المادة: هندسة معامل الاغذية ***FOOD PLANTS ENGINEERING***

الجزء النظري: **عدد الوحدات النظرية (2)** **عدد الساعات (2)**

مدرس المادة: أ.م.د. اسعد رحمان سعيد الحلفي

قسم علوم الاغذية – كلية الزراعة – جامعة البصرة

المحاضرة الخامسة:

انتقال الحرارة غير المستقر والمبادلات الحرارية *Unsteady - state heat transfer and Heat Exchangers*

انتقال الحرارة في الحالة غير المستقرة: *Unsteady - state heat transfer*

انتقال الحرارة في الحالة غير المستقرة هو المرحلة في عملية التسخين او التبريد عندما تتغير درجة الحرارة مع الزمن ، خلال هذه المرحلة تكون درجة الحرارة دالة للموقع والزمن.

رقم بيتوت: *Biot Number*

ويمثل نسبة المقاومة الداخلية (في الجسم)لانتقال الحرارة الى المقاومة الخارجية (مقاومة حمل حراري بين الوسط المحيط والجسم)لانتقال الحرارة بالمائع .

$$N_{Bi} = \frac{h\,L}{k}$$

L:طول السطح (m)

اذا كان N_{Bi} اقل من 0.1 فان المقاومة الداخلية تكون مهملة وان h اكبر من k

$$\frac{T_0 - T}{T_0 - T_1} = e^{-\frac{hA}{mCp}t}$$

T: درجة حرارة الجسم الداخلية (^oC) ، T_o: درجة حرارة المحيط الثابتة (^oC) ، T_1:درجة حرارة الجسم الابتدائية (^oC). A: المساحة السطحية للجسم (m^2) ، m: كتلة الجسم (kg) ، t: الزمن.

مثال: احسب درجة الحرارة لعصير طماطة كثافته 980 كغم/ $م^3$ بعد ان سخن لمدة 5 دقيقة في غلاية نصف كروية مغلفة نصف قطرها 50 سم ومعامل انتقال الحرارة بالحمل 5000 واط / $م^2.^oم$ ودرجة الحرارة في الغلاية 90 درجة مئوية ودرجة حرارة الطماطة الابتدائية 20 مئوي علما ان الحرارة النوعية لعصير الطماطة 3950 جول / كغم. كلفن.

Dr.ASAAD AL-HILPHY

الزمن بعد 5min. يساوي300sec. ونلاحظ أن المنتج سيخلط جيداً

نحسب مساحة السطح وتساوي مساحة نصف الكرة وهي تساوي:

$$A=\frac{1}{2}\left[4\pi r^2\right]=2\pi r^2=2\pi(0.5)^2=1.57m^2$$

$$\forall=\frac{1}{2}X\frac{4}{3}\left[\pi r^3\right]=\frac{4\pi(0.5)^3}{2}=0.262m^3$$

$$m=\rho\forall=980X0.262=0.257kg$$

$$\frac{T_0-T}{T_0-T_1}=e^{\frac{hA}{mCp}t}$$

$$\frac{90-T}{90-20}=e^{\frac{5000X1.57}{0.257X3950}X300}$$

ونجد قيمة Tوالتي ستساوي$83.3C^0$.

اذا كان N_{Bi} اكبر من 0.1 واقل من 40 فان المقاومة الداخلية والخارجة تكونان مؤثرتان وان k اكبر من h وفي هذه الحالة يحسب رقم فوريير ويمثل النسبة بين معدل التوصيل الحراري عبر بعد معين وبين معدل تخزين الحرارة بالحجم المكعب ونلجأ الى خرائط الزمن ودرجات الحرارة

$$F_o=\frac{Kt}{C_p\rho r^2}=\frac{\alpha t}{x^2}$$

$$\alpha=\frac{k}{\rho C_p}$$

يستخدم r اذا كان الجسم على شكل كروي او اسطواني . اما اذا كان الجسم على شكل مضلع فانه يستخدم X/2 بدلا من نصف القطر. α :معامل الانتشار الحراري . F_o:رقم فوريير وبايجاد رقمي بايوت وفوريير نستطيع ايجاد :

