



Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap
Miljö- och energisystem

Daniel Östberg

Energieffektivare torkning i diskmaskiner genom ny torkmetod

Utvärdering genom praktiska försök och
simuleringar

More energy efficient dishwashers through new
drying method

Evaluation through practical experiments and simulations

Examensarbete 30 hp
Civilingenjörsprogrammet i energi- och miljöteknik

Juni 2013

Handledare: Jonas Berghel

Examinator: Roger Renström

Sammanfattning

Världens energiförbrukning ökar ständigt. Detta ger upphov till stora miljöproblem där klimatförändringen är ett av de största problemen. Hushållens energiförbrukning står idag för en betydande del av den totala energianvändningen. Det är därför viktigt att effektivisera hushållens energianvändning för att reducera deras påverkan på miljön. Vitvaror, som står för en stor del av hushållens energianvändning, har en stor potential att energieffektiviseras. Ett exempel på en vitvara där mycket energi kan sparas är diskmaskiner.

Diskmaskiner tvättar, sköljer och torkar smutsig disk. Med dagens diskmaskiner går det åt mindre energi och vatten än vad det gjorde förr, då detta arbete gjordes för hand. Det finns dock fler åtgärder som kan utföras för att minska diskmaskinernas energiförbrukning. Det läggs bl.a. ned mycket arbete på att minska energiförbrukningen vid uppvärmningen av vattnet i diskmaskinerna och för att minska den energi som går åt i torkfasen.

En diskmaskin där uppvärmningen sker via en värmepump utvecklas av Asko Appliances AB. Värmen som behövs i diskmaskinen tar värmepumpen från en vattenbehållare, vilket får vattnet att frysa till is. Torkningen av disken i denna diskmaskin kommer att ske genom att den fuktiga luften inuti diskmaskinen förs ut med hjälp av en fläkt. Den drivs sedan, genom en luftspalt, förbi islagret där fukten i luften kondenseras mot den kalla yta som skapas av islagret. Luften förs sedan tillbaka till diskmaskinen.

I detta examensarbete utvärderas denna torkmetod. Den jämförs även med den teknik som används av Asko Appliances AB idag, där den fuktiga luften förs ut ur diskmaskinen till det rum där diskmaskinen står samtidigt som rumsluft förs in. Försök kommer att utföras på en diskmaskin med ett externt islager. Utvärderingen av torkningen i försöken gjordes med hjälp av torksyrning. En matematisk modell med en energibalans över torkfasen har också byggts. Simuleringar utfördes på modellen och resultaten verifierades med försöken. Från modellen beräknades mängden vatten som torkas inuti diskmaskinen under torkfasen.

Resultaten från torksyrningen visade att torkmetoden med islager fungerar bättre än torkmetoden som används av Asko Appliances AB idag. Höga temperaturer och luftflöden visade sig ge det bästa torkresultatet enligt både försöken och modellen. Enligt modellen är torkningen mest energieffektiv då starttemperaturen är 70 °C, men eftersom så mycket vatten som sitter på diskmaskinens väggar då torkas är den starttemperaturen inte den mest effektiva i verkligheten. Den starttemperatur som är mest energieffektiv är 60 °C. Då torkas disken lika bra och det används 0,5 MJ mindre energi än då starttemperaturen är 70 °C.

Abstract

The energy consumption is constantly increasing. The results are major environmental issues in which climate change is one of the biggest problems. Household energy consumption currently account for a significant share of the total energy consumption. Therefore it is important to improve household energy consumption to reduce household environmental impact. Appliances, which accounts for a large portion of household energy use, have a great potential for energy improvement. One example of an appliance where much energy can be saved is dishwashers.

Dishwashers wash, rinse and dry dirty dishes. The dishwashers produced today uses less energy and water than before, when this work was done by hand. There are still more actions that can be taken to reduce the dishwasher's energy consumption. A lot of efforts are made among other things to reduce the energy consumption during the heating of the water inside the dishwasher and to reduce the energy consumed during the drying phase.

A dishwasher where the heating occurs by a heat pump is developed by Asko Appliances AB. The heat pump takes the heat that is needed for the dishwasher from a water tank, causing the water to freeze. The drying of the dishes in this dishwasher will be done by letting the humid air inside the dishwasher out, using a fan. The air is then driven past the ice stock by making it go through an air gap, where the moisture condenses from the air on the cold surface created by the ice. The air then returns back into the dishwasher.

In this thesis, this drying method is evaluated and compared with the technology used by Asko Appliances AB today, where the humid air is leaving the dishwasher and is brought into the room where dishwasher stands while air from the room is entering. Experiments will be performed on a dishwasher with an external ice stock. The evaluation of the drying process experiment was done using inspection. A mathematical model with an energy balance over the drying phase was built. Simulations were performed on the model and the results were verified by the experiments. With the model, the amount of water that evaporates inside the dishwasher during the drying phase was calculated.

Results from the inspection showed that the drying method using the ice stock better performs than the drying method used by Asko Appliances AB today. High temperatures and air flow rates were found to provide a better result according to the experiments and the model. The drying is according to the model most energy efficient when the starting temperature is 70 °C, but since so much water located on the dishwasher walls is dried at that starting temperature, the in reality most efficient starting temperature is 60 °C. Then the dish is dried just as well and the energy consumption is 0.5 MJ less than when the starting temperature is 70 °C.

Förord

Detta arbete är rapporten för ett examensarbete som utförts vid Karlstads universitet. Detta är den avslutande delen på civilingenjörsutbildningen med inriktning energi- och miljöteknik. Arbetet har pågått i 20 veckor, vilket motsvarar 30 högskolepoäng.

Detta examensarbete har redovisats muntligt för en i ämnet insatt publik. Arbetet har därefter diskuterats vid ett särskilt seminarium. Författaren av detta arbete har vid seminariet deltagit aktivt som opponenter till ett annat examensarbete.

Jag vill tacka Jonas Berghel, som varit min handledare, för allt stöd och hjälp under arbetets gång.

Ett stort tack till Asko Appliances AB och Peder Bengtsson som gjort arbetet möjligt och hjälpt till med utrustning och vägledning.

Jag vill också tacka Lars Pettersson för all hjälp med det praktiska arbetet i början på examensarbetet.

Nomenklatur

A_s	Totala ytan inuti diskmaskinen (inkl. disk)	m^2
c_p	Specifik värmekapacitet på luften inuti och ut ur diskmaskin	J/kg, K
$c_{p,in}$	Specifik värmekapacitet på luften in i diskmaskinen	J/kg, K
dE	Ändring energi	J
dt	Ändring tid	s
dT	Ändring temperatur	$^{\circ}C$
E	Energi	J
g	Tyngdacceleration	m/s^2
$h_{A_{dm}}$	Beräknad energiförlust per $^{\circ}C$	$J/^{\circ}C$
h_{fg}	Förångningsentalpi	J/kg
h_{mass}	Massöverföringskoefficient	m/s
h_{heat}	Värmeöverföringskoefficient	$J/m^2, K$
k	Termisk konduktivitet	W/m, K
L	Karaktäristisk längd	m
m	massa	kg
\dot{m}	Massflöde vatten som förångas	kg/s
M_{H_2O}	Molmassa vatten	kg/mol
M_{luft}	Molmassa luft	kg/mol
Nu	Nusselt-tal	[1]
Pr	Prandtl-tal	[1]
P_{sat}	Mättnadstryck	Pa
P_{tot}	Totaltryck	Pa
\dot{Q}_{in}	Effekt in i diskmaskinen	W
\dot{Q}_{ut}	Effekt ut ur diskmaskinen	W
Ra	Rayleigh-tal	[1]
t	Tid	s
T	Temperatur på luften och vattnet inuti och ut ur diskmaskinen	$^{\circ}C$
T_{in}	Temperatur på luft och vatten in i diskmaskinen	$^{\circ}C$
T_s	Yttemperatur på ytorna inuti diskmaskinen	$^{\circ}C$
T_{∞}	Temperatur på omgivningsluften	$^{\circ}C$
\dot{V}	Volymflöde luft	m^3/s
V_d	Volym diskmaskin	m^3
w_{∞}	Massfraktion i omgivningen	[1]
w_s	Massfraktion vid ytan	[1]
β	Volymexpansion	1/K
ν	Kinematisk viskositet	m^2/s
ρ	Densitet på luften inuti och ut ur diskmaskin	kg/m^3
ρ_{in}	Densitet på luften in i diskmaskinen	kg/m^3

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Diskmaskiners energianvändning	3
1.2	Torkning	5
1.3	Torkning disk	5
1.4	Syfte och mål	7
2	Metod	7
2.1	Försök	7
2.2	Torkmodell	13
3	Resultat	18
3.1	Försök	18
3.2	Torksyning	19
3.3	Verifiering av torkmodell	21
3.4	Beräknad torkning	24
3.5	Beräknad energi	25
4	Diskussion	26
4.1	Mätningar	26
4.2	Torksyning	27
4.3	Verifiering av torkmodell	28
4.4	Beräknad torkning	28
4.5	Beräknad energi	30
4.6	Torkmodellen	30
4.7	Metodkritik	31
5	Slutsats	32
6	Referenser	34

1 Introduktion

Hushållens energianvändning står idag för en stor del av den totala energianvändningen och dess relaterade utsläpp enligt Kelly (2012). Hushållens energianvändning är idag i samma storleksordning som industriernas energianvändning. Hushållens energianvändning har även en stor potential att öka i hela världen.

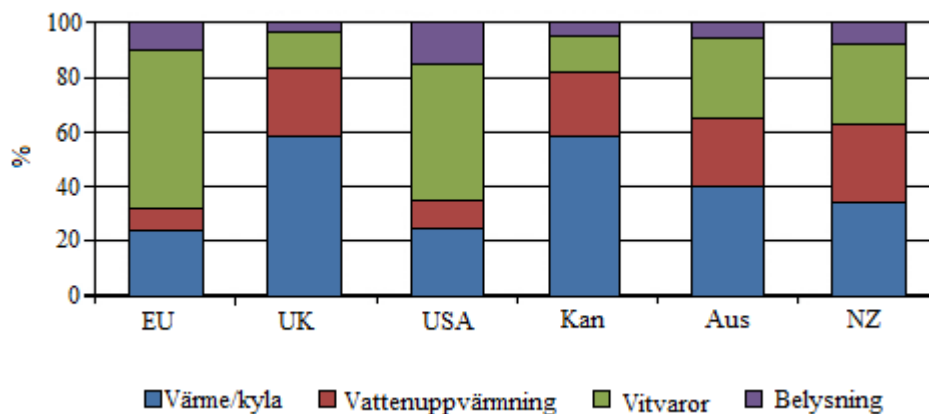
År 2009 stod hushållen för 25 % av de totala växthusgasutsläppen inom EU, vilket är ungefär lika mycket som industriernas utsläpp som låg på 26 %. Tabell 1 visar andelen av hushållens och industriernas förbrukning av elenergi inom EU, Storbritannien, USA, Kanada, Australien, Nya Zeeland och som medelvärde i hela världen (Kelly 2012).

Tabell 1. Hushållens och industriernas elenergiförbrukning (Kelly 2012).

	EU	UK	USA	Kan	AUS	NZ	Världen
Hushållens totala användning [%]	24	29	31	26	23	28	27
Hushållens användning i % av industrins användning	71	104	151	85	61	87	66

Tabellen visar att en stor del av den totala energianvändningen går till hushållen.

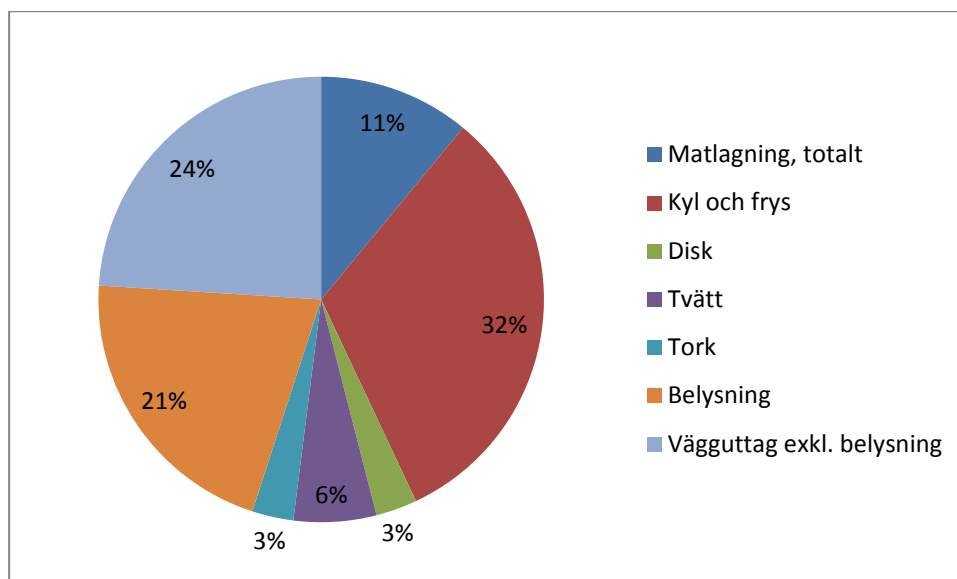
I figur 1 visas vad hushållen använder elektriciteten till i de olika länderna. Vitvaror står för en betydande del av hushållens energianvändning, inom EU ca 60 %.



Figur 1. Hushållens elektricitetsanvändning (Kelly 2012).

Carlsson-Kanyama och Lindén (2002) har undersökt hushållens energianvändning i Sverige. Enligt dem går de största delarna utav hushållens elanvändning till kyl och frys, vägguttag och belysning. Detta var dock före förbudet av glödlampor, därför är belysningens energiförbrukning betydligt mindre idag. De har inte jämfört med elenergin som används till uppvärmning. Figur 2 visar hushållens elanvändning i småhus i Sverige. Vitvarornas elenergiförbrukning står för ca 50 % av hushållens

elenergiförbrukning. Exempel på vitvaror är kyl, frys, diskmaskiner, tvättmaskiner, torkskåp, torktumlare, spisar och ugnar.



