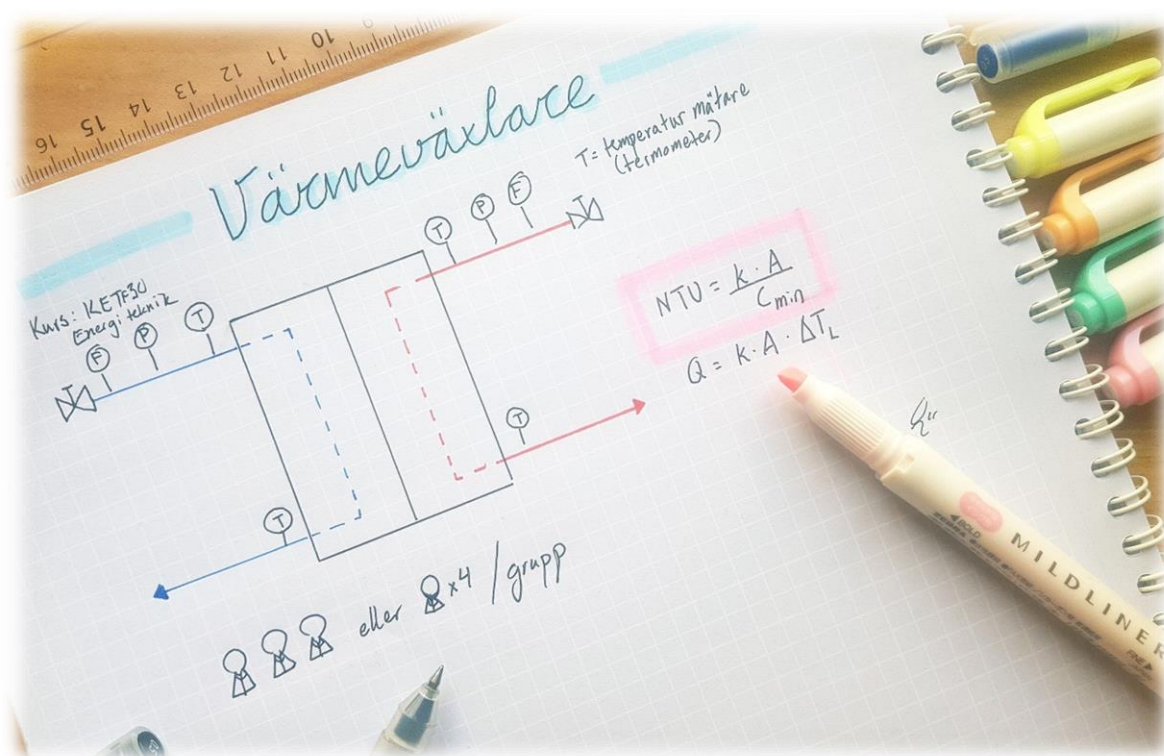


Ny laboration om värmeväxling för kursen KETF30 Energiteknik

av

Qiling Tan



Department of Chemical Engineering

Lunds universitet

April 2021

Version 2

Handledare: Ola Wallberg

Examinator: Mats Galbe

Postadress

Box 124
221 00

Hemsida

www.chemeng.lth.se

Besöksadress

Getingevägen 60
Lund, Sweden

Telefon

+46 46-222 82 85
+46 46-222 00 00

Fax

+46 46-222 45 26

Förord

Syftet med detta kandidatarbete är att få fram ett laborationsförslag om värmeväxling för kursen Energiteknik KETF30 på Lunds Tekniska Högskola. Utifrån ett befintligt förslag som inspiration skrivs en ny laborationsbeskrivning som har värmeväxlarens beteende av olika parametrar som tryckfall och hastighet i fokus.

Jag vill speciellt tacka min handledare Ola Wallberg på Lunds universitet som gav idén till arbetet och gett vägledning genom hela arbetet. Vill också tacka teknikern Leif Stanley på Lunds universitet som har satt upp alla stationerna till labben. Tack till Alfa Laval för värmeväxlarna och tack till examinator Mats Galbe på Lunds universitet. Slutligen, tack till mina nära och kära för all stöd och alla som har hjälpt till med att läsa rapporten och gett mig värdefulla feedback!

Qiling Tan

Lund, april 2021

Abstract

At Lund University, students in the program *Chemical engineering* have a compulsory course *Heat Engineering* (Energiteknik KETF30). The course has a laboratory practical concerning heat exchanger that needs to be renewed. The goal of this bachelor thesis was to write a description for the practical, focusing on the heat exchanger's behavior considering different parameters and comparing the who commonly used methods for heat exchanger analysis, efficiency-NTU (Number of Transfer Units) and the LMTD method (Logarithmic Mean Temperature Difference).

The work was divided into two parts. The first part was to perform the practical according to an already existing suggestion. Three different types of heat exchangers from Alfa Laval have been set up in three laboratory stations in pilot size. The setup was adjusted due to what material was available.

In the second part, the data acquired from performing the practical in part one was used to adjust the method description to a practical to be performed in total 2 hours for 3-4 students per group. Then the lab questions were adjusted to be more focused on the heat exchangers behavior using other methods than the LMTD method.

This results in a description of the practical containing three practical parts with questions. Also, three lab stations were built that are ready to use. For further progress, there are suggestions like alternative materials to use and virtualizing the practical.

Sammanfattning

På Lunds Tekniska Högskola studenter som studerar på programmet Civilingenjör inom Kemiteknik en obligatorisk kurs Energiteknik KETF30. Kursen har ett laborationsmoment om värmeväxling som behöver förnyas. Målet med kandidatarbetet är att få fram en laborationsbeskrivning med fokus på värmeväxlarens beteende beroende på olika parametrar och jämföra de två metoder som kan användas för att beskriva värmeväxlarens beteende, effektivitet-NTU (Termisk längd) och LMTD metoden (Logaritmiska medeltemperatur).

Arbetet består av två moment. Första momentet var att utföra laborationen enligt ett befintligt förslag. Tre olika värmeväxlare från Alfa Laval byggs upp till var sin station i pilotstorlek enligt förslaget med anpassning utifrån vad som fanns tillgängligt.

