LUND UNIVERSITY

Fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling

Jensen, Lars

2010

Link to publication

Citation for published version (APA):
Jensen, L. (2010). *Fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling*. (TVIT; Vol. TVIT-7048). [Publisher information missing].

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

Fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2010
Rapport TVIT--10/7048

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 rökspridning 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.

Fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2010
ISRN LUTVDG/TVIT--10/7048--SE(70)

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

Innehållsförteckning

1 Inledning och problemställning 5
Grundsamband och fuktfaktor 5
Gränsvärden 6
Basfall 6
Disposition 6

2 Värmeväxling utan kondens 7

3 Värmeväxling med en enkel modell 13
Omfattningen av kondens 13
Värmeväxling uppdelad i en torr och en våt del 14

4 En fullständigare modell 23

5 Undersökning av olika rotorlängd 25

6 Undersökning av olika rotorhastighet 27

7 Undersökning av olika lufthastighet 29

8 Undersökning av olika utetemperatur 31

9 Undersökning av olika frånluftstemperatur 33

10 Undersökning av olika antal element 35

11 Undersökning av olika parallellflöde 37

12 Undersökning av olika flödeskvot 41

13 Undersökning av olika klimat 43

14 Undersökning av olika tidsförlopp 53

15 Undersökning av luftflöden i praktiken 61

16 Sammanfattning och slutsatser 69
Tumregler 70
Åtgärder för bättre drift 70
Forskningsbehov 70

1 Inledning och problemställning

Syftet med denna arbetsrapport är att undersöka fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling med en ren metallrotor. Verkningsgraden för fuktöverföring ligger endast något under temperaturverkningsgraden för fallet med hygroskopiska rotormaterial. Fläkt Woods redovisar i ett diagram i en teknisk beskrivning Econovent_PUM att fuktverkningsgraden är för en hygro-skopisk rotor 0.63 för halvfart och 0.71 vid helfart och för en kompositrotor 0.67 respektive 0.73. Fuktverkningsgraden för en ren metallrotor anges i ett sifferexempel till 0.45.

En enkel analys i ett Mollier-diagram visar att fuktåtervinning för en ren metallrotor kan bli stor. Fuktåtervinningen ökar ju mer mättad uteluft och frånluft är. Ett extremfall är återvinning mellan helt mättad uteluft och frånluft.

Grundsamband och fuktfaktor

Fuktåterföringen har ingen betydelse för en byggnad utan något fuktillskott, eftersom inne- och uteluftens vatteninnehåll då är de samma. Fuktåterföring tillsammans med ett stort fukttillskott medför att uppfuktningen kan öka flera gånger själva fukttillskottet. Ett enkelt statiskt samband mellan frånluftens vatteninnehåll x_f g/kg, uteluftens vatteninnehåll x_u g/kg, fukttillskottet Δx g/kg och fuktverkningsgraden η_x – är följande:

$$x_f = x_u + \Delta x / (1 - \eta_x) \qquad \text{(g/kg)} \qquad (1.1)$$

En fuktverkningsgrad om 0.5 ger en fördubblad uppfuktning av uteluften till frånluft. Det är fuktfaktorn $1/(1 - \eta_x)$ som svarar för fördubblingen.

Fuktverkningsgraden η_x i (1.1) ökar med både uteluftens och frånluftens vatteninnehåll. Detta skapar en form av självförstärkning. Naturliga frågor är därför: Finns det ett fukttillskott för vilket vatteninnehållet i rumsluft/frånluft bara ökar tills luften är helt mättad? Har sambandet (1.1) alltid en stabil lösning för alla fukttillskott?

Det statiska grundsambandet (1.1) kan även skrivas om till en dynamisk modell som beskriver fuktlagring i luftvolymen och fuktbuffring i olika material, vilket ges av vänsterledet i samband (1.2) nedan. Fuktbuffringsförmågan kan jämställas med en extra luftvolym. Detta innebär att luftomsättningstiden ur fuktsynpunkt T är större än den normala ur ventilationssynpunkt.

$$T\, dx_f/dt = - x_f + x_u + \Delta x / (1 - \eta_x) \qquad \text{(g/kg)} \qquad (1.2)$$

Notera att båda sambanden (1.1-2) förutsätter att det inte finns infiltration, exfiltration eller avfuktning i den eller de lägenheter som betjänas av ventilationssystemet .

Gränsvärden

Det finns två gränsvärden som berör uppfuktning och fukthalt i rumsluft. Uppfuktningen av rumsluft bör inte regelmässigt överstiga 2.5 g/kg (3 g/m^3) 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.

Basfall

Många beräkningar i 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. Alla rotorer med samma basdata har samma egenskaper.

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. Rotorkanallängd är strömningsvägens längd, rotorns axiella längd eller djup.

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.

Disposition

Denna arbetsrapport behandlar fuktåtervinning i ett flertal avsnitt. I avsnitt 2 undersöks först för vilka ute- och inneklimat samt fukttillskott som det inte blir kondens och därmed inte heller någon fuktåtervinning.

Fuktåtervinning undersöks med en enkel modell i avsnitt 3, där värmeväxlaren delas upp i en torr och en våt del. En fullständigare modell beskrivs i avsnitt 4, där en kanal i en regenerativ värmeväxlare 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.

Den fullständigare modellen undersöks i avsnitt 5-12 med avseende på sex variablers betydelse för fuktåtervinningen. Variablerna är rotorlängd, rotorhastighet, lufthastighet, utetemperatur, frånluftstemperatur, antalet beräkningselement, parallellflöde (extra ventilation utöver den nominella) och flödeskvot mellan tilluft och frånluft (flödesobalans). Temperaturverkningsgrad, fuktverkningsgrad och nödvändigt fukttillskott för att nå ett givet fukttillstånd inne redovisas på samma sätt för de sex delstudierna.

Samma modell undersöks också med avseende på både ute- och inneklimat i avsnitt 13 och olika tidsförlopp i avsnitt 14. Hur fuktfaktorn påverkas av fuktverkningsgrad, parallellflöde och flödeskvot undersöks i avsnitt 15. En uppsummering görs sist i avsnitt 16.

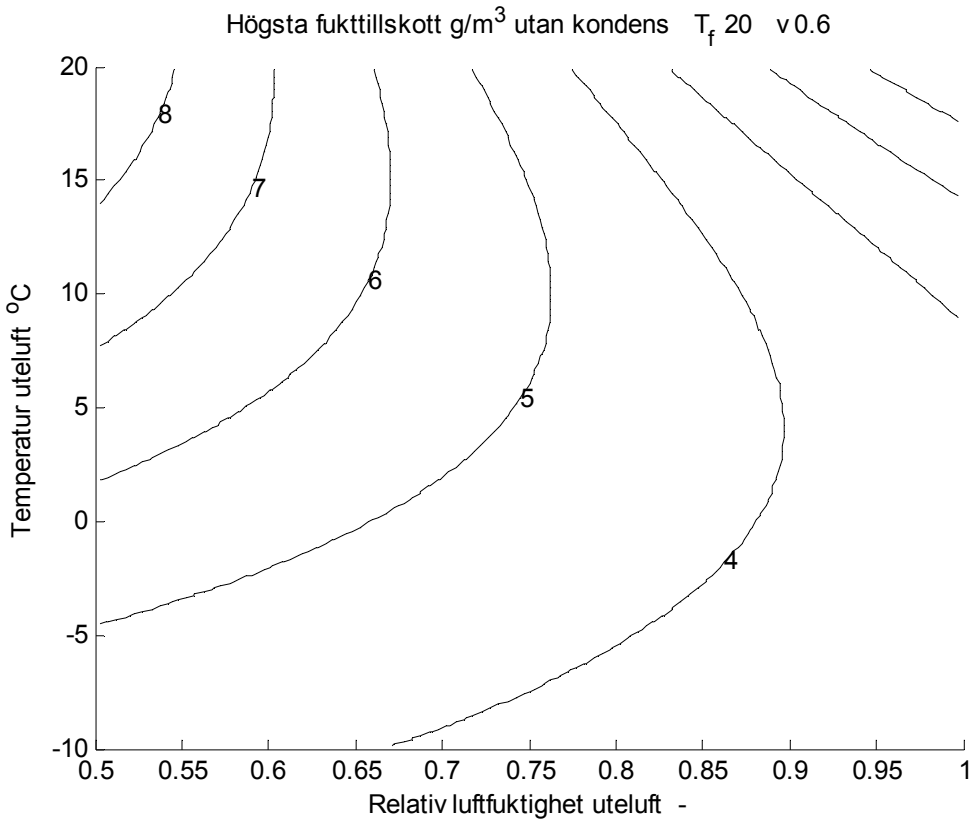
2 Värmeväxling utan kondens

Värmeväxling mellan uteluft och frånluft kan ske utan kondens om fukttillskottet till frånluften är begränsat i förhållande till temperaturverkningsgraden. Gränsen eller det högsta tillåtna fukttillskottet kan beräknas som funktion av uteluftens temperatur och relativa luftfuktighet för en given frånluftstemperatur och temperaturverkningsgrad.

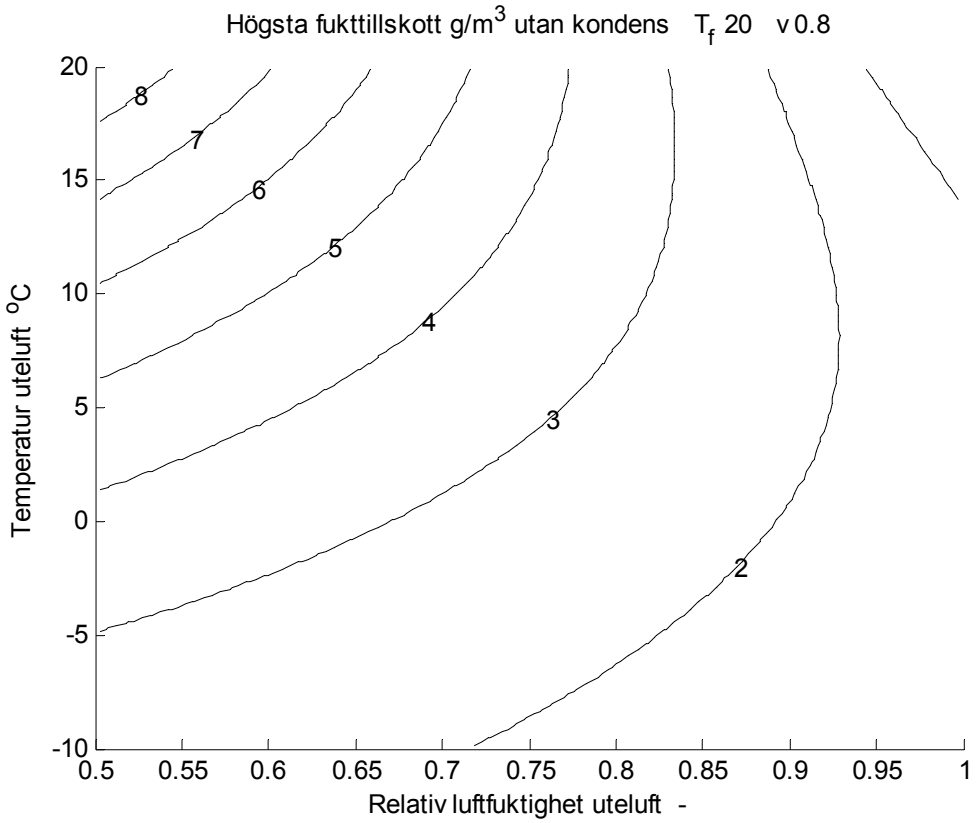
Fyra fall redovisas i Figur 2.1-4 med högsta fukttillskott som isodiagram med x-axel uteluftens relativa luftfuktighet och y-axel uteluftens temperatur för kombinationerna mellan frånluftstemperaturerna 20 och 25 °C och temperaturverkningsgraderna 0.6 och 0.8. Isolinjerna i Figur 2.1-4 visar att det blir kondens till höger om dessa för fukttillskott lika med eller större isolinjens värde.

En alternativ redovisning görs i Figur 2.5-8 med frånluftstemperatur 20 och 25 °C och relativ luftfuktighet 0.8 och 1.0. Temperaturverkningsgraden är x-axel. Uteluften är oftast nästan mättad vintertid. Isolinjerna i Figur 2.5-8 visar att det blir kondens till höger om dessa för fukttillskott lika med eller större isolinjens värde.

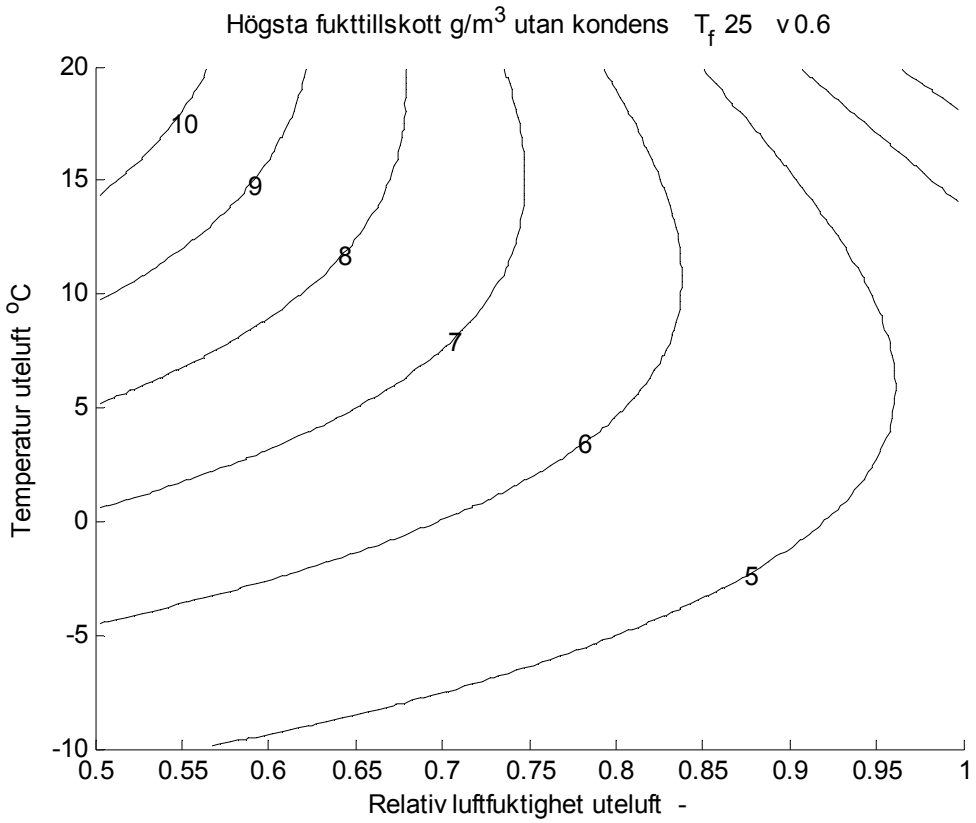
En genomgång av de redovisade fallen i Figur 2.1-8 att kondens kan vara svår att undvika för fukttillskott över 2.5 g/kg. Omfattningen ökar med lägre frånluftstemperatur och högre temperaturverkningsgrad. Lägre fukttillskott som 1 g/kg behöver inte resultera i kondens för de valda frånluftstemperaturerna och temperaturverkningsgraderna.



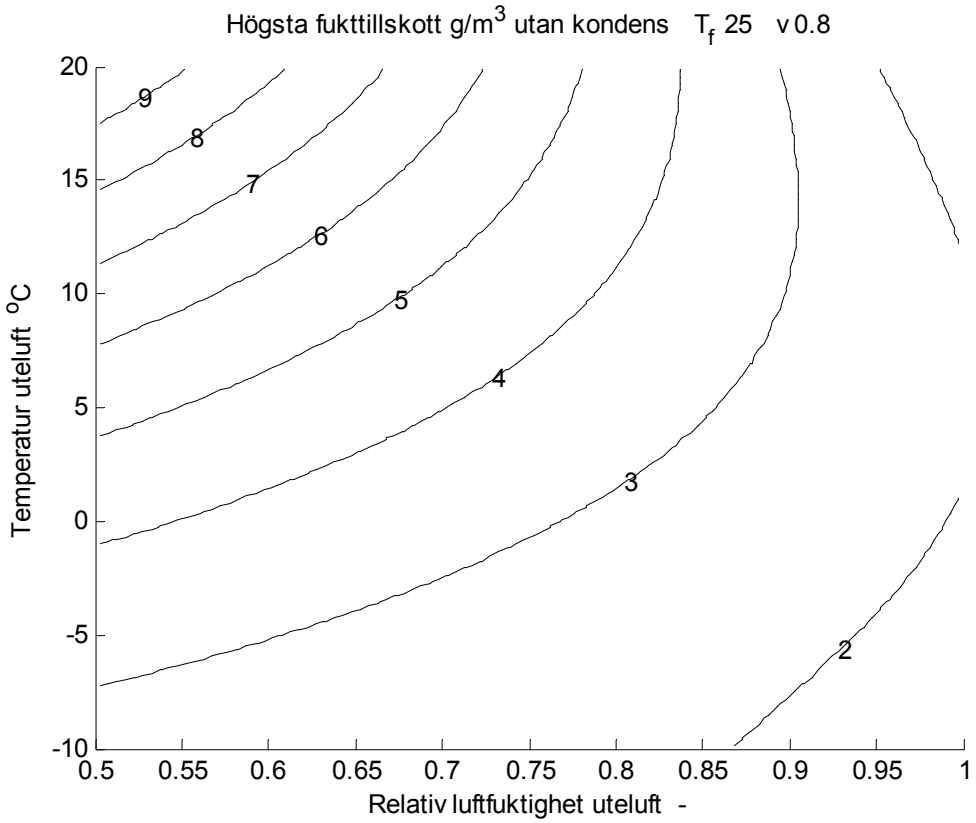
Figur 2.1 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 20 °C och v 0.6.



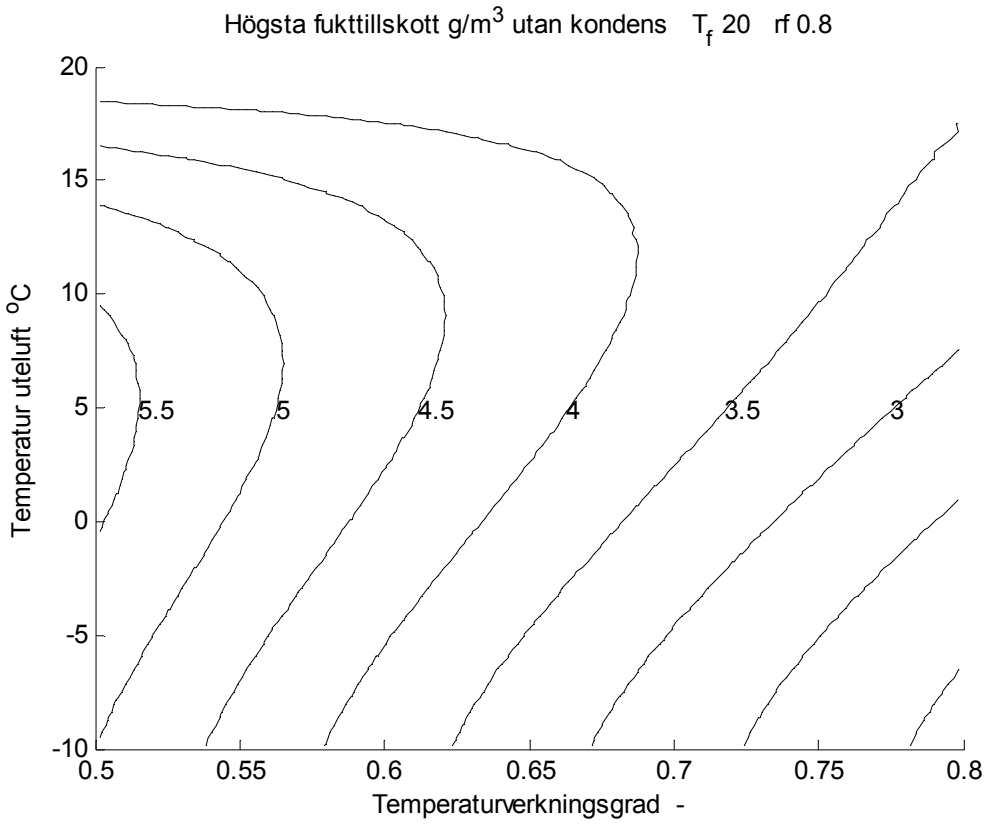
Figur 2.2 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 20 °C och v 0.8.



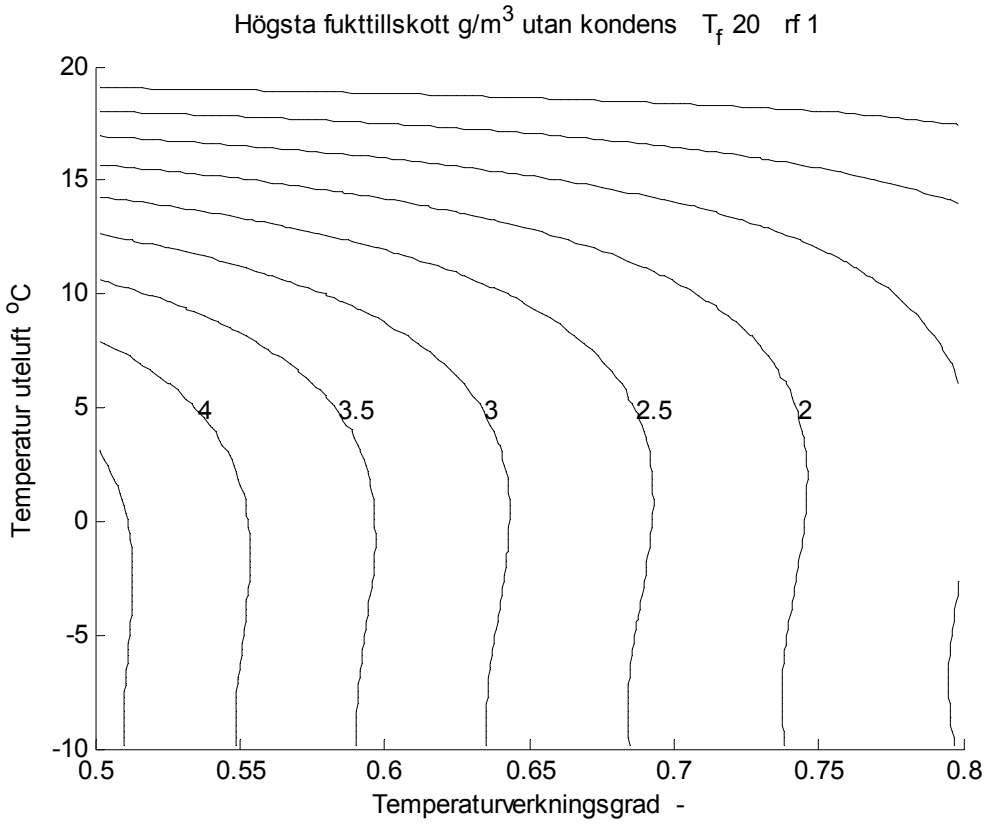
Figur 2.3 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 25 °C och v 0.6.



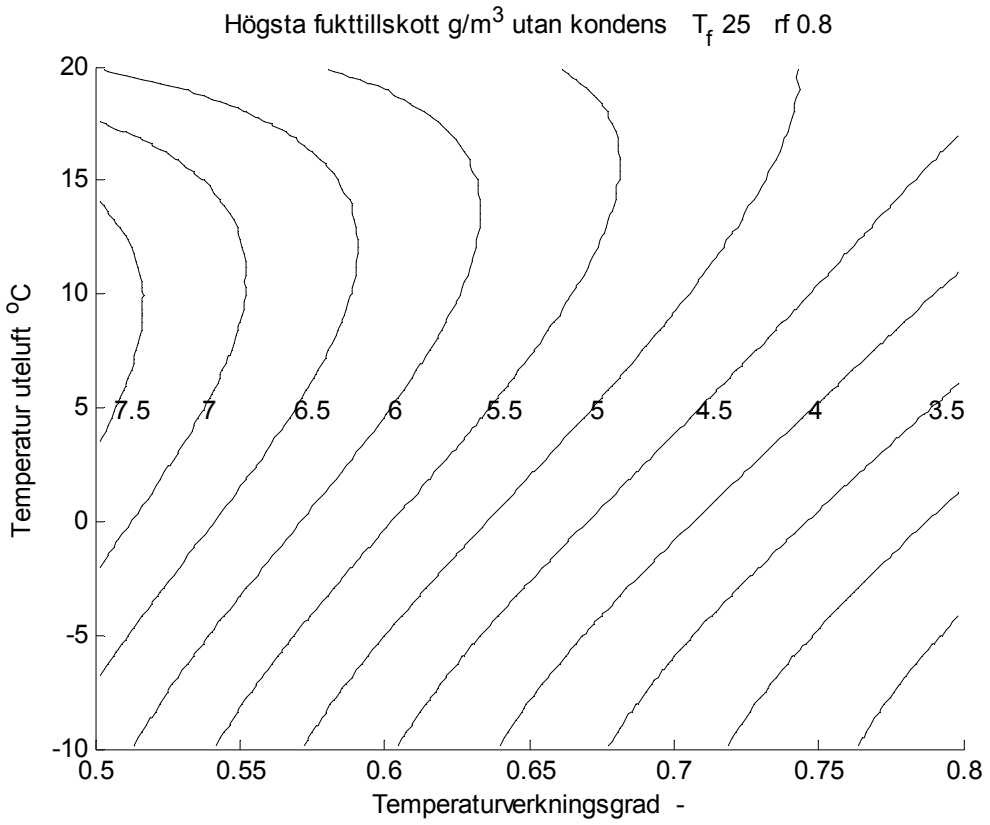
Figur 2.4 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 25 °C och v 0.8.



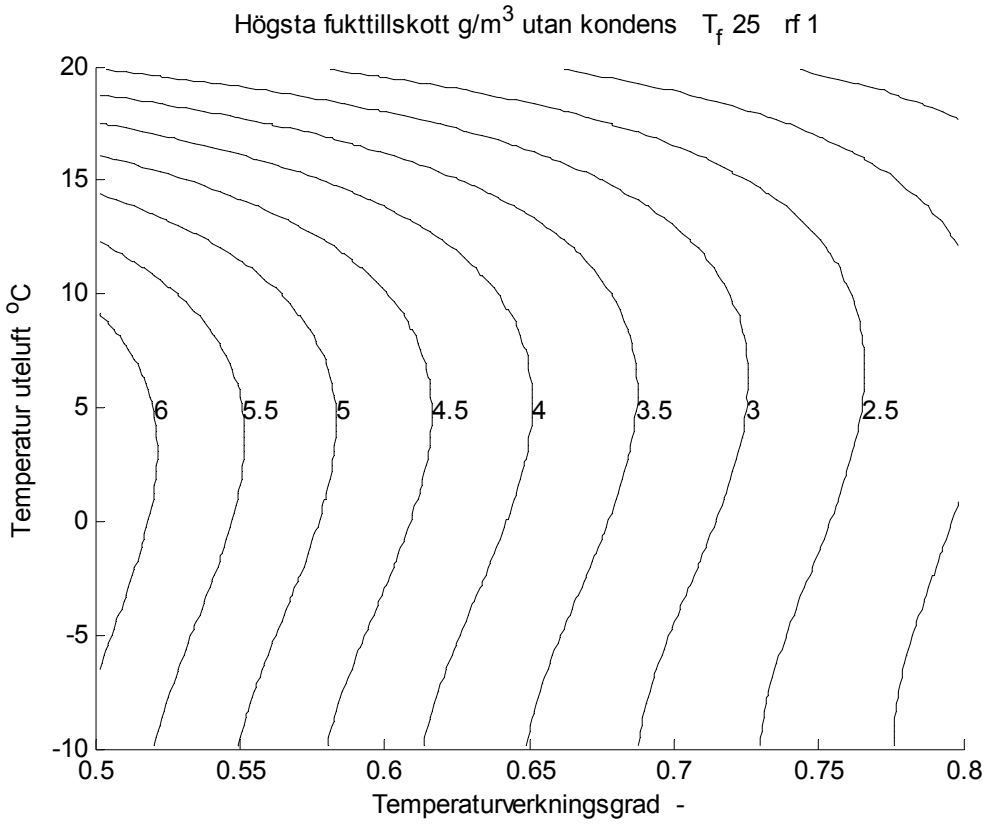
Figur 2.5 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 20 °C och r_u 0.8.



Figur 2.6 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 20 °C och r_u 1.



Figur 2.7 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 25 °C och r_u 0.8.



Figur 2.8 Högsta fukttillskott utan kondens vid värmeväxling med T_f 20 °C och r_u 1.

3 Värmeväxling med enkel modell

I detta avsnitt undersöks först om strömningen kan påverkas av kondens som tar plats i en rotor vid en given avfuktning av luften som passerar och därefter beräknas fuktverknings-graden med en enkel modell genom att dela upp värmeväxlingen i en torr och en våt den som för en rekuperativ värmeväxlare.

Omfattningen av kondens

Några naturliga frågor är följande Kan kondens försvåra genomströmningen i en rotorkanal? och Vilken tjocklek har vattenfilmen för en given avfuktning?

Båda frågorna kan besvaras genom att beräkna den vattenvolym som kondenserar och med den beräkna den antagna vattenfilmens tjocklek. Det som har betydelse är den mängd luft som passerar en rotorkanal under en halvperiod i förhållande till rotorkanalens kontaktyta under förutsättning att vattenfilmens tjocklek är mycket mindre än rotorkanalens diameter. Inför följande parametrar:

d	rotorkanaldiameter, m
l	rotorkanallängd, m
p	rotorns periodtid, s
t	tjocklek vattenfilm, m
v	luftströmningshastighet, m/s
Δx	avfuktning, g/m^3
ρ	densitet för vatten, kg/m^3

Den vattenmängden m som kondenserat under en halvperiod $p/2$ kan skrivas som:

$$m = \pi d^2 v p \Delta x / 8000 \qquad \text{(kg)} \qquad (3.1)$$

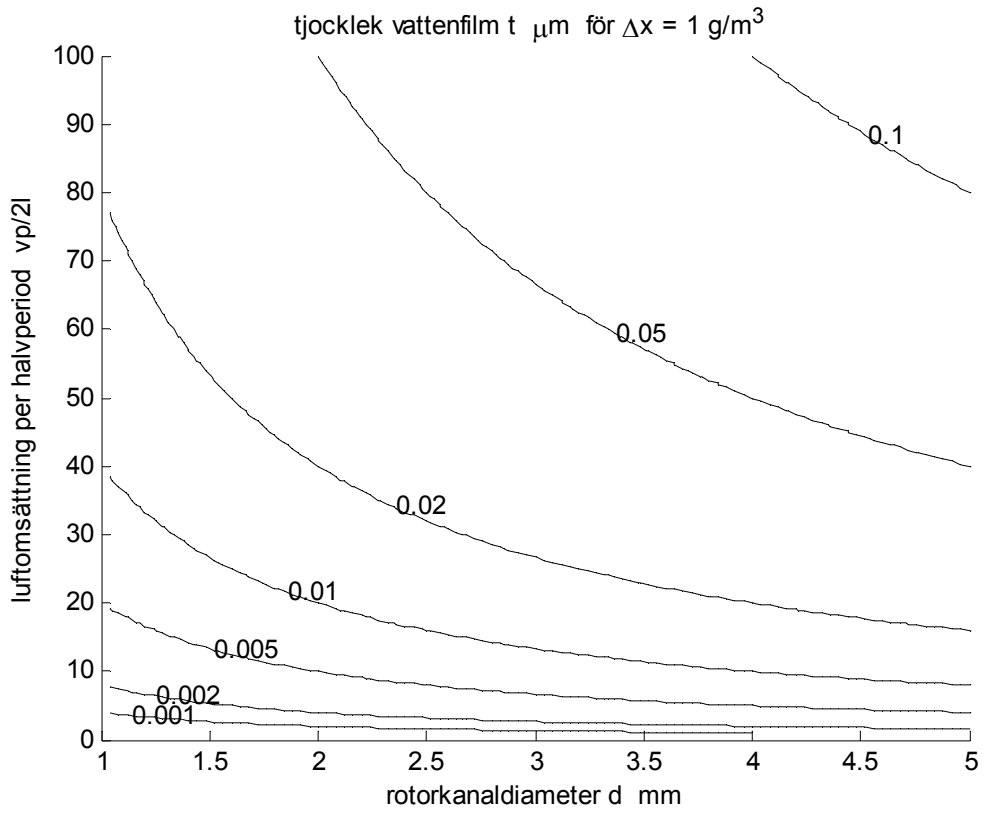
Vattenfilmens tjocklek t kan i sin tur skrivas som:

$$t = m / \pi d l \rho \qquad \text{(m)} \qquad (3.2)$$

Vattenfilmens tjocklek t enligt (3.2) kan efter förenkling med (3.1), förkortning och införande av luftomsättningen $n = vp/2l$ och vattnets densitet ρ 1000 kg/m^3 skrivas som:

$$t = d n \Delta x / 4 \qquad \text{(µm)} \qquad (3.3)$$

Sambandet (3.3) redovisas i Figur 3.1 som ett isodiagram för vattenfilmens tjocklek med x-.axel rotorkanaldiameter och som y-axel luftomsättningen under en halvperiod. Isolinjerna visar att vattenfilmen är ytterst tunn och kan inte påverka genomströmningen om ingen ackumulering sker.



Figur 3.1 Tjocklek för kondensvattenfilm som funktion av kanaldiameter och luftomsättning per halvperiod för avfuktningen 1 g/kg.

En tillämpning av Figur 3.1 med basfallets lufthastighet 2 m/s, periodtid 6 s, rotorlängd 0.2 m och rotorkanaldiameter 2 mm ger en luftomsättning på 30 och därmed en vattenfilmtjocklek på mindre än 0.02 μm, vilket inte kan påverka geometrin för genomströmning. Notera att vattenfilmen är lika fördelad över hela rotorlängden.

Värmeväxling uppdelad i en torr och en våt del

En enkel modell för fuktöverföring vid regenerativ värmeväxling formuleras, beskrivs och tillämpas i detta avsnitt med följande antaganden.

- ingen ackumulering av vatten i rotorn
- ingen strömning av vatten i rotor
- endast kondensering och avdunstning
- vattenfilmen påverkar inte strömningen
- uteluftsflödet är normaliserat till värmeöverföringsförmågan 1 W/K
- frånluftsflödet är normaliserat till värmeöverföringsförmågan 1 W/K
- fuktverkningsgraden och entalpiverkningsgraden vid våt värmeväxling är lika med temperaturverkningsgraden vid torr värmeväxling och för samma växlareyta

Värmeväxlingen delas upp i en torr och en våt del. Regenerativ värmeväxling med hög verkningsgrad kan beräknas som för rekuperativa värmeväxlare.

Följande variabler kommer att användas där *T, x* och *i* står för luftens torr temperatur °C, vatteninnehåll g/kg och värmeinnehåll kJ/kg:

T_f x_f	frånluft även för rumsluft
T_d x_d i_d	frånluft övergång torr-våt värmeväxling
T_g x_g i_g	uteluft övergång våt-torr värmeväxling
T_u x_u i_u	uteluft
v	temperaturverkningsgrad för hela växlaren
v_t	temperaturverkningsgrad för torra delen av växlaren
v_v	temperaturverkningsgrad för våta delen av växlaren
Ah	värmeväxlarens värmeöverföringsförmåga, W/K
Ah_t	torra delens värmeöverföringsförmåga, W/K
Ah_v	våta delens värmeöverföringsförmåga, W/K

För värmeväxlarens variabler/parametrar gäller följande samband:

$$Ah = Ah_t + Ah_v \qquad \text{(W/K)} \qquad (3.4)$$

$$v = Ah / (Ah + 1) \qquad \text{(-)} \qquad (3.5)$$

$$v_t = Ah_t / (Ah_t + 1) \qquad \text{(-)} \qquad (3.6)$$

$$v_v = Ah_v / (Ah_v + 1) \qquad \text{(-)} \qquad (3.7)$$

En anmärkning är att verkningsgrad betecknas med v i detta avsnitt, medan tecknet η förekommer i andra avsnitt i arbetsrapporten.

