



Avdelningen för energi-, miljö- och byggt teknik

Energieffektiv torkning av kläder

- en studie av torktumlare med varm- respektive kallvattenanslutning

Improving the energy efficiency of residential clothes dryers

- A study of heating and condensing tumble dryers with hot and cold water

Omar Ayedi

Examensarbete (22,5 hp) - Energi- och miljöingenjörsprogrammet

Abstract

Tumble dryers and drying cabinets have to a large extent replaced the traditional way of drying clothes outdoors. They are faster, more convenient, require less space and can be operated regardless of weather conditions. This replacement has significantly increased residential energy consumption, due to the fact that tumbles dryers consume large amounts of electrical energy. In the USA 9 % of the households electric energy is consumed when drying clothes. Over 4 million tumble dryers are sold in Europe each year and 20 % of the residential electricity consumption in Sweden is used drying and washing clothes. Tumble dryers are also utilized in the industrial sector, but industrial dryers are not considered in this study.

Increasing energy costs contributes to the public's awareness and desire to cut their energy consumption. The aim of this study is to increase the energy efficiency and drastically reduce electric power use of tumble dryers.

There are two main types of tumble dryers available on the market; the open cycle tumble dryer and the closed cycle tumble dryer. The open cycle tumble dryer is often attached to the ventilation system and thereby it evacuates its exhaust air. The closed cycle tumble dryer condenses the water from the air before it recirculates it.

To increase the energy efficiency and reduce electric power use of tumble dryers, two separate studies were made. One on a water cooled closed cycle tumble dryer and one on a hot water heated open cycle tumble dryer. Both tumble dryers where rebuild and originated from the same tumble dryer. The tumble dryer that both studies originated from was a conventional air cooled closed cycle tumble dryer. The tumble dryer is made by Asko Cylinda AB.

The results reveal that the water cooled closed cycle tumble dryer does not have greater energy efficiency than the conventional air cooled closed cycle tumble dryer. However the drying time was reduced by 37 %.

The result also reveals that the hot water heated open cycle tumble dryer cuts the electric consumption by 93 % and improves the energy efficiency by 53 % compared to the conventional air cooled closed cycle tumble dryer. On the other hand the drying time increases by 9 %.

Sammanfattning

Torktumlare och torkskåp har i stor utsträckning ersatt tvättlinan som metod att torka kläder. De är snabbare, bekvämare, tar mindre plats och kan nyttjas oberoende av väderlek. Då torktumlare förbrukar mycket el har denna omställning medfört att hushållens energiförbrukning ökat. I USA används 9 % av hushållens elenergi i syfte att torka kläder, i Europa säljs årligen över 4 miljoner torktumlare och i Sverige står hanteringen av tvätt för cirka 20 % av hushållens totala elförbrukning. Även inom industrin används torktumlare, men den typen av tumlare behandlas inte i detta arbete.

När elpriserna stiger ökar även kundernas medvetenhet och vilja att reducera sin förbrukning av el. Målet med detta examensarbete är att förbättra energieffektiviteten och minska elförbrukningen markant för torktumlare.

På marknaden finns två typer av torktumlare; frånluftstumlare och kondensstumlare. En frånluftstumlare ansluts till ventilationen och all fukt och värme evakueras. En kondensstumlare kondenserar vatten från luften efter att den lämnat trumman, därefter recirkuleras luften tillbaka in i trumman.

För att förbättra energieffektiviteten och minska elförbrukningen utfördes laborationsförsök på en vattenkyld kondensstumlare och en varmvattenuppvärmd frånluftstumlare. Båda tumlarna är ombyggda versioner av en konventionell luftkyld kondensstumlare från Askö Cylinda AB.

Resultatet visar att den vattenkylda kondensstumlaren inte har bättre energieffektivitet jämfört med den luftkylda. Den har emellertid 37 % kortare torktid.

I den varmvattenuppvärmda frånluftstumlaren reduceras elförbrukningen med nästan 93 % och energieffektiviteten förbättras med 53 %, jämfört med den luftkylda kondensstumlaren. Torktiden blir dock 9 % längre.

Innehåll

Abstract	2
Sammanfattning	3
Inledning	5
Teori.....	8
Material och metod.....	13
Resultat och diskussion	17
Slutsatser	22
Tackord.....	22
Referenser	23

Inledning

Torktumlare och torkskåp har i stor utsträckning ersatt tvättlinan som metod att torka kläder. De är snabbare, bekvämare, tar mindre plats och kan nyttjas oberoende av väderlek. Då torktumlare förbrukar mycket el har denna omställning medfört att hushållens energiförbrukning ökat. Idag står hanteringen av tvätt i Sverige för cirka 20 % av hushållens totala elförbrukning, vilket motsvarar 600-1500 kWh per hushåll, Stawreberg *et al.* (2009). När elpriserna stiger ökar även kundernas medvetenhet och vilja att reducera sin förbrukning av el.

I USA används 16 % av hushållens gas och 9% av elenergin i syfte att torka kläder, Han & Deng (2003). Torktumlare används i stor utsträckning i enfamiljshus och flerfamiljshus. Även inom industrin används torktumlare, men den typen av tumlare behandlas inte i detta arbete.

I Europa säljs årligen över 4 miljoner torktumlare, Brunzell (2006). För att hjälpa konsumenterna har ett europeiskt energiklassningssystem tagits fram.¹ I ett standardtest mäts den elförbrukning som krävs för att torka 6 kg bomull med 70 %-ig fukthalt, Energimyndigheten (2005). Torktummlaren betygsätts sedan på en skala mellan A och G där kravet för A-klassning innebär en elförbrukning under 0.55 kWh/kg torr bomull, B-betyg ges till en tumlare med en förbrukning mellan 0.55-0.64 kWh/kg torr bomull och ett C tilldelas tumlare mellan 0.64-0.73 kWh/kg torr bomull, Energimyndigheten (2005). En restfukthalt på ± 5 % tillåts. Energiklass C är vanligast, men fler och fler tumlare klassas numera med B. Det finns någon enstaka modell i klass A, men den är betydligt dyrare eftersom den är utrustad med värmepump, Energimyndigheten (2009).

På marknaden finns två typer av torktumlare; *frånluftstumlare* och *kondenstumlare*. En frånluftstumlare ansluts till ventilationen och all fukt och värme evakueras. Frånluftstumlaren används då värme och fukt måste evakueras ur rummet t.ex. från tvättstugan i ett flerfamiljshus. En kondenstumlare kondenserar vatten från luften efter att den lämnat trumman, därefter recirkuleras luften tillbaka in i trumman. Kondenstumlaren behöver därför inte kopplas till ventilationen. Kondensvattnet från kondenstumlaren lagras i en tömbar tank såttillvida maskinen inte ansluts till ett avlopp. Kondenstumlare kan med fördel användas när värmen från tummlaren kommer fastigheten tillgodo, t. ex. i ett enfamiljshus.

Sedan 70-talet, då Kionka (1973) och Rüter *et al.* (1978) inledde studier för att minska energianvändningen på torktumlare, har forskningen inom området tilltagit, särskilt under de senaste 10 åren.

¹ I USA, Kanada och Australien finns liknande energiklassningssystem.

I en studie av Bassilly & Colver (2003) undersöks en frånluftstumlare med målet att minska elförbrukningen. I studien varieras parametrarna; eltillskott, fläkthastighet, trumhastighet, last samt fukttinhåll, och torktid, elkonsumtion och läckage noteras. Följande slutstats presenteras: Genom att minska luftläckaget in i trumman och att optimera hastigheten av både trumman och fläkten samt effekten hos värmeelementet för den specifika lasten, minskar energiförbrukningen. Bassilly & Colver rekommenderar även en förlängd centrifugering i tvättmaskinen. Detta sänker fukttinhållet hos lasten, vilket medför en lägre energiförbrukning hos tumlaren. Även Beiron & Brunzell (2005) sänker i en studie effekten i värmebatteriet i tumlaren med lägre elkonsumtion som resultat. Torktiden blir dock längre.