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0}$$

حبة برتقال قطرها10cm ودرجة الحرارة الابتدائية لها$18C^0$ وضعت لمدة 5.25hr في محيط درجة حرارة $4C^0$ علماً بأن معامل انتقال الحرارة بالحمل على سطح الثمار$3w/m^2K$ ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل 0.15w/mK ومعامل الانتشار الحراري لداخل الثمار$4.75X10^{-4}m^2/hr$؟

$$Bi=\frac{hR}{K}$$

$$Bi=\frac{3*0.05}{0.15}=1$$

$$F_o=\frac{Kt}{C_p\rho r^2}=\frac{4.75X10^{-4}*5.25}{0.05^2}=0.9975$$

$$F_o=\frac{Kt}{C_p\rho r^2}=\frac{\alpha t}{x^2}$$

ومن الخرائط للأشكال الكروية نجد أن:

$$\frac{T-T_0}{T_1-T_0}=0.1$$

$$\frac{T-(-4)}{18-(-4)}=0.1\Rightarrow T+4=0.1X22$$

$$T=2.2-4=-1.8C^0$$

سطح سمكه60cm ودرجة حرارته الابتدائية$20C^0$ معرض من جانبيه إلى غازات ساخنة مندفعة عند درجة حرارة$577C^0$ فإذا علمت أن معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغازات والسطح يساوي$13.5w/m^2K$ ومعامل انتقال الحرارة بالتوسيل للسطح$4w/mK$ وكثافة مادة السطح$2590kg/m^3$ والحرارة النوعية للسطح$0.3Kj/kgK$احسب درجة الحرارة في منتصف الجدار بعد مرور.8.75hr.

نحسب رقم فوريير:

$$F_o=\frac{Kt}{C_p\rho r^2}$$

$$F_o=\frac{4X8.75}{0.3X2590X\left(\frac{0.6}{2}\right)^2}=0.5$$

نحسب رقمBi:

$$Bi=\frac{hL}{K}$$

$$Bi=\frac{13.5X0.3}{4}=1.01$$

ومن الشكل نجد أن $\frac{T-T_0}{T_1-T_0}$ تساوي0.8. عند منتصف السطح.

$$\frac{T-577}{20-577}=0.8\Rightarrow T-577=0.8(20-577)=-445.6$$

$$T=577-445.6=131.4C^0$$

اذا كان N_{Bi} اكبر من 40 فان المقاومة السطحية تكون مهملة وان k كبير

الاوعية مزدوجة الجدار *Jacketed Pans*

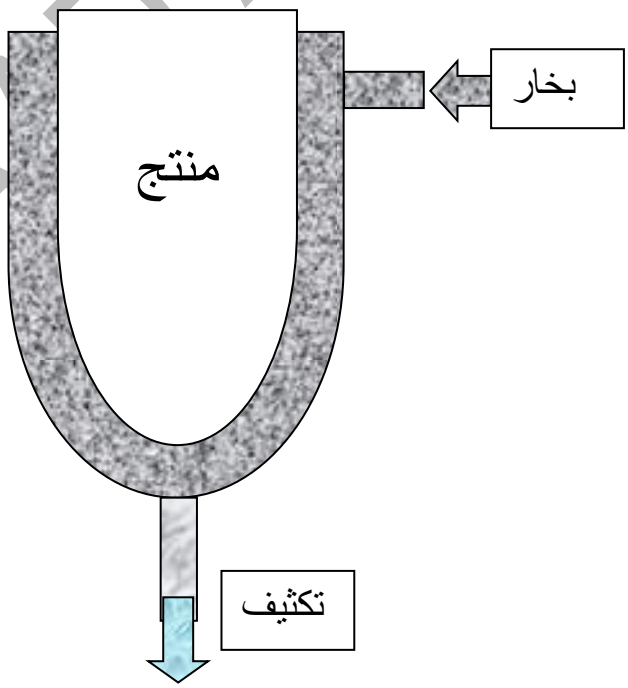
يتم احتواء السائل الذي يراد تسخينه في الوعاء مزدوج الجدار داخل وعاء قد يحتوي على خلاط للحفاظ على السائل في حالة حركة خلال سطح انتقال الحرارة.

