



LUND UNIVERSITY

Verkningsgrader vid regenerativ värmväxling

Jensen, Lars

2012

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, L. (2012). *Verkningsgrader vid regenerativ värmväxling*. (TVIT; Vol. TVIT-7074). Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Verkningsgrader vid regenerativ värmeväxling

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2012
Rapport TVIT--12/7074



Verkningsgrader vid regenerativ värmeväxling

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2012
ISRN LUTVDG/TVIT--12/7074--SE(45)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 LUND

Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Innehållsförteckning

1 Inledning och problemställning	5
2 Beräkningsmodell	7
3 Undersökning av olika utetemperatur	9
4 Undersökning av olika frånluftstemperatur	13
5 Undersökning av olika flödeskvot	17
6 Undersökning av olika rotorhastighet	21
7 Undersökning av olika lufthastighet	25
8 Undersökning av olika rotorlängd	29
9 Undersökning av olika antal element	33
10 Undersökning av rotoruppfuktning	37
11 Sammanfattning och slutsatser	45

1 Inledning och problemställning

Syftet med denna arbetsrapport är att komplettera två tidigare arbetsrapporter TVIT-7006 Roterande värmeväxlare och TVIT-7048 Fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling. Den första arbetsrapporten undersökte temperaturverkningsgraden för regenerativ värmeväxling för det normala motströmsfallet och det något udda medströmsfallet. Den andra arbetsrapporten undersökte enbart fuktöverföring för regenerativ värmeväxling med motström.

Undersökningarna visade att det för medströmsvärmeväxling finns ett beräkningsbart varvtal som ger högst temperaturverkningsgrad samt att temperaturverkningsgraden kan bli högre än 0.5 för fallet med lika stora flöden, vilket inte gäller för rekuperativa värmeväxlare med medström med lika stora flöden. Temperaturverkningsgraden för motströmsfallet är alltid större än för medströmsfallet och ökar med varvtalet och därför är högsta möjliga varvtal bäst om renblåsning slopas och överföring tillåts. Den lägre temperaturverkningsgraden för medströmsfallet är en nackdel, men varvtalet är betydligt lägre än för motströmsfallet. Det medför mindre slitage och renblåsning. Medströmsvärmeväxling innebär mindre tryckskillnader och därmed mindre läckage. Växling från motströmsdrift till medströmsdrift kan vara ett sätt att minska fuktöverföringen, rotoruppfuktning och påfrysning.

Kompletteringen är därför att även undersöka fuktöverföring för medströmsfallet och samtidigt genomräkna motströmsfallet för samma parameterfall som en jämförelse. Verkningsgrader för temperatur, vatteninnehåll och entalpi beräknas för både tilluft och avluft. Rotoruppfuktningen bestäms, undersöks och redovisas också i ett avsnitt.

Alla beräkningar i denna arbetsrapporten utgår från ett basfall för en rotorvärmeväxlare. Basfallet avser endast en del av en rotorvärmeväxlare, nämligen en enda rotorkanal. Rotorns storlek har därför ingen betydelse. Rotorkanalens geometri är förenklad till ett cylindriskt rör med samma kontaktyta mellan luft och material som för den verkliga geometrin. Rörets godstjocklek anpassas för att rotorns massa skall bli den samma som för den verkliga rotorn. Rörets godstjocklek halveras i modellberäkningen, eftersom rotorkanalväggen delas mellan två rotorkanaler. Antalet axiella beräkningselement är 100 för basfallet.

Basfallets data är följande rotorkanallängd 200 mm, rotorkanaldiameter 2 mm, godstjocklek 0.05 mm, material aluminium, lufthastighet 2 m/s, värmeövergångstal 40 W/Km^2 och varvtid 6 s för motströmsfallet och 20 s för medströmsfallet. Varvtiden för medströmsfallet anpassas för att nå högsta temperaturverkningsgrad, vilket beskrivs med ett uttryck (2.5) i avsnitt 2.

Basfallets uteklimat är $0 \text{ }^\circ\text{C}$ och 3.5 g/kg samt frånluftstemperatur är $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Frånluftens vatteninnehåll är den oberoende variabeln i samtliga redovisade diagram, Den varierar från uteluftens vatteninnehåll ökat med 0.5 g/kg upptill 14 g/kg och i steg om 0.5 g/kg . Mättnadsvärdet är 14.7 g/kg vid temperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Modellen som beskrivs i avsnitt 2 utgår från en kanal i en regenerativ värmeväxlare, vilken modelleras med fyra tillståndsekvationer för luftens temperatur och vatteninnehåll, rotorns temperatur och vatteninnehåll under en halv period med uteluft och en halv period med frånluft. Det finns ingen renblåsning. Detta är fallet för många mindre aggregat för ett hushåll.

Modellen undersöks i avsnitt 3-9 med avseende på sju variablers betydelse för de tre verkningsgraderna. Variablerna är uteklimat, frånluftstemperatur, flödeskvot mellan tilluft och frånluft, rotorhastighet, lufthastighet, rotorlängd och antal beräkningselement enligt sammanställningen nedan. Temperaturverkningsgrad, fuktverkningsgrad och entalpiverkningsgrad för tilluft och avluft beräknas och redovisas på samma sätt för de sju delstudierna med medström överst och motström nederst i samma Figur 3-9.1-3.

• utetemperatur	-5, 0, 5, 10 °C	avsnitt 3	sid 9
• frånluftstemperatur	20, 22, 24 °C	avsnitt 4	sid 13
• flödeskvot	1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6	avsnitt 5	sid 17
• varvtid	6, 12, 15, 20, 30 s	avsnitt 6	sid 21
• lufthastighet	1, 2, 3, 4 m/s	avsnitt 7	sid 25
• rotorlängd	100, 200, 300, 400 mm	avsnitt 8	sid 29
• antal element	10, 20, 50, 100	avsnitt 9	sid 33

Rotoruppfuktningens grad lika med skillanden mellan fuktverkningsgrad för avluft och tilluft undersöks och redovisas i avsnitt 10 för samma fall som i sammanställningen ovan. Rotoruppfuktningens grad används för att skatta rotorfyllningsgraden. Sammanfattning och slutsatser ges sist i avsnitt 11.

Det finns två gränsvärden som berör uppfuktning och fukthalt i rumsluft. Uppfuktningen av rumsluft bör inte regelmässigt överstiga 2.5 g/kg (3 g/m³) vintertid enligt SOSFS 1999:25. Vatteninnehållet i rumsluft skall heller inte överstiga 7 g/kg under längre tid vintertid enligt SOSFS 1999:21, vilket för temperaturen 21 °C motsvarar en relativ luftfuktighet om 0.45.

Linjen 7 g/kg finns inritad i samtliga diagram. Det finns också linjer för relativ luftfuktighet från 0.3 till 0.9 i steg om 0.1 för frånluftens vatteninnehåll vid temperaturen 20 °C.

2 Beräkningsmodell

En fysikalisk modell kan formuleras som följer under följande förutsättningar. En rotorkanal beskrivs som ett cylindriskt rör med en given längd, en given innerdiameter, en given godstjocklek och ett givet material. Genomströmningen sker med uteluft och frånluft växelvis och i motström eller medström för en given varvtid med samma lufthastighet utan renblåsning.

Värmeledning i rotorn har försummats. Rotorn är en ren metallrotor. Vattnets ackumulering i rotorn har också försummats. Vattenfilmens tjocklek påverkar inte heller rotorkanaldiametern. Frysning och smältning beskrivs inte av modellen. Felet uppskattas att vara litet. Ångbildningsvärmets är flera gånger större än det tillkommande smältvärmets.

Rotorkanalen följs under ett helt varv för att bestämma olika verkningsgrader. Det finns två temperaturverkningsgrader, en för tilluft och en för avluft. Samma sak gäller även för vatteninnehåll och värmeinnehåll eller entalpi. Fuktverkningsgraden kan även beräknas med hjälp av rotorns ändring i vatteninnehåll under ett halvvarv under förutsättning att det inte sker någon ackumulering av vatten i rotorn. Rotormodellens grundparametrar är följande:

c	c_r	specifikt värme luft och rotor, J/kgK
d		rotorkanaldiameter, m
h		värmeövergångstal, W/Km ²
l		rotorkanallängd, m
n		antal element, -
r		ångbildningsvärme, J/kg
t		rotorns godstjocklek, m
v		strömningshastighet, m/s
ρ	ρ_r	densitet luft och rotor, kg/m ³

Grundparametrarna bildar en del hjälpparametrar och variabler enligt nedan:

$dz = l/n$	(m)	rotorelementlängd
$a = \pi d^2/4$	(m ²)	rotorkanaltvärsnittsyta
$A = \pi d dz$	(m ²)	rotorelementkontaktyta
$V = a dz$	(m ³)	rotorkanalvolym
$C = \rho c V$	(J/K)	värmekapacitet för kanalvolym
$C_r = \rho_r c_r A t/2$	(J/K)	värmekapacitet för rotorvolym
$q = \rho a v$	(kg/s)	luftflöde
$x_m = f(T_r)$	(kg/kg)	mättat rotorvatteninnehåll
$P = Ah(T_r - T)$	(W)	värmeeffekt till luft från rotor
$Q = Ah(x_m - x)/c$	(kg/s)	vattenflöde till luft från rotor

Två värmebalansekvationer (2.1-2) anges för varje rotorelements luftmassa och rotormassa. En balansekvation (2.3) anges för vatteninnehållet i rotorluften. En massbalansekvation (2.4)

anges för rotorns vattenmassa. Vektorbeteckningarna T , x , T_r och m används för rotorkanal-luftens temperatur och vatteninnehåll, rotortemperatur respektive rotorvatten. Rotorns temperatur T_r bestämmer vatteninnehållets mättnadsvärde x_m med en tredjegradsfunktion av rotorns temperatur. De fyra differentialekvationerna för rotorns fyra tillstånd lufttemperatur, vatteninnehåll, rotortemperatur och rotorvatten redovisas nedan där alla derivator skrivs förenklat som da/db .

$$dT/dt = (P - c q dT/dz) / C \quad (^\circ\text{C/s}) \quad (2.1)$$

$$dT_r/dt = (- P - r Q) / C_r \quad (^\circ\text{C/s}) \quad (2.2)$$

$$dx/dt = (Q - q dx/dz) / \rho V \quad (\text{kg/kgs}) \quad (2.3)$$

$$dm/dt = - Q \quad m > 0 \quad (\text{kg/s}) \quad (2.4)$$

De två axiella derivatorna dT/dz i (2.1) och dx/dz i (2.3) beräknas med uppströmsvärden, vilket för in de två inflödenas temperatur och vatteninnehåll växelvis för varje halvperiod. Lösningen av (2.1-4) sker med en enkel framåtdifferensmetod med relaxationsfaktorn 0.5. Utflödenas värden extrapoleras med de två yttersta elementen fram till rotorns kant. Viktningen är 1.5 och -0.5 för det yttersta respektive det näst yttersta elementet. Beräkningarna omfattar tio hela varv och de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för tilluft och avluft beräknas för det tionde varvet. Beräkningarna sker med vatteninnehåll med den rätta sorten kg/kg för att undvika fel, medan all redovisning i diagram sker med den mer hanterbara sorten g/kg.

Bästa varvtid för medströmsfallet som ger högst temperaturverkningsgrad bestäms med kravet att rotorns värmelagringsförmåga skall vara lika med luftflödets värmeöverföringsförmåga under ett halvt varv. Uttrycket blir efter förenkling med tidigare givna parametrarna:

$$p = 4 \rho_r c_r l t / \rho c d v \quad (\text{s}) \quad (2.5)$$

Basfallets varvtid för medström blir 20.25 s, vilket avrundas till 20 s. Rotorlängd l och luft-hastighet v undersöks för värdena 100, 200, 300 och 400 mm samt 1, 2, 3 och 4 m/s, vilket ger varvtiderna 10, 20, 30 respektive 40 s samt 40, 20, 13.3 (40/3) respektive 10 s för medström.

Fuktöverföringen består av direkt överföring, eftersom renblåsning saknas, och den indirekta överföringen genom växelvis kondensering och förångning. Den direkta överföringen a är kvoten mellan genomblåsningstid l/v och tiden för ett halvt varv $p/2$, vilket blir:

$$a = (l/v) / (p/2) = 2 l / p v \quad (\text{s}) \quad (2.6)$$

Den direkta kondensfria överföringen för basfallet är 0.01 (0.1/10) för medström och 0.033 (0.1/3) för motström. Överföringen är alltid 0.01 för medström, eftersom $p v / l$ enligt (2.5) är konstant $4 \rho_r c_r t / d$ för de parameterfall som undersöks. Rotorlängd l och luft-hastighet v undersöks för värdena 100, 200, 300 och 400 m samt 1, 2, 3 och 4 m/s, vilket för motström enligt (2.6) ger överföringen 0.017, 0.033, 0.050 respektive 0.067 samt 0.067, 0.033, 0.022 respektive 0.017. Den direkta kondensfria överföringen kan alltid läsas av som fuktverknings-graden för lågt vatteninnehåll för frånluften i samtliga diagram Figur 3-9.2.

3 Undersökning av olika utetemperatur

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft beror på uteklimatet med följande fyra par för temperatur och vatteninnehåll $-5\text{ °C}:2\text{ g/kg}$, $0\text{ °C}:3.5\text{ g/kg}$, $5\text{ °C}:5\text{ g/kg}$ och $10\text{ °C}:7\text{ g/kg}$ och frånluftens vatteninnehåll upptill 14 g/kg . Genomräkningar har skett med basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll och given frånluftstemperatur 20 °C .

En viktig anmärkning är att modellen inte tar hänsyn till isbildning i rotor utan endast kondensation och avdunstning. Fallet med utetemperatur -5 °C får mer ses som ett test.

Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entalpiverkningsgrad η_h redovisas i Figur 3.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 3.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1 i steg om 0.1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 3.1-3.

Tilluftsverkningsgraderna numreras 1-4 i samtliga diagram för de fyra uteklimatfallen. Avluftsverkningsgraderna märks däremot inte.

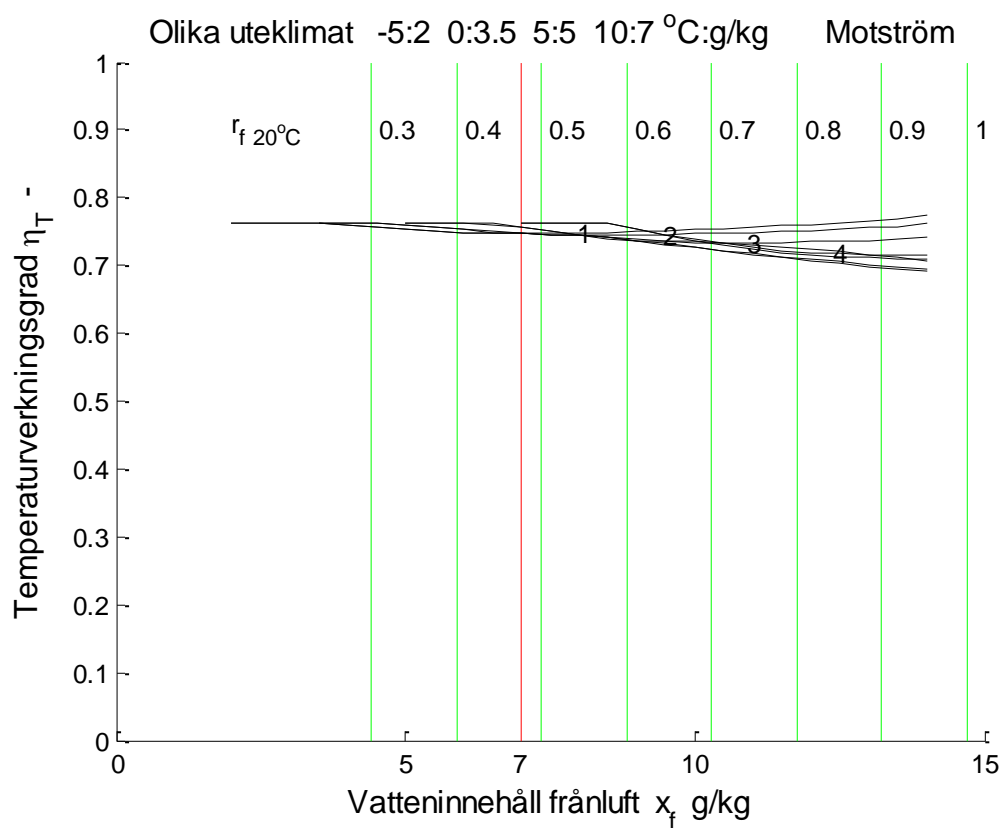
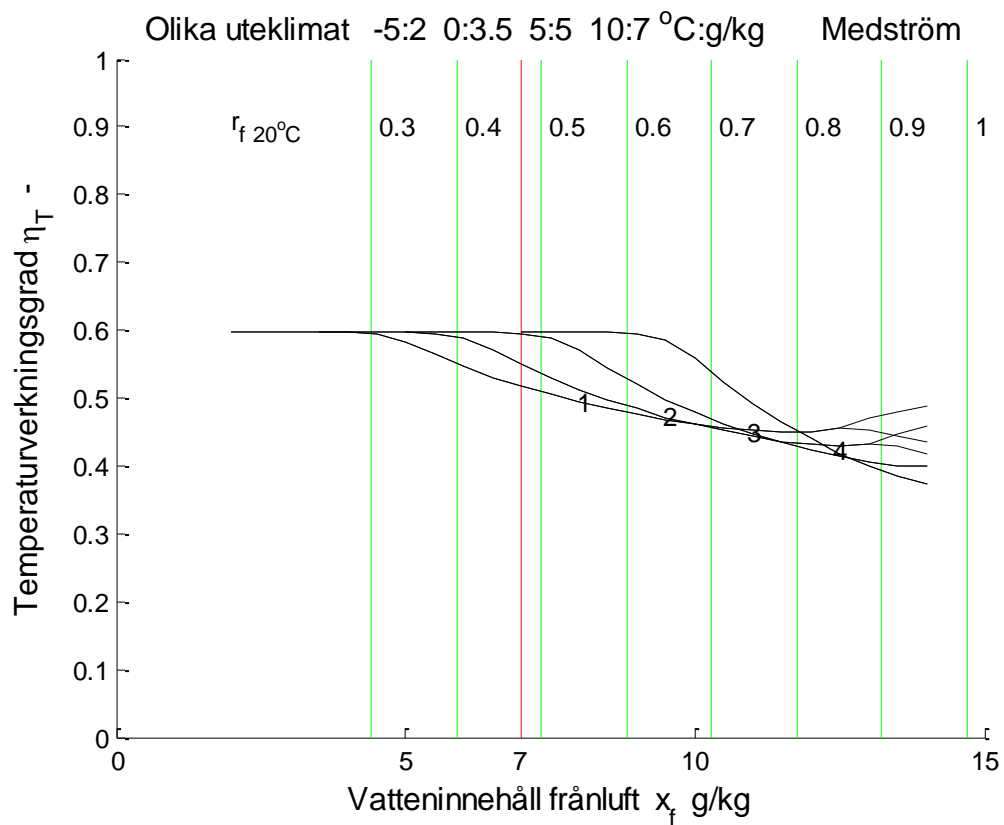
Kurvorna i Figur 3.1 visar att temperaturverkningsgraden för motströmsfallet är nästan oberoende av uteklimatet och frånluftens vatteninnehåll, medan medströmsfallet påverkas påtagligt.

Fuktverkningsgraden i Figur 3.2 är starkt beroende av uteklimatet både för medström och motström de fyra uteklimaten.

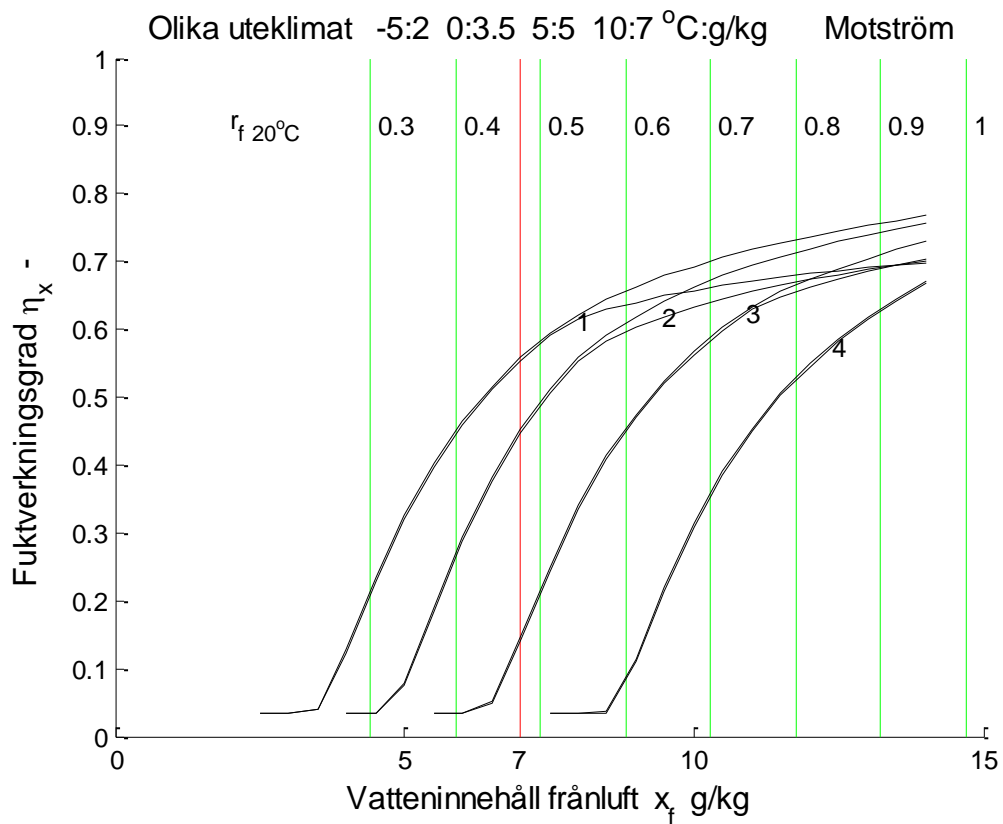
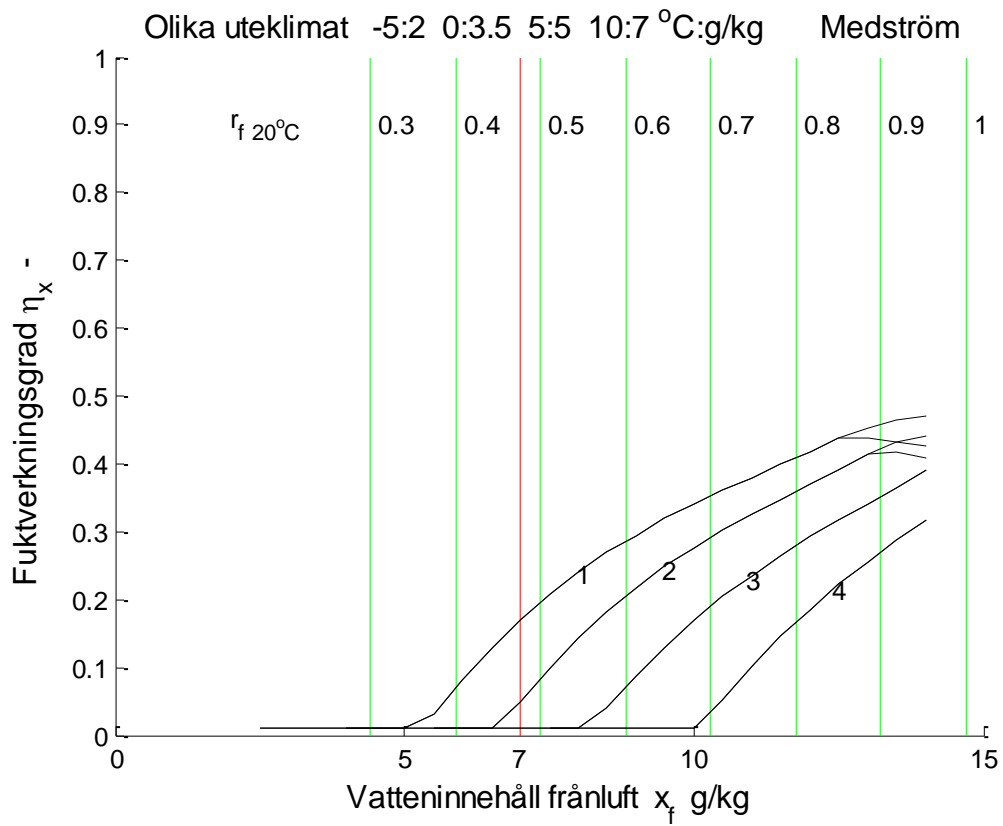
Entalpiverkningsgraden i Figur 3.3 visar att entalpin är en funktion av både temperatur och vatteninnehåll. Entalpiverkningsgraden avtar först med ökande vatteninnehåll för frånluften och ökar därefter med ökande vatteninnehåll för frånluften. Nergången beror på att fuktverkningsgraden är nästan noll för lågt vatteninnehåll för frånluften. Luftens energiinnehåll eller entalpi beror på både temperatur och vatteninnehåll. Frånluftens entalpi ökar med ökande vatteninnehåll.