Figur 2. Elanvändningen i svenska småhus (Carlsson-Kanyama och Lindén 2002).

Eftersom vitvaror står för en stor del av hushållens energiförbrukning skulle en reducering av vitvarornas energianvändning ha en stor betydelse för miljön i hela världen. Detta eftersom de flesta vitvarorna drivs av elenergi, vilket är en stor utsläppskälla för växthusgaser (Kelly 2012). Dessa reduceringar i elenergianvändning inträffar dock bara då gamla vitvaror byts ut mot nya, mer energieffektiva (Young 2007).

Även om det har blivit stora förbättringar på vitvaror när det gäller energianvändning, ökar användningen av elenergi i hushåll i Europa med 2 % per år (Tompros et al. 2009). Detta på grund av det ökande antalet vitvaror och elektronik i hushållen. Det är därför viktigt att energieffektisera vitvaror för att mildra energikrisen och miljöproblemen (Han 2011).

Största potentialen för elenergiesparningar genom byte till mer energieffektiva vitvaror nås då kyl och frys byts ut. Om en kyl och en frys från 70-talet byts ut mot en ny, mer energieffektiv kyl och frys, kan energibesparingen bli ca 1000 kWh per år. Byte av andra vitvaror ger inte lika stor energibesparing. Det går dock att spara upp till 20 % elenergi genom byte till mer energieffektiva vitvaror (Carlsson-Kanyama och Lindén 2002).

I alla EU-länder måste vitvaror märkas med en märketikett som bl.a. talar om vilken energiklass maskinen har. Med energiklass menas hur energieffektiv maskinen är. Det finns energiklasser från G, som är sämst, till A som bäst. Det finns även A⁺, A⁺⁺ och A⁺⁺⁺ för vissa produkter. Den årliga energiförbrukningen finns med på etiketten och den uttrycks i kWh per år. Andra viktiga egenskaper som finns med i märkningen är buller och volym, kapacitet, vattenförbrukning samt

hur väl torkningen fungerar. Detta för att dessa egenskaper påverkar den årliga energiförbrukningen. Det behövs ingen information om hur ren t.ex. disk och tvätt blir eftersom alla maskiner måste klara högsta betyg för att få säljas. I Sverige är det Energimyndigheten som övervakar att reglerna för energimärkning följs (Energimyndigheten).

Energimärkningen driver företag att utveckla energieffektiva maskiner. Det är också ett sätt för företag att få konsumenter att välja deras produkt (Young, 2011).

1.1 Diskmaskiners energianvändning

Byte av en 30 år gammal diskmaskin till en nyare, mer energieffektiv kan sänka energiförbrukningen för diskmaskinerna med upp till 80 %. År 1994 användes 3 % av hushållens elförbrukning till disk (Carlsson-Kanyama och Lindén, 2002). Enligt De Paepe (2003) förbrukar en diskmaskin i ett hushåll ca 268 kWh per år.

En energimärkt diskmaskin har en cykel som är indelad i 5 olika faser. Förtvätt, huvudtvätt, första sköljningen, andra sköljningen och torkning. I förtvätten sköljs en stor del av partiklarna bort utan att vattnet värms upp. Under huvudtvätten sker själva diskningen med varmvatten och diskmedel. Nytt vatten, som inte värms upp, tappas sedan upp och används till att skölja disken. Nytt vatten tappas upp ännu en gång. Detta vatten värms upp och blandas med sköljmedel. Sköljmedlet används för att ändra på ytspänningen på vattnet och på så vis förbättra torkningen. Sist torkas disken. Tack vare att den sista sköljningen hade värmts upp har energi lagrats i diskmaskinen, vilket hjälper vattnet att avdunsta (Minde, 2011).

Diskmaskinerna har förbättrats mycket de senaste 30 åren. Vattenförbrukningen har sjunkit från 50 liter till 10 liter och medelenergiförbrukningen har sjunkit från 3 kWh till mindre än 1 kWh per cykel. Vatten- och energiförbrukningen kommer att sjunka ännu mer framöver eftersom det är ett viktigt mål för diskmaskinsproducenterna (Minde, 2011).

Enligt Hoak et al. (2008) går det att spara mycket energi och vatten om disktiden varierar beroende på hur smutsig disken är eller i vilken grad sköljvattnet är smutsigt. Mycket energi kan också sparas genom att låta bli att skölja disken innan den diskas i diskmaskinen, trots det är det vanligt att disken sköljs.

Persson (2006) har undersökt om det går att spara elektricitet genom att använda fjärrvärme istället för direktel för uppvärmningen i diskmaskiner. I hans undersökning värmdes diskmaskiner upp av fjärrvärme med hjälp av en värmeväxlare. I undersökningen utfördes försök på en prototyp och simuleringar på en matematisk modell. Resultaten från dessa verifierades genom att jämföra den beräknade och den uppmätta energin som strömmade genom värmeväxlaren. När dessa jämfördes användes följande ekvation:

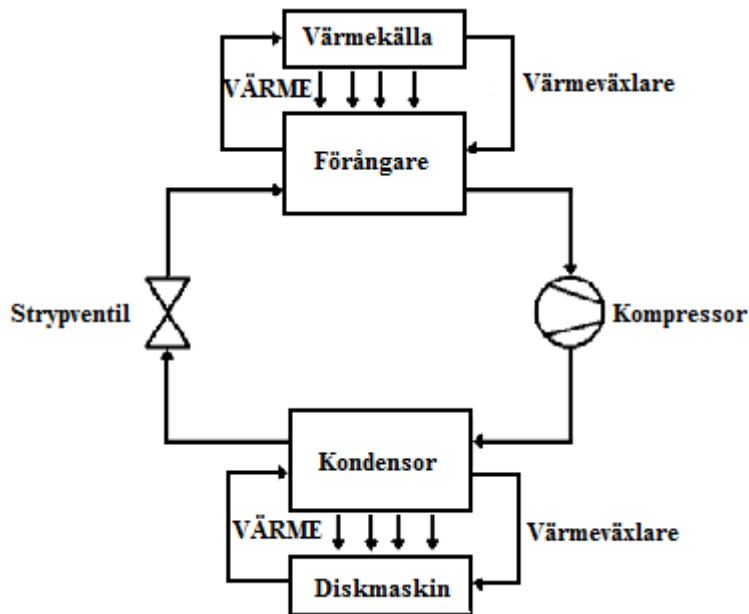
$$\varepsilon_w = \frac{W_c - W_m}{W_m} \cdot 100\% \quad (1)$$

Där ε_w är det relativa felet, W_c den beräknade energin och W_m är den energin som mättes i försöken. ε_w var aldrig större än 5 %. Persson (2006) kom fram till att det är möjligt ersätta all elektricitet som används till uppvärmningen med fjärrvärme.

De Paepe et al. (2003) har undersökt om det är möjligt att använda värmeåtervinning i diskmaskiner för att på så sätt minska energianvändningen. Då värms det inkommande kallvattnet upp av det varma vattnet som användes i fasen innan. Det krävs då inte lika mycket elektricitet för att värma upp vattnet till rätt temperatur. Deras experiment visade att det är möjligt att återvinna en stor mängd värme med denna metod.

Det går att minska elenergianvändningen genom att använda en annan värmekälla istället för element. Ett sätt är att använda en värmepump som värmekälla i diskmaskiner. En värmepump transporterar värme från ett kallt område till ett som är varmt. I figur 3 visas en skiss över en värmepump i en diskmaskin.

Genom en värmepump cirkulerar ett köldmedium. I förångaren värms det kalla köldmediet upp av omgivningen som är varmare än köldmediet, samtidigt som det förångas från vätska till gas. Kompressorn, som drivs av el, höjer trycket hos köldmediet och då också dess temperatur. Den varma ångan kommer sedan till kondensorn där den kondenserar. När detta sker avges värme. När köldmediet sedan fortsätter är det en vätska. Vätskan passerar en strypventil som får trycket och temperaturen att sjunka. Efter det fortsätter köldmediet tillbaka till förångaren och cykeln börjar om. Värmefaktorn, verkningsgraden, på värmepumpar är oftast mellan 3 och 4, den blir högre ju mindre temperaturskillnaden mellan förångaren och kondensorn är (Warfvinge & Dahlblom, 2010).



Figur 3. Värmepump i en diskmaskin.

1.2 Torkning

Torkning är en energiintensiv process och den mesta torkningen sker vid låg termisk effektivitet (Linga 2010). Torkning är en komplicerad process som involverar fenomen som värme- mass- och rörelsemängdsöverföring. Torkning kan beskrivas som en process där flyktiga ämnen (fukt) avlägsnas termiskt. När ett fast ämne torkas sker två processer: (Mujumdar 1995)

1. Energi, till största del i form av värme, överförs från omgivningen som får fukten på ytan att avdunsta. Värmeenergin som överförs från omgivningen till den fuktiga soliden kan ske genom, konvektion, konduktion, strålning eller som en kombination av dessa.
2. Efter det överförs den interna fukten till ytan av soliden och därefter sker samma process som tidigare.

1.3 Torkning disk

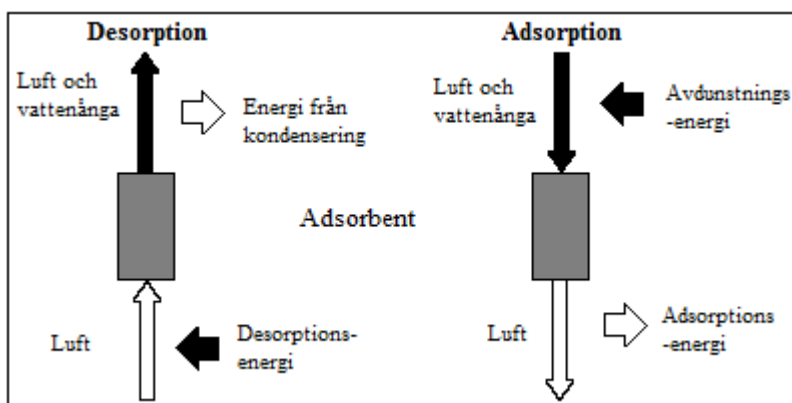
Under torkfasen i en diskmaskinscykel används upp till 60 % av diskmaskinens totala energianvändning (Minde, 2011). Därför är det viktigt att välja en torkmetod som är energieffektiv för att på så sätt kunna få en energieffektiv diskmaskin.

Enligt Minde (2011) kan ett torksystem antingen vara dynamiskt eller statiskt. Ett dynamiskt system använder sig av en fläkt för att tvinga luften att cirkulera för att på så sätt öka avdunstningen av vatten. Ett statiskt system använder sig inte av en fläkt. Ett exempel på ett statiskt system är en torkfas där dörren till diskmaskinen öppnas innan torkfasen börjar och på så sätt släpper ut den fuktiga luften utan att använda en fläkt. Det finns även en torkmetod där vattnet i luften inuti

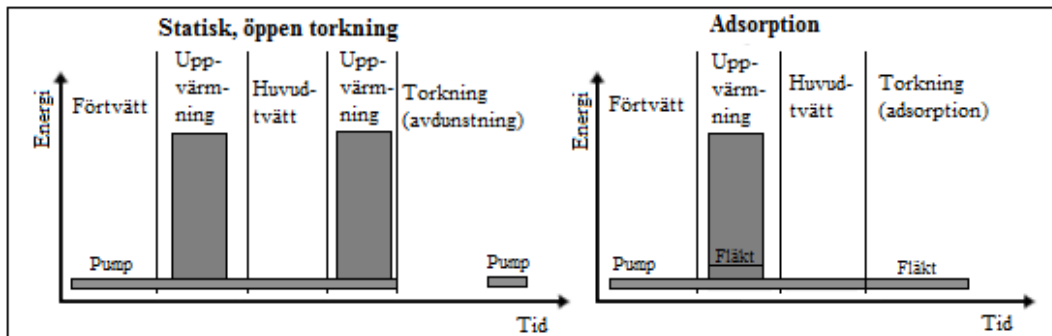
diskmaskinen kondenserar på diskmaskinens väggar och ibland inuti en behållare, där vattnet samlas upp.

Hauer och Fischer (2010) har undersökt en diskmaskin som använder adsorption för att torka disken. I en adsorptionscykel avfuktas luften på ett energieffektivt sätt. De använde zeolit 13 X som adsorbent och under torkprocessen (adsorptionsprocessen) förs fuktig luft genom zeoliten som adsorberar vattenånga i luften. Då vattnet adsorberas frigörs energi i form av värme, som förs vidare med luften tillbaka till diskmaskinen. Under uppvärmningen av vattnet i diskmaskinen, i början av nästa diskcykel desorberas adsorbenten. Under desorptionsprocessen behövs energi i form av värme för att få vattnet att avlägsnas från zeoliten och följa med luften. Värmen kommer från ett element. När vattnet sedan kondenserar på ytorna i diskmaskinen frigörs värme som värmer upp diskmaskinen. På så sätt frigörs vattnet inuti adsorbenten och den kan sedan användas igen vid nästa torkning. Hauer och Fischer använde en metod, introducerad av Hauer, för att genom en matematisk modell identifiera temperaturen ut ur adsorbenten vid adsorption. Med hjälp av den kunde sedan energiförbrukningen för en diskmaskin med adsorptionstorkning beräknas. De kom fram till att denna metod sparar 25 % av diskmaskinens totala energi jämfört med en konventionell diskmaskin, på grund av att ingen uppvärmning behövs före torkfasen.

