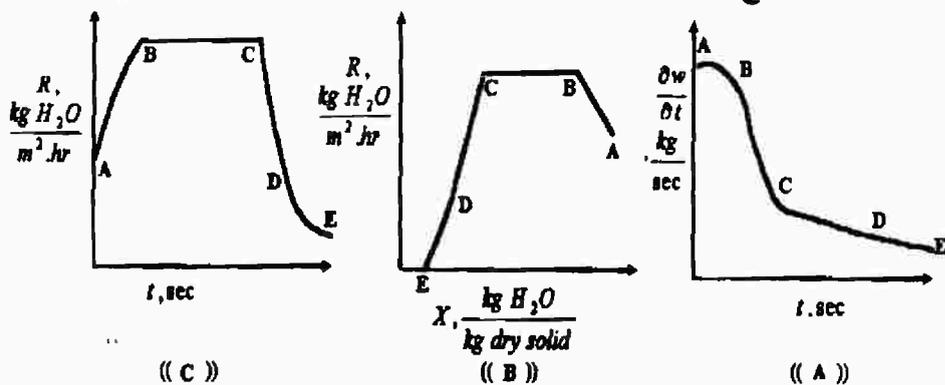
((B)) مع الرطوبة النسبية.

خلال التلامس مع سطوح ساخنة وكذلك بواسطة الإشعاع أو بواسطة الميكانيكيات الثلاثة معاً. إن الحرارة تنفذ من السطح إلى داخل المادة الصلبة عن طريق التوصيل وفي بعض الحالات أيضاً بواسطة تعاقب العمليات الأخرى مثل التبخير والتكثيف. أما السائل داخل المادة الصلبة فينتقل بواسطة العديد من الميكانيكيات مثل الانتشار الجزيئي في مادة صلبة متجانسة مستمرة أو بالجريان الشعري capillary flow في حبيبات ومواد صلبة مسامية أو بالجريان الناتج عن الانكماش أو تدرج الضغط أو بالجريان الناتج عن تعاقب

عملياتي التبخير والتكثيف وحتى لو صادفت إحدى الميكانيكيات في زمن معين خلال دورة التجفيف فإنه من غير الشائع أن تسيطر ميكانيكيات أخرى في أوقات أخرى.

13.7 فترات التجفيف Drying Periods

في الشكل (7 - 8 A) يبين محتوى السائل كدالة للزمن في الحالة العامة عند تجفيف مادة ما. في الشكل (7 - 8 B) والذي يزيدنا بمنحني معدل التجفيف مع محتوى الرطوبة وهو مشتق من المنحني A. الفترة A - B تمثل فترة التدفئة أما الجزء B - C يمثل فترة المعدل الثابت Constant Rate Period عند التبخر عندما يتبخر السائل من سطح مشبع بالمادة الصلبة. أما الجزء المنحني C - D فيمثل فترة المعدل الهابط Falling Rate Period والذي ربما يحتوي على فترة تبخير من سطح مشبع ذي مساحة متناقصة بالتدرج والمتبعة بفترة تبخير الماء من داخل المادة الصلبة. إن النقاط نفسها مبينة في الشكل رقم (7 - 8 C) حيث أن معدل التبخير (التجفيف) قد رسم مقابل الزمن ويسمى محتوى السائل في النقطة C أي الفاصل بين المعدل الثابت والهابط بمحتوى السائل الحرج Critical Moisture Content وقيمته تعتمد على نوع المادة الصلبة وقد أتضح بأنها تزداد بزيادة سمك المادة الصلبة ومعدل التجفيف.



الشكل (7 - 8)

يبين العلاقة بين معدل التجفيف وكل من محتوى الرطوبة والزمن

إن الرمل الخشن نسبياً يبين محتوى رطوبة حرج في المدى من (3 - 10 %) ماء على الأساس الجاف dry basis أما الترسبات الدقيقة والأصباغ فيبلغ محتوى الرطوبة الحرج فيها في المدى (40 - 60 %) أما الجلود والألواح الجدارية فيبلغ محتوى الرطوبة فيها في المدى (60 - 100 %). إن E تمثل النقطة التي يكون فيها جميع السطح المعرض غير مشبع وتمثل رطوبة التوازن الداخلية للمادة الصلبة.

1.13.7 فترة المعدل الثابت Constant Rate Period

في فترة المعدل الثابت تكون حركة السائل داخل المادة الصلبة سريعة بما فيه الكفاية لإبقاء السطح مشبعاً أما إذا جهزت الحرارة بالحمل من هواء دافئ فقط فإن درجة حرارة السطح هي درجة حرارة البصلة الرطبة wet bulb (إن عملية قياس درجة الحرارة التي تحصل عند محرار نو بصلة رطبة هي في الحقيقة إحدى أنواع عمليات التجفيف بمعدل ثابت).