En observation är att fuktverkningsgraderna i Figur 3.2 är större än noll även för helt kondensfria fall med låga frånluftsvatteninnehåll. Förklaringen är att det finns inte någon renblåsning och överföringen kan räknas om till fuktverkningsgrad enligt (2.6). Basfallets genomblåsningstid är 0.1 s (0.2 m och 2 m/s). Tiden för ett halvvarv är 3 s för motström och 10 s för medström, vilket ger överföringen och verkningsgraden 0.033 för motström och 0.01 för medström.

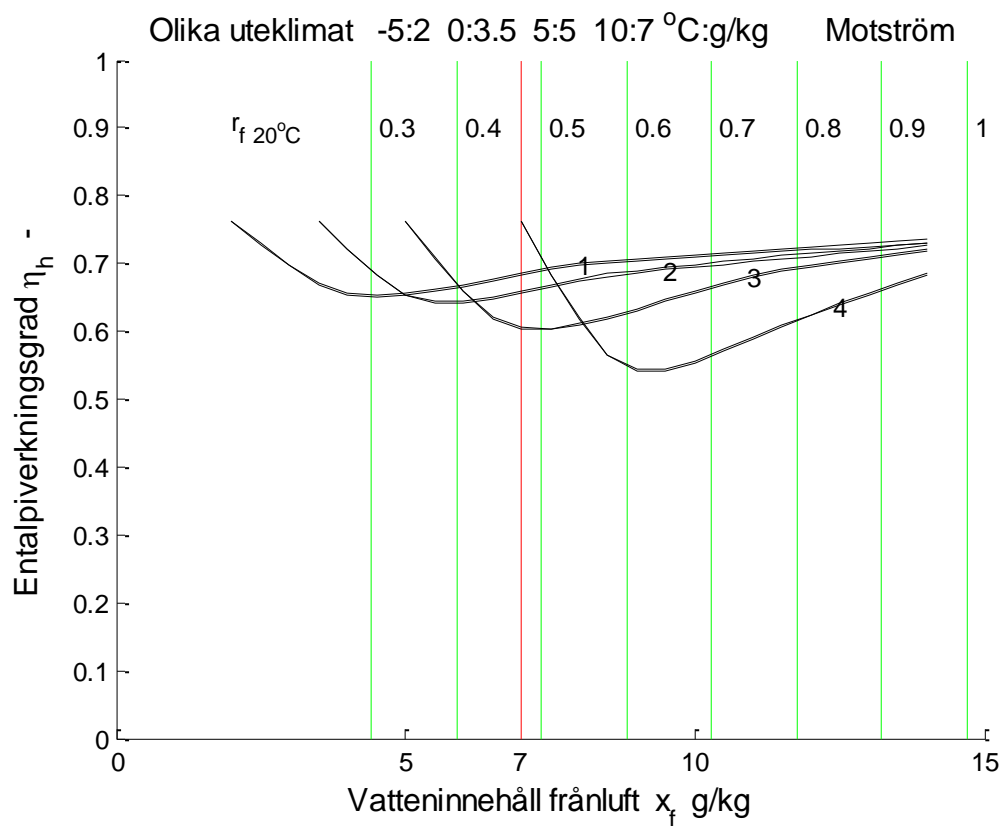
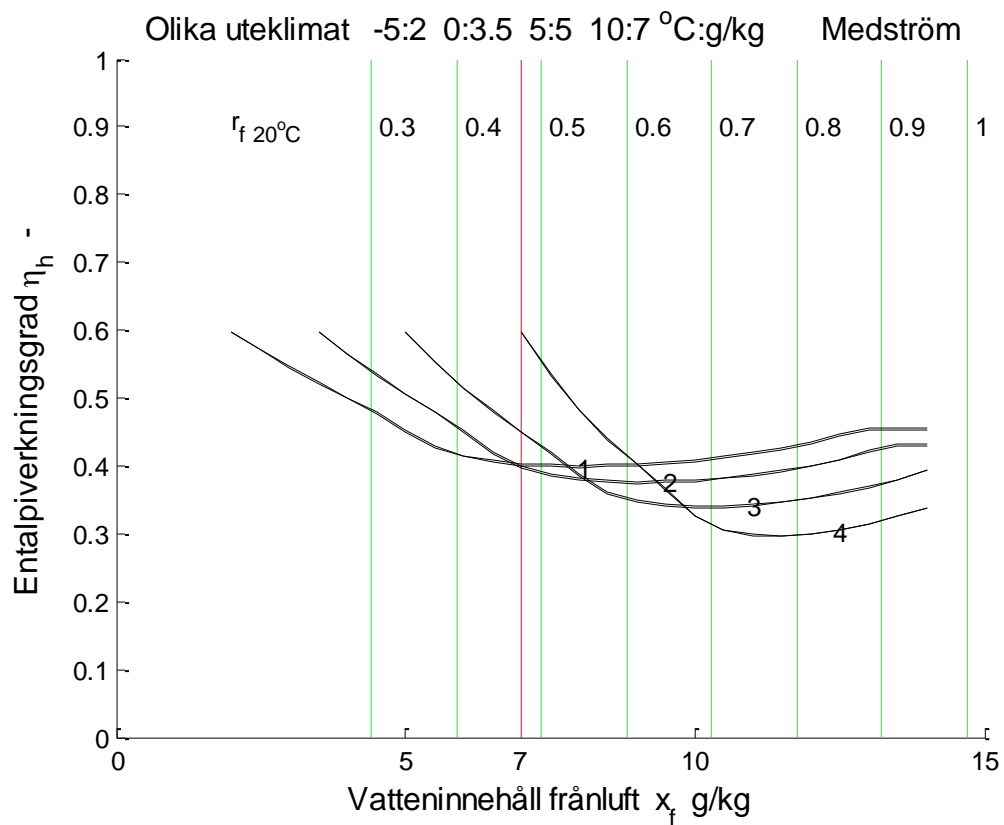
En annan observation är att fuktverkningsgraderna för tilluft är mindre än för avluft, vilket innebär att rotern fuktas upp. Detta undersöks mer i detalj i avsnitt 10.



Figur 3.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



Figur 3.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



Figur 3.3 Entalpiverkningsgrad η_h - som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.

4 Undersökning av olika frånluftstemperatur

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft beror på olika frånluftstemperatur 20, 22 och 24 °C för samma uteluftstillstånd 0 °C:3.5 g/kg. Genomräkningar har skett med basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll. Basfallets frånluftstemperatur är 20 °C.

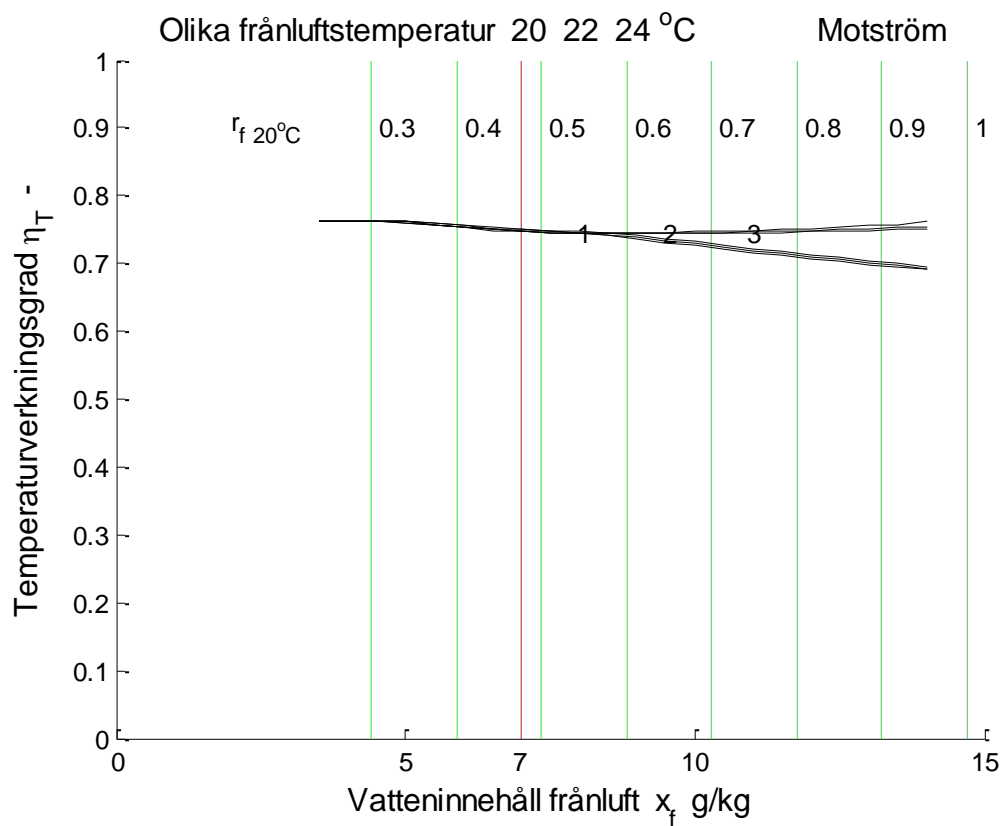
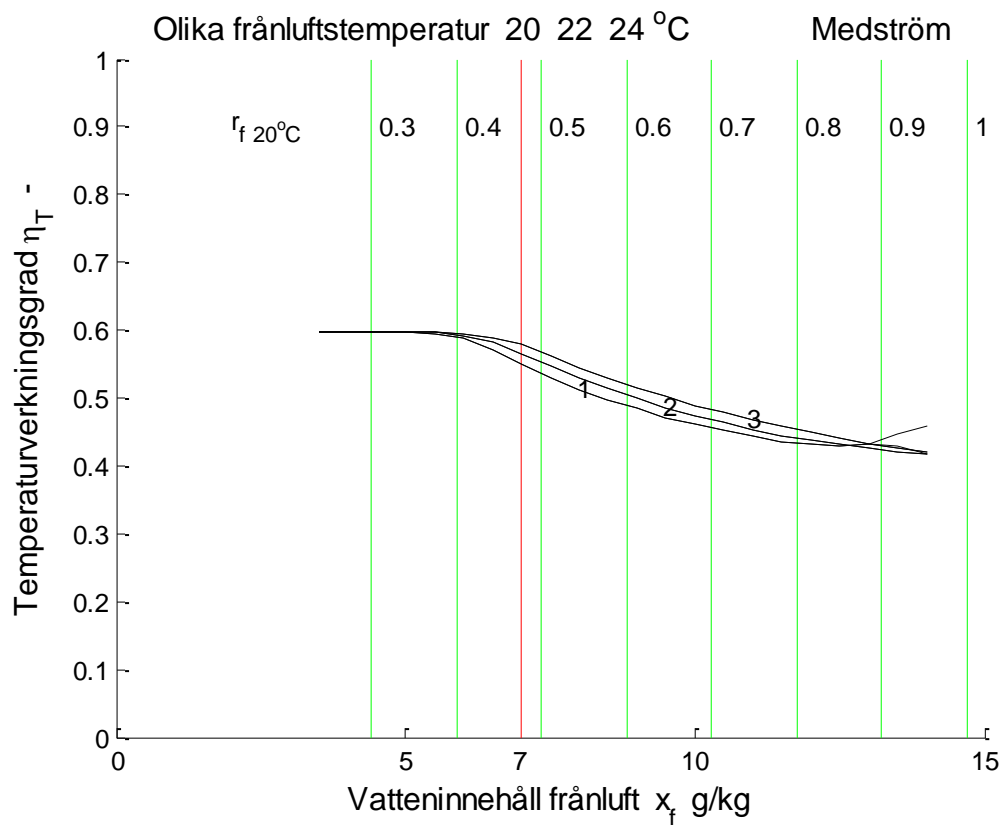
Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entalpiverkningsgrad η_h redovisas i Figur 4.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 4.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1 i steg om 0.1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 4.1-3.

Tilluftsverkningsgraderna numreras 1-3 i samtliga diagram för de tre frånluftstemperaturfallen. Avluftsverkningsgraderna märks däremot inte.

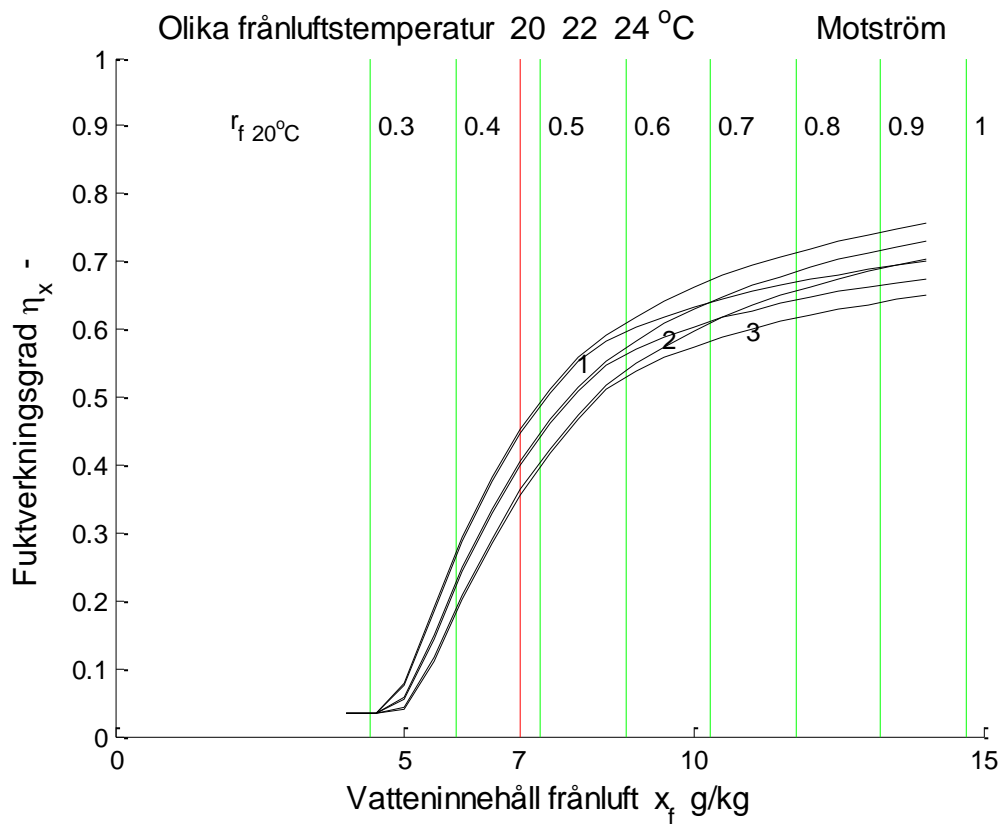
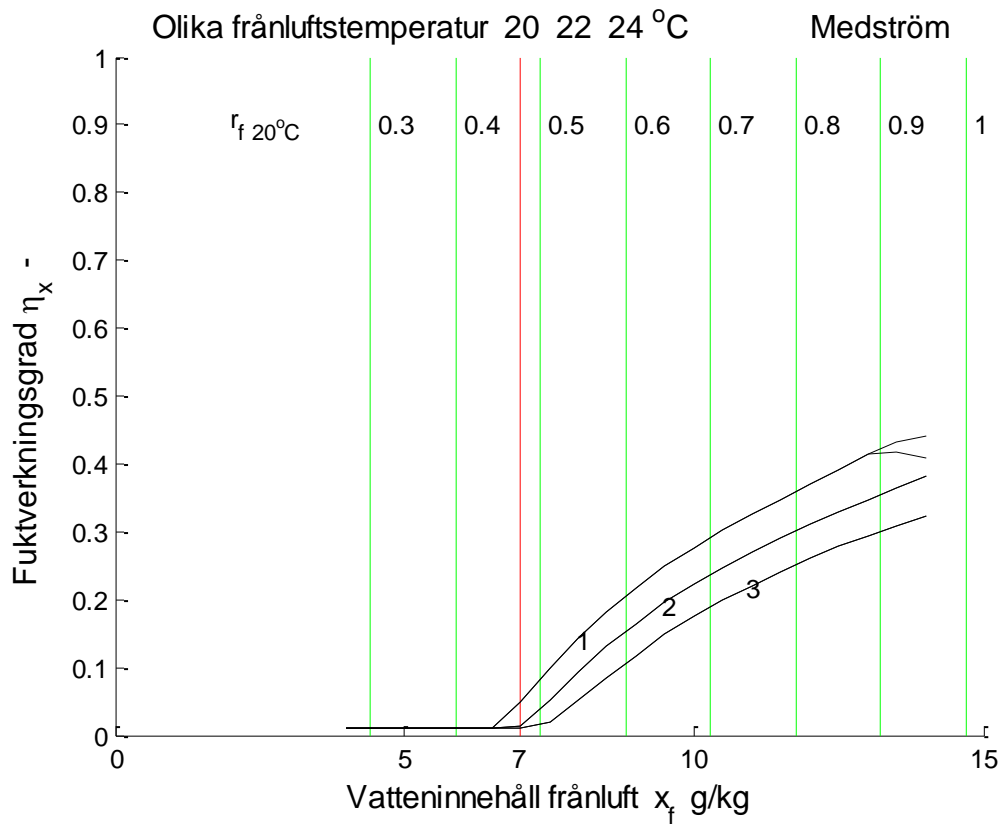
Kurvorna i Figur 4.1 visar att temperaturverkningsgraden för meströmsfallet är nästan oberoende av uteklimatet och inneklimatet, medan medströmsfallet påverkas något med fallande temperaturverkningsgrad.

Fuktverkningsgraden i Figur 4.2 avtar något med ökande frånluftstemperaturen av frånluftens vatteninnehåll. Slutsatsen är att en högre frånluftstemperatur minskar fuktverkningsgraden och därmed också fuktåtervinningen. Temperaturskillnaden mellan frånluftstemperatur och dagpunktstemperatur ökar med ökande frånluftstemperatur, vilket ökar den torra värmväxlingen.