Som tidigare nämnts recirkulerar kondensumlare 100 % av luften som lämnar trumman, medan frånluftstumlaren inte recirkulerar alls. En del försök har dock gjorts där delar av luften från frånluftstumlaren recirkuleras i syfte att spara energi. Deans (2001), Conde (1997) och Lambert *et al.* (1991) har alla studerat detta med delvis olika resultat.

Deans (2001) studerar en frånluftstumlare med hjälp av praktiska försök som sedan valideras i ett modelleringsprogram. Han kommer med hjälp av sina försök fram till att frånluftstemperaturen är för låg för att kunna recirkuleras med lägre energiförbrukning som följd. Däremot kommer han fram till att lufttemperaturen i rummet och luftens relativa fuktighet har stor betydelse för hur stor energiförbrukningen blir. Dessutom visar modelleringen att ett högre energitillskott till värmebatteriet ger både en förkortad torktid samt en lägre energiförbrukning.

Conde (1997) menar i sin studie att energiförbrukningen inte minskar genom att recirkulera frånluften. Tvärtom menar han att förbrukningen ökar. Emellertid visar hans studie att installationen av värmeväxlare i tumlaren där frånluften växlas mot tilluften, ger en lägre energiförbrukning. Även Bansal *et al.* (2001) presenterar en studie som visar att värmeväxlare minskar energiförbrukningen. I studien utvecklas en simulationsmodell för både frånluftstumlare och kondensumlare. De kommer fram till att en värmeväxlar-utrustad frånluftstumlare är 14 % effektivare än en standardmodell. Kondensumlaren med samma utrustning blir 7 % effektivare än standardmodellen. När Bansal *et al.* (2001) sedan jämför standardmodellerna av frånluftstumlare och kondensumlare visar det sig att frånluftstumlaren är 7 % effektivare.

Lambert *et al.* (1991) har, i en studie baserat på ett modelleringsverktyg, kommit fram till att en 75 %-ig recirkulation av frånluften är optimalt i energisparande syfte.

Ett annat sätt att minska energiförbrukningen för både frånlufts- och kondensumlare är att minimera luftläckaget. Berghel *et al.* (2003) som studerat en kondensumlare såg att energiförbrukningen kunde minskas med upp till 9 % genom att täta ytterhöljet hos tumlaren.

Integreringen av värmepumpar i tumlare är också ett område där forskning bedrivs. Hekmat & Fisk (1984), jämför en frånluftstumlare med en tumlare med integrerad värmepump.

Resultatet visar en 33 %-ig förbättring av energieffektiviteten, men en längre torktid krävs. I en studie av Braun *et al.* (2002) där en konventionell frånluftstumlare jämförs med en kondensumlare med integrerad värmepump, visade det sig att en upp till 40 %-ig förbättring kunde uppnås. En konventionell kondensumlare är dock mindre effektiv än en frånluftstumlare enligt slutsatser från den genomgånga forskningen.

Målet med detta examensarbete är att förbättra energieffektiviteten och minska elförbrukningen markant hos både en frånluftstumlare och en kondensumlare.

För att lättare kunna jämföra resultaten med andra torktumlare kommer nyckeltal att presenteras.

Teori

I torktumlare används rumsluften som torkmedium. När luften förs in i torktumlarens trumma transporteras fukt, i form av vattenånga, från kläderna till luften. Vattnet transporteras genom antingen *förångning* eller *avdunstning*. För att förångning ska ske måste fukten i kläderna nå kokpunkten. Den lufttorkning som sker i torktumlaren sker med hjälp av avdunstning, Mujumdar & Menon (1995). Detta innebär att luftens fuktinnehåll ökar. Hur mycket vattenånga luften kan innehålla beror på gasblandningens tryck och temperatur. Hastigheten för avdunstningen mellan kläderna och luften beror i sin tur på hur stor skillnaden är mellan luften respektive klädernas temperatur och fuktighet. Luftfuktighet kan beskrivas som *relativ fuktighet* och *specifik fuktighet*. Specifik luftfuktighet, x , är mängden vatten i luften och kan beskrivas som

$$x = \frac{m_v}{m_l}, \quad (1)$$

där m_v är vattenångans massa och m_l är luftens torrsvikt.

Den relativa fuktigheten, ϕ , definieras som kvoten mellan vattenångans partialtryck i luften, p_v , och vattenångans mättnadstryck i luften vid samma temperatur, p_v^0 , enligt

$$\phi = \frac{p_v}{p_v^0}. \quad (2)$$

Ju lägre den relativa fuktigheten hos luften som strömmar in i torktumlaren och över kläderna är, desto mer vattenånga kan föras från kläderna till luften. Om temperaturen hos luften höjs, sjunker den relativa fuktigheten. Fukthalten i luften kan också sänkas innan luften värms. Detta sker i en kondensumlare genom att vatten kondenseras innan luften värms.

Entalpin för torr luft, i_l , kan härledas ur luftens specifika värmekapacitet, c_{pl} . Vid temperaturen T , för torr luft kan entalpin uttryckas som

$$i_l = c_{pl}T. \quad (3)$$

För att uttrycka den totala entalpin för fuktig luft, i , summeras entalpin för torr luft (ekvation (3)) med entalpin för vattenångan i luften, enligt

$$i = c_{pl}T + x(c_{pv}T + i_{fg0^\circ\text{C}}). \quad (4)$$

Referenstemperaturen är 0°C , vilket ger förångingsentalpin, $i_{fg0^\circ\text{C}}$, 2501.3 kJ/kg . Enligt ekvation (1) anger x luftens specifika fuktighet.

Torkprocessen hos en torktuvmare kan ritas in i ett entalpi/fuktighetsdiagram. Diagrammet visar relationen mellan temperatur, entalpi, specifik och relativ fuktighet. Figur 1 visar den ideala cykeln för luft hos en kondensstumlare.