Figur 4 visar hur en adsorptions- och desorptionsprocess går till. Figur 5 visar energianvändningen hos en diskmaskin med ett statiskt, öppet system och hos en som använder adsorption i torkfasen (Hauer & Fischer 2010). Det syns tydligt att adsorptionsprocessen använder mindre energi, på grund av att det endast sker en uppvärmning istället för två.



Figur 4. Adsorption och desorption (Hauer & Fisher 2010).



Figur 5. Energianvändningen hos en maskin som torkas med ett statiskt, öppet system och genom adsorption (Hauer & Fisher 2010).

1.4 Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att genom försök och simuleringar på en matematisk modell utvärdera en ny torkprocess till diskmaskiner med värmepump.

Målet med arbetet är att:

- Med försök utvärdera vilken starttemperatur på luften, vilket luftflöde och vilken bredd på luftspalten som ger den bästa torkningen.
- Verifiera modellen genom att jämföra de uträknade temperaturerna inuti diskmaskinen med temperaturerna som mättes i försöken.
- Med modellen beräkna mängden vatten som torkar inuti diskmaskinen.
- Med modellen beräkna energin som går åt för att värma upp diskmaskinen och bestämma en energiverkningsgrad för torkningen.

2 Metod

Arbetet delades in i två delar: försök med en diskmaskin samt ett islager och simuleringar på en modell över diskmaskinen. Resultaten från simuleringarna verifierades och jämfördes med resultaten från försöken.

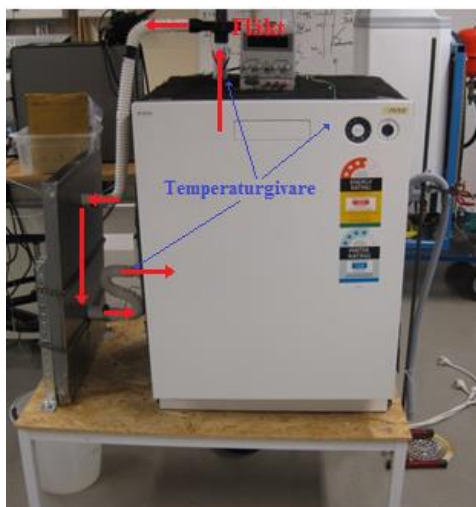
2.1 Försök

Torkförsök utfördes på en diskmaskin med ett islager. Flera försök genomfördes med olika starttemperaturer på luften inuti diskmaskinen, luftflöden och spaltbredder. Starttemperaturerna som användes var 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C och 70 °C, flöden som användes var 4 m³/h, 8 m³/h och 12 m³/h. de spaltbredder som användes var 6 mm och 3 mm. Även standardförsök utfördes. I dessa standardförsök undersöktes hur väl torkmetoden som används idag hos Asko Appliances AB fungerar. Denna torkmetod använder en fläkt för att föra ut den fuktiga luften ur diskmaskinen samtidigt som luft från utsidan av diskmaskinen tar sig in. Inget islager används alltså i dessa försök. I standardmetoden är luftflödet 4 m³/h, därför kommer luftflödet i standardförsöken inte variera, utan 4 m³/h kommer att användas hela tiden.

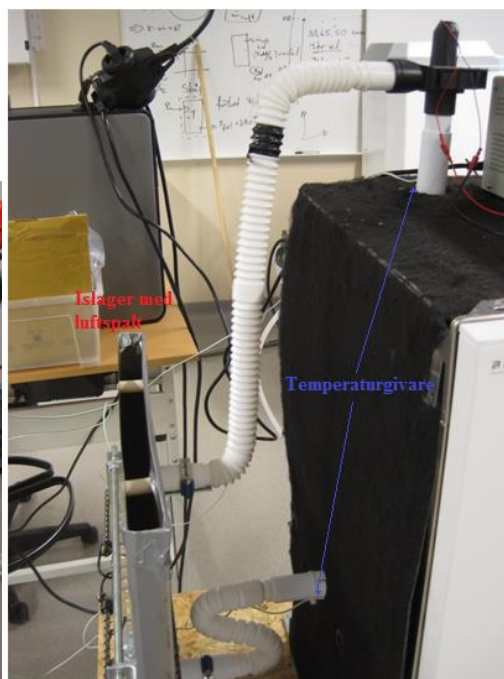
I försöken användes en diskmaskin, ett islager med luftspalt, diskgoods och sköljmedel. Diskmaskinen som användes i försöken är tillverkad av Asko Appliances AB. Start och stopp av diskmaskinens pumpar genomfördes manuellt. Uppvärmningen, som skedde med ett element, konstant effekt och även här utfördes start och stopp av uppvärmningen manuellt.

På toppen på diskmaskinen och på dess vänstra sida borrades hål. I hålet på toppen sattes en fläkt som var kopplad till ett rör som gick till en luftspalt och därifrån tillbaka till diskmaskinen via ett rör som kopplades till hålet på diskmaskinens vänstra sida, se figur 6 och 7. Fläkten tog luft från ovansidan på diskmaskinen, ledde den genom luftspalten och sedan tillbaka till diskmaskinen genom hålet dess vänstra sida. Vid utloppet på toppen och inloppet på diskmaskinens vänstra sida sattes temperaturgivare som mätte temperaturen på luften som gick ut ur resp. in i diskmaskinen. En temperaturgivare sattes även inuti diskmaskinen som mätte lufttemperaturen där. Figur 6 visar en bild på diskmaskinen där luftflödet är utritat med röda pilar och de blå pilarna visar var temperaturgivarna sitter. I figur 7 visas in- och utloppet till diskmaskinen, även i denna figur visar de blå pilarna var temperaturgivarna sitter. Ett ytterligare, mindre hål, gjordes på toppen av diskmaskinen. Genom detta hål sprutades sköljmedel med pipett.

Det var under arbetets gång problem med fläkten. Vid flöden på 4 m³/h kunde fläkten ibland sluta fungera. När detta inträffade startades dock fläkten snabbt igen och det bör därför inte ha påverkat resultatet nämnvärt. Det enda som hann hända var att temperaturgivaren som mätte temperaturen ut ur diskmaskinen visade lägre temperaturer eftersom ingen varmluft längre passerade temperaturgivaren.



Figur 6. Diskmaskinen framifrån.



Figur 7. In- och utloppen till diskmaskinen.

Diskmaskinen har inget islager eftersom den inte värms upp av värmepump. Därför har ett islager som ska kyla luften som förs ut ur diskmaskinen byggts. Behållaren fylldes under försöken med is och vatten och ska då fungera som islagret som hade bildats om diskmaskinen använt en värmepump till uppvärmningen. I denna behållare byggdes även en luftspalt som luften från diskmaskinen förs genom och kyls. Bredden på spalten kunde ändras och längst ner i spalten byggdes en behållare där kondensvattnet samlades upp och kunde tappas ur genom ett hål. Måtten på islagret med luftspalt visas i tabell 2 och i figur 8.

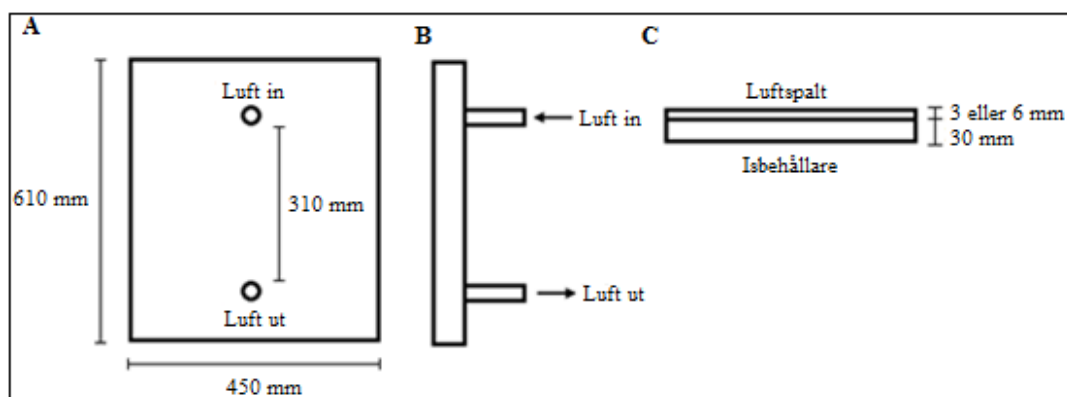
Tabell 2. Måtten på islagret med luftspalt.

Total höjd	610 mm
Höjd mellan in- och utlopp	310 mm
Bredd	450 mm
Tjocklek islager	30 mm
Tjocklek luftspalt	3 mm och 6 mm

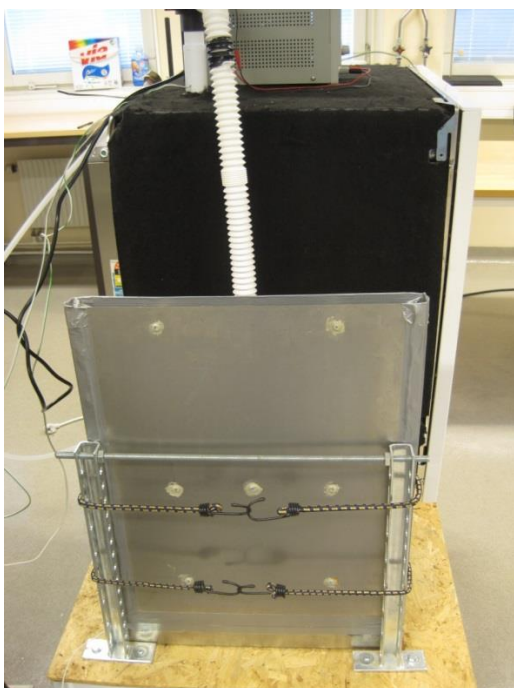
Höjden och bredden på islagret som användes i detta arbete byggdes i samma storlek som islagret som Askö Appliances AB har byggt. Tjockleken på islagret överdimensionerades så att det kunde räcka till flera körningar och för att vara säkert att all is inte skulle hinna smälta under en körning. Hela islagret byggdes i 0,5 mm tjockt rostfritt stål.

I försöken med islager undersöktes två olika spaltbredder på luftspalten: 3 mm och 6 mm. Detta var bredden vid kanterna på luftspalten. Plåten som luftspalten var gjord av var böjd och buktade därför utåt, vilket gjorde bredden på luftspalten större i mitten. Skillnaden på bredden mellan kanterna och mitten var inte stor, ca 1 mm, men kan ändå haft en påverkan på resultatet.

Figur 8 visar en skiss på islagret, A visar det framifrån, B från sidan och C uppifrån. I figur 7 och 9 visas islagret och hur den är kopplad till diskmaskinen.



Figur 8. Skiss på islagret med mått: A framifrån, B från sidan, C uppifrån.



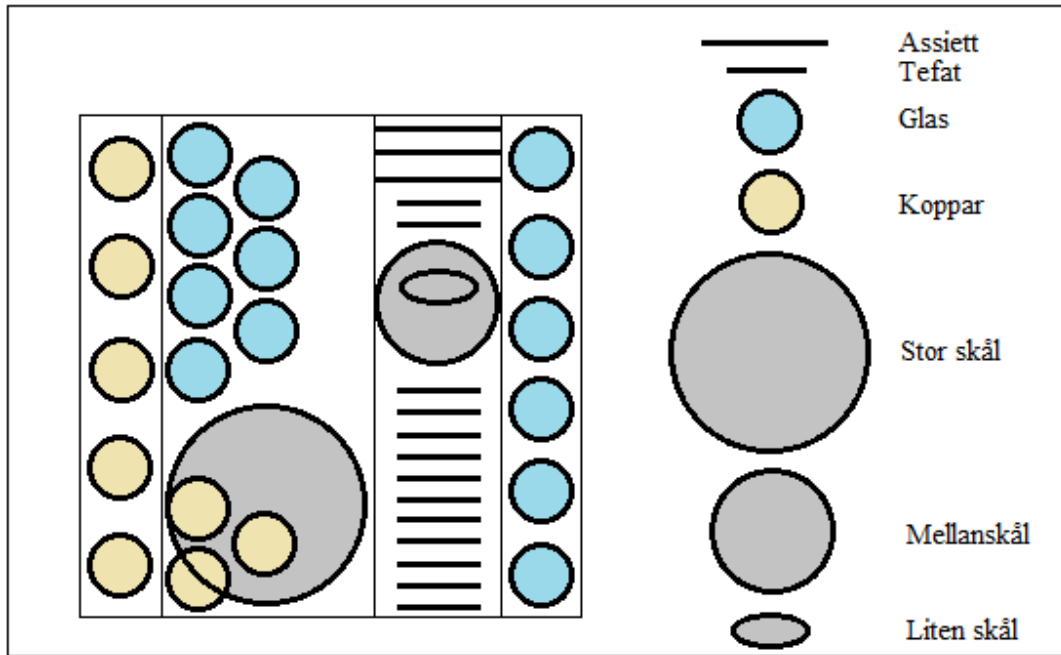
Figur 9. Islagret.

Disken som användes i försöken är standardgods som används vid tester av diskmaskiner i EU. Vilka diskgods som fanns med visas i tabell 3.