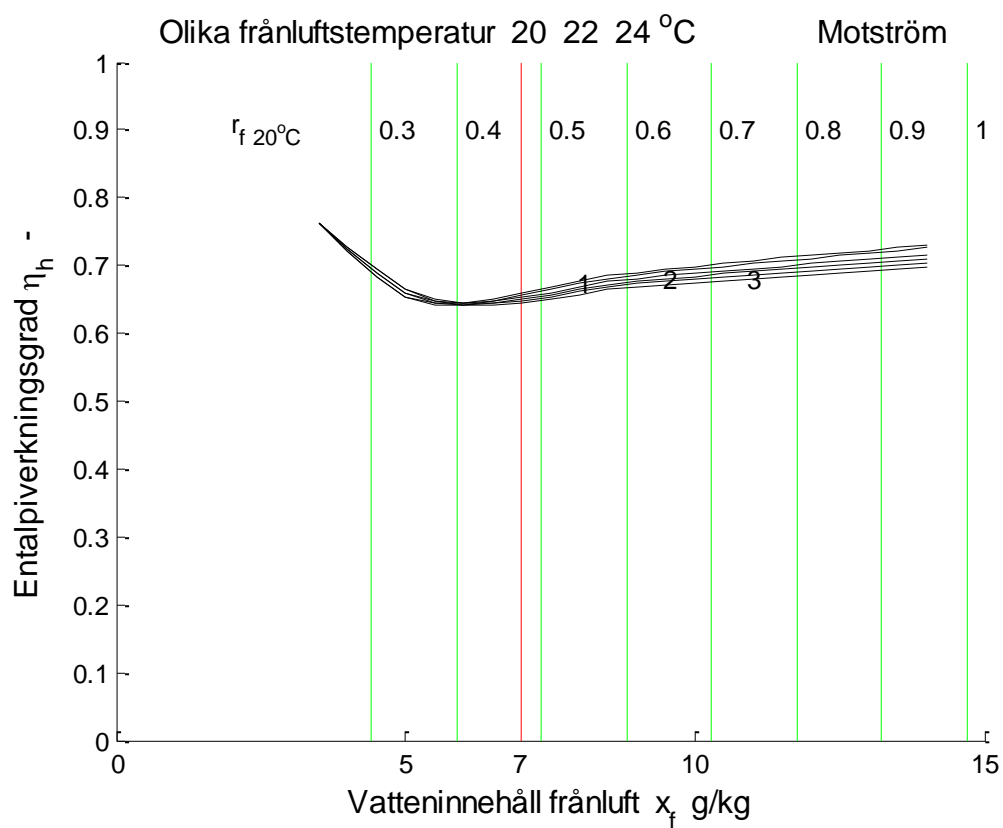
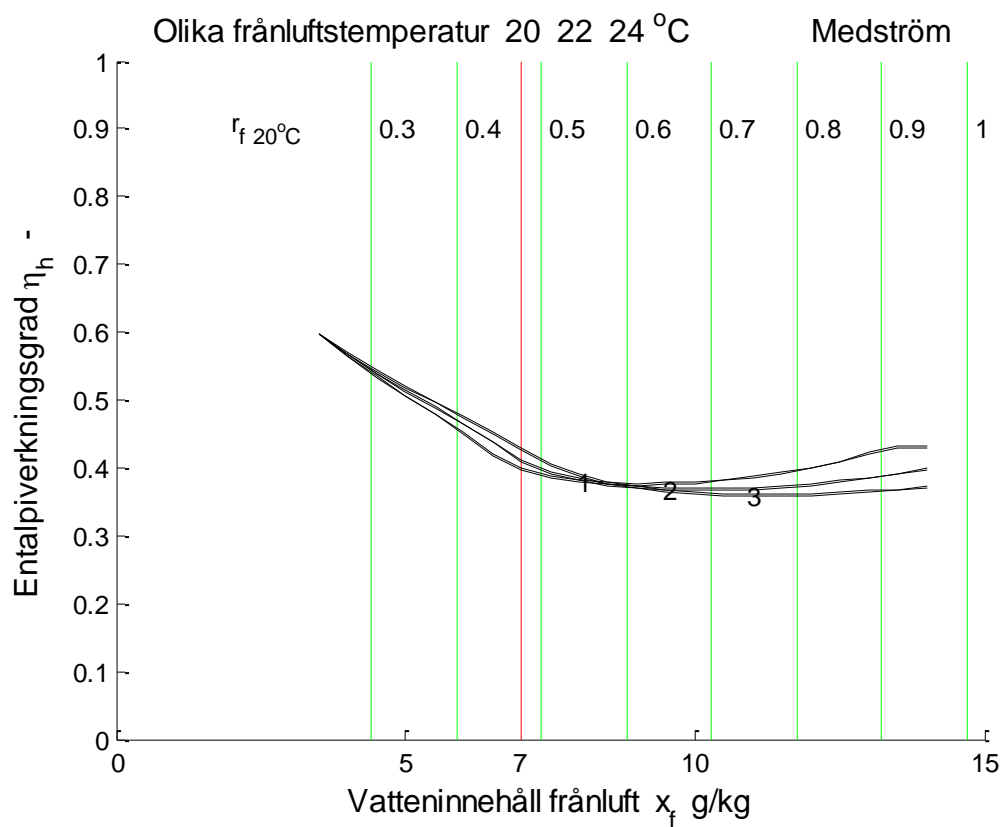
Entalpiverkningsgraden i Figur 4.3 visar att entalpin är en funktion av både temperatur och vatteninnehåll. Entalpiverkningsgraden avtar, när fuktverkningsgraden är nästan noll, och ökar därefter när fuktverkningsgraden ökar allt mer.



Figur 4.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika frånluftstemperatur.



Figur 4.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika frånluftstemperatur.



Figur 4.3 Entalpiverkningsgrad η_h – som funktion av x_f g/kg och olika frånluftstemperatur.

5 Undersökning av olika flödeskvot

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft beror på flödeskvoten mellan aggregatets tilluft och frånluft för uteklimatet 0 °C:3.5 g/kg. Frånluftsflödet antas vara konstant och samma som i tidigare avsnitt. Tilluftsflödet antas vara 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 och 1 av frånluftsflödet. Basfallets flödeskvot är 1.

Tilluftsverkningsgraderna numreras 1-5 i samtliga diagram för de fem flödeskvoterna 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 och 1. Avluftsverkningsgraderna märks däremot inte.

Verkningsgraderna för tilluft blir högre än verkningsgraderna för avluft för de fyra flödeskvoterna 0.6, 0.7, 0.8 och 0.9. Detta kan förklaras med att det finns ett samband mellan de två flödenas verkningsgrader och de två flödena eller deras massflödeskvot. Inför beteckningarna η_a och η_b för verkningsgrad och q_a och q_b för flöde och balans ger grundsambandet:

$$\eta_a q_a = \eta_b q_b \quad (\text{kg/s}) \quad (5.1)$$

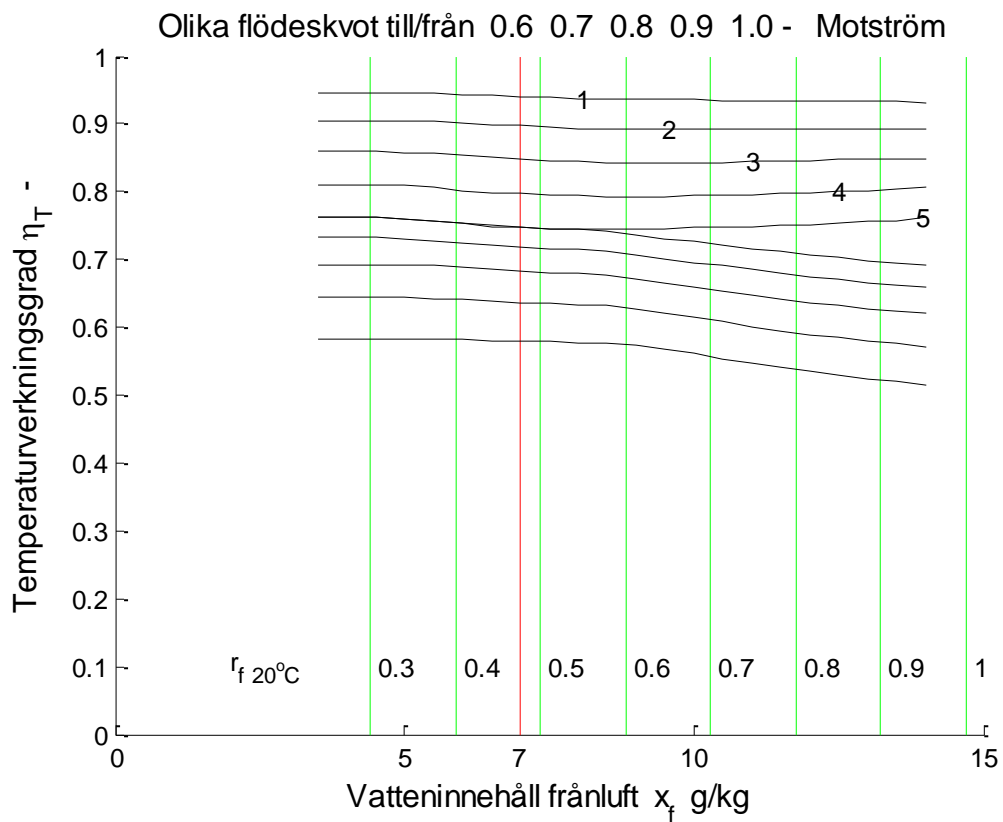
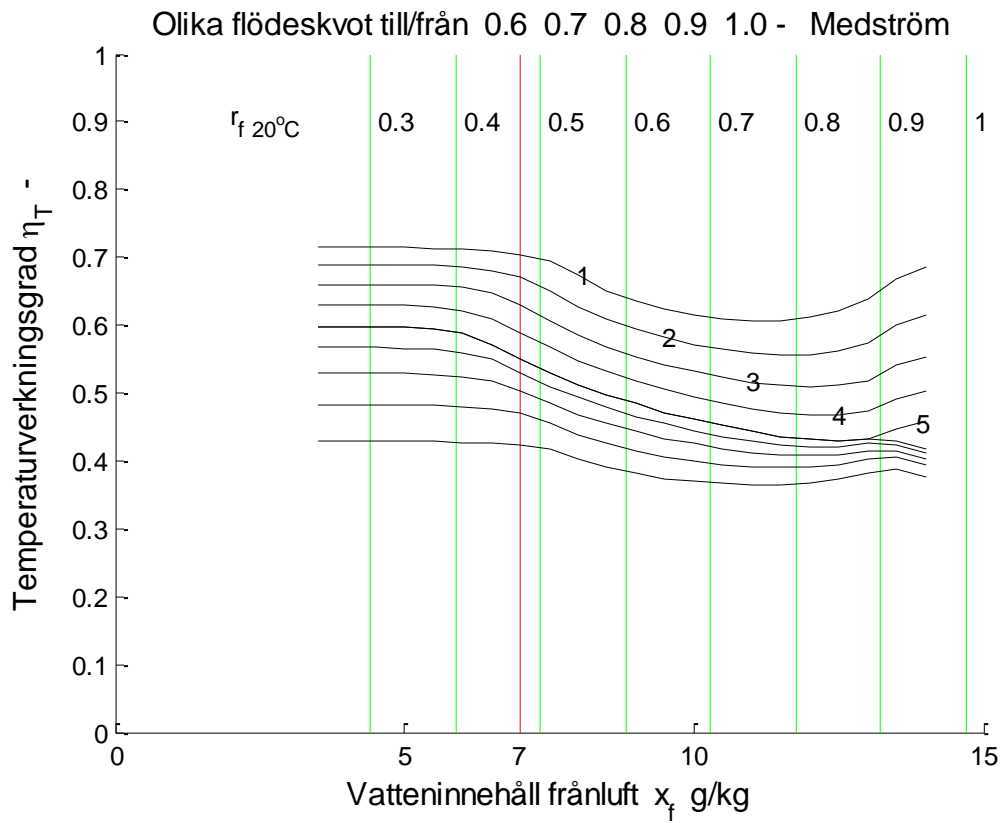
Uttrycket (5.1) kan skrivas om obetydligt till kvoter mellan verkningsgrader och massflöden dock omkastade:

$$\eta_a / \eta_b = q_b / q_a \quad (-) \quad (5.2)$$

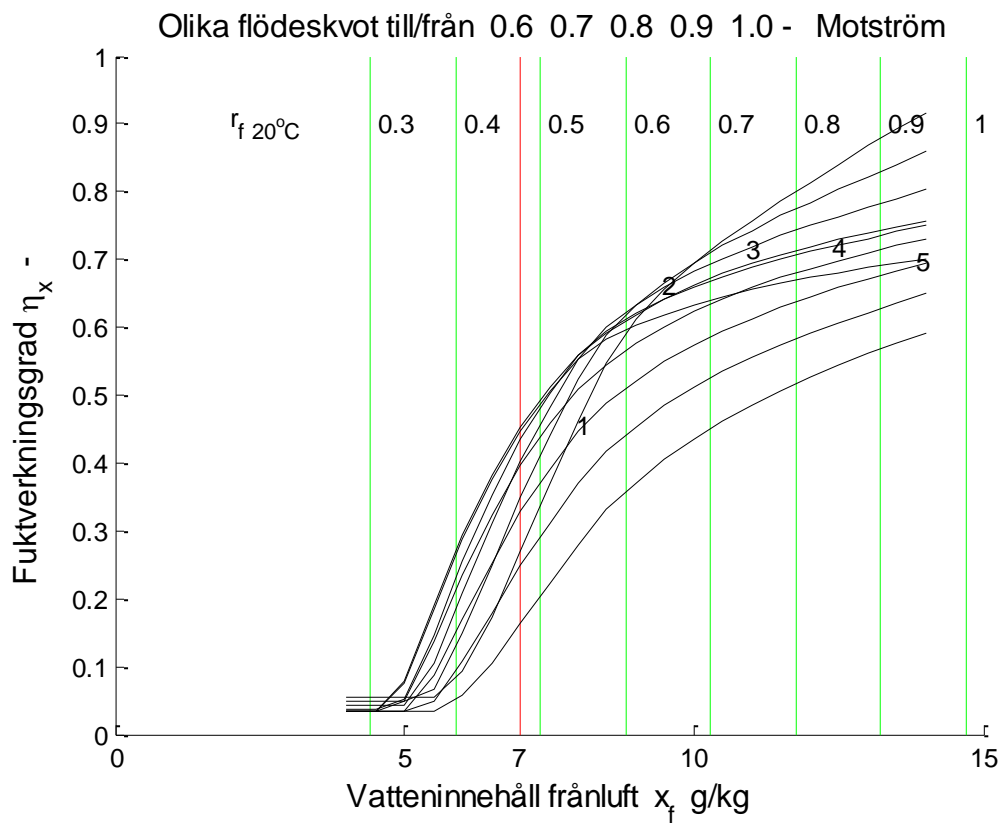
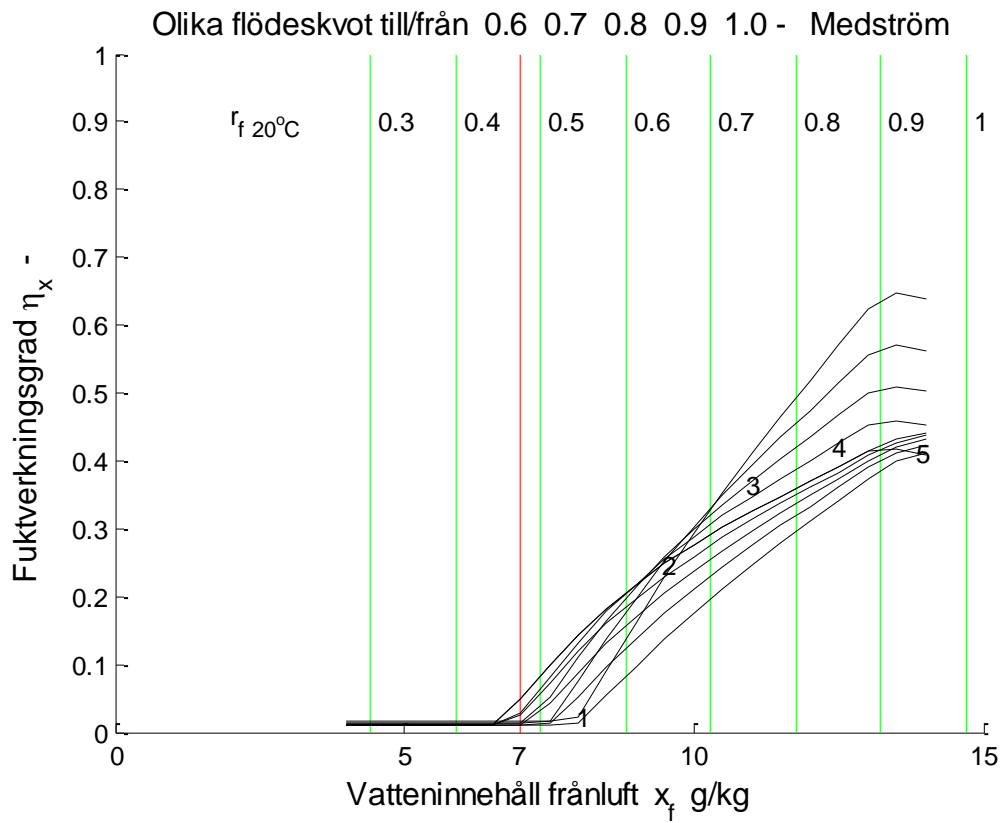
Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entalpiverkningsgrad η_h redovisas i Figur 5.1-3 på samma sätt som i avsnitten 3-9.

Kurvorna i Figur 5.1-3 visar att temperaturverkningsgrad, fuktverkningsgrad och entalpiverkningsgrad påverkas av flödesobalansen. Verkningsgraderna för tilluft bör öka med minskade flödeskvot enligt (5.1-2). Detta stämmer för temperatur och entalpi, men knappast för fukt. Vad detta beror på utreds inte på grund av tidsbrist.

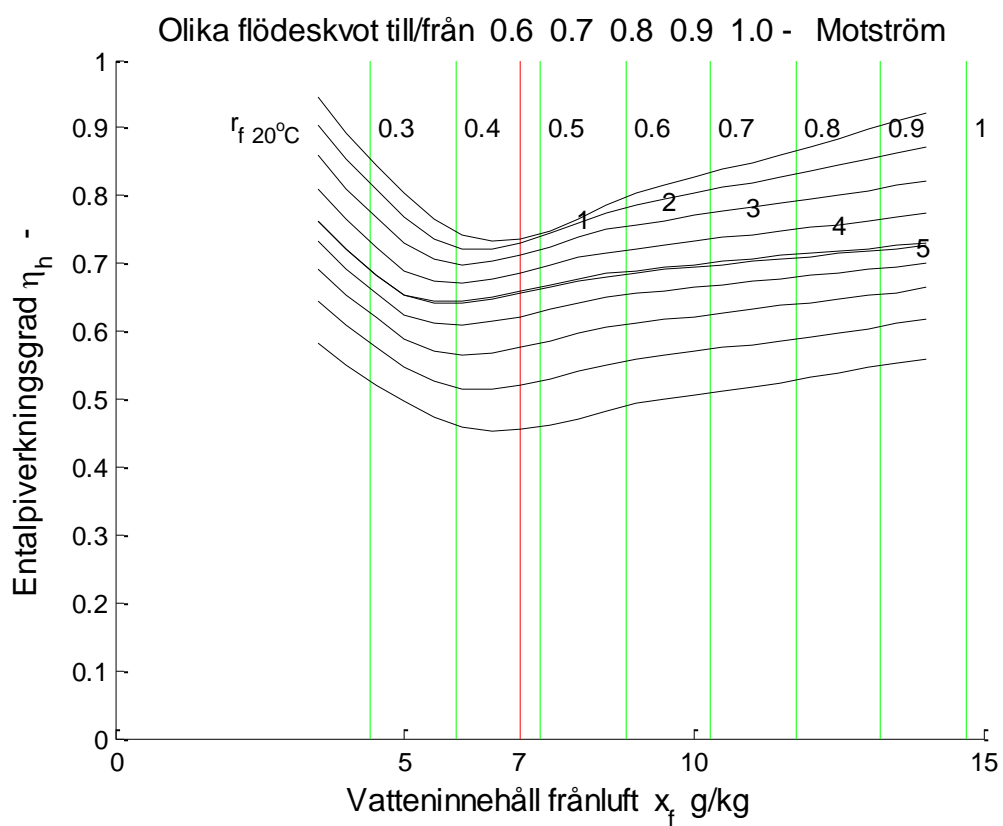
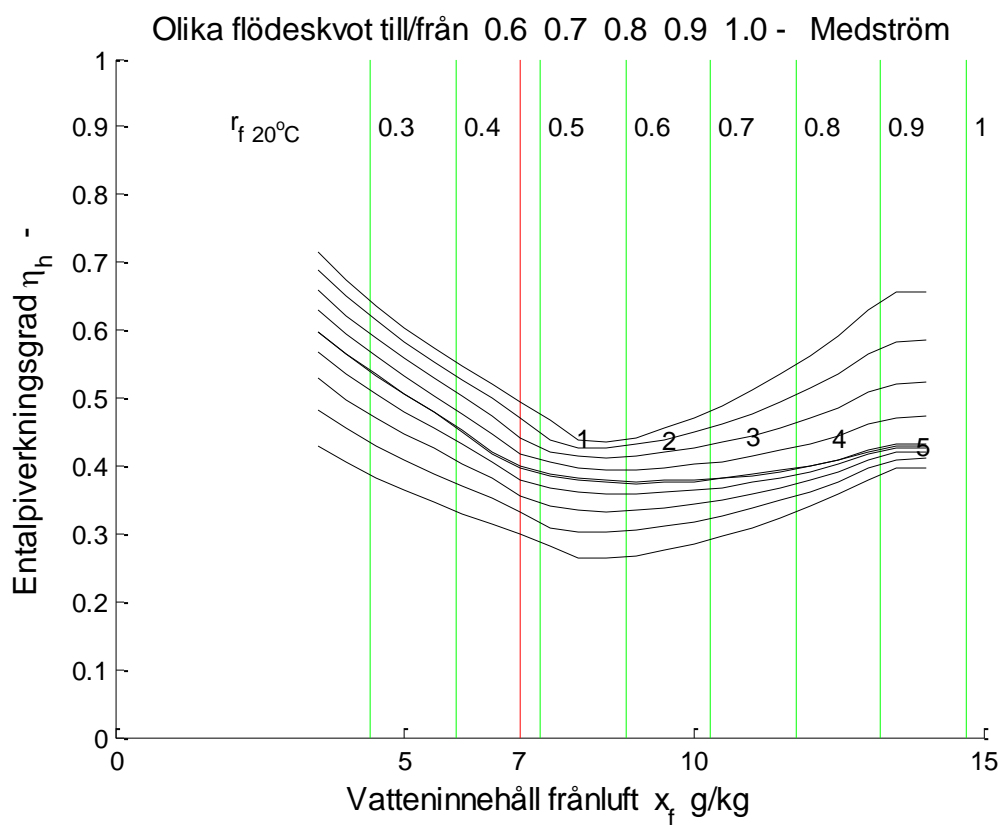
En anmärkning är att varvtiden är här 20 s för medström oberoende av flödeskvoten, men en något högre temperaturverkningsgrad skulle kunnat ha uppnåtts om varvtiden ökas med avtagande flödeskvot. Rotorn blir mindre belastad med lägre flödeskvot, vilket innebär att varvtiden kan ökas.



Figur 5.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot k .



Figur 5.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot k .



Figur 5.3 Entalpiverkningsgrad η_h – som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot k .

6 Undersökning av olika rotorhastighet

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft påverkas av rotorhastigheten. Fem olika varvtider 6, 12, 15, 20 och 30 s har genomräknats som funktion av frånluftens vatteninnehåll för ett givet uteklimat 0 °C och 3.5 g/kg och given frånluftstemperatur 20 °C. Bsfallets varvtid är för medström 20 s och för motström 6 s. De fem varvtiderna motsvarar varvtalen 10, 5, 4, 3 respektive 2 varv/min.