2.13.7 التجفيف بواسطة التدوير الخلالي

Through Circulation Drying

عندما يمر الهواء على طبقات رقيقة من المادة الصلبة مسندة على مشابك فهو يقوم بالنقاط وحمل السائل ويجهز حرارة التبخير أيضاً، في الطبقة العميقة المتكونة من دقائق رطبة تماماً ذات الحجم الذي يمثل جزءاً صغيراً من عمق الطبقة سوف تتطور إلى منطقة ضيقة للتبخير عند السطح وتتحرك تدريجياً خلال الطبقة باتجاه جريان الهواء. وفي درجة حرارة الإشعاع وهذا يعطي سرعة تجفيف في فترة المعدل الثابت.

3.13.7 فترة المعدل الهابط Falling Rate Period

إن فترة المعدل الهابط المبينة في المنحني C - D في الشكل (7 - 8) (A) و (B) و (C) هي الحالة الأكثر عمومية ويمكن تقسيم هذه الفترة إلى منطقتين: الأولى هي منطقة تجفيف السطح غير المشبع والمنطقة التي سيكون فيها المجرى الداخلي للسائل هو المتحكم. إن منطقة تجفيف السطح غير المشبع المبينة في المنحني C - E في الشكل (7 - 8) تأتي مباشرة بعد النقطة الحرجة.

إن التقليل في فترة التجفيف ينتج بواسطة خفض مساحة السطح المبلل كما إن أجزاء جافة من المادة الصلبة سوف تنتقل إلى الهواء مما يعمل على تقليل معدل التبخير لوحدة المساحة. إن معدل التجفيف في هذه المنطقة غالباً ما يكون دالة خطية لمحتوى الرطوبة X كما موضح في الخط المستقيم المرسوم بين النقطتين D - E والموجود في الشكل المرقم (7 - 8) (B).

14.7 حساب معدل التجفيف للفترتين الثابتة والهابطة

Calculation of Constant and Falling Drying Rates

(1) تحويل البيانات بالأوزان إلى رطوبة فمثلاً إن النتائج المحصلة من قياس وزن المادة الرطبة (وزن المادة الجافة + الرطوبة) عند عدة أوقات وتحويلها إلى بيانات رطوبة بالشكل التالي:-

$$X_t = \frac{\text{وزن الرطوبة}}{\text{وزن الصلب الجاف}} = \frac{W - W_s}{W_s} \left(\frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg dry solid}} \right) \left(\frac{\text{lb } H_2O}{\text{lb dry solid}} \right) \quad (10 - 7)$$

ولظروف تجفيف ثابتة تقريباً يتم فحص مستوى رطوبة التوازن * X بوحدة كجم ماء لكل كجم صلب جاف فتصبح الرطوبة الحرة بالشكل التالي:-

$$X = X_t - X^* \quad (11 - 7)$$

حيث إن X تمثل الرطوبة الحرة و X_h تمثل الرطوبة غير المقيدة عند أي زمن t . لغرض حساب معد التجفيف من منحنى التجفيف يتم قياس ميل المماس أو بأخذ التفاضل $\frac{dX}{dt}$ الذي عند ضربه في $-\frac{W_s}{A}$ تعطي قيم معدل التجفيف R . لو أن:-

$$R = -\frac{W_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (12-7)$$

حيث أن R = معدل التجفيف بالكيلوجرام ماء لكل كيلوجرام صلب جاف.
 W_s = وزن المادة الصلبة الجافة.
 A = المساحة المقطعية المعرضة للتجفيف.
 بإجراء التكامل للمعادلة (7 - 12) عند فترة المعدل الثابت نحصل على:-

$$\int_0^{t_c} dt = -\frac{W_s}{A} \int_{X_1}^{X_c} \frac{dX}{R_c} \quad (13-7)$$

$$\therefore t_c = \frac{-W_s}{AR_c} (X_c - X_1) = \frac{W_s}{AR_c} (X_1 - X_c) \quad (14-7)$$

حيث أن t_c = زمن التجفيف الثابت، X_1 = محتوى الرطوبة الأولي
 X_c = محتوى الرطوبة الحرج.

(2) استخدام المعادلات الخاصة بانتقال الحرارة: إن كمية الحرارة المنتقلة
 بميكانيكية الحمل فقط هي :

$$q = h A (T - T_w) \quad (15-7)$$

حيث q = معدل الحرارة المنقولة ، A = مساحة التجفيف ، h = معامل انتقال الحرارة بالحمل و T = درجة حرارة الهواء الجاف و T_w = درجة حرارة البصلة للرطوبة للهواء.