För värmeväxlarens torra del gäller följande samband:

$$v_t = (T_d - T_f) / (T_g - T_f) \qquad \text{(-)} \qquad (3.8)$$

För värmeväxlarens våta del gäller följande två samband:

$$v_v = (i_g - i_u) / (i_d - i_u) \qquad \text{(-)} \qquad (3.9)$$

$$v_v = (x_g - x_u) / (x_d - x_u) \qquad \text{(-)} \qquad (3.10)$$

Luftens värmeinnehåll i beräknas med torr temperatur T och vatteninnehåll x enligt:

$$i = 1.06\ T + 2.49\ x + 0.00193\ T\ x \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad (3.11)$$

Rumsluften tillförs ett vattentillskott om Δx g/m^3, vilket efter omräkning med densiteten 1.2 kg/m^3 till sorten g/kg är skillnaden mellan frånluftens vatteninnehåll x_f och tilluftens vatteninnehåll lika med uteluftens vatteninnehåll efter den våta värmeväxlingen x_g.

$$x_f = x_g + \Delta x/1.2 \qquad \text{(g/kg)} \qquad (3.12)$$

Givna variabler/parametrar är uteluftens tillstånd T_u, x_u och i_u frånluftens torra temperatur T_f, fukttillskottet Δx och verkningsgraden v.

Det går inte att direkt lösa ut frånluftens (rumsluftens) tillstånd eller fuktöverföringen med sambanden (3.4-12). En säker lösningsmetod är att använda sig av intervallhalvering för att bestämma frånluftens vatteninnehåll. Detta har tillämpats med tjugo halveringar. Slutintervallet blir endast 10^{-6} av startintervallet.

Metoden har tillämpas på totalt sex fall med två olika frånluftstemperaturer, 20 och 25 °C, och tre olika fukttillskott 1, 2 och 3 g/m^3. Den regenerativa växlarens temperaturverkningsgrad är 0.8. Uteluftens tillstånd har omfattat temperaturintervallet (0,20) °C och relativa luftfuktighetsintervallet (0.5,1.0). Resultatet redovisas i Figur 3.2-13 med fuktåtervinningsgrad och relativa luftfuktighet inomhus med udda respektive jämna nummer.

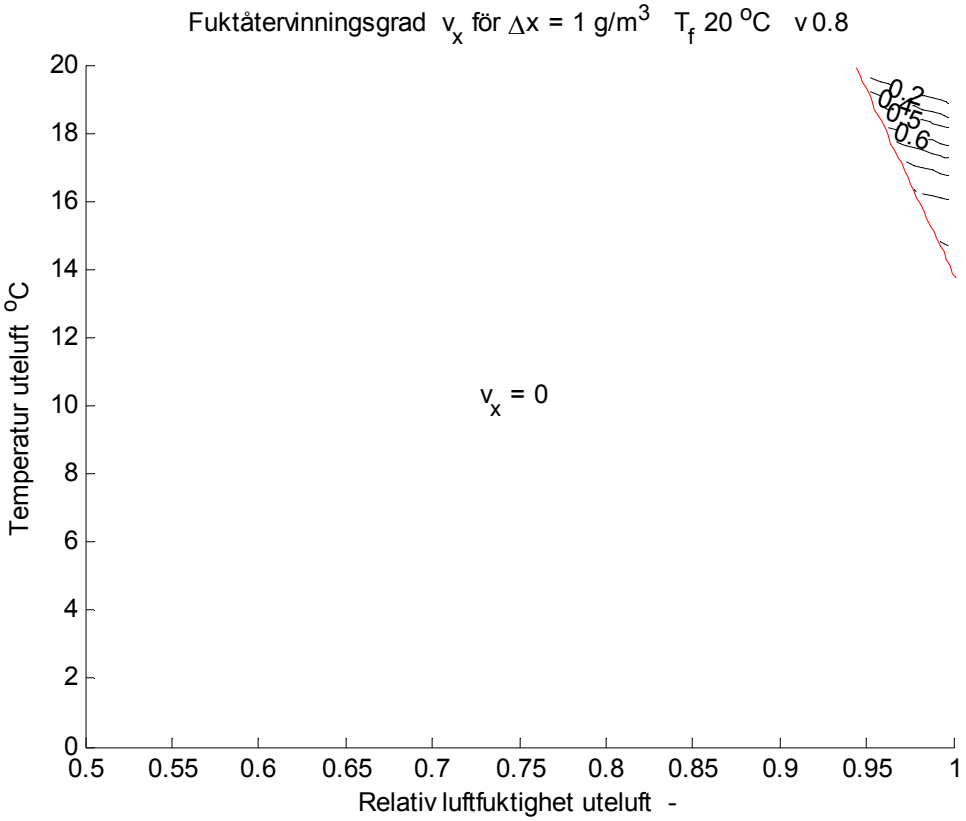
Gränsen för kondens finns inritad i samtliga Figur 3.2-3.13 och till vänster on denna sker ingen kondensering, vilket även anges med texten $v_x = 0$ att fuktverkningsgraden är noll. Kondenslinjen försvinner till höger till en del och i ett fall helt.

Fuktåtervinningen i Figur 3.2(2)12 har en språngvis övergångvid kondensgränsen, vilket beror på att vid lite kondens ökar frånluftens vatteninnehåll och även dess daggpunktstemperatur, vilket minskar den torra verkningsgraden och ökar den våta verkningsgraden, vilket i sin tur ökar kondenseringen ytterligare.

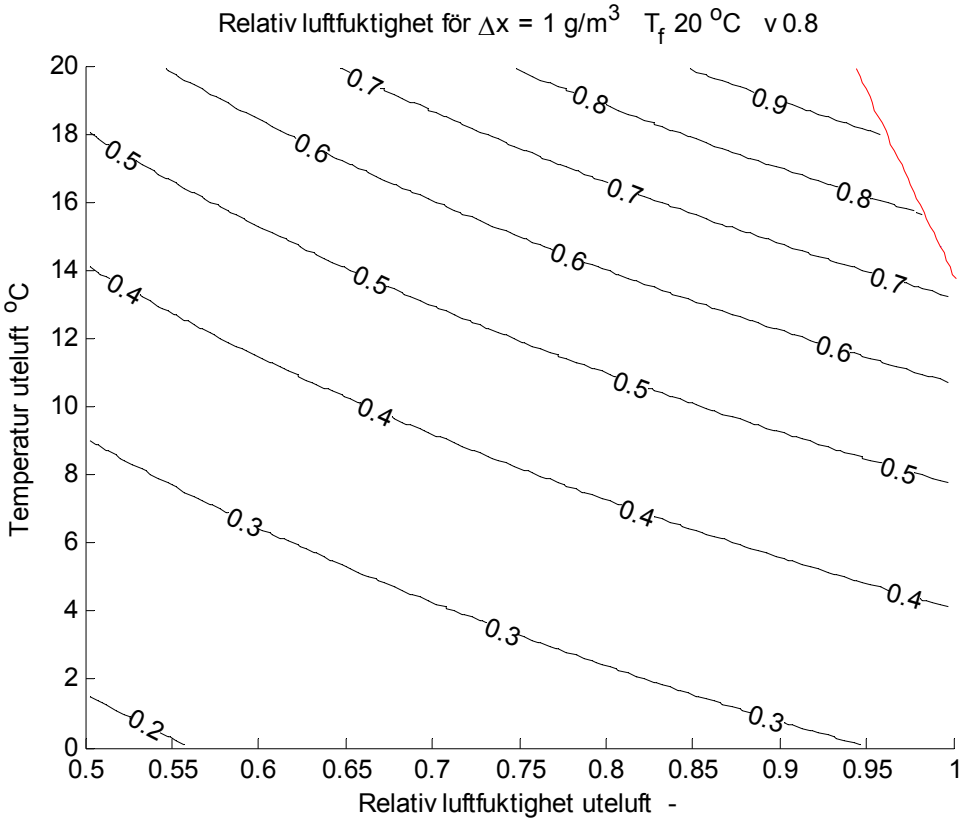
Denna språngvisa ändring syns i den relativa luftfuktigheten som är identisk för alla fall ytan kondens till vänster om kondenslinjen.

Slutsatsen som kan dras för redovisad fuktverkningsgrad i Figur 3.2(2)12 är att fuktverkningsgraden kan bli mycket hög och nära den antagna temperaturverkningsgraden 0.8 särskilt för nästan mättad uteluft.

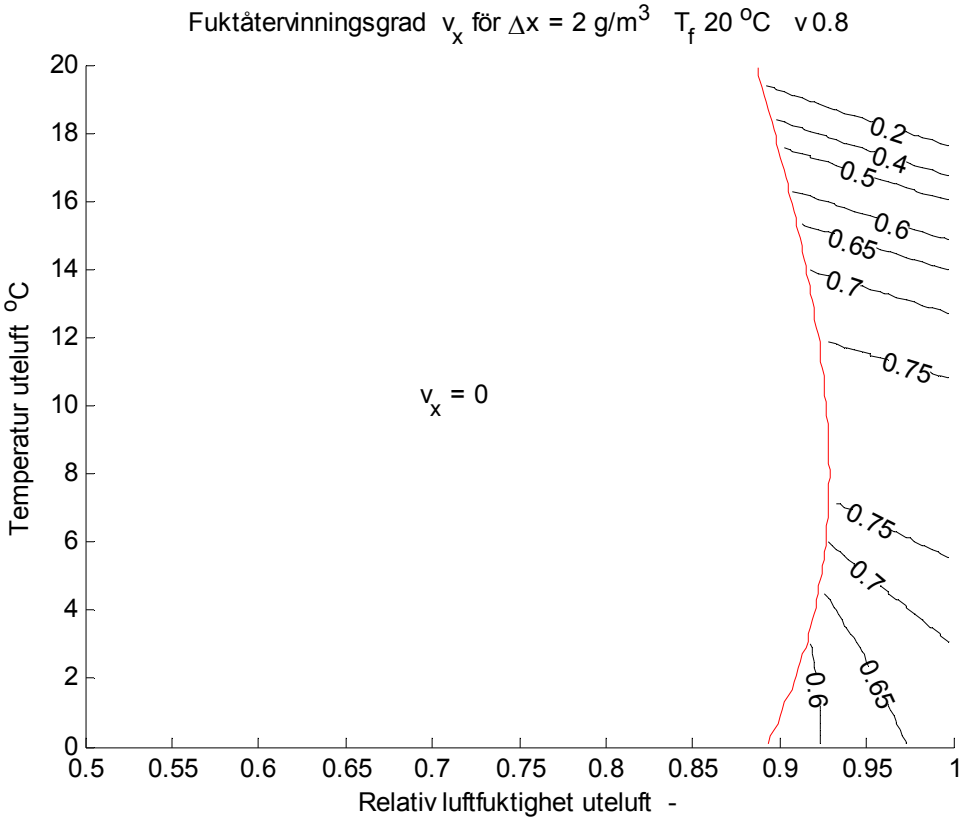
Fuktverkningsgraden är även högre än en fullständigare modell som behandlas i avsnitt 4. En förklaring till att denna enkla modell ger en högre fuktverkningsgrad är att värmeväxlaren är uppdelad i en torr och en våt del, men värmeväxlingen regenerativ och periodisk. Den våta delen torkar upp helt för måga driftsförutsättningar, vilket den fullständigare modellen beskriver och inte den enklare modellen i detta avsnitt. Den enkla modellen kan tolkas som en regenerativ värmeväxlare med mycket högt varvtal. Ett högt varvtal ökar verkningsgraden.



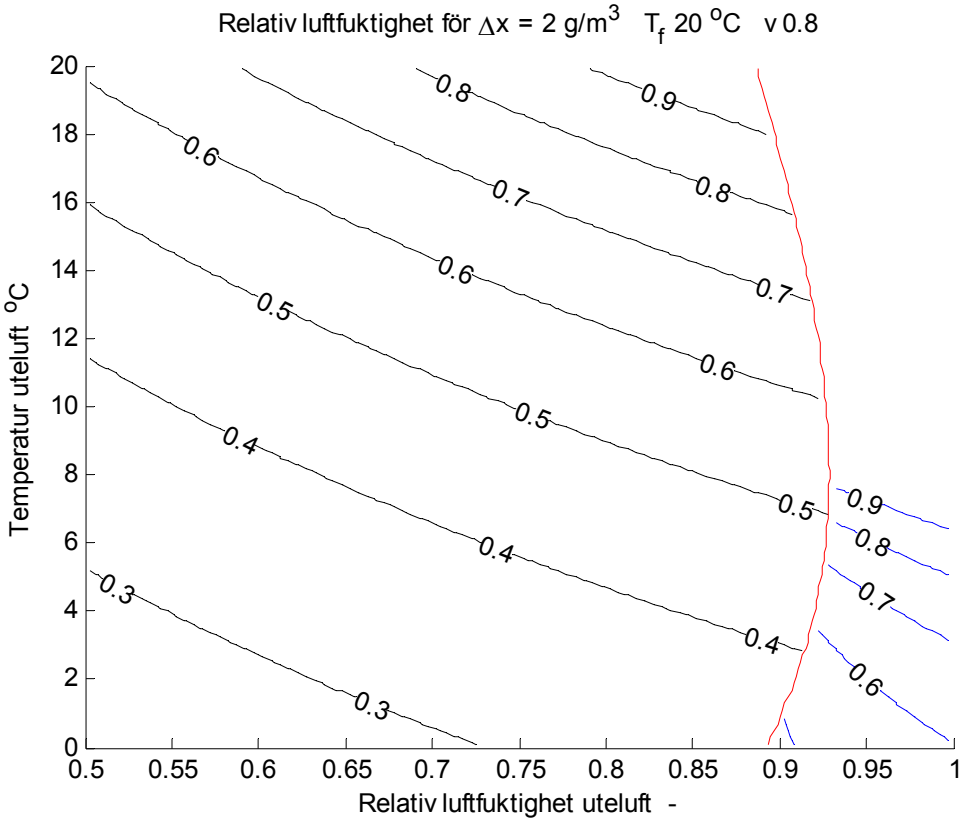
Figur 3.2 Fuktåtervinningsgrad för olika uteluftstillstånd, Δx 1 g/m^3, T_f 20 °C samt v 0.8.



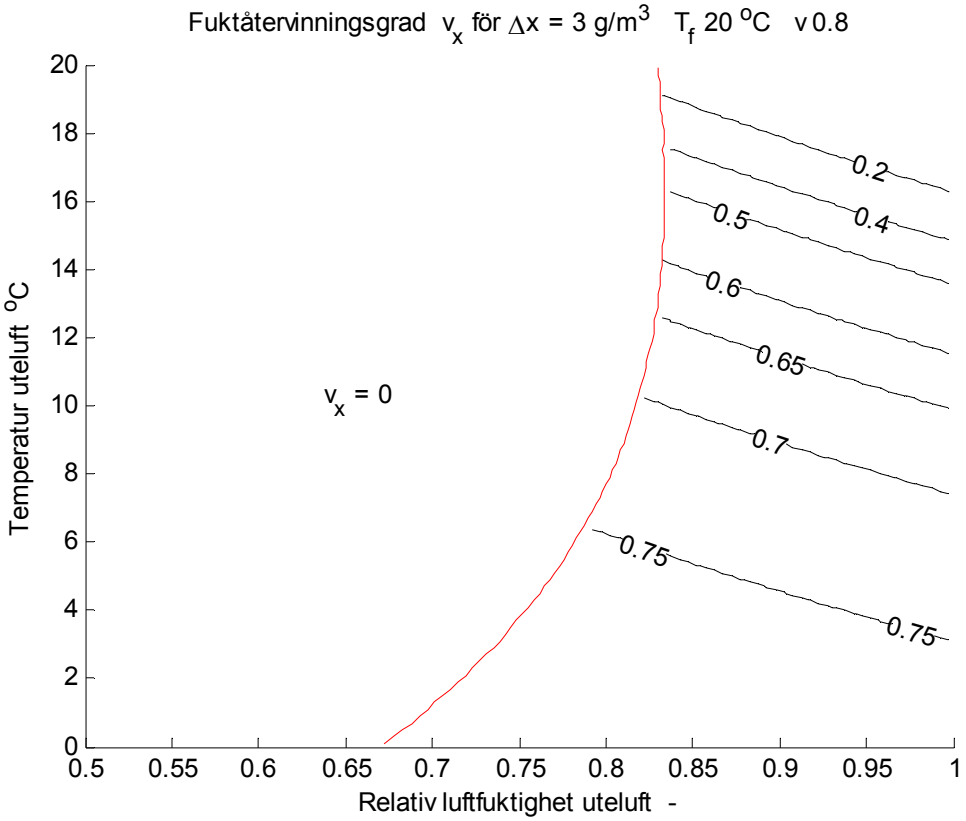
Figur 3.3 Relativ luftfuktighet för olika uteluftstillstånd, Δx 1 g/m^3, T_f 20 °C samt v 0.8.



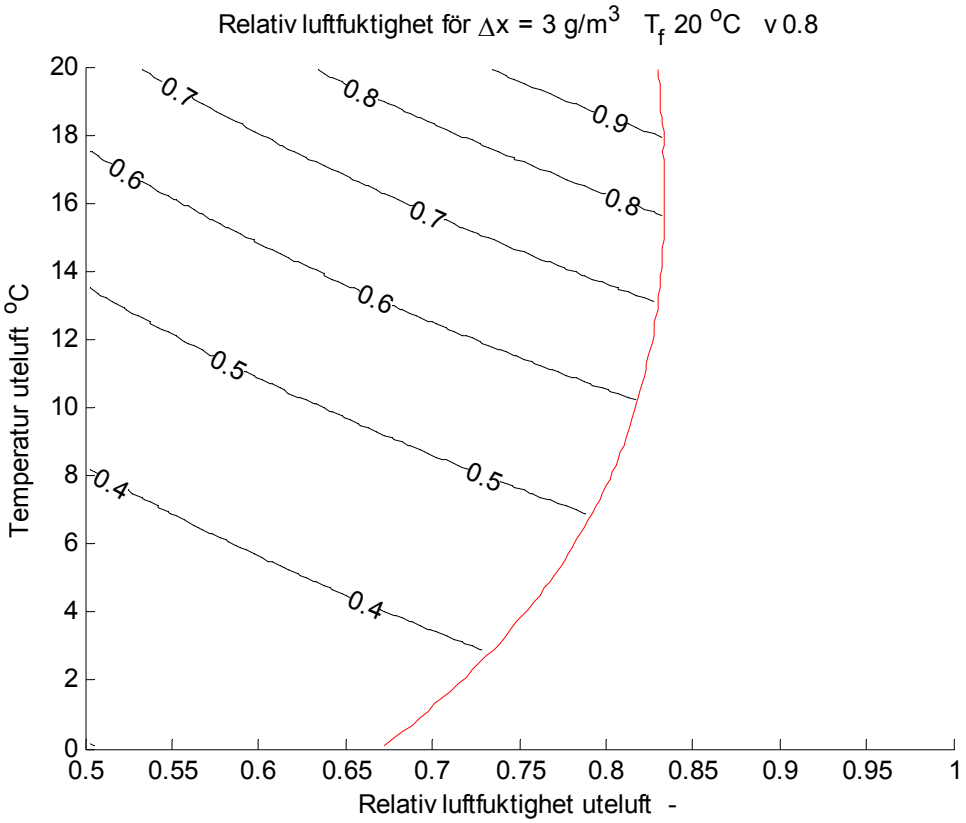
Figur 3.4 Fuktåtervinningsgrad för olika uteluftstillstånd, Δx 2 g/m^3, T_f 20 °C samt v 0.8.



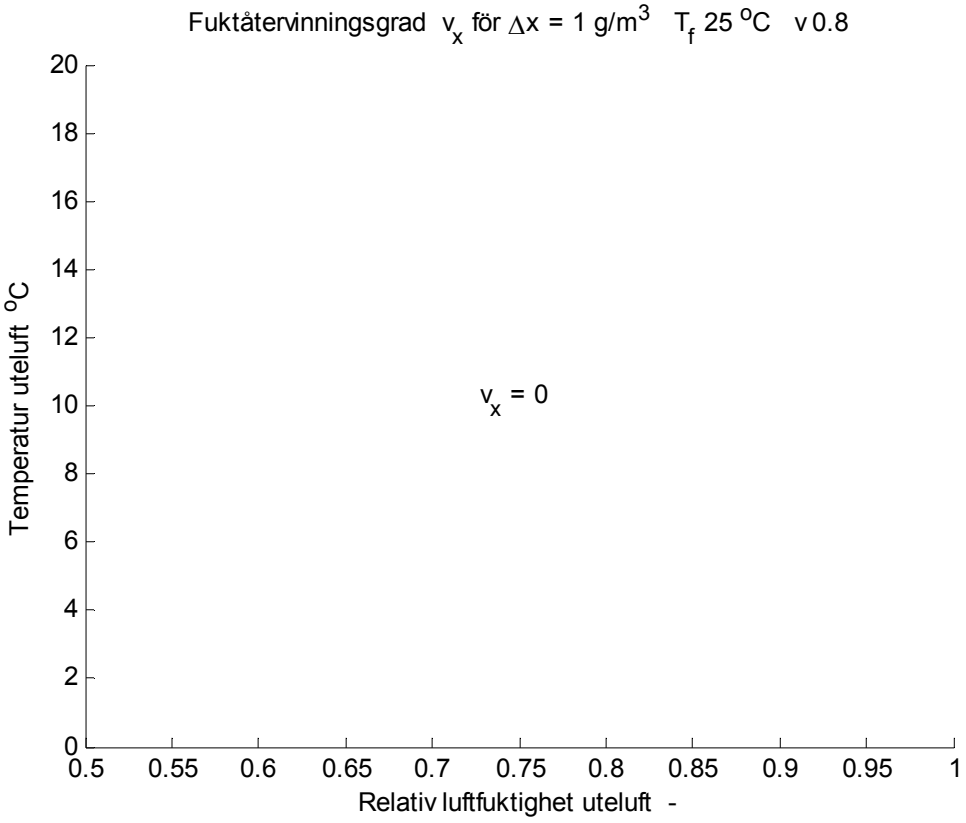
Figur 3.5 Relativ luftfuktighet för olika uteluftstillstånd, Δx 2 g/m^3, T_f 20 °C samt v 0.8.



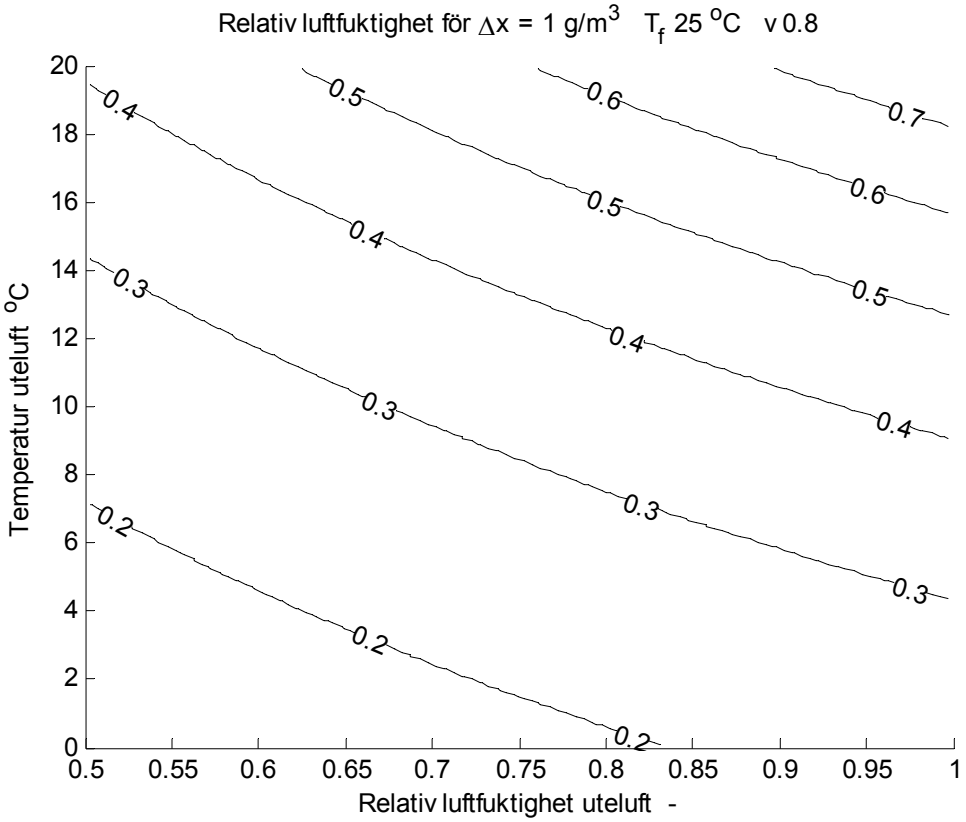
Figur 3.6 Fuktåtervinningsgrad för olika uteluftstillstånd, Δx 3 g/m^3, T_f 20 °C samt v 0.8.



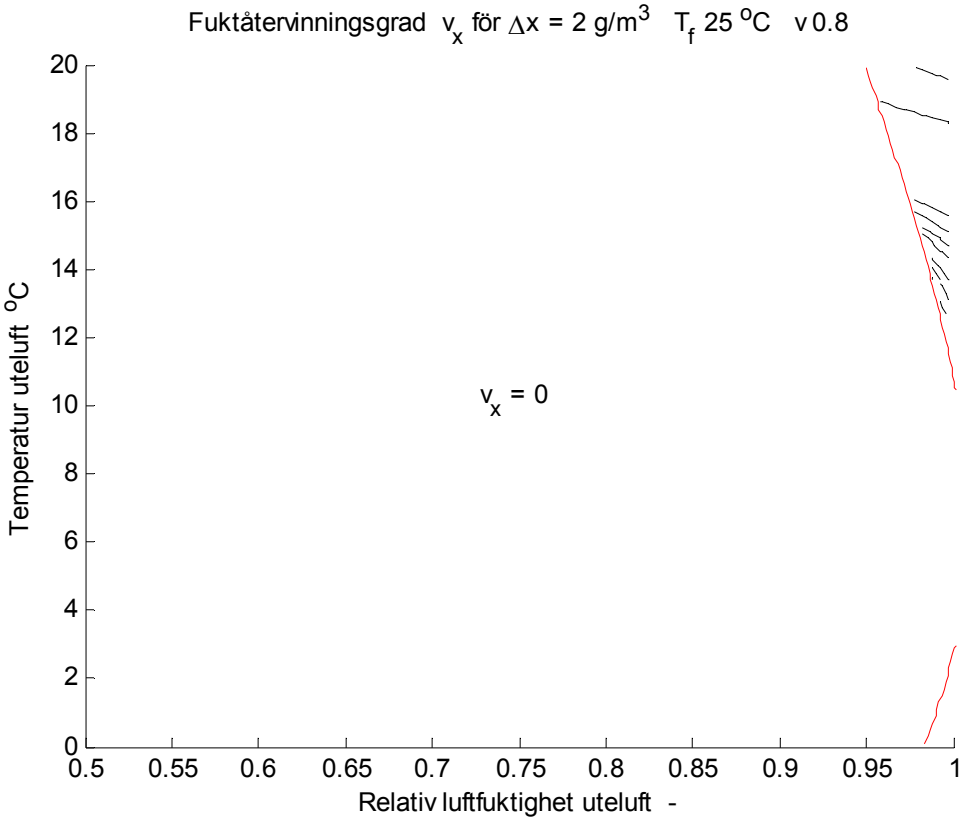
Figur 3.7 Relativ luftfuktighet för olika uteluftstillstånd, Δx 3 g/m^3, T_f 20 °C samt v 0.8.



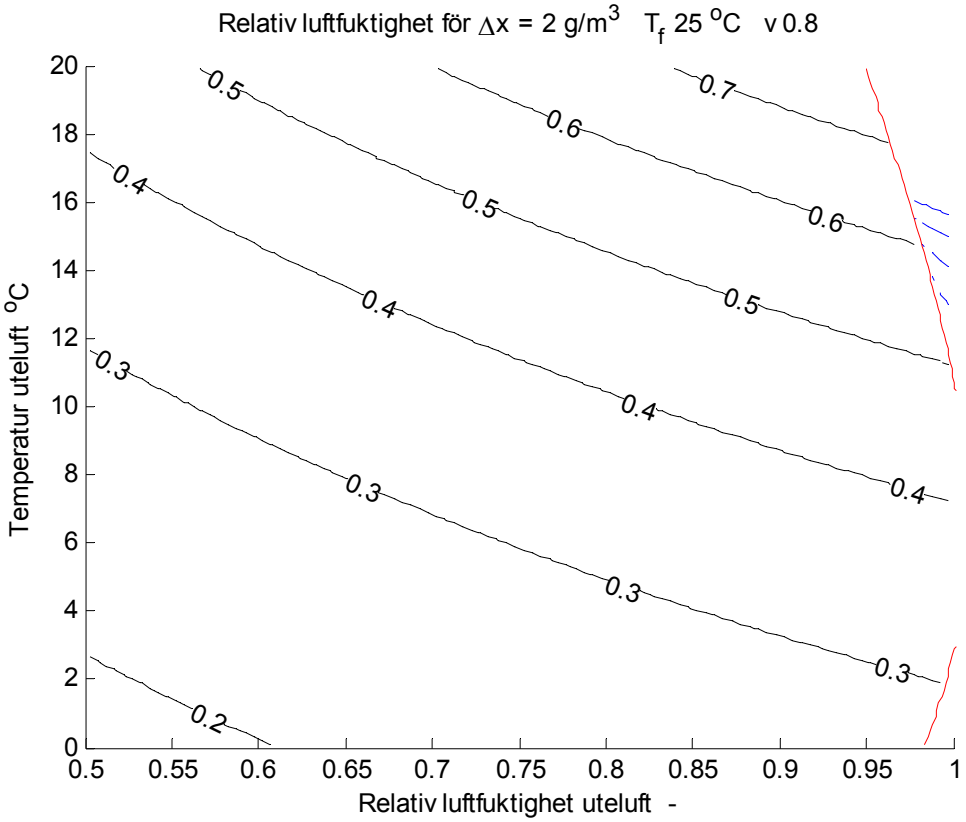
Figur 3.8 Fuktåtervinningsgrad för olika uteluftstillstånd, Δx 1 g/m^3, T_f 25 °C samt v 0.8.



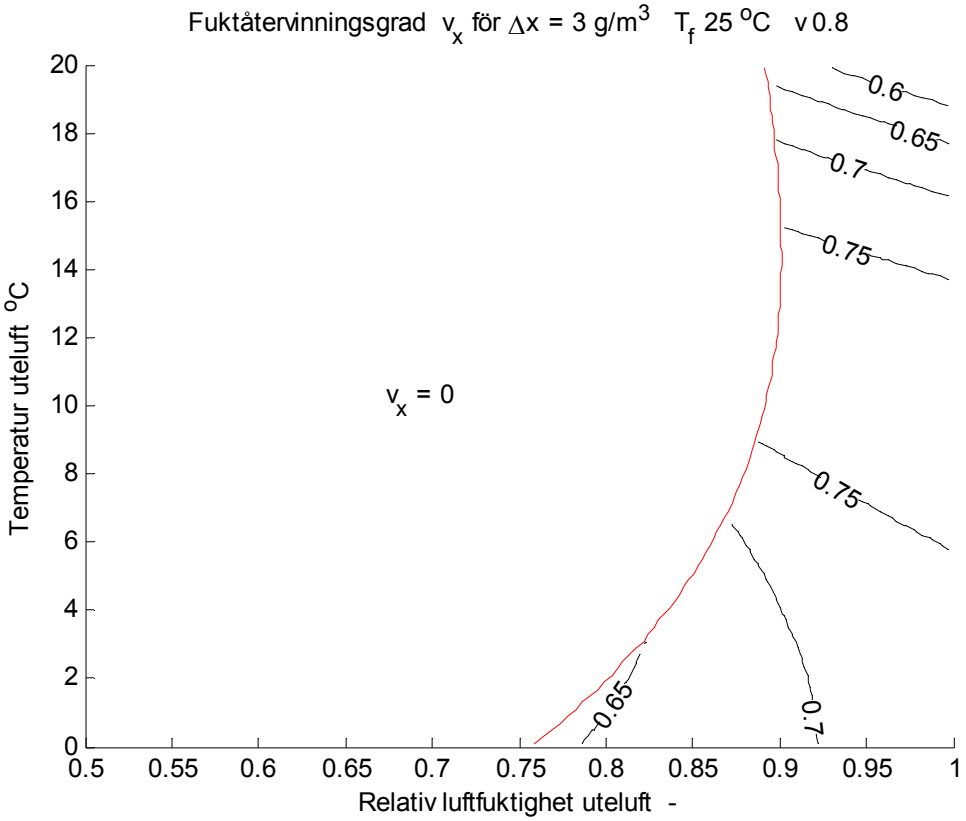
Figur 3.9 Relativ luftfuktighet för olika uteluftstillstånd, Δx 1 g/m^3, T_f 25 °C samt v 0.8.



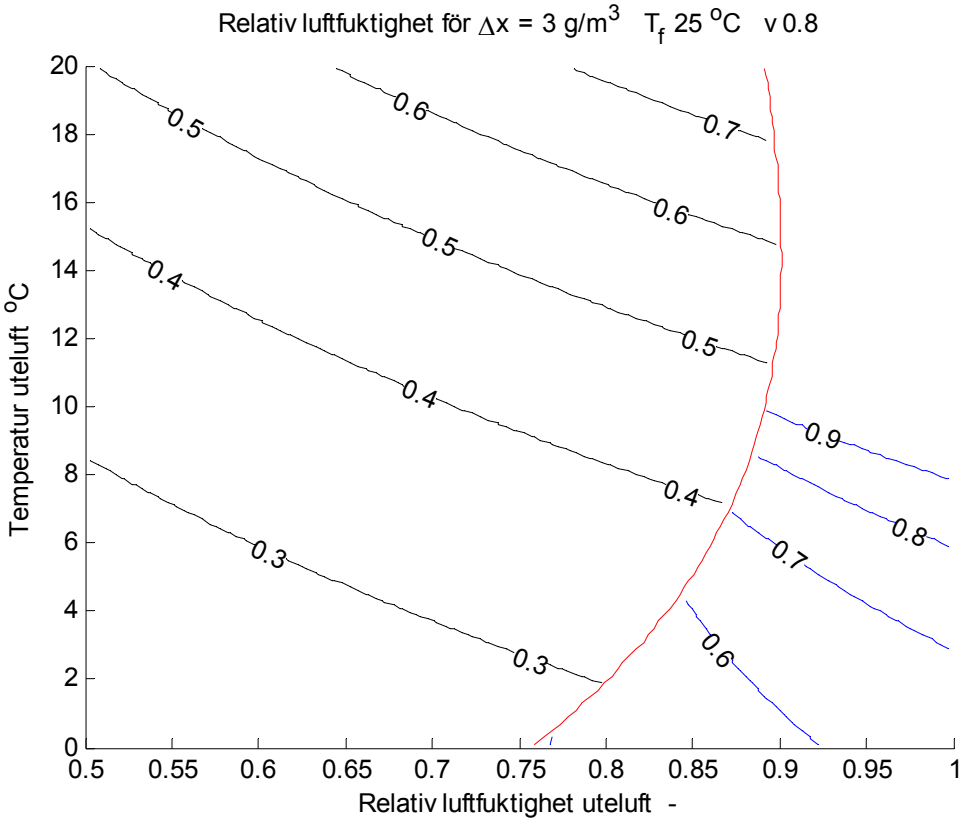
Figur 3.10 Fuktåtervinningsgrad för olika uteluftstillstånd, Δx 2 g/m^3, T_f 25 °C samt v 0.8.