يكون مصدر الحرارة بخار ماء يتكثف في فراغ الجدار المزدوج . ومن الاعتبارات العملية ذات الاهمية :

1- ان يكون هنالك وجود ادنى للهواء مع بخارالماء في فراغ الجدار المزدوج.

2- ان يكون بخار الماء غير محمص لانه في حالة التحميص سيتعين استخدام جزء من السطح كمزيل للتحميص وينتج عنه معاملات منخفضة للانتقال الحراري للغاز بدلا من معاملات انتقال حراري عالية.

3- ان وجود مصيدة بخار ماء لازالة البخار المتكثف والهواء يكون ملائم جدا.



Dr.ASAAD AL-HILPHY

مثال: قدر احتياجات بخار الماء عند بدئك في تسخين 50 كغم حساء في وعاء مزدوج الجدار ، اذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للحساء 18 مئوي والضغط المعياري لبخار الماء 100 كيلو باسكال (معياري)والوعاء له

الاغذية

مساحة 1 م^2 والمعامل الكلي لانتقال الحرارة 300 جول/م^2.ثا.^{o}م وان درجة تشبع بخار الماء عند 100 كيلو باسكال هي 120 مئوي والحرارة الكامنة لتبخر الماء 2202 كيلوجول/كغم.

$$q = U\ A\ \Delta T$$

$$q = 300 \times 1(120 - 18) = 3.06\ \times 10^4\ J/s$$

كمية بخار الماء تساوي

$$\frac{q}{\gamma} = \frac{3.06 \times 10^4}{2.202 \times 10^6} = 1.4 \times \frac{10^{-2}\text{kg}}{\text{s}} = 50\text{kg/h}$$

تنطبق هذه النتيجة عند بداية التسخين فقط ومع ارتفاع درجة الحرارة سيتم استهلاك كمية اقل من بخار الماء كلما انخفضت ΔT . ويمكن الاخذ بنظر الاعتبار عملية التسخين الكلية باستخدام المعادلة :

$$\frac{(T_o - T)}{(\text{T}_\text{o} - \text{T}_1)} = \exp\left(\frac{-\text{h A t}}{\text{m C}_\text{p}}\right)$$

ففي حالة استخدام وعاء يحتوي على خلاط حيث تدخل اليه الحرارة من سطح ما للتسخين يكون فيه معامل انتقال الحرارة السطحي هو الذي يسيطر على سريان الحرارة فسنجد ان هذا النظام يتبع نفس مسار التسخين او التبريد كما في حالة جسم صلب ذو موصلية حرارية عالية ومساحة سطح تسخين محددة وذي معامل انتقال حرارة سطحي.

مثال: عند تسخين الوعا المزدوج الجدار في المثال السابق قدر الزمن اللازم لرفع درجة حرارة الحساء الى 90 مئوي بافتراض ان الحرارة النوعية 3.95 كيلوجول /كغم. مئوي.

$$\frac{(T_o - T)}{(\text{T}_\text{o} - \text{T}_1)} = \exp\left(\frac{-\text{h A t}}{\text{m C}_\text{p}}\right)$$

$$\text{t} = \left(-\frac{C_p\ m}{h\ A}\right) \log \frac{(T - T_o)}{(\text{T}_1 - \text{T}_\text{o})}$$

$$\text{t} = \left(-\frac{3.95 \times 10^3 \times 50}{300 \times 1}\right) \log \frac{(90 - 120)}{(18 - 120)} = 803\ s = 13.4\ min$$

