المحاضرة الرابعة – انتقال الحرارة

انتقال الحرارة هو العملية التي تنتقل فيها الطاقة الحرارية من جسم (مادة) إلى أخرى نتيجة اختلاف درجات الحرارة.

تطبيقات انتقال الحرارة في هندسة معامل الأغذية

في **هندسة معامل الأغذية** يعتبر انتقال الحرارة من العمليات الحيوية لضمان سلامة وجودة المنتجات الغذائية وله تطبيقات متعددة وتشمل ما يلي:

1. **التبريد والتجميد:**
تستخدم هذه العمليات لحفظ الأغذية وتقليل نشاط الكائنات الحية الدقيقة. فهم انتقال الحرارة هنا يساعد في تحسين كفاءة عملية التبريد وضمان تجميد المنتجات بشكل متساوٍ وسريع مما يحافظ على جودة الغذاء.
2. **البسترة والتعقيم الحراري:**
تعتمد هذه العمليات على تسخين المنتجات الغذائية إلى درجات حرارة محددة لفترة معينة لقتل البكتيريا والميكروبات الضارة. يتم تصميم هذه العمليات بناءً على فهم دقيق لكيفية انتقال الحرارة عبر الغذاء لضمان التسخين الفعال من دون الإضرار بالقيمة الغذائية.
3. **التجفيف الحراري:**
في هذه العملية تتم إزالة الرطوبة من الأغذية عبر التسخين. الفهم الجيد لانتقال الحرارة يساعد في تحقيق تجفيف فعال وسريع مع الحفاظ على جودة المنتج النهائي.
4. **الطهي الصناعي:**
يتم تسخين المواد الغذائية في المصانع باستخدام الأفران أو التسخين بالبخار. تحسين كفاءة نقل الحرارة هنا يقلل من استهلاك الطاقة ويضمن نضجًا متساويًا للمنتجات.
5. **التبادل الحراري:**
في مصانع الأغذية يتم استخدام المبادلات الحرارية (Heat Exchangers) لنقل الحرارة بين الموائع المختلفة (مثل تسخين السوائل أو تبريدها). الفهم لانتقال الحرارة هنا يزيد من كفاءة العمليات ويقلل من فقد الطاقة اثناء عمليات التصنيع.

انتقال الحرارة يحدث بثلاث طرق رئيسية :

1/ التوصيل 2/ الحمل 3/ الاشعاع

- **انتقال الحرارة بالتوصيل :(Conduction)** يحدث انتقال الحرارة بالتوصيل في المواد الصلبة والسوائل التي لا تكون في حالة حركة ويعتمد على معادلة فوريه Fourier's :

$$q_{Conduction} = -k\frac{dT}{dx}$$

حيث :

$q_{Conduction}$: معدل انتقال الحرارة بالتوصيل (W/m^2).

k : معامل التوصيل الحراري للمادة (W/m.K).

$\frac{dT}{dx}$: تدرج او تغير الحرارة عبر المادة (K/m).

ويكتب قانونه فوريه بصيغته البسيطة:

$$q = \frac{kA\ (T1 - T2)}{L}$$

حيث :

A : مساحة السطح (m^2).

T1 : درجة حرارة السطح الساخن (C^O).

T2 : درجة حرارة السطح البارد (C^O).

L : سمك اللوح (m).

مثال1/ لدينا جهاز بسترة يحتوي على جدار معدني من **الفولاذ المقاوم للصدأ** بسمك (5 ملم) ومعامل التوصيل الحراري للفولاذ (k = 15 W/m.K) وكانت درجة الحرارة داخل الجهاز (T1 = 80 °C) ودرجة حرارة السطح الخارجي للجهاز (T2 = 25 °C) ، احسب معدل انتقال الحرارة لكل متر مربع من الجهاز؟

ج/ نستخدم معادلة فوريه لحل المعادلة بعد تحديد المعطيات

$$q = \frac{kA\ (T1 - T2)}{L}$$

K = 15 W/m.k

A = 1 m^2

T1 = 80 °C

T2 = 25 °C

L = (5/1000) = 0.005 m

$$q = \frac{15\ \times 1\ (80 - 25)}{0.005}$$

q = 165000 W/m^2 لكل متر مربع

مثال2/ لدينا جهاز بسترة يحتوي على جدار يتكون من ثلاث طبقات :

الطبقة الداخلية من **النحاس** بسمك (2) ملم ومعامل توصيل حراري (k_1 = 380 W/m.K)