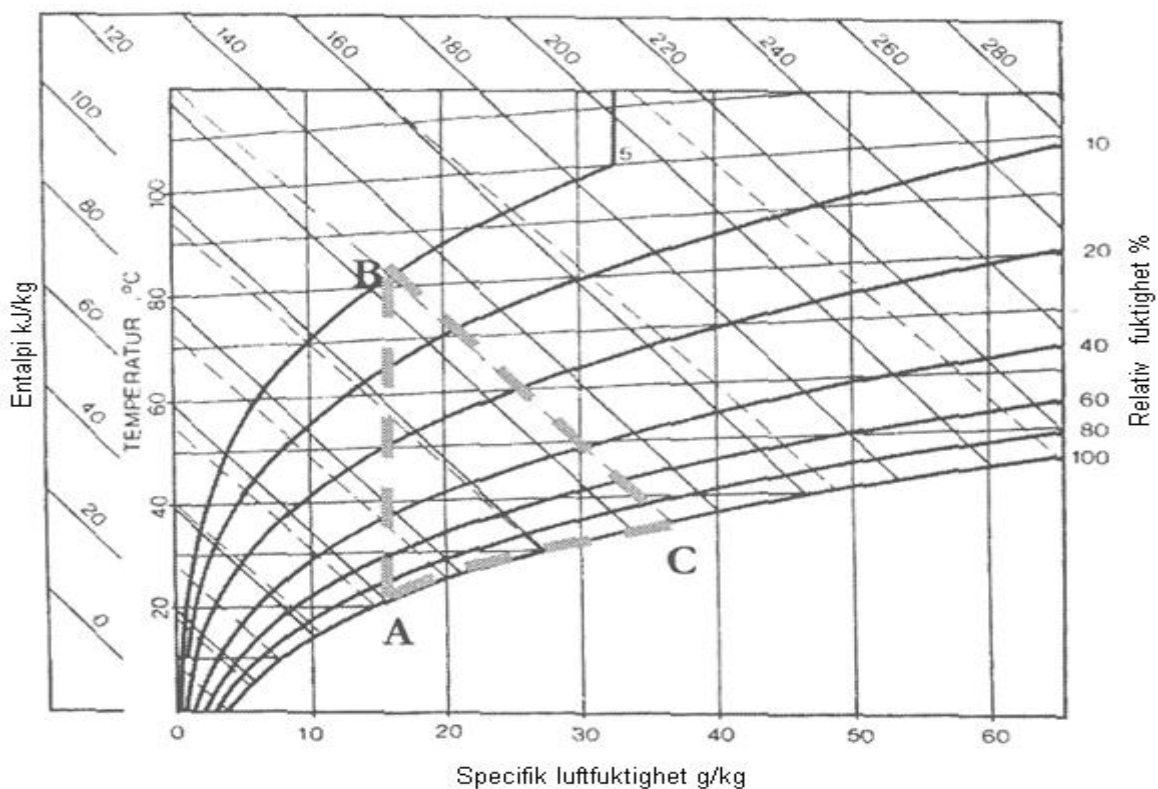


Fig 1. Ideal cykel för kondensstumlare inritat i ett entalpi/fuktighetsdiagram. Källa, Brunzell (2006)

Värmning av luften sker mellan A och B, vilket samtidigt sänker den relativa fuktigheten hos luften, den specifika luftfuktigheten förblir konstant. Vid B möter luften fuktiga kläder och befuktas. Detta sker genom en isentapisk process, dvs. att entalpin förblir konstant. Temperaturen sjunker tills luften når 100 % relativ fuktighet. Mellan C och A förs luften till kondensorn och fukten kondenseras ur luften. Den relativa fuktigheten förblir 100 % under hela kondenseringssteget. För frånluftstumlaren ser cykeln likadan ut förutom att steget mellan C och A saknas.

För en större masstransport bör B-C steget förlängas. Detta kan göras genom att öka effekten hos kondensorn så att C-A steget blir längre och genom att höja temperaturen och förlänga A-B steget.

Energitransporten mellan en solid och fluid kallas konvektion och beskrivs som

$$\frac{dQ}{dt} = \bar{h}A(T_l - T_y) \quad (5)$$

där dQ/dt är effekten, \bar{h} [W/m²K] är medelkonvektionskoefficienten för hela ytan, A , T_y är materialets ytemperatur och T_l luftens temperatur.

Antalet mol vattenånga per tidsenhet som lämnar kläderna, dN_v/dt [kmol/s], beskrivs genom följande samband

$$\frac{dN_v}{dt} = \bar{h}_m A (C_{v,l} - C_{v,o}) \quad (6)$$

där \bar{h}_m [m/s] är medelmasstransportskoefficienten för hela ytan. $C_{v,l}$, [kmol/m³], är luftens molkoncentration av vattenånga och $C_{v,o}$, [kmol/m³] är vattenkoncentrationen vid ytan.

Medelkonvektionkoefficienterna, \bar{h} , och medelmasstransportskoefficienten, \bar{h}_m , beror i sin tur på klädtyornas geometri och hur luftflödet ser ut. \bar{h} kan härledas ur följande samband

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k_l} \quad (7)$$

där k_l är värmekonduktiviteten för luft och L är den karakteristiska längden hos kläderna. \bar{Nu} är kvoten mellan värmetransporten som beror på konvektion, och värmetransporten som beror på konduktion, i gränsskiktet mellan luft och kläder. \bar{Nu} -talet är en funktion av Reynold-talet och Prantl-talet. Re-talet avgör om luftflödet över kläderna är turbulent, transient eller laminärt. Prantl-talet visar relationen mellan tjockleken av värme och hastighetsgränsskikten, för luft är prantl-talet 0.7, Brunzell (2006).

För att bestämma medelmasstransportskoefficienten, \bar{h}_m , används medelSherwoodtalet, \bar{Sh} ,

$$\bar{Sh} = \frac{\bar{h}_m L}{D_{ls}}. \quad (8)$$

D_{ls} är medeldiffusionskoefficienten. \bar{Sh} är en funktion av Reynoldstalet och Schmidttalet, som visar relationen koncentrations- och hastighetsgränsskiktet. Bassily & Colver (2003) har i sin studie empiriskt tagit fram Sherwoodtal för torktumlare.

Vid ytan av kläderna i torktumlaren överförs värme från luften till kläderna. Samtidigt sker en masstransport från klädernas yta till luften. Masstransporten vid torkning av kläder beror på tre faktorer, Haghi (2006):

- Masstransporten inom klädernas fibrer
- Masstransporten från klädernas yta till luften
- Hur kläderna absorberar vatten

Biottalet för masstransport används för att avgöra om torkprocessen kontrolleras av masstransporten *inom* klädernas fibrer eller av masstransporten *från* klädernas yta till luften. Biottalet, Bi_m , definieras som

$$Bi_m = \frac{h_m L}{D_{ly}} \quad (9)$$

där h_m är masstransportsvärmeövergångstalet, L är halva tjockleken av materialet och D_{ly} är materialets diffusionskoefficient.

Om Biot-talet < 0.1 är både energi och masstransporten inom klädernas fibrer försumbart, eftersom motståndet *inom* materialet är mycket mindre än motståndet *genom* gränsskiktet vid ytan. Vid detta tillstånd kontrolleras energi och masstransport i torkprocessen av hur mycket luften förmår att ta upp, Brunzell (2006).

Torkprocessen i en torktumlare kan delas upp i olika perioder. Mellan dessa perioder varierar hastigheten för energi och masstransporten från kläderna till luften. Genom att mäta temperaturen på luften som lämnar trumman, kan perioderna följas, se figur 2.