Figur 3.11 Relativ luftfuktighet för olika uteluftstillstånd, Δx 2 g/m^3, T_f 25 °C samt v 0.8.



Figur 3.12 Fuktåtervinningsgrad för olika uteluftstillstånd, Δx 3 g/m^3, T_f 25 °C samt v 0.8.



Figur 3.13 Relativ luftfuktighet för olika uteluftstillstånd, Δx 3 g/m^3, T_f 25 °C samt v 0.8.

4 En fullständigare modell

En fullständigare 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 för en given varvtid och med samma lufthastighet.

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

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 beräknas med hjälp av rotorns ändring i vatteninnehåll under ett halvvarv under förutsättning att det inte sker någon ackumulering av vatten i rotorn.

En korrektion görs av fuktverkningsgraden för växling mellan sektorn för uteluft-tilluft och sektorn frånluft-avluft. Rotorkanalmodellen innehåller i stort sett enbart frånluft vid övergång till sektorn uteluft-tilluft och omvänt bara uteluft vid övergång till sektorn frånluft-avluft. Denna korrektion kan motsvara inverkan av en renblåsningssektor.

En rotorkanal har delats upp i upptill 100 axiella element. Två värmebalansekvationer (4.1-2) anges för varje rotorelements luftmassa och rotormassa. En balansekvation (4.3) anges för vatteninnehållet i rotorluften. En massbalansekvation (4.4) anges för rotorns vattenmassa. De fyra balansekvationerna beskrivs nedan för med vektorbeteckningarna T, x, T_r och m för rotorkanalluftens temperatur och vatteninnehåll, rotortemperatur respektive rotorvatten. Rotorns temperatur T_r bestämmer vatteninnehållets mättnadsvärde x_m med en tredjegradsfunktion av rotorns temperatur. Rotormodellens grundparametrar är följande:

c	specifikt värme luft, J/kgK
c_r	specifikt värme 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	luftdensitet, kg/m^3
ρ_r	rotordensitet, 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

De fyra differentialekvationerna för rotorns fyra tillstånd lufttemperatur, vatteninnehåll, rotortemperatur och rotorvatten redovisas nedan. Alla derivator skrivs som *da/db*.

$$dT/dt = (P – c q dT/dz) / C \qquad (°C/s) \qquad (4.1)$$

$$dT_r /dt = (- P - r Q) / C_r \qquad (°C/s) \qquad (4.2)$$

$$dx/dt = (Q - q dx/dz) / \rho V \qquad (kg/kgs) \qquad (4.3)$$

$$dm/dt = - Q \qquad m > 0 \qquad (kg/s) \qquad (4.4)$$

De två axiella derivatorna *dT/dz* i (4.1) och *dx/dz* i (4.3) beräknas med uppströmsvärden, vilket för in de två inflödenas temperatur och vatteninnehåll växelvis för varje halvperiod. 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.

Denna modell enligt (4.1-4) med tillhörande hjälpvariabler och parametrar undersöks utifrån basfallet för att möjliggöra jämförelser som följer för olika:

• rotorlängd	100, 200, 300, 400 mm	avsnitt 5	sid 25
• varvtid	6, 12, 15, 20, 30 s	avsnitt 6	sid 27
• lufthastighet	1, 2, 3, 4 m/s	avsnitt 7	sid 29
• utetemperatur	-5, 0, 5, 10 °C	avsnitt 8	sid 31
• frånluftstemperatur	20, 22, 24 °C	avsnitt 9	sid 33
• antal element	10, 20, 50, 100	avsnitt 10	sid 35
• parallellflöde	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5	avsnitt 11	sid 37
• flödeskvot	1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6	avsnitt 12	sid 41
• klimat		avsnitt 13	sid 43
• tidsförlopp		avsnitt 14	sid 53
• luftflöden i praktiken		avsnitt 15	sid 61

Basfallet har 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. Godstjockleken halveras, eftersom rotorkanalväggen delas mellan två rotorkanaler. Rotorkanalens geometri är förenklad till ett cylindriskt rör.

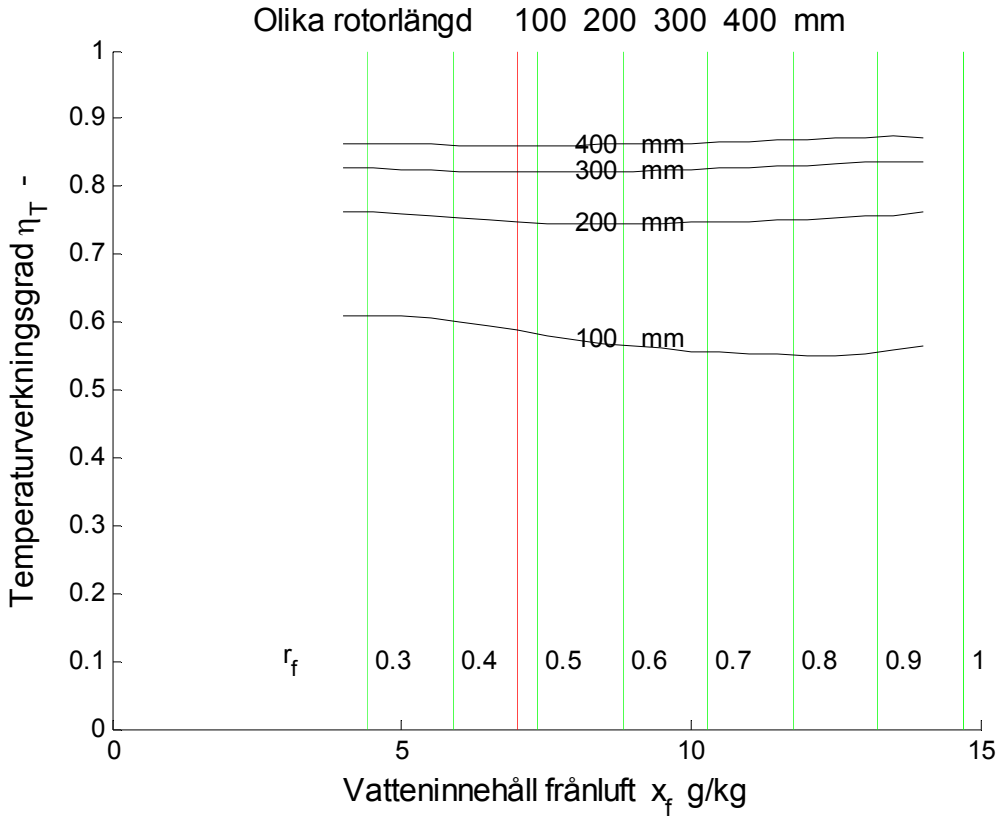
5 Undersökning av olika rotorlängd

Syftet med detta avsnitt är att redovisa vad olika dimensionering eller val av temperaturverkningsgrad betyder för fuktverkningsgraden. 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.

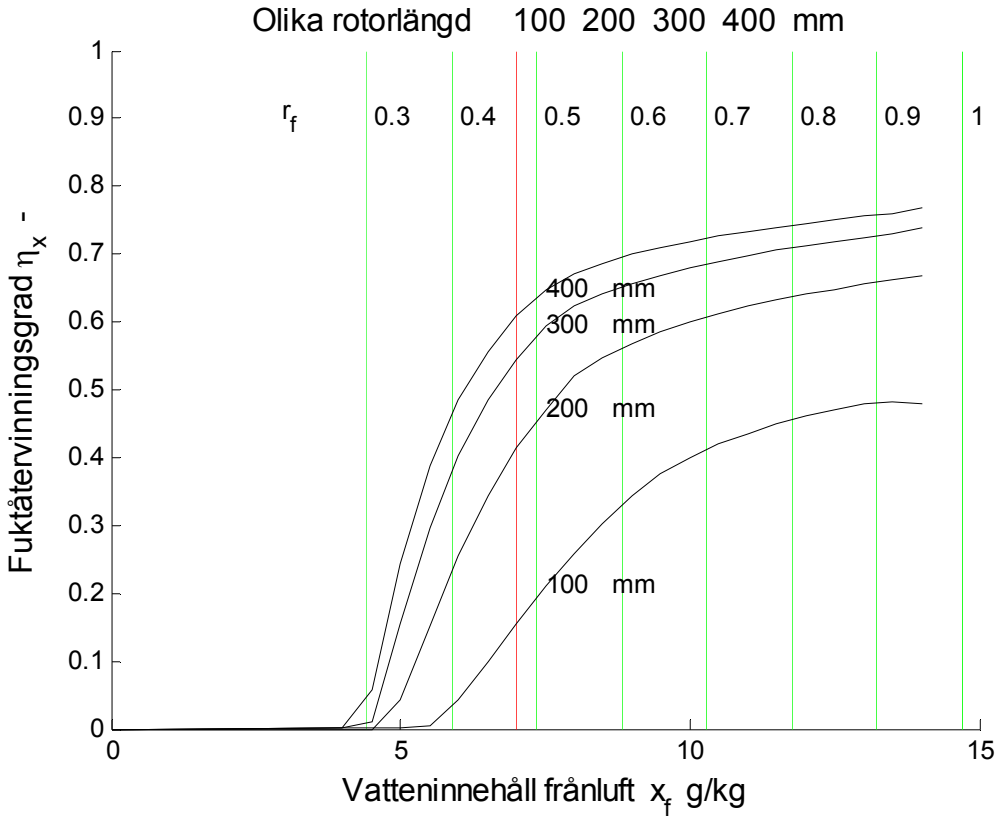
Fyra rotorlängder 100, 200, 300 och 400 mm har genomräknats som funktion av frånluftens vatteninnehåll för ett givet uteklimat 0 °C och 3.5 g/kg och given frånluftstemperatur 20 °C.

Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg redovisas i Figur 5.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 5.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 5.1-3. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 5.3.

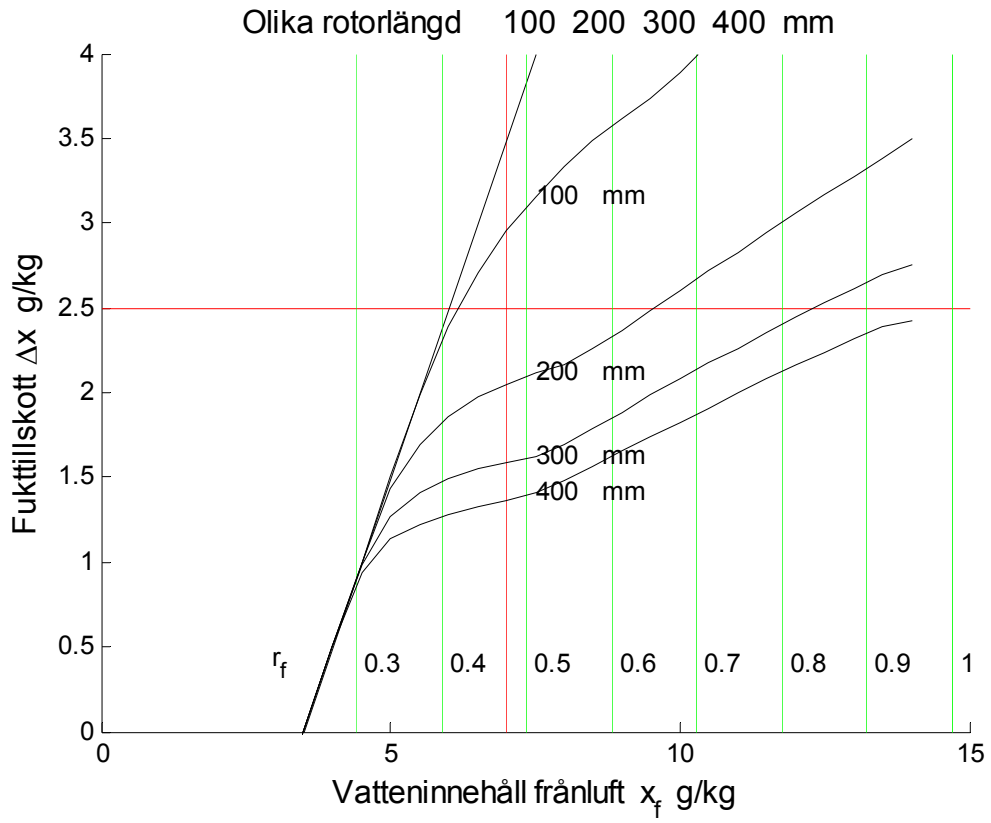
Kurvorna i Figur 5.2 visar att fuktverkningsgraden kan bli hög för rotorer med hög temperaturverkningsgrad.



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



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



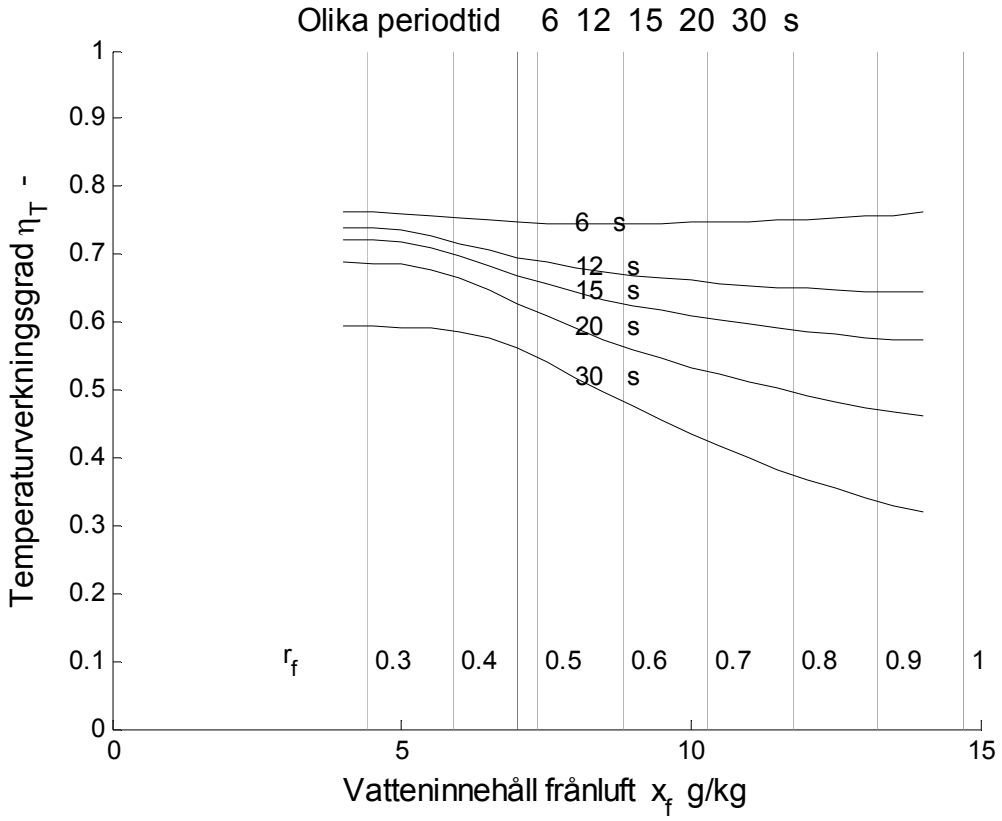
Figur 5.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika rotorlängd.

6 Undersökning av olika rotorhastighet

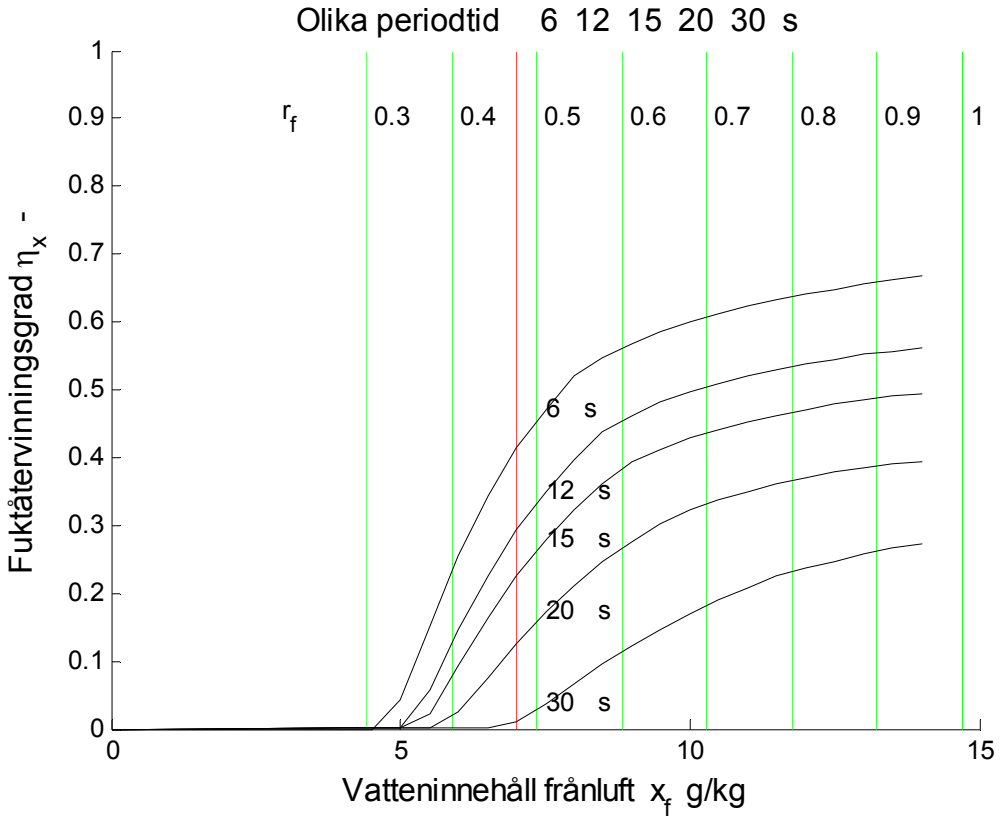
Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur fuktverkningsgraden kan minskas genom att minska rotorhastigheten och hur temperaturverkningsgraden samtidigt påverkas. Fem olika varvtider 6, 12, 15, 20 och 30 s har genomräknats som funktion av frånluftens vatteninnehåll för ett givet uteklimat 0 °C och 3.5 g/kg och given frånluftstemperatur 20 °C.

Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg 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. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 6.1-3. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 6.3.

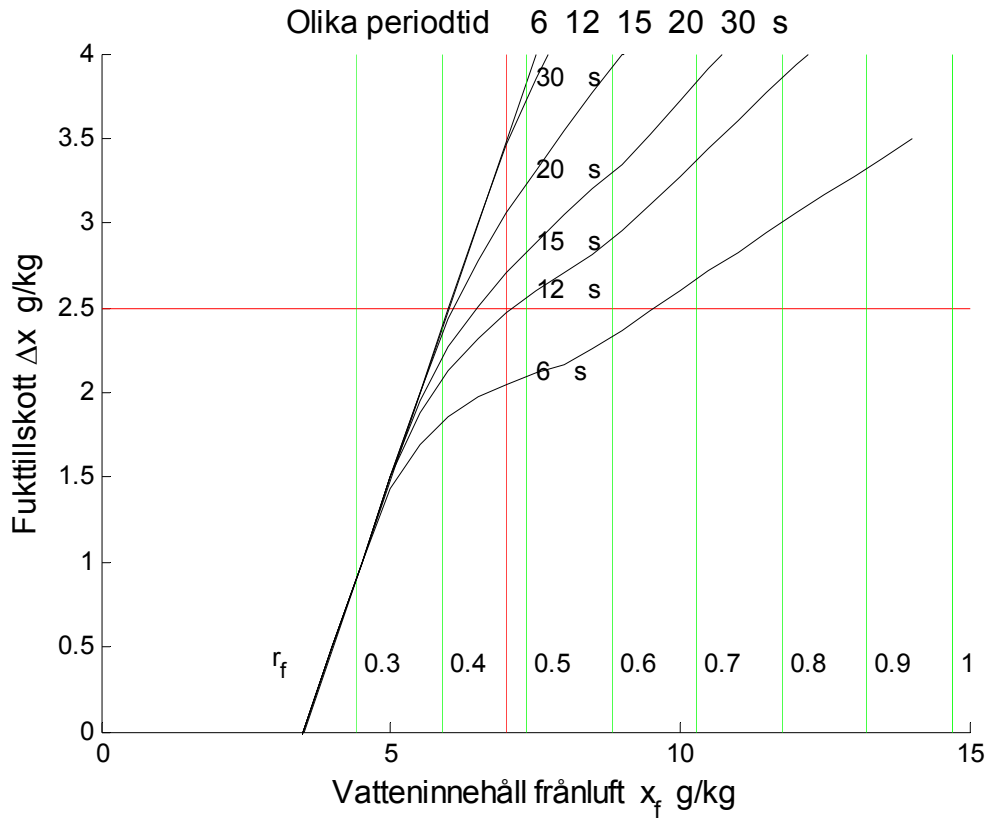
Kurvorna i Figur 6.1 och 6.2 visar att temperatur- och fuktverkningsgrad avtar med minskande rotorhastighet eller ökande varvtid. Fuktverkningsgraden kan avta betydligt i förhållande till temperaturverkningsgraden, vilket ses för vatteninnehåll 7 g/kg vid övergång från 6 s till 30 s. Temperaturverkningsgrad och dito fukt ändras från 0.75 till 0.56 respektive 0.41 till 0.01. Nödvändigt fukttillskott ökar starkt med ökande varvtid enligt Figur 6.3 och för samma fall som ovan från 2.0 g/kg till 3.5 g/kg.



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.



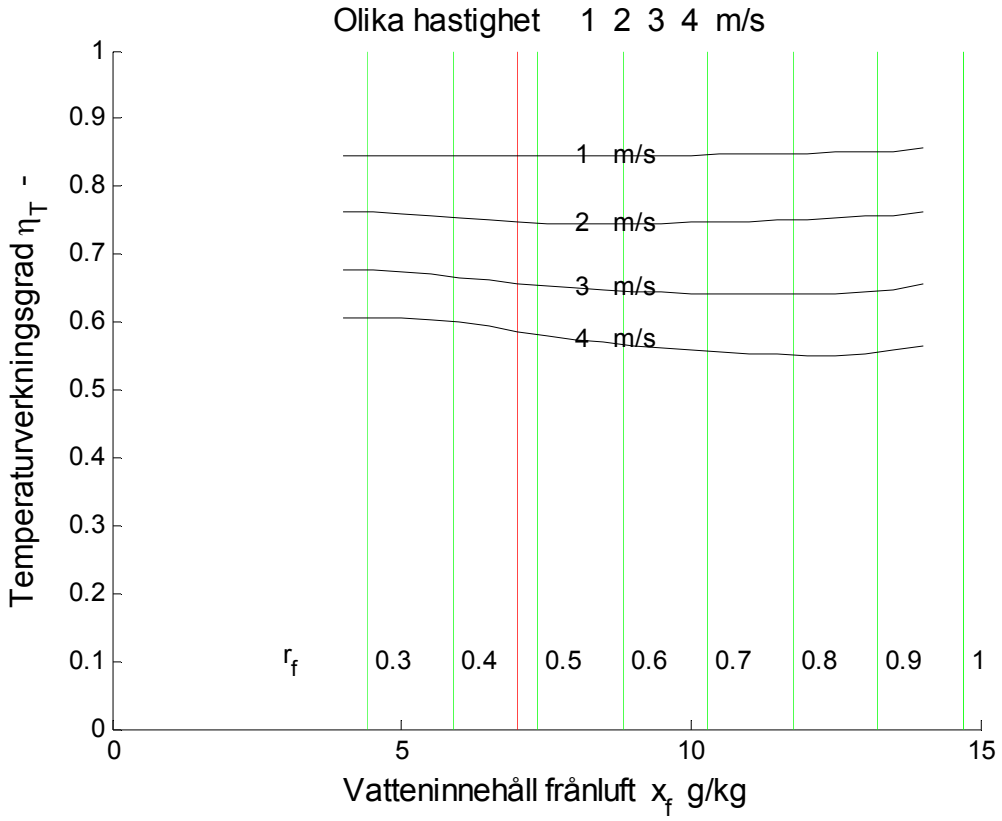
Figur 6.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika rotorhastighet.

7 Undersökning av olika lufthastighet

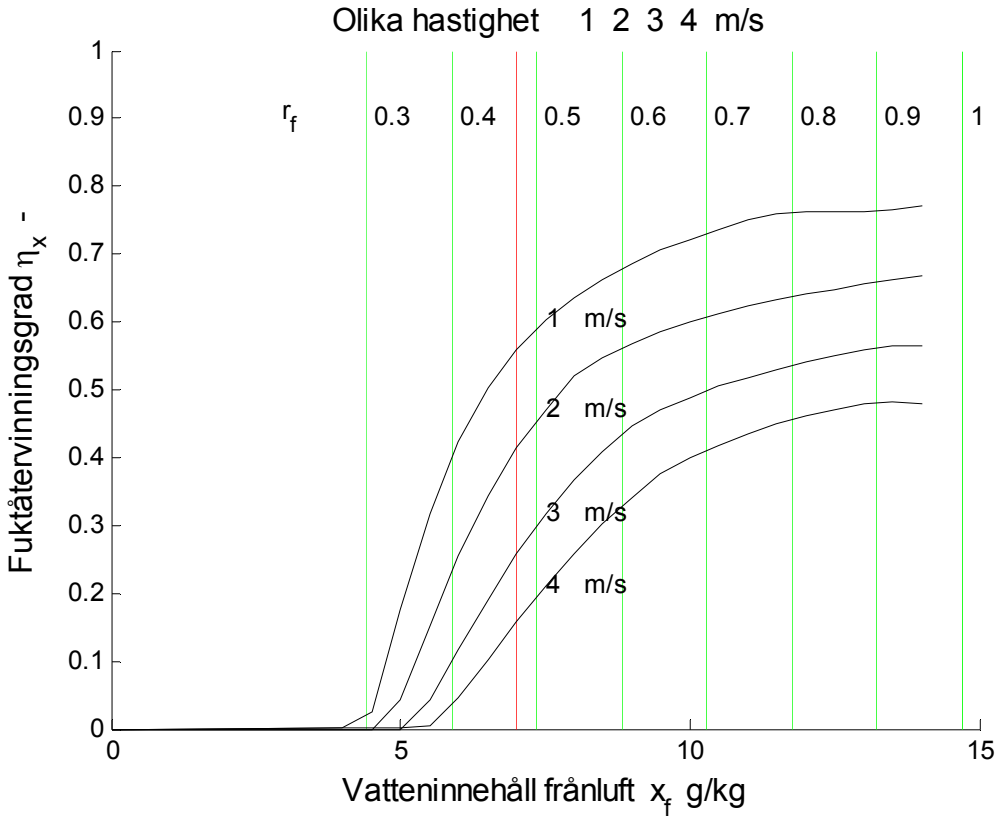
Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur fuktverkningsgraden kan minskas genom att öka lufthastigheten genom rotorn eller egentligen öka ventilationsflödet och hur temperaturverkningsgraden samtidigt påverkas. Fyra olika lufthastigheter 1, 2, 3 och 4 m/s har genomräknats som funktion av frånluftens vatteninnehåll för ett givet uteklimat 0 °C och 3.5 g/kg och given frånluftstemperatur 20 °C. Värmeövergångstalet är konstant 40 W/Km^2.

Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg 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. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 7.1-3. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 7.3.

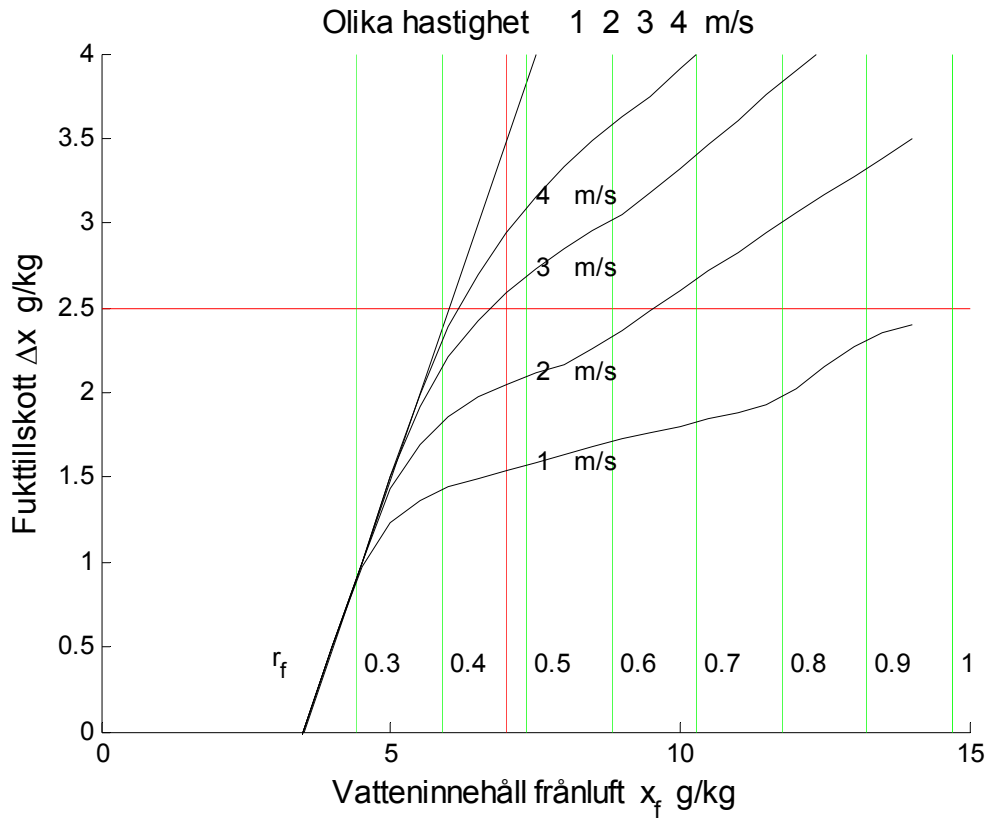
Kurvorna i Figur 7.1-2 visar att temperatur- och fuktverkningsgraden avtar med ökande lufthastighet. Fuktverkningsgraden kan avta betydligt i förhållande till temperaturverkningsgraden, vilket ses för vatteninnehåll 7 g/kg vid övergång från 2 m/s till 4 m/s. Temperaturverkningsgrad och dito fukt ändras från 0.75 till 0.60 respektive 0.41 till 0.16. Nödvändigt fukttillskott för samma fall som ovan ökar från 2.0 g/kg till 2.9 g/kg.



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.



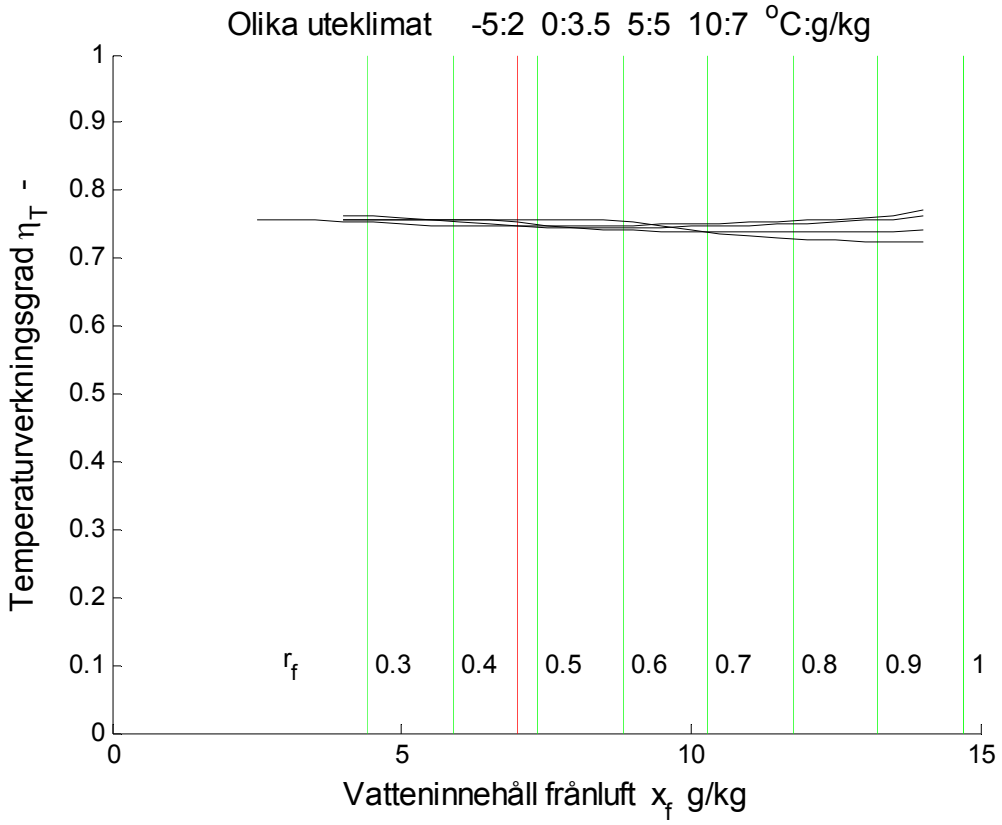
Figur 7.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika lufthastighet.

8 Undersökning av olika utetemperatur

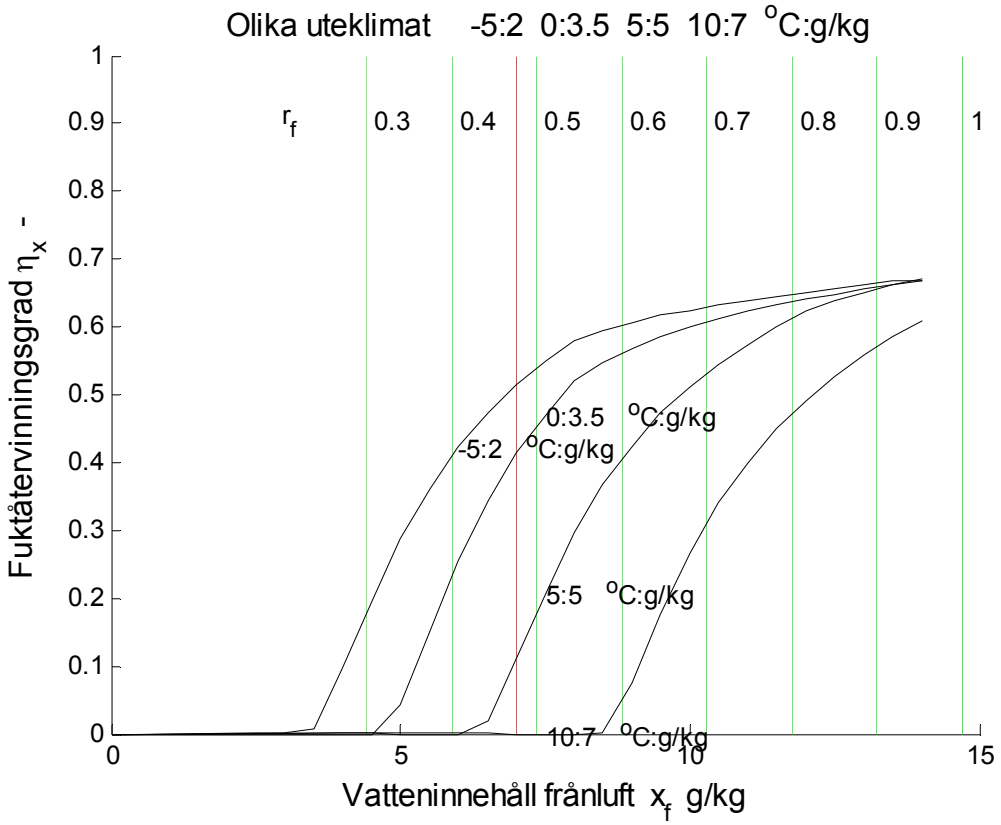
Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur fuktverkningsgraden beror på uteklimatet med följande fyra par för temperatur och vatteninnehåll -5 °C:2 g/kg, 0 °C:3.5 g/kg, 5 °C:5 g/kg och 10 °C:7 g/kg. Genomräkningar har skett med basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll och given frånluftstemperatur 20 °C.

Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg 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. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 8.1-3. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 8.3.

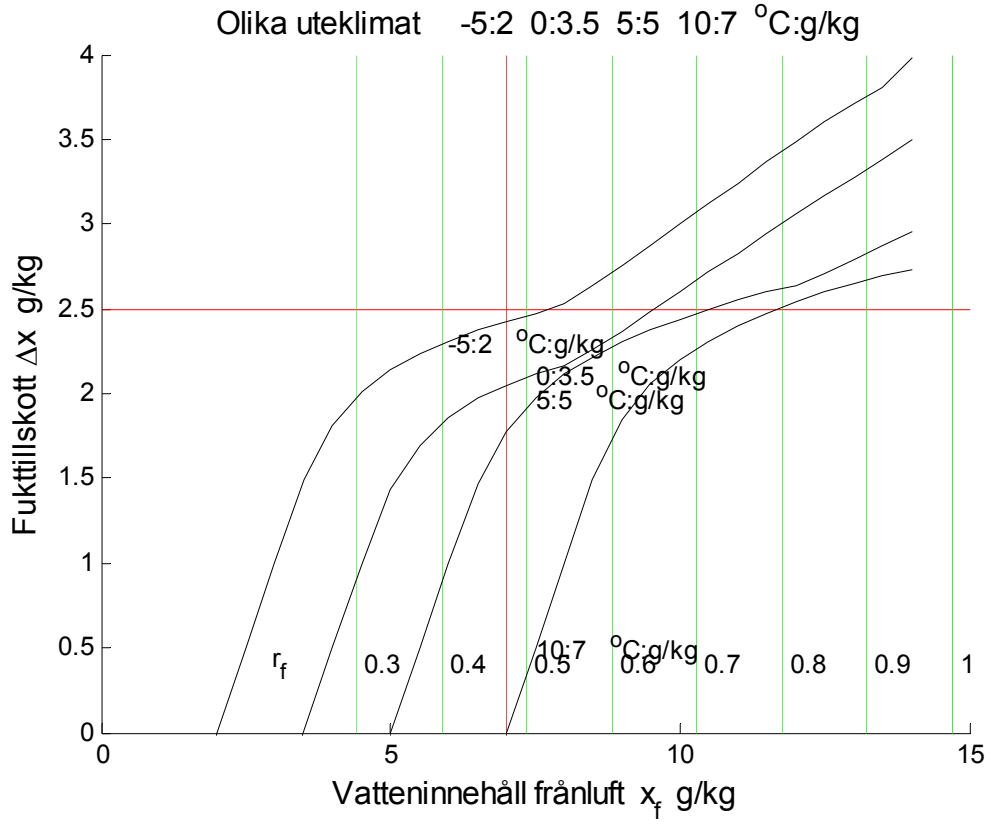
Kurvorna i Figur 8.1 visar att temperaturgraden är nästa oberoende av uteklimatet och frånluftens vatteninnehåll. Fuktverkningsgraden i Figur 8.2 är starkt beroende av uteklimatet och är 0.51, 0.41, 0.11 och 0 för de fyra uteklimaten och för vatteninnehåll 7 g/kg. Motsvarande nödvändigt fukttillskott kan i Figur 8.3 läsas av till 2.4, 2.0, 1.7 respektive 0 g/kg. 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.



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



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



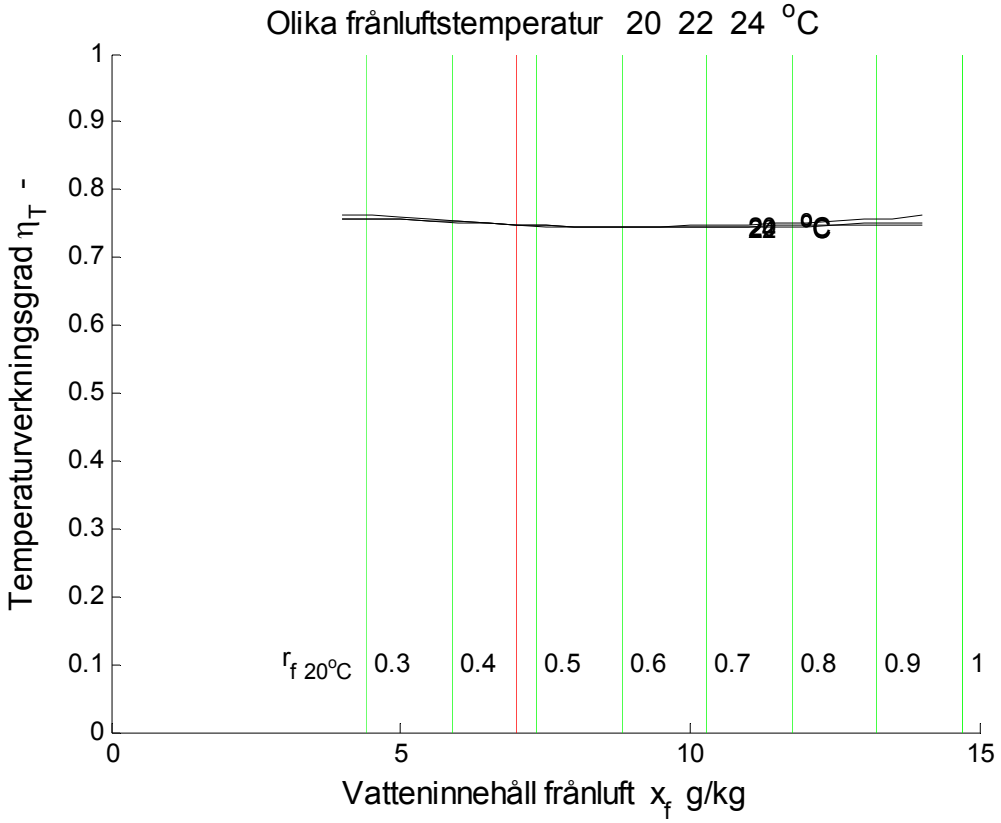
Figur 8.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.

9 Undersökning av olika frånluftstemperatur

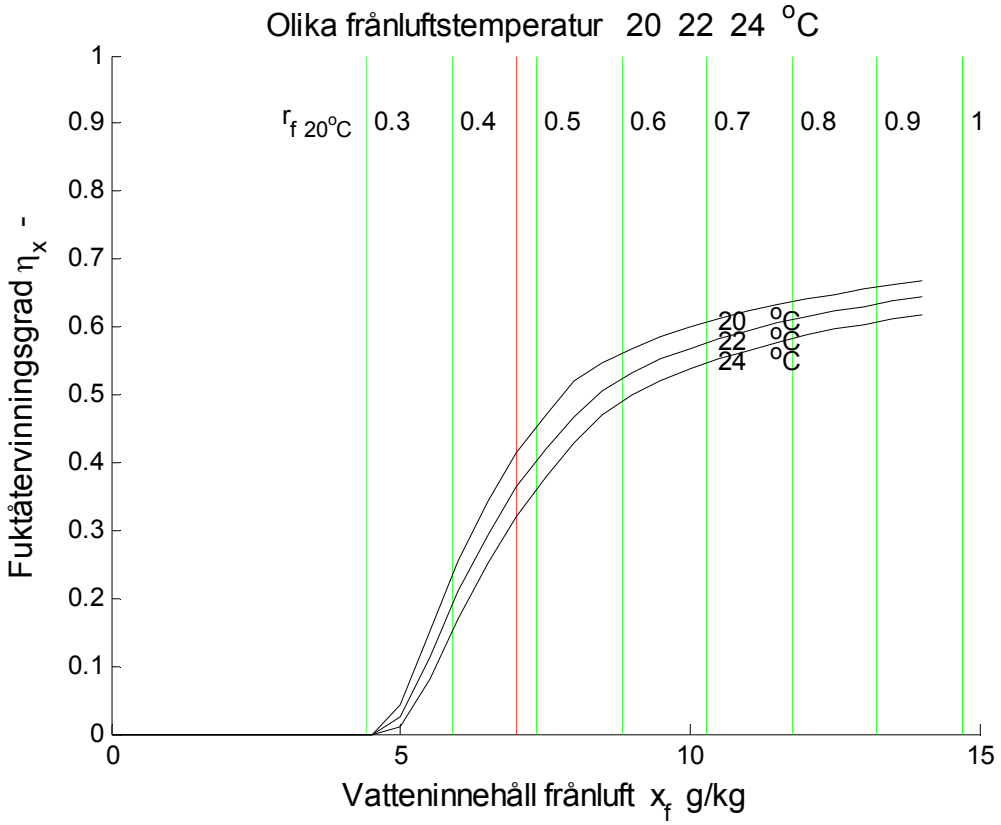
Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur fuktverkningsgraden beror på olika frånluftstemperatur 20, 22 och 24 °C för samma uteluftstillstånd 0 °C:3.5 g/kg. Genomräkningar har skett med basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll.

Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg 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. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 9.1-3. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 9.3.

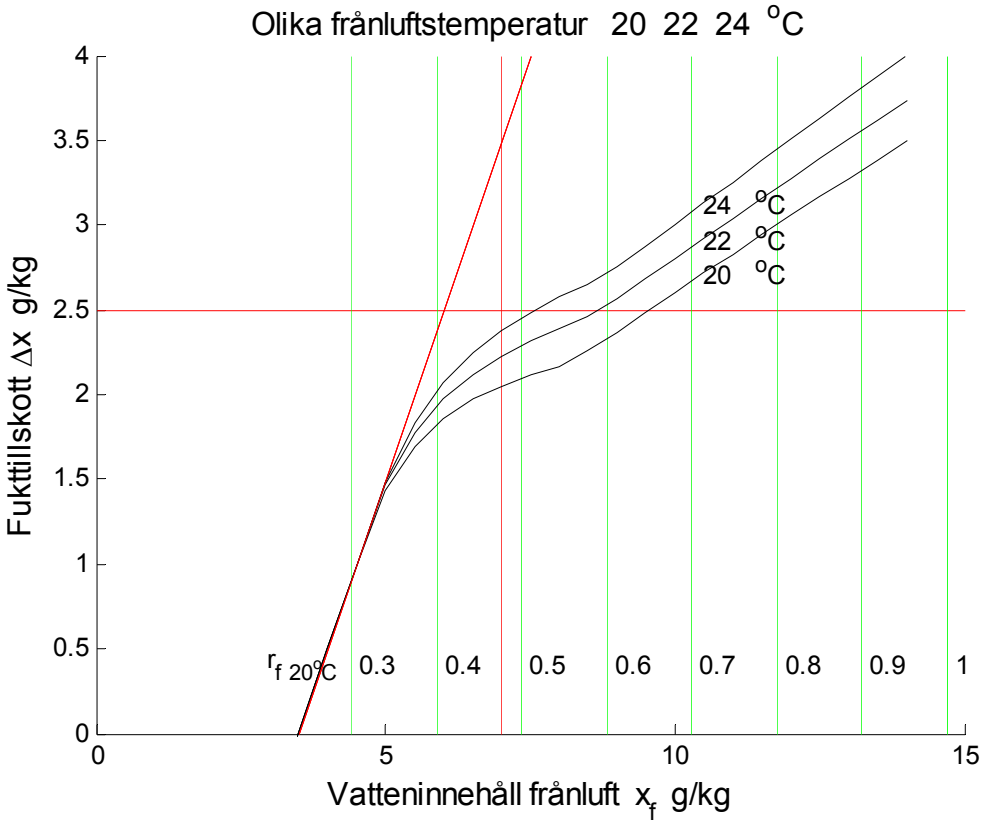
Kurvorna i Figur 9.1 visar att temperaturgraden är nästan oberoende av uteklimatet och inneklimatet. Fuktverkningsgraden i Figur 9.2 är mindre beroende av frånluftstemperaturen än av frånluftens vatteninnehåll. Huvudslutsatsen är att en högre frånluftstemperatur minskar fuktverkningsgraden och därmed också fuktåtervinningen. Temperaturskillnaden mellan frånluftstemperatur och daggpunktstemperatur ökar med ökande frånluftstemperatur, vilket ökar den torra värmeväxlingen.



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



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



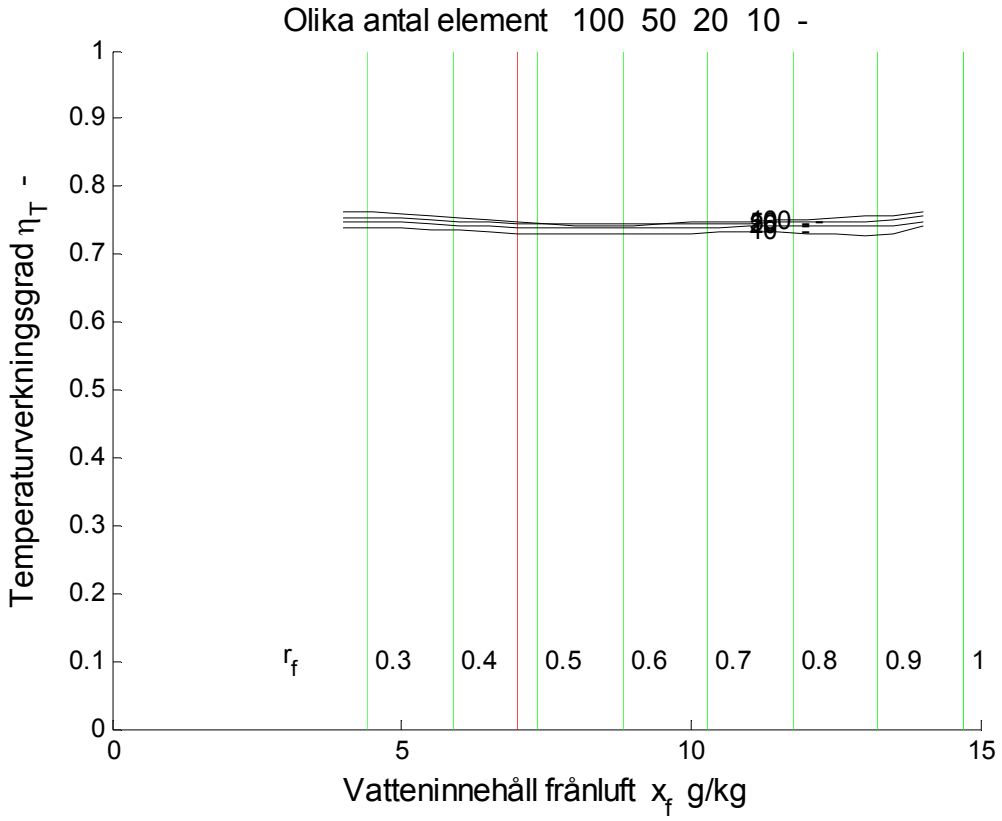
Figur 9.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika frånluftstemperatur.

10 Undersökning av olika antal element

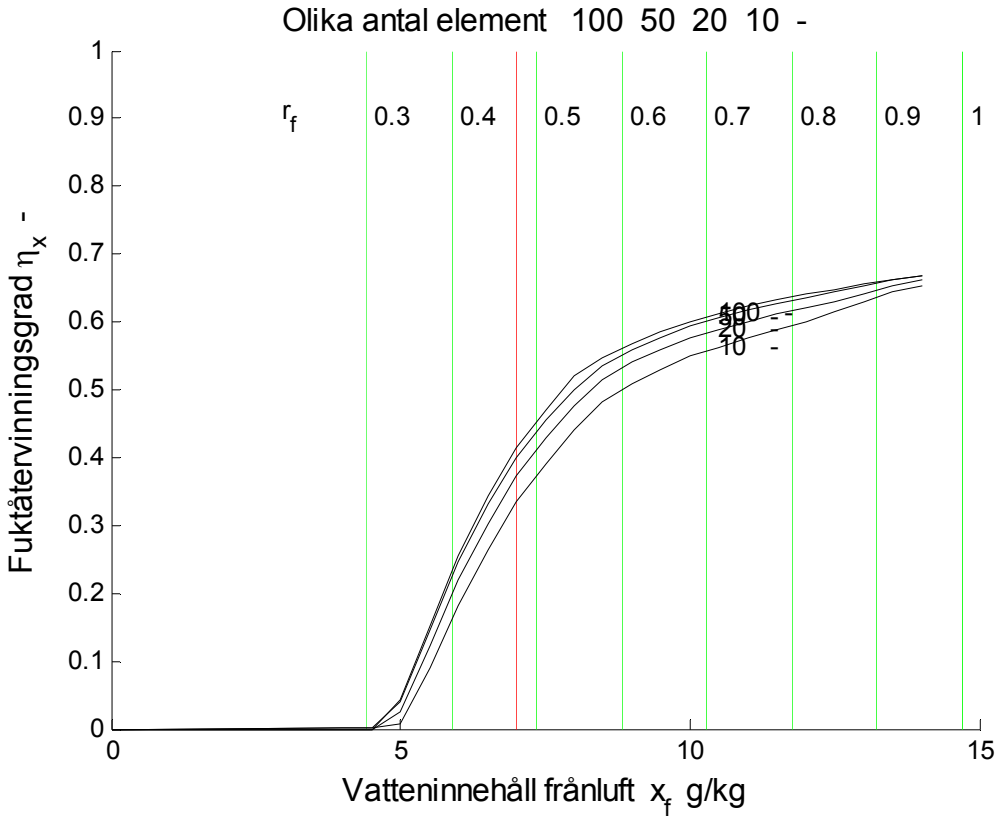
Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur fuktverkningsgraden beror på uteklimatet med följande fyra par för temperatur och vatteninnehåll -5 °C:2 g/kg, 0 °C:3.5 g/kg, 5 °C:5 g/kg och 10 °C:7 g/kg. Genomräkningar har skett med basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll och given frånluftstemperatur 20 °C.

Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg redovisas i Figur 10.1-3. Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 10.1-3 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 10.1-3. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 10.3.

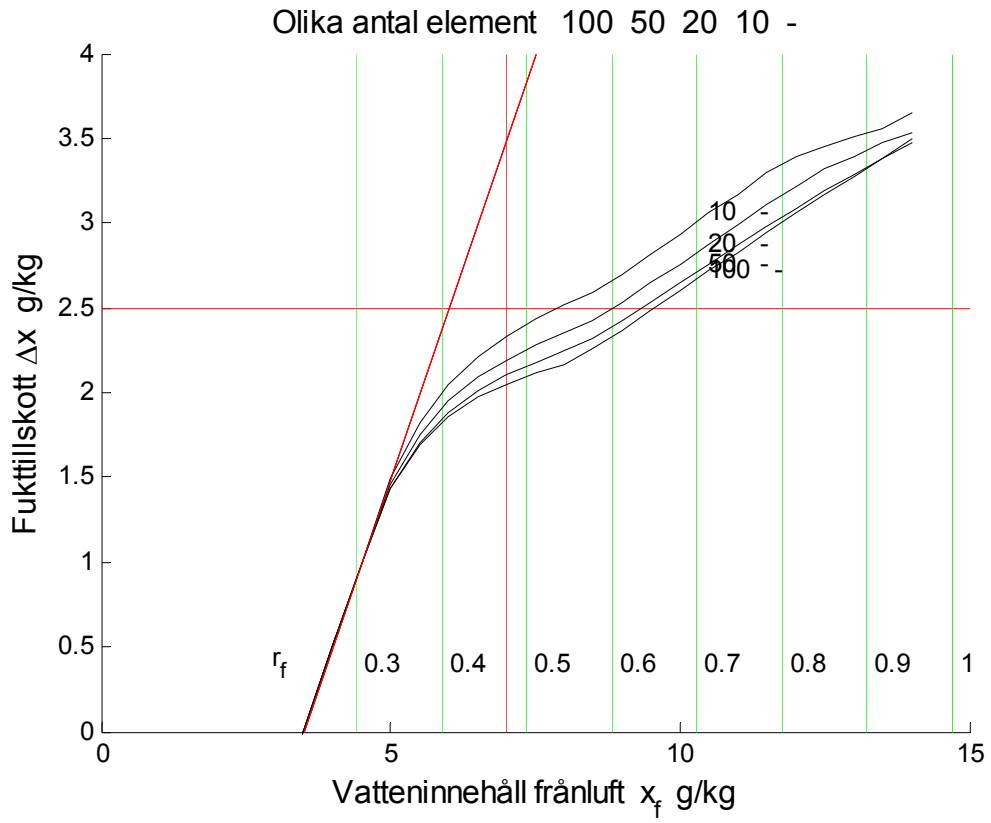
Kurvorna i Figur 10.1 visar att temperaturgraden är nästa oberoende av uteklimatet och frånluftens vatteninnehåll. Fuktverkningsgraden i Figur 10.2 är starkt beroende av uteklimatet och är 0.51, 0.41, 0.11 och 0 för de fyra uteklimaten och för vatteninnehåll 7 g/kg. Motsvarande nödvändigt fukttillskott kan i Figur 10.3 läsas av till 2.4, 2.0, 1.7 respektive 0 g/kg. 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.



Figur 10.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



Figur 10.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



Figur 10.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.

11 Undersökning av olika parallellflöde

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur inneklimatet beror olika parallellflöde och för fyra uteklimat med temperatur och vatteninnehåll -5 °C:2 g/kg, 0 °C:3.5 g/kg, 5 °C:5 g/kg respektive 10 °C:7 g/kg. Parallellflödet definieras som extra ventilation relativt den nominella som gäller för den regenerativa växlaren. Parallellflöde innebär ökad ventilation som här passerar parallellt sida om sida med de ordinarie aggregatbundna flödena för tilluft och frånluft. Detta innebär att det krävs ett större fukttillskott för att uppnå ett visst fukttillstånd. Parallellflödet kan vara infiltration och exfiltration och/eller mer eller mindre ständig vädring.

Följande uttryck gäller för det statiska fallet i jämvikt för frånluftens vatteninnehåll x_f, uteluftens vatteninnehåll x_u, fuktverkningsgrad η_x, fukttillskott Δx och en relativ tvärflödesandel p.

$$x_f = x_u + \Delta x / (1 - \eta_x + p) \qquad \text{(g/kg)} \qquad (11.1)$$

Uttrycket (11.1) visar att om tvärflödesandelen p är lika med fuktverkningsgraden η_x, då blir fukttillståndet för frånluften $x_f = x_u + \Delta x$. Detta motsvarar ett fall utan fuktåtervinning, utan tvärflöde och med nominell ventilation.

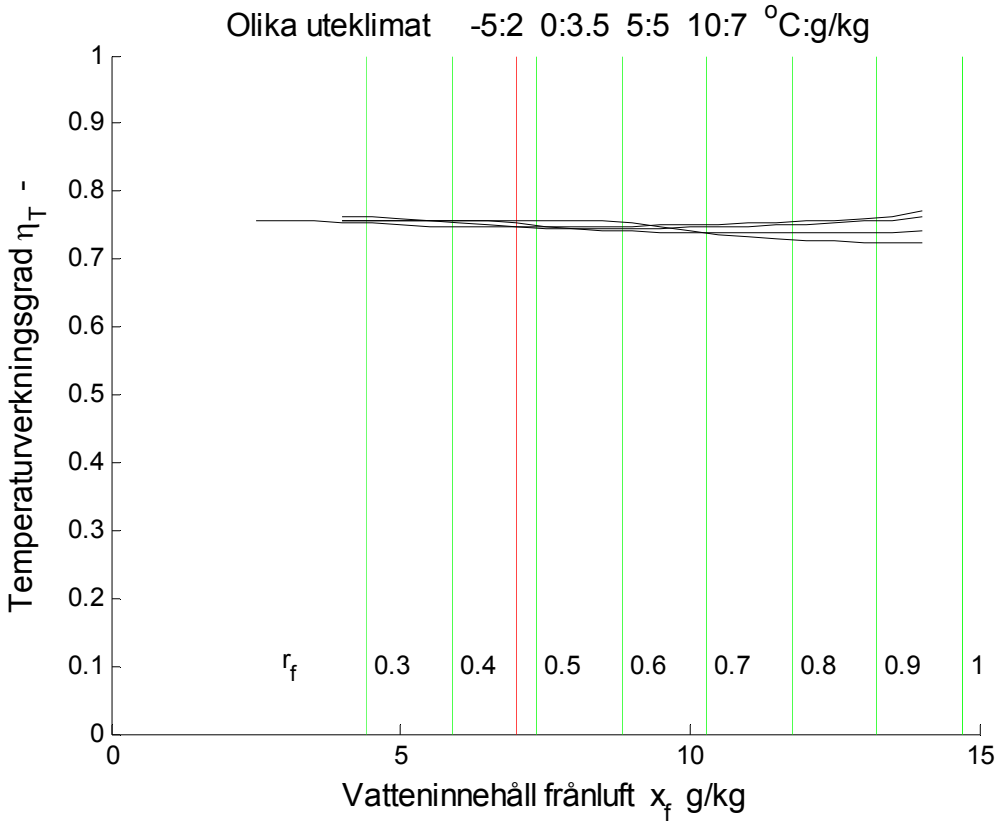
Genomräkningar har skett för tvärflödesandelarna 0.0, 0.1, 0.2, 0.3 och 0.4 för basfallet som funktion av frånluftens vatteninnehåll och given frånluftstemperatur 20 °C. Temperaturverkningsgrad η_T och fuktverkningsgrad η_x redovisas i Figur 11.1-2. Dessa är de samma som i tidigare redovisning som i avsnitt 8.

Det nödvändiga fukttillskottet redovisas i Figur 11.3-6 för de fyra uteklimatfallen med temperatur och vatteninnehåll vatteninnehåll -5 °C:2 g/kg, 0 °C:3.5 g/kg, 5 °C:5 g/kg respektive 10 °C:7 g/kg. Fallet med nominell ventilation och ingen fuktåtervinning finns också inritad som en rät linje i Figur 11.3-6 enligt formeln $x_f = x_u + \Delta x$.

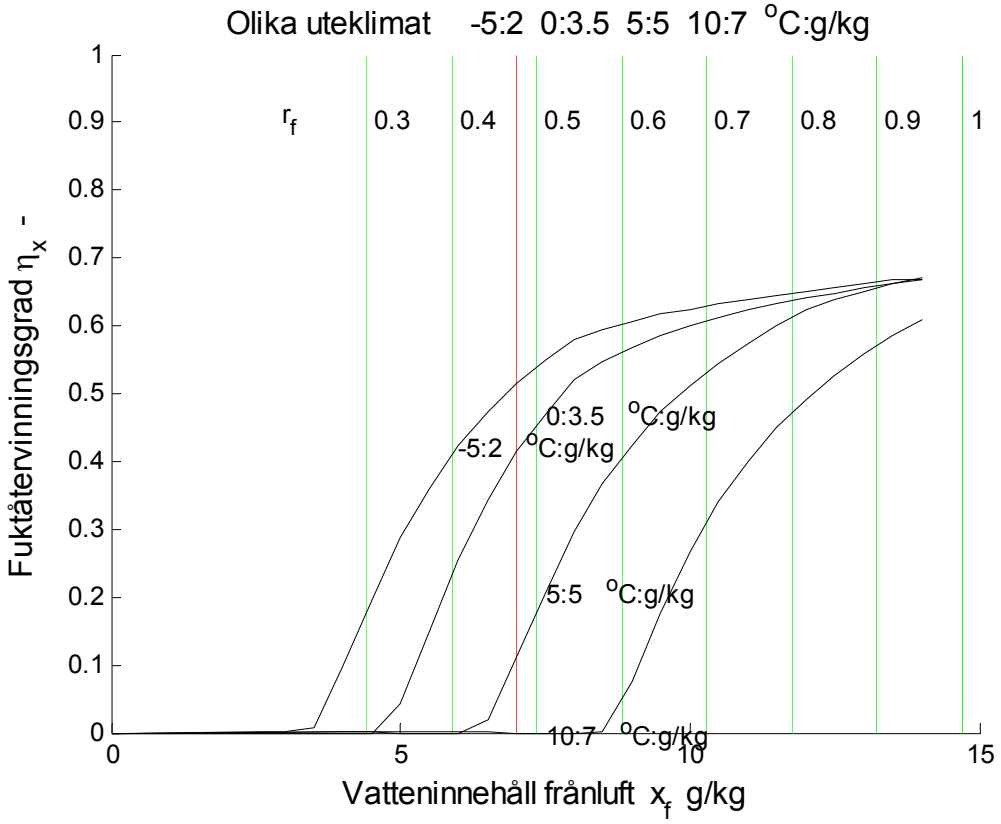
Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 11.1-6 med vertikala linjer från 0.3 upptill 1. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 11.1-6. Kravet på högst 2.5 g/kg för fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 anges i Figur 11.3-6.

Kurvorna i Figur 11.3 visar att för fukttillskottet 2.5 g/kg minskar den relativa luftfuktigheten från 0.54 till 0.31 om parallellflödet går från 0 till 0.2. Samma jämförelse för kurvorna i Figur 11.4-6 ger från 0.65 till 0.43, 0.72 till 0.54 respektive 0.79 till 0.64. Alla fall har fullt varvtal, vilket egentligen inte behövs för utetemperaturen 5 och 10 °C i Figur 11.5-6.

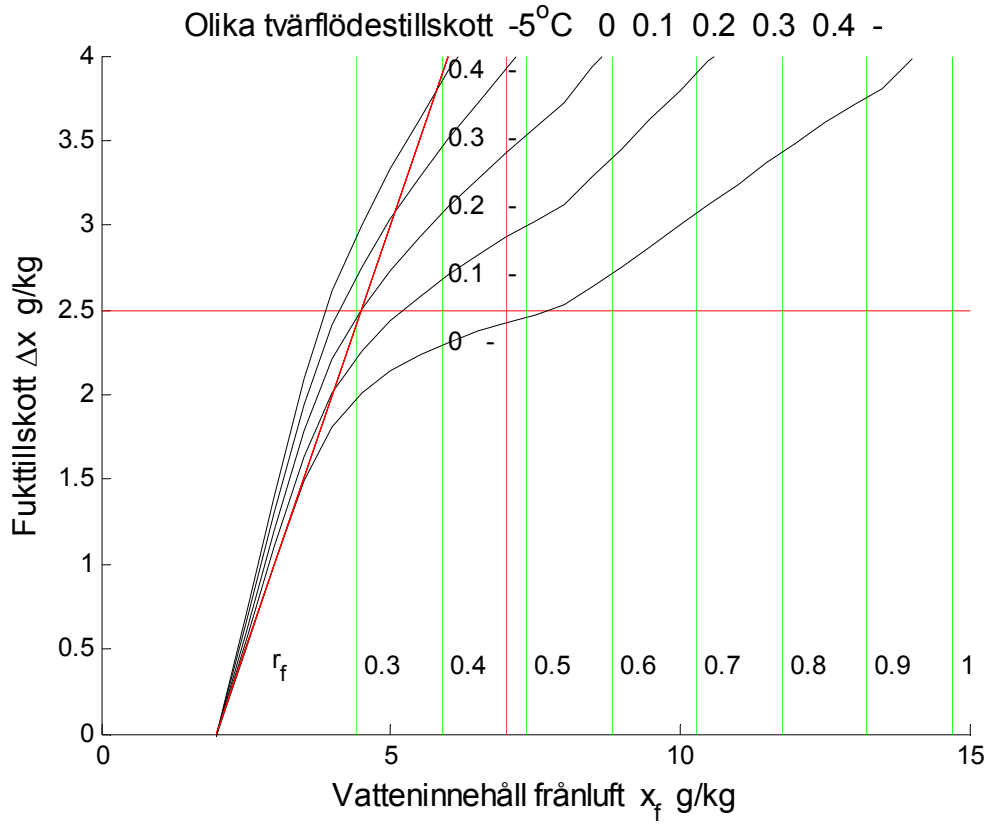
Slutsatsen från alla kurvorna i Figur 11.3-6 är att om husen är tillräckligt parallellflödesventilerade är det nog inga problem med fuktåtervinning.



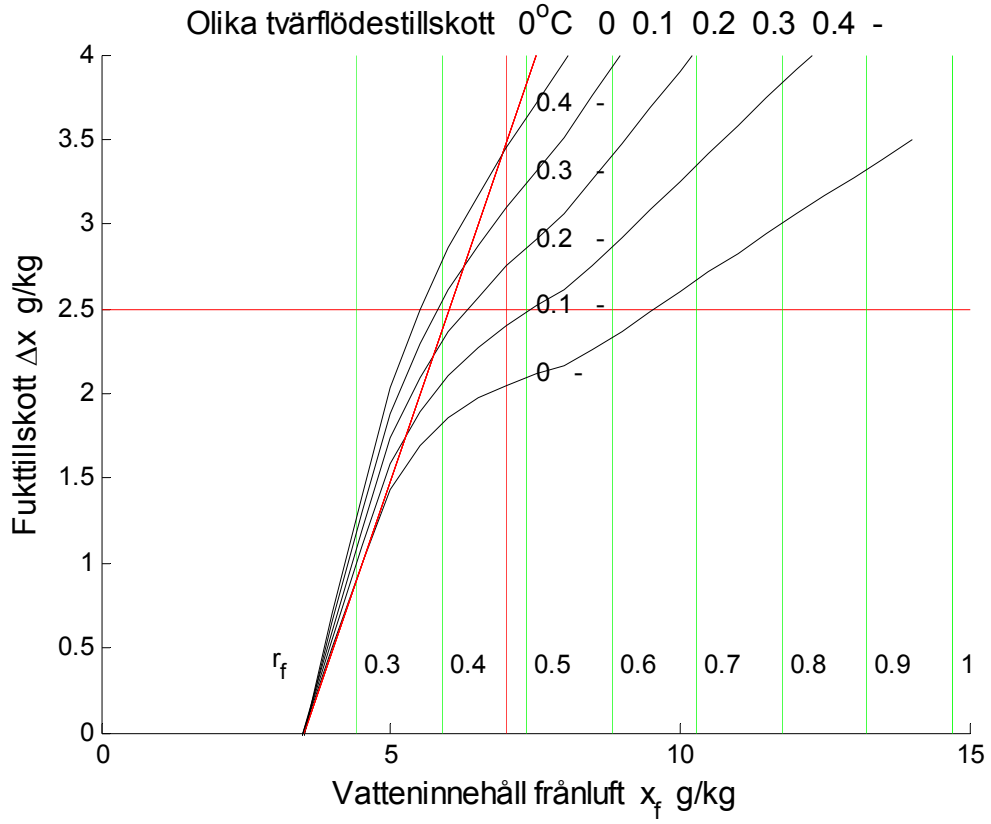
Figur 11.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



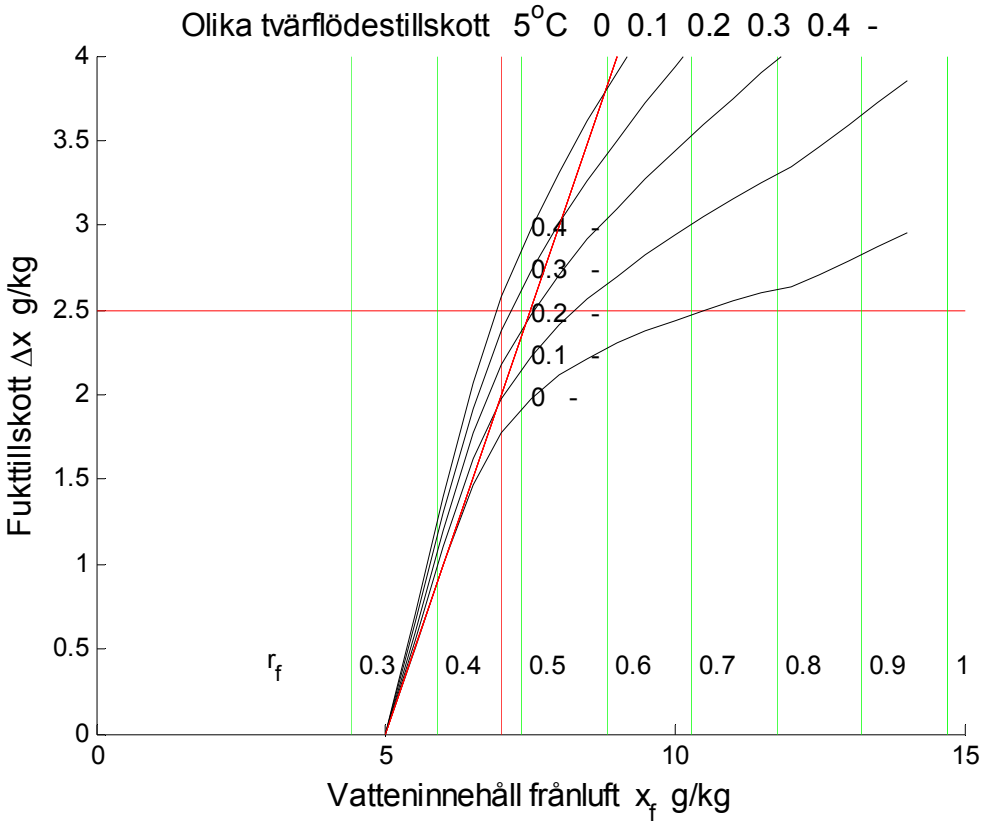
Figur 11.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika uteklimat.