الطبقة الوسطى من **الفولاذ** بسمك (3) ملم ومعامل توصيل حراري (k_2 = 15 W/m.K)

الطبقة الخارجية من **عازل حراري** بسمك (4) ملم ومعامل توصيل حراري (k_3 = 0.05 W/m.K)

ودرجة حرارة السطح الداخلي للجهاز (T1 = 90 °C) ودرجة حرارة السطح الخارجي للجهاز بعد العزل (T4 = 30 °C) ، احسب معدل انتقال الحرارة الكلي لكل متر مربع من الجهاز؟

ج/

نقوم بإيجاد صيغة **المقاومة الحرارية المكافئة الكلية** لحساب معدل انتقال الحرارة في الجدران متعددة الطبقات من خلال المعادلة التالية:

$$R = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}$$

$$R = \frac{0.002}{380} + \frac{0.003}{15} + \frac{0.004}{0.05}$$

$$R = 5.26 \times 10^{-6} + 0.0002 + 0.08$$

R = 0.08020526 K/W

حيث R هي المقاومة الحرارية الكلية **وبذلك يُحسب معدل انتقال الحرارة باستخدام المعادلة:**

$$q = \frac{(T1 - T4)}{R}$$

$$q = \frac{(90 - 30)}{0.08020526}$$

q = 748 W/m^2 لكل متر مربع

مثال3/ لدينا جهاز بسترة أسطواني ذو قطر داخلي (1 m) وقطر خارجي (1.2 m) مصنوع من مادة الفولاذ المقاوم للصدأ بسمك (0.1 m) ومعامل التوصيل الحراري (k = 16 W/m.K) وكانت درجة الحرارة داخل الجهاز (T1 = 85 °C) ودرجة حرارة السطح الخارجي (T2 = 30 °C) ، احسب معدل انتقال الحرارة لكل متر طولي من الجهاز؟

ج/ في حالة الاجسام الاسطوانية نستخدم قانون فوريه بالصيغة التالية لغرض إيجاد المساحة :

$$q = \frac{2\pi kL\ (T1 - T2)}{\text{In}\ (\frac{r2}{r1})}$$

r1 = 1/2 = 0.5 m نصف القطر الداخلي للإسطوانة

r2 = 1.2/2 = 0.6 m نصف القطر الخارجي للإسطوانة

L = 1 m وهنا يعتبر هو طول الأسطوانة

π = 3.14

نقوم بحساب اللوغاريتم الطبيعي

$$In\frac{(0.6)}{(0.5)} = In\ (1.2) = 0.1823$$

نطبق قانون فوريه:

$$q = \frac{2\,\pi\ \times 16\ \times 1\ (85 - 30)}{0.1823}$$

q = 30314.8 W/m or q = 30.3 KW/m لكل متر طول من جهاز البسترة الاسطواني

- **انتقال الحرارة بالحمل** :**(Convection)** هو طريقة نقل الحرارة عبر حركة المائع (سائل أو غاز) من منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة إلى منطقة ذات درجة حرارة منخفضة ، ويحدث هذا النقل عندما تتغير كثافة المائع بسبب اختلاف درجات الحرارة مما يؤدي إلى حركة هذا المائع ونقل الحرارة من خلاله ، ويقسم الحمل الحراري إلى نوعين:

1. **الحمل الطبيعي :(Natural Convection)** يحدث عندما تكون حركة المائع ناتجة عن فروق الكثافة الناتجة عن اختلاف درجات الحرارة في المائع. مثال تسخين الهواء فوق سطح ساخن حيث يرتفع الهواء الساخن بسبب انخفاض كثافته ويحل محله هواء بارد.
2. **الحمل القسري :(Forced Convection)** في هذه الحالة يتم إجبار المائع على التحرك بواسطة وسيلة خارجية مثل مروحة أو مضخة ، هذا النوع من الحمل يستخدم بشكل شائع في صناعات ومعالجة الأغذية حيث يتم تسريع عملية انتقال الحرارة باستخدام أجهزة مثل المراوح أو المضخات لضمان توصيل الحرارة بكفاءة أكبر.

يمكن وصف انتقال الحرارة بالحمل $q_{Convection}$ باستخدام معادلة نيوتن للحمل الحراري :

$$q_{Convection} = h\, A_S\, (T_S - T\infty)$$

حيث :

h : معامل الحمل الحراري $(W/m^2.K)$.

As : مساحة السطح (m^2).

Ts : درجة حرارة السطح او المحيط (C^o).

T∞ : درجة حرارة المائع اثناء الجريان (C^o).