Dr.ASAAD AL-HILPHY

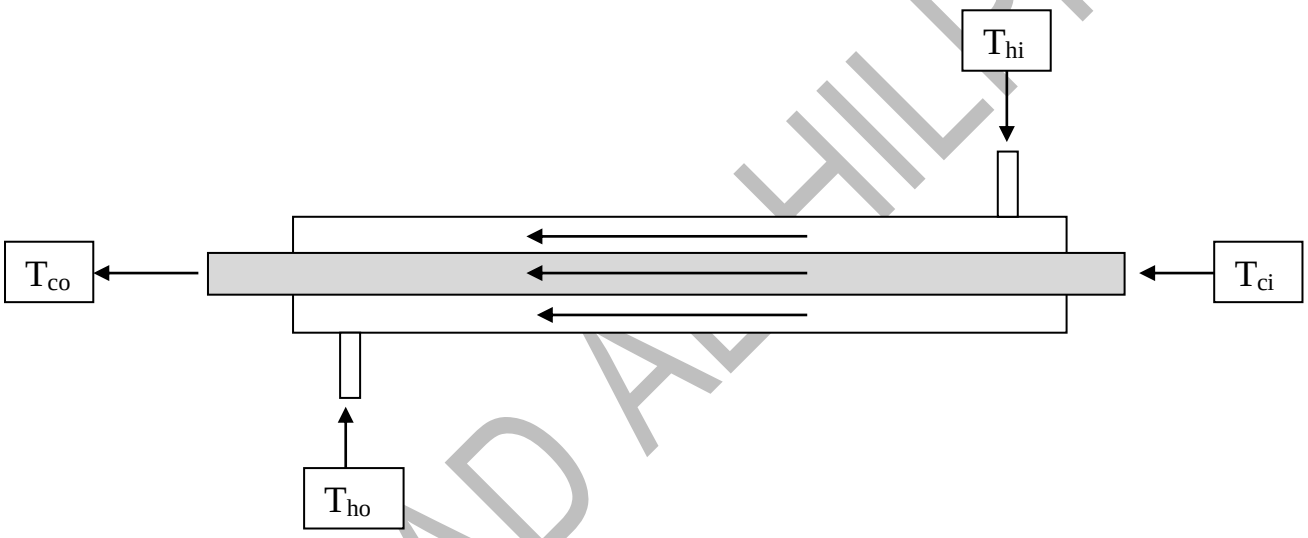
المبادلات الحرارية:

المبادل الحراري هو اداة لنقل الطاقة الحرارية من مائع درجة حرارته مرتفعة الى مائع درجة حرارته منخفضة وذلك اثناء حركة المائعان خلاله. ومن امثلتها المبادلات الحرارية المستخدمة في بسترة الاغذية السائلة مثل الحليب والعصير.

المبادلات الحرارية من نوع الصفيحة والانبوب هي:

المبادل الحراري المتوازي:*Parallel Flow Heat Exchanger (cocurent flow)*

وفيه تسير المادة الغذائية المسخنة او المبردة باتجاه واحد



يحسب معدل الفقد الحراري من المائع الساخن:

$$q_h = \dot{m}_h C_{ph}(T_{hi} - T_{ho})$$

معدل الكسب الحراري للمائع:

$$q_c = \dot{m}_c C_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

$$q_h = q_c$$

تحسب كمية الطاقة الحرارية الكلية المتبادلة في المبادل الحراري:

$$q = U\ A\ \Delta T_m$$

U:معامل انتقال الحرارة الكلي ($W/m^2.^oC$). A: مساحة سطح التلامس للمبادل الحراري (m^2).

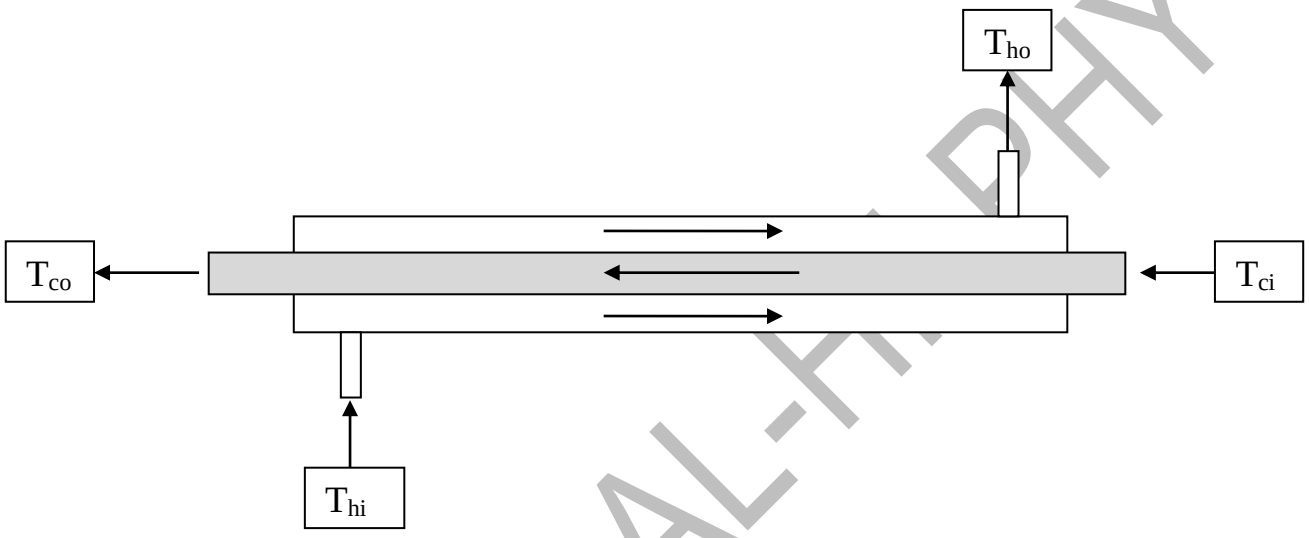
ΔT_m:الفرق بدرجة الحرارة بين المائع الساخن والمائع البارد(^oC) وتسمى بالفرق اللوغارتمي لمتوسط درجة الحرارة LMTD .