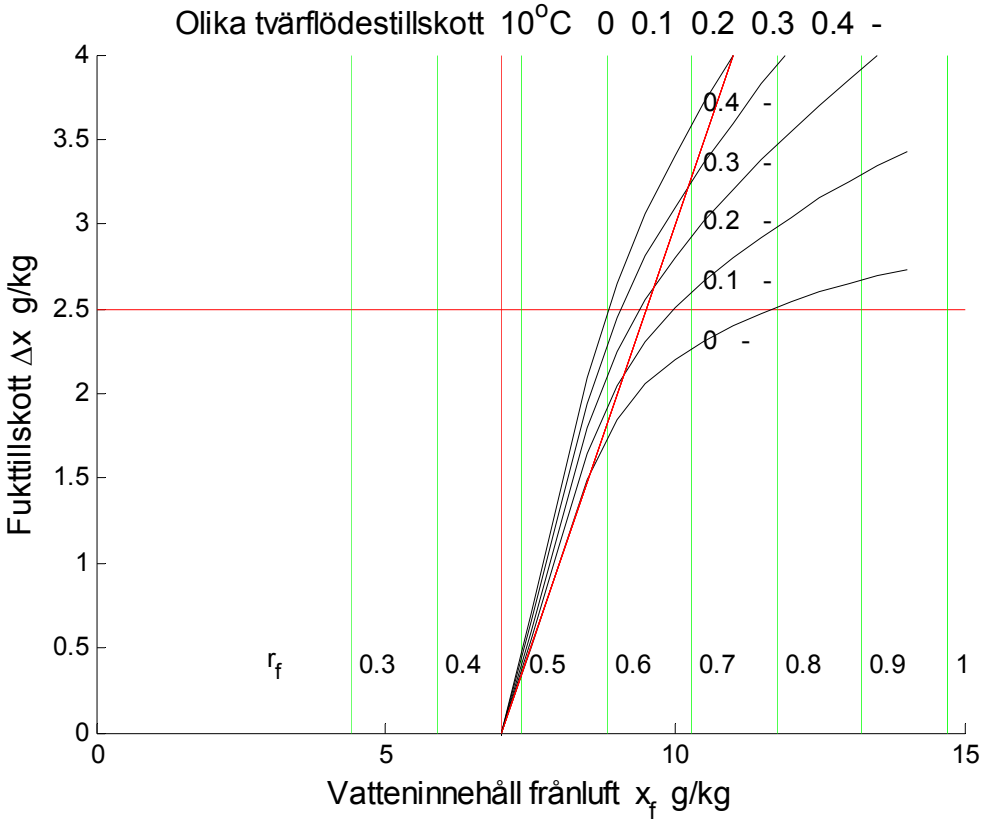
Figur 11.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och tvärflöde p och -5 °C:2 g/kg.



Figur 11.4 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och tvärflöde p och 0 °C:3.5 g/kg.



Figur 11.5 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och tvärflöde p och 5 °C:5 g/kg.



Figur 11.6 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och tvärflöde p och 10 °C:7 g/kg

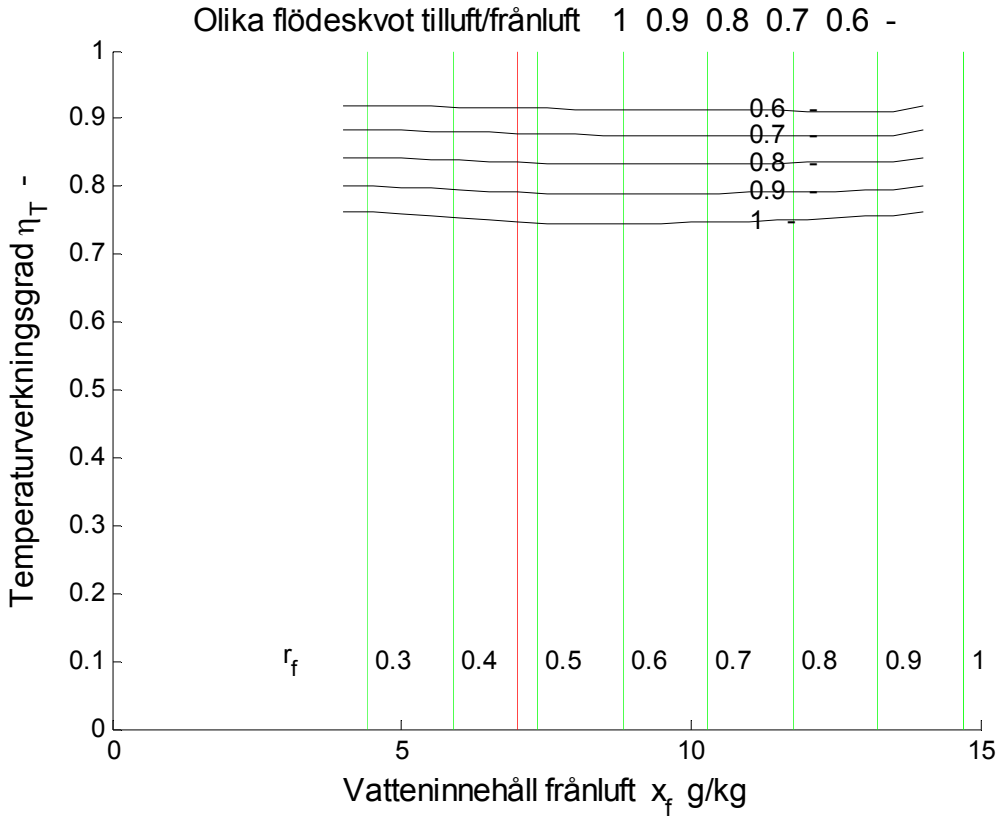
12 Undersökning av olika flödeskvot

Syftet med detta avsnitt är att redovisa hur inneklimatet 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 1, 0.9, 0.8, 0.7 och 0.6 av frånluftsflödet. Skillnaden täcks av infiltration. Uttrycket (11.1) kan utökas med flödeskvoten k mellan tilluftsflöde och frånluftsflöde, vilket ger:

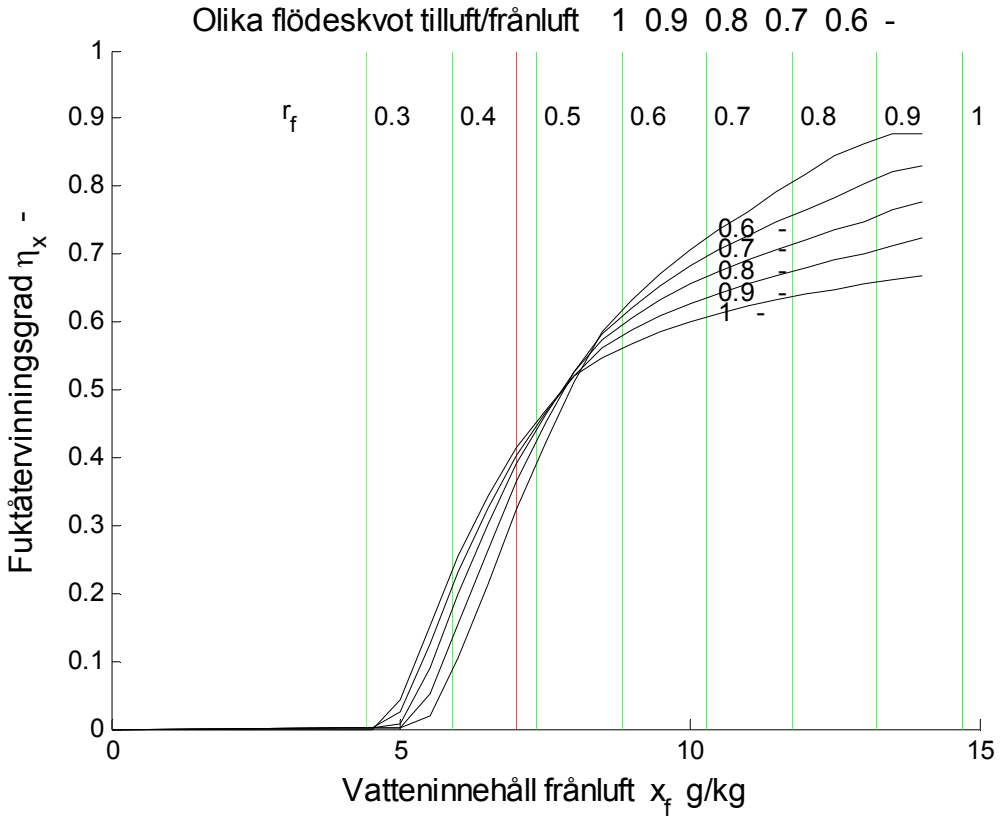
$$x_f = x_u + \Delta x / (1 + p - k\, \eta_x) \qquad \text{(g/kg)} \qquad (12.1)$$

Uttrycket (12.1) visar att om flödeskvoten $k = 1$ fås uttrycket (11.1). Fuktfaktorn $1/(1+p-k\eta_x)$ ser ut att avta med minskande flödeskvot k, men notera att fuktverkningsgraden η_x ökar när flödeskvoten k minskar. Om $k = 0$ (ingen tilluft) fås som väntat att $x_f = x_u + \Delta x / (1 + p)$.

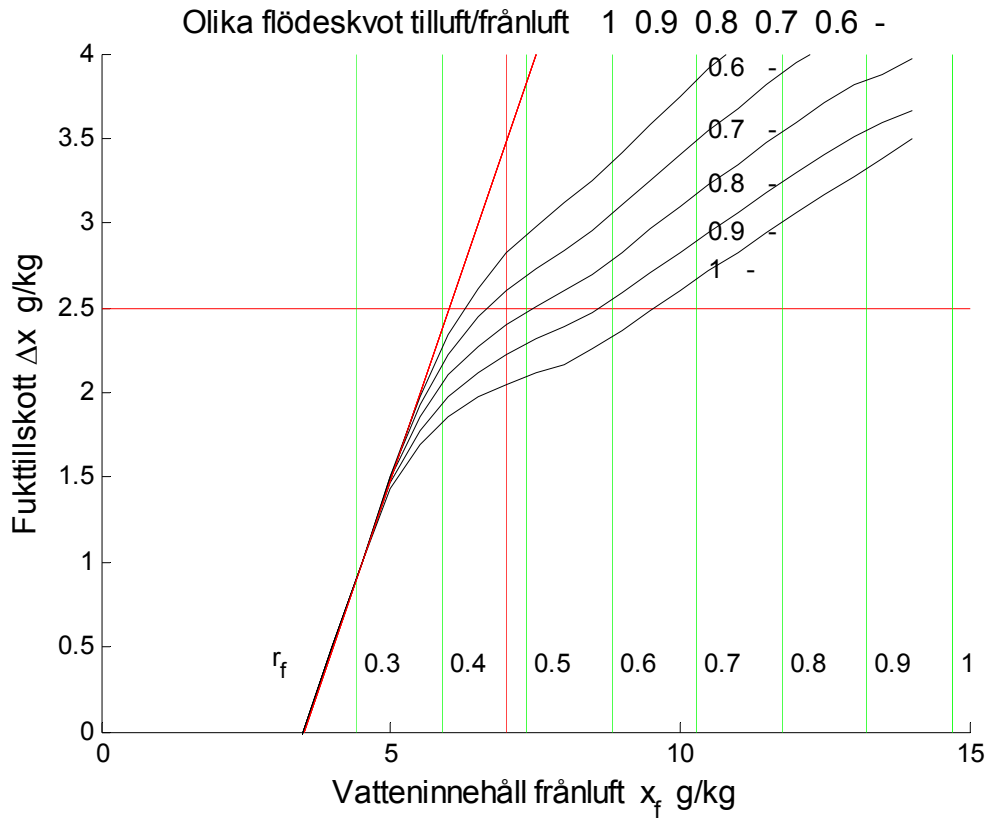
Temperaturverkningsgrad η_T, fuktverkningsgrad η_x och nödvändigt fukttillskott Δx g/kg redovisas i Figur 12.1-3 på samma sätt som i avsnitten 5-9. Kurvorna i Figur 12.1-3 visar att temperaturverkningsgrad, fuktverkningsgrad och fukttillskott påverkas av flödesobalansen. Ett fukttillskott på 2.5 g/kg ger en relativ luftfuktighet på 0.65, 0.58, 0.51 och 0.45 för flödeskvoterna 1, 0.9, 0.8 respektive 0.7.



Figur 12.1 Temperaturverkningsgrad η_T – som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot k.



Figur 12.2 Fuktverkningsgrad η_x – som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot k.



Figur 12.3 Fukttillskott Δx g/kg som funktion av x_f g/kg och olika flödeskvot k.

13 Undersökning med olika klimat

Syftet med detta avsnitt är att för basfallet få en översikt för fuktverkningsgraden och nödvändigt fuktillskott för olika uteklimat och inneklimat.

Fuktverkningsgrad och nödvändigt fukttillskott redovisas som isodiagram för nio fall som är kombinationer mellan tre frånluftstemperaturer, 20, 22 och 24 °C, och tre relativa luftfuktigheter för uteluften, 0.6, 0.8 och 1. De nio klimatfallen sammanställs nedan i Tabell 13.1.

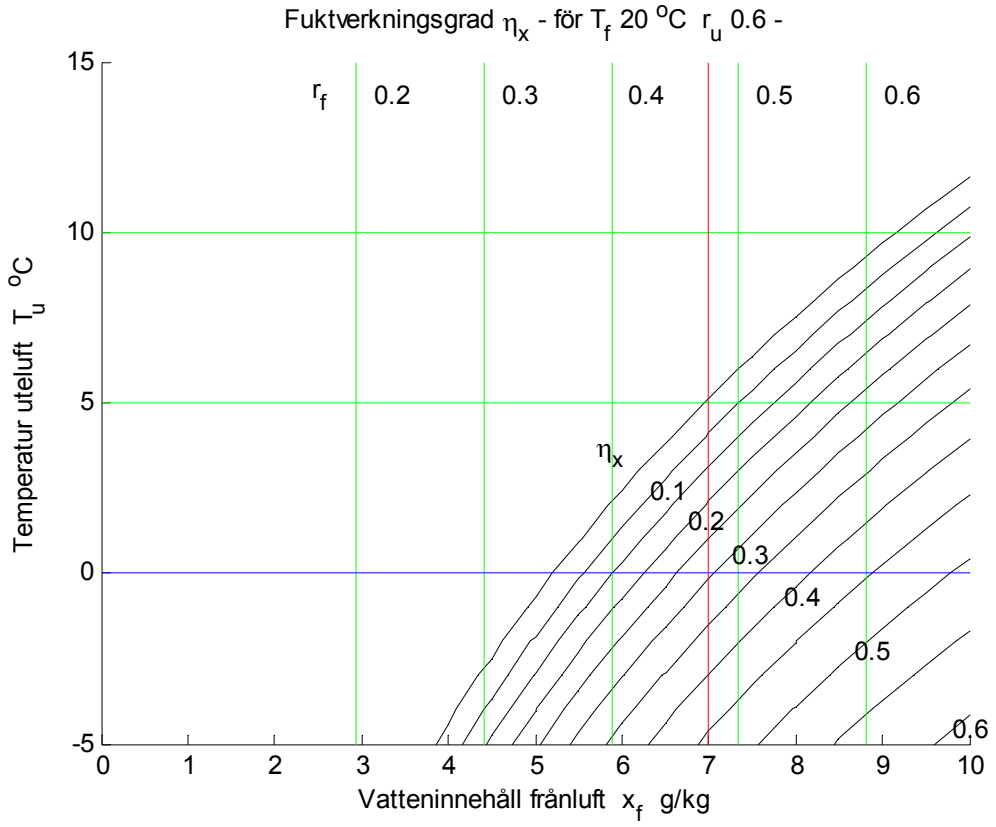
Frånluftens vatteninnehåll är x-axel för isodiagrammen i Figur 13.1-18 och har varierats från uteluftens vatteninnehåll i steg om 0.5 g/kg upptill 10 g/kg. Notera att x-axeln är kortare är i de tidigare avsnitten 5-8 upptill 15 g/kg. Utetemperaturen är y-axel för isodiagrammen i Figur 13.1-18 har varierats från -5 °C till 15 °C. En viktig anmärkning är att modellen inte tar hänsyn till isbildning i rotor utan endast kondensation och avdunstning, vilket kan påverka flödet.

Den relativa fuktigheten för frånluften markeras i Figur 13.1-18 med vertikala linjer från 0.2 upptill 0.6. Kravet på högst 7 g/kg vatteninnehåll för rumsluft/frånluft enligt SOSFS 1999:21 är också inritat i Figur 13.1-18. Kravet på högst 2.5 g/kg fukttillskott enligt SOSFS 1999:25 är också inritat i Figur 13.2(2)18.

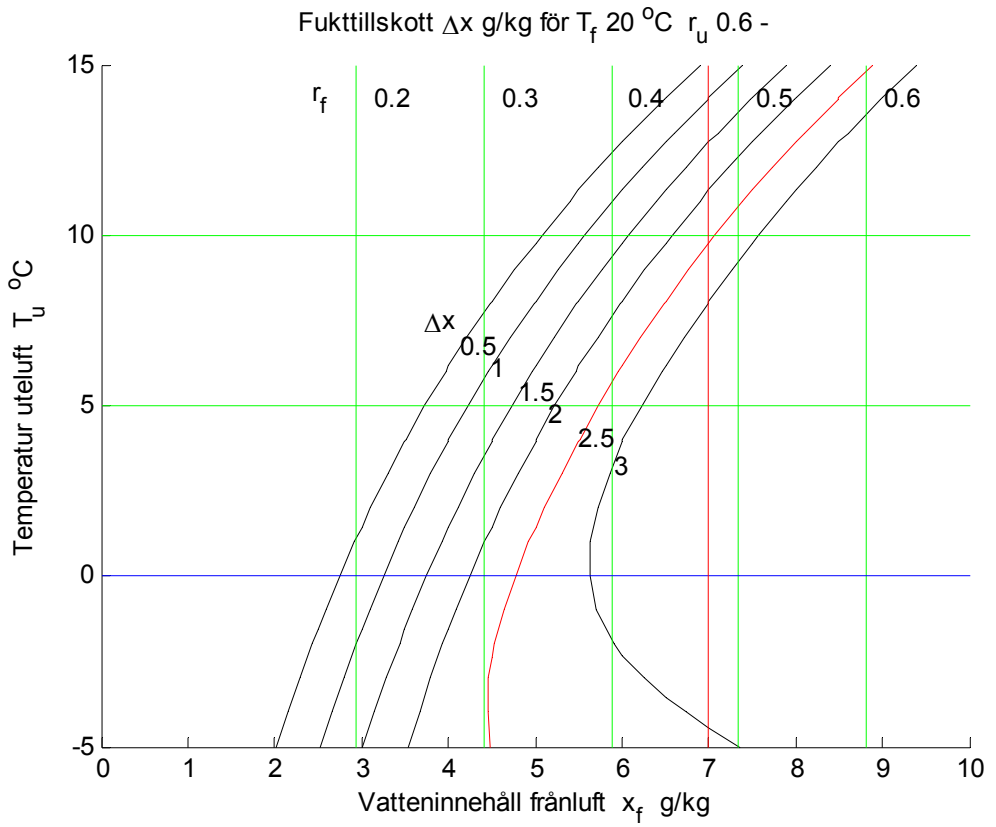
Tabell 13.1 Klimatfall och fuktverkningsgrad och fukttillskott för 0 °C ute och 7 g/kg inne.

fall	T_f °C	r_u -	η_x - Figur 13.	η_x - 0 °C 7 g/kg	Δx g/kg Figur 13.	Δx g/kg 0 °C 7 g/kg
1	20	0.6	1	0.29	2	> 3
2	20	0.8	3	0.35	4	2.6
3	20	1.0	5	0.42	6	1.8
4	22	0.6	7	0.26	8	> 3
5	22	0.8	9	0.31	10	2.7
6	22	1.0	11	0.38	12	2.0
7	24	0.6	13	0.23	14	> 3
8	24	0.8	15	0.27	16	2.8
9	24	1.0	17	0.34	18	2.2

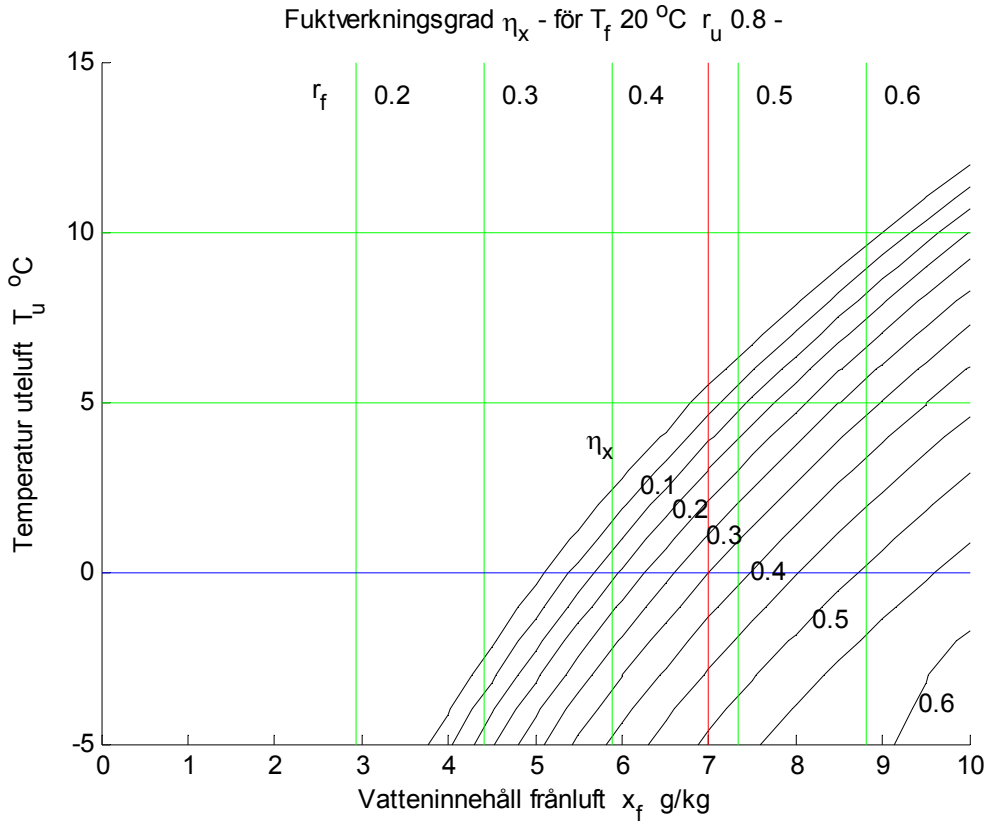
Några väntade slutsatser för tabellfallen för 0 °C ute och 7 g/kg inne är att ökande frånluftstemperatur medför minskande fuktverkningsgrad och ökande fukttillskott. Ökande relativ luftfuktighet ute medför ökande fuktverkningsgrad och minskande fukttillskott. Siffrorna i Tabell 11.1 och kurvorna i Figur 13.2(2)18 visar också att fukttillskottet 2.5 g/kg kan medföra att gränsen 7 g/kg överskrids som för fall 3, 6 och 9 alla med mättad uteluft.



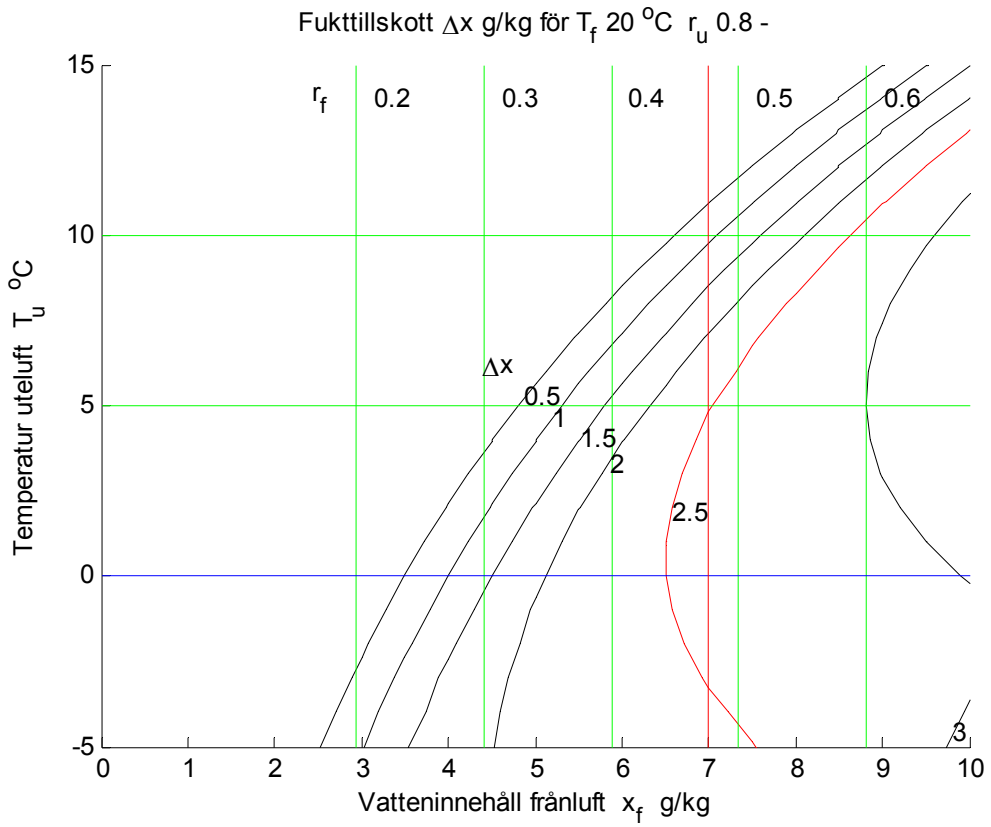
Figur 13.1 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 20 °C och r_u = 0.6.



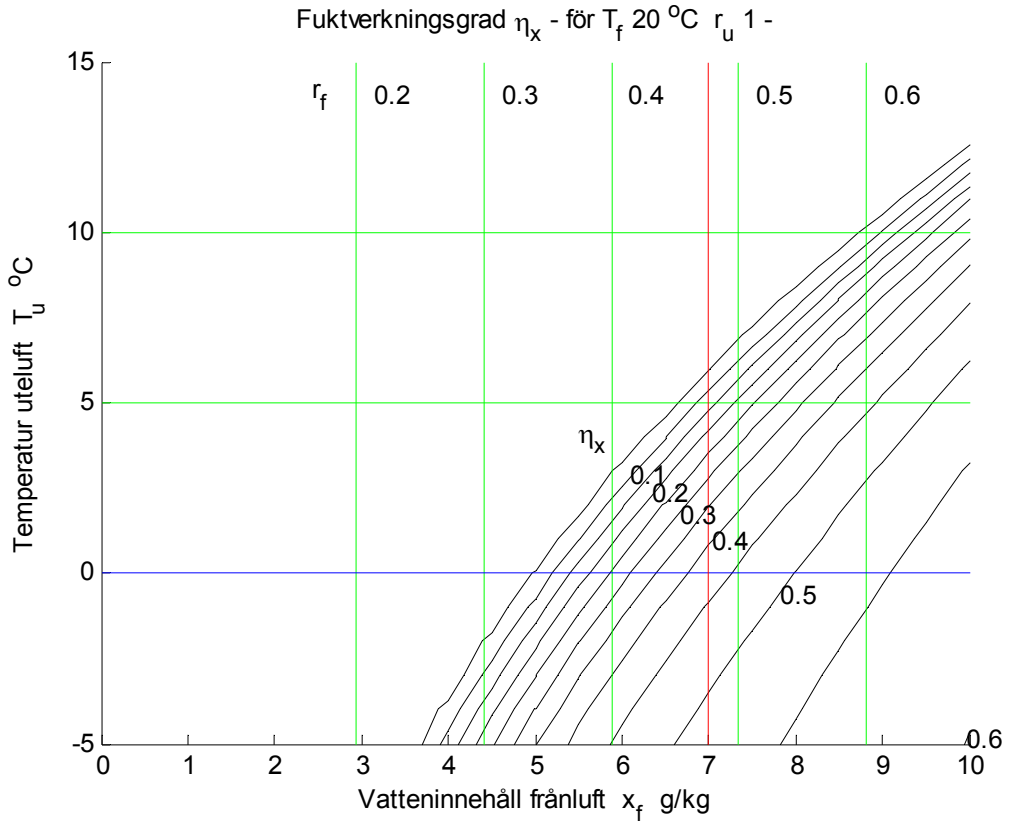
Figur 13.2 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 20 °C och r_u = 0.6.



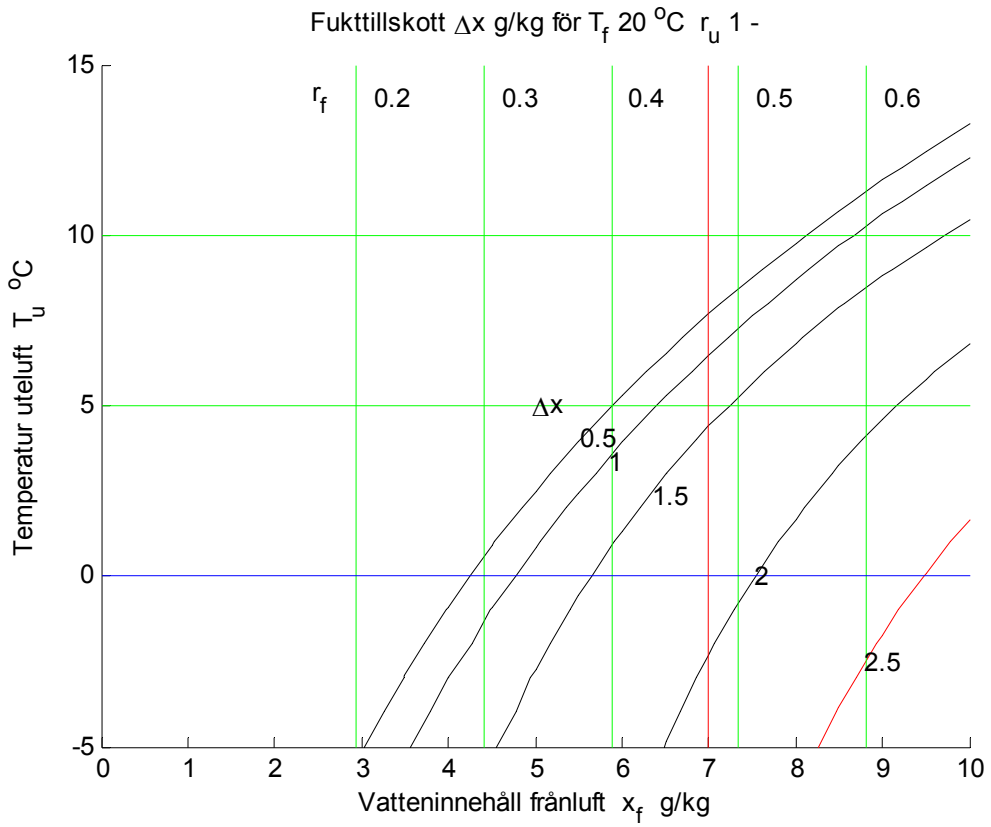
Figur 13.3 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 20 °C och r_u = 0.8.



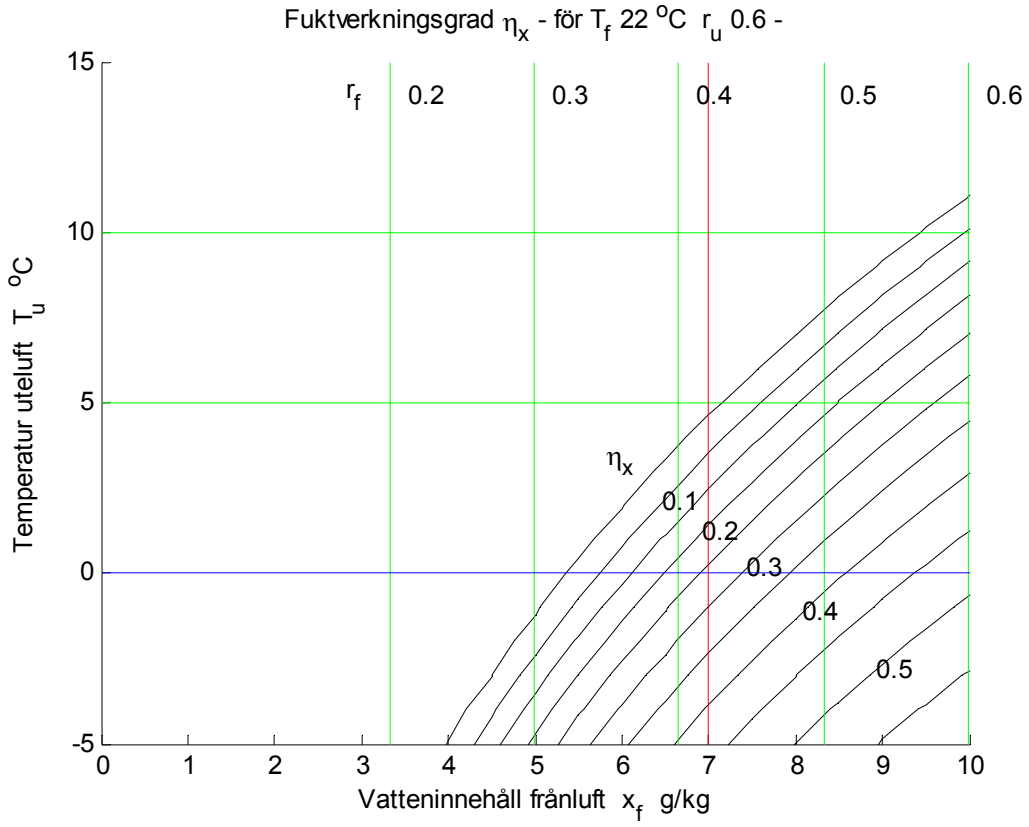
Figur 13.4 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 20 °C och r_u = 0.8.