إن معدل التجفيف الثابت لحالة انتقال الحرارة بالحمل فقط بحسب من المعادلة التالية:-

$$R_c \left(\frac{kg H_2O}{m^2 \cdot hr} \right) = \frac{h}{\lambda_w} (T - T_w) (\text{°C}) (3600) \quad \text{بالوحدات العالمية} \quad (16-7)$$

$$R_c \left(\frac{lb H_2O}{ft^2 \cdot hr} \right) = \frac{h}{\lambda_w} (T - T_w) (\text{°F}) \quad \text{بالوحدات البريطانية} \quad (17-7)$$

حيث أن R_c = معدل التجفيف الثابت.

$$\left(\frac{Btu}{ft^2 \cdot hr \cdot \text{°F}} \right) \text{ أو } \left(\frac{W}{m^2 \cdot \text{°K}} \right) \text{ = معامل انتقال الحرارة بالحمل}$$

λ_w = حرارة تبخير الماء

إن معامل انتقال الحرارة بالحمل في المعادلات أعلاه بحسب مما يلي:-

$$h \left(\frac{W}{m^2 \cdot \text{°K}} \right) = 0.0204 G^{0.8} \quad \text{بالوحدات العالمية} \quad (18-7)$$

حيث أن G سرعة الجريان الكتلية للهواء وتقع في المدى بين $G = (2450 - 24500 \frac{kg}{m^2 \cdot hr})$

أو في مدى سرعة خطية مساوي $V = (0.61 - 7.6 \frac{m}{sec})$

أو

$$h \left(\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot \text{°F}} \right) = 0.0128 G^{0.8} \quad \text{بالوحدات البريطانية} \quad (19-7)$$

حيث أن G سرعة الجريان الكتلية للهواء وتقع في المدى بين $G = (500 - 6000 \frac{lb}{ft^2 \cdot hr})$

أو في مدى سرعة خطية مساوي $V = (2 - 25 \frac{ft}{sec})$

تستخدم المعادلات أعلاه عندما يكون جريان الهواء موازياً لسطح التجفيف أما إذا كان اتجاه جريان الهواء عمودياً على سطح التجفيف وكان مدى سرعة

الجريان الكتلية للهواء هو (3900 - 19500 كجم/م².ساعة) أو مدى سرعة خطية (0.9 - 4.6 م/ثانية) فيمكن حساب معامل انتقال الحرارة من المعادلتين التاليتين:-

$$h \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right) = 1.17 G^{0.37} \quad (20-7) \quad \text{بالوحدات العالمية}$$

$$h \left(\frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} \right) = 0.37 G^{0.37} \quad (21-7) \quad \text{بالوحدات البريطانية}$$

أما زمن التجفيف الكلي فيحسب من المعادلة التالية:-

$$t = \frac{W_s \lambda_w (X_1 - X_2)}{Ah(T - T_w)} \quad (22-7)$$

وفي جميع الحالات فإن درجة حرارة هواء التجفيف تكون في المدى بين القيمتين (45 - 100 °C).

(3) انتقال الحرارة بالطرق الثلاثة، التوصيل والحمل والإشعاع في زمن التجفيف الثابت

Combined Convection , Conduction and Radiation Heat Transfer

لنتصور أن لدينا مادة رطبة معرضة لعملية تجفيف وهذه المرة من قبل سطح مشع للحرارة (كما في الأفران). إن ميكانيكية انتقال الحرارة في هذه المعدات تحدث بواسطة طرق انتقال الحرارة الثلاثة وهي التوصيل والحمل والإشعاع أي أن:-

$$q = q_c + q_R + q_k \quad (23 - 7)$$

حيث أن: q = كمية الحرارة الكلية المنتقلة (جول/ثانية أو وات).

q_c = كمية الحرارة المنتقلة بواسطة الحمل من الغاز عند درجة حرارة مقدارها $T^\circ C$ إلى السطح الصلب مقدره بألـ (جول/ثانية) أو بالوات.
 q_R = كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع من سطح عند درجة حرارة T_R إلى سطح المادة الذي درجة حرارته T_s ووحداتها أيضاً (جول/ثانية) أو وات.
 q_k = كمية الحرارة المنتقلة بالتوصيل في الأسفل بوحدات (جول/ثانية) أو بالوات.

وكما سبق توضيحه فإن:-

$$q_c = h_c(T - T_s)A \quad (24 - 7)$$

$$q_R = h_R(T_R - T_s)A \quad (25 - 7)$$

حيث إن A مساحة سطح التجفيف بالمتر المربع أو القدم المربع.
 أما معامل انتقال الحرارة بالإشعاع فيحسب من المعادلة التالية

$$h_R = \epsilon(5.676) \frac{\left(\frac{T_R}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s}{100}\right)^4}{T_R - T_s} \quad (26 - 7)$$

حيث إن ϵ ثابت ستيفان - بولتزمان ويساوي $0.1713 \times 10^{-8} \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ R^4}$ أو $4.88 \times 10^{-8} \frac{kcal}{hr \cdot m^2 \cdot ^\circ K^4}$

نلاحظ أن وحدات T_s و T_R في المعادلة (26 - 7) تكون بالكلفن. أما الحرارة المنتقلة بالتوصيل فتحسب من المعادلة

$$q_k = U_k(T - T_s)A \quad (28 - 7)$$

حيث أن U_k هو معامل انتقال الحرارة الإجمالي ويحسب من المعادلة التالية:-

$$U_k = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{z_M}{k_M} + \frac{z_s}{k_s}} \quad (29 - 7)$$