Dr.ASAAD ALHILPHY

$$\Delta T_m = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{\ln\left(\frac{(T_{hi} - T_{ci})}{(T_{ho} - T_{co})}\right)}$$

المبادل الحراري المعكوس: *Counter Flow Heat Exchanger*

وفيه تسير المادة الغذائية باتجاه والمادة المسخنة او المبردة باتجاه متعاكس.



في هذه الحالة كالاتي: ΔT_m يحسب

$$\Delta T_m = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}\right)}$$

يحسب معامل انتقال الحرارة الكلي بالنسبة للمساحة الداخلية كالاتي:

$$U_i = \frac{1}{\frac{A_i}{h_0 A_0} + \frac{A_i \ln\frac{r_0}{r_i}}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i}}$$

Dr.ASAAD AL-HILPHY

يحسب معامل انتقال الحرارة الكلي بالنسبة للمساحة الخارجية كالاتي:

$$U_0 = \frac{1}{\frac{A_0}{h_i A_i} + \frac{A_0 \ln \frac{r_0}{r_i}}{2\pi k L} + \frac{1}{h_0}}$$

معامل فاولنك: *Fouling Factors*

في بعض الاحيان نتيجة استخام المبادلات لفترة طويلة يحدث ترسب على سطح الانابيب والصفائح نتيجة للرواسب الموجودة في الموائع وهذا يؤدي الى زيادة المقاومة الحرارية للمبادل الحراري . وتحسب المقاومة الحرارية للرواسب كالاتي:

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U}$$

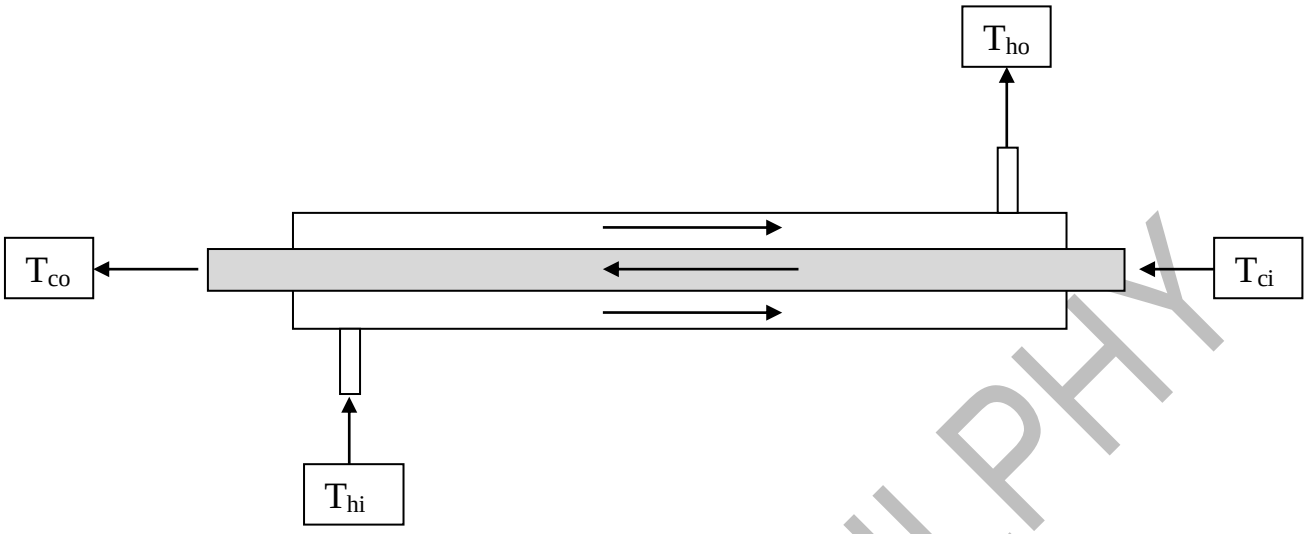
U: معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري قبل الاستخدام. U_d: معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري بعد الاستخدام. R_d: المقاومة الحرارية للرواسب.