Moment två var att bearbeta med mättningsresultat från laborationen och justera laborationsbeskrivningen så att den var anpassad till en laboration som ska utföras i totalt 2 timmar där studenter är i grupper om 3 - 4 personer. Samt lägga till frågor till laborationen som hade mer fokus på att förstå värmeväxlarens beteende med hjälp av en annan metod än LMTD metoden.

Resultatet blev en laborationsbeskrivning med tre laborationsmoment med frågor som studenterna ska svara på. Även tre färdigbyggda laborationsstationer tillverkas som är redo att användas. Till det föreslogs förslag på vidare utveckling av laborationen som alternativa material och virtuell laboration.

Innehållsförteckning

Nomenklaturlista.....	1
1 Introduktion	2
1.1 Kandidatarbetets syfte.....	2
1.2 Problemformulering	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Litteraturstudie	3
2.1 Logaritmiska medeltemperatur metoden	3
2.1.1 Logaritmiska medeltemperaturen - härledning.....	4
2.2 Numbers of Transfer Unit och effektivitet-NTU metoden	6
2.3 Effektivitet-NTU metoden och logaritmiska medeltemperatur metoden	8
3 Material och metoder	9
3.1 Material.....	9
3.2 Metod	10
4 Resultat	10
5 Diskussion	12
6 Referenser	13
7 Bilagor	14
Bilaga A – Laborationsbeskrivning för <i>Laboration Värmetransport och NTU</i>	14

Nomenklaturlista

Beteckning	Förklaring	SI-enhet
<i>C</i>	Värmekapacitet	J/K
<i>c_p</i>	Den specifika värmekapacitet	J/(kg · K)
<i>ε (epsilon)</i>	Effektivitet	W = J/s
<i>h</i>	Värmeöverföringstal	W/(m ² · K)
<i>k</i>	Värmegenomgångstal	W/(m ² · K)
<i>λ (lambda)</i>	Värmeledningstalet/värmekonduktivitet	W/(m · K)
<i>LMTD</i>	Logaritmska medeltemperatur även betecknas ΔT_L (Logarithmic Mean Temperature Difference)	°C eller K
<i>NTU</i>	Termisk längd (Number of Transfer Units)	Enhetslös
<i>Q</i>	Värmelast/värmeöverföring	W = J/s
<i>T</i>	Temperatur	°C eller K

1 Introduktion

Kursen KETF30 Energiteknik på Lunds Tekniska Högskola har ett laborationsmoment om värmeväxling som behöver förnyas. Denna kurs är obligatorisk för studenter som läser programmet *Civilingenjör inom Kemiteknik*. Målet med detta arbete är att få fram en laborationsbeskrivning som ger studenterna mer förståelse om värmetransport samt komplettera den befintliga laborationen med mer verklighetsförberedande kunskaper. Kandidatarbetets syfte är att fördjupa kunskaper från tidigare kurser i programmet.

1.1 Kandidatarbetets syfte

Målet med kandidatarbetet kan sammanfattas i följande punkter:

1. Bygga en laboration till energiteknik kursen.
2. Laborationen ska bygga på kunskaper kring värmetransport från tidigare kurs KETF01 Transportprocesser.
3. Få fram budskapen av hur värmeväxlarkoefficienten k -värdet påverkas i relation till andra processparametrar. Införa effektivitet-NTU metoden.
4. Få fram en handledning till laborationen anpassad för 3 - 4 studenter/grupp som ska bli färdiga med laborationen inom 2 timmar.

1.2 Problemformulering

1. Vad är det som påverkar k -värdet? Hur är k -värdet relaterat till andra processparametrar som exempelvis tryckfall och flödet?
2. Hur kan en värmeväxlare beskrivas med NTU? Vad innebär NTU?

1.3 Avgränsningar

Laborationen är gjord i studiesyfte och därför kommer de använda materialen vara tillgängliga hos institutionen. Laborationsupprättningarna kommer även vara i pilot-storlek. I samarbete med Alfa Laval kommer endast värmeväxlare från dem användas.

2 Litteraturstudie

I det följande beskrivs två olika metoder som används vid analyser kring värmeväxlare. Avsnitt 2.1 beskriver den logaritmiska medeltemperaturen (LMTD) och andra faktorer relaterat till metoden som används. I avsnitt 2.2 beskrivs bakgrundsfakta samt begrepp om den enhetslösa storheten *Numbers of Transfer Unit* (NTU), varför den används och vilken information man kan få ut ur denna metod. I avsnitt 2.3 beskrivs en jämförelse mellan NTU-metoden med den klassiska logaritmiska medeltemperatur-metoden.

2.1 Logaritmiska medeltemperatur metoden

För att beräkna det totala värmelasten/värmeöverföringen i systemet krävs en energibalans avseende energin från den varma samt kalla sidan. Den drivande kraften i värmetransporten är differensen i temperaturen $\Delta T = T_v - T_k$ som är lokalt och varierar beroende på positionen i värmeväxlaren. Om det inte sker någon fasövergång i fluiderna kan värmen från båda sidorna uttryckas:

$$Q_k = m_k \cdot c_{p,k} \cdot (T_{ut,k} - T_{in,k}) \quad (1)$$

$$Q_v = m_v \cdot c_{p,v} \cdot (T_{in,v} - T_{ut,v}) \quad (2)$$

Där Q är värmeöverföringen, m är massflödet, c_p är specifika värmekapaciteten, T är temperaturen, indexen k för den kalla sidan i ekvation 1 samt v för varma sidan vid en viss punkt i värmeväxlaren i ekvation 2.