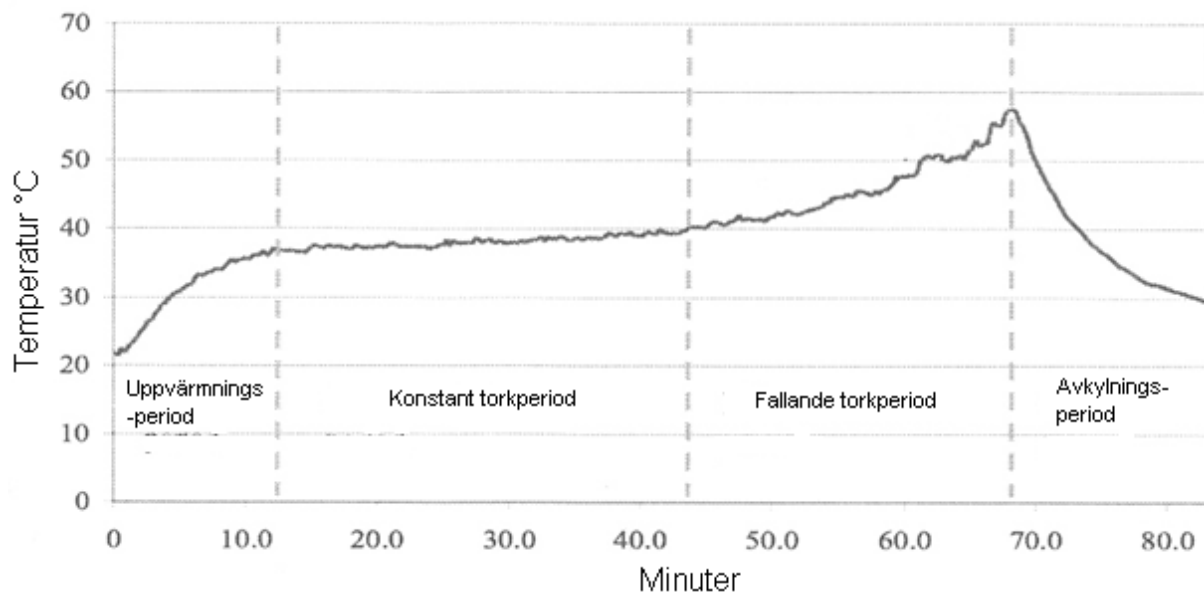


Fig. 2 Figuren visar temperaturen på luften som lämnar trumman under en torkprocess för en torktumlare med torkprocessens olika perioder utmärkta, Brunzell (2006).

Under första perioden, uppvärmningsperioden, värms kläderna i tumlaren upp. Eftersom energitillförseln till torktummlaren är konstant kommer temperaturen tillslut att nå en balanstemperatur. Detta inleder den konstanta torkperioden. I den konstanta torkperioden avlägsnas obunden fukt från kläderna. Klädernas hela yta är här täckt med vatten. Klädernas temperatur håller sig jämn och nära luftens våta temperatur. I denna period är Biottalet < 0.1 och det är luftens förmåga att ta upp fukt som styr torkhastigheten, Brunzell (2006). När lufttemperaturen sedan stiger övergår torkprocessen till den fallande torkperioden. I den fallande torkperioden avtar förångningshastigheten. Samtidigt som temperaturen stiger börjar vatten röra sig inifrån kläderna mot ytan. I samband med det kan torra fläckar ses på ytan av kläderna. När allt vatten avlägsnat sig från ytan blir Biottalet > 0.1 . Detta resulterar i att luftens förmåga att ta upp fukt inte längre styr torkhastigheten. Istället är det energi och masstransporten inom klädernas fibrer som kontrollerar torkhastigheten, Bejan *et al.* (2004). Slutligen inleds avkylningsperioden, där energitillförseln till tumlaren avbryts med målet att klädernas temperatur ska närma sig rumsluften.

Material och metod

Laborationsförsöken utfördes under perioden, 1/3- 1/5 2008, i laborationssalarna på avdelningen för energi, miljö- och byggt teknik vid Karlstads universitet. Försöken bestod av två försöksserier; *försöksserie 1* och *försöksserie 2*. Försöksserie 1 utfördes på en vattenkyld kondensumtlare och försöksserie 2 utfördes på en varmvattenuppvärmd frånluftstumtlare. Samma försöksmatris användes i båda försöksserierna.

Både försöksserie 1 och 2 har samma torktumtlare som utgångspunkt; en C-klassad² kondensumtlare av modell T 303c tillverkad av Asko Cylinda AB. Torktumtlaren är optimerad för 6 kg bomull. Torktumtlaren består i *originalutförande* av följande huvudkomponenter: en roterande trumma, internluftsfläkt, externluftsfläkt, luftkyld kondensator, ett eldrivet värmebatteri och en kondensvattenbehållare, se figur 3.

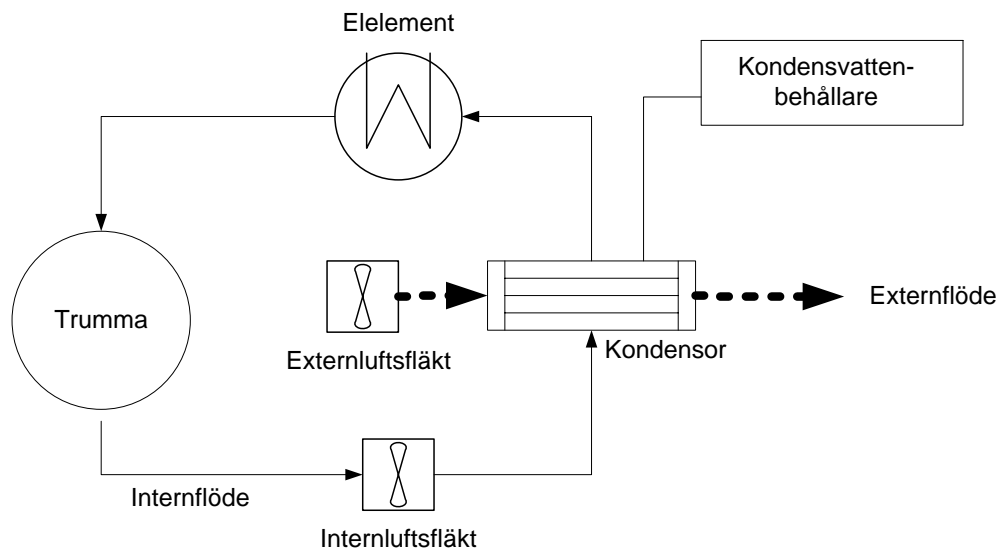


Fig. 3 Figuren visar en schematisk beskrivning av den luftkylda kondensumtlaren i originalutförande. Tumlaren är tillverkad av Asko Cylinda AB, modell T 303c.

Inför försöksserie 1 byggdes torktumtlaren om till en kondensumtlare med vattenkyld kondensator. Detta gjordes genom att byta ut tumlarens luft/luftkondensator mot en tvärströms luft/vattenvärmeväxlare bestående av aluminiumrör och flänsar. Värmeväxlaren hade arean 0.35 m² och flänsavsåndet 3 mm. Torktumtlaren består nu av följande huvudkomponenter: en roterande trumma, internluftsfläkt, vattenkyld kondensator, ett eldrivet värmebatteri och en kondensvattenbehållare, se figur 4.

² Torktumtlaren är C-klassad enligt det europeiska energiklassningssystemet.

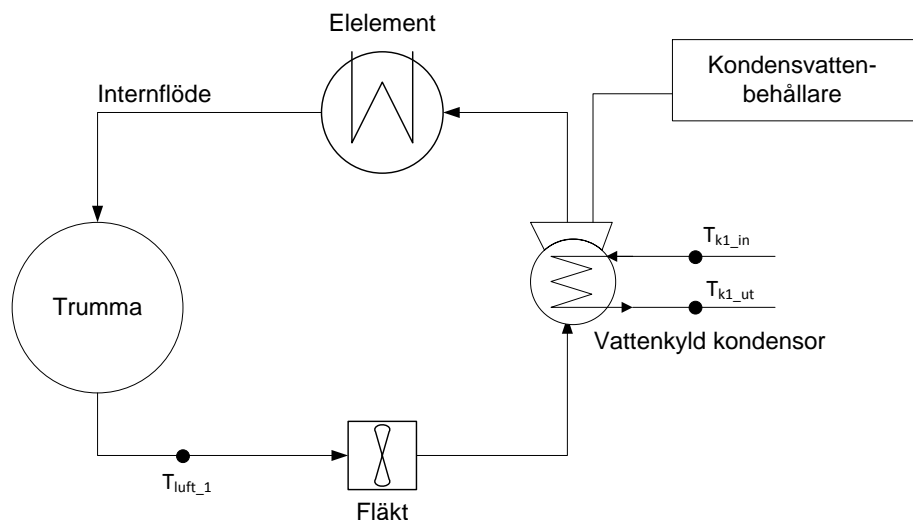


Fig. 4 Figuren visar en schematisk beskrivning av den vattenkylda kondensstumlaren som användes vid försöksserie 1. Punkterna representerar mätpunkter för temperatur.