وبالتالي يكون معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري :

$$\frac{1}{U} = + \frac{1}{h_1} + + \frac{1}{h_{d1}} + \frac{x_w}{K_w} + \frac{1}{h_{d2}} + \frac{1}{h_2}$$

مثال: ماء يتدفق بمعدل 68 كغم / دقيقة يتم تسخينه بواسطة زيت من 35 درجة مئوية الى 65 درجة مئويةفي مبادل حراري متعاكس اذا كانت الحرارة النوعية للماء 4100 جول /كغم.كلفن وللزيت 1.9 كيلوجول /كغم.كلفن ودرجة حرارة الزيت اثناء دخوله 110 مئوي واثناء خروجه 75 مئوي اذا كان معامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري هو 320 واط / م^2 . احسب معدل الكسب الحراري للماء في المبادل الحراري . ومعدل تدفق الزيت والفرق اللوغارتمي لمتوسط درجة الحرارة ومساحة المبادل الحراري.

Dr.ASAAD AL-HILPHY



$$q_c = \dot{m}_c\, C_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

$$q_c = \frac{68}{60} \times 4100\ (65 - 35) = 139400\ \text{w}$$

$$q_h = \dot{m}_h\, C_{ph}(T_{hi} - T_{ho})$$

$$139400 = \dot{m}_h \times 1900\ (110 - 75)$$

$$\dot{m}_h = 2.09\ kg/s$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln\left(\frac{(T_{hi} - T_{co})}{(T_{ho} - T_{ci})}\right)}$$

$$\Delta T_m = \frac{(110 - 65) - (75 - 35)}{\ln\left(\frac{(110 - 65)}{(75 - 35)}\right)} = 42.45℃$$