مثال4/ لدينا جهاز بسترة يستخدم ماء ساخن لتسخين الحليب داخل الانابيب درجة حرارة الحليب هي ($T\infty = 72^o$ C) ودرجة حرارة الماء المحيط بالأنابيب ($Ts = 90^o$ C) ، علما ان معامل الحمل الحراري بين الماء والانابيب (500 W/m².K) وطول الانبوب (5 m) وقطره الداخلي (0.05 m) احسب معدل انتقال الحرارة بالحمل إلى الحليب داخل الأنبوب ؟

ج/ نحسب مساحة سطح الانبوب من المعادلة التالية :

$$A = \pi\, d\, L$$

d : قطر الأنبوب.

L : طول الأنبوب

$$A = 3.14 \times 0.05 \times 5 = 0.785\ m^2$$

نحسب معدل انتقال الحرارة بالحمل باستخدام قانون نيوتن للحمل الحراري:

$$q = 500 \times 0.785\ (90 - 72)$$

$$q = 7065\ W/m \quad or \quad 7.07\ kW/m$$

مثال5/ يتم معالجة علب تحتوي على مادة غذائية باستخدام جهاز تعقيم يعمل على دفع هواء درجة حرارته ($Ts = 135\ ^oC$) حتى تصل درجة حرارة علب الاغذية الى ($T\infty = 115\ ^oC$) ويتم إخراجها ، علما ان معامل الانتقال الحراري بالحمل للهواء ($h = 20\ W/m^2.K$) ومساحة السطح الخارجي للعلب هي ($0.3\ m^2$) ، احسب معدل انتقال الحرارة بالحمل الحراري الطبيعي من الهواء إلى العلب ؟

ج/ نحسب معدل انتقال الحرارة بالحمل باستخدام قانون نيوتن للحمل الحراري:

$$q_{Convection} = h\, A_S\, (T_S - T\infty)$$

$$q = 20 \times 0.3\ (135 - 115)$$

$$q = 120\ W/m^2$$

- **انتقال الحرارة بالإشعاع :(Radiation)** يحدث انتقال الحرارة بالإشعاع من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة بدون الحاجة لوسط ناقل ، يُعبّر عنه بقانون ستيفان-بولتزمان:

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A_S (T_1^4 - T_2^4)$$

ϵ : معامل انبعاثية الإشعاع للسطح (قيمته بين 0 و 1).
σ : ثابت ستيفان-بولتزمان (5.67×10^{-8} $W/m^2.K^4$) وهو مقدار اعلى اشعاع يمكن انبعاثه من سطح مثالي يعرف بالجسم الأسود (Black-body).
As : مساحة السطح (m^2).
T_1 : درجة حرارة السطح الاول (K^o).
T_2 : درجة حرارة السطح الثاني (K^o).

مثال6/ في عملية شواء لشرائح لحم مساحتها السطحية ($0.5\ m^2$) وضعت في فرن درجة حرارة جداره الداخلي ($T = 300\ ^oC$) لحين وصول درجة حرارة الشرائح الى ($T = 160\ ^oC$) حيث كانت الانبعاثية للسطح (0.9) ، احسب درجة الحرارة المنتقلة بالإشعاع من الفرن الى المادة الغذائية ؟

ج/ نقوم بتحويل درجة الحرارة من سيليزي الى كلفن:

$T1 = 300 + 273 = 573\ ^oK$ $T2 = 160 + 273 = 433\ ^oK$

نقوم بإيجاد الاس الرابع لكل درجة حرارة بالكلفن ثم نستخرج الفرق بين درجتي الحرارة:

$\Delta T = 107799932241 - 35152125121 = 72647807120$

نقوم بحساب معدل انتقال الحرارة بالإشعاع باستخدام المعادلة:

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A_S (T_1^4 - T_2^4)$$

$$q_{rad} = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.5\ (72647807120)$$

$q_{rad} = 1853.6\ W$ للمساحة المذكورة

مثال7/ احسب معدل انتقال الحرارة بالإشعاع الى رغيف خبز اثناء انضاجه في فرن على درجة حرارة ($T = 450\ ^oK$) حيث كانت درجة حرارة الرغيف ($T = 373\ ^oK$) علما ان الانبعاثية لسطح الرغيف كانت (0.85) و المساحة السطحية للرغيف ($0.05\ m^2$).

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A_S (T_1^4 - T_2^4)$$

$$q_{rad} = 0.85 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 0.05\ (450^4 - 373^4)$$

$q_{rad} = 52.2\ W$ للمساحة المذكورة