Torktumlarens vattenvärmeväxlare kopplades till det kommunala kallvattensystemet. Kallvattenflödet genom värmeväxlaren var 28 g/s, flödet mättes med stoppur och hink. Kallvattentemperaturerna T_{k1_in} , T_{k1_ut} och lufttemperaturen efter trumman T_{luft_1} mättes och loggades varje sekund i datorprogrammet Labview[®]. T_{k1_in} varierade mellan 13 och 15 °C. Elmotorn som driver fläkt och trumma har effekten 145W och elementet har effekten 2500W. Elementet styrs med on-off reglering. Elförbrukningen under försöken mättes med en elmätare av märket Etech TM 300[®].

Inför försöksserie 2 byggdes torktumlaren som användes i försöksserie 1 om; nu till en varmvattenuppvärmd frånluftstumlare. Detta gjordes genom att addera ännu en tvärströms luft/vattenvärmeväxlare på ett avstånd av 10 cm från den befintliga. Den sammanlagda värmeväxlararean blev nu 0,7 m² med flänsavsåndet 3 mm. Dessutom blockerades luftkanalen mellan fläkten och värmebatteriet. Därefter tillverkades tillufts- och frånluftshål på varsin sida av blockeringen. Hålen ligger med 15 cm mellanrum. Vinkeln mellan hålen sett utifrån torktumlaren är 270°. Torktumlaren består nu av följande huvudkomponenter: en roterande trumma, en fläkt och två värmeväxlare med varmvattengenomströmning, se figur 5.

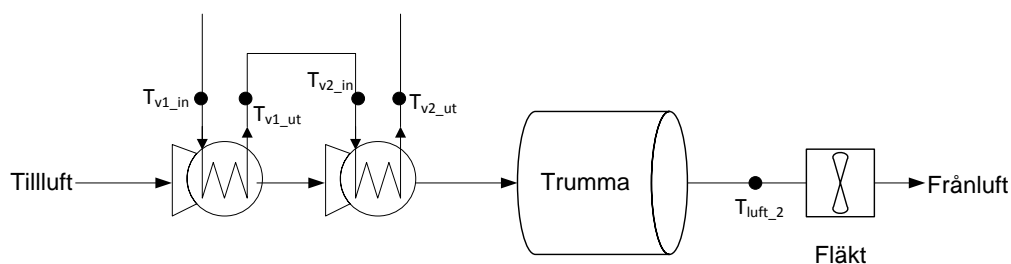


Fig. 5 Figuren visar en schematisk beskrivning av den varmvattenuppvärmda frånluftstumlaren som användes vid försöksserie 2. Punkterna representerar mätpunkter för temperatur.

Torktumlarens vattenvärmeväxlare tog vatten från det kommunala varmvattensystemet som först leddes genom en vattenpanna utrustad med elpatron. Elpatronen har en effekt på 9 kW. Varmvattenflödet genom de två värmeväxlarna var mellan 28-32 g/s och flödet mättes med stoppur och hink. Varmvattentemperaturerna T_{v1_in} , T_{v1_ut} , T_{v2_in} , T_{v2_ut} och lufttemperaturen efter trumman T_{luft_2} mättes och loggades varje sekund i datorprogrammet Labview[®]. T_{v1_in} varierade mellan 78 - 87 °C och T_{v2_in} varierade mellan 72 - 80 °C. Elmotorn som driver fläkt och trumma har effekten 145W. Elförbrukningen under försöken mättes med elmätare av märket Etech TM 300[®].

Hur värmeväxlarna integrerades i torktumlaren inför försöksserie 2 visas i bild 1. I försöksserie 1 såg installationen ut på samma sätt, men utan från- och tilluftshål samt endast med en värmeväxlare.



Bild 1 visar hur värmeväxlarna integrerades i torktumlaren inför försöksserie 2. Pilarna visar mätpunkter för varmvattentemperaturer och från- och tilluftsvägar.

För att försöksserierna skulle bli jämförbara gjordes först tre inledande försök. Målet med försöken var att fastställa temperaturen på luften som lämnar trumman, när kläderna blivit torra. Vid dessa temperaturer stoppades försöken. Temperaturerna fastställdes till 60°C för försöksserie 1 och 55°C för försöksserie 2.

Före varje försök kördes torktummlaren för att luftkanalerna skulle bli fuktiga och försöken likvärdiga. Den kördes med 3 kg blöt tvätt i 15 min. Därefter fick tummlaren kylas tills den nått rumstemperatur.

Försöksmatrisen som kördes i försöksserie 1 och 2 visas i tabell 1.

Tabell 1 visar försöksmatrisen som kördes i försöksserie 1 och 2.

Försök	Torrsvikt	Antal försök
Bomull	6.0 kg	3
Bomull	2.9 kg	3
Syntet	2.6 kg	3

Försöken inleddes med att den torra tvätten vägdes på en digitalvåg med en felmarginal på ± 10 g. Därefter kördes tvätten i en tvättmaskin på sköljprogram för att sedan centrifugeras med 1200 rpm tills den nått en fukthalt på 70 % för bomull respektive 33 % för syntet. Fukthalten definieras som kvoten mellan det vatten som tillförts kläderna och klädernas torrsvikt. Torrsvikten definieras som den vikt kläderna har då de nått jämvikt med den omgivande rumsluften, med avseende på temperatur och fukthalt. För bomull med temperaturen 30 °C är jämviktsfukthalten 5.56 %, Brunzell (2006). Efter att tvätten centrifugerats mättes vattenflödet och tummlarens filter rengjordes. Därefter lastades torktummlaren. Datorloggningen och elenergimätningen nollställdes innan tummlaren startades. När lufttemperaturen nått 60°C i försöksserie 1 resp. 55°C i försöksserie 2 stoppades torktummlaren. Elförbrukningen noterades, och kondensvattnet (gäller försöksserie 1) vägdes.

Resultat och diskussion

I tabell 2 redovisas resultatet för varje försök i försöksserie 1.

Tabell 2 visar resultatet efter försöksserie 1.

Försök	Last	Elförbrukning	Kondensor	Förluster	Kondensoreffektivitet	Fukthalt vid start	Fukthalt vid slut	Torktid
	[kg]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%, kg/kg]	[%, kg/kg]	[%, kg/kg]	[Min]
1	6.0 kg Bomull	4.0	2.2	1.8	85	70	3.0	101
2	6.0 kg Bomull	4.1	2.2	1.9	88	71	3.3	104
3	6.0 kg Bomull	4.1	2.2	1.9	86	71	3.3	102
4	2.9 kg Bomull	2.0	1.1	0.9	88	69	3.4	50
5	2.9 kg Bomull	2.0	1.1	0.9	80	70	4.5	50
6	2.9 kg Bomull	2.1	1.1	1.0	87	71	3.4	53
7	2.6 kg Syntet	1.0	0.4	0.6	49	33	1.8	26
8	2.6 kg Syntet	1.0	0.4	0.6	54	33	1.9	25
9	2.6 kg Syntet	1.1	0.5	0.6	55	33	1.2	27

Förlusterna definieras som tillförd elenergi subtraherat med bortförd energi i kondensorn. Förlusterna beror på läckage samt värmeförluster från tumlaren till rummet. Förlusterna uppgår till ca 46 %. Förlusterna kan begränsas genom tätning och isolering av torktummlaren. Detta skulle då även medföra kortare torktid och lägre energiförbrukning, Berghel *et al.* (2003).