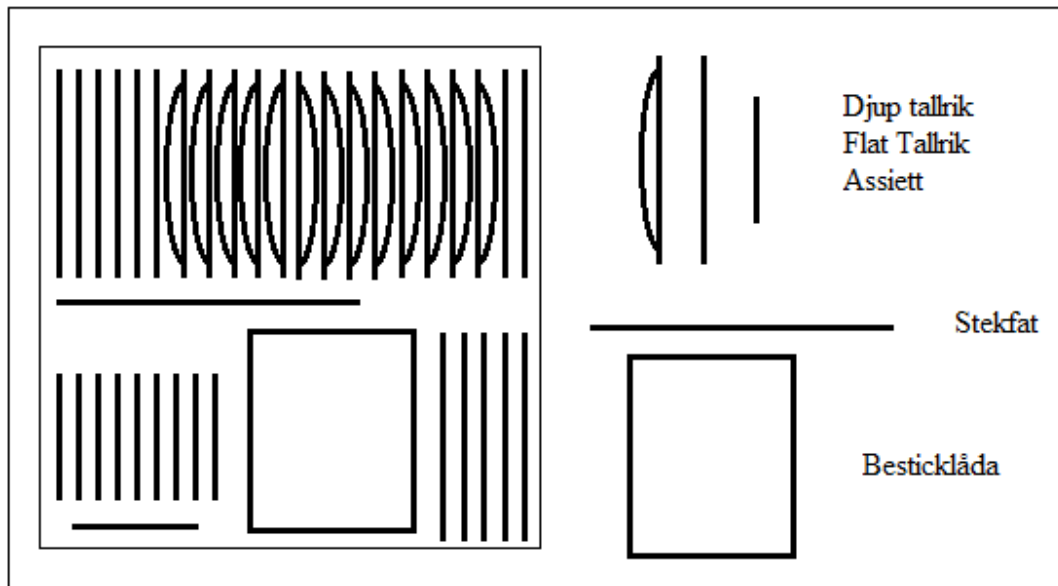
Tabell 3. Diskgodset som användes.

Diskgods	Antal
Djup tallrik	13
Flat tallrik	13
Assiett	13
Tefat	13
Koppar	13
Glas	13
Skålar	3 i olika storlekar
Stekfat	1
Soppsked	13
Gaffel	13
Kniv	13
Dessertsked	13
Tesked	13
Serveringsbestick	4

Disken placerades i diskmaskinen enligt figur 10, 11 och 12. Figur 10 visar hur disken låg i överkorgen, figur 11 hur den låg i underkorgen och figur 12 hur besticken hade placerats i besticklådan. I överkorgen ligger mellanskålen över den lilla skålen och den stora skålen ligger över tre koppar. Längst till vänster ligger kopparna, fem st. ligger längst ner och fem st. ligger över de andra på en hylla.



Figur 10. Disken i överkorgen.



Figur 11. Disken i underkorgen.

2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5		5	1	8		8				4		4				
5		5	1	1	1	1	1	1	1	4		4			4	6
5	5		5	1	1	1	1	7	1	1			4		4	
5		5		5		5	3			4			4		4	
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

1. Teskedar
2. Dessertskedar
3. Soppskedar
4. Gafflar
5. Knivar
6. Serveringsbestick - gaffel
7. Serveringsbestick - såsslev
8. Serveringsbestick - skedar

Figur 12. Besticken i besticklådan.

Till vattnet inuti diskmaskinen tillfördes 5 ml sköljmedel. Sköljmedel används för att ändra på ytspänningen på vattnet och på så vis förbättra torkningen.

Under försöken följdes detta schema:

1. Islagret fylldes med is och vatten.
2. Diskmaskinen fylldes med 4 l vatten.
3. Cirkulationspumpen och elementet startades och kördes till önskad temperatur var nådd.
4. 5 ml sköljmedel tillfördes och elementet stängdes av.
5. Cirkulationspumpen kördes 2 minuter utan uppvärmning, sedan startades uppvärmningen igen till temperaturen var tillbaka till den önskade temperaturen.
6. Allt stängdes av och diskmaskinen fick stå i 1 minut.
7. Vattnet pumpades ur.
8. Fläkten och loggning av temperaturerna startades.
9. Fläkten stängdes av efter 1 timme och sedan fick diskmaskinen vila 30 minuter.
10. Torksyning.

Med torksyningen undersöktes hur torr disken blivit. Den gick till att varje gods undersöktes noga, men snabbt, efter vattendroppar. Var godset helt torrt, utan några droppar, fick den två poäng. Om det fanns små droppar som tillsammans inte var större än $0,5 \text{ cm}^2$ och inte var fler än 3 st. fick den 1 poäng. Om det fanns fler än 3 droppar, om deras totala yta var större än $0,5 \text{ cm}^2$ eller om det fanns någon droppe längst upp på skålar eller koppar (oberoende på antal och storlek) fick godset 0 poäng. Poängen fylldes i en tabell, se figur 13, där den totala poängen för varje

körning beräknades, maxpoängen var 302 poäng. Torksyningen måste ske snabbt eftersom disken torkar under torksyningen.

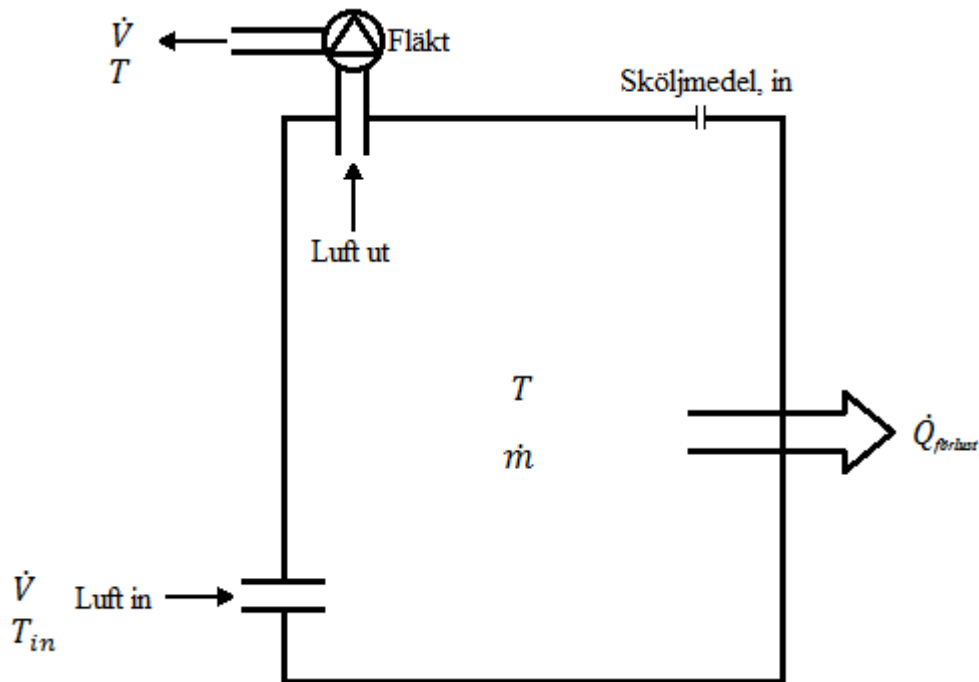
Delar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Summa
Djup tallrik														0
Koppar														0
Tefat														0
Flat tallrik														0
Flat tallrik														0
Assiett ö-korg														0
Assiett u-korg														0
Assiett														0
Stekfat														0
Stor skål														0
Mellanskål														0
Liten skål														0
Glas														0
Soppsked														0
Gaffel														0
Kniv														0
Dessertsked														0
Tesked														0
Serveringsbestick														0
Total:													0	

Figur 13. Tabell där poängen i disksyningen fylldes i.

2.2 Torkmodell

En matematisk modell över mass- och energibalansen under torkfasen byggdes och med den utfördes simuleringar på torkningen. Modellen bestod av en differentialekvation som simulerades i Microsoft Excel.

Data om temperaturen på luften som kom in i diskmaskinen från luftspalten (T_{in}) togs från försöken. Resterande data som densitet, specifik värmekapacitet, molmassa och förångningsentalpi togs från tabeller och antogs vara konstanta under hela torkperioden. Vattnets mättnadstryck antogs dock förändras linjärt. Mått och vikt på diskmaskin, diskgoods samt luftspalt mättes och vägdes. I figur 14 visas en skiss över diskmaskinen. I figuren visas temperaturen och flödet som förs in och ut ur diskmaskinen samt energiförlusten. Temperaturen ut ur diskmaskinen antogs vara samma som temperaturen inuti diskmaskinen.



Figur 14. Skiss över diskmaskinen.

Differentialekvationen var en balans över energin inuti systemet. Systemet är hela diskmaskinen inklusive diskgoods.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{ut} \quad (2)$$

Ekvation 2 beskriver energiändringen i diskmaskinen över tiden. Där \dot{Q}_{in} är effekten in i diskmaskinen och \dot{Q}_{ut} är effekten ut ur diskmaskinen.

$$E = [m \cdot c_p \cdot T]_{tot} \quad (3)$$

Energien inuti diskmaskinen där m är den totala massan för diskmaskinen inklusive luft, vatten och diskgoods.

$$m = m_{luft} + m_{vatten} + m_{porslin} + m_{metall} + m_{glas} + m_{maskin} \quad (4)$$

m_{vatten} , $m_{porslin}$, m_{metall} , m_{glas} , m_{maskin} vägdes medan m_{luft} beräknades.

$$m_{luft} = V_d \cdot \rho \quad (5)$$

Hela diskmaskinen antogs ha samma temperatur. Anledningen till det antagandet är för att Asko Appliances AB gör samma antagningar i deras undersökningar.

Ändringen i energi blir då:

$$dE = [m \cdot c_p \cdot dT]_{tot} \quad (6)$$

Ekvation 2 och 6 blir tillsammans:

$$[m \cdot c_p]_{tot} \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{ut} \quad (7)$$

Eller:

$$dT = \frac{1}{[m \cdot c_p]_{tot}} \cdot (\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{ut}) \cdot dt \quad (8)$$

där T är temperaturen inuti diskmaskinen och dT är därför temperaturändringen inuti diskmaskinen.

Effekten in i systemet är:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{V} \cdot \rho_{in} \cdot c_{p,in} \cdot T_{in} \quad (9)$$

Vilket bara är effekten från luftflödet in i diskmaskinen, se figur 14. Effekten ut ur diskmaskinen beskrivs i ekvation 10. Effekten ut är effekten från luftflödet ut ur diskmaskinen, energiförlusterna från diskmaskinen och energin som går åt för att förångas vattnet inuti diskmaskinen, se figur 14.

$$\dot{Q}_{ut} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot T + hA_{dm} \cdot (T - T_{\infty}) + h_{fg} \cdot \dot{m} \quad (10)$$

\dot{m} i ekvation 10 är massflödet på vattnet som förångas. När massflödet multipliceras med förångningsentalpin blir produkten effekten som krävs för att vattnet ska avdunsta. Här antas massöverföringen/torkningen ske med hjälp av konvektiv massöverföring. Den kan beräknas med hjälp av en massöverföringskoefficient, h_{mass} .

$$\dot{m} = h_{mass} \cdot \rho \cdot A_s \cdot (w_s - w_{\infty}) \quad (11)$$

h_{mass} kan beräknas med hjälp av analogin mellan värme- och massöverföring. Ekvation 12 visar en sådan analogi, som kallas för Lewis relation (Cengel 2010):

$$h_{mass} = \frac{h_{heat}}{\rho \cdot c_p} \quad (12)$$

Denna analogi är en förenkling som fungerar bra då vatten torkar i luft. I denna förenkling antas att $\left(\frac{D_{AB}}{\alpha}\right)^{2/3} = 1$. Egentligen är $\left(\frac{D_{AB}}{\alpha}\right)^{2/3}$ för vatten vid 25 °C lika med 0,913.

Ekvation 11 och 12 blir tillsammans:

$$\dot{m} = \frac{h_{heat}}{c_p} \cdot A_s \cdot (w_s - w_{\infty}) \quad (13)$$

Massfraktionerna beräknas enligt ekvation 14:

$$w = \frac{P_{sat}}{P_{tot}} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_{luft}} \quad (14)$$

P_{sat} är beroende av temperaturen på vattnet och förändras alltså under torkprocessen. Förändringen antogs vara linjär P_{sat} kunde därför beräknas med hjälp av ekvation 15:

$$P_{sat} = k \cdot T + m \quad (15)$$

Där k och m beräknades med hjälp av tabeller över P_{sat} .

h_{heat} beräknades för väggarna på insidan av diskmaskinen. För att få h_{heat} beräknades Rayleigh-talet:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T) \cdot L^3}{\nu^2} \cdot Pr \quad (16)$$

Där T_s är yttemperaturen på diskmaskinens väggar och den antogs vara 3 °C högre än temperaturen på luften. L är den karaktäristiska längden vilken är olika om ytan där h_{heat} ska beräknas är vertikal, eller horisontell. För vertikala ytor är den karaktäristiska längden höjden på ytan och för horisontella ytor är den $L = \frac{A}{p}$, där A är ytans area och p är omkretsen. Ytorna där h_{heat} var ytorna på diskmaskinens väggar.

Nusselt-talet beräknas från Rayleigh-talet och är olika beroende på om ytan är vertikal, översidan av en horisontell yta eller undersidan av en horisontell yta (Cengel 2010).

$$Nu_{vertikal} = \left(0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (17)$$

Nusselt-talet för en vertikal yta.

$$Nu_{horisontell \text{ översida}} = 0,54 \cdot Ra^{1/4} \quad (18)$$

Nusselt-talet för översidan av en horisontell yta.

$$Nu_{horisontell \text{ undersida}} = 0,27 \cdot Ra^{1/4} \quad (19)$$

Nusselt-talet för undersidan av en horisontell yta.

h_{heat} beräknades sedan med ekvation 20 för varje yta.

$$h_{heat} = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (20)$$

I modellen användes ett medelvärde av alla h_{heat} från de olika väggarna på diskmaskinen och användes även på diskgodsets ytor. h_{heat} för de vertikala ytorna beräknades till $3 \text{ W/m}^2, \text{K}$. för de horisontella ytorna blev h_{heat} $4 \text{ W/m}^2, \text{K}$ och $2 \text{ W/m}^2, \text{K}$ för översidan resp. undersidan. Medelvärdet blev då $3 \text{ W/m}^2, \text{K}$.