حيث z_M = سمك معدن الحوض بالمتر أو القدم و z_s = سمك مادة الحوض بالمتر أو بالقدم و k_M = معامل التوصيل الحراري للمعدن و k_s = معامل التوصيل الحراري للمادة ويربط المعادلات أعلاه نحصل على ما يلي:-

$$R_c = \frac{q}{A \lambda_s} = \frac{(h_c + U_k)(T - T_s) + h_R(T_R - T_s)}{\lambda_s} \quad (30-7)$$

والتي ترتب لتصبح بالشكل التالي:-

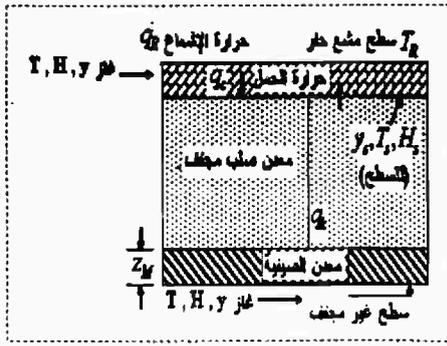
$$\frac{(H_s - H)}{C_s} = \left(1 + \frac{U_k}{h_c}\right)(T - T_s) + \frac{h_R}{h_c}(T_R - T_s) \quad (31-7)$$

إن قيمة C_s التي تمثل الحرارة النوعية الرطبة ($J / kg. ^\circ K$) تحسب من المعادلة التالية:-

$$C_s = (1.005 + 1.88 H) 10^3 J / kg. ^\circ K \quad (32-7)$$

ويتم حل المعادلة (32 - 7) بطريقة الخطأ والصواب.

مثال 7 - 2: مادة حبيبية رطبة غير ذائبة من المطلوب تجفيفها في حوض أبعاده (0.457 m x 0.457 m) وعمقه (25.4 mm). يبلغ عمق المادة داخل الحوض (25.4 mm) أيضاً ويبلغ سمك المعدن أسفل الحوض 0.61 m ومعامل التوصيل الحراري $\frac{W}{m.^\circ K}$ 43 أما المادة الصلبة فيبلغ معامل التوصيل الحراري لها $\frac{W}{m.^\circ K}$ 0.865. إن ميكانيكية انتقال الحرارة بالحمل تكون بواسطة تيار هواء يجري باتجاه موازي لسطح التجفيف وقعر الحوض وبسرعة خطية مقدارها 6.1 m / sec عند درجة حرارة $65.6^\circ C$ ومحتوى رطوبة $H = 0.01 \frac{kg H_2O}{Kg dry air}$ ، كما موضح في الشكل أدناه. يستلم سطح التجفيف الحرارة بواسطة ميكانيكيتي التوصيل والإشعاع أيضاً من أنابيب مسخنة بالبخار والمطلوب حساب معدل التجفيف الثابت لهذه المادة علماً أن درجة حرارة السطح المشع $93.3^\circ C$ وإشعاعية السطح = 0.92



الحل:

$$k_M = 43.3 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \quad k_s = 0.865 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$$

$$z_M = 0.0061m \quad z_s = 0.0254m$$

$$k_M = 43.3 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \quad k_s = 0.865 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$$

$$\varepsilon = 0.92, H = 0.01, \lambda_s = 2424 kJ/kg$$

من جداول الرطوبة نجد أن $T_w = 29^\circ C$

أما كثافة الهواء فتحسب من الحجم الرطب Humid Volume بالشكل التالي:-

$$V_H = (0.00283 + 0.00456 H)(T + 273)$$

$$= [0.00283 + (0.00456)(0.01)](65.6 + 273) = 0.974 \frac{m^3}{kg \text{ dry air}}$$

$$\therefore \rho = \frac{1 + 0.01}{0.974} = 1.037 \text{ kg} / m^3 \left(0.0647 \frac{lb}{ft^3} \right)$$

$$\therefore G = (6.1)(3600)(1.037) = 22770 \text{ kg} / m^2 \cdot hr$$

$$\therefore h_c = 0.0204 (22770)^{0.8} = 62.45 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$$

نفرض أن درجة حرارة السطح $T_s = 32^\circ C$ أو $305^\circ K$ إن درجة حرارة السطح المشع هي $93.3^\circ C$ أو $366.3^\circ K$ إن يتم حساب معامل انتقال الحرارة بالإشعاع من المعادلة (7-26) كما يلي:-

$$\therefore h_R = (0.92)(5.67) \frac{\left(\frac{366}{100} \right)^4 - \left(\frac{305}{100} \right)^4}{366.3 - 305}$$

$$= 7.96 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

$$\therefore U_k = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{z_M}{k_M} + \frac{z_s}{k_s}} = \frac{1}{\frac{1}{62.45} + \frac{0.00061}{43.3} + \frac{0.0254}{0.865}}$$

$$= 22.04 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

$$C_s = (1.005 + 1.88H)10^3 = [1.005 + (1.88)(0.01)]10^3$$

$$= 1.02 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ K$$

$$\frac{(H_s - 0.01) \lambda_s}{1.024 \times 10^3} = \left(1 + \frac{22.04}{62.45}\right) (65.6 - T_s) + \frac{7.96}{62.45} (93.3 - T_s)$$