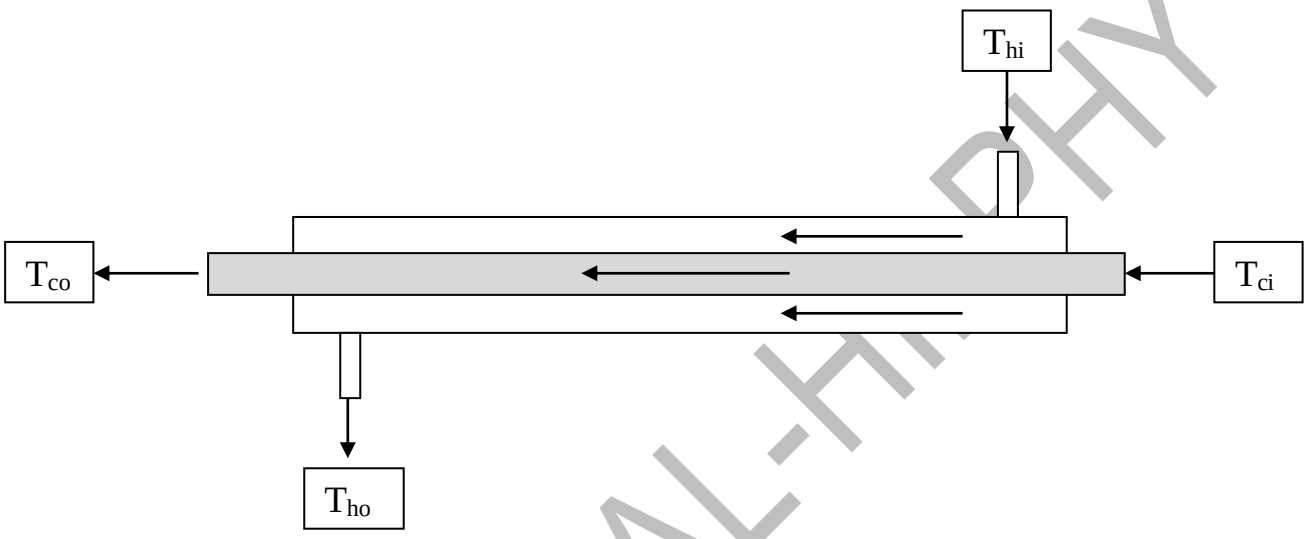
$$q = U\ A\ \Delta T_m$$

$$139400 = 320 \times A \times 42.45$$

Dr.ASAAD AL-HILPHY

$$A=10.26\ m^2$$

مثال: يتم تبريد 1.9 كغم / ثا من الحليب من 68 درجة مئوية الى 34.5 مئوي في مبادل حراري من النوع المتوازي ، تم استخدام الماء لهذا الغرض حيث كانت درجة حرارة الماء الداخل الى المبادل الحراري 4 مئوي والخارجة منه تساوي 24.9 مئوي اذا علمت ان الحرارة النوعية للحليب 3500 جول /كغم . كلفن وللماء تساوي 4100 جول /كغم . كلفن وكانت مساحة المبادل الحراري 36 م^2 . احسب معدل تدفق الماء البارد في المبادل الحراري . والفرق اللوغارتمي لمتوسط درجات الحرارة ومعامل انتقال الحرارة الكلي للمبادل الحراري .



$$q_h = q_c = \dot{m}_h\, C_{ph}(T_{hi} - T_{ho}) = \dot{m}_c\, C_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

$$q_c = 1.9 \times 3500\,(68 - 34.5) = \dot{m}_c \times 4100\,(24.9 - 4)$$

$$m=2.6\ kg/s$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{\ln\left(\frac{(T_{hi} - T_{ci})}{(T_{ho} - T_{co})}\right)}$$

$$\Delta T_m = \frac{(68 - 4) - (34.5 - 24.9)}{\ln\left(\frac{(68 - 4)}{(34.5 - 24.9)}\right)} = 28.67℃$$

$$q = U\,A\,\Delta T_m$$

$$222775 = U \times 36 \times 28.67$$

$$U=215.84\ W/m^2.K$$

Dr.ASAAD AL-HILPHY

مثال: حليب يسري في مبرد انبوبي ويمر داخل انبوب قطره الداخلي 25 سم بمعدل يساوي 0.4 كغم / ثا . درجة الحرارة الابتدائية للحليب 49 مئوي وهنالك رغبة لتبريده الى 18 مئوي باستخدام حمام مرجوج يستخدم ماء حول الانابيب عند درجة حرارة ثابتة مقدارها 10 مئوي ماهو طول الانبوب اللازم ؟ افترض ان معامل انتقال الحرارة من الحمام الى الحليب 900 جول / م^2.ثا.^{o}م والحرارة النوعية للحليب 3890 جول / كغم. ^{o}م.

$$q_h = m_{ih}\, C_{ph}(T_{hi} - T_{ho})$$

$$q_h = 0.4 \times 3890\ (49 - 18) = 48240\ J/s$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{hi} - T_{ci}) - (T_{ho} - T_{co})}{\ln\left(\frac{(T_{hi} - T_{ci})}{(T_{ho} - T_{co})}\right)}$$

$$\Delta T_m = \frac{(49 - 10) - (18 - 10)}{\ln\left(\frac{(49 - 10)}{(18 - 10)}\right)} = 19.6\ ℃$$

$$48240 = 900\ A \times 19.6$$

$$A = 2.43\ m^2$$

$$D = 0.025\ m$$

$$L = 2.43/(3.14 * 0.025) = 34.4\ m$$

Dr.ASAAD AL-HILPHY