Ekvation 8 tillsammans med ekvationerna 9, 10, 11 och 15 blir:

$$dT = \frac{1}{[m \cdot c_p]_{\text{tot}}} \cdot \left(\dot{V} \cdot (\rho_{\text{in}} \cdot c_{p,\text{in}} \cdot T_{\text{in}} - \rho \cdot c_p \cdot T) - hA_{\text{dm}} \cdot (T - T_{\infty}) - h_{fg} \cdot \frac{h_{\text{heat}}}{c_p} \cdot A_s \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{luft}} \cdot P_{\text{tot}}} \cdot (k \cdot T + m - (k_{\text{in}} \cdot T_{\text{in}} + m_{\text{in}})) \right) \cdot dt \quad (21)$$

Ekvation 21 är den modell som användes för att simulera temperaturen inuti diskmaskinen. Data togs från tabeller genom ett medelvärde av temperaturen som mättes inuti diskmaskinen i varje försök. För data för inluften användes ett medelvärde av temperaturen vid inloppet på diskmaskinen. dt är tidssteget mellan mätningarna, som var 10 sekunder.

För att kunna beräkna temperaturen inuti diskmaskinen vid en viss tidpunkt användes ekvation 22:

$$T_2 = T_1 + dT \quad (22)$$

Där T_2 är temperaturen inuti diskmaskinen vid den önskade tidpunkten och T_1 är temperaturen 10 sekunder innan.

Modellen utvärderas genom att den beräknade temperaturen inuti diskmaskinen jämförs med den temperaturen som mättes i försöken. Modellen användes sedan till beräkning av mängden vatten som torkar från luften inuti diskmaskinen. Den mängden antogs vara lika stor som mängden vatten som förångas.

För att beräkna mängden energi som behövdes för att värma upp diskmaskinen användes ekvation 23:

$$E = [m \cdot c_p]_{\text{tot}} \cdot \Delta T \quad (23)$$

Där ΔT är temperaturskillnaden mellan rumsluften och temperaturen som diskmaskinen värms upp till. Rumsluften antogs vara $19 \text{ }^\circ\text{C}$.

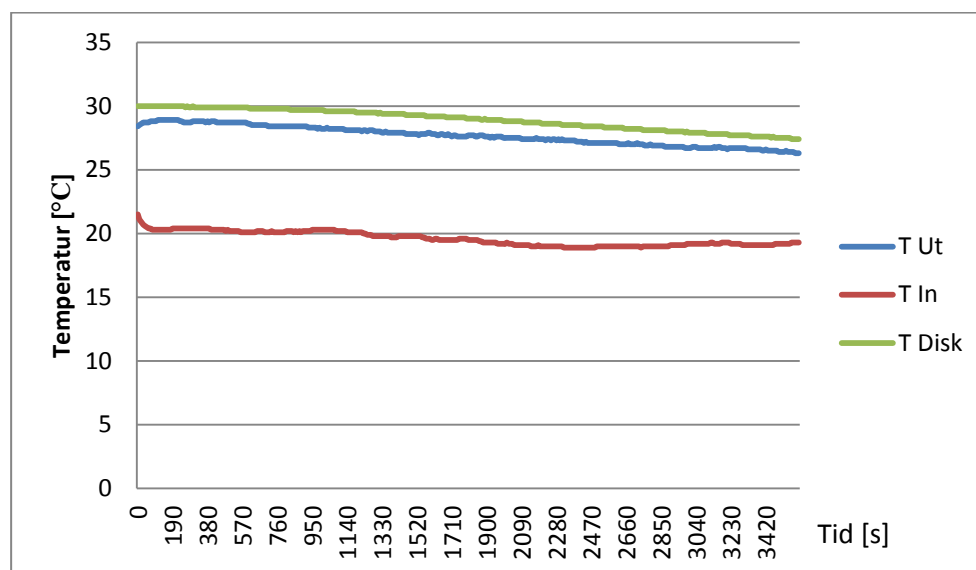
Energiverkningsgraden på torkningen beräknades med ekvation 24:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot h_{fg}}{E} \quad (24)$$

3 Resultat

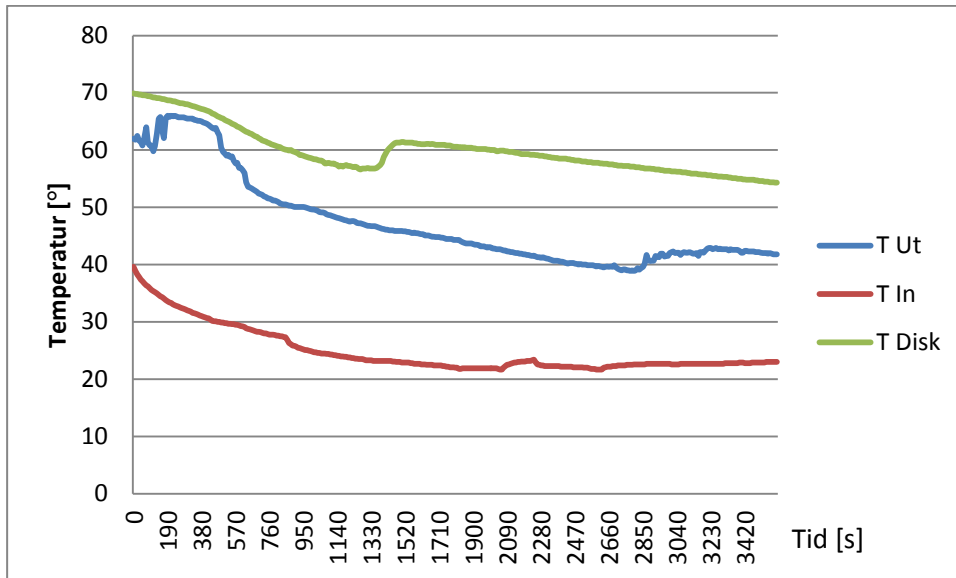
3.1 Försök

Under försöken mättes temperaturerna in i (T_{In}), ut ur (T_{Ut}) och inuti diskmaskinen (T_{Disk}). Figur 15 och 16 visar temperaturerna som mättes i två av försöken. Figur 15 visar försöket med starttemperaturen 30 °C, luftflödet 8 m³/h och spaltbredden 3 mm och figur 16 visar försöket med starttemperaturen 70 °C, luftflödet 4 m³/h och spaltbredden 6 mm.



Figur 15. De uppmätta temperaturerna i försöket då starttemperaturen var 30 °C, flödet 8 m³/h och spaltbredden 3 mm.

Temperaturen inuti diskmaskinen, var i stort sett alltid högre än temperaturen ut ur diskmaskinen, vilket inte stämmer överrens med antagandet i modellen att dessa temperaturer är lika. Temperaturen tillbaka in till diskmaskinen var nästan konstant under hela torkfasen i försöken med låg starttemperatur.



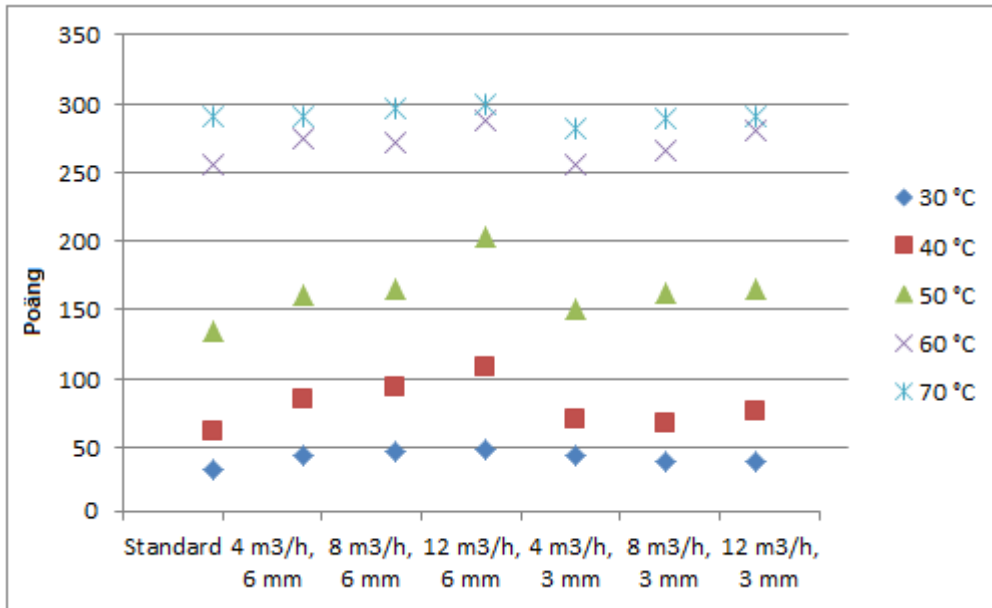
Figur 16. De uppmätta temperaturerna i försöket då starttemperaturen var 70 °C, flödet 4 m³/h och spaltbredden 6 mm.

I försöken med hög starttemperatur var skillnaden mellan temperaturen inuti diskmaskinen och temperaturen på luften ut ur diskmaskinen stor, ibland nära 20 °C, se figur 16. Temperaturen på luften tillbaka in i diskmaskinen var inte konstant då starttemperaturen var hög, utan sjönk i början och var sedan närmast oförändrad under resten av torkfasen.

Temperaturen på luften tillbaka in i diskmaskinen från luftspalten berodde mer på spaltbredden än temperaturen på luften som fördes ut ur diskmaskinen och luftflödet. Liten spaltbredd gav lägre temperaturer på luften in i diskmaskinen.

3.2 Torksyning

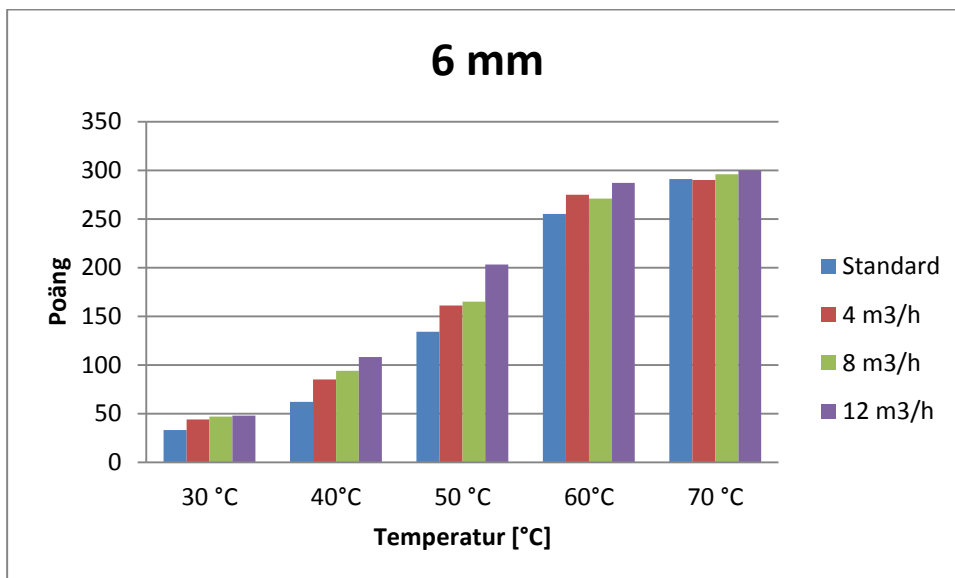
Försöken visade med hjälp av torksyningen hur bra disken i diskmaskinen torkades. Figur 17 visar hur många poäng torkningen fick i varje försök. Olika former och färger på punkterna är olika temperaturer inuti diskmaskinen då torkningen startade. I figuren visas också resultaten vid olika flöden, spaltbredder och i standardförsöket då inget islager användes. Max antal poäng som var möjligt att få var 302.



Figur 17. Poängen från torksyningen för de olika försöken.

Figuren visar att hög starttemperatur, högt flöde och större spaltbredd på försöken ger bättre poäng i torksyningen. Förändring på starttemperatur gav störst förändring på torkningen.

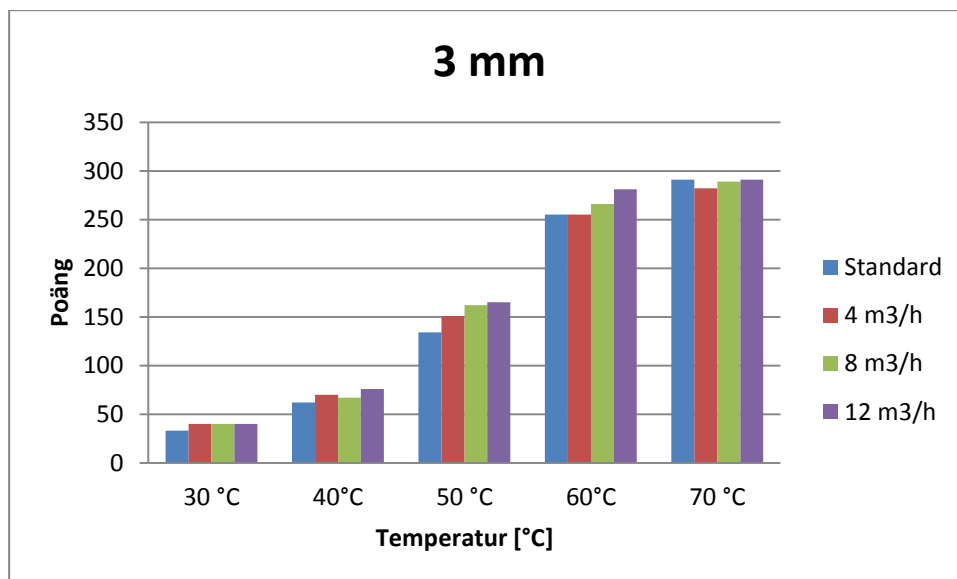
I figur 18 och 19 visas poängen från torksyningen i stapeldiagram. I figur 18 visas poängen på försöken spaltbredden var 6 mm och i figur 19 spaltbredden var 3 mm.