Eftersom ΔT är lokalt används därför ett medelvärde av temperaturdifferensen $\Delta \bar{T}_L$, som är den drivande kraften och uttrycket är olika beroende på flödestypen, se härledning under 2.1.1. Totala värmen Q genom hela värmeväxlarytan A beror på värmegenomgångstal k , se ekvation 3. (Incropera & Dewitt, 2007)

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta \bar{T}_L \quad (3)$$

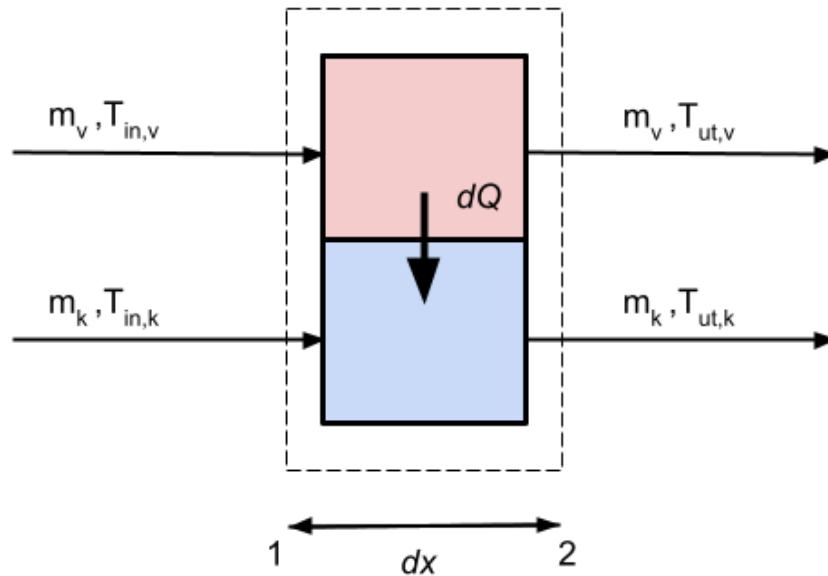
Värmegenomgångstalet är en samling av värmeöverföringstalen h samt värmeledningstalet λ i j stycken medium $\sum \frac{b_j}{\lambda_j}$ mellan fluiderna, se ekvation 4. (Alveteg, 2017)

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_k} + \sum \frac{b_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_v} \quad (4)$$

2.1.1 Logaritmiska medeltemperaturen - härledning

I denna härledning utgår vi från en värmeväxlare i medström, se figur 1. Den logaritmiska medeltemperaturen härleds med hjälp av energibalanser mellan den kalla och den varma sidan samt följande antaganden:

1. Systemet är isolerat, endast värmetransport mellan den kalla och varma fluiden.
2. Systemet är i stationärt tillstånd.
3. Axiell värmetransport försummas.
4. Ingen fasövergång.
5. Värmegenomgångstalet k är konstant.
6. De specifika värmekapaciteterna c_p är konstanta.



Figur 1. In- och utflöden för system med värmeväxlare i medström. (Nilsson, 2018)

Eftersom specifika värmekapaciteterna och massflöden antas konstanta kan produkten av dem förenklas med värmekapaciteten C , vilket också blir konstant i detta fall, se ekvation 5.

$$C = m \cdot c_p \quad (5)$$

Att systemet antas isolerat medför att all värme från den varma sidan förs till den kalla sidan. Detta ger energibalanserna i ekvation 6 och 7 för den lokala värmeöverföringen. Värmen blir ett negativt bidrag för den varma sidan och positivt bidrag för den kalla sidan.

$$dQ = -m_v \cdot c_{p,v} \cdot dT_v \equiv -C_v \cdot dT_v \quad (6)$$

$$dQ = m_k \cdot c_{p,k} \cdot dT_k \equiv C_k \cdot dT_k \quad (7)$$

där dQ är den lokala värmeöverföringsändringen och dT den lokala temperaturändringen för respektive sida.

Den lokala värmeöverföringen dQ över ytan kan uttryckas som produkten av värmegenomgångstalet k , den lokala temperaturskillnaden ΔT och ytan dA :

$$dQ = k \cdot \Delta T \cdot dA \quad (8)$$

Genom att sätta differentialen av ΔT lika med differensen av differentialerna hos de lokala temperaturändringarna får man i kombination med ekvation 6 och 7:

$$d(\Delta T) = dT_v - dT_k = -dQ \frac{1}{c_v} + dQ \frac{1}{c_k} \quad (9)$$

Om man kombinerar ekvation 8 och 9 fås följande uttryck:

$$d(\Delta T) = -k \left(\frac{1}{c_v} + \frac{1}{c_k} \right) \Delta T dA \quad (10)$$

Flytta ΔT till vänsterledet och beräkna integralen för ändringen mellan två punkter som i figur 1:

$$\begin{aligned} \int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} &= -k \left(\frac{1}{c_v} + \frac{1}{c_k} \right) \int_1^2 dA \\ \Leftrightarrow \ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} &= -kA \left(\frac{1}{c_v} + \frac{1}{c_k} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Ersätt C_v och C_k för att uttrycka högerledet med temperaturer:

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -kA \left(\frac{T_{in,v} - T_{ut,v}}{Q} + \frac{T_{ut,k} - T_{in,k}}{Q} \right) \quad (12)$$

Jämför med figur 1 och se att för *medström* gäller $\Delta T_1 = T_{in,v} - T_{in,k}$ samt $\Delta T_2 = T_{ut,v} - T_{ut,k}$. Detta ger:

$$\begin{aligned} \ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} &= -\frac{kA}{Q} \left((T_{in,v} - T_{in,k}) - (T_{ut,v} - T_{ut,k}) \right) = -\frac{k}{Q} (\Delta T_1 - \Delta T_2) \\ &\Leftrightarrow \\ Q &= kA \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \end{aligned} \quad (13)$$

Om man lägger ihop ekvation 3 med ekvation 13 fås uttrycket för den drivande kraften, *logaritmiska medeltemperaturen* $\Delta\bar{T}_L$ som visas i ekvation 14.

$$\Delta\bar{T}_L = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (14)$$

För *motström* gäller $\Delta T_1 = T_{in,v} - T_{ut,k}$ samt $\Delta T_2 = T_{ut,v} - T_{in,k}$. ΔT_1 och ΔT_2 är temperaturskillnaderna för varje sida medan ΔT_k och ΔT_v är temperaturskillnader i strömmen. (Incropera & Dewitt, 2007)