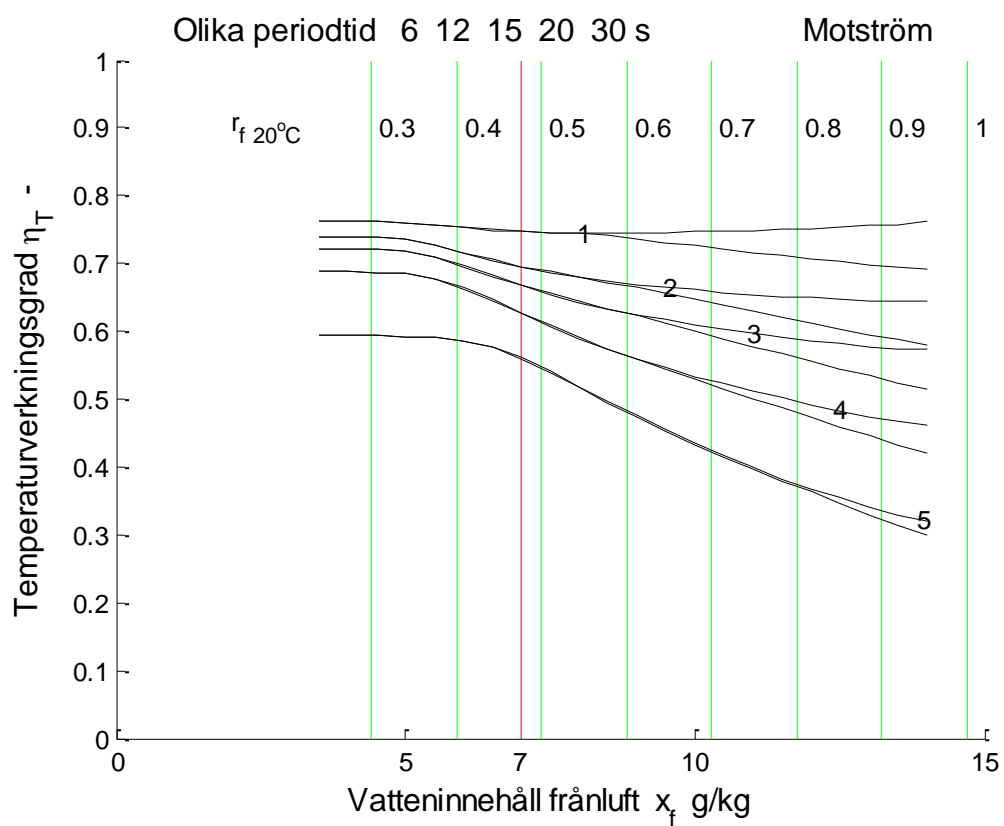
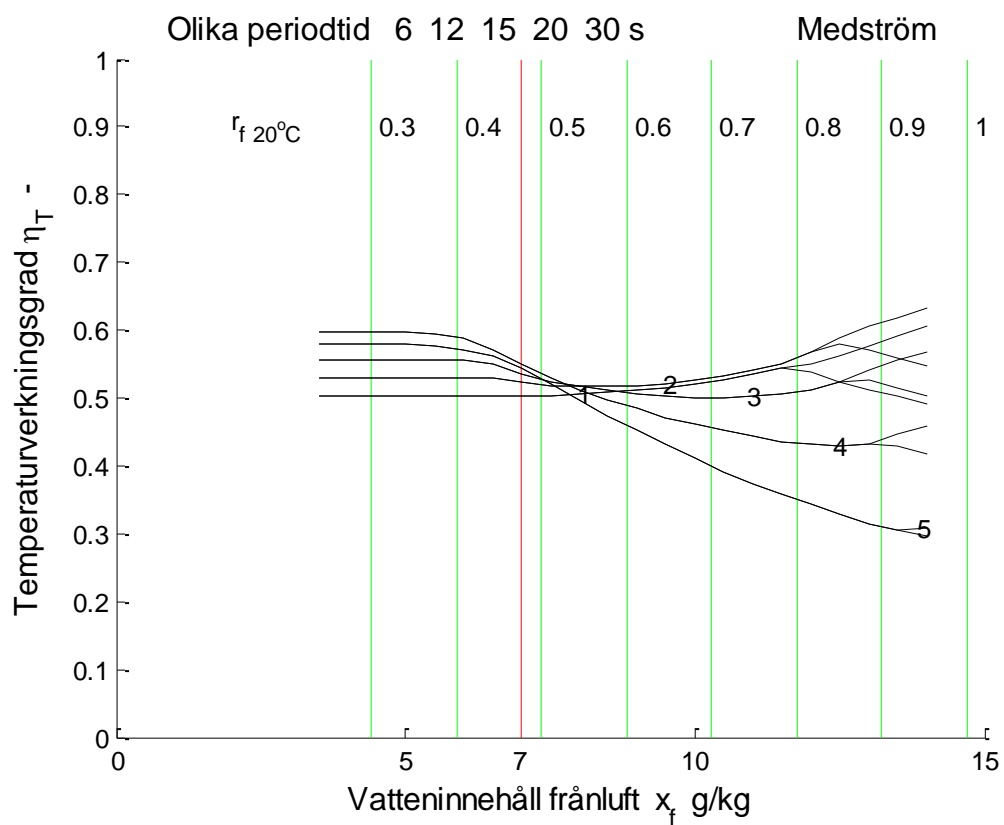
Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entapliverkningsgrad η_h redovisas i Figur 6.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 6.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1 i steg om 0.1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 6.1-3.

Tilluftsverkningsgraderna numreras 1-5 i samtliga diagram för de fem varvtiderna. Avluftsverkningsgraderna märks däremot inte.

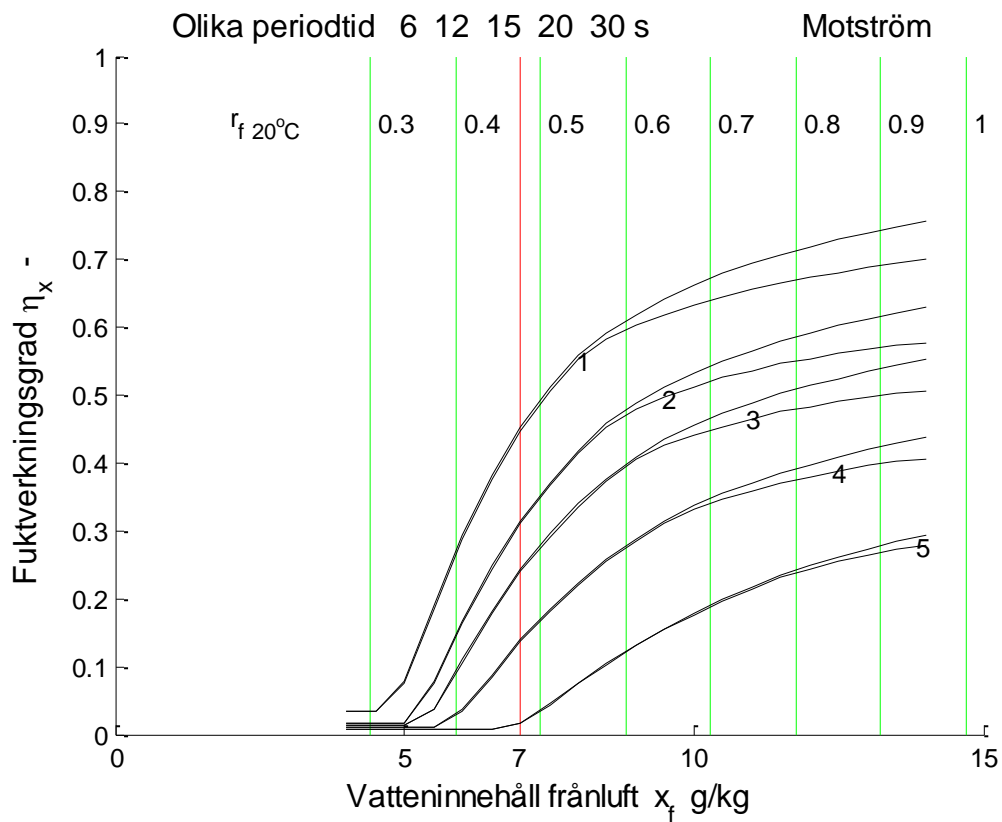
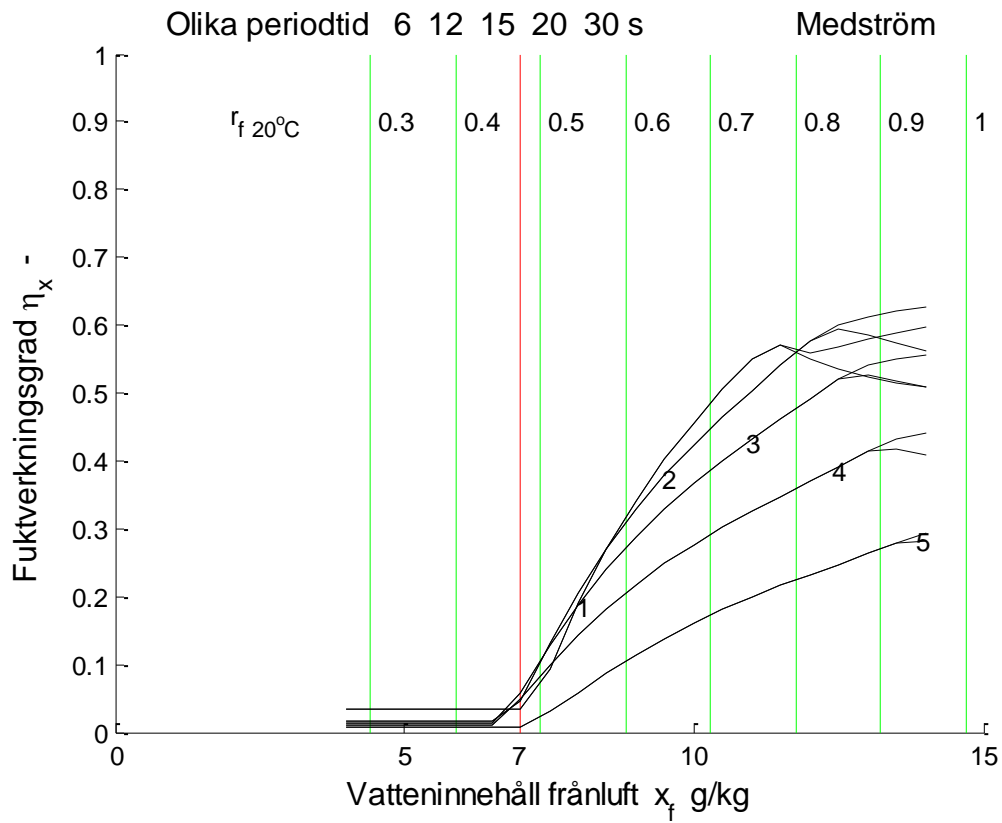
Kurvorna i Figur 6.1 och 6.2 visar att temperatur- och fuktverkningsgrad avtar med minskande rotorhastighet eller ökande varvtid för både medström och motström.

Notera att högsta temperaturverkningsgrad för medström och en kondensfri rotor (fuktverkningsgraden är noll bortsett från den direkta överföringen) ges av kurva 4 med varvtiden 20 s.

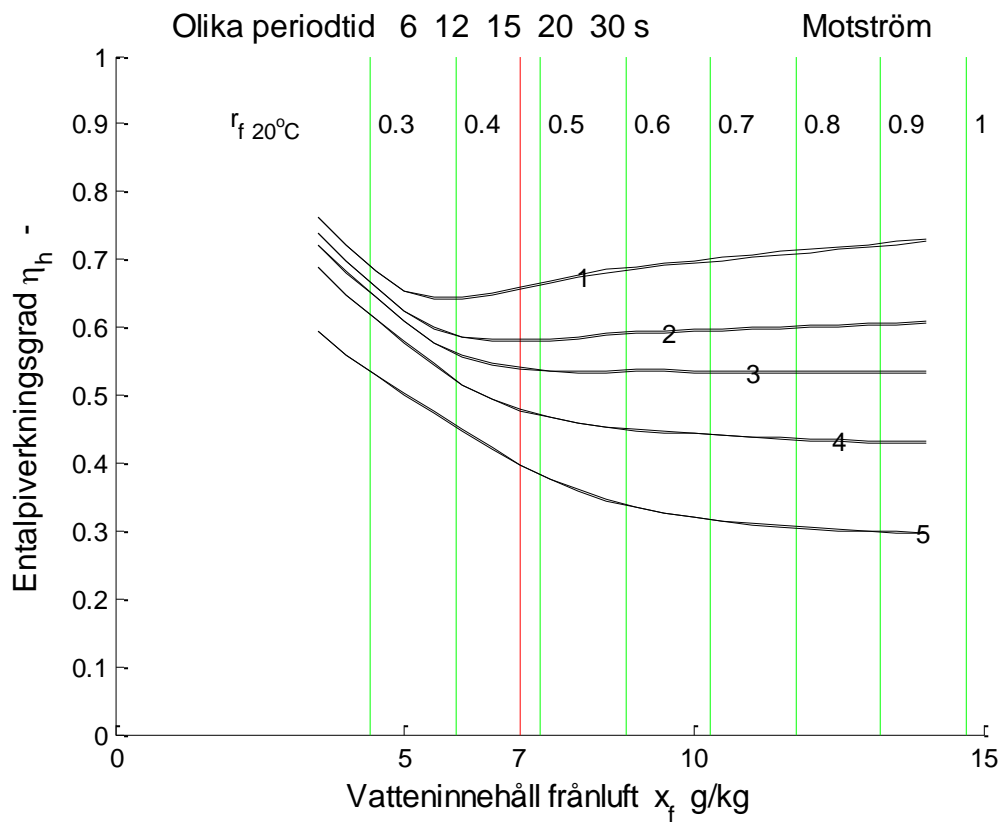
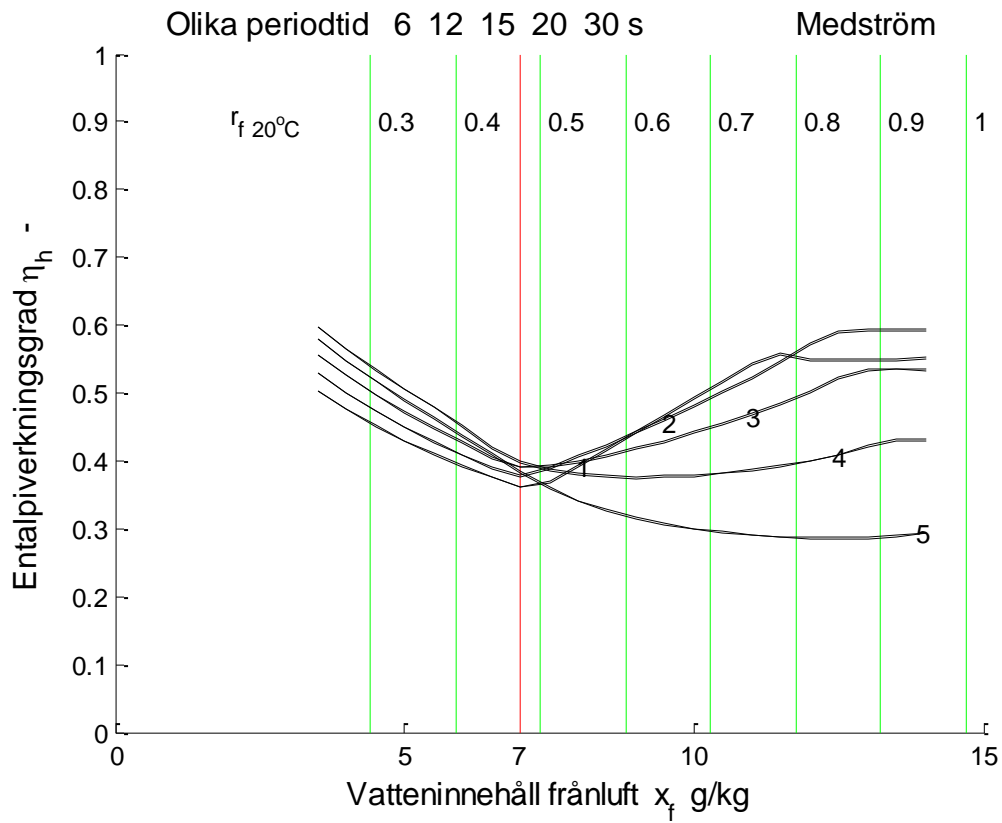
Den varvtidsberoende kondensfria överföringen i Figur 6.2 kan för både medström och motström beräknas till 1/30, 1/60, 1/75, 1/100 och 1/150 motsvarande varvtiderna 6, 12, 15, 20 respektive 30 s och en genomblåsningstid 0.1 s enligt (2.6).



Figur 6.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika rotorhastighet.



Figur 6.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika rotorhastighet.



Figur 6.3 Entalpiverkningsgrad η_h – som funktion av x_f g/kg och olika rotorhastighet.

7 Undersökning av olika lufthastighet

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft påverkas av lufthastigheten. Fyra olika lufthastigheter 1, 2, 3 och 4 m/s har genomräknats som funktion av frånluftens vatteninnehåll för ett givet uteklimat 0 °C och 3.5 g/kg och given frånluftstemperatur 20 °C. Basfallets lufthastighet är 2 m/s. Värmeövergångstalet är konstant 40 W/Km².

Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entapliverkningsgrad η_h redovisas i Figur 7.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 7.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1 i steg om 0.1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 7.1-3.

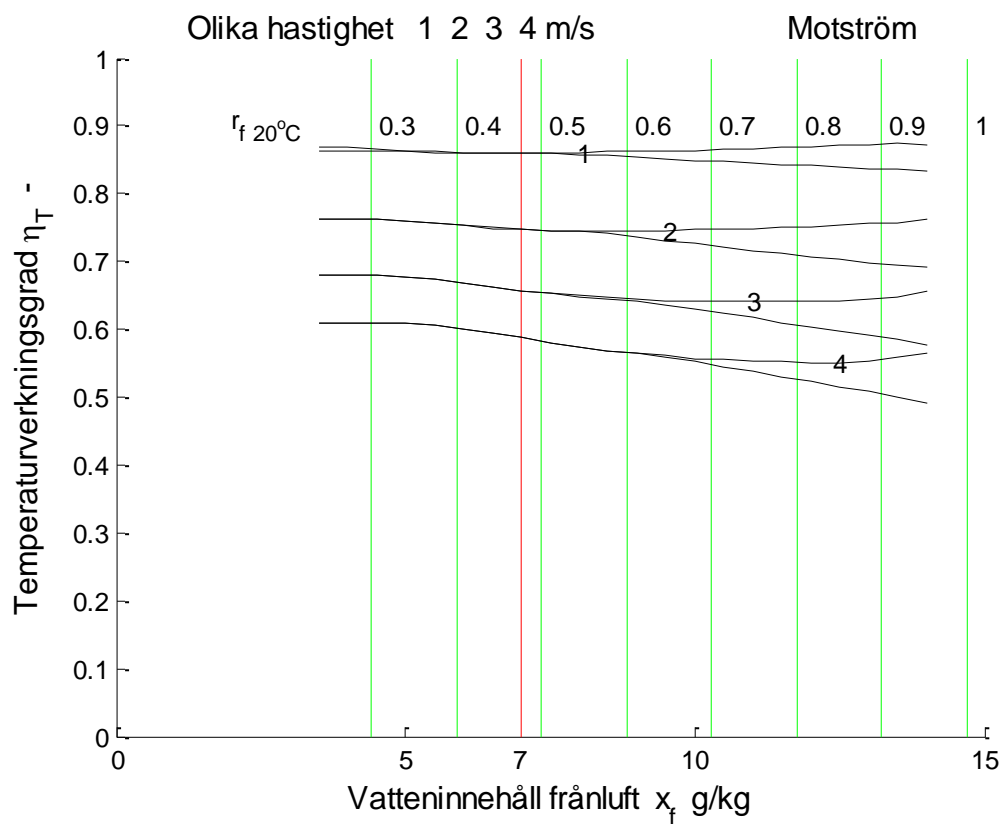
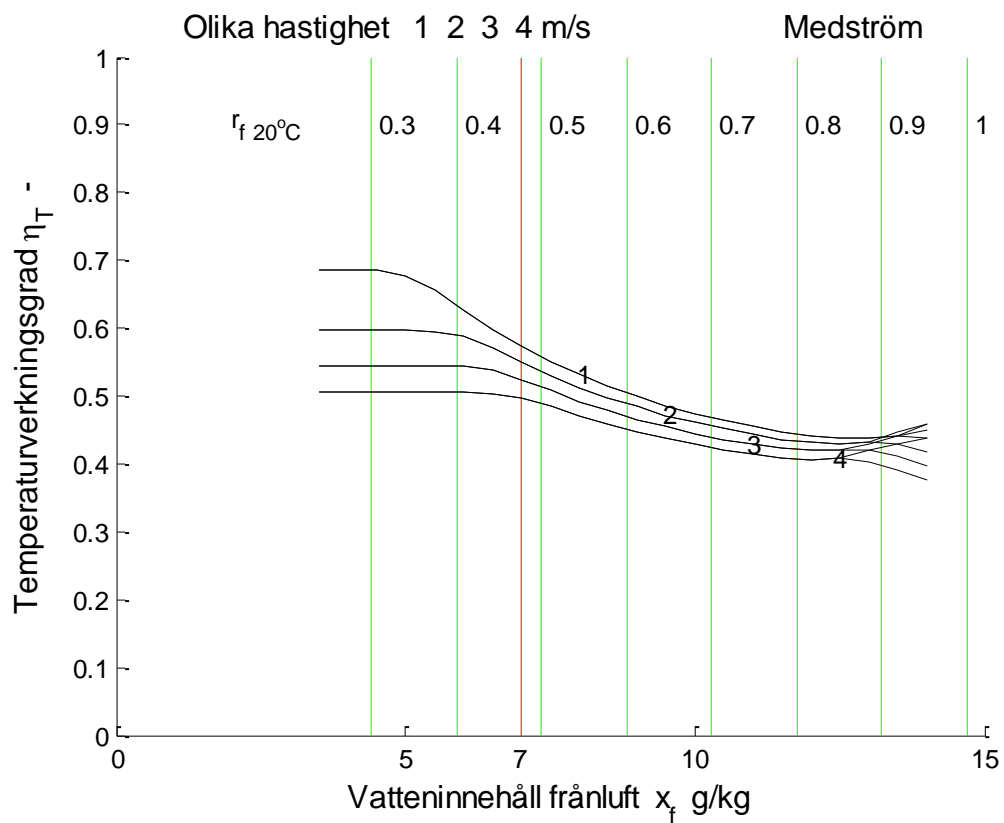
Tilluftsverkningsgraderna numreras 1-4 i samtliga diagram för de fyra lufthastigheterna 1, 2, 3 och 4 m/s. Avluftsverkningsgraderna märks däremot inte.

Kurvorna i Figur 7.1-2 visar att temperatur- och fuktverkningsgraden avtar med ökande lufthastighet. Fuktverkningsgraden för motströmsfallet kan avta betydligt i förhållande till temperaturverkningsgraden, vilket ses för vatteninnehåll 7 g/kg vid övergång från 2 m/s till 4 m/s. Temperaturverkningsgrad och dito fukt ändras från 0.74 till 0.59 respektive 0.45 till 0.18.