Kondensoreffektiviteten definieras som kvoten mellan condensatvikten och vikten för vattnet som tillförts kläderna före torkning. I försök 7-9 dvs. torkningen av syntet observerades att uppskattningsvis 2-3 dl vatten hade kondenserat och ansamlats i luftkanalen mellan trumman och kondensorn. Denna vattenmängd mättes aldrig och finns inte med i resultatet. Om den tas med i resultatet kommer kondensoreffektiviteten för synteslasterna att ligga på samma nivå som bomullslasterna.

En fördel med en vattenkyld kondenstumlare är att värmen från tumlaren ligger bunden i vattnet som lämnar trumman. Detta vatten kan i sin tur användas för att värma huset genom att kopplas till FTX-system, eller förvärma varmvattnet. En luftkyld kondenstumlare avger alltid sin värme till luften i rummet, vilket inte alltid är önskvärt, t.ex. på sommaren, då det kan ge upphov till ett kylbehov med högre energiförbrukning som följd.

Resultatet visar att förlusterna har samma proportion mot torktiden mellan samtliga försök. Klädernas fukthalt vid torktidens slut varierade endast med någon procent. Restfukthalterna ligger inom standarden för det europeiska energiklassningssystemet. Att de ligger på denna nivå, tyder på att avbrottstemperaturen 60°C var korrekt.

I tabell 3 redovisas resultatet för varje försök i försöksserie 2.

Tabell 3 visar resultatet efter försöksserie 2.

Försök	Last	El-förbrukning	Energi-förbrukning varmvatten	Total energiförbrukning	Fukthalt vid start	Fukthalt vid slut	Torktid
	[kg]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[%, kg/kg]	[%, kg/kg]	[min]
1	6.0 kg Bomull	0.30	2.5	2.8	70	-2	155
2	6.0 kg Bomull	0.29	2.5	2.79	70	1	148
3	6.0 kg Bomull	0.28	2.4	2.68	69	-1.3	154
4	2.9 kg Bomull	0.16	1.1	1.26	71	-3.3	94
5	2.9 kg Bomull	0.14	1.0	1.14	71	-1	84
6	2.9 kg Bomull	0.06	0.4	1.23	71	-0.3	80
7	2.6 kg Syntet	0.06	0.4	0.46	35	0.4	38
8	2.6 kg Syntet	0.06	0.5	0.56	34	0	35
9	2.6 kg Syntet	0.06	0.6	0.66	33	0.4	40

Den totala energiförbrukningen definieras som summan av tillförd elenergi och tillförd energi med hjälp av varmvatten. Klädernas fukthalt vid torktidens slut varierade endast med någon procent mellan försöken. I över hälften av försöken blev kläderna övertorkade. Att så blev fallet tyder på att 55 °C var en för hög avbrottstemperatur. En lägre temperatur skulle ha valts, vilket borde ha medfört både kortare torktid och lägre energiförbrukning.

I figur 6 kan medelförbrukningen av elenergi mellan lasterna och försöksserierna jämföras. Dessutom kan elförbrukningen vid torkning av 6.0 kg bomull i torktumlaren i originalutförande avläsas. Den maximala elförbrukningen för energiklass A, B och C i det europeiska energiklassningssystemet finns också angivet i figuren. Elenergiförbrukningen visas per kg torr last.

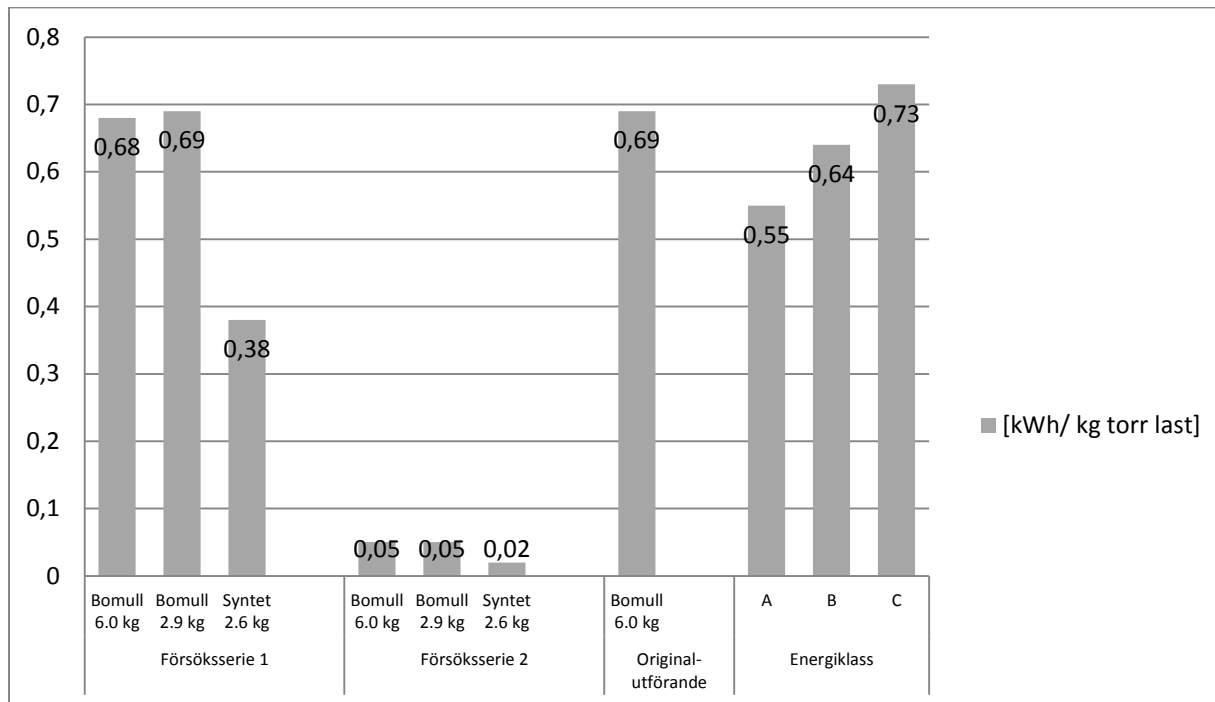


Fig.6 visar medelförbrukningen av elenergi per kg torr last i försöksserie 1 och 2. Figuren visar också elenergiförbrukningen för lasten 6.0 kg då torktumlaren var i originalutförande. Den maximala elförbrukningen för energiklass A, B och C kan avläsas.

Figur 6 visar att ombyggnaden från en luftkyld kondensumlare till en vattenkyld kondensumlare inte har någon tydlig inverkan på elförbrukningen för lasten 6.0 kg bomull.

Skillnaden i elförbrukning per kg torr last mellan bomullslasterna inom försöksserie 1 och 2 är mycket liten eller samma. Detta är ett oväntat resultat då torktumlaren är optimerad för 6 kg tvätt. Den förändrade lufttemperaturen i trumman kan ha påverkat energiförbrukningen mellan lasterna. Dessutom gör integreringen av värmeväxlare att luftflödet genom torktumlaren har förändrats.

I figur 6 syns att tumlaren som användes i försöksserie 1 skulle kategoriseras i energiklass C och tumlaren i försöksserie 2 i energiklass A. Att endast tillförd elenergi visas i samband med energiklassningen beror på att tillförd elenergi är den enda energiform som klassningen tar hänsyn till.

I figur 7 har energin som tillförts av varmvattnet i försöksserie 2 adderats. Figur 7 visar den totala förbrukningen av energi per kg torr last.