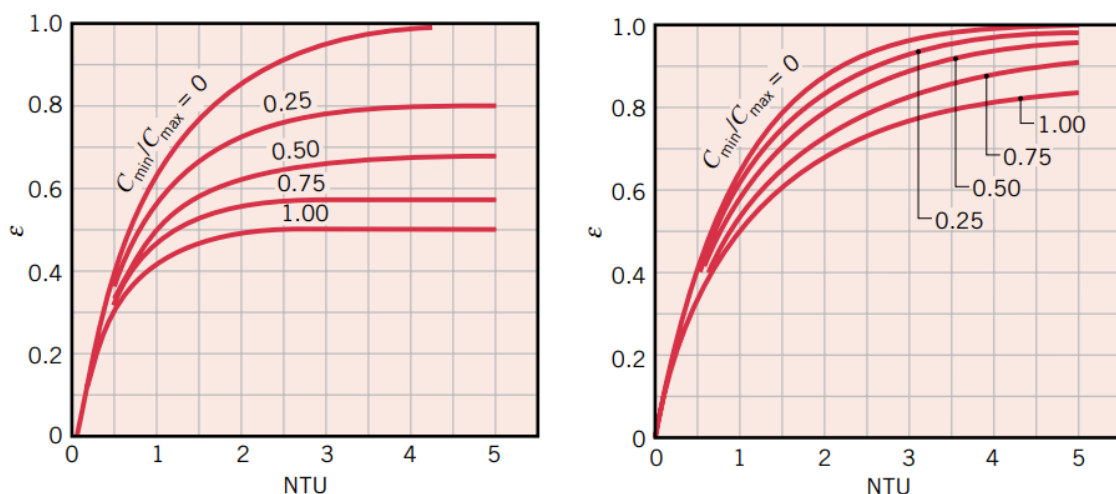
2.2 Numbers of Transfer Unit och effektivitet-NTU metoden

Numbers of Transfer Unit (NTU) är ett begrepp som används ofta inom värmeöverföring.

Definitionen av NTU är en sammansättning av värmegenomgångstalet k (även betecknas som U i till exempel engelskspråkig litteratur), värmeöverföringsarean A och minsta värmekapaciteten bland båda sidorna C_{min} som är produkten av massflödet m och specifika värmekapaciteten (materialberoende) c_p , se ekvation 15.

$$NTU = \frac{k \cdot A}{C_{min}} \quad (15)$$

NTU uttrycks oftast som ett samband med effektiviteten och denna metod kallas för effektivitet-NTU (ϵ -NTU) metoden. I figur 2 visas två ϵ -NTU diagram för en värmeväxlare i medström och en i motström. Med denna metod kan man enkelt få fram vad effektiviteten är med ett känt NTU värde. (Zhang, 2013)



Figur 2. ϵ -NTU diagram, vänstra för medström och högra för motström. (Incropera & Dewitt 2007)

För att få fram ett ε -NTU diagram behövs ett uttryck för effektiviteten. Definitionen av effektiviteten är andelen av den nyttjade värmeöverföring Q genom den maximala värmeöverföringen Q_{max} :

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (16)$$

Om ingen fasövergång sker kan värmeenergin hos båda sidorna beräknas med ekvationerna 6 och 7 med givna in och ut temperaturer T , massflöden m och den specifika värmekapaciteten c_p . Den nyttjade värmen Q kan vara antingen den avgivna värmen från den varma sidan Q_v eller värmen den kalla sidan har mottagit Q_k . Oftast väljer man $Q = Q_k$ då man vill veta hur mycket värme från den varma sidan som har värmt upp den kalla sidan.

Den teoretiska maximala värmeöverföringen \dot{Q}_{max} beräknas med den minsta värmekapaciteten och den största temperaturskillnaden ($T_{v,in} - T_{k,in}$). Den minsta värmekapaciteten C_{min} kan vara både C_v och C_k beroende på vilken av dem har minsta värdet. Ekvation 17 kan användas för att beräkna Q_{max} :

$$Q_{max} = C_{min}(T_{v,in} - T_{k,in}) \quad (17)$$

Ekvationerna 15, 16 och 17 ger ett enkelt uttryck för sambandet mellan NTU och effektiviteten. Effektivitet-NTU sambandet för en värmeväxlare med medström ges av ekvation 18:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+C_r)]}{(1+C_r)} \quad (18)$$

Där värmekapacitets förhållandet $C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$. Och för motströms värmeväxling är sambandet följande för $C_r < 1$ (ekvation 19):

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1-C_r)]} \quad (19)$$

Vid specialfallet där $C_r = 1$ kan sambandet förenklas till ekvation 20.

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1+NTU} \quad (20)$$

Det finns inget bestämt uttryck för effektivitet-NTU sambandet, sambandet är beroende på flödenas riktning, och vilken sorts värmeväxlare det är. (Incropera & Dewitt 2007) Detta samband ger grafer som i figur 2 som därmed medför information om hur en värmeväxlare ska designas.

¹ För härledning, se 4.6.3 The Effectiveness-Number of Transfer Units Method: ε -NTU Relations s.149-151 (McDonald & Magande, 2012)

2.3 Effektivitet-NTU metoden och logaritmiska medeltemperatur metoden

Två vanliga designproblem förekommer inom ofta vid värmeväxlardesign. Antingen är in- och ut-temperaturer bestämda och en värmeväxlare anpassad för det specifika arbetet ska designas. Alternativet är att använda en färdigbyggd värmeväxlare och man försöker reglera andra parametrar efter det önskade arbetet. De vanligaste metoderna som används när man ska designa värmeväxlare är logaritmiska medeltemperatur-metoden och effektivitet-NTU metoden. Oavsett vilken metod som väljs är det vanligt att använda den andra metoden för validering.

Logaritmiska medeltemperatur (LMTD) metoden används främst när det finns tillräckligt med uppgifter om värmeväxlaren för att kunna förutspå dess prestanda och beteende. Främst krävs det att alla fyra temperaturerna, totala värmeöverföringen samt överföringsarean är bestämda. Om någon av dessa uppgifter saknas kan de beräknas med energibalanser för den kalla och varma sidan som kräver att approximationerna under avsnitt 2.1.1 gäller för att kunna använda energibalanserna. Bland kraven ska kinetiska och potentiella energiförändringar kunna försummas, vilket innebär att LMTD metoden inte är lämplig för system som har fasövergångar. I de flesta designproblem är uttemperaturerna okända. Denna metod är inte heller effektiv att använda för att ta reda på uttemperaturerna när endast totala värmeöverföringen Q och in-temperaturerna är kända eftersom metoden ger en helhetsbild av systemets beteende med de kända värden. I dessa fall är det bättre att använda sig av effektivitet-NTU (ϵ -NTU) metoden.