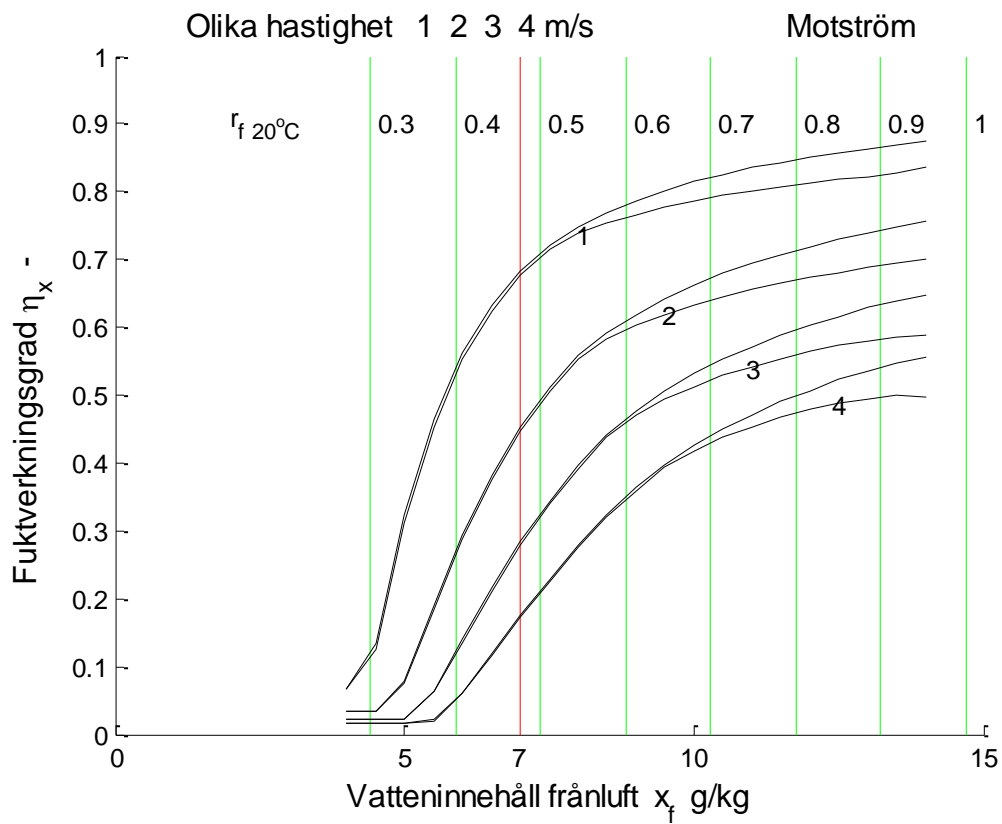
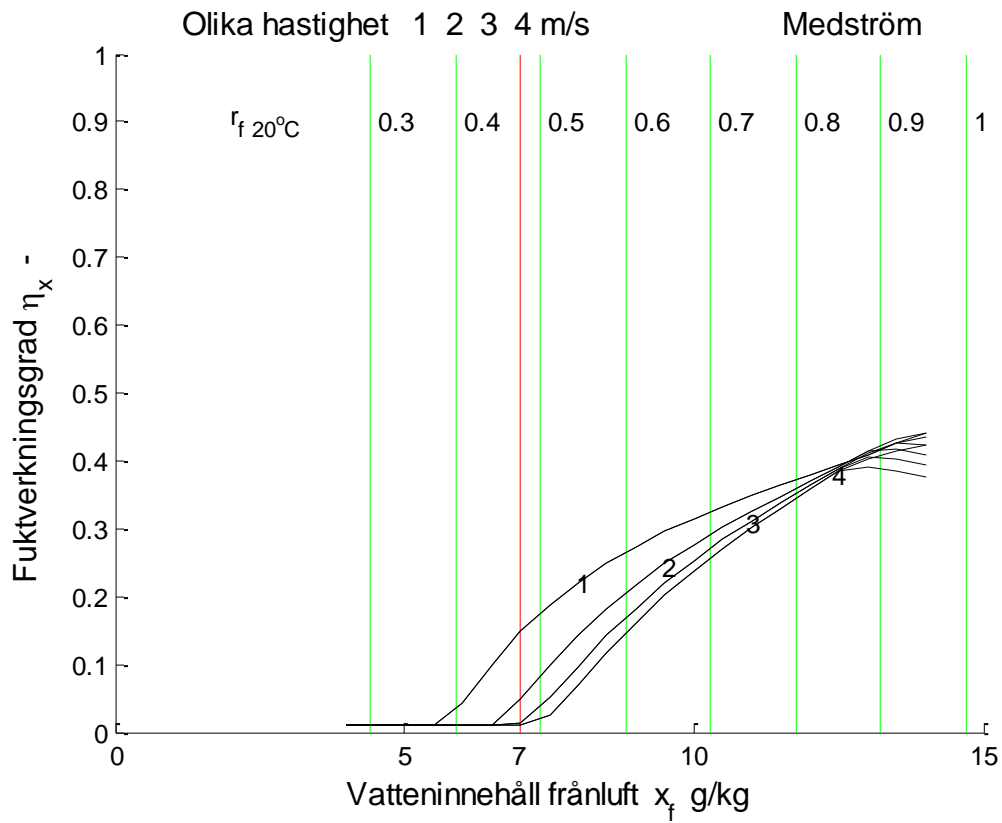
Medströmsfallet påverkas mindre än motströmsfallet av olika lufthastigheter genom rotorn.

Överföringen eller den kondensfria fuktverkningsgraden kan enligt (2.6) beräknas till 0.01 för medström oberoende av lufthastigheten, eftersom varvtiden anpassas efter lufthastigheten enligt (2.5). Varvtiden är 40, 20, 13.3 och 10 s för medström enligt (2.5).

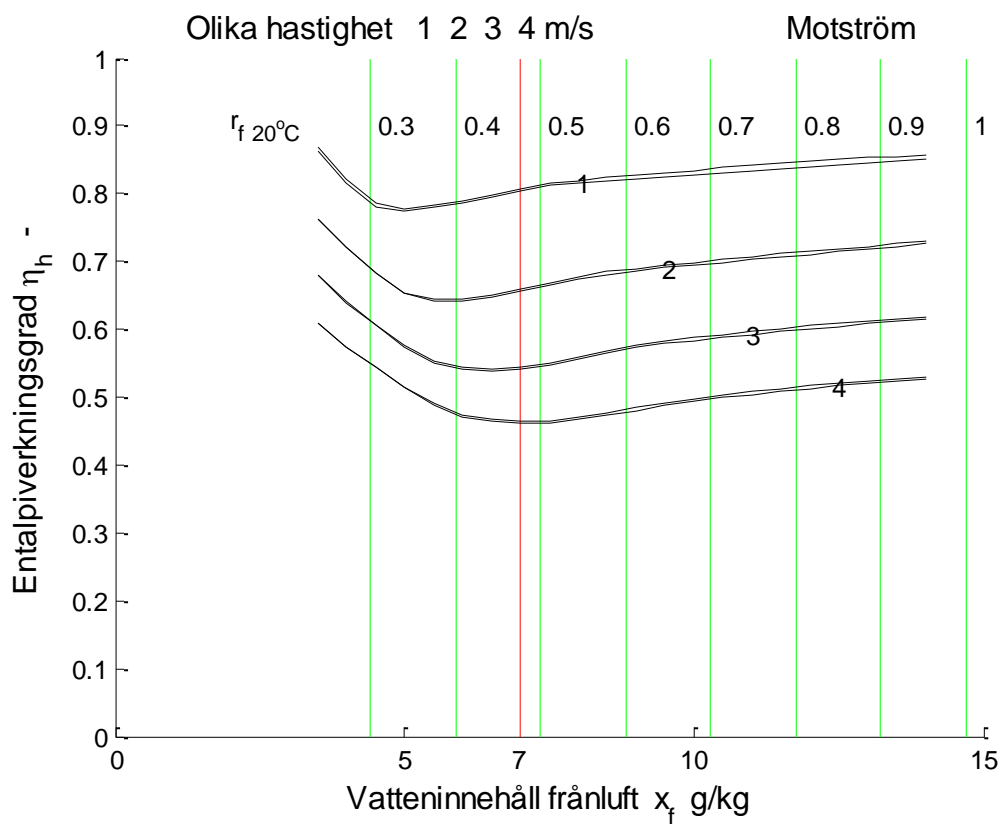
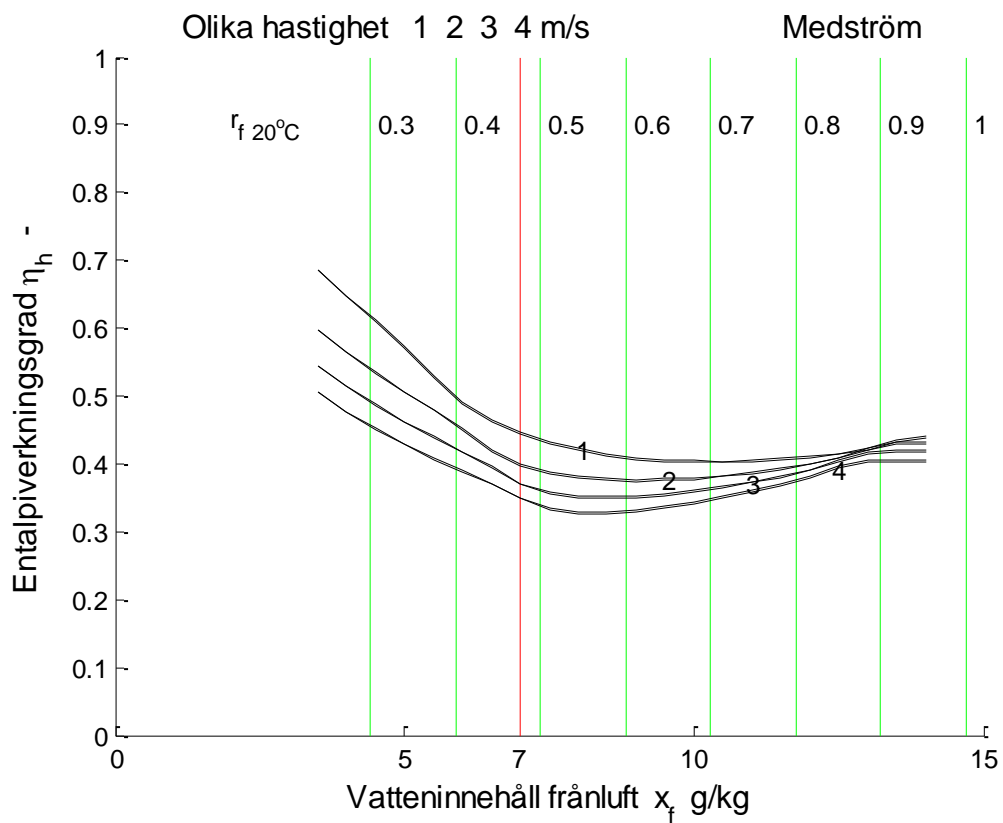
Överföringen för motström blir 0.017, 0.033, 0.050 och 0.067 för lufthastigheterna 1, 2, 3 och 4 m/s, vilket framgår nederst i Figur 7.2. Varvtiden är 6 s för motström.



Figur 7.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika lufthastighet.



Figur 7.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika lufthastighet.



Figur 7.3 Entalpiverkningsgrad η_h – som funktion av x_f g/kg och olika lufthastighet.

8 Undersökning av olika rotorlängd

Syftet med detta avsnitt är att redovisa de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft påverkas av rotorlängd. Ett sätt att påverka temperaturverkningsgraden är att välja en stor rotor i förhållande till ventilationsflödet. Ett enkelt sätt är att variera rotorlängden, vilket ökar rotormassan och rotorkontaktyta. Rotormassan kan också ökas genom att välja ett grövre rotormaterial.

Fyra rotorlängder 100, 200, 300 och 400 mm har genomräknats som funktion av frånluftens vatteninnehåll för ett givet uteklimat 0 °C och 3.5 g/kg och given frånluftstemperatur 20 °C. Basfallets rotorlängd är 200 mm.

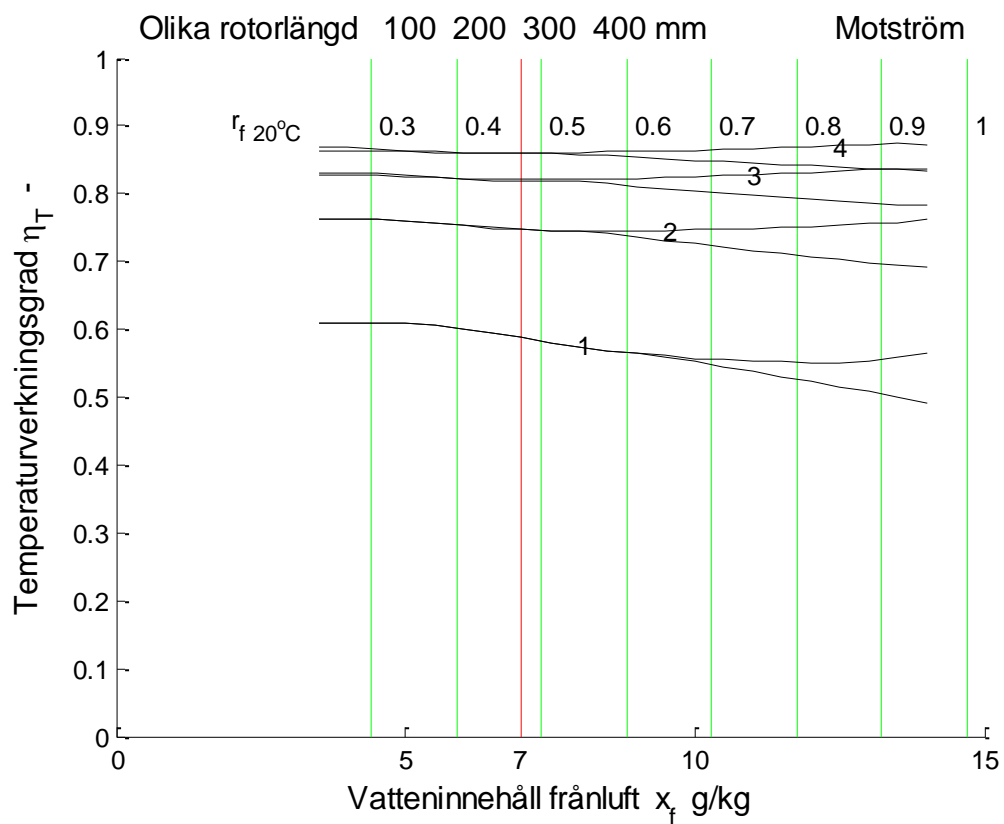
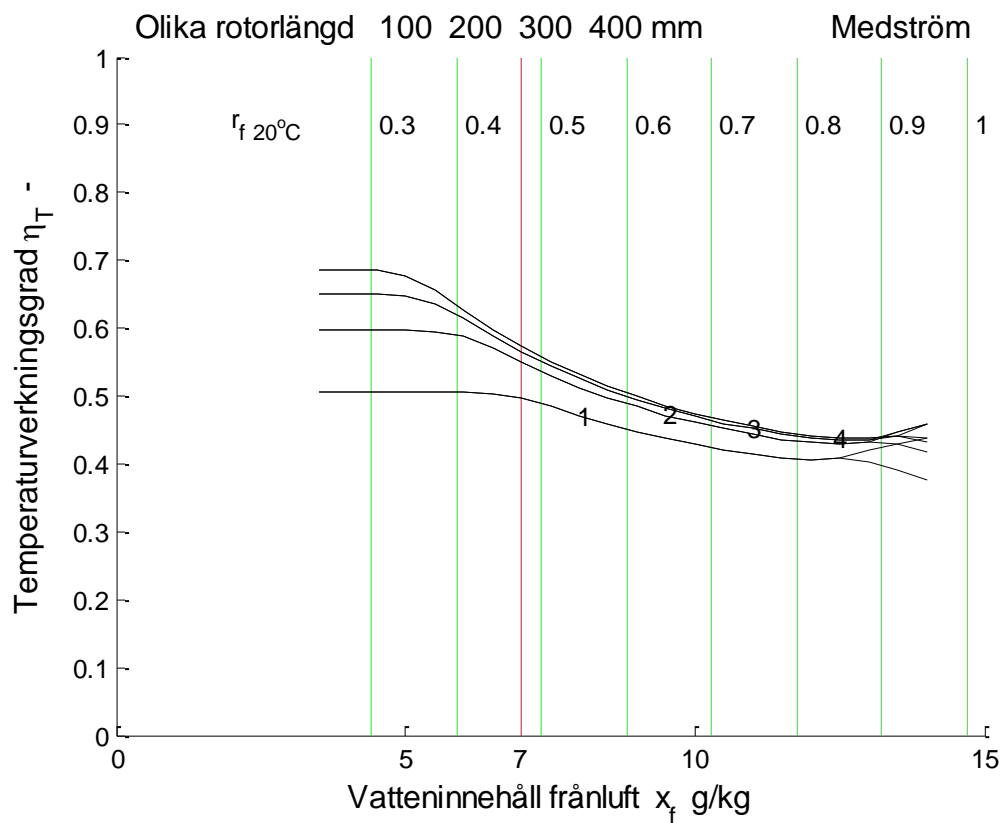
Den nominella varvtiden för medströmsfallet enligt (2.5) har beräknats till 10, 20, 30 och 40 s för rotorlängderna 100, 200, 300 respektive 400 mm.

Överföringen eller den kondensfria fuktverkningsgraden kan beräknas med (2.6). Den är 0.01 för medström och 0.017, 0.033, 0.050 och 0.067 för rotorlängderna 100, 200, 300 respektive 400 mm

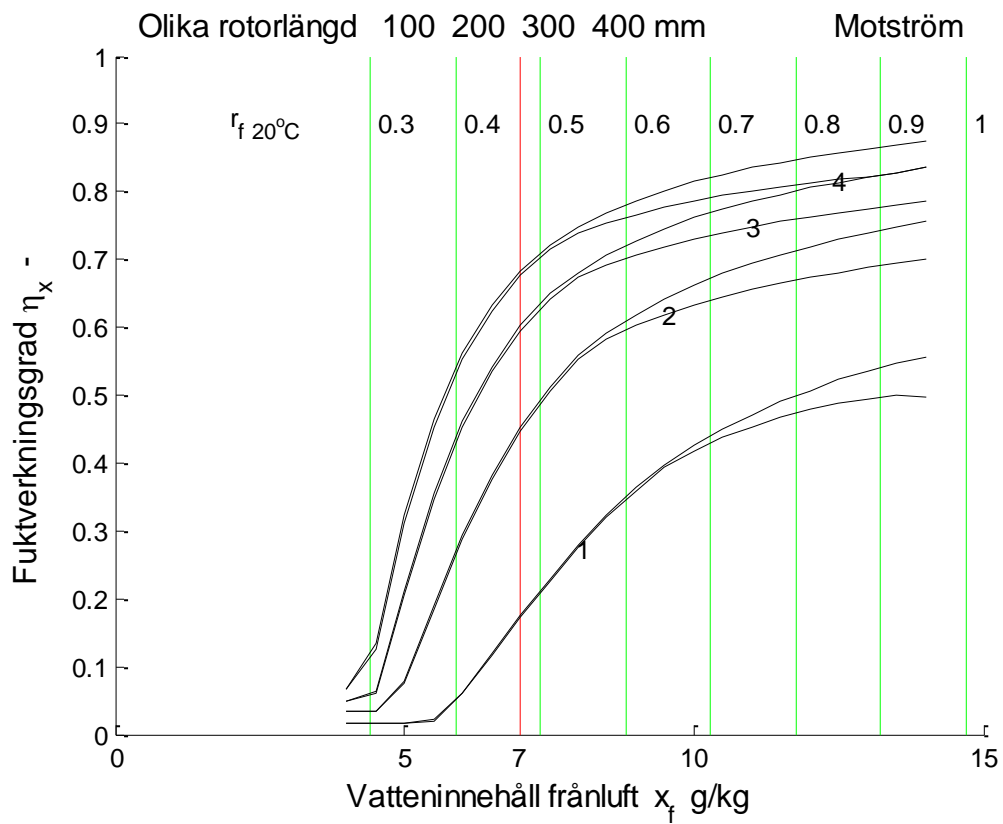
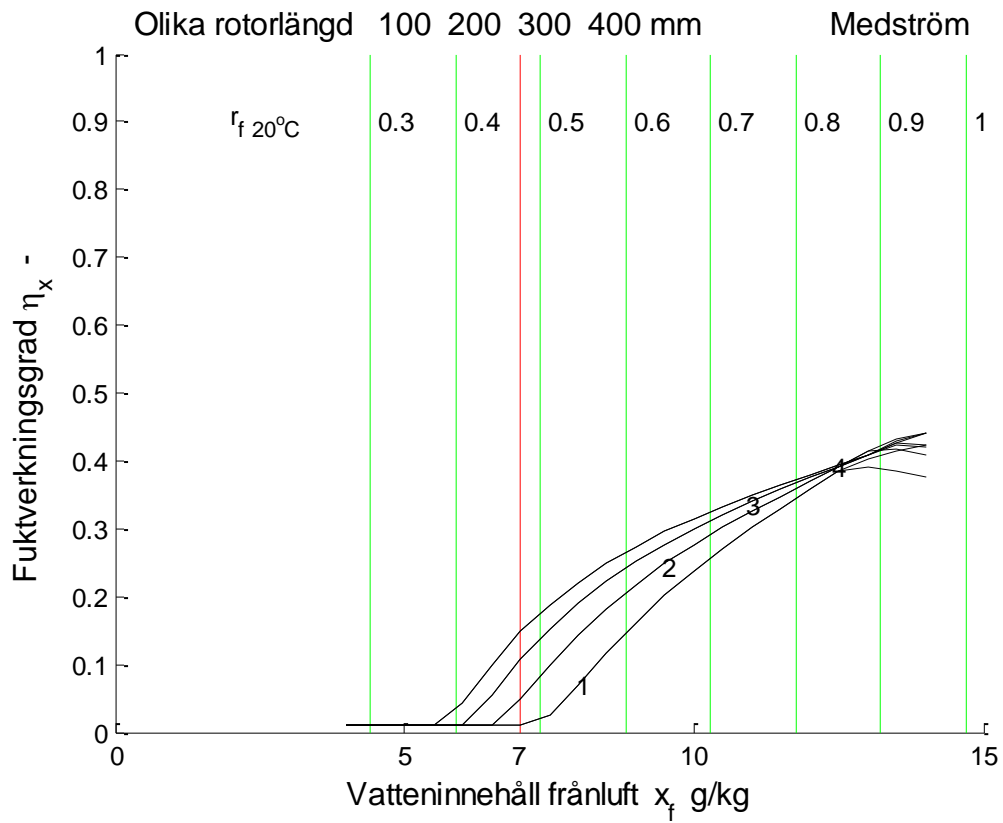
Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entapliverkningsgrad η_h redovisas i Figur 8.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 8.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1 i steg om 0.1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 8.1-3.