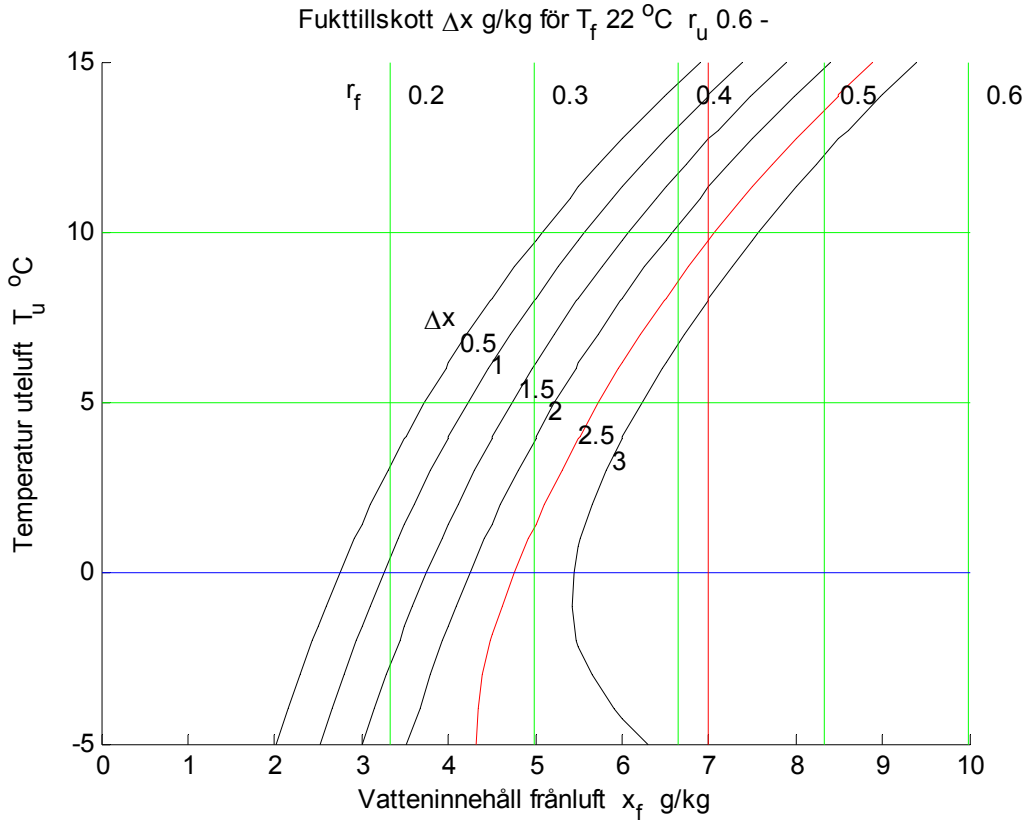
Figur 13.5 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 20 °C och r_u = 1.



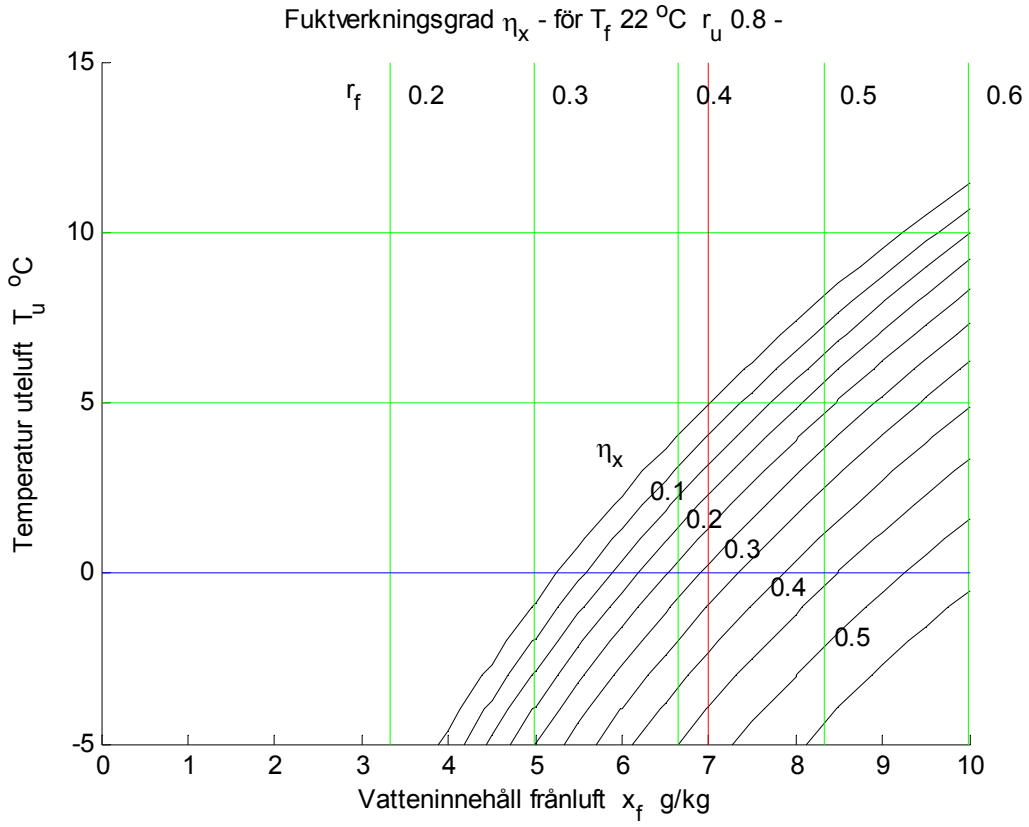
Figur 13.6 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 20 °C och r_u = 1.



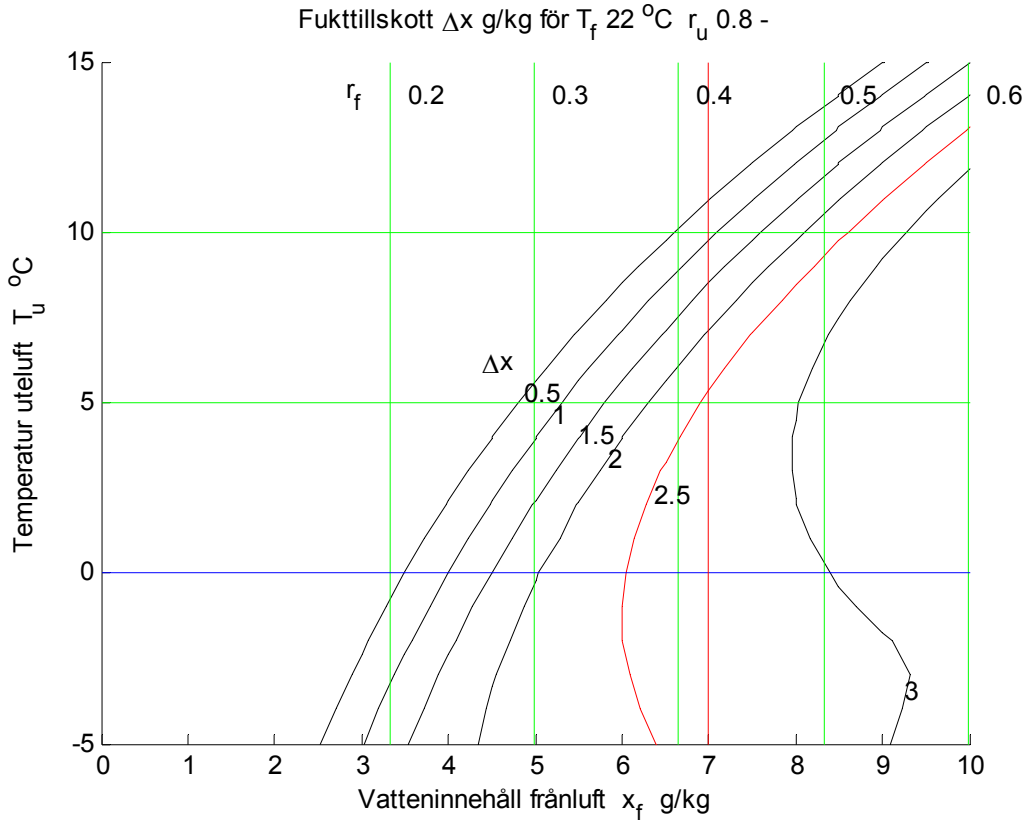
Figur 13.7 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 22 °C och r_u = 0.6.



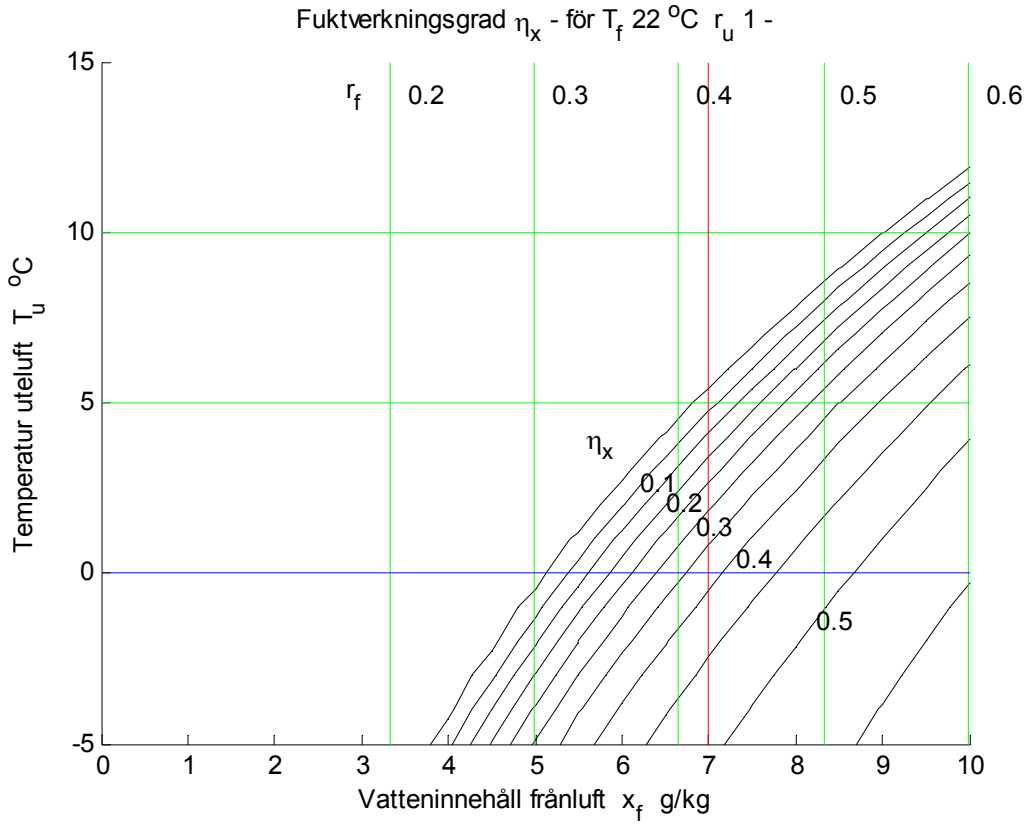
Figur 13.8 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 22 °C och r_u = 0.6.



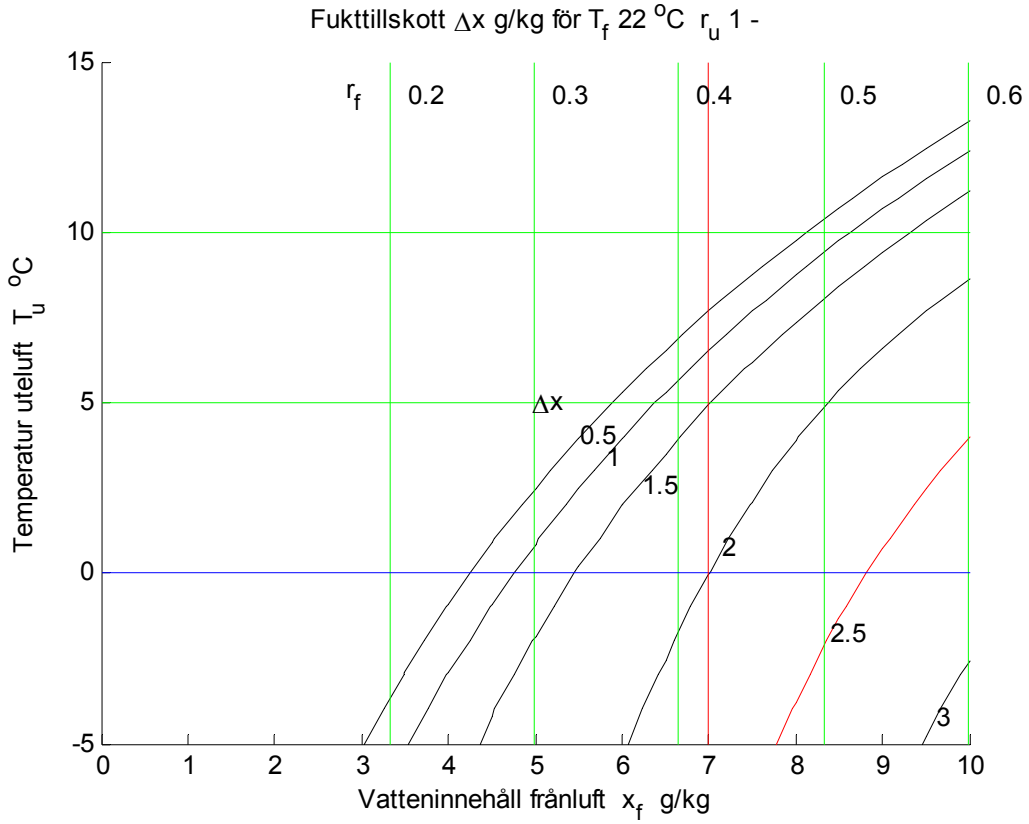
Figur 13.9 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 22 °C och r_u = 0.8.



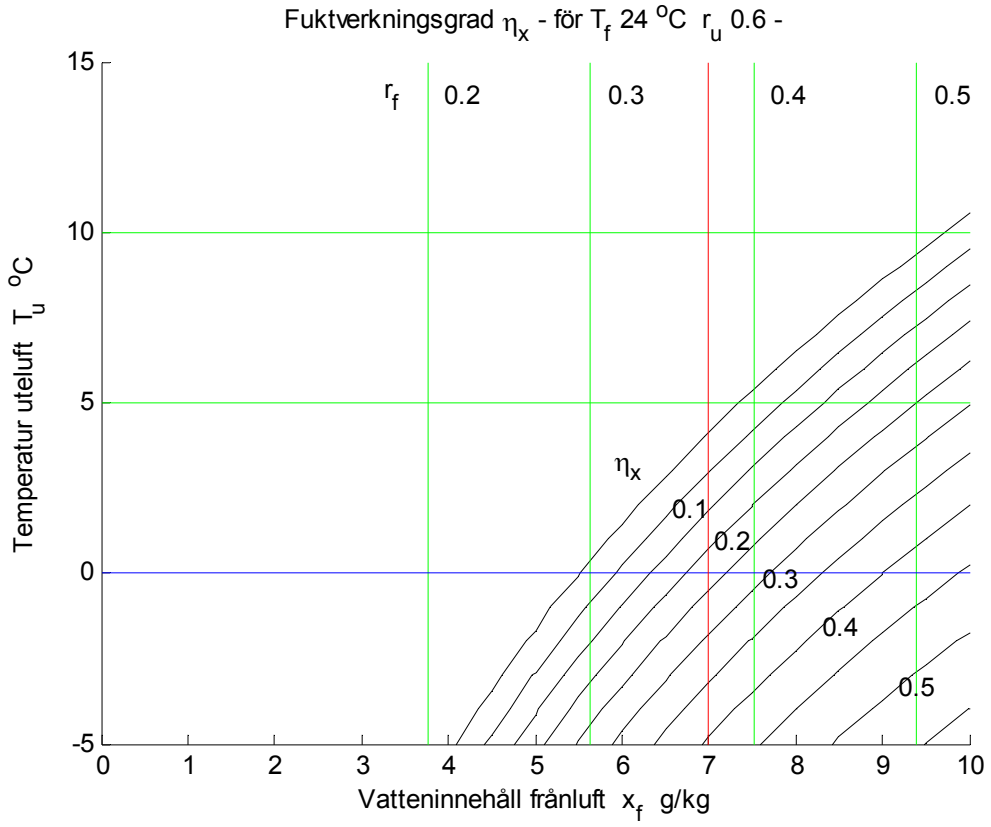
Figur 13.10 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 22 °C och r_u = 0.8.



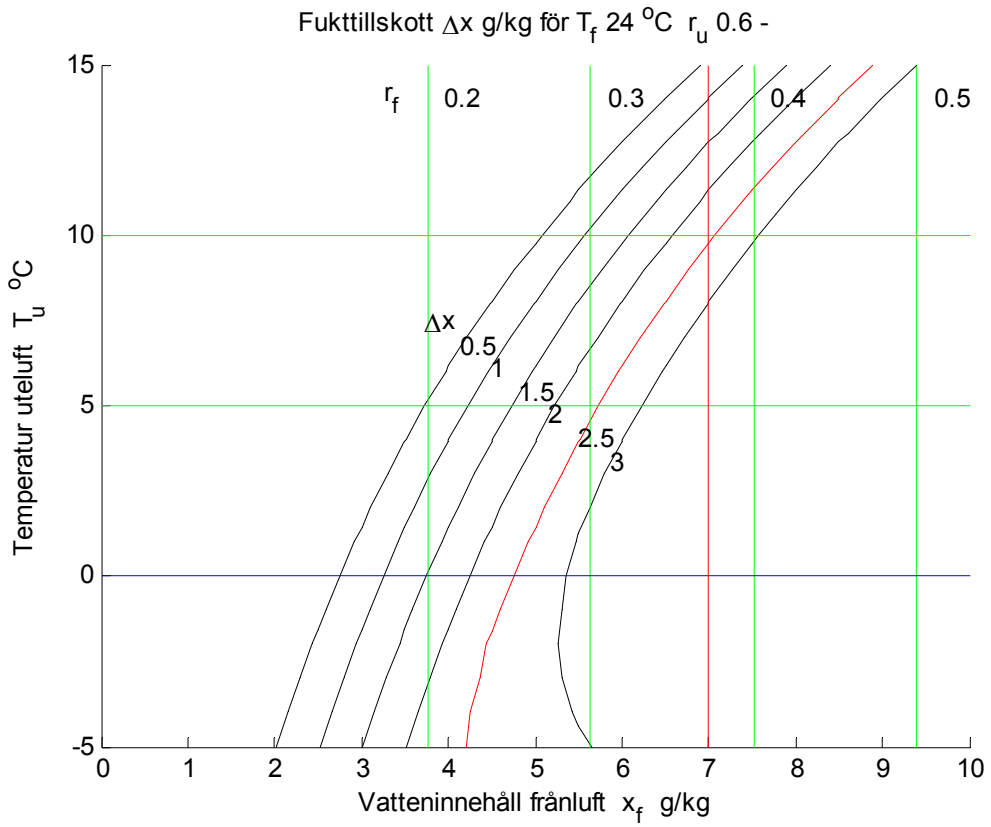
Figur 13.11 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 22 °C och r_u = 1.



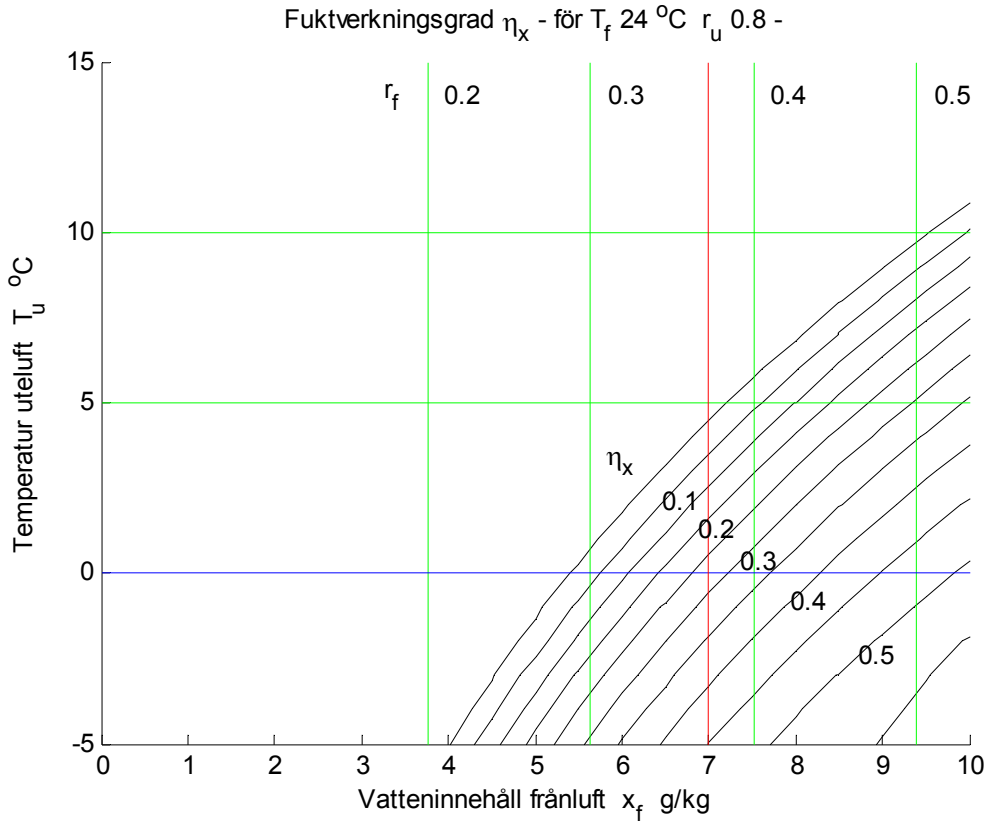
Figur 13.12 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 22 °C och r_u = 1.



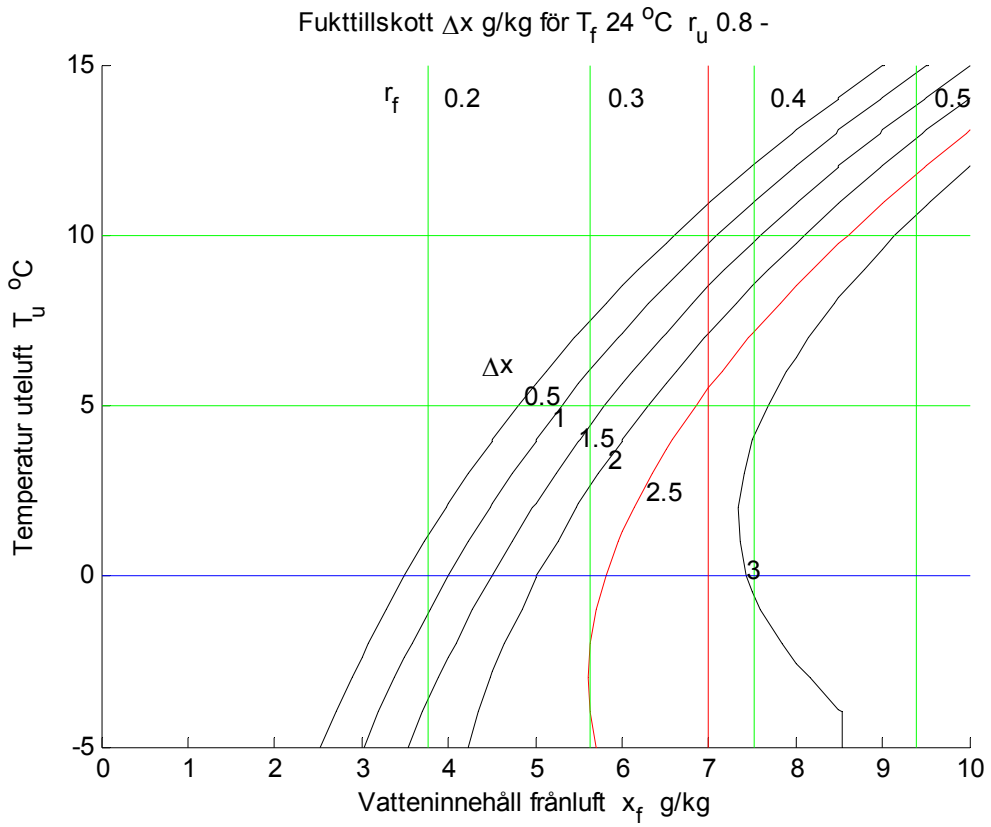
Figur 13.13 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 24 °C och r_u = 0.6.



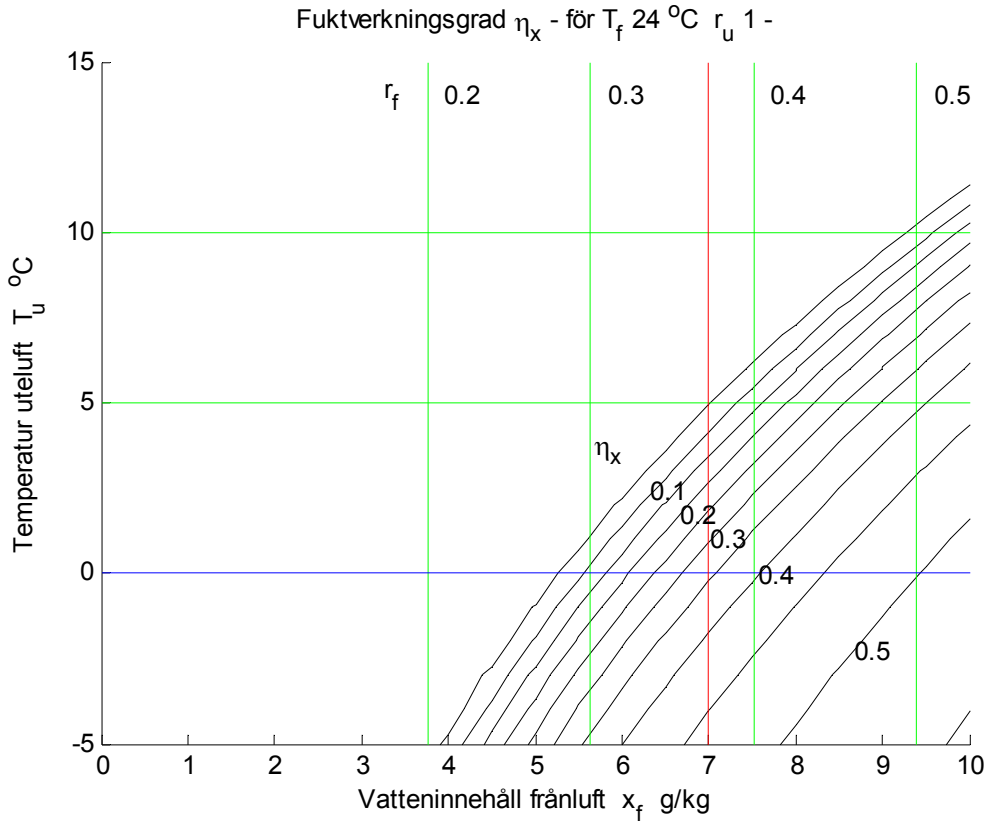
Figur 13.14 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 24 °C och r_u = 0.6.



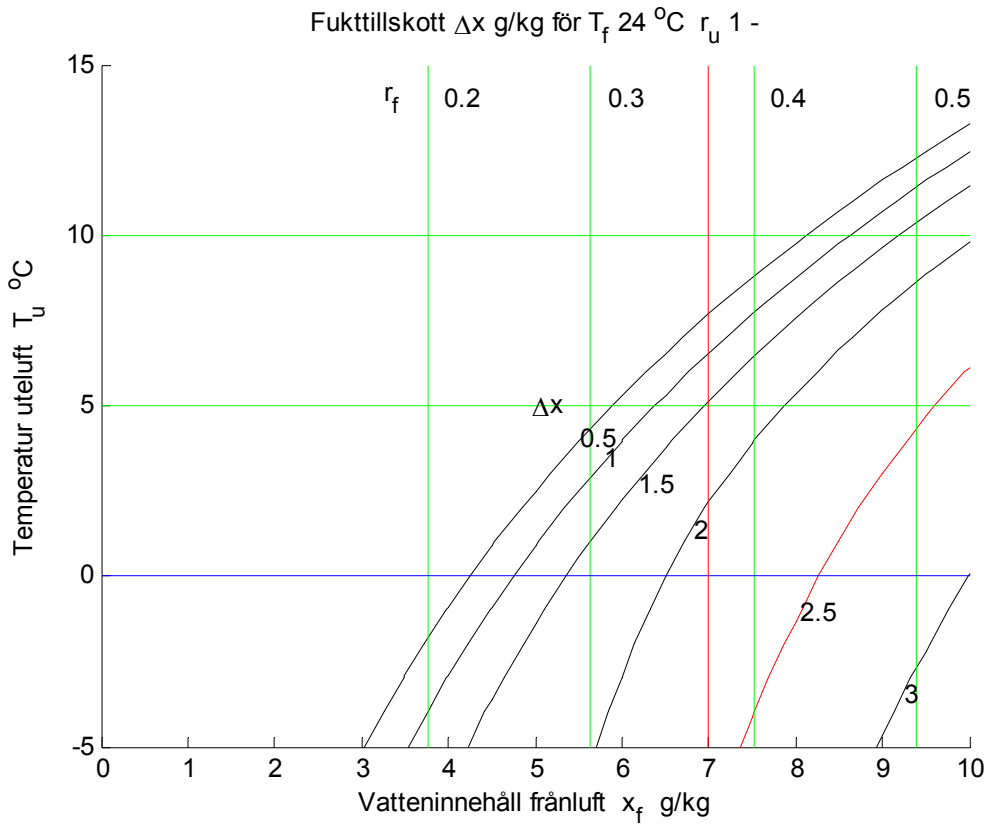
Figur 13.15 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 24 °C och r_u = 0.8.



Figur 13.16 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 24 °C och r_u = 0.8.



Figur 13.17 Fuktverkningsgrad η_x - funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 24 °C och r_u = 1.



Figur 13.18 Fukttillskott Δx g/kg funktion av x_f g/kg och T_u °C för T_f = 24 °C och r_u = 1.

14 Undersökning av tidsförlopp

All undersökning av inneklimat, fuktverkningsgrad och nödvändigt fukttillskott har i de tidigare avsnitten 5-13 bara behandlat det statiska fallet (i jämvikt). I detta avsnitt redovisas sju fall med olika fukttillskott fördelat över tiden. Sambandet (1.2) används för att simulera byggnadens inre fuktbalans. Gemensamma förutsättningar för alla fall är uteklimatet 0 °C och 3.5 g/kg och frånluftstemperaturen 20 °C. Simuleringstiden är 48 h. Luftomsättningstiden för fukt har varit 3 h. Uppstart sker med samma vatteninnehåll inne som ute 3.5 g/kg eller med en given relativ luftfuktighet inne. Den relativa luftfuktigheten och fuktverkningsgraden redovisas parvis i Figur 14.1-14 för de sju fallen.

Fall 1 visar resultatet i Figur 14.1-2 för fukttillskott 1, 2, 3 och 4 g/kg under 24 h följt av 0 g/kg under 24 h. Fuktökningen är långsammare än luftomsättningstiden för fukt på 3 h. Orsaken är självförstärkningen genom att fuktåtervinningen ökar med vatteninnehåll inne.

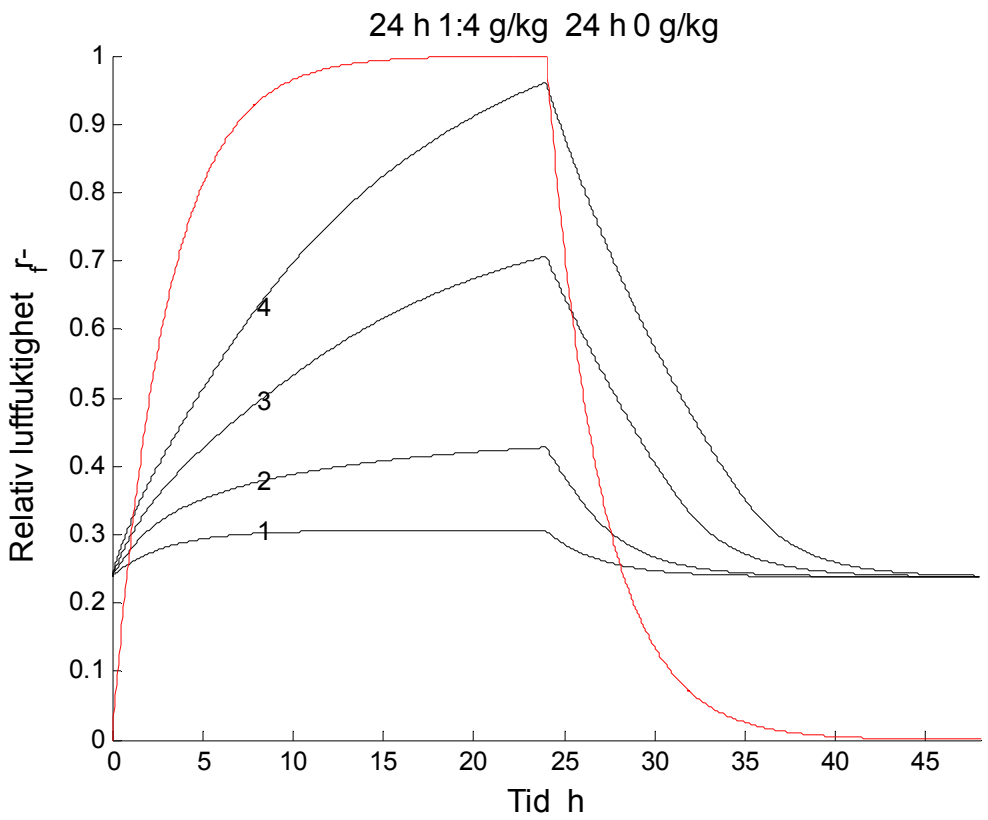
En hjälpkurva för ett insvängningsförlopp med tidskonstanten 3 h har också ritats in i Figur 14.1 som jämförelse. Ett insvängningsförlopp utan självförstärkning har efter 1, 2 och 4 luftomsättningstider eller som här 3, 6 och 12 h uppnått 0.63, 0.86 respektive 0.98 av slutvärdet.

Fall 2 visar resultatet i Figur 14.3-4 för fukttillskott som i medeltal är 2 g/kg över 24 h. Det som skiljer är att fukttillskottet är 3, 4, 5 och 7 g/kg under 12, 8, 6 respektive 4 h av 24 h och 1 g/kg under övrig tid. Fallet med konstant 2 g/kg över 24 h finns också med. Variationen i relativ luftfuktighet och fuktverkningsgrad skiljer givetvis över dygnet. Dygnsmedelvärdena skall vara något högre för höga fukttillskott under kort tid på grund av självförstärkningen. Beräknade dygnsmedelvärden för den relativa luftfuktigheten för frånluft är 0.451, 0.473, 0.481, 0.485 respektive 0.489. Slutsatsen är att variationer i fukttillskottet ökar medelvärdet något. Motsvarande medelvärdena för fuktverkningsgraden är 0.362, 0.371, 0.362, 0.357 och 0.351. Värdena ökar först och avtar därefter. En förklaring till att effekten av ett högt och kortvarigt fukttillskott begränsas, är att fuktverkningsgraden har en avtagande ökning.