ϵ -NTU metoden används främst för att förutspå uttemperaturerna när endast in-temperaturerna är givna. Oftast brukar materialegenskaper vara givna för ett bestämt medium som används i kalla och varma sidan. Det finns flera sätt att gå till väga med ϵ -NTU metoden. Ett sätt är att först beräkna ϵ och relativa värmekapaciteten $C_r = C_{min}/C_{max}$ som man sedan får ett uttryck för NTU som en funktion av dessa två parametrar. En fördel med ϵ -NTU metoden är att den kan ta hänsyn till fasövergångar. När ena sidans medium förångas blir C_{max} mycket större än C_{min} vilket ger $C_r \rightarrow 0$. När NTU är beräknad används den för att få värmeöverföringsarean för att bestämma storleken på värmeväxlaren (se ekvation 15). (Incropera & Dewitt 2007)

Ett annat sätt är att först beräkna NTU och C_r , därefter få ϵ som funktion av NTU ur ett likadant diagram. Med effektiviteten kan vi få ut den nyttjade värmelasten q , se ekvation 16. Båda uttemperaturerna kan då beräknas med ekvation 1 och 2. Värmeegenomgångstalet k kan beräknas med ekvation 4, och beroende på flödet om det är laminärt eller turbulent kan vi få värmeövergångstalet h hos respektive sida som därefter används för att få k som är en funktion h som i sin tur är beroende av tryckfallet dP/dL (tryckfall per längdenhet).

Både LMTD och ϵ -NTU metoden ger endast en helhetsbild av värmeväxlarens beteende men inte förhållanden inuti. (Incropera & Dewitt 2007)

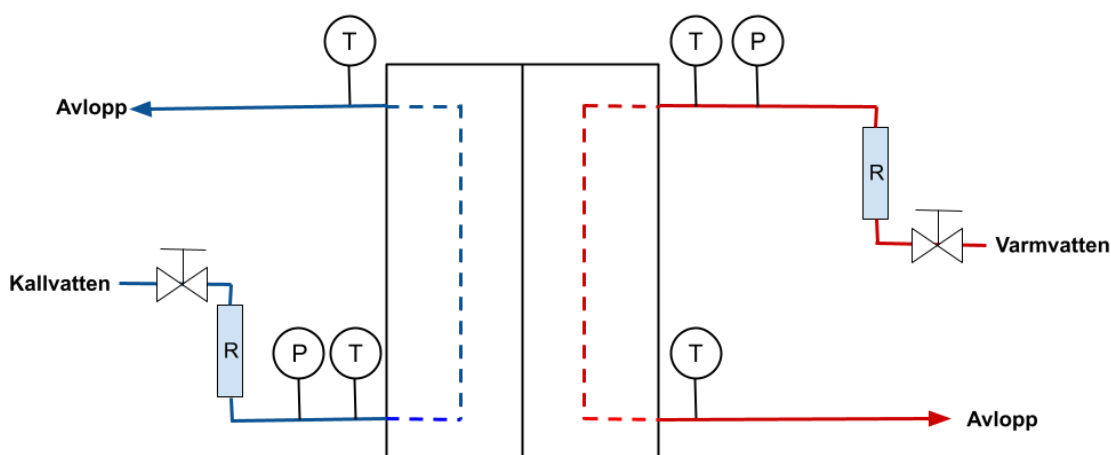
3 Material och metoder

För varje typ av plattvärmeväxlar-packning byggs en laborationsstation. I avsnitt 3.1 nämns material som användes och i avsnitt 3.2 beskrivs metoderna. Laborationen har modifierats för att anpassa till utrustning som redan fanns tillgängligt i institutionen.

3.1 Material

Uppställning/flödesschema

Ett flödesschema fanns i utgångsmaterialet



Figur 2. Flödesschema för uppställningen av laborationsstationen, T för temperaturmätare, P för tryckmätare, R är rotameter och ventiler emellan.

Material

Följande är material som användes med beskrivning:

- Värmeväxlare: Plattvärmeväxlare med tre olika packningar från Alfa Laval, Model M3-FG:
 - 2-pass M3 H-theta (H-kanal)
 - 1-pass M3 H-theta (H-kanal)
 - 1-pass M3 L-theta (L-kanal)

21 plattor per packning/värmeväxlare som har 0.032m^2 värmeöverföringsyta per platta.

H-kanal och L-kanal är två olika kanaltyper, H-kanalplattor har brantare kanaler än L-kanalplattor vilket också medför längre kanallängder i H-kanalplattor.

- Fluider: Varmvatten (ca $60\text{ }^\circ\text{C}$) och kallvatten (ca $10\text{ }^\circ\text{C}$) från kran.
- Termometer: Digitala som går att tejpa på.
- Flödesmätare: Rotameter

- Bordsvagn med hjul: Till för att ställa uppställningen (i figur 2) på.
- Våg: Som kan räkna i gram upp till 10kg
- Hink: 10 liter med handtag
- Tidtagare: Enkel digitalt tidtagarur (alt. tidtagarur i mobilen)

3.2 Metod

Utgångsmaterial

Metoden följde *Förslag till värmväxlarlaboration* av Matz Andersson (2017) som inspiration. Enligt förslaget kan man ha fyra stationer men vi fick tre värmväxlare med olika packning från Alfa Laval. Vi valde att köra alla tre stationer i motström. Detta är eftersom mätdata för den fjärde stationen med medström var avsedd för jämförelse med en likadan packning i motström vilket inte var en del av syftet för laborationen. Frågor som var mer relevant till en kurs, Transportprocesser KETF01, som läses innan denna kurs togs även bort. Därefter lades andra frågor till som är relevant till denna laborations syfte.

Test av laborationen

En av stationerna var uppsatt enligt figur 2 och testades. Utförande gjordes enligt laborationsförslaget och tiden för laborationsdelmomenterna noterades för att se till att den hela laborationsmomenten höll sig inom 2 timmars tidsspannen. Eftersom förslaget hade föreslagit en flödesmätare men det som användes här blev en rotameter behövdes en hink, tidtagare samt våg för att mäta maxflödet.

4 Resultat

Kandidatarbetet resulterade i tre uppbyggda laborationsstationer samt en laborationsbeskrivning. Bild på stationerna med en 2-pass H-kanal värmväxlare visas i figur 3, medan en 1-pass H-kanal och en 1-pass L-kanal värmväxlare visas i figur 4. Laborationsbeskrivningen finns som bilaga A.