Tilluftsverkningsgraderna numreras 1-4 i samtliga diagram för de fyra rotorlängderna. Avluftsverkningsgraderna märks däremot inte.

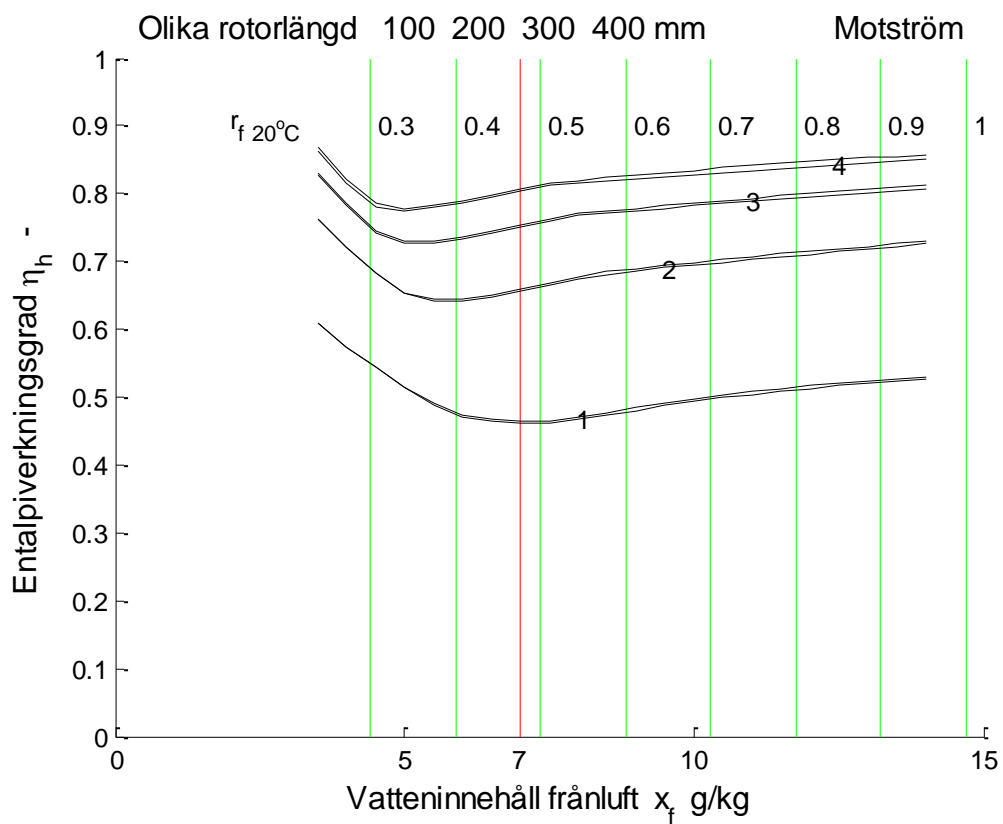
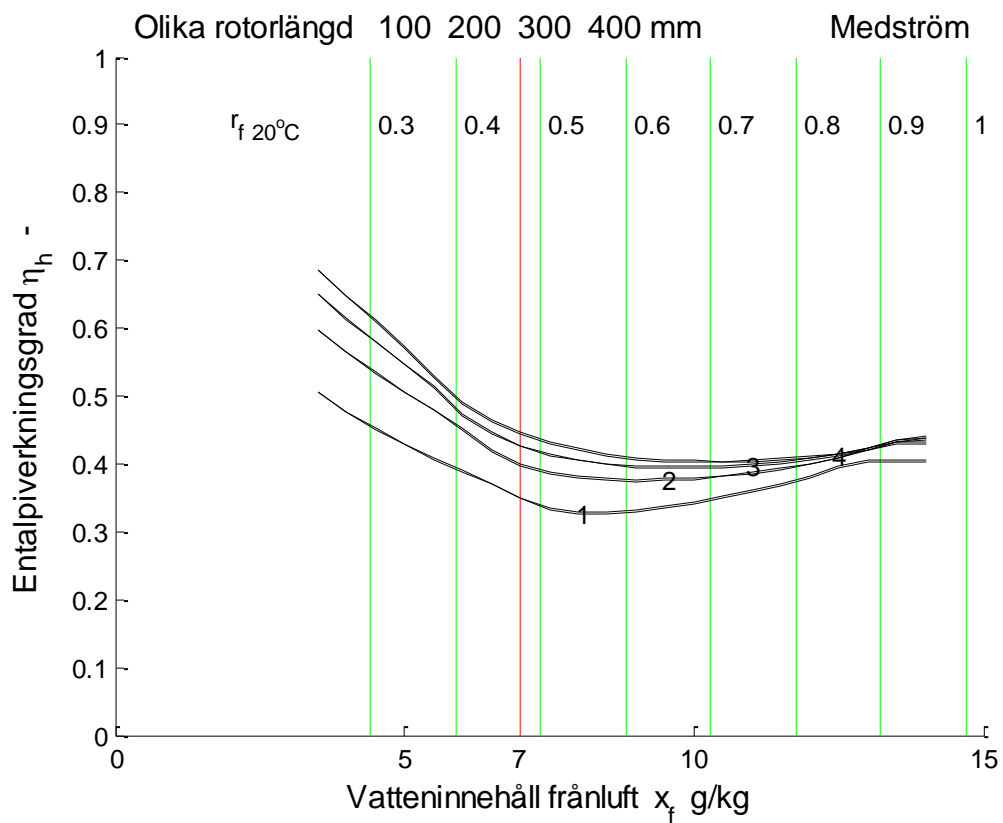
Kurvorna i Figur 8.2 visar att fuktverkningsgraden kan bli hög för rotorerna med hög temperaturverkningsgrad.



Figur 8.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika rotorlängd.



Figur 8.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika rotorlängd.



Figur 8.3 Entalpiverkningsgrad η_h – som funktion av x_f g/kg och olika rotorlängd.

9 Undersökning av olika antal element

Antalet beräkningselement har varit 100 i alla de tidigare avsnitten 3-8. Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur de tre verkningsgraderna för temperatur, vatteninnehåll och entalpi för både tilluft och avluft beror på antalet beräkningselement, vilket har varit 10, 20, 50 och 100. Basfallets antal beräkningselement är 100. Genomräkningar har skett med basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll och given frånluftstemperatur 20 °C.

Om antalet beräkningselement som valts för basfallet är tillräckligt bör avvikelser till de övriga tre fallens verkningsgrader med 10, 20 och 50 beräkningselement avta med ökande antal beräkningselement gentemot fallet med 100 beräkningselement.

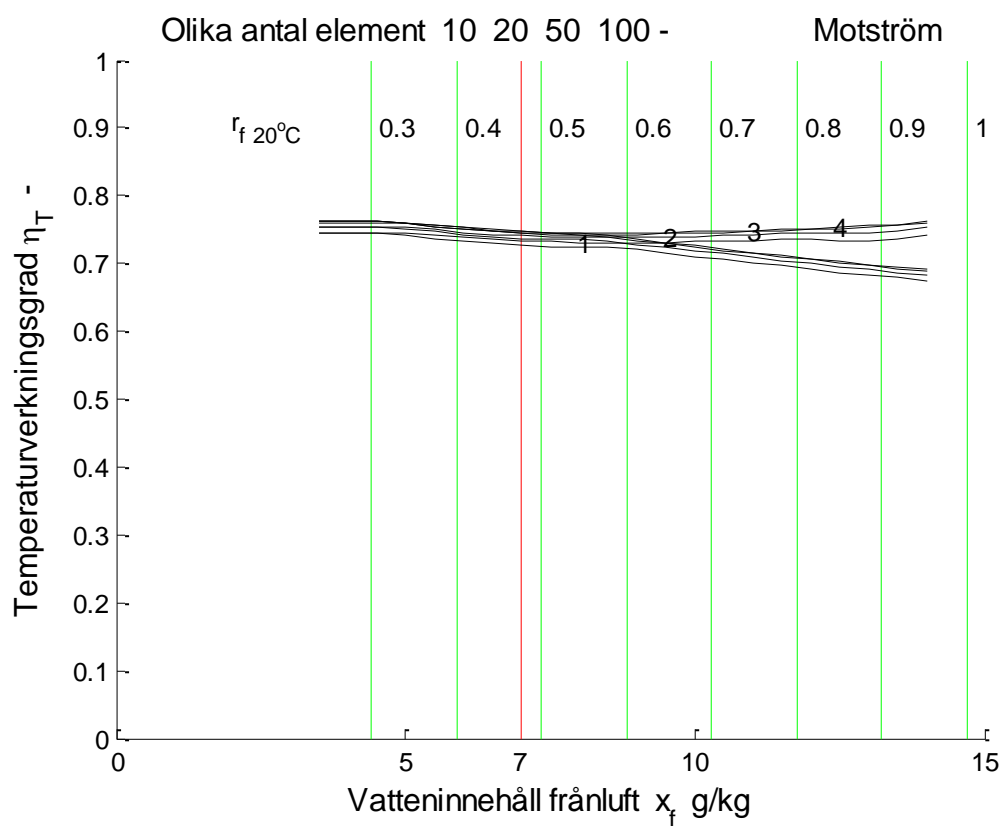
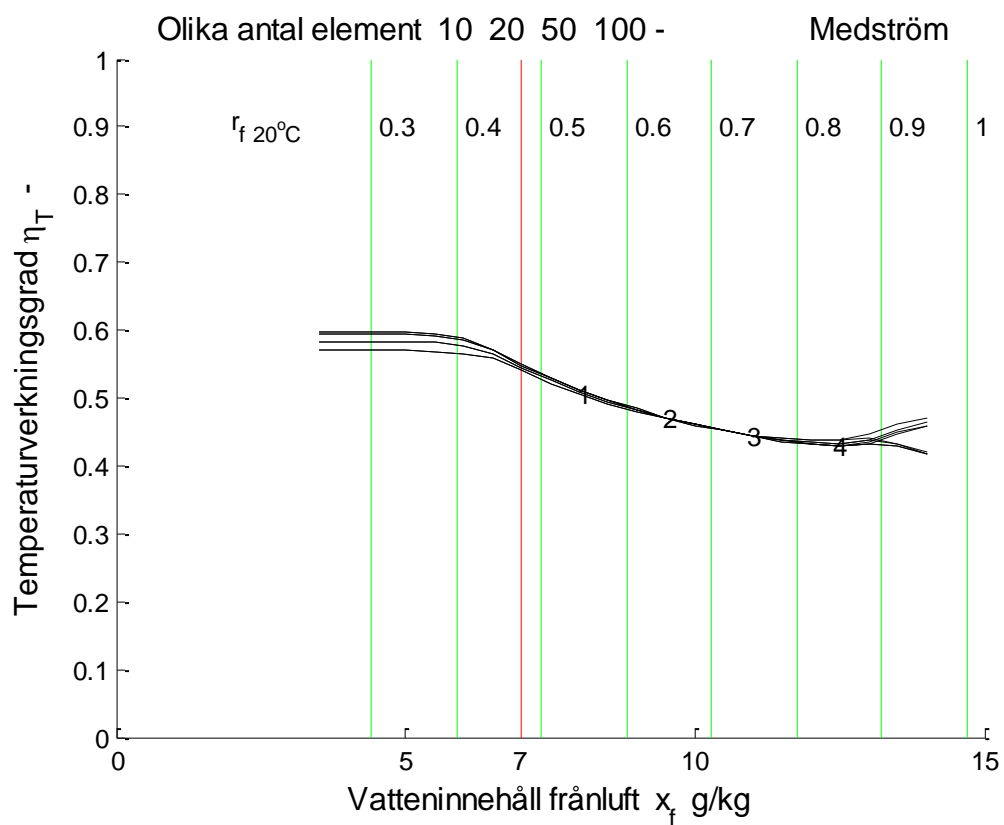
Temperaturverkningsgrad η_T , fuktverkningsgrad η_x och entalpiverkningsgrad η_h redovisas i Figur 9.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 9.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1 i steg om 0.1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 9.1-3.

Kurvorna i Figur 9.1 visar att temperaturverkningsgraden är nästan oberoende av uteklimatet och från-luftens vatteninnehåll.

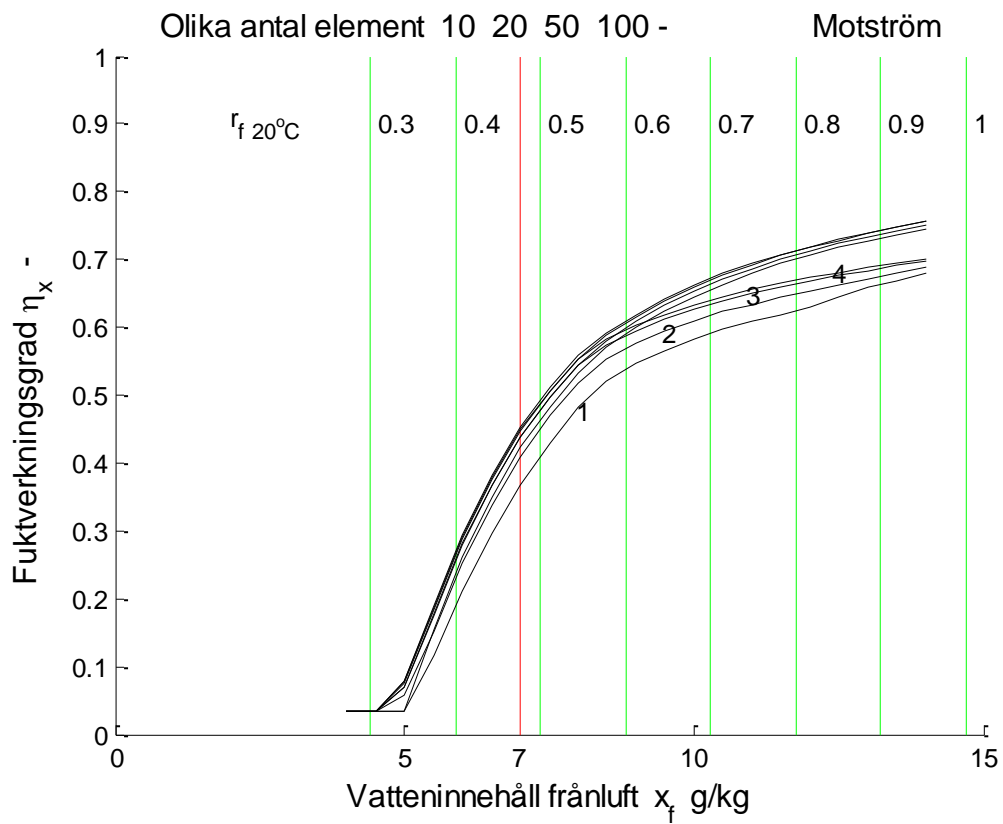
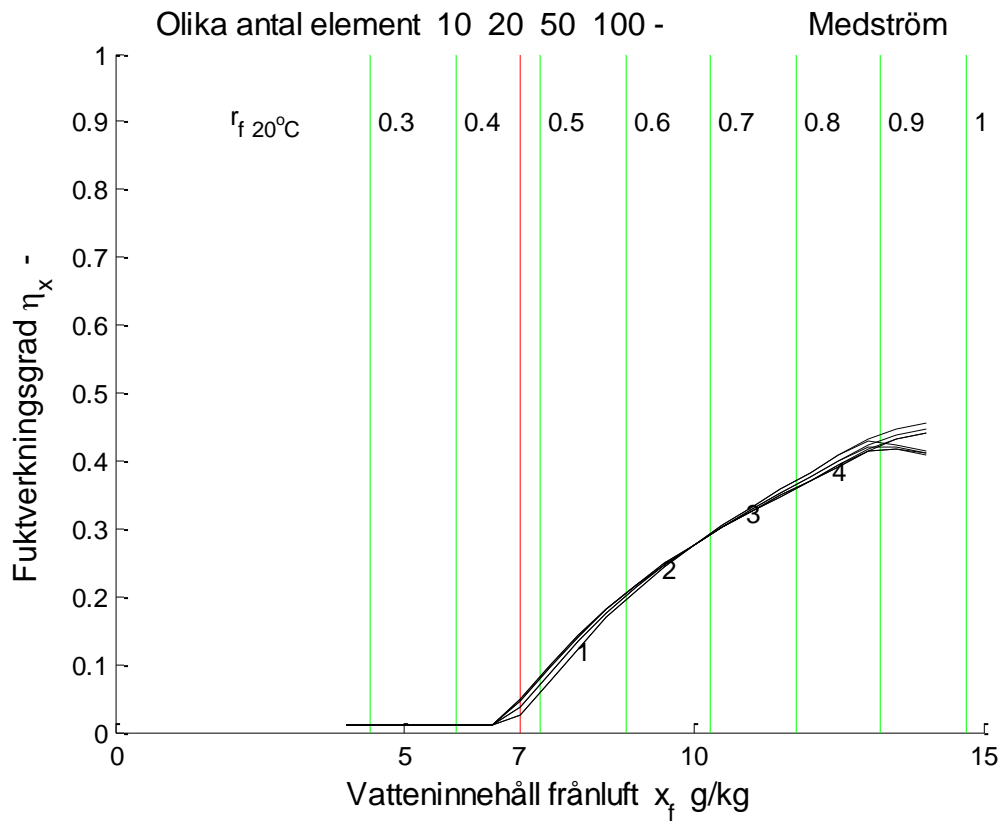
Fuktverkningsgraden i Figur 9.2 är starkt beroende av uteklimatet och är 0.51, 0.41, 0.11 och 0 för de fyra uteklimaten och för vatteninnehåll 7 g/kg.

Kurvorna i Figur 9.1-3 visar att fall 50 och 100 nästan sammanfaller medan 10 och 20 avviker något. Slutsatsen är att antalet 100 beräkningselement ger ett godtagbart resultat.

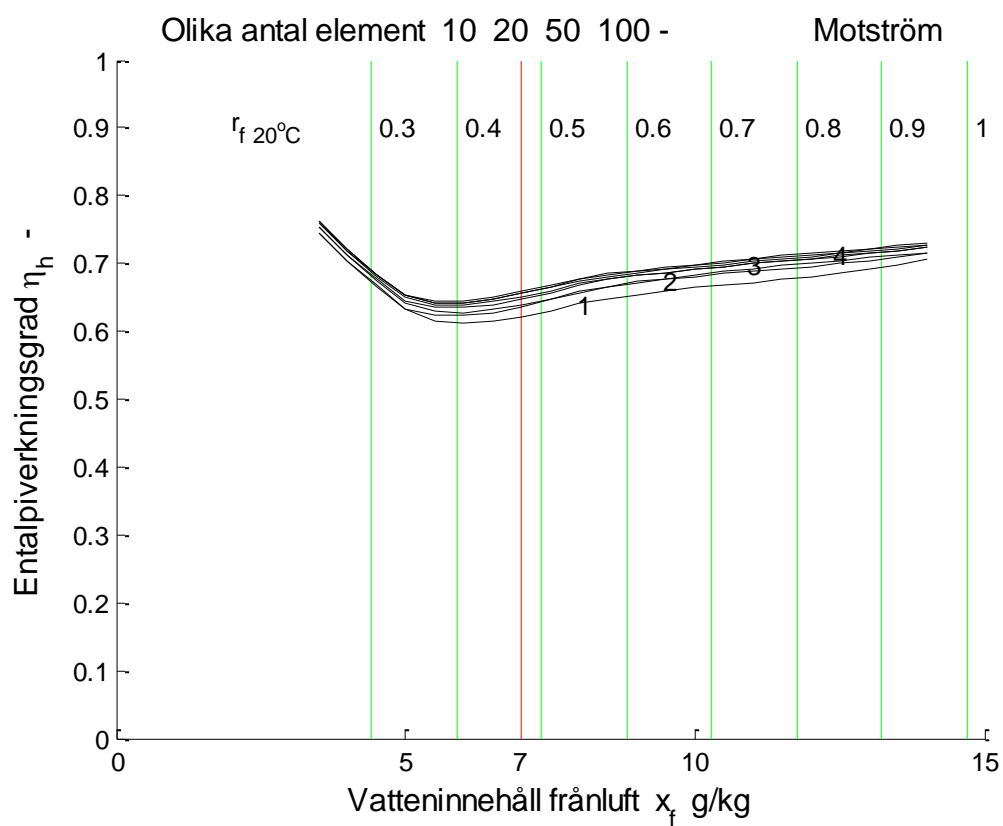
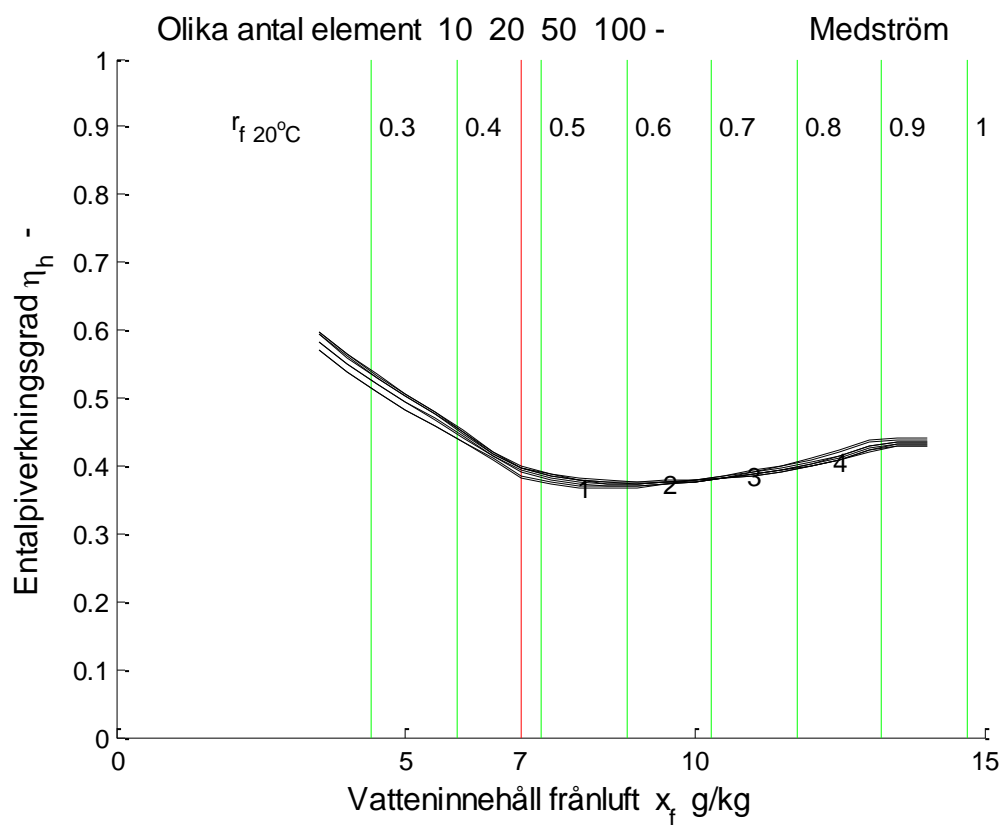
Ett litet antal beräkningselement beskriver rotorns temperatur otillräckligt. Ett enkelt exempel att om luft med daggpunkten 10 °C passerar en yta som är 10 °C sker ingen kondensering eller förångning, men om samma yta delas upp bättre i en varmare halva om 11 °C och en kallare halva om 9 °C sker kondensering.