Figur 18. Poängen i torksyningen i försöken med spaltbredden 6 mm.

Även i figur 18 går det se att torkresultatet beror starkt på starttemperaturen. Standardförsöken fick alltid mindre poäng än försöken med islager. Det sämsta resultatet var 33 av 302 poäng för standardtestet med starttemperaturen 30 °C, det

bästa resultatet var 300 av 302 poäng då starttemperaturen var 70 °C och flödet var 12 m³/h.

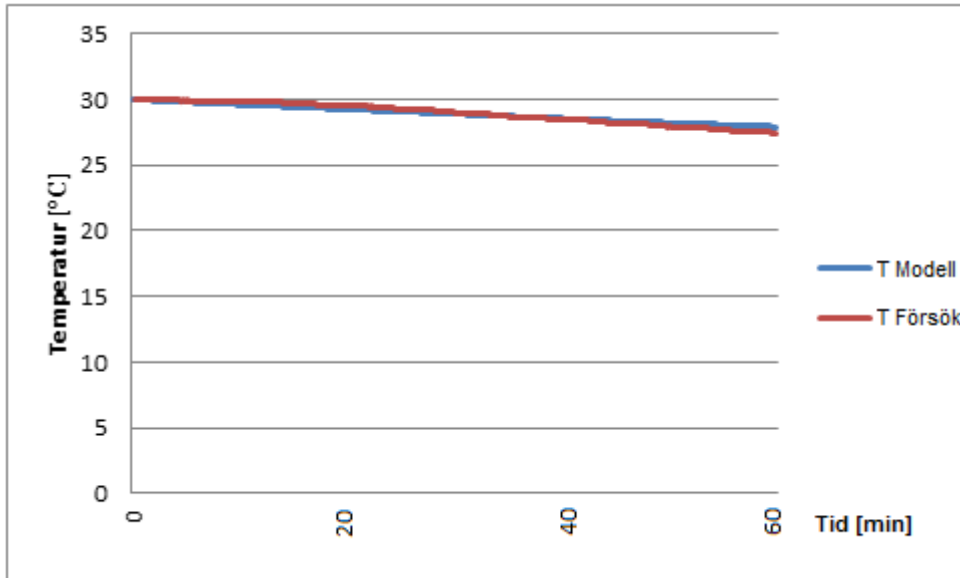


Figur 19. Poängen i torksyningen i försöken med spaltbredden 3 mm.

I figur 19 går det att se att skillnaden mellan försöken med islager och standardförsöken är mindre än då spaltbredden var 6 mm, vilket tyder på att resultatet blev sämre då spaltbredden minskades. Då spaltbredden var 3 mm var försöken med islager alltid bättre än standardförsöken, bortsett då starttemperaturen var 70 °C då standardförsöket alltid var bäst.

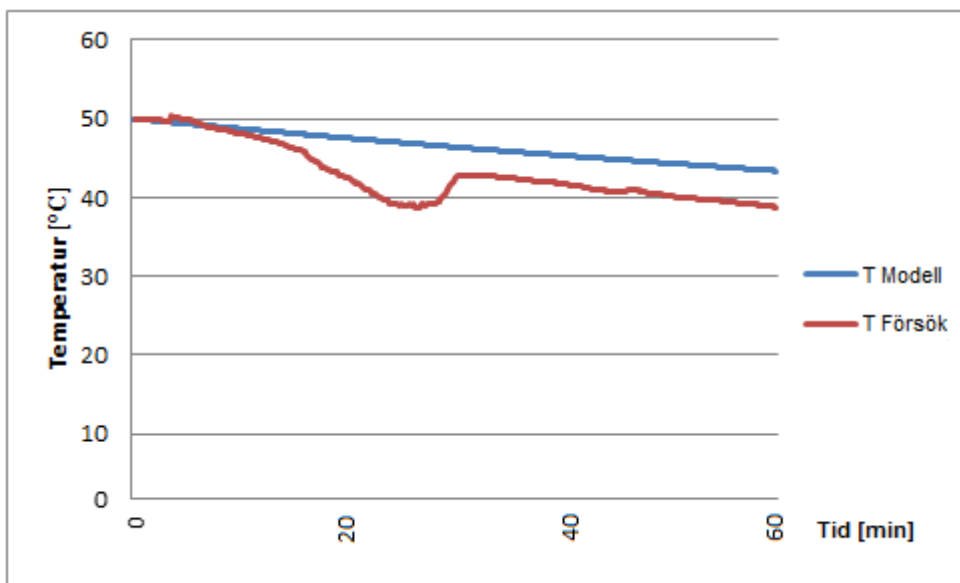
3.3 Verifiering av torkmodell

De beräknade temperaturerna inuti diskmaskinen från simuleringarna på modellen jämfördes med temperaturerna från alla försöken, med islager och utan islager, för att verifiera modellen. I figur 20 och 21 visas temperaturerna som beräknades med hjälp av modellen för två försök. Figur 20 visar resultaten då starttemperaturen var 30 °C, flödet 8 m³/h och spaltbredden 3 mm. I figur 21 visas resultaten då starttemperaturen var 50 °C, flödet 12 m³/h och spaltbredden 6 mm.



Figur 20. Temperaturerna som beräknades med modellen och som mättes i försöken då starttemperaturen var 30 °C, flödet 8 m³/h och spaltbredden 3 mm.

Figur 20 visar att temperaturerna som beräknades med modellen och temperaturerna som mättes i försöket inte skiljer sig mycket åt. Skillnaden var liten för alla försöken då starttemperaturen var 30 °C samt då den var 70 °C.



Figur 21. Temperaturerna som beräknades med modellen och som mättes i försöken då starttemperaturen var 50 °C, flödet 12 m³/h och spaltbredden 6 mm.

I figur 21 finns en period då temperaturen på försöket snabbt sjönk, för att sedan snabbt öka igen. Detta skedde i de flesta försök med starttemperatur över 30 °C och hände inte i simuleringarna och därför är skillnaden mellan försöken och modellerna större där. Orsaken till dessa snabba temperaturförändringar tas upp i diskussionen.

Då starttemperaturen var 40 °C, 50 °C och 60 °C var skillnaden mellan beräknad och uppmätt temperatur inuti diskmaskinen större, se figur 21 för att se temperaturerna då starttemperaturen var 50 °C. I modellen antogs det att hela diskmaskinens massa hade samma temperatur, samma temperatur som luften och diskgodset hade inuti diskmaskinen. Diskmaskinen och diskgodset fungerade som ett värmelager som kunde avge energi så att vattnet kunde torka från disken. Om värmelagret skulle antas vara för litet skulle den beräknade temperaturen inuti diskmaskinen samt mängden torkat vatten bli för lågt jämfört med försöken. Om värmelagret skulle antas vara för stort skulle den beräknade temperaturen och mängden torkat vatten bli för högt. Den från modellen beräknade temperaturen inuti diskmaskinen var alltid högre än samma temperatur i försöken. Därför var diskmaskinens antagna värmelager för stor.

I tabell 4 och 5 visas den procentuella skillnaden mellan försöken och beräkningarna då skillnaden var som störst, dock inte under de stora temperaturändringarna som skedde i försöken.

Tabell 4. Procentuella skillnaden mellan uppmätt och beräknad temperatur inuti diskmaskinen då spaltbredden var 6 mm.

	Standard	4 m ³ /h	8 m ³ /h	12 m ³ /h
30 °C	5,6 %	2,5 %	3,1 %	6,0 %
40 °C	9,9 %	14,2 %	7,7 %	8,2 %
50 °C	19,5 %	17,5 %	16,3 %	11,9 %
60 °C	18,1 %	23,2 %	12,7 %	7,2 %
70 °C	6,0 %	4,4 %	4,3 %	-1,0 %

Tabell 4 visar att modellen stämmer bäst överrens med försöken då starttemperaturen var 30 °C och 70 °C, då skillnaden var mellan -1 % och 6 %. Störst var skillnaden då temperaturen var 50 °C och 60 °C samt då flödet var 4 m³/h.

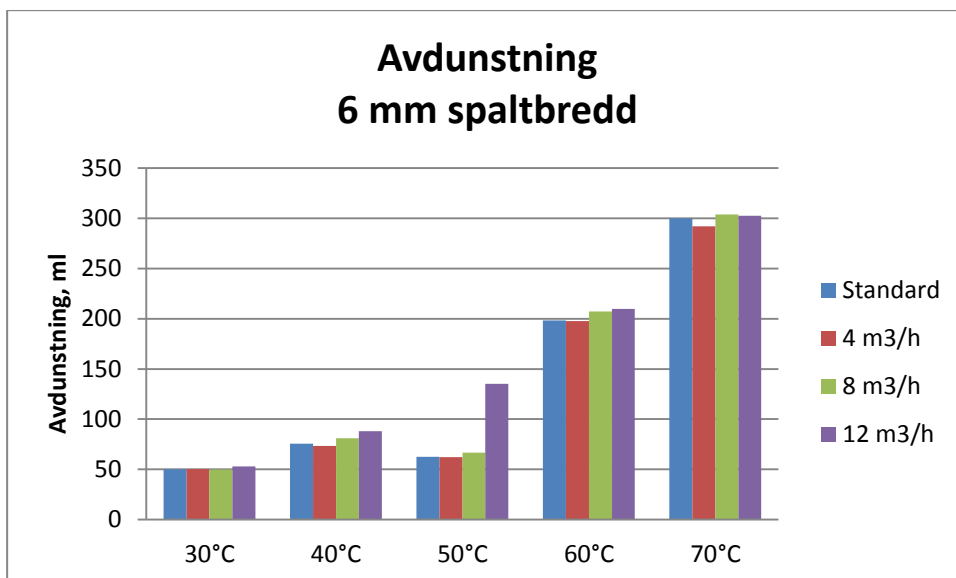
Tabell 5. Procentuella skillnaden mellan uppmätt och beräknad temperatur inuti diskmaskinen då spaltbredden var 3 mm.

	Standard	4 m ³ /h	8 m ³ /h	12 m ³ /h
30 °C	5,6 %	2,40 %	2,0 %	7,2 %
40 °C	9,9 %	9,70 %	9,1 %	4,7 %
50 °C	19,5 %	10,7 %	15,5 %	11,8 %
60 °C	18,1 %	9,4 %	8,6 %	10,0 %
70 °C	6,0 %	5,6 %	4,5 %	3,7 %

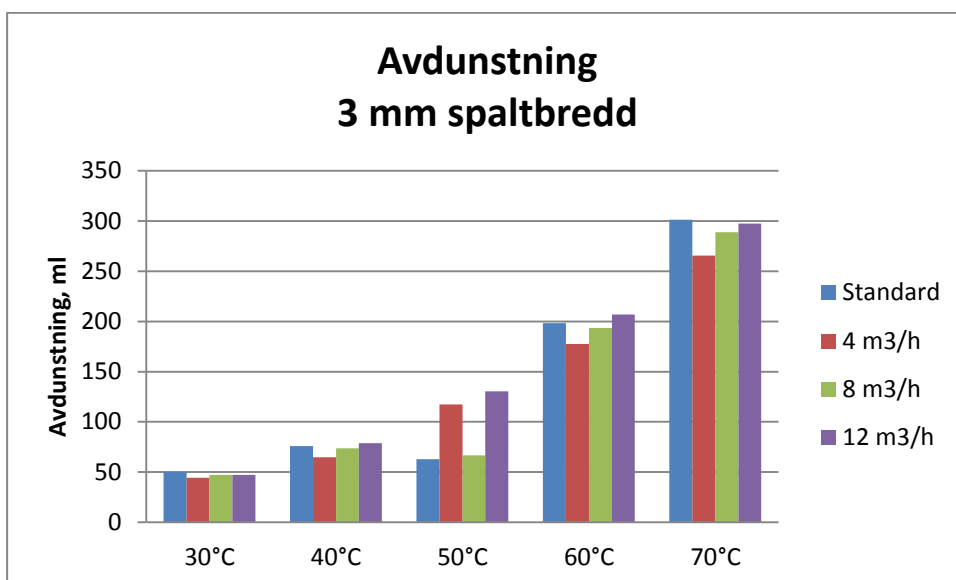
I tabell 5 går det att se att även då spaltbredden var 3 mm stämmer modellen överrens med försöken då starttemperaturen var 30 °C och 70 °C. Då starttemperaturen var 50 °C blev skillnaden som störst.

3.4 Beräknad torkning

Figur 23 och 24 visar stapeldiagram över mängden vatten som i varje försök beräknats torka i diskmaskinen då bredden på luftspalten var 6 mm resp. 3 mm.



Figur 22. Den beräknade mängden vatten som torkade i luftspalten då den var 6 mm bred.



Figur 23. Den beräknade mängden vatten som torkades i luftspalten då den var 3 mm bred.

Figureerna visar att torkningen ökar när temperaturen ökar. Undantaget är när starttemperaturen var 50 °C. Då torkas mindre i modellerna för standardförsöket, försöken med 6 mm spaltbredd och flödena 4 m³/h och 8 m³/h samt försöket med 3

mm spaltbredd och 8 m³/h. Högre flöden ger bättre torkning och försök med islager har för det mesta också bättre torkning. Vid 60 °C och 70 °C har dock modellen över standardförsöket mer torkning än modellerna för försöken med islager.