Figur 3. Laborationsstation med en 2-pass H-kanal värmeväxlare kopplad i motström på en bordvagn.



Figur 4. Laborationsstationer, en med 1-pass H-kanal och en med 1-pass L-kanal värmeväxlare kopplad i motström på vars bordvagn.

5 Diskussion

Material

Det är möjligt att använda andra värmeväxlare som finns i marknaden. En bordsvagn är inte heller ett måste men det bidrar till en mer portabel station och därför föreslås det att ha en bordsvagn.

Istället för rotameter kan en flödesmätare ge en mer noggrann beräkning av flödet. Att mäta flödet med en hink och tidtagarur är enkelt, men det kan förekomma felkällor som tidtagningen, risk för vattenläcka och en felaktig våg. Men denna metod är bra att ha som en kontroll om flödesmätaren är korrekt.

Virtuell laboration

Om kursen ska läsas på distans kan en virtuell laboration varit ett bra alternativ. Själva utförandet av laborationen kan spelas in i en video och studenterna får hämta data genom att observera temperaturmätarna samt tryckmätarna. För att säkerställa att studenterna har tillräckligt med förkunskaper kan ett formulär användas. I formuläret kan det finnas frågor relaterat till utförandet av laborationen, exempelvis i vilken ordning laborationen ska utföras. Studenten måste svara formuläret korrekt för att få delta i laborationen. Kursansvarig får bestämma om laborationen ska utföras individuellt eller i grupp.

Utföra laborationen och ge ett lösningsförslag.

Som vidare utveckling av laborationsbeskrivningen skulle ett lösningsförslag vara en bra bas till laborationshandledarna att ha som referens. Detta moment hann inte bli utfört under kandidatarbetet på grund av Covid-19 pandemin.

6 Referenser

Alveteg, M. 2017, *Handbook, Physical properties, correlations and equations in chemical engineering*. Lund: MediaTryck.

Andersson, M. 2017, *Förslag till värmeväxlarlaboration*. Alfa Laval. Lund.

Incropera F. P. & Dewitt D. P. 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6: e upplaga, pp. 686–689. USA: John Wiley & Sons. ISBN: 9780471457282

Nilsson, B. 2018, *Transportprocesser, Föreläsningar*. Lund: MediaTryck.

McDonald A. G. & Magande H. L. 2012, *Introduction to Thermo-Fluids Systems Design*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 9781118313633.

Zhang L. Z. 2013, *Chapter 11 - Effectiveness-NTU Methods for Heat and Mass Transfer Processes.*, pp. 309-334, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407782-9.00011-3>

7 Bilagor

Bilaga A – Laborationsbeskrivning för *Laboration Värmetransport och NTU*

Energiteknik

Laboration

Värmetransport och NTU

Version 1.0

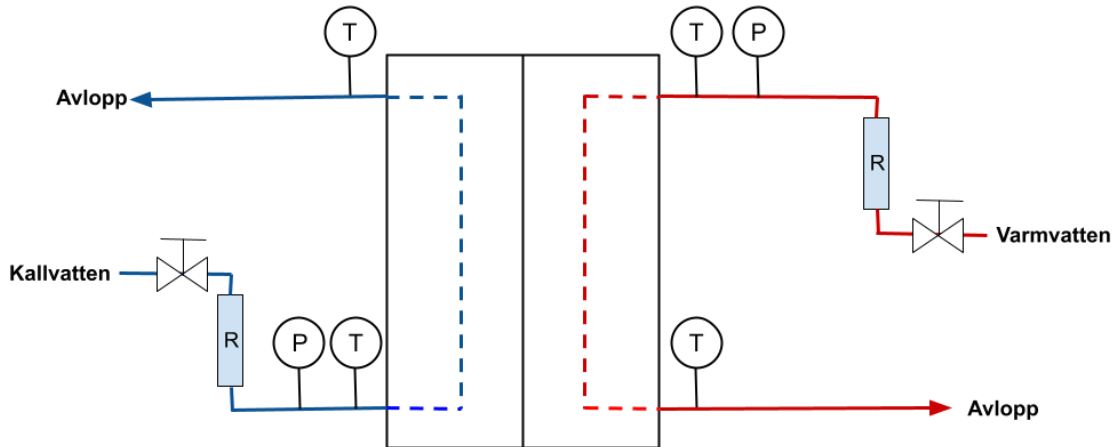
Institutionen för kemiteknik

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Uppställning:

T = termometer, P = tryckmätare, R = rotameter



Laborationen består av 3 olika stationer, varsin plattvärmväxlare med en sorts packning. I grupp om 3–4 studenter ska studenterna spendera cirka 30 min till att hämta data och fylla i tabeller för varje station.

Gör följande:

1. Öppna ventilerna och reglera rotameter helt för att mäta maxflödet. Flödet kan mätas genom att fylla en hink under en vald tid, t.ex. 10s, därefter väg hinken för att beräkna massflödet samt volymflödet. (Om flödesmätare används kan mätning av maxflöde skippas)
2. Välj tre rimliga flöden som ni vill mäta, (t.ex. $1 \text{ m}^3/\text{h}$, $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ och $2 \text{ m}^3/\text{h}$). Notera att välja flöden som är lägre än maxflödet.
3. Reglera rotameterna så att volymflödet hos både den kalla och varma sidan är lika. Börja med det lägsta volymflödet.
4. Fyll i tabellen.
5. Hög till nästa flöde och upprepa steg 3 och 4.
6. Stäng av ventilerna först, och vänta en stund tills flödet har slutat, därefter stryp rotametern. Detta görs för att undvika tryck i rören.
7. Gå till nästa station och börja med steg 1 igen.

Räkna ut de saknade uppgifter i tabeller under tiden. När gruppen har fyllt i tabellerna kan ni svara på frågorna som finns sist i häftet. Cirka 20 minuter innan laborationens slut kan grupperna samlas och ha en genomgång om frågorna.

V = vätskeflödet, T = temperatur, ΔP = tryckskillnad, $\overline{\Delta T}_{La}^a$ = logaritmiska temperaturen (LMTD), Q = värmeöverföring, k = värmegenomgångstal, NTU = termisk längd (number of transfer units) och ε = effektivitet.