Figur 9.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika antal element.



Figur 9.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika antal element.



Figur 9.3 Entalpiverkningsgrad η_h – som funktion av x_f g/kg och olika antal element.

10 Undersökning av rotoruppfuktning

Fuktverkningsgraden för tilluft är inte alltid lika med den för avluft utan mindre, vilket innebär att rotorn fuktas upp om flödeskvoten är ett. Kurvorna i Figur 3-4.2 och 5-9.2 visar att fuktverkningsgraderna för tilluft och avluft för medströmsfallet för höga värden på frånluftens vatteninnehåll samt för motströmsfallet för måttliga och höga värden på frånluftens vatteninnehåll skiljer sig åt. Rotoruppfuktningensgraden η_r kan definieras som följer med hänsyn till flödeskvoten k mellan tilluftsmassflöde och frånluftsmassflöde samt fuktverkningsgraderna för tilluft η_{xt} och avluft η_{xa} enligt (10.1) samt redovisas i Figur 10.1-7 för både medström och motström för samma sju fall från tidigare avsnitt 3-9. Om flödeskvoten k är ett och de två fuktverkningsgraderna för tilluft η_{xt} och avluft η_{xa} är lika blir rotoruppfuktningensgraden η_r noll.

$$\eta_r = \eta_{xa} - k \eta_{xt} \quad (-) \quad (10.1)$$

Vattenmassflöde q_{vm} kg/s som tillförs rotorn kan skrivas som en funktion av vatteninnehåll för frånluft x_f kg/kg och uteluft x_u kg/kg samt rotoruppfuktningensgrad η_r och frånluftsmassflöde q_{fm} kg/s samt rotorfyllningsgraden f kan efter tiden t och för rotorkanalvolymen V skrivas som:

$$q_{vm} = (x_f - x_u) \eta_r q_{fm} \quad (\text{kg/s}) \quad (10.2)$$

$$f = q_{vm} t / \rho_v V \quad (-) \quad (10.3)$$

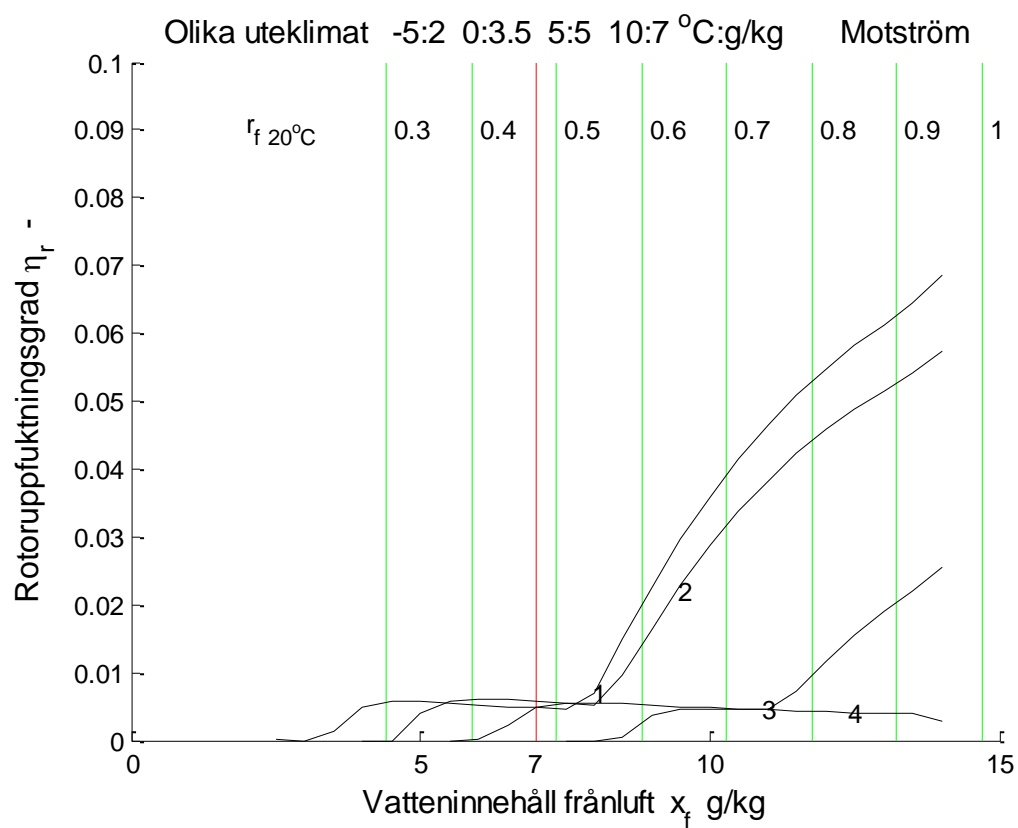
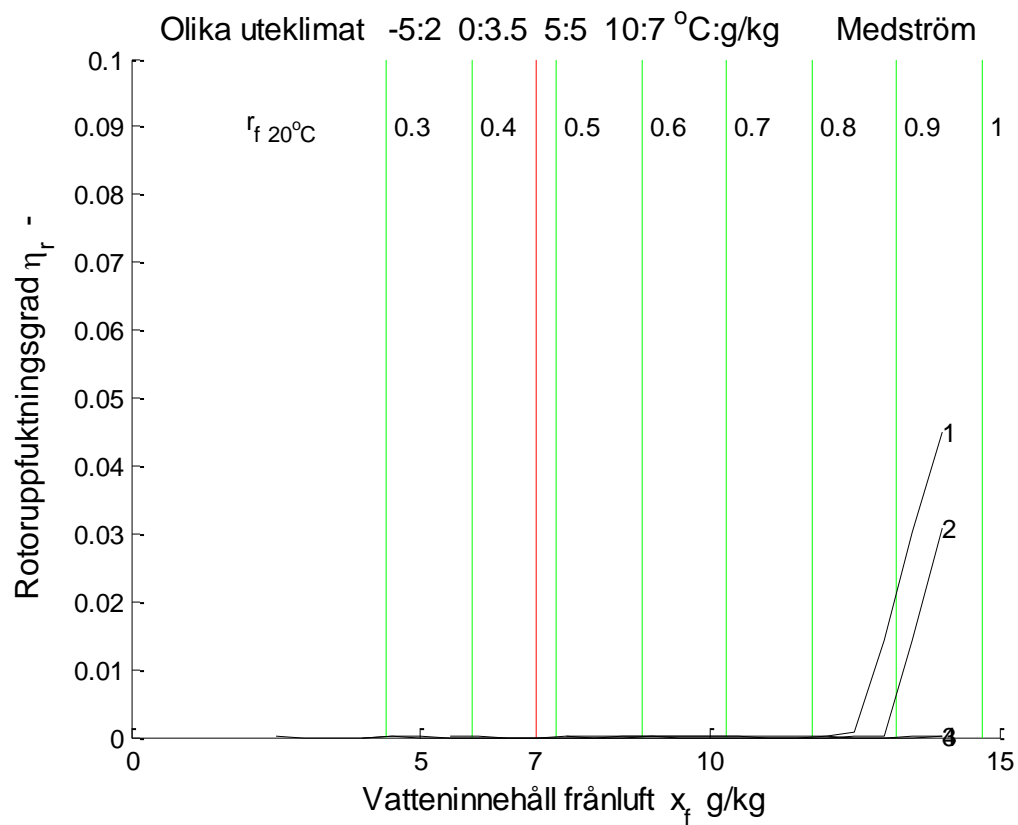
Luftmassflödet q_{fm} i (10.2) kan med rotorns lufttvärsnitt A och djup l samt genomströmningshastighet v skrivas enligt (10.4) samt rotorfyllningsgraden f enligt (10.3) kan nu med (10.2) och (10.4) och efter förenkling skrivas enligt (10.5):

$$q_{fm} = \rho A v \quad (\text{kg/s}) \quad (10.4)$$

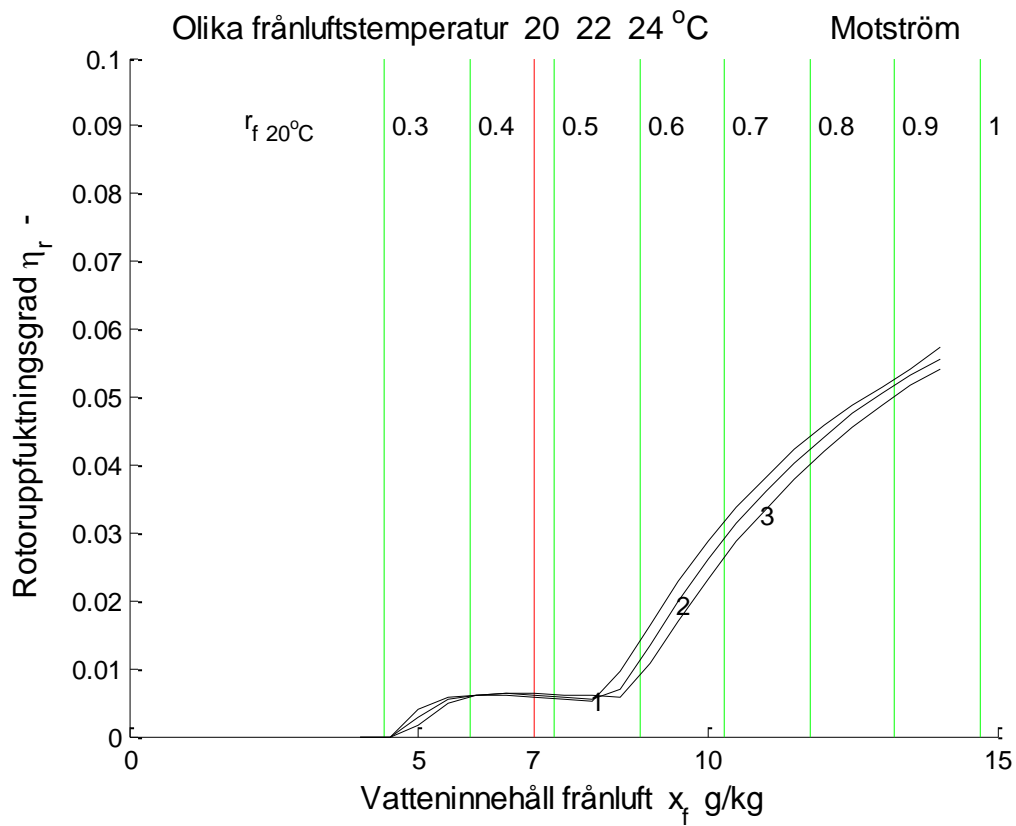
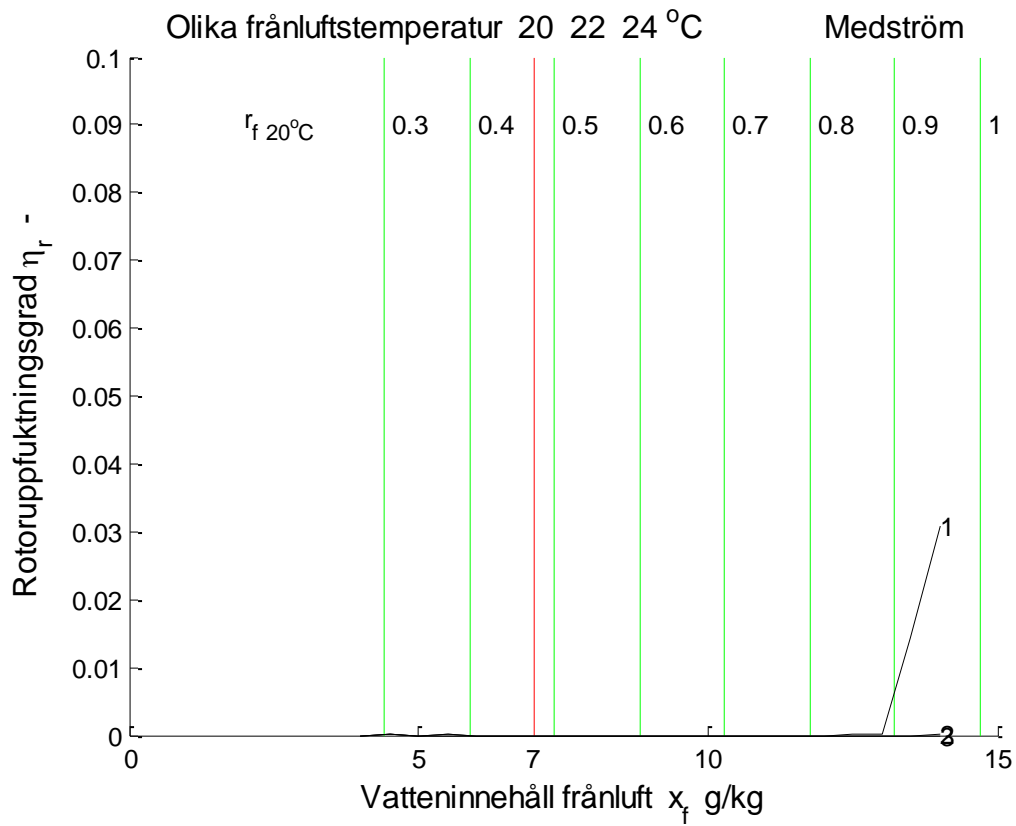
$$f = (x_f - x_u) \eta_r \rho v t / \rho_v l \quad (-) \quad (10.5)$$

Ett sifferexempel med $x_f - x_u = 0.005$ kg/kg, $\eta_r = 0.01$, $\rho = 1.2$ kg/m³, $v = 2$ m/s, $t = 36000$ s, $\rho_v = 1000$ kg/m³ och $l = 0.2$ m ger resultat $f = 0.0216$, vilket inte är försumbart. Rotorfyllningen är troligen inte jämnt fördelad i axiell led. Notera att tidsexponeringen är 10 h.

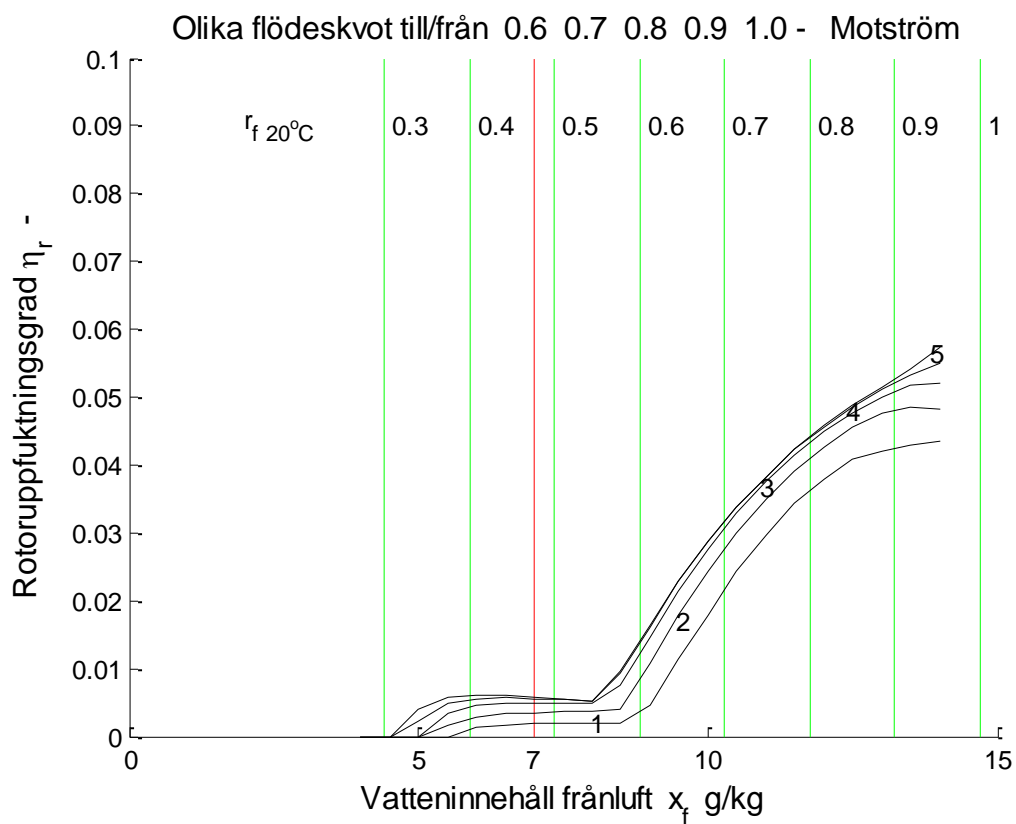
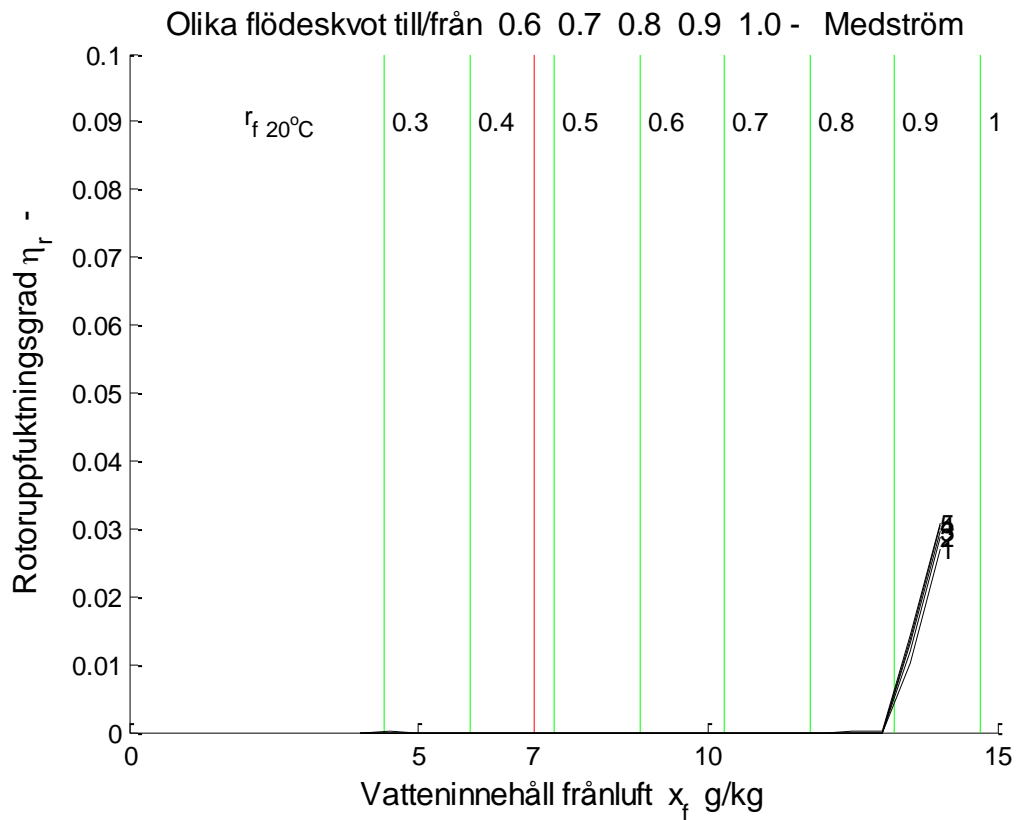
Kurvorna i Figur 10.1-7 visar att rotoruppfuktningensgraden är obetydlig för medströmsfallet utom för mycket höga värden på frånluftens vatteninnehåll. Rotoruppfuktningensgraden för motströmsfallet är begränsad och mindre än 0.01 för måttliga värden på frånluftens vatteninnehåll mindre än 7 g/kg samt ökar betydligt med högre värden på frånluftens vatteninnehåll. De måttliga värdena verkar bero på antalet element, vilket Figur 10.7 visar. Rotoruppfuktningensgraden verkar vara omvänt proportionell mot antalet element i detta område. Det normala antalet element 100 är kanske för litet. Detta borde utredas närmare, men görs inte här på grund av tidsbrist.