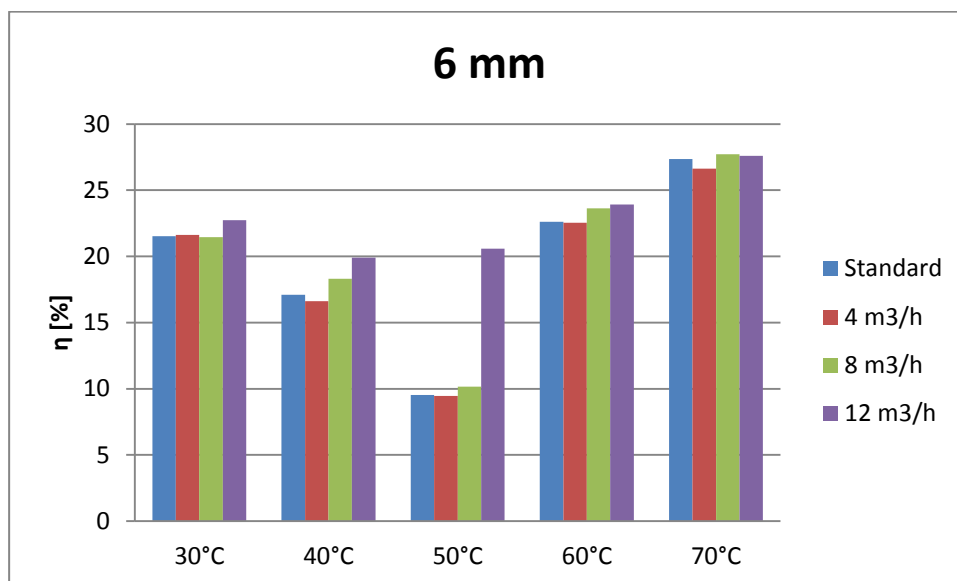
3.5 Beräknad energi

I tabell 6 visas energin, i MJ, som krävs för att värma upp diskmaskinen till de olika starttemperaturerna. Energiförbrukningen ökar då starttemperaturen ökar.

Tabell 6. Energin som krävs för att värma upp diskmaskinen

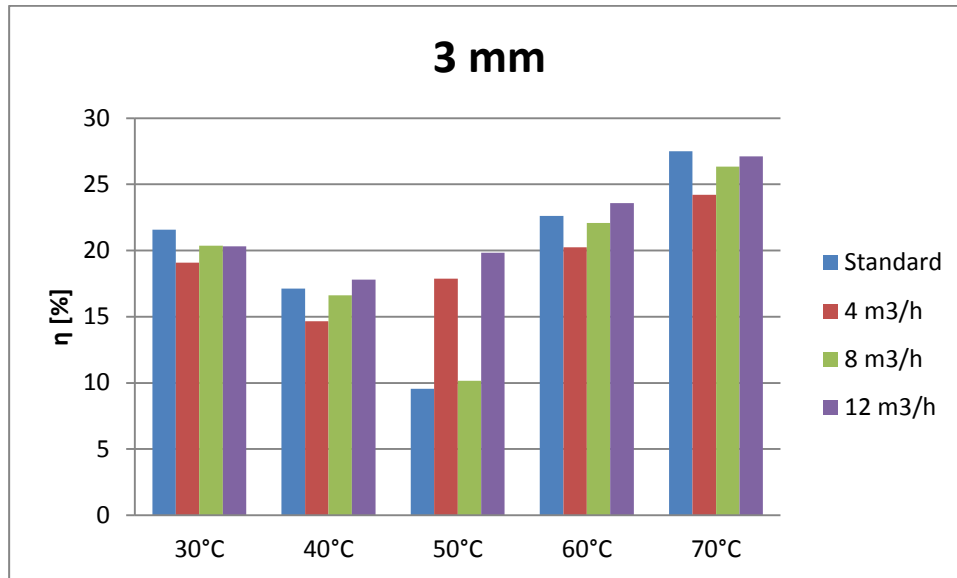
T _{Start}	Energi [MJ]
30°C	0,5
40°C	1,1
50°C	1,6
60°C	2,1
70°C	2,6

I figur 24 och 25 visas den beräknade energiverkningsgraden för torkningen. I figur 24 visas energiverkningsgraden för standardförsöken och försöken då spaltbredden var 6 mm och i figur 25 för standardförsöken och försöken då spaltbredden var 3 mm.



Figur 24. Den beräknade energiverkningsgraden för torkningen för standardförsöken och försöken då spaltbredden var 6 mm.

Figur 24 visar att i försöken då starttemperaturen var 70 °C var energiverkningsgraden högst, då gick mer än 25 % av värmeenergin som tillförs diskmaskinen till att torka vattnet.



Figur 25. Den beräknade energiverkningsgraden för torkningen för standardförsöken och försöken då spaltbredden var 6 mm.

Även då spaltbredden var 3 mm hade försöken med starttemperaturen 70 °C högst energiverkningsgrad. Energiverkningsgraden var alltid lite lägre i försöken med spaltbredden 3 mm.

Då starttemperaturen var 50 °C var energiverkningsgraden i vissa försök, både då spaltbredden var 6 mm och 3 mm, mycket lägre än vad den annars var. Detta på grund av att den beräknade mängden vatten som torkas var så låg i dessa försök.

4 Diskussion

4.1 Mätningar

I figur 15 och 16 visas temperaturerna på luften som strömmar in i diskmaskinen. I de försök där bredden på luftspalten var 3 mm var temperaturen på luften in i diskmaskinen högre än i de försök där spaltbredden var 6 mm. Detta på grund av att i den smalare bredden på luftspalten blev luftens hastighet större och hann därför inte kylas ned lika mycket. Det gick dock inte att se någon liknande skillnad mellan de olika flödena på luften. Då luftflödet ökade blev hastigheten högre och därför borde temperaturen på luften in i diskmaskinen varit högre för försöken med höga flöden. En anledning till det kan vara att bredden på luftspalten påverkar hastigheten genom luftspalten mer än vad luftflödet som strömmar från fläkten gör. Temperaturen på luften som förs ut ur diskmaskinen verkar inte heller påverka temperaturen på luften som förs in i diskmaskinen. En högre temperatur in till luftspalten borde resulterat i en högre temperatur ut ur den. Detta tyder på att hastigheten genom luftspalten påverkar temperaturen som kommer ut ur den mer än vad temperaturen in till luftspalten påverkar temperaturen ut.

I många av försöken sjönk temperaturen på luften inuti diskmaskinen ibland snabbare än den gjorde tidigare för att sedan snabbt öka en stund senare, se figur 16. Varför dessa snabba temperaturförändringar sker är oklart. En teori är att en vattendroppe träffar temperaturgivaren och när vattnet torkar från den sjunker temperaturen. När sedan allt vatten torkat ökar temperaturen snabbt igen. I modellens beräknade lufttemperatur inuti diskmaskinen fanns det inga snabba temperaturförändringar.

4.2 Torksyning

I torksyningen bedöms hur torr disken är och varje gods får poäng beroende på hur torr den är. Det finns vissa osäkerheter med denna metod för att bedöma hur torr disken är. För det första är det osäkert om en viss storlek på en vattendroppe på ett gods gav lika många poäng över hela arbetet. Vid ett försök kan en droppe ge ett poäng i torksyningen och vid ett annat försök senare kan en annan, lika stor droppe, ge noll poäng. Denna osäkerhet har varit känd under hela arbetet, vilket minskar risken för att olika bedömningar har gjorts. För det andra är vissa droppar små och därför svåra att upptäcka, speciellt med tanke på att torksyningen måste ske snabbt. Därför kan vissa gods ibland fått full poäng (två poäng) trots att det funnits en eller fler små vattendroppar. För att förhindra att droppar missas skedde torksyningen direkt under en lampa med lysrör för att få så mycket ljus som möjligt. Nästan alla vattendroppar som var kvar på godsen var längst ned på godset eller där det legat emot andra gods. Det var därför lätt att hitta även små droppar om godset undersöktes längst ned och där den hade legat emot andra gods. Eftersom det funnits kunskap om osäkerheterna under torksyningen och åtgärder genomförts för att minska risken för misstag bör poängskillnaden på grund av felaktigheter mellan olika försök vara liten. Ett undantag är för standardförsöket på 70 °C. Då var standardförsöken bättre än både försöket med 6 mm luftspalt och 3 mm luftspalt. I alla andra försök blev torkresultatet alltid bättre med islager och luftspalt än utan. En förklaring till detta kan vara felbedömningar i torksyningen för standardförsöket, vilket resulterat i att den fått för många poäng.

Torksyningen i detta arbete utfördes av en person som inte har erfarenhet i torksyning. Resultatet från torksyningen kan därför skilja sig mycket från resultatet från torksyningen av någon med erfarenhet. Därför bör resultaten från detta arbete inte jämföras med resultat från torksyning av någon med erfarenhet av detta, utan endast mellan försöken från detta arbete.

I torksyningen gav hög starttemperatur med högt flöde och bred luftspalt det bästa resultatet. Detta var inte oväntat eftersom det vid höga starttemperaturer fanns ett stort värmelager inuti diskgodset och diskmaskinen som värmdes upp luften, vilket fick vattnet att torka fortare. Anledningen till att höga luftflöden ökade hastigheten på torkningen är att mer luft då kunde föras förbi luftspalten där vattnet

kondenserade och avskiljdes. Högre hastighet på luftrörelserna inuti diskmaskinen ökar också hastigheten på torkningen eftersom avdunstningen då går fortare.

I figur 17 visas resultatet från torksyningen för alla resultat. Försöken med starttemperaturen 70 °C gav bäst resultat, 300 poäng av 302 möjliga. Försöken med starttemperaturen 60 °C var något sämre, 287 poäng av 302 möjliga, men skillnaden är inte stor. Speciellt inte på de försöken med höga flöden. Därför bör inte diskmaskinen värmas upp till 70 °C av den sista sköljningen, utan det räcker med 60 °C. Detta kan spara energi samtidigt som torkresultatet blir bra. Dock bör man ha ett högt flöde på fläkten om diskmaskinen bara ska värmas upp till 60 °C. Vid höga temperaturer och luftflöden är skillnaden på torkresultatet i försök med 6 mm och 3mm spaltbredd liten. Det är därför möjligt att välja en mindre spaltbredd för att på så sätt spara plats, och samtidigt få ett bra torkresultat.

4.3 Verifiering av torkmodell

Den från modellen beräknade temperaturen inuti diskmaskinen var alltid högre än samma temperatur i försöken. Anledningen till det är för att diskmaskinens antagna värmelager var för stor, med andra ord var antagandet att hela diskmaskinens massa hade samma temperatur var felaktig. Endast de innersta delarna av diskmaskinen hade samma temperatur som luften inuti diskmaskinen. Ju längre ut, desto lägre var diskmaskinens temperatur och längst ut var temperaturen på diskmaskinen samma som rumsluftens temperatur, vilket för det mesta var betydligt lägre än temperaturen inuti diskmaskinen. Trots att detta var känt under arbetets gång gjordes denna antagning. Anledningen till det är för att Asko Appliances AB gör detta antagande i deras arbeten och eftersom detta arbete är åt Asko Appliances AB gjordes samma antagande här. Konsekvensen av detta antagande blev som sagt att den beräknade temperaturen blev för hög. I de försöken då starttemperaturen var 40 °C, 50 °C och 60 °C var skillnaden mellan mätt och beräknad temperatur, ibland nära 20 °C. Då starttemperaturen var 30 °C var skillnaden väldigt liten, vilket var väntat eftersom skillnaden mellan temperaturen på diskmaskinens innersta delar och dess yttersta då var liten. I de försök då starttemperaturen var 70 °C, då skillnaderna i temperatur mellan diskmaskinens innersta och yttersta delar var som högst, förväntades skillnaden mellan temperaturen på luften inuti diskmaskinen som mättes och beräknades vara som störst. Dock var denna skillnad betydligt mindre än skillnaderna då starttemperaturerna var 40 °C, 50 °C och 60 °C. En anledning till det kan vara för att energiförlusten genom diskmaskinens väggar blev för stor och temperaturen inuti diskmaskinen då blev lägre än vad den annars skulle blivit.

4.4 Beräknad torkning

Mängden vatten som torkar inuti diskmaskinen ökar när starttemperaturen ökar. Undantaget är då starttemperaturen är 50 °C. Då torkas det för det mesta mindre än då starttemperaturen är 40 °C (undantag för standardförsöket och då spaltbredden

är 6 mm och luftflödet är 12 m³/h samt då spaltbredden är 3 mm och luftflödet är 4 m³/h och 12 m³/h, då torkas mer vatten vid starttemperaturen 50 °C). Mängden vatten som torkar då starttemperaturen är 50 °C bör vara större än då starttemperaturen är 40 °C. Detta eftersom en högre starttemperatur ger ett större värmelager som får vattnet att torka. Det har därför blivit fel någonstans i beräkningarna, dock har inga fel hittats.

Eftersom skillnaden mellan uppmätta och beräknade temperaturer i vissa fall var stor bör även den beräknade mängden torkat vatten skilja sig från verkligheten. Hur mycket denna skillnad är går inte att säga eftersom detta inte mättes i försöken, men man kan anta att i de försök då skillnaden mellan uppmätt och beräknad temperatur var stor, var även skillnaden mellan beräknad och verklig mängd torkat vatten stor. Detta eftersom det är temperaturen som påverkar hur mycket som torkas.

I försöken som fått bäst torkresultat i torksyrningen har mest vatten torkat från disken. Därför finns likheter mellan resultaten från torksyrningen och den beräknade mängden torkat vatten. Likheterna är att ökad starttemperatur, luftflöde och spaltbredd gav högre poäng vid torksyrningen och högre beräknad mängd torkat vatten. Dock är skillnaden mellan resultaten då starttemperaturen var 60 °C och då den var 70 °C större för den beräknade mängden torkat vatten än vad den var för poängen från torksyrningen. En annan avvikelse är att skillnaden mellan resultaten från standardförsöken och försöken med islager inte är så stor för den beräknade mängden torkat vatten. Försöken med 6 mm spaltbredd var för det mesta bättre än standardförsöken, men skillnaden var väldigt liten och det är därför svårare att få en slutsats om vilken som är bäst utifrån att studera resultatet från modellerna jämfört med att undersöka resultatet från torksyrningen.