وعندما تكون T_s مساوية إلى $32^\circ C$ فإن H_s تساوي 0.031 (من منحنيات الرطوبة) وقيمة $\lambda_s = 2424 \times 10^3$ جول/كجم. كلفن بالتعويض في المعادلة أعلاه

$$\therefore \frac{(0.031 - 0.01)(2424 \times 10^3)}{1.024 \times 10^3} = \left(1 + \frac{22.04}{62.45}\right) (65.6 - T_s)$$

$$+ \frac{7.96}{62.45} (93.3 - T_s)$$

$$\therefore T_s = 34.4^\circ C$$

نلاحظ أن القيمة المحسوبة بعيدة عن القيمة المفترضة لذلك يجب فرض قيمة جديدة لدرجة حرارة السطح وهذه المرة ستكون قيمة $T_s = 32.5^\circ C$. بإعادة الحسابات نحصل على القيم التالية $H_s = 0.032$, $\lambda_s = 2423 \times 10^3$ وهكذا فإن قيمة T_s الجديدة $= 32.8^\circ C$ وهذه القيمة قريبة من القيمة المفترضة. نعوض بقيمة T_s الصحيحة في المعادلة (7 - 30) فنحصل على معدل التجفيف الثابت.

$$\therefore R_c = \frac{(h_c + U_k)(T - T_s) + h_R(T_R - T_s)}{\lambda_s} (3600)$$

$$\therefore R_c = \frac{(62.45 + 22.04)(65.6 - 32.8) + 7.96(93.3 - 32.8)}{2423 \times 10^3} (3600)$$

$$= 4.83 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$$

ولو قارنا هذه النتيجة مع القيمة التي نحصل عليها عند انتقال الحرارة بواسطة ميكانيكية الحمل فقط باستعمال المعادلة (7 - 16) سوف نحصل على القيمة التالية:-

$$\begin{aligned}\therefore R_c &= \frac{h_c}{\lambda_w} (T - T_w)(3600) \\ \therefore R_c &= \frac{(62.45)(65.6 - 32.8)}{2423 \times 10^3} (3600) \\ &= 3.043 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}\end{aligned}$$

(4) حساب زمن التجفيف في فترة المعدل الهابط

Falling Rate Drying Period

بالعودة إلى المعادلة (7 - 12) وعندما يكون معدل التجفيف غير ثابت ويتناقص مع زمن التجفيف ومحتوى الرطوبة، فإنه عندما يصل محتوى الرطوبة الحر إلى الصفر يكون المعدل مساوياً للصفر وخلال أي مجال بين X_c الذي يمثل محتوى الرطوبة الحرج و X_2 الذي يمثل محتوى الرطوبة النهائي يحسب زمن التجفيف بالشكل التالي:-

$$t_F = \int_0^{t_F} dt = \frac{W_s}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{R} \quad (33-7)$$

في هذه الحالة فإن قيمة R متغيرة ولا يمكن إجراء التكامل كما في الحالة الأولى وعليه يحسب هذا التكامل عددياً أي بحساب المساحة تحت المنحني البياني والتي يتم الحصول عليها من رسم قيم معدل التجفيف خلال الزمن الهابط $\frac{1}{R}$ مقابل قيم X لتلك الفترة وكما سيتم توضيحه في المثال التالي:-

مثال 7 - 3: وجبة من مادة رطبة مطلوب تجفيفها من محتوى رطوبة أولي $X_1 = 0.38$ كجم ماء/كجم صلب جاف لمحتوى رطوبة نهائي $X_2 = 0.04$ كجم ماء /كجم صلب جاف. يبلغ وزن المادة الصلبة الجافة 399 كجم ومساحة التجفيف 18.58 m^2 . أحسب زمن التجفيف الكلي لهذه الوجبة علماً أن بيانات معدل التجفيف ضد محتوى الرطوبة لفترة الزمن الهابط معطاة في الجدول أدناه.

$\frac{X}{\text{kg dry solid}}$	$R, \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{m}^2 \text{ hr}}$	$\frac{1}{R}, \frac{\text{m}^2 \text{ hr}}{\text{kg H}_2\text{O}}$	$\frac{X}{\text{kg dry solid}}$	$R, \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{m}^2 \text{ hr}}$	$\frac{1}{R}, \frac{\text{m}^2 \text{ hr}}{\text{kg H}_2\text{O}}$
0.195	1.51	0.663	0.065	0.71	1.41
0.15	1.21	0.826	0.05	0.37	2.7
0.1	0.9	1.11	0.04	0.27	3.7