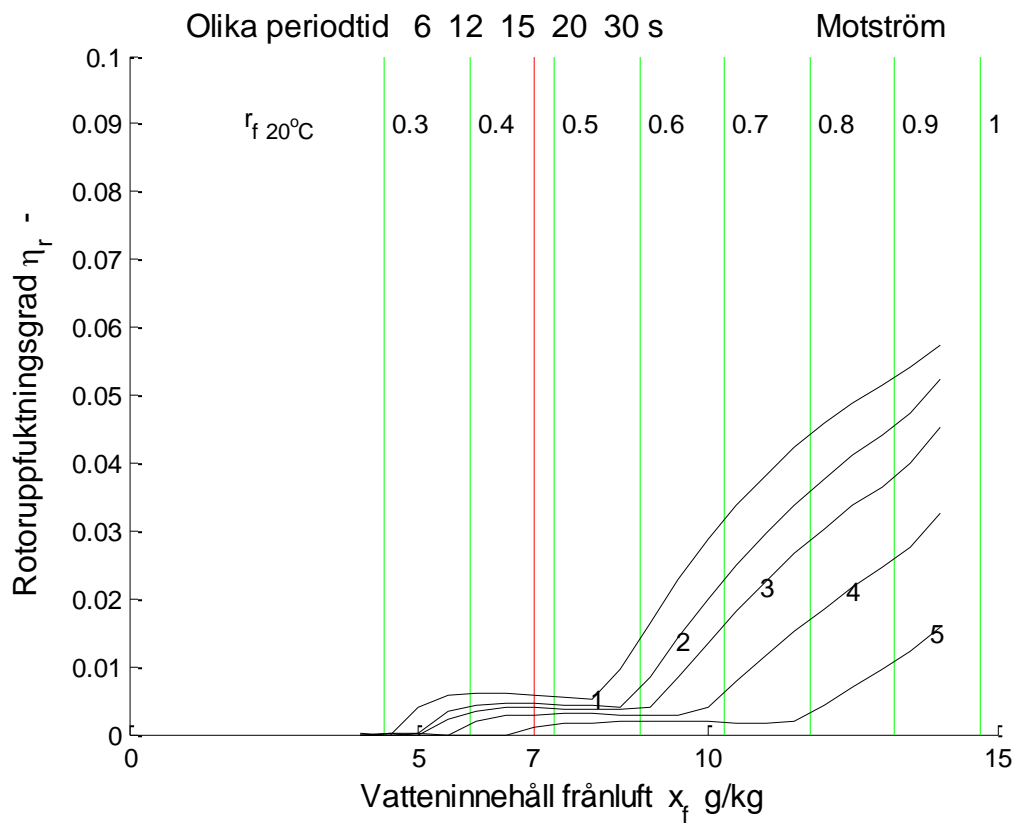
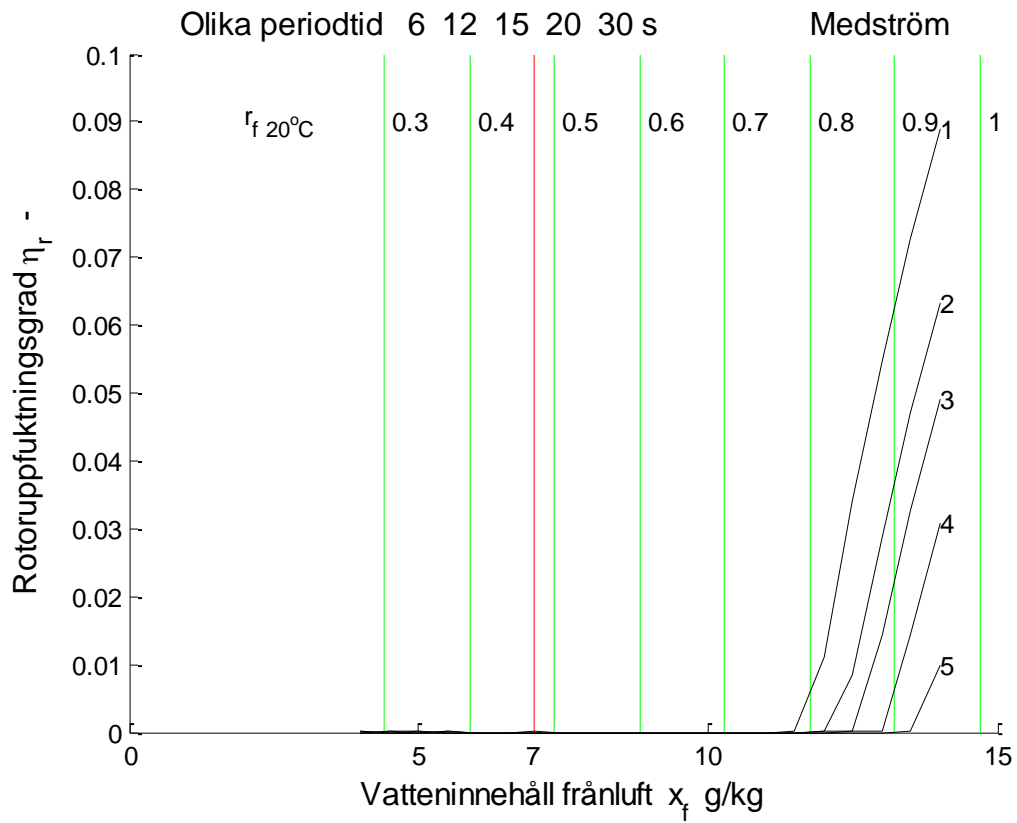
Figur 10.1 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



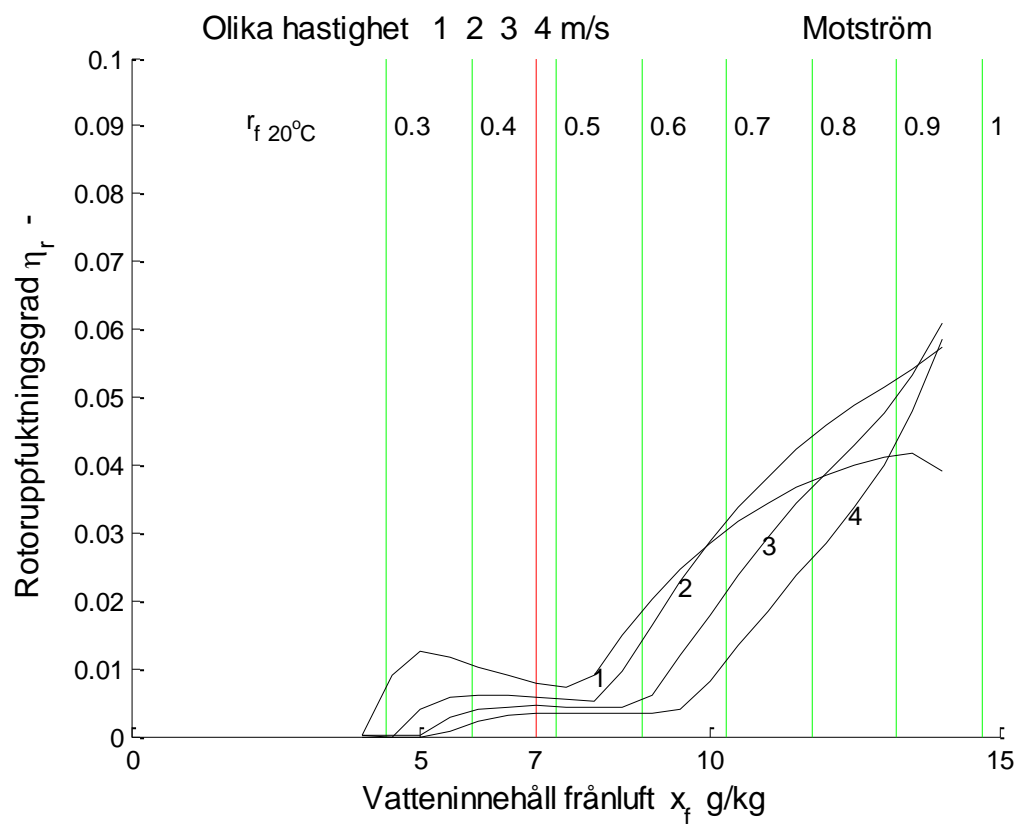
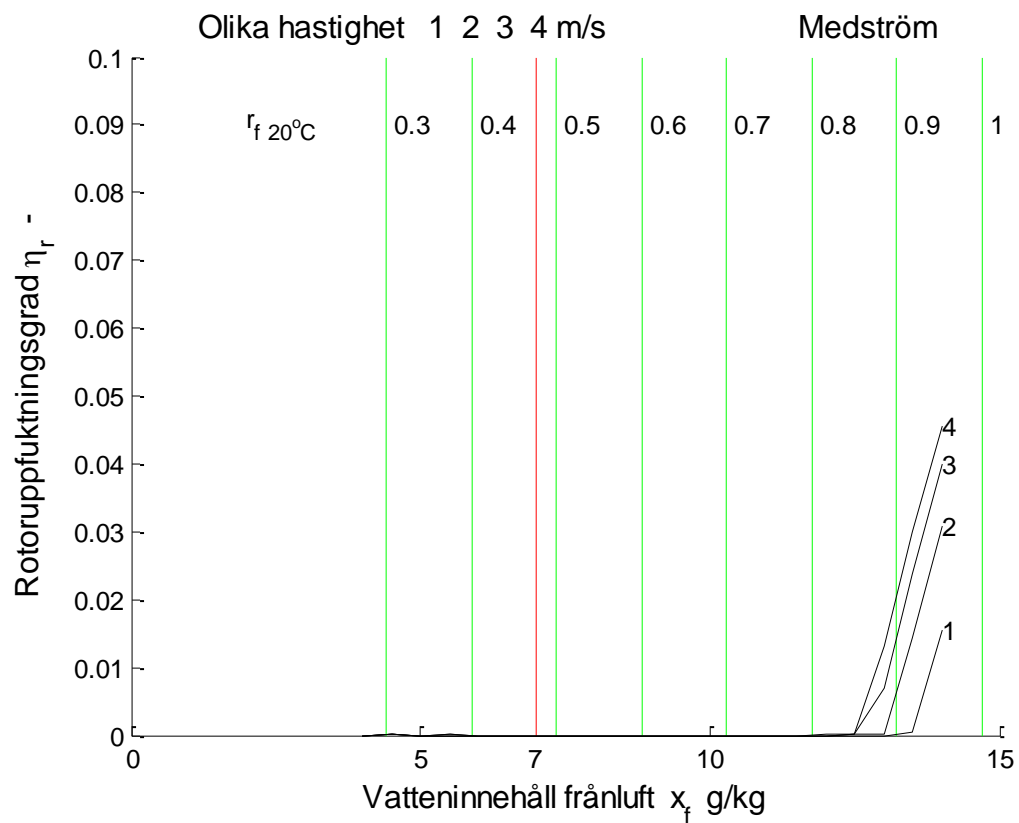
Figur 10.2 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika frånluftstemperatur.



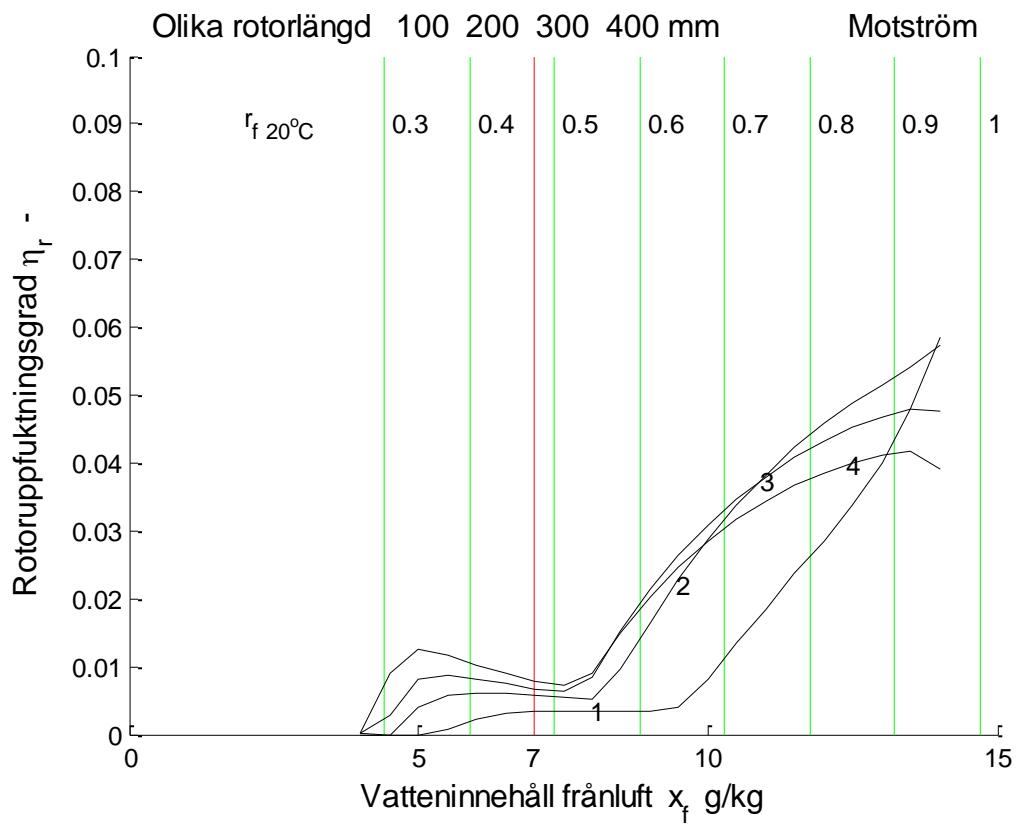
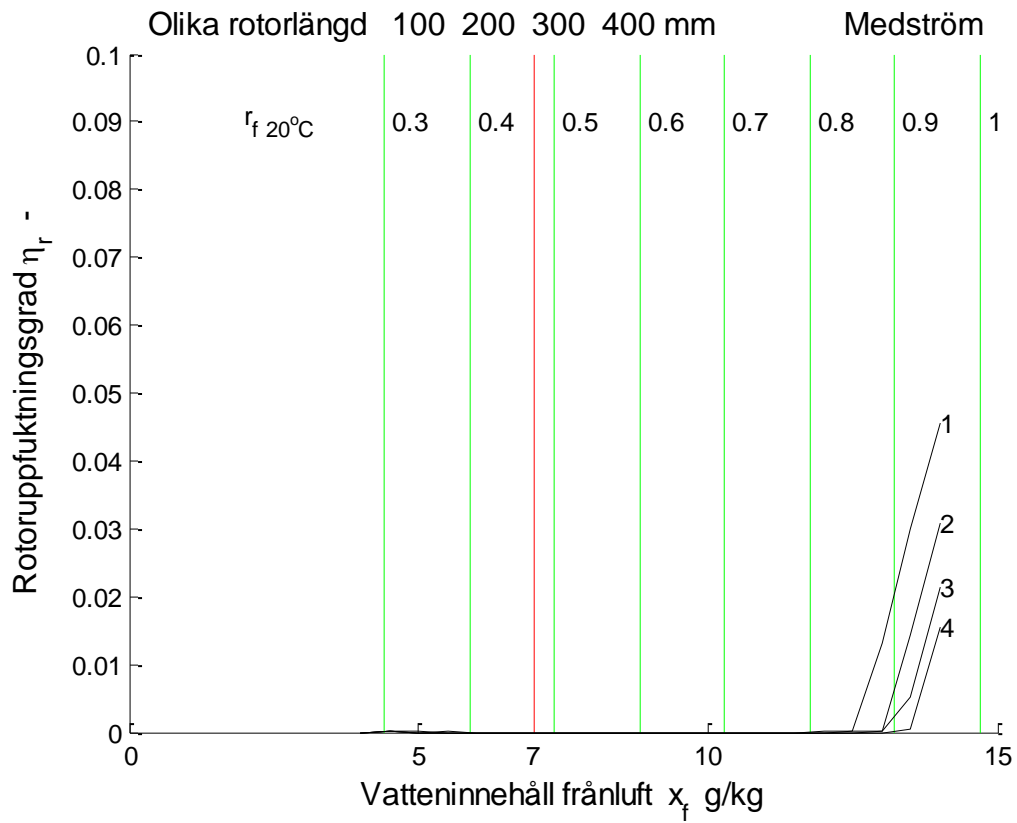
Figur 10.3 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot.



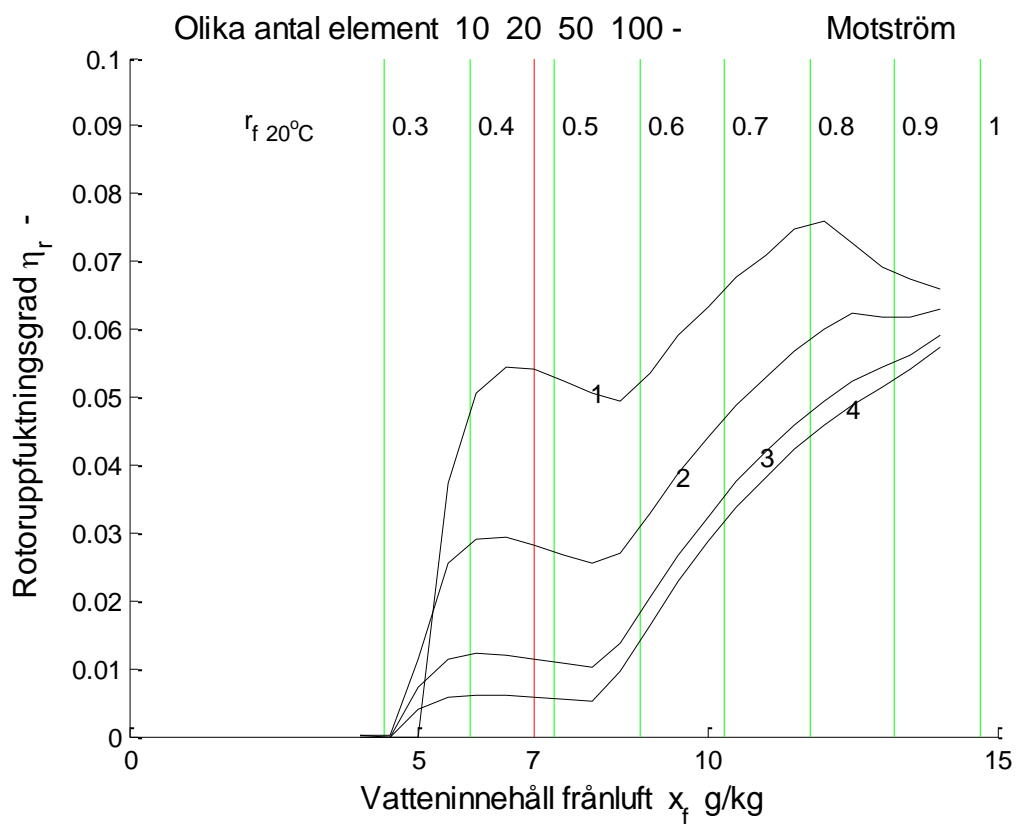
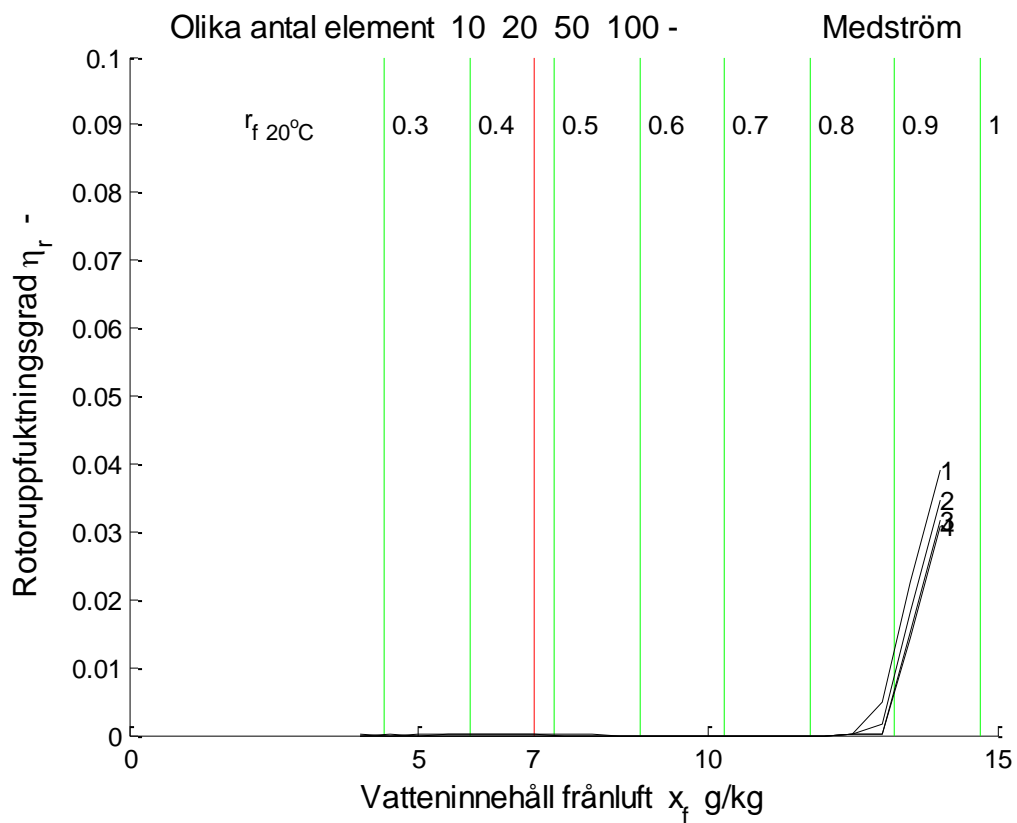
Figur 10.4 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika rotorhastighet.



Figur 10.5 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika lufthastighet.



Figur 10.6 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika rotorlängd.



Figur 10.7 Rotoruppfuktningsgrad η_r – som funktion av x_f g/kg och olika antal element.

11 Sammanfattning och slutsatser

Denna arbetsrapport visar att fuktverkningsgraden kan vara hög för en regenerativ värmewäxlare utan hygroskopiskt material för både medström och motström.

Avsnitt 2 beskriver en modell som bygger på fyra balansekvationer för luftens och rotorns temperatur och vatteninnehåll. Avgränsningar för denna modell är ingen värmeledning i axiell riktning, ingen renblåsning, ingen isbildning och ingen begränsning av vatten i rotorn. Strömningen genom rotorn sker med konstant massflöde i båda riktningarna.

Temperaturverkningsgraden för medström avtar något med ökande vatteninnehåll hos frånluften samt något mindre för motström.

Fuktverkningsgraden för både medström och motström ökar mer eller mindre linjärt med ökande vatteninnehåll hos frånluften för att därefter minska ökningstakten och plana ut. Det finns en kondensfri överföring eller fuktverkningsgrad enligt (2.6) större än noll för frånluft med lågt vatteninnehåll, eftersom modellen helt saknar renblåsning.

Entalpiverkningsgraden för både medström och motström avtar först med ökande vatteninnehåll för frånluften till dess att fuktåtervinningen inträffar och därefter ökar entalpiverkningsgraden. Frånluftens energiinnehåll beror direkt på frånluftens vatteninnehåll och utan fuktåtervinning försämras även entalpiverkningsgraden.

Medströmsfallet uppvisar sammantaget en betydande fuktöverföring som dock alltid är mindre än motströmsfallet.

De två verkningsgraderna för temperatur och fukt för tilluft och avluft skiljer sig något åt för medström och mer för motström, medan skillnaden är mindre för entalpi, som endast beror på rotorns uppfuktning. De två entalpiverkningsgraderna skall vara lika om rotorn varken fuktas upp eller torkas ut varv för varv.

Rotoruppfuktningensgraden är obetydlig för medströmsfallet utom för mycket höga värden på frånluftens vatteninnehåll. Rotoruppfuktningensgraden för motströmsfallet är begränsad och mindre än 0.01 för måttliga värden på frånluftens vatteninnehåll samt ökar betydligt med högre värden på frånluftens vatteninnehåll. De måttliga värdena verkar bero på antalet element, vilket Figur 10.7 visar. Rotoruppfuktningensgraden verkar vara omvänt proportionell mot antalet element i detta område. Det normala antalet element 100 är kanske för litet. Detta borde utredas närmare, men görs inte här på grund av tidsbrist.

Denna arbetsrapport är ett arbete utfört under kort tid. Det finns mycket mer att undersöka för främst motströmsfallet. Några exempel är modellering av avrinning från en våt rotor och isbildning i en rotor samt modellering av luftgenomströmning av en våt eller frostad rotor.