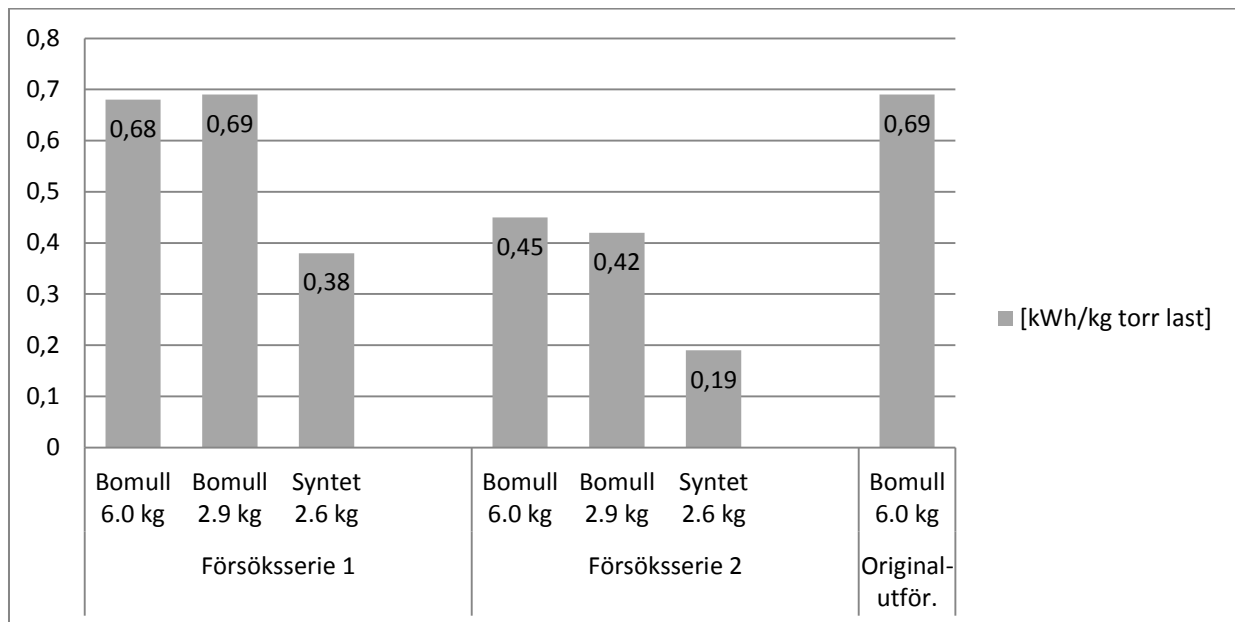


Fig.7 visar medelförbrukningen av energi per kg torr last i försöksserie 1 och 2 samt för 6.0 kg bomull för torktummlaren i originalutförande.

I figur 7 visar att energiförbrukningen i försöksserie 2 är över 50 % lägre än i försöksserie 1 och torktummlaren i originalutförande. Bortser man från att det endast är elenergi som tas hänsyn till i det europeiska energiklassningssystemet, och istället tar hänsyn till total tillförd energi till torktummlaren, klarar torktummlaren i försöksserie 2 ändå A-klassningen med en marginal på 22 %.

Resultatet att torktummlaren i försöksserie 2 förbrukar 50 % mindre energi än torktummlaren i originalutförande ter sig desto mer lockande i Sverige då den till största delen drivs av varmvatten. Varmvatten är en lägre kvalitativ energiform än el. I Sverige produceras ofta varmvatten i fjärrvärmeanläggningar i bioeldade mottrycks kraftverk. Detta medför enligt marginalesprincipen, Sköldberg *et al.* (2006), att användandet av mer varmvatten för med sig att mer elenergi baserad på biobränsle kan produceras, vilket slår ut kolkraft. Mottrycks kraftverk har både lägre verkningsgrad och miljöpåverkan jämfört med kolkraftverk. Det är viktigt att uppmärksamma det faktum att vattnet som lämnade torktummlaren i försöksserie 2 hade en temperatur på ca 70 °C. Detta vatten måste tas tillvara för att torktummlaren ska kunna ses som energieffektiv. T.ex. kan det återföras till fjärrvärmenätet eller utnyttjas för uppvärmning av fastigheten.

Energiförbrukningen hos tummlaren i försöksserie 2 har med stor sannolikhet påverkats av att tillufts- och frånluftshålen, av byggnadstekniska skäl, var placerade med 15 cm mellanrum. Detta bör ha medfört en viss recirkulation av frånluften. Då forskarna som presenterats i inledningen har skilda uppfattningar om nyttan med recirkulation och eftersom recirkulationen inte mätts kan inga slutsatser dras i frågan.

I figur 8 jämförs medeltorktiden mellan lasterna och försöksserierna 1 och 2 samt torktummlaren i originalutförande.

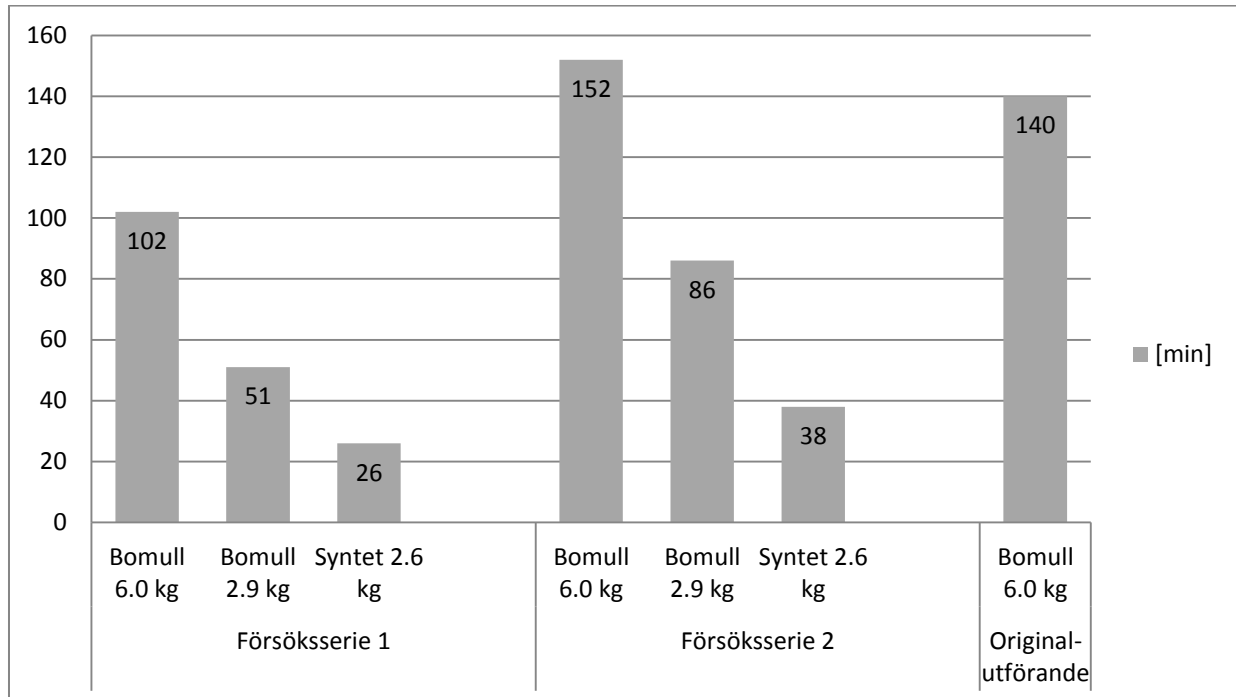


Fig.8 visar medeltorktiden per last i försöksserie 1 och 2 samt medeltorktiden för 6.0 kg bomull för torktummlaren i originalutförande.