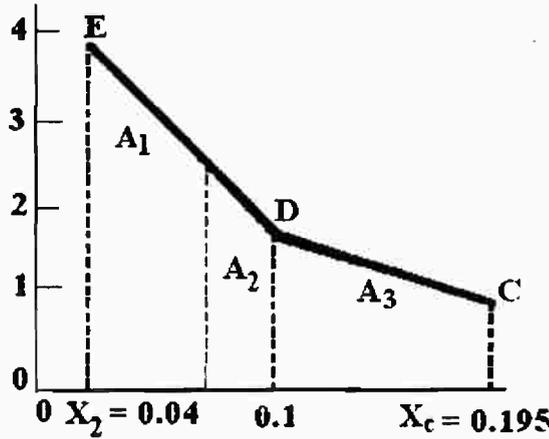
الحل : من معطيات السؤال نجد أن $X_1 = 0.38$ كجم ماء/كجم صلب جاف وأن مساحة التجفيف $A = 18.58 \text{ m}^2$ وأن وزن الصلب الجاف هو 399 kg وبما أن محتوى الرطوبة النهائي هو $X_2 = 0.04$ كجم ماء/كجم صلب جاف وأن فترة التجفيف مكونة من جزئين، الجزء الأول هو فترة التجفيف الثابت والتي تبدأ من X_1 وتنتهي بمحتوى الرطوبة الحرج وهو في هذه المسألة يساوي من حيث القيمة أول نقطة تبدأ بها البيانات وهي النقطة $X_c = 0.195$ وعند هذه النقطة فإن معدل التجفيف يساوي 1.51 كجم ماء / كجم صلب جاف وهو يمثل في هذه الحالة معدل التجفيف الثابت وعليه فإن زمن التجفيف الثابت سوف يحسب في هذه الحالة من المعادلة (7 - 14) :-

$$t_c = \frac{-W_s}{AR_c} (X_c - X_1) = \frac{W_s}{AR_c} (X_1 - X_c)$$

$$= \frac{(399)}{(18.58)(1.51)} (0.38 - 0.195) = 2.63 \text{ hr}$$

أما في حالة التجفيف الهابط فإن معدل التجفيف سيتغير بشكل دائمي مع محتوى الرطوبة ولذلك يحسب زمن التجفيف في هذه الفترة من المعادلة رقم (7 - 33) حيث يرسم منحنى مقلوب معدل التجفيف $\frac{1}{R}$ مع محتوى الرطوبة X بين $X_c = 0.195$ و $X_2 = 0.04$ كجم ماء / كجم صلب جاف وكما موضح في الشكل (7 - 9) أدناه. المساحة تحت المنحنى تحسب كما يلي :-

$$A_1 + A_2 + A_3 = (2.5 \times 0.024) + (1.18 \times 0.056) + (0.84 \times 0.075) = 0.189$$



الشكل (7 - 9) حساب المساحة تحت المنحنى لزمن التجفيف الهابط

وعلى هذا الأساس فإن زمن التجفيف الهابط يحسب من المعادلة (7 - 33) كما يلي :-

$$t_F = \frac{W_s}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{R} = \frac{399}{18.58} (0.189) = 4.06 \text{ hr}$$

$$\therefore t_T = t_c + t_F = 2.63 + 4.06 = 6.69 \text{ hr}$$

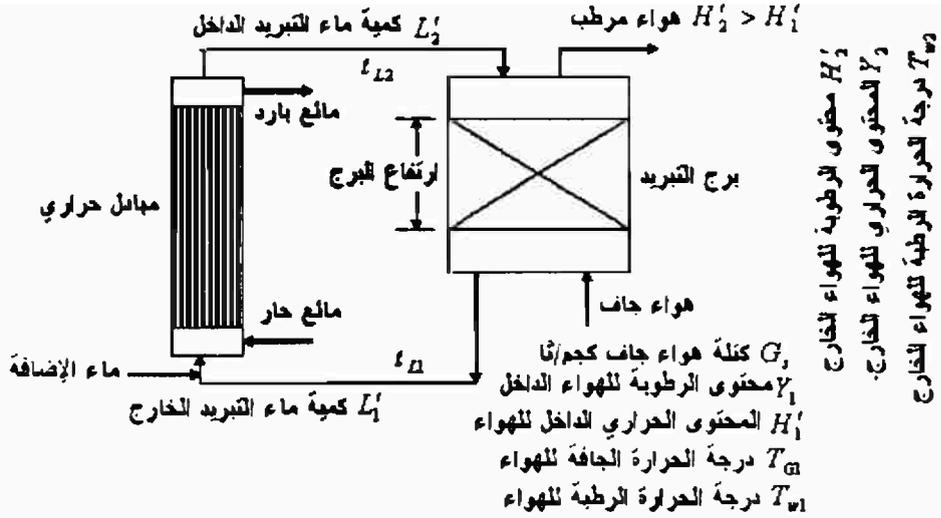
15.7 الترطيب وأبراج تبريد المياه

Humidification and Water Cooling Towers

الترطيب كلمة تستخدم للدلالة على تبخر الماء إلى داخل غاز لا ينوب عملياً في الماء وهو إحدى العمليات التي يحدث فيها التزامن المشار إليه في انتقال الحرارة والكتلة حيث يعتبر كلاهما مهمان ويؤثران في بعضهما البعض.

من التطبيقات الهندسية المهمة لمبدأ الترطيب والذي قد يصنف أيضاً ضمن عمليات انتقال الكتلة Mass Transfer Operations هي في تكييف الهواء أو Air Conditioning وفي التبريد التبخيري للماء أو ما يصطلح على تسميته Evaporative Water Cooling أو في التطبيق الأهم لهذه العملية في أبراج تبريد المياه Water Cooling Towers.