Station 1

Packning:

Total värmeöverföringsyta A (m²):

V_{kall}				m ³ /h
V_{varm}				m ³ /h
$T_{\text{kall_in}}$				°C
$T_{\text{kall_ut}}$				°C
$T_{\text{varm_in}}$				°C
$T_{\text{varm_ut}}$				°C
ΔP_{kall}				kPa
ΔP_{varm}				kPa
$\overline{\Delta T}_{La}^a$				°C
Q				kW
k				kW/m ² ·°C
NTU				
ε				

Station 2

Flödestyp (motström/medström):

Total värmeöverföringsyta A (m²):

V_{kall}				m ³ /h
V_{varm}				m ³ /h
$T_{\text{kall_in}}$				°C
$T_{\text{kall_ut}}$				°C
$T_{\text{varm_in}}$				°C
$T_{\text{varm_ut}}$				°C
ΔP_{kall}				kPa
ΔP_{varm}				kPa
$\overline{\Delta T}_{La}^a$				°C
Q				kW
k				kW/m·°C
NTU				
ε				

Station 3

Flödestyp (motström/medström):

Total värmeöverföringsyta A (m²):

V_{kall}				m ³ /h
V_{varm}				m ³ /h
$T_{\text{kall_in}}$				°C
$T_{\text{kall_ut}}$				°C
$T_{\text{varm_in}}$				°C
$T_{\text{varm_ut}}$				°C
ΔP_{kall}				kPa
ΔP_{varm}				kPa
$\overline{\Delta T}_{La}^a$				°C
Q				kW
k				kW/m·°C
NTU				
ε				

Frågor:

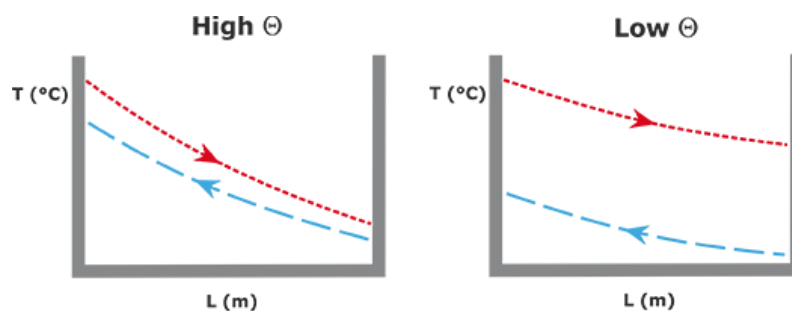
(OBS! Ta bort lösningsförslag stycket vid utskrift.)

Vilken station ger hög respektive låg NTU vid samma flöde, varför?

Antag kallvatten in är 10 °C. Det ger vid 15 m³/h NTU är värdena hos alla stationer: 2-pass H-kanal = 2,66, 1-pass H-kanal = 1,88, 1-pass L-kanal = 1,04 (kolla mätdata sida 5 i förslaget).

Att H-kanal har högre NTU är rimligt ty H-kanaler är brantare vilket gör att fluiden har längre väg (termisk längd) att passera i värmeväxlaren, detta resulterar i att fluiden stannar längre tid i värmeväxlaren (tänk att man slingrar runt en väg istället för att gå rakt fram).

Högre NTU värde innebär bättre värmeöverföring men kan också innebära lägre LMTD som är den drivande kraften till värmeöverföringen. Detta gör att värmeväxlare med hög NTU är svårare att bygga.



Figur². vänster Hög NTU, höger Låg NTU

Svar: 2-pass H-kanal har högst NTU värde medan 1-pass L-kanal har lägst.

Hur kommer värmegenomgångstalet (k) och tryckfallet (ΔP) variera när flödet ökar? (Välj en apparat/station)

Värmeöverföringstalet ökar med ökat flöde, detta kan förklaras med att LMTD ökar ty högre flöde medför att kalla sidan inte hinner bli värmd och den varma sidan inte hinner bli kyld tillräckligt och håller temperaturskillnaden mellan båda sidorna relativt stort i jämförelse med lägre flöden. Men detta innebär också att överförd värme per kilo fluid minskar.

² bild från <https://www.swep.net/refrigerant-handbook/1.-basic-heat-transfer/as1/>

Kolla s.81 i handboken (Alvetag, 2017). Om vi antar att friktionskoefficienten (f) är oberoende av massflödet, så kommer kanaltryckfallet vara proportionellt mot hastigheten i kvadrat. (Andersson, 2017)

$$\Delta P_{ch} = \frac{4 \cdot f \cdot L}{d_H} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

Jämför uppmätt data för de olika apparater och försök att förklara deras variation i tryckfall, värmegenomgångstal, värmelast och LMTD.

1.5 m ³ /h	1-pass L-Channels	1-pass H-Channel	2-pass H-Channel	
ΔP_{ch} hot/cold	2.4/3.1	8.1/10.4	63.1/78.2	kPa
$T_{out,cold}$	28.9	33.5	36.1	°C
LMTD	18.1	12.5	9.8	°C
U-value	2047	4219	6267	W/m ² ·°C
U-LMTD	37050	52740	61420	W/m ²

Tryckfallet:

Högre i en H-kanal jämfört med en L-kanal vid samma flöde. H-kanalen är mer ”snirkliga” och får högre tryckfall (ΔP) och även bättre värmeöverföringstal (h). Tryckfallet ökar ungefär med flödet i kvadrat (se ekvation nedan). Jämför man 1-pass H-kanal mot 2-pass H-kanal, så kommer tryckfallet öka ungefär åtta gånger. Dels blir hastigheten (u) i kanalen dubbelt så hög (vi har samma totalflöde som ska gå i hälften så många kanaler) och dels är den totala kanallängden (L) (eftersom den går i två pass) som vätskan ska gå den dubbla (ty dubbelkanal). (Nu har vi antagit att Fannings friktionsfaktor (f) är oberoende av flödet).

$$\Delta P_{ch} = \frac{4 \cdot f \cdot L}{d_H} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

Värmegenomgångstalet (k):

Värmeövergångstalet (h) kommer att öka från 1-pass L-kanal, till 1-pass H-kanal och högst kommer 2-pass H-kanal att vara. Att den är högre i H-kanalen än i L-kanalen, är som ovan att man har mer turbulens och därmed lägre filmmotstånd (1/h). Värmeöverföringstalet (h) är en funktion av skjuvkraften (τ) mot väggarna (kunskap från transportprocesser). Eftersom man har högre dP/dL i H-kanalen, så är även värmeöverföringstalet (h) högre. Hade man haft samma hastighet i kanalerna på 1-pass H-kanal och 2-pass H-kanal, så skulle man få samma värmeöverföringstal (h). Men nu har man dubbla hastigheten i 2-pass apparaten och det innebär att skjuvkrafterna (τ) är det som

orsakar tryckfall (friktion) och tryckfallet går upp och därmed också värmeöverföringstalet (h) (högre hastighet håller en större delta T som är drivkraften till värmeöveringen).