Det bästa resultatet i beräkningen av mängden torkat vatten kom från försöket med starttempertur 70 °C, luftflöde 8 m³/h och spaltbredd 6 mm. Detta stämmer inte överrens med torksyrningen där det bästa resultatet kom från försöket med starttempertur 70 °C, luftflöde 12 m³/h och spaltbredd 6 mm. Skillnaden mellan mängden torkat vatten från försöken med 8 m³/h och 12 m³/h är dock inte stor. Utifrån att bara studera torksyrningen hade försöket med 60 °C starttemperatur, 12 m³/h och spaltbredden 6 mm valts att använda i en diskmaskin. När den beräknade mängden torkat vatten studeras hade istället någon av försöken vid 70 °C valts. Detta för att resultaten från försöken då starttemperaturen är 70 °C är så mycket bättre än de från försöken med 60 °C. Skillnaden i mängden torkat vatten är större än energibesparingen som fås från att välja en med starttemperatur 60 °C. Men om både resultaten från torksyrningen och modellen studeras skulle starttemperatur 60 °C, luftflöde 12 m³/h och 6 mm luftspaltsbredd rekommenderas.

4.5 Beräknad energi

Precis som väntat ökade energin som beräknades användas för att värma upp diskmaskinen då starttemperaturen ökade. Energiverkningsgraden på torkningen var som högst då starttemperaturen var som högst, vilket borde betyda att torkningen då var som mest energieffektiv. Detta är dock inte sant. Resultaten från torksyrningen visar att skillnaden i torkresultatet då starttemperaturen var 60 °C och då den var 70 °C var liten. Skillnaden i energi som användes för att värma upp diskmaskinen mellan dessa starttemperaturer var dock 0,5 MJ. Med andra ord går det åt 0,5 MJ mindre för att torka disken vid 60 °C istället för vid 70 °C, men resultatet blir nästan detsamma. Anledningen till att försöken med 70 °C starttemperatur är mer energieffektiv enligt modellen är för att det då torkas så mycket vatten som inte sitter på diskgodset, till exempel på diskmaskinens väggar, tak och golv. När vatten torkas därifrån blir torkresultatet inte bättre, men mängden vatten som torkas blir större.

Energibesparingen på 0,5 MJ som erhålls då starttemperaturen 60 °C används istället för 70 °C är betydligt mindre än den minskade energianvändningen som Hauer och Fisher (2010) får då de använder adsorption för att torka disken. De kom fram till att den metoden sparar 25 % av den totala energianvändningen. Enligt Minde (2011) använder dagens diskmaskiner något mindre än 1 kWh energi per cykel. Om man antar att en diskmaskincykel använder 1 kWh skulle den procentuella energibesparingen då en starttemperatur på 60 °C väljs istället för 70 °C bli 14 %. Men eftersom en värmepump används som värmekälla skulle minskningen av elenergi bli mindre än så, beroende på värmepumpens värmefaktor.

För att spara ännu mer energi skulle det gå att använda värmeåtervinning till diskmaskinen för att på så sätt inte behöva tillföra lika mycket värme till diskmaskinen. Enligt De Paepe et al. (2003) går det att återvinna en stor del värme i diskmaskiner.

All energi som minskas per cykel kan leda till en stor total energibesparing per år, men detta bara om hushållen byter ut sina gamla diskmaskiner mot nya, mer energieffektiva diskmaskiner (Young 2007). En minskning i energianvändningen hos en diskmaskin ger den en bättre energiklass i energimärkningen (Energimyndigheten), vilket gör diskmaskinen mer eftertraktad av konsumenterna (Young 2007).

4.6 Torkmodellen

I framtiden skulle torkmodellen kunna användas för att utvärdera torkningen i diskmaskiner. Genom att beräkna mängden vatten som torkar inuti diskmaskinen är det möjligt att få kunskap om hur väl disken torkas i verkligheten. Den beräknade energiverkningsgraden kan användas som underlag då starttemperatur till torkfasen ska väljas för att på så sätt få den mest energieffektiva torkningen. Eftersom det

inte går att se vart vattnet i modellen torkar, på disken eller på diskamskinens väggar, är det svårt att bedöma hur torr disken har blivit efter torkfasen genom att studera den beräknade mängden vatten som torkat. Energiverkningsgraden på torkningen blir också svårbedömd eftersom inte allt vatten som torkar sitter på disken. Dock kan modellen användas för att se vilka startvärden på diskmaskinen som är intressanta för fortsatta studier, med praktiska försök.

Antagandet att hela diskmaskinen har samma temperatur som luften inuti diskmaskinen gör så diskmaskinen får ett för stort värmelager. Det stora värmelagret får temperaturen inuti diskmaskinen att sjunka långsammare i modellen än vad den gör i verkligheten. Eftersom temperaturerna i modellen inte stämmer överrens med verkligheten bör inte heller mängden torkat vatten göra det. Detta går att åtgärda genom att dela upp diskmaskinen i olika delar, med olika temperaturer, ju längre ut på diskmaskinen desto lägre temperatur. Då skulle värmelagret bli mindre och temperaturerna i modellen skulle sjunka snabbare.

En annan brist med modellen är att den kräver att temperaturen på luften in i diskmaskinen är känd under hela torkprocessen. Därför måste försök utföras för att modellen ska kunna användas. Dock skiljer sig inte temperaturen på luften in till diskamskinen mycket mellan olika försök, därför kan samma värden på temperaturen in i diskmaskinen användas till flera modeller med olika, med liknande startvärden. Det är också möjligt att göra en modell över vad som sker inuti luftspalten för att på så sätt beräkna temperaturen på luften in i diskmaskinen.

4.7 Metodkritik

Standardförsöken var försök på torkmetoden som används av Asko Appliances AB idag. I deras torkfas förs den fuktiga luften ut ur diskmaskinen och in i rummet där maskinen står. Detta med hjälp av en fläkt med flödet $4 \text{ m}^3/\text{h}$, därför undersöktes bara luftflöde på $4 \text{ m}^3/\text{h}$ i standardförsöken. Fler standardförsök borde dock ha utförts, med flera olika luftflöden, för att på så sätt lättare kunnat jämföra resultaten från standardförsöken med försöken där islager användes.

Temperaturen på luften in i diskmaskinen som mättes i försöken användes som indata till modellen. Detta höjer trovärdigheten på modellen eftersom detta är data som har mätts för det system som modellen är byggd efter, inte data som har antagits eller beräknats utifrån tabellvärden. Nackdelen med detta är dock att försök måste göras för att kunna få indata på lufttemperaturen in i diskmaskinen.

Densiteten, den specifika värmekapaciteten och förångningsentalpin antogs i modellen vara konstanta över hela torkfasen. Detta är dock en förenkling eftersom dessa varierar med varierande temperatur, men eftersom temperaturen som mest sjunker $20 \text{ }^\circ\text{C}$ under torkfasen varierar inte densiteten, den specifika värmekapaciteten och förångningsentalpin mycket och därför påverkas inte modellen nämnvärt av denna förenkling. Mättnadstrycket för vattnet, P_{sat} , antogs

förändras linjärt med temperaturen. Anledningen till att mätnadstrycket inte antogs vara konstant var för att det påverkade mängden vatten som torkas för mycket. Men att anta att mätnadstrycket förändras linjärt med temperaturen är också en förenkling. Denna förenkling har dock en relativt liten påverkan på resultatet eftersom felet som uppkommer med denna förenkling är ytterst liten.

Ett antagande som har större betydelse på modellen är antagandet att temperaturen på luften ut ur diskmaskinen är samma som temperaturen inuti diskmaskinen. Ibland är detta ett bra antagande eftersom dessa temperaturer är nästan lika stora under hela, eller stora delar av torkfasen, se figur 15. Men i vissa försök är skillnaden mellan temperaturen ut ur diskmaskinen och temperaturen inuti stor, se figur 16. Anledningen till att dessa temperaturer ibland är så olika kan vara för att diskmaskinens in- och utlopp är så nära varandra, utloppet är nästan precis över inloppet. Den kylda luften som kommer in i diskmaskinen kan därför föras ut ur diskmaskinen nästan direkt efter att den kommit in. Det hade varit bättre om in- och utloppet hade varit på varsin sida av diskmaskinen så att luften som kommer in måste färdas genom hela diskmaskinen innan den förs ut igen. Då hade temperaturen inuti diskmaskinen varit mer jämn och lufttemperaturen ut ur diskmaskinen hade varit mer lik den som är inuti. Eftersom temperaturen på luften ut ur diskmaskinen i modellen var högre än vad den var i försöken blev energiförlusten och mängden torkat vatten i modellen större än vad de var i försöken. Betydelsen på denna skillnad är olika mellan olika modeller eftersom lufttemperaturen ut ur diskmaskinen i vissa försök var ungefär lika hög som temperaturen inuti diskmaskinen, medan i vissa försök var skillnaden relativt stor, ibland upp till ca 20°C. Hade in- och utloppet placerats längre ifrån varandra hade det inte bara påverkat skillnaden mellan temperaturen ut ur diskmaskinen och temperaturen inuti, det hade också påverkat torkresultatet. Om den kylda luften som kommer in i diskmaskinen måste färdas längre genom diskmaskinen innan den når utloppet kommer den att värmas upp mer och då kunna bära mer fukt ut ur diskmaskinen och därmed torka disken bättre.

Om man skulle göra om detta arbete skulle man inte antagit att hela diskmaskinen hade samma temperatur eftersom detta hade en stor betydelse på resultatet. När Persson (2006) jämförde den procentuella skillnaden mellan beräknade och uppmätta energin var det aldrig över 5 %. I detta arbete var skillnaderna för det mesta över 5 %, ofta över 10 %, vilket tydligt visar att antagandet att hela diskmaskinen hade samma temperatur inte var korrekt.

5 Slutsats

Arbetet visade att torkning av disk i en diskmaskin fungerar bättre när torkningen sker med hjälp av ett luftflöde genom en luftspalt med en kall yta, jämfört med när luften förs ut ur diskmaskinen och ny luft förs in från rummet där diskmaskinen

står. Det bästa resultatet erhålls vid höga starttemperaturer på luften inuti diskmaskinen och höga luftflöden. 6 mm spaltbredd gav bättre resultat än 3 mm spaltbredd.

Det är möjligt att använda en matematisk modell för att simulera en torkprocess hos en diskmaskin. Dock måste alla förenklingar och antagningar stämma bra överens med verkligheten. Mängden vatten som beräknas avdunsta i modellen stämmer överens med resultaten från torksytningen, hög starttemperatur, luftflöden och spaltbredd ger upphov till att mer vatten avdunstar inuti diskmaskinen.

Energien som beräknades användas för att värma upp diskmaskinen var mellan 0,5 MJ och 2,6 MJ.

Trots att försök med starttemperaturen 70°C gav bäst resultat och att torkningen enligt modellen var mest energieffektiv då starttemperaturen var 70 °C rekommenderas en torkprocess med en starttemperatur på 60°C. Torkresultatet blev bara marginellt bättre i försöken med 60°C än de med 70°C. Att använda en starttemperatur på 60°C istället för 70°C skulle minska på diskmaskinens energiförbrukning med 0,5 MJ.

6 Referenser

- Carlsson-Kanyama, A. & Lindén, A. (2002). *Hushållens energianvändning. Värderingar, beteenden, livsstilar och teknik. En litteraturöversikt.Fms-report*, 176.
- Cengel, Y.A. & Ghajar, A.J. (2010). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education.
- De Paepe, M., Theuns, E., Lenaers, S. & Van Loon, J. (2003). *Heat recovery system for dishwashers*. Elsevier Ltd.
- Energimyndigheten (2013). *Energimärkning guidar till grönare val*. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/hushall/Din-ovriga-energianvandning-i-hemmet/Energimarkning/> [2013-04-17].
- Han, J., Chang-Sic Choi, Wan-Ki Park & Lee, I. (2011). *Green home energy management system through comparison of energy usage between the same kinds of home appliances*. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Hauer, A. (2011). *Open adsorption system for an energy efficient dishwasher*. P.O. Box 101161, Weinheim, D-69451, Germany: Wiley-VCH Verlag.
- Hoak, D.E., Parker, D.S., Hermelink, A.H. & Center, F.S.E. (2008). How Energy Efficient are Modern Dishwashers? *Florida Solar Energy Center.Augus*.
- Kelly, G. (2012). *Sustainability at home: Policy measures for energy-efficient appliances*. Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, United Kingdom: Elsevier Ltd.
- Linga, A. & Sai, P.S.T. (2010). Studies on drying kinetics of solids in a rotary dryer. In *2010 3rd International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies, Theory and Applications, ThETA3 2010, December 19, 2010 - December 22*. Cairo, Egypt: IEEE Computer Society. 389.
- Minde, M. Validation of Dishwasher CFD Model Using PIV.
- Mujumdar, A.S. (1995). *Handbook of industrial drying*. Marcel Dekker Inc.
- Persson, T. (2007). *Dishwasher and washing machine heated by a hot water circulation loop*. Elsevier Ltd.
- Tompros, S., Mouratidis, N., Draaijer, M., Foglar, A. & Hrasnica, H. (2009). *Enabling applicability of energy saving applications on the appliances of the home environment*. USA: IEEE.
- Warfvinge, C. & Dahlblom, M. (2010). *Projektering av VVS-installationer*. Studentlitteratur.

Young, D. (2008). *When do energy-efficient appliances generate energy savings? Some evidence from Canada*. UK: Elsevier Science Ltd.