إن برج التبريد يستخدم في المصنع لتبريد الماء الخارج من المبادلات الحرارية التي تتواجد ضمن وحدات العمليات الإنتاجية أو في الوحدات الخدمية في المصانع حيث أنه من الناحية الاقتصادية من غير الممكن رمي الماء الخارج من المبادلات الحرارية إلى النفايات خارج المصنع لأن ذلك يعتبر هدراً في الطاقة حيث إن الماء الداخل للمبادلات يجب أن يكون معالجاً ولذلك يعاد تبريد هذا الماء واستخدامه مرة أخرى باستخدام الهواء كوسيلة ترطيب حيث يجري كل من الهواء والماء المطلوب تبريده في أعمدة أسطوانية الشكل أو على هيئة متوازي مستطيلات وباتجاه معاكس لجريان الآخر. في هذا الترتيب ونتيجة تلامس كل من الماء والهواء بشكل متعكس سوف يتبخّر قسم من الماء القادم من المبادلات فتتقلص كتلته وتتنخفض درجة حرارته إلى أقل من درجة حرارة دخوله ويعاد للاستخدام في المبادلات الحرارية كما يوضح ذلك الشكل (7 - 10) أدناه.



الشكل (7 - 10) أبراج تبريد المياه في المصانع الهندسية

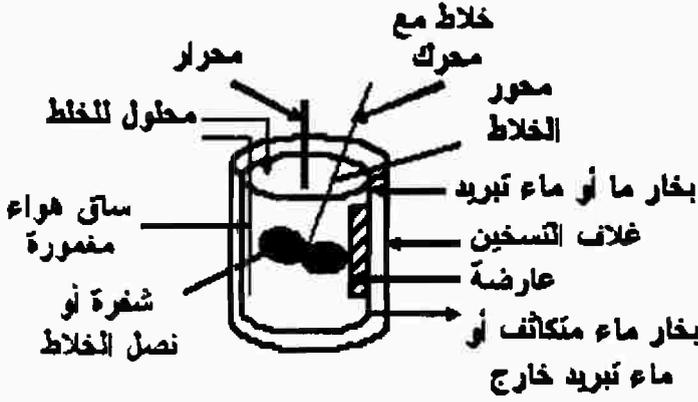
16.7 انتقال الحرارة في أوعية الخلط

Heat Transfer In Agitated Vessels

إن سطوح التبادل الحراري يمكن أن تكون بهيئة أغلفة تسخين أو تبريد أو ملفات أو أنابيب مغمورة في السائل حيث تستعمل بشكل واسع في أوعية التحريك والخلط وفي وعاء التحريك أو الخلط ، يعمل الخلاط Agitator على تدوير السائل داخل وعاء الخلط وتكوين دوامات الجريان والتي بدورها تزيد من معدل انتقال الحرارة بين ملف أو غلاف التسخين وبين المائع داخل الوعاء (الشكل 7 - 11) أما العوارض أو القواطع Baffles فتستخدم لمنع تكون ظاهرة الزوبعة Vortex وتكسير دوامات الجريان المضطرب والتخلص من الخلط المحوري Axial Mixing غير المرغوبة.

لتسخين أو تبريد السوائل داخل وعاء الخلط الأسطواناني الشكل والمزود بملف حلزوني ومروحة توربينية تستخدم العلاقة التالية:-

$$\frac{h_c D_c}{k} = 0.17 \left(\frac{D_a^2 n \rho}{\mu} \right)^{0.67} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.37} \left(\frac{D_a}{D_t} \right)^{0.1} \left(\frac{D_c}{D_t} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^b \quad (34-7)$$



الشكل (7 - 11) وعاء التحريك أو الخلط

حيث أن h_c هو معامل انتقال الحرارة الفردي بين سطح الملف والسائل D_a هو قطر الخلاط و n سرعة دوران الخلاط (rpm) أما ρ فهي كثافة السائل و μ هي لزوجة السائل و k هو معامل التوصيل الحراري للسائل و C_p هي الحرارة النوعية للسائل و D_c هو قطر وعاء الخلاط أما D_e فهو قطر الملف أما μ_w فهي لزوجة الماء عند نفس درجة حرارة السائل. الأس b الموجود على المقدار المخصص للزوجة ويكون أعلى في حالة السوائل الخفيفة عما هو عليه بالنسبة للزيوت اللزجة وعادة ما تساوي قيمته 0.24. في حالة انتقال الحرارة بين السائل وغلاف التسخين عند استخدام خلاط توربيني تستخدم المعادلة:-

$$\frac{h_j D_t}{k} = 0.76 \left(\frac{D_a^2 n \rho}{\mu} \right)^{0.67} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.24} \quad (35-7)$$