Figur 8 visar att torktiden för 6.0 kg bomull är 37 % lägre i försöksserie 1 jämfört med torktummlaren i originalutförande. Detta trots att figur 7 visar att energiförbrukningen förblir på samma nivå som torktummlaren i originalutförande. Till största del beror detta på följande; dels har kondensorn i den vattenkylda kondensummlaren högre effekt än den luftkylda, vilket medför att den torkar med lägre temperatur. Detta i sin tur gör att värmeförlusterna blir mindre, både på grund av den lägre temperaturen i luften och för att torktiden blir kortare.

Torktiden i försöksserie 2 blir istället 9 % längre jämfört med torktummlaren i originalutförande. Det faktum att vattentemperaturen för värmning i försöksserie 2 var 78 - 87 °C gör att torktiden knappast kan förkortas i någon större utsträckning genom en högre vattentemperatur. Däremot kan en stor värmeväxlare installeras istället för två mindre. Fördelen skulle då vara att de ca 5 °C som temperaturen sjunker mellan värmeväxlarna bättre kan tas till vara istället för att värma rummet.

Det är få hushåll som har så hög varmvattentemperatur som den som användes i försöksserie 2. Därför kommer troligtvis torktiden att bli längre vid en installering av varmvattenuppvärmd torktummlare i privathushåll. Att torktiden blir längre har dock inte lika stor betydelse i privathushåll som i gemensam tvättstuga, där tvättiden är bergränsad. Varmvattentemperaturen får dock inte vara lägre än 50°C då en varmvattentemperatur under 50°C inte har någon positiv effekt på energiförbrukningen jämfört med en eluppvärmd torktummlare, Stawreberg (2009).

En applikation för varmvattenuppvärmda torktumlare skulle kunna vara tvättomater som är vanliga i USA, Asien och Australien. Där skulle en naturgaseldad panna, kopplad till samtliga torktumlare, lätt kunna leverera en vattentemperatur runt 90°C. Skillnaden i torktid per kg last mellan bomullslasterna är inom försöksserie 1 och 2 mycket liten.

För att lättare kunna jämföra resultaten med andra torktumlare presenteras i tabell 4 och 5 centrala nyckeltal för försöksserie 1 och 2.

Tabell 4 visar nyckeltal för försöksserie 1, värdena är medelvärden för varje last och visas per kg torr last.

Försöksserie 1			
	Bomull 6.0 kg	Bomull 2.9 kg	Syntet 2.6 kg
Tillförd elenergi	0.68 Kwh	0.69 Kwh	0.38 Kwh
Avgiven energi i kylbatteriet	2.2 Kwh	1.1 Kwh	0.4 Kwh
Värmeförluster	1.9 Kwh	0.9 Kwh	0.6 Kwh
Kondensoreffektivitet	86%	85%	53%

Tabell 5 visar nyckeltal för försöksserie 2, värdena är medelvärden för varje last och visas per kg torr last.

Försöksserie 2			
	Bomull 6.0 kg	Bomull 2.9 kg	Syntet 2.6 kg
Tillförd elenergi	0.05 Kwh	0.05 Kwh	0.02 Kwh
Energi till värmebatteriet	2.5 Kwh	1.1 Kwh	0.5 Kwh

Slutsatser

Den vattenkylda kondensumlaren har inte bättre energieffektivitet jämfört med den luftkylda. Den vattenkylda kondensumlaren har emellertid 37 % kortare torktid.

Genom att värma frånluftstumlaren med varmvatten kan elförbrukningen reduceras med nästan 93 % och energieffektiviteten förbättras med 53 %, jämfört med en luftkyld kondensumlare. Torktiden blir dock 9 % längre.

Tackord

Jag vill tacka min handledare Roger Renstöm för den hjälp och det stöd han gett mig under arbetets gång.

Jag vill också tacka Lars Pettersson för hjälpen han gett mig med uppställningen av försöken.

Sist, men inte minst, vill jag tacka Malin Hedin för den hjälp hon gett med att utveckla mitt skrivande.

Referenser

- Bansal, P.K., Braun, J.E. & Groll, E.A. (2001). Improving the energy efficiency of conventional tumbler clothes drying systems. *International Journal of Energy Research*. 25(15):pp. 1315-1332.
- Bassily, A-M. & Colver, G.M (2003). Performance analysis of an electric clothes dryer. *Drying Technology*. 21(3): pp. 499-524.
- Bassily, A-M. & Colver, G.M (2005). Numerical optimization of the annual cost of a clothes dryer. *Drying Technology*. 23(7): pp. 1515-1540.
- Beiron, J. & Brunzell, L. (2005). Energy efficiency and drying capacity of an unheated or partially heated air vented tumble dryer. *Proceedings of the 3rd Nordic Drying Conference, Karlstad, Sweden*.
- Bejan, A., Dincer, I., Lorente, S., Miguel, A.F. & Reis, A. H. (2004). *Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies*. Springer-Verlag. New York.
- Berghel, J., Brunzell, P.K. & Groll, E.A. (2003). Systemstudie av kondensortkumlare – styrsystem och energiflöden. Arbetsrapport. Karlstad universitet, Sweden.
- Braun, J.E., Bansal, P.K. & Groll, E.A. (2002). Energy efficiency analysis of air cycle heat pump dryers. *International Journal of Refrigeration*. 25(7):pp. 954-965.
- Brunzell, L. (2006). *Energy Efficient Textile Drying*. Universitetsstryckeriet, Licentiate thesis at Karlstad Universitet, Karlstad.
- Brunzell, L. & Berghel, J., Renström, R. (2009). Integrating Tumble Dryer in The Heating Systems in Block of Flats. *Proceedings of the 4th Nordic Drying Conference, Reykjavik, Iceland*.
- Conde, M.F (1997). Energy conservation with tumbler drying in laundries. *Applied Thermal Engineering*. 17(12): pp. 1163-1172.
- Deans, J. (2001). The modeling of a domestic tumbler dryer. *Applied Thermal Engineering*. 21(9): pp. 977-990.
- Energimyndigheten (2005). *Sveriges energimyndighets författningssamling, STEMFS 2005:6*
- Energimyndigheten (2009). Test av energismarta torktumlare. 2009-05-11 <http://www.energimyndigheten.se>
- Haghi, A.K. (2005). A study of heat and mass transfer in porous material under equilibrium conditions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 39(2): pp. 200-3.
- Han, H., Deng, S.M. (2003). A study on residential clothes drying using waste heat rejected from a split-type room air conditioner. *Drying Technology*, 21(8): pp. 1471-1490
- Hekmak, D. & Fisk, W. J. (1984). Improving the energy performance of residential clothes dryers. *The 35th Annual International Appliance Technical Conference, Ohio State University*.
- Kionka, U. (1973). Clothes drying systems. *Elektrizitaet*(11): pp. 329-333.
- Lambert, A.J.D., Spruit, F.P.M. & Claus, J. (1991). Modeling as a tool for evaluating the effect of energy-saving measures. Case study. A tumbler dryer. *Applied Energy*. 38(1): pp. 33-47
- Mujumdar, A. S. & Menon, A. S. (1995). Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers. In *Handbook of Industrial Drying*. Mujumdar A.S. Marcel Dekker, Inc. New York. Vol. 2: pp. 1-40.
- Ruiter, J. P., Leentvaar, G. & Zeylstra, A. H. (1978). Tumbler dryer with heat pump. *Elektrotechnik*. 56(4):pp. 224-9.
- Sköldberg, H., Unger, T., Olofsson M. (2006). Marginal och miljövärdering av el. *Elforsk rapport 06:52*