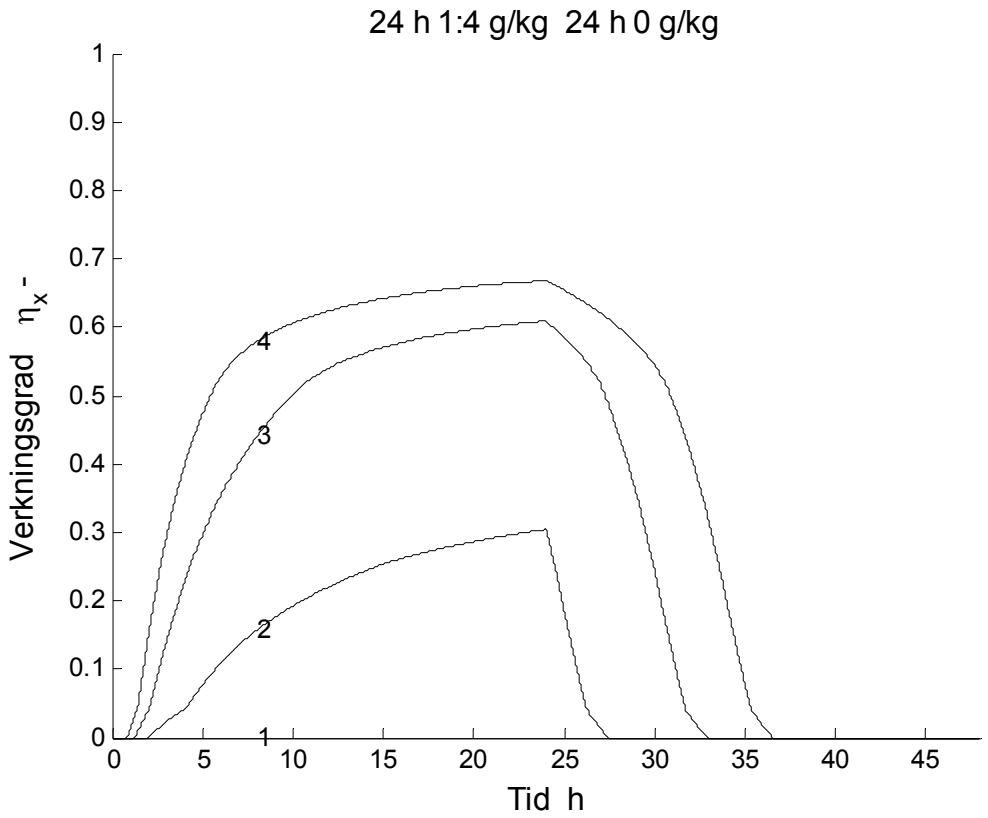
Fall 3-5 visar resultatet i Figur 14.5-10 för fukttillskottet 0, 1 och 2 g/kg under 48 h med start från olika relativ luftfuktighet från 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 och 0.9. Kurvorna visar att tidsförloppen är långsammare än luftomsättningstiden för fukt på grund av självförstärkningen. Hjälpkurvan för luftomsättningstiden 3 h finns även inritad här. De tre olika fukttillskotten 0, 1 och 2 g/kg fördröjer insvängningsförloppet betydligt. Fuktverkningsgraden är noll för fukttillskott 0 och 1 g/kg efter 10 respektive 20 h. Fallet med fukttillskott 2 g/kg har inte nått sitt jämviktstillstånd efter 48 h.

Fall 6 och 7 redovisar tidigare fall med olika fuktomsättningstid 3, 6, 12 respektive 24 h kombinerat med fall 1 och 4 g/kg i Figur 14.11-12 respektive med fall 2 med 8 h 4 g/h och 16 h 1 g/kg. Kurvorna i Figur 14.11-14 visar att hög fuktomsättningstid ger lägre luftfuktighet inne.

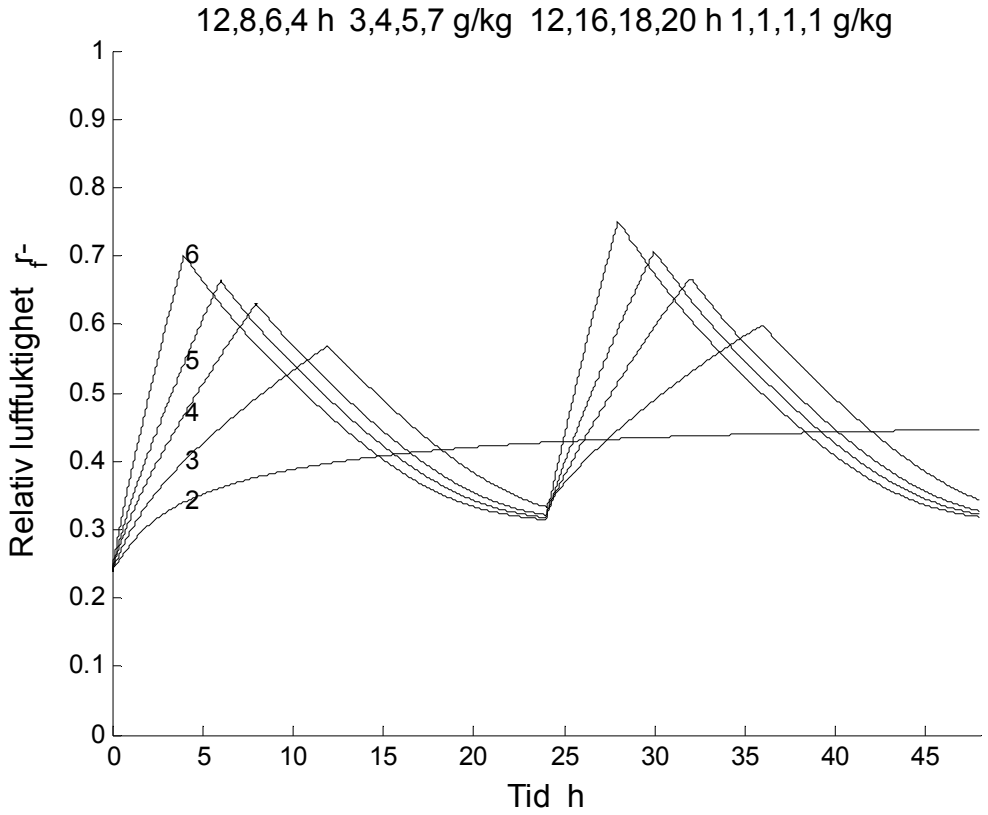
Slutsatsen för detta avsnitt är att den självförstärkande effekten gör att tidsförloppen blir mycket långsammare än vad luftomsättningstiden anger. Utjämningen över dygnet är stor.



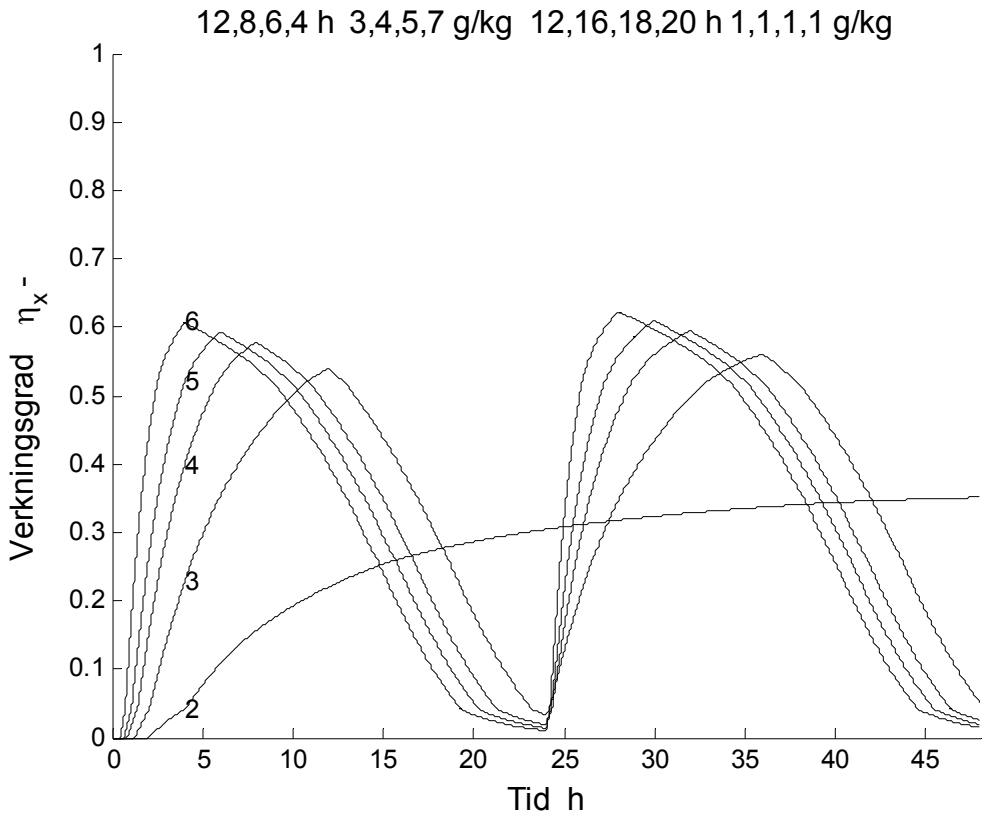
Figur 14.1 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 1.



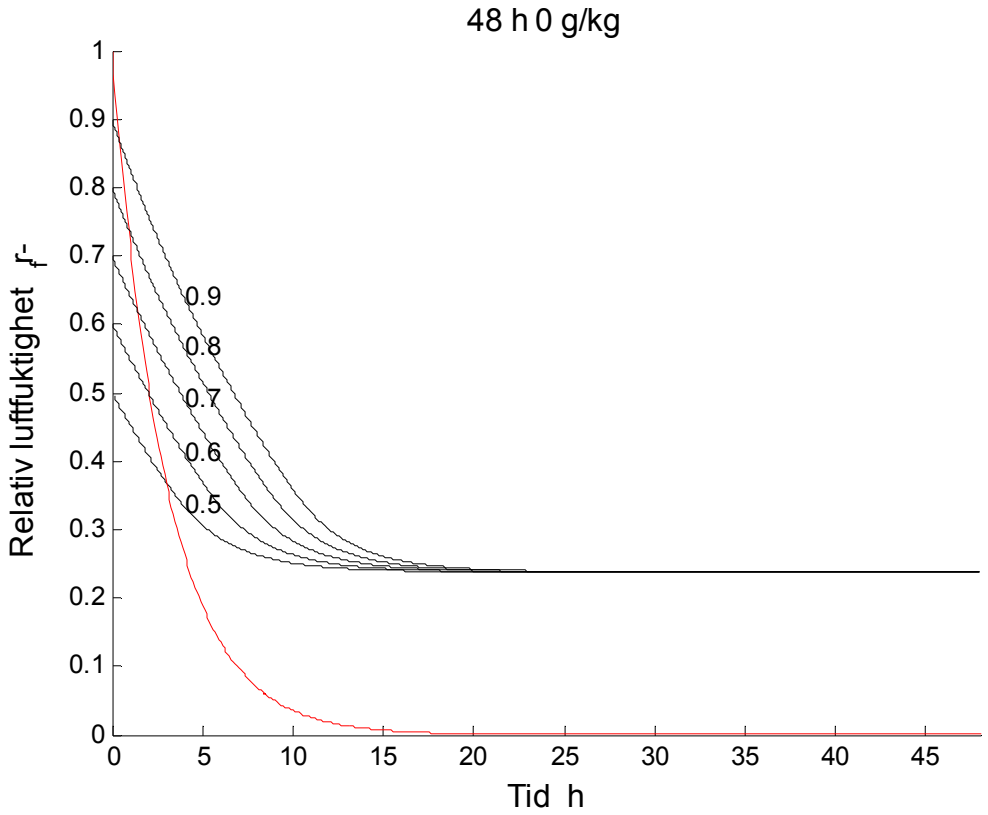
Figur 14.2 Fuktverkningsgrad η_x - för som funktion av tiden 0-48 h för fall 1.



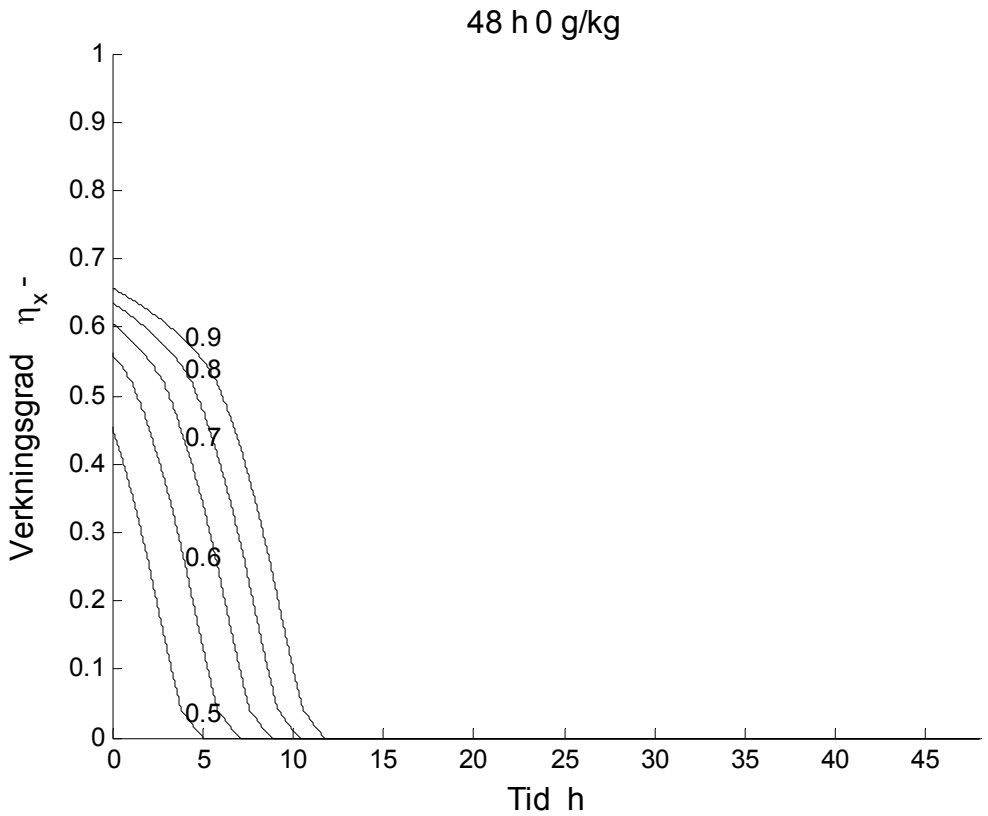
Figur 14.3 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 2.



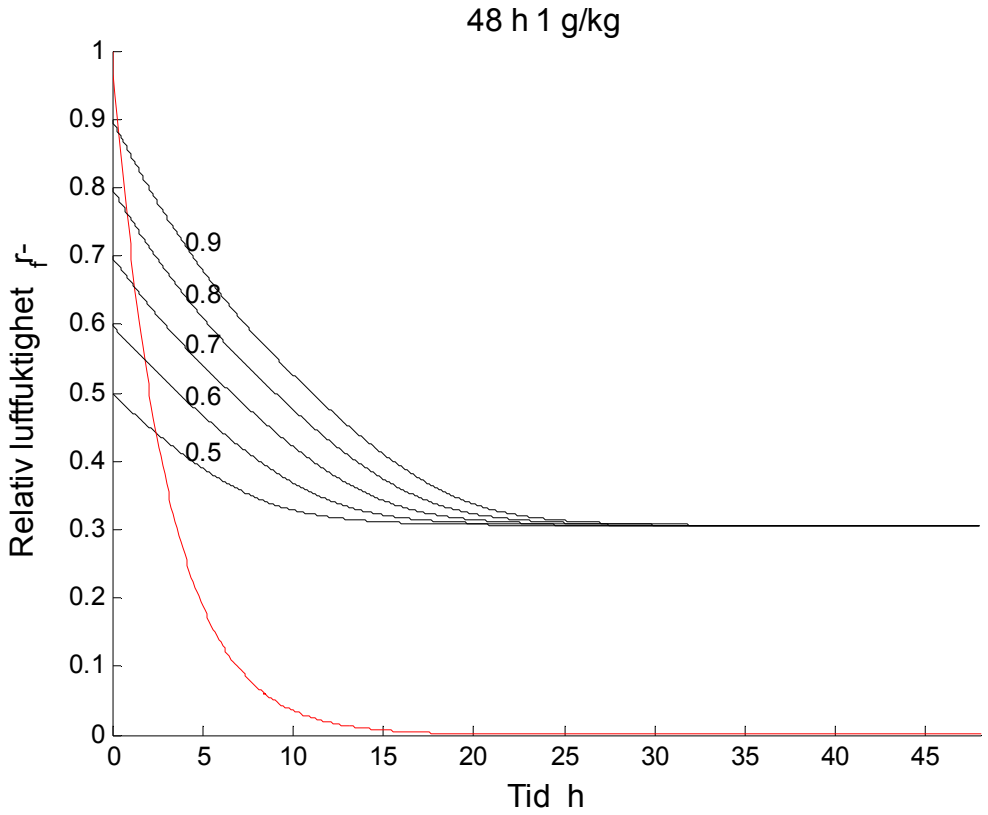
Figur 14.4 Fuktverkningsgrad η_x -för som funktion av tiden 0-48 h för fall 2.



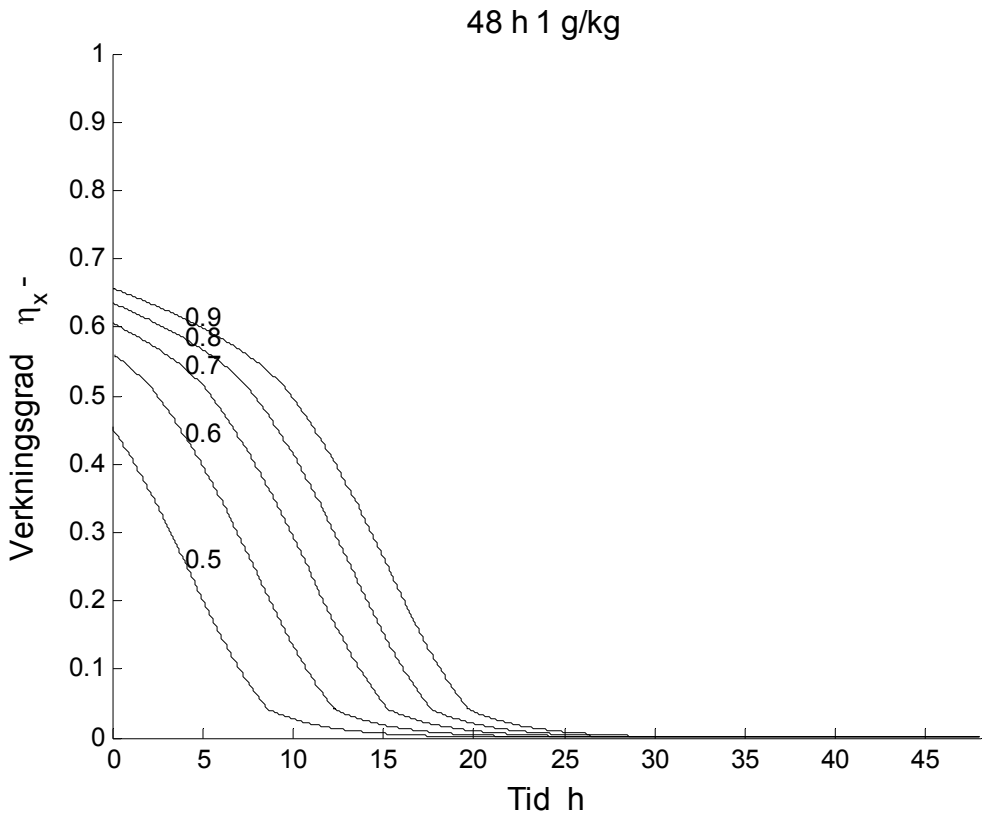
Figur 14.5 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 3.



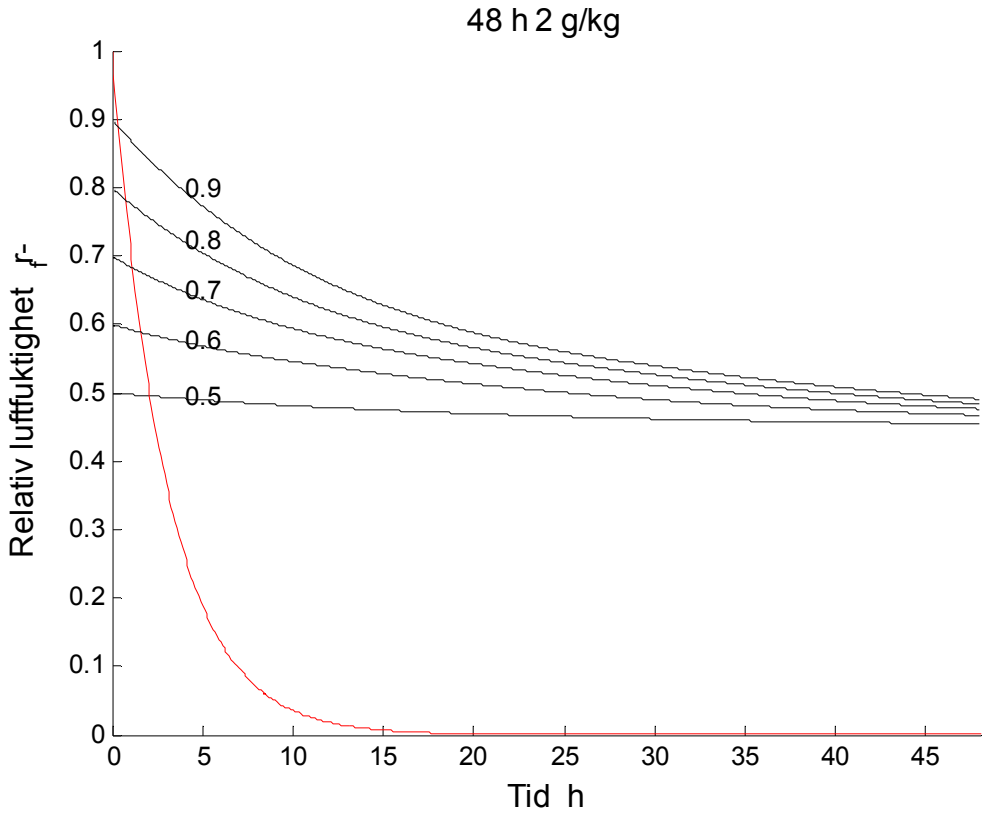
Figur 14.6 Fuktverkningsgrad η_x -för som funktion av tiden 0-48 h för fall 3.



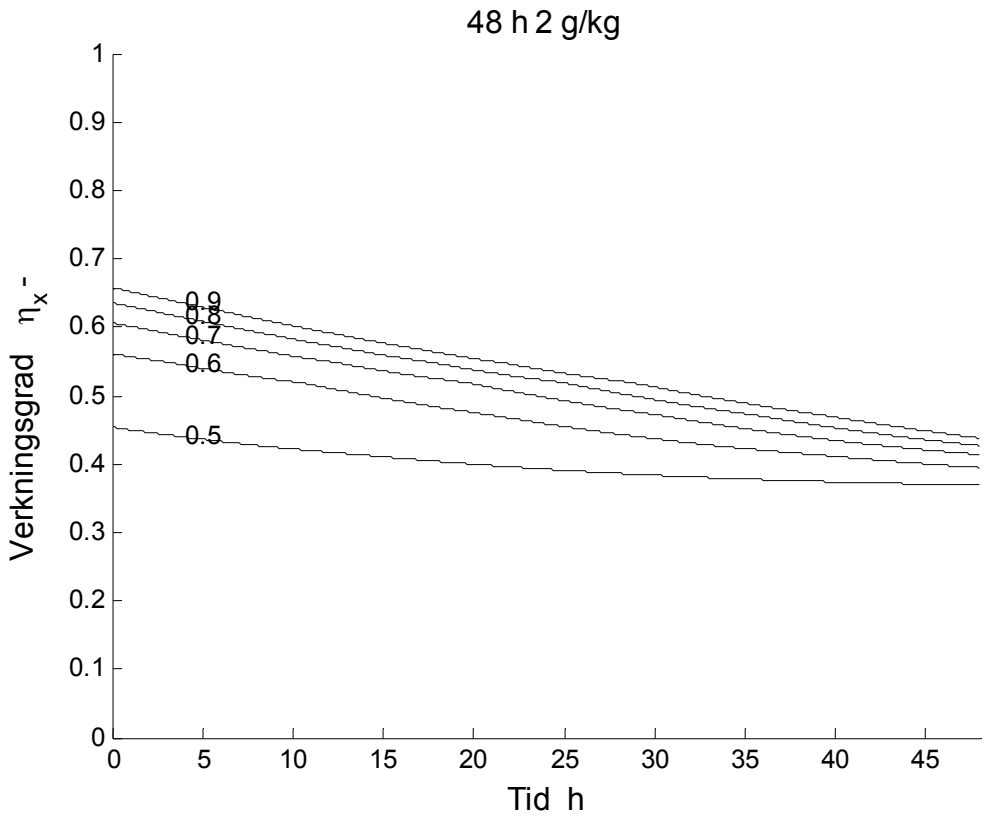
Figur 14.7 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 4.



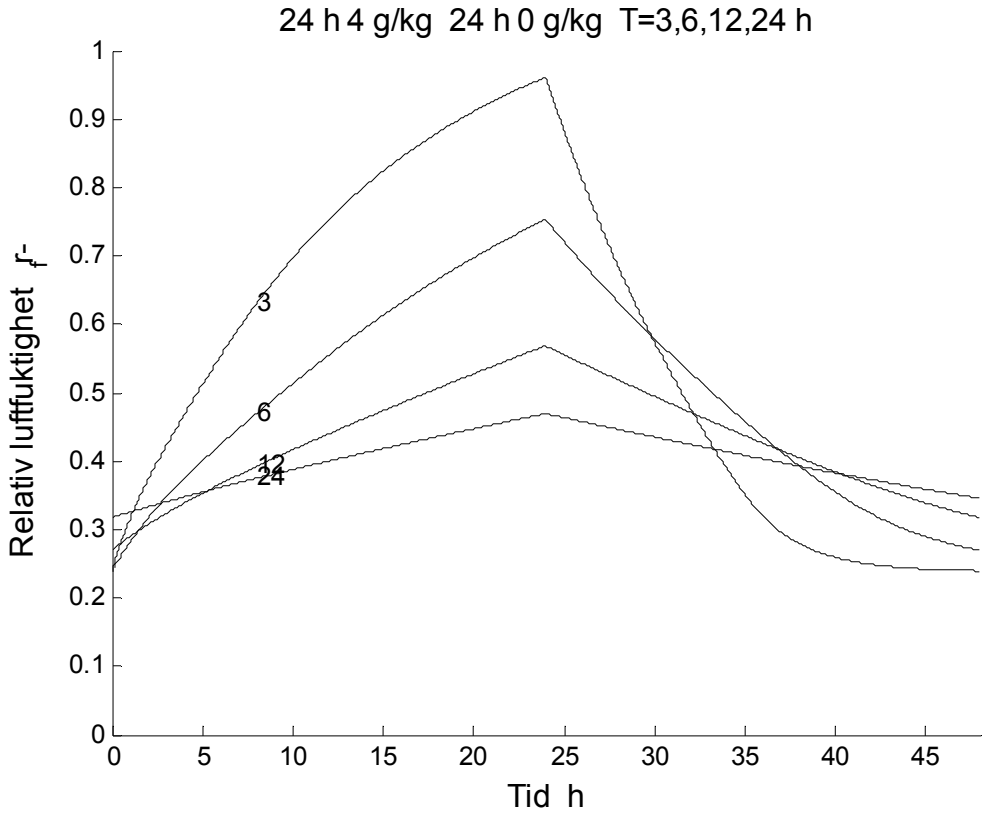
Figur 14.8 Fuktverkningsgrad η_x -för som funktion av tiden 0-48 h för fall 4.



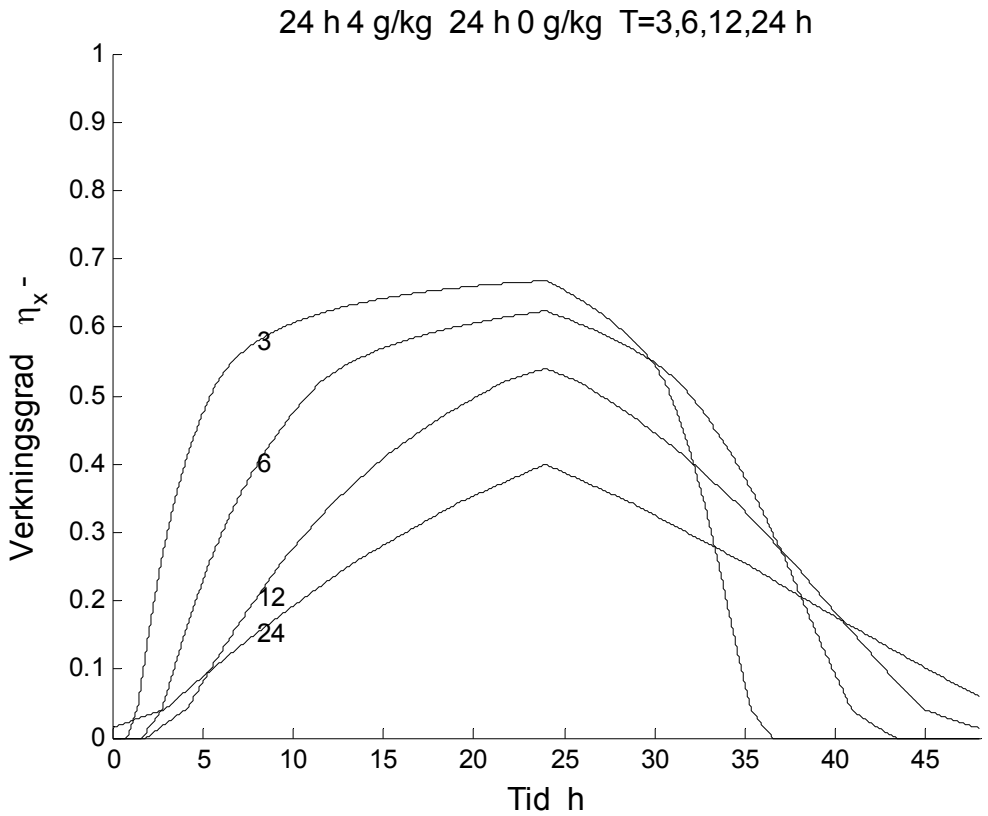
Figur 14.9 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 5.



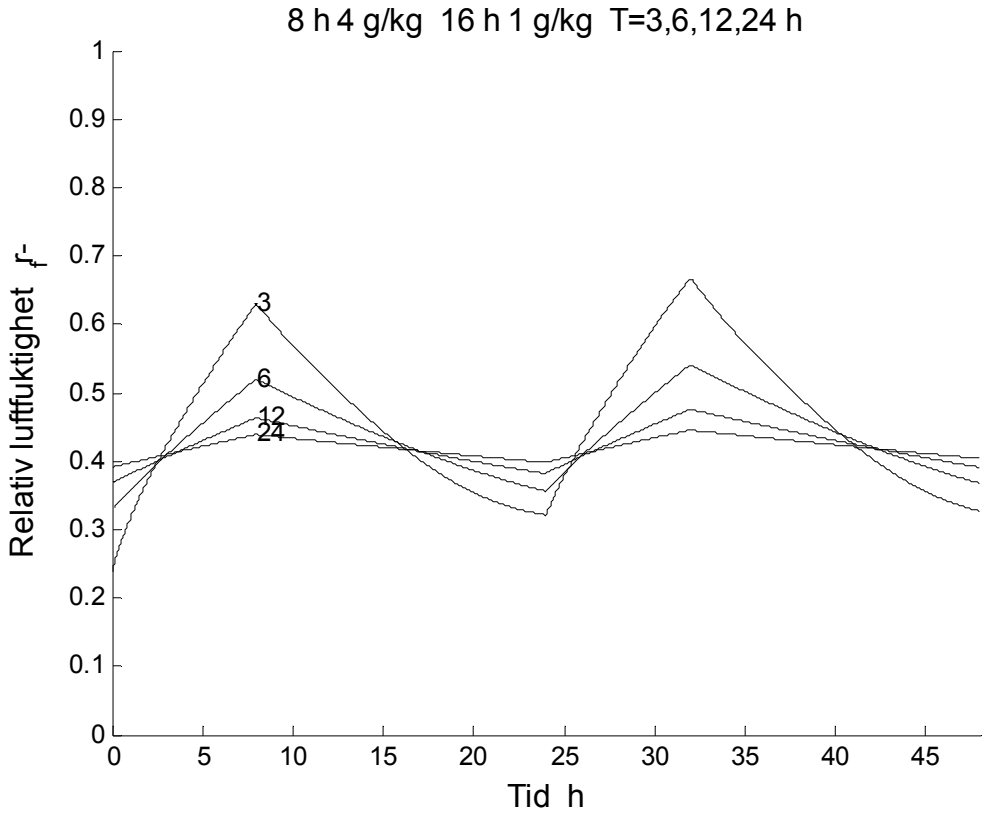
Figur 14.10 Fuktverkningsgrad η_x -för som funktion av tiden 0-48 h för fall 5.



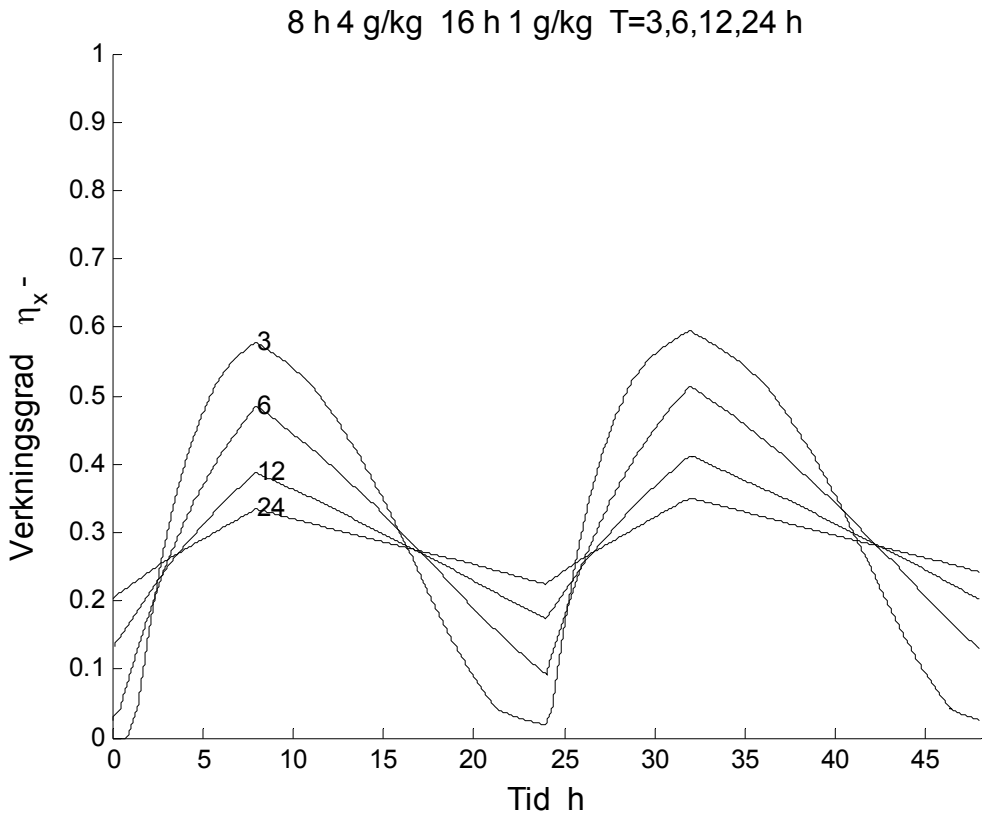
Figur 14.11 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 6.



Figur 14.12 Fuktverkningsgrad η_x -för som funktion av tiden 0-48 h för fall 6.



Figur 14.13 Relativ luftfuktighet r_f - som funktion av tiden 0-48 h för fall 7.



Figur 14.14 Fuktverkningsgrad η_x -för som funktion av tiden 0-48 h för fall 7.