حيث h_j هو معامل انتقال الحرارة الفردي للخلاط. وعندما يكون السائل لزج جداً واستعمال خلاط يشبه المرساة في شكله فإن معامل انتقال الحرارة يحسب من المعادلة التالية:-

$$\frac{h_j D_t}{k} = K \left(\frac{D_a^2 n \rho}{\mu} \right)^a \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.18} \quad (36-7)$$

17.7 تمارين في الباب السابع

- س1: في ضوء مفهوم انتقال الحرارة هناك اختلاف واضح بين عمليات التقطير،التبخير والتجفيف والبلورة. ما هي أوجه هذا الاختلاف؟
- س2: محلول من مواد صمغية عضوية في الماء مطلوب تركيزه من 8 % إلى 45 % مواد صلبة في مبخر أحادي التأثير. يتوفر بخار عند ضغط مقياس 1.03 atm (120 °C). تم المحافظة على الضغط في فضاء البخار عند قيمة 102 mm Hg وهذا يقابل نقطة غليان للماء بقيمة 51.7 °C. إن معدل جريان المغذي هو 20,000 باوند / ساعة ويمكن اعتماد قيمة 2800 W/m².°C لمعامل انتقال الحرارة الإجمالي ويمكن إهمال التدرج في درجة الغليان وحرارة تخفيف المحلول. أحسب استهلاك البخار،الاقتصادية ومساحة السطح المطلوب للتسخين إذا كانت درجة حرارة المغذي هي (a) 51.7 °C (b) 21.1 °C و (c) 93 °C علماً أن الحرارة النوعية للمغذي هي 3.77 J/g .°C ويمكن اعتبار أن حرارة تبخير المحلول المغذي مساوية لحرارة تبخير الماء.
- س3: أجريت تجربة تجفيف مخبرية لعينة من مادة صلبة مساحتها 0.1 m² وكانت الأوزان المسجلة لفترات مختلفة من الزمن بالشكل التالي:

الزمن ، ساعة	الكتلة ، كجم	الزمن ، ساعة	الكتلة ، كجم	الزمن ، ساعة	الكتلة ، كجم
0	4.82	2.6	4.341	6.5	3.905
0.1	4.807	3.0	4.269	7.0	3.885
0.2	4.785	3.4	4.206	8.0	3.859
0.4	4.749	3.8	4.150	9.0	3.842
0.8	4.674	4.2	4.130	10.0	3.832
1.0	4.638	4.6	4.057	11.0	3.825
1.4	4.565	5.0	4.015	12.0	3.821
1.8	4.491	5.4	3.979	14.0	3.819
2.2	4.416	6.0	3.933	16.0	3.819

فإذا علمت أن وزن المادة الصلبة الجافة يساوي 3.765 kg

(a) أرسم منحنى معدل التجفيف (R) مقابل محتوى الرطوبة (W) .

(b) أحسب زمن التجفيف الكلي .

ص4: بلاطة رطبة وزنها 10 كجم وتحتوي على 75% من وزنها رطوبة. يبلغ محتوى رطوبة التوازن للبلاطة 2% من وزنها الأصلي. أبعاد البلاطة (75 mm x 600 mm x 900 mm) عندما تجفف في وحدة تجفيف بواسطة الهواء الجاف. أحسب زمن التجفيف المطلوب للوصول إلى محتوى رطوبة 5% من وزن البلاطة إذا كانت بيانات التجفيف كالتالي :-

2.7	2.9	3.3	4.2	5.3	7.2	9.1	وزن البلاطة الرطب (W) (kg)
1.0	2.0	3.4	3.9	4.4	4.9	4.9	معدل التجفيف (R) (kg / m ² .hr)

ص5: أجريت عملية تجفيف دفعي لمادة رطبة لتقليل محتوى الرطوبة من $0.33 \frac{kg H_2O}{kg solid}$ إلى 6% وزناً وكان وزن المادة الصلبة الجافة 120 kg أما مساحة التجفيف فكانت $3m^2$. أحسب الزمن الكلي لتجفيف هذه المادة علماً أن بيانات التجربة كانت كالتالي:

$X, \frac{kg H_2O}{kg dry solid}$	0.2	0.18	0.16	0.14	0.12	0.1	0.08	0.064
$R \times 10, \frac{kg H_2O}{m^2 \cdot sec}$	0.3	0.27	0.24	0.21	0.18	0.15	0.07	0.025

ص6: باستخدام المعادلة (7 - 35) أحسب معامل انتقال الحرارة بالحمل لغلاف تسخين وعاء خلط قطره 2 متر يقوم بتسخين منتج بترولي إلى درجة حرارة $60^\circ C$ إذا كان الخلاط يدور بسرعة مقدارها 140 rpm علماً أن الخلاط هو توربيني نو ستة شفرات وأن النسبة بين قطر الخلاط إلى قطر وعاء الخلط هي 3/1 علماً أن لزوجة الزيت (المواصفات أدناه) تعتبر تقريباً مساوية للماء.

T, °F	Cp Btu / lb. °F	الكثافة lb / ft ³	اللزوجة Ft ² / hr	k Btu / h. ft °F	الخاصية
140	0.477	54.37	0.000218	0.0733	اللزوجة