Nu har jag bara talat om värmeöverföringstalet (h), medan eleverna har mätt upp värmegenomstalet (k). Men jag antar att de kan sambandet mellan dem.

Eftersom värmegenomgångstalet ökar, så kommer även värmelasten Q öka i ordningen: 1-pass L-kanal, 1-pass H-kanal och 2-pass H-kanal, även om LMTD minskar. Detta beroende på att produkten $k \times \text{LMTD}$ är större ($Q = k \cdot A \cdot \text{LMTD}$).

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_{in}} + \sum \frac{b_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_{ut}}$$

Eftersom värmelasten ökar enligt ovan, så kommer den drivande kraften LMTD att gå åt andra hållet. (Andersson, 2017) LMTD är störst hos 1-pass L-kanal och minst hos 2-pass H-kanal.

Vad är det teoretiska förhållandet mellan kanaltryckfall och flödet?

Kolla i Handbook, Physical properties, correlations and equations in chemical engineering av Alvetag (2017) s.81.

Högre i en H-kanal jämfört med en L-kanal vid samma flöde. H-kanalen är mer ”snirklare” och får högre tryckfall (ΔP) och även bättre värmeöverföringstal (h). Tryckfallet ökar ungefär med flödet i kvadrat (se ekvation nedan). Jämför man 1-pass H-kanal mot 2-pass H-kanal, så kommer tryckfallet öka ungefär åtta gånger. Dels blir hastigheten (u) i kanalen dubbelt så hög (vi har samma totalflöde som ska gå i hälften så många kanaler) och dels är den totala kanallängden (L) (eftersom den går i två pass) som vätskan ska gå den dubbla (ty dubbelkanal). (Nu har vi antagit att Fannings friktionsfaktor (f) är oberoende av flödet). (Andersson, 2017)

$$\Delta P_{ch} = \frac{4 \cdot f \cdot L}{d_H} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

Vilka andra tryckfall än kanaltryckfallet kan man ha? (Repetition från Transportprocesser)

Förutom kanaltryckfallet, så har man ofta ett porttryckfall i ingående port och utgående port. Om anslutningen har en annan diameter än porten, så får man även ett engångsmotstånd i form av en expansion och en kontraktion. (Andersson, 2017)

Om man har samma tryckfall för 1-pass H-kanal och 1-pass L-kanal, hur stor är skillnaden i värmeomgångstalet mellan dem?

Grovt kan man säga att man får ungefär samma värmeöverföringstal (h).

Värmeöverföringstalet är en funktion av dP/dL och använder du samma tryckfall, så ligger de nära. Däremot så kommer man behöva en mycket högre flöde i kanalen hos L-kanal för att få detta värmeöverföringstal och det innebär att överför värme per kilo fluid blir lägre. Detta innebär att kanalen för ett lägre NTU pga lägre värmelast. (Andersson, 2017)

Jämför 1-pass H-kanal och 1-pass L-kanal vid samma flöde. Varför har man olika kanaltyper?

En plattkanal har en specifik termisk längd (NTU). Det innebär att den passar till uppgifter som har just den termiska längden. Men eftersom uppgifter kan ha alla möjliga NTU, så måste man ha värmväxlare med olika NTU. För plattor varierar man plattans längd, vidd, kanaldjupet, och pilvinkel i fiskbensmönstret. H-kanalen har ett högre NTU än L-kanalen. Man kan även blanda olika kanaler i ett paket, för att få varierande NTU. (Andersson, 2017)

Jämför med den klassiska LMTD metoden med effektivitet-NTU metoden, vilka information missar man om man använder endast en av dem?

Målet med dessa metoder är för att få information av storleken på värmväxlaren för att den ska kunna utföra det arbetet som önskas.

LMTD metoden är bra att använda när alla fyra temperaturerna är kända. Om någon av dem inte är det får man räkna ut med hjälp av energibalans. Dock används metoden efter vissa antaganden. Oftast behöver alla fyra temperaturer vara kända också. När uttemperaturerna är okända så kan det vara svårt att använda LMTD metoden och i dessa fall är det bra att använda sig av effektivitet-NTU metoden istället.

Nu använde vi logaritmiska temperaturen för att enkelt beräkna NTU, antag uttemperaturerna är okända, hur kan man beräkna NTU? Vad ska man tänka på?

Vi kan använda oss av definitionen för $NTU = k \cdot A / (m \cdot c_p)_{\min}$.

Vi kan utnyttja effektivitet-NTU metoden. Effektiviteten kan bestämmas av kunden efter vad som önskas. För motström gäller $\varepsilon = NTU / (1 + NTU)$ om vi antar att $C_r = 1$. Detta ger oss en

graf av ε -NTU. NTU kan alltså uttryckas som en funktion av ε där $\varepsilon = q/q_{max} = C_k(T_{ut,k} - T_{in,k}) / (C_{min}(T_{in,v} - T_{in,k}))$.

Vad är fördelar samt nackdelar med effektivitet-NTU metoden?

ε -NTU metoden kan ta hänsyn till fasövergång och hitta samband till uttemperaturerna. Metoden ger en grafisk lösning med effektivitet-NTU kurvor för den undersökta värmeväxlarens prestation. Om det är design kan man få ut värmeöverföringsarean ur NTU värdet med bestämd prestation. Om det är prestation kan man få ut effektiviteten med bestämda NTU värden. En nackdel är att metoden kräver att man hittar rätt samband beroende på flödestypen.