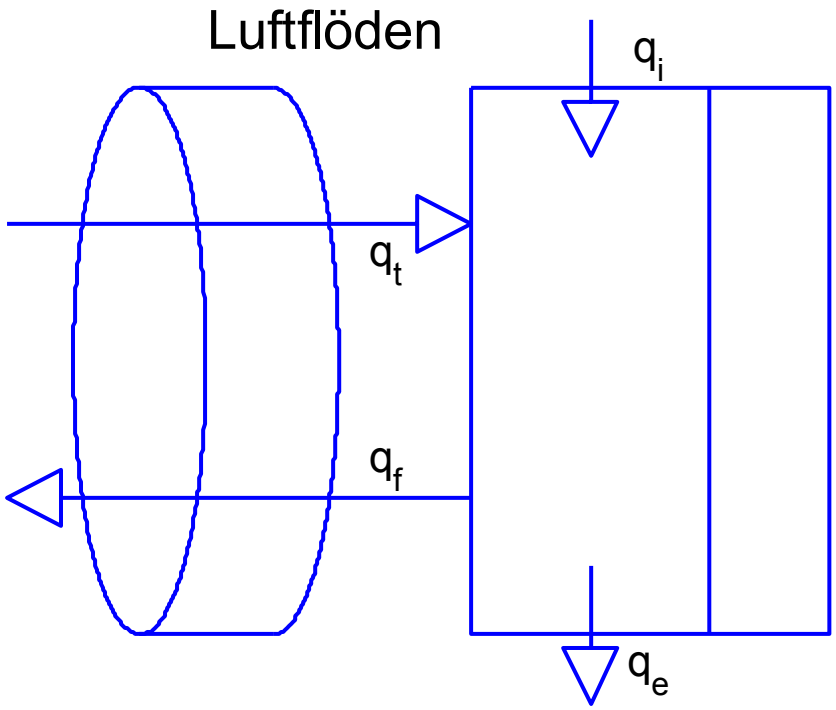
15 Undersökning av luftflöden i praktiken

Detta avsnitt undersöker hur parallellflöde och flödeskvot tillsammans påverkar fuktåtervinning. Parallellflöde är ett oönskat extra ventilationsflöde relativt det nominella frånluftsflödet som passerar den ventilerade volymen med samma inflöde som utflöde. Parallellflöde kan vara infiltration, exfiltration eller vädring. Flödeskvoten är kvoten mellan tilluftsflödet och frånluftsflödet, som helst skall vara mindre än ett för att förhindra omfattande exfiltration. En flödeskvot mindre än ett innebär att infiltration får ersätta skillnaden mellan det större frånluftsflödet och det mindre tilluftsflödet. En flödeskvot större än ett kan fås när frånluftsfiltret sätter igen mer än tilluftsfiltret. Detta skapar oönskad exfiltration.

Det statiska sambandet mellan de fyra luftflöden enligt Figur 15.1, fukttillstånd inne x_f och ute x_u, fukttillskott Δx för ett flöde $q_{\Delta x}$ och fuktverkningsgrad η_x kan skrivas som följer:

$$x_f = x_u + \Delta x \, q_{\Delta x} / (q_f + q_e - q_t \, \eta_x) \qquad \text{(g/kg)} \qquad (15.1)$$

Uttrycket (15.1) är allmännare än (12.1), eftersom absoluta flöden ingår för frånluft, exfiltration, tilluft och fukttillskottsflödet $q_{\Delta x}$. Uttrycket (15.1) kan användas vid ändrat flöde till exempel forcering, men alla variabler i nämnaren i (15.1) påverkas vid en flödesändring.



Figur 15.1 Definition av fyra luftflöden för en ventilerad byggnad.

Forcering av ventilationen är ett sätt att minska uppfuktningen. En svårighet med ett ökat frånluftsflödet är hur övriga flöden och fuktverkningsgrad påverkas. Det finns inget enkelt svar och det finns många möjliga utfall enligt uttryck (15.1)

Uppfuktningen av en ventilerad volym bestäms av produkten mellan fuktfaktorn f_x och fukttillskottet Δx. Fuktfaktor f_x kan skrivas som en funktion av fuktverkningsgrad η_x, relativt parallellflöde p och flödeskvot k som följer:

$$f_x = 1 / (1 + p - k\, \eta_x) \qquad (-) \qquad (15.2)$$

Idealfallet är $p = 0$ och $k = 1$ och fuktfaktorn blir förenklat $1/(1 - \eta_x)$. Fuktfaktorn är ett om det inte finns någon fuktåtervinning. En bedömning är att det finns en mindre marginal till att ha en fuktfaktor något större än ett, men inte lika eller större än två.

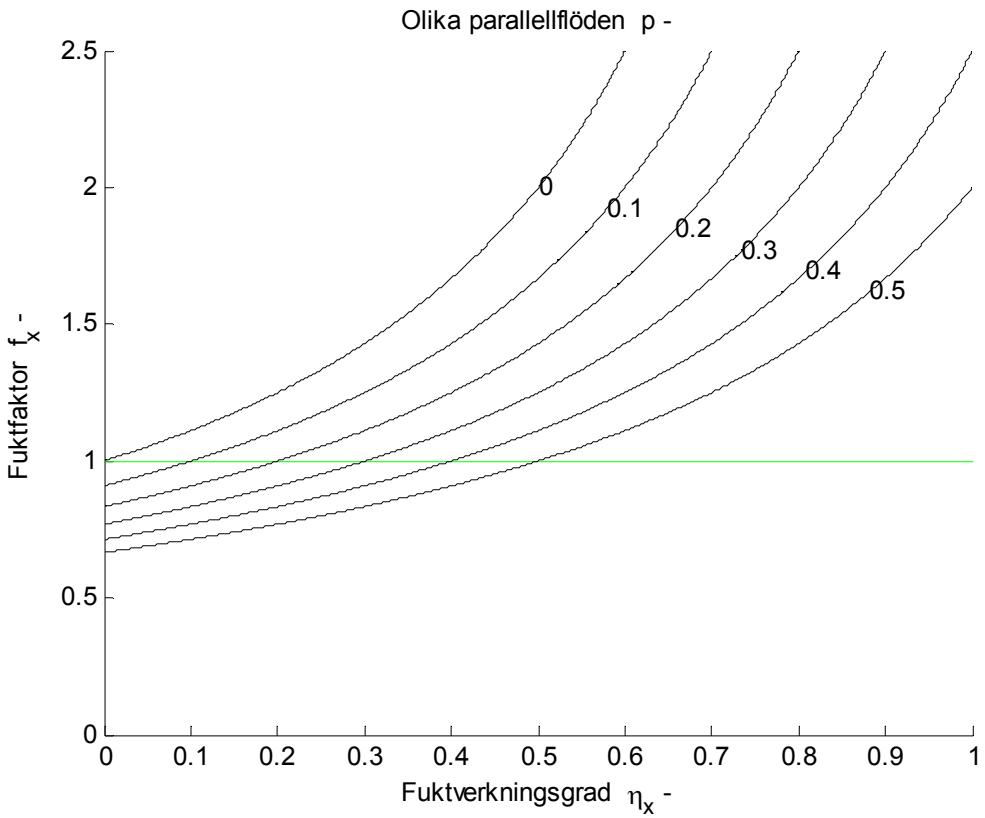
Hur fuktfaktorn f_x beror på olika parallellflöden och alternativt olika flödeskvoter var för sig redovisas i Figur 15.2 respektive 15.3 som funktion av fuktverkningsgraden η_x. Kurvorna i Figur 15.2 visar att fuktfaktorn avtar med ökande parallellflöde, vilket är naturligt. Kurvorna i Figur 15.3 visar att fuktfaktorn avtar med en minskande flödeskvot. Ett viktigt påpekande är att flödeskvoten också påverkar fuktverkningsgraden.

En frågeställning kan vara vilken fuktverkningsgrad η_x, relativt parallellflöde p och flödeskvot k ger en given fuktfaktor f_x. Detta redovisas i Figur 15.4-7 för fuktfaktorn f_x 1, 1.2, 1.5 och 2 med isodiagram för fuktverkningsgrad η_x med flödeskvot s som x-axeln (0.5,1) och relativt parallellflöde r som y-axeln (0,0.5). Det ideala fallet är markerat och ges av det nedre högra diagramhörnet.

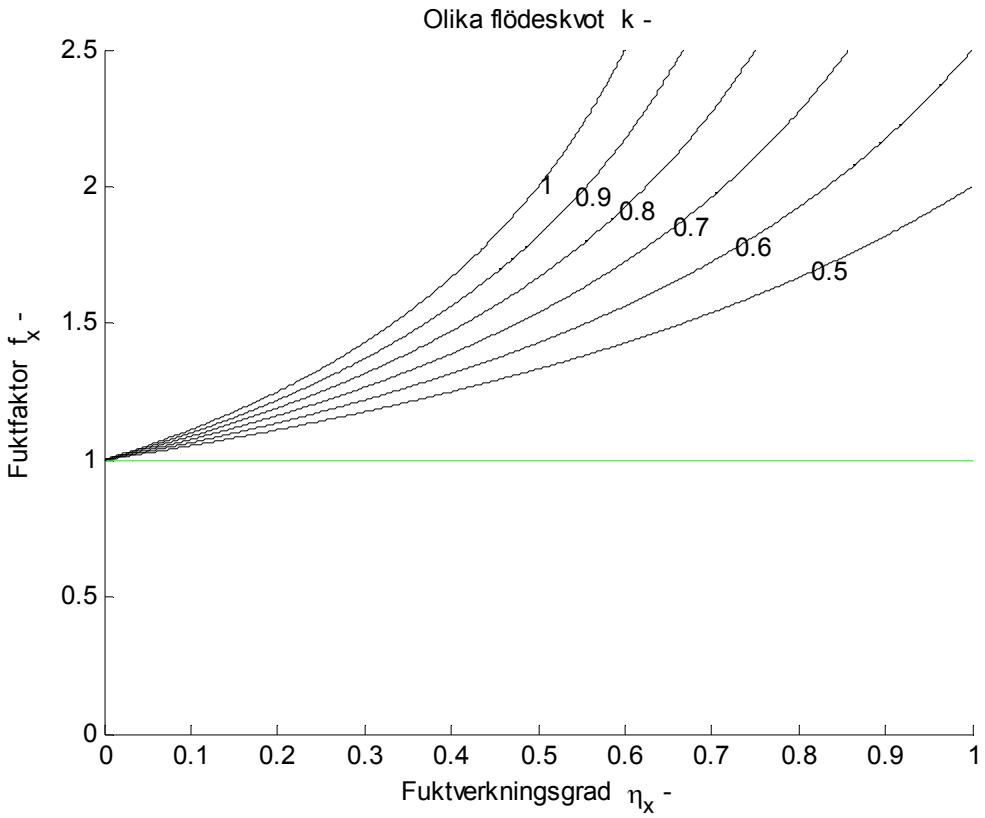
Skillnaden i fuktverkningsgrad mellan ett idealt fall och ett möjligt fall från praktiken för att ge en given fuktfaktor är rätt stor. Ett exempel med relativt parallellflöde 0.2 och flödeskvot 0.9 samt en given fuktfaktor 1.2, 1.5 och 2 ger enligt Figur 15.5-7 fuktverkningsgraderna 0.41, 0.59 och 0.78 att jämföra med det ideala fallets 0.17 (1/6), 0.33 (1/3) respektive 0.5. Fuktverkningsgrader över 0.5 är kanske svårt att uppnå.

En alternativ omvänd frågeställning är vilken fuktfaktor f_x, relativt parallellflöde r och flödeskvot s ger en given fuktverkningsgrad η_x. Detta redovisas i Figur 15.8-11 för fuktverkningsgraden η_x 0.2, 0.4, 0.6 och 0.8 med isodiagram för fuktfaktorn f_x med flödeskvot k som x-axeln (0.5,1) och relativt parallellflöde p som y-axeln (0,0.5). Det ideala fallet är markerat och ges av det nedre högra diagramhörnet.

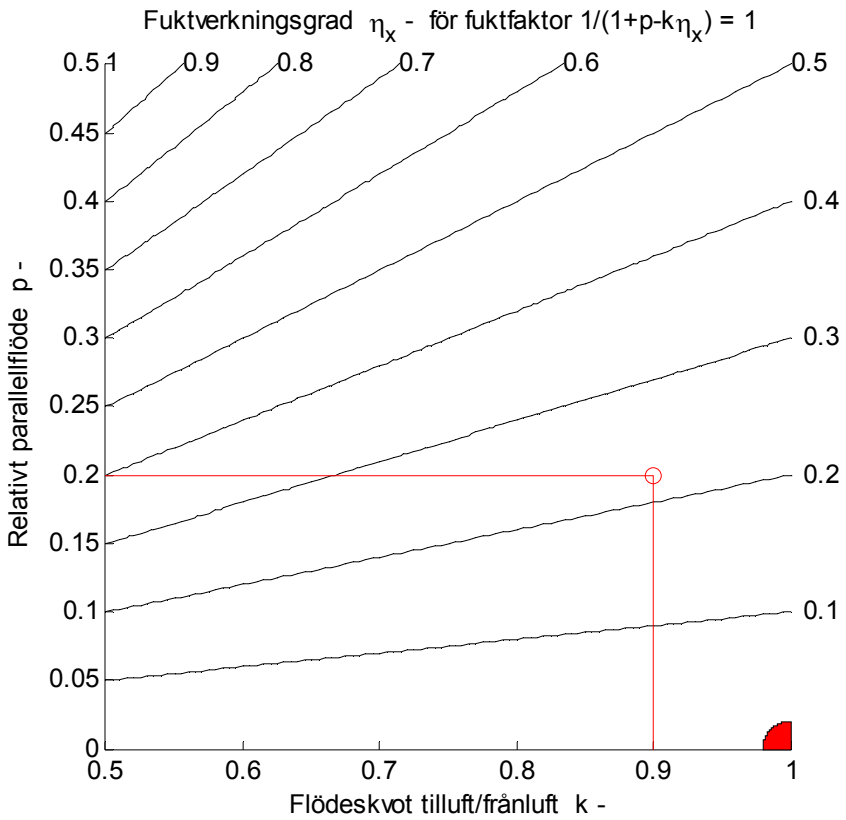
Skillnaden i fuktfaktor mellan ett idealt fall och ett möjligt fall från praktiken för att ge en given fuktverkningsgrad är rätt stor. Ett exempel med relativt parallellflöde 0.2 och flödeskvot 0.9 samt en given fuktverkningsgrad 0.2, 0.4 och 0.6 ger enligt Figur 15.8-10 fuktfaktorerna 1.0, 1.2 och 1.5 att jämföra med det ideala fallets 1.25, 1.67 respektive 2.5. Fuktfaktorer under 1.5 kan bedömas vara säkra.



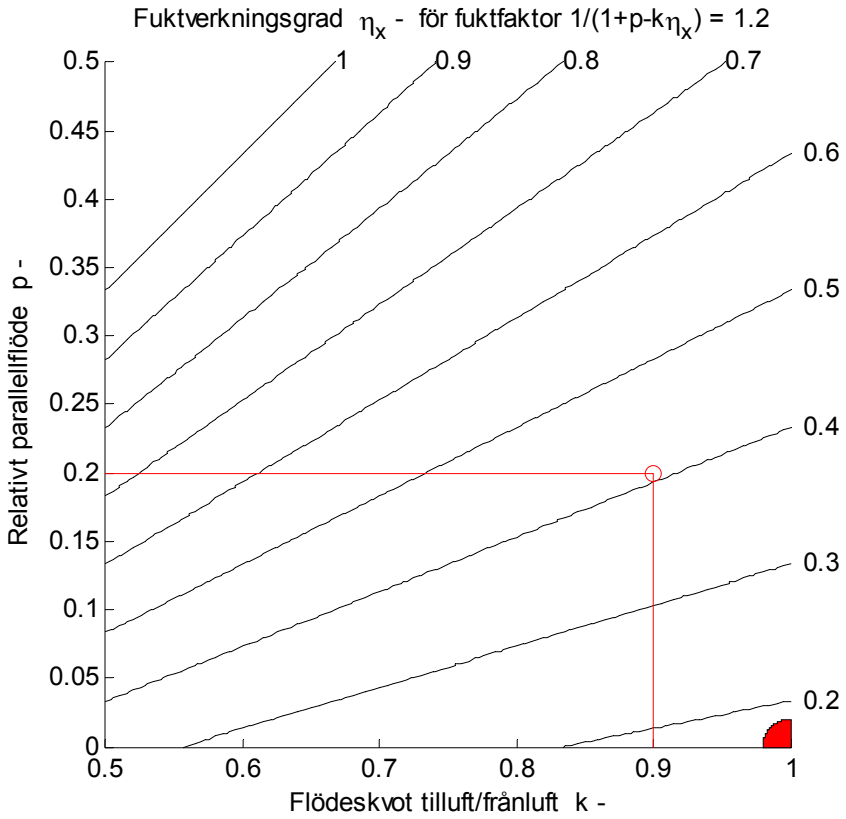
Figur 15.2 Fuktfaktor f_x som funktion av fuktverkningsgrad η_x för olika parallellflöde p.



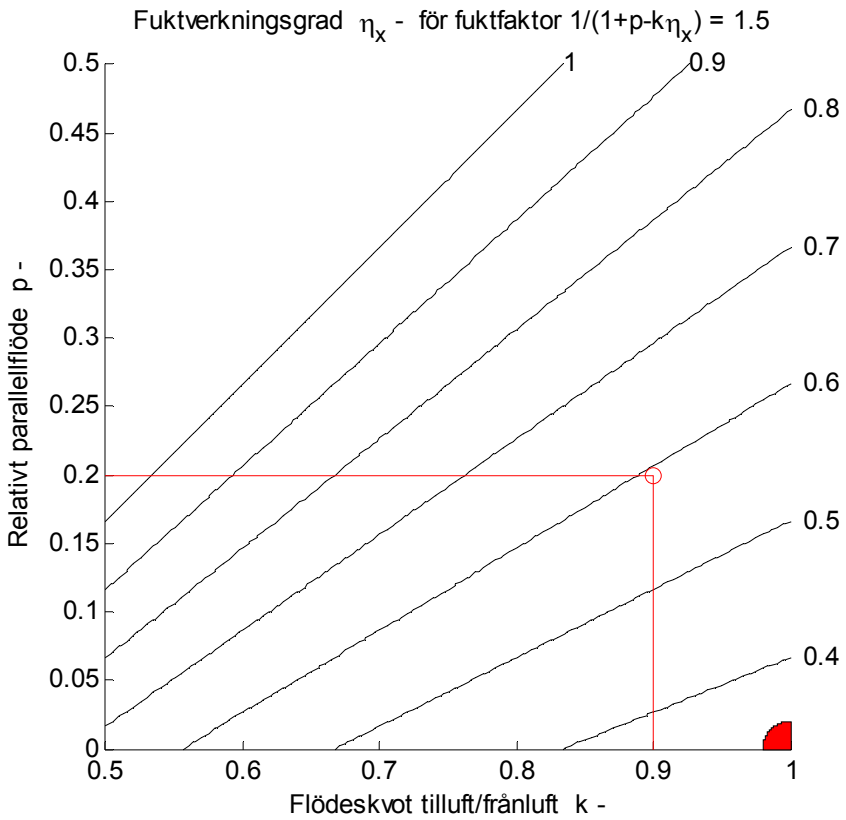
Figur 15.3 Fuktfaktor f_x som funktion av fuktverkningsgrad η_x för olika flödeskvot k.



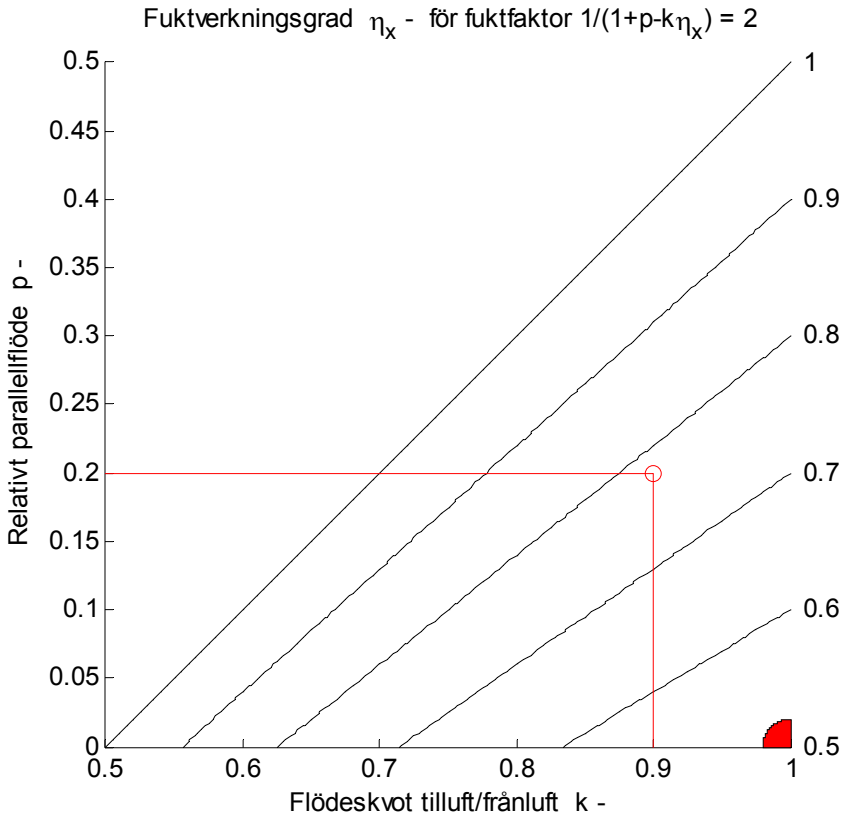
Figur 15.4 Fuktverkningsgrad som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktfaktor 1.



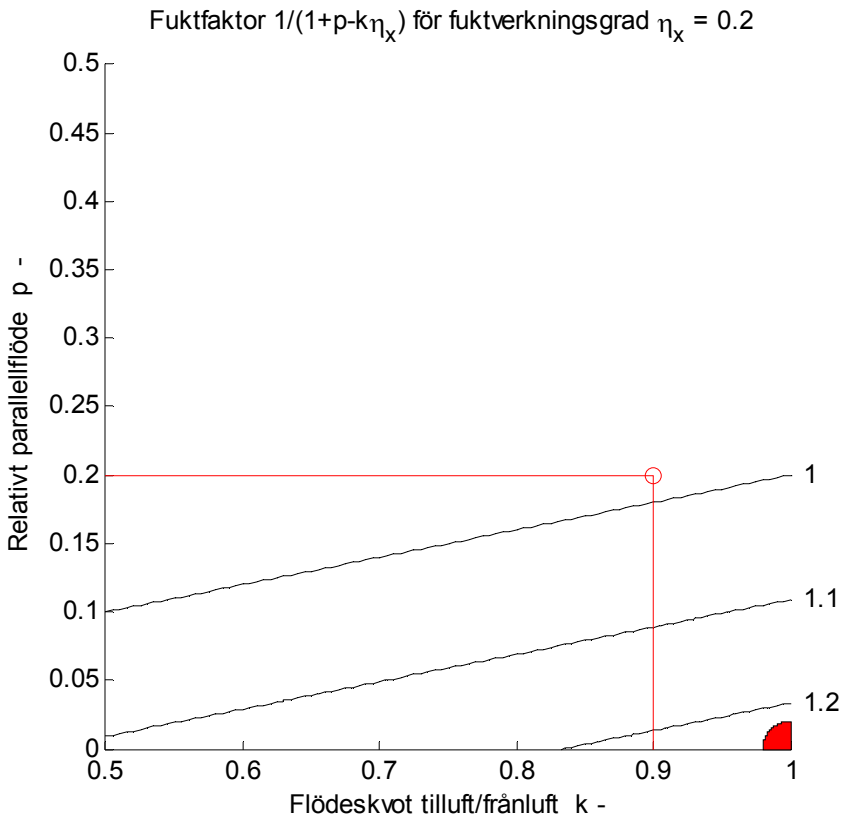
Figur 15.5 Fuktverkningsgrad som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktfaktor 1.2.



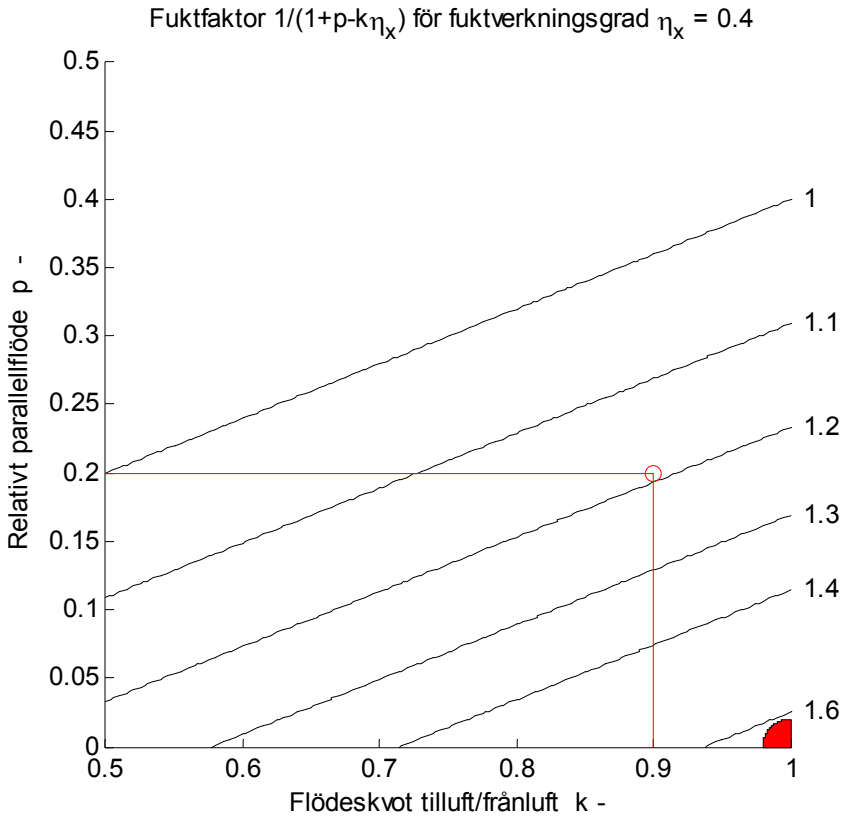
Figur 15.6 Fuktverkningsgrad som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktfaktor 1.5.



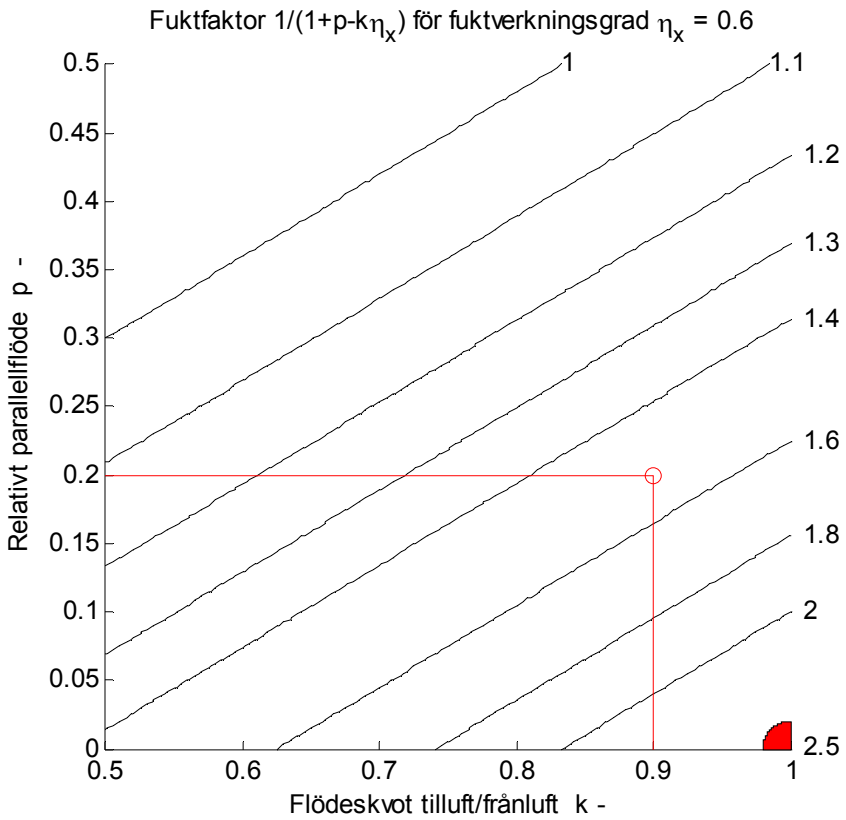
Figur 15.7 Fuktverkningsgrad som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktfaktor 2.



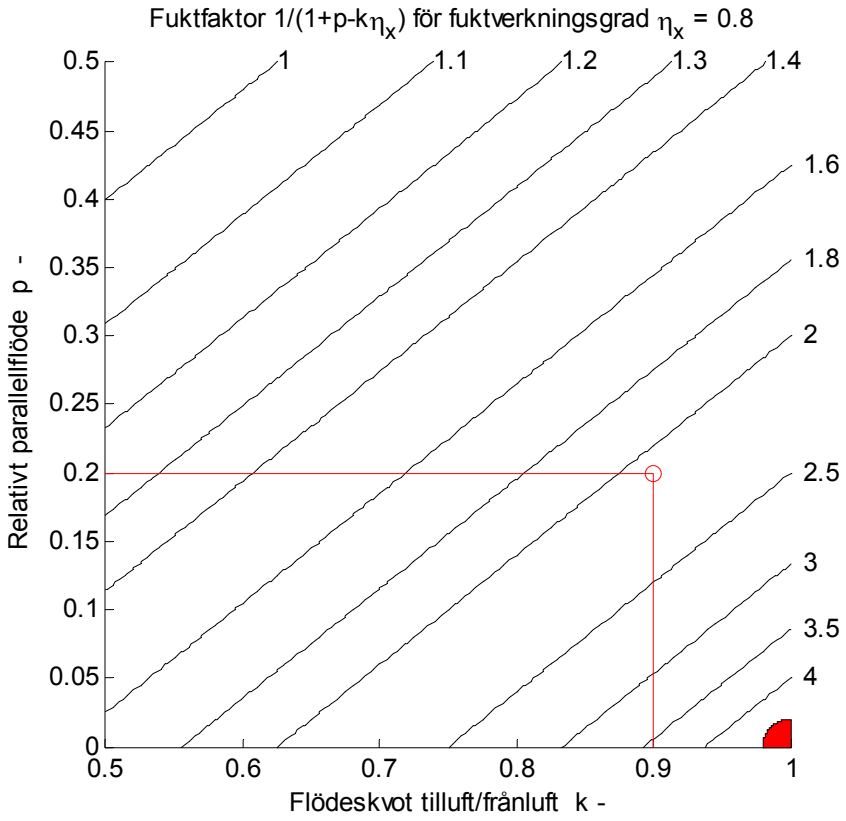
Figur 15.8 Fuktfaktor som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktverkningsgrad 0.2.



Figur 15.9 Fuktfaktor som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktverkningsgrad 0.4.



Figur 15.10 Fuktfaktor som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktverkningsgrad 0.6.



Figur 15.11 Fuktfaktor som funktion av parallellflöde, flödeskvot och fuktverkningsgrad 0.8.

16 Sammanfattning och slutsatser

Denna arbetsrapport visar att fuktverkningsgraden kan vara hög för en regenerativ värmeväxlare utan hygroskopiskt material. Det enkla grundsambandet (1.1) visar att fukttillskottet förstärks med en fuktfaktor på formen $1/(1-\eta_x)$. Fuktfaktorn kan beakta relativt parallellflöde (exfiltration, infiltration och vädring) (11.1), flödeskvot (mindre tilluft än frånluft) (12.1) och absoluta flöden enligt (15.1). Fuktfaktorn kan minska betydligt jämfört med det ideala fallet.

Avsnitt 2 visar att kondens inträffar särskilt om uteluften är nästan mättad. Avsnitt 3 visar med en enkel modell, som delar upp värmeväxlingen i en torr och en våt del, att fuktverkningsgraden kan blir nästan lika med verkningsgraden för temperatur.

Avsnitt 4 beskriver en fullständigare modell som bygger på fyra balansekvationer för luftens och rotorns temperatur och vatteninnehåll. Avgränsningar för denna modell är ingen värmeledning i axiell riktning, ingen isbildning och ingen begränsning av vatten i rotorn. Strömningen genom rotorn är konstant med konstant flöde i båda riktningarna.

Avsnitt 5 visar att fuktverkningsgraden för den fullständigare modellen kan bli hög för rotorer med hög temperaturverkningsgrad. Avsnitt 6 visar att temperatur- och fuktverkningsgrad avtar med minskande rotorhastighet. Fuktverkningsgraden kan avta betydligt mer, vilket är en fördel om fuktproblem skall undvikas genom att reglera ner rotorhastigheten.

Avsnitt 7 visar att temperatur- och fuktverkningsgraden avtar med ökande lufthastighet. Fuktverkningsgraden kan avta betydligt i förhållande till temperaturverkningsgraden, vilket är en fördel om fuktproblem skall undvikas genom att reglera upp ventilationsflödet. Det flödesrelativa fukttillskottet minskar också.

Avsnitt 8 visar att fuktverkningsgraden är starkt beroende av uteklimatet. Avsnitt 9 visar att fuktverkningsgraden avtar med ökande frånluftstemperatur. Antalet beräkningselement påverkar fuktverkningsgraden, vilken ökar med ökande antal element. Detta visas i avsnitt 10.

Avsnitt 11 och 12 visar att parallellflöde respektive mindre tilluft än frånluft minskar vatteninnehållet och den relativa luftfuktigheten för inneluften betydligt och risken för fuktskador.

Avsnitt 13 visar att ökande frånluftstemperatur medför minskande fuktverkningsgrad och ökande nödvändigt fukttillskott för att bibehålla ett givet vatteninnehåll i rumsluft/frånluft. Ökande relativ luftfuktighet ute medför ökande fuktverkningsgrad och minskande nödvändigt fukttillskott.

Avsnitt 14 visar tidsförlopp och att fuktökningen är mycket långsammare än luftomsättningstiden för fukt. Orsaken är självförstärkning genom att fuktåtervinningen ökar med ökande vatteninnehåll inne. Det kan ta flera dygn att ställa om från ett fuktigt tillstånd till ett torrare tillstånd. Utjämningen blir stor för dygnsperiodiska förlopp.

Avsnitt 15 visar att fuktfaktorn kan minska betydligt beroende på parallellflöde och på mindre tilluft än frånluft.

Tumregler

Erfarenheterna från detta arbete kan också förenklat sammanfattas med tumreglerna nedan för regenerativ värmeväxling med en ren metallrotor:

- Fuktåtervinning för fukttillskottet 1 g/kg är noll.
- Fuktåtervinning för fukttillskottet 2 g/kg är påtaglig.
- Fuktåtervinning för fukttillskottet 3 g/kg är kritisk och ta med handduk.

Åtgärder för bättre drift

Några förslag på åtgärder för att minska risken för hög luftfuktighet inomhus är följande:

- minska fukttillskott med separat köksfläkt, duschfläkt och tvättfläkt
- öka ventilationsflödet som minskar fuktverkningsgrad och fukttillskott
- minska rotorvarvtal som minskar fuktverkningsgrad
- minska tilluftflödet genom återvinnaren och bibehåll frånluftsflödet
- eftervärm frånluft eller förvärm uteluft tills att avluft inte kondenserar
- använd avfuktare
- vädra (parallellflöde) dock mindre bra ur energisynpunkt
- mindre tilluftsflödet än frånluftsflöde ökar infiltration och minskar exfiltration
- välj aggregat med lägre temperaturverkningsgrad
- byt till rekuperativ värmeväxlare som dock kräver mer utrymme

Två åtgärder som kan genomföras och kombineras är punkt två och tre ovan under förutsättning att både varvtal och luftflöden är reglerbara. Reglering kan ske främst efter utetemperatur och vatteninnehåll inne.

Forskningsbehov

Denna arbetsrapport är ett arbete utfört under endast fem veckor. Det finns mycket mer att undersöka. En ordentlig studie skulle kunna bli till ett helt doktorsarbete. Några exempel på olika arbetsmoment är följande:

- modellering av avrinning från en våt rotor och isbildning i en rotor
- modellering av luftgenomströmning av en blöt eller frostad rotor
- simulering med mätdata för fukttillskott och tillhörande uteklimat
- uppmätning av fuktverkningsgrad
- utformning och uttestning av reglersätt för att minska fuktproblem
- modellering av fuktbuffring i en lägenhet