



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

Albin Andréén

# Att förutsäga temperatur, utgående fukthalt och tryckfall i en pneumatisk transporttork

Predicting temperature, outgoing moisture content  
and pressure drop in a pneumatic conveying dryer

Examensarbete 22,5 hp

Högskoleingenjörsprogrammet i energi- och miljöteknik

Juni 2014

Handledare: Stefan  
Frodeson

Examinator: Lena  
Strawreberg



## Sammanfattning

Användningen av pellets har ökat kraftigt de senaste åren och har blivit ett viktigt verktyg för att minska miljöpåverkan. I energibranschen är viktigt utreda möjligheten att effektivisera tillverkningsprocessen för att ligga i framkant av utvecklingen och göra bränslet till ett attraktivt val för konsumenterna. En stor del av pelletstillverkarnas utgifter går till att torka det råmaterial som pellets består av. Torkning och transport av material är två energikrävande processer som är nödvändiga i många industrier och kan ibland innebära stora utgifter såväl kostnadsmässigt som miljömässigt. Pneumatisk transporttorkning är ett sätt att kombinera torkning och transport av material och tekniken kan vara lämplig att använda vid pelletstillverkning. På Karlstads Universitet finns en pneumatisk transporttork vars syfte är att forska och utveckla torkning av råmaterial.

I den här studien byggdes en modell för att hjälpa användaren att förutse vilket tryckfall och utgående fukthalt som kan förväntas vid torkning av sågspån. Modellen kan användas som ett hjälpmedel vid planering av försök i Karlstads Universitets pneumatiska transporttork.

Modellen byggdes i beräkningsverktyget Excel. Dess resultat jämfördes med testserier genomförda i Karlstads Universitets pneumatiska transporttork. Totalt genomfördes trettio tre olika testserier då tryckfall och utgående fukthalt jämfördes. Testserierna skiljde sig ifrån varandra i fråga om massflödet luft, material och ingående lufttemperatur.

Vid lägre lufttemperaturer förutsåg modellen en högre utgående fukthalt än vad som kunde uppmätas. När den ingående lufttemperaturen var 120 °C förutsågs ibland rätt, ibland högre och ibland lägre fukthalt i jämförelse med testserierna. Tryckfallet kunde med god noggrannhet förutsägas då lufthastigheten var låg. Då hastigheten var högre var differensen mellan mätdata och modellen större.

Känslighetsanalysen visade att en möjlig förklaring till att modellen i vissa fall förutsåg en hög fukthalt kan vara att vissa materialegenskaper var felaktigt antagna. Störst påverkan hade antagandena angående partiklarnas densitet och antalet partiklar som flödar genom systemet per sekund. Det simulerade tryckfallet påverkades inte av ovan nämnda antaganden.

Modellen har stor utvecklingspotential men vidare studier rekommenderas för att skapa en bättre förståelse för såväl den pneumatiska transporttorken som modellen. Studierna bör främst riktas mot att bestämma partikelegenskaper och att kontrollera hur väl tryckfallet överensstämmer med mätdata i hela torken. Om det genomförs finns goda möjligheter att modellen kan bli användbar för användare av Karlstads Universitets pneumatiska tork.



## **Abstract**

The use of pellets has increased significantly in recent years and has become an important tool for reducing environmental impact. Large portions of the pellet producer's expenditure are being used to dry raw material. Drying and conveying are energy-consuming processes needed in most industries but it also a big expense, both in terms of cost and from an environmental perspective. Pneumatic conveying and drying is a well-known technique that combines drying and conveying of material. The features of a pneumatic dryer and conveyer may make it suitable for use in pellet production. A pneumatic dryer and conveyer is located at Karlstads University which aims to develop and study the drying process of raw material.

This study investigates the possibility of developing a model that can serve as a tool to help users predict the pressure drop and the moisture content of sawdust. The model was built in the calculation tool Excel and its results were compared to a number of test series conducted at the pneumatic dryer and conveyer located at Karlstads University. The model will serve as a reference when test runs of Karlstad University pneumatic dryer and conveyer is being planned and a functional tool would save considerable time and labor.

At lower air temperatures (80 °C and 100 °C) the model predicted a higher output moisture content compared to test runs. At higher air temperatures (120 °C), the model predicted sometimes right, sometimes higher and sometimes lower moisture content compared to the test runs. The pressure drop was predicted with good accuracy when the air velocity was low. At higher velocities the model over predicted the pressure drop.

The model has great potential for development and further studies are recommended to create a better understanding in terms of the model and the pneumatic dryer and conveyer at Karlstads University. The studies should be directed to determine some of the particle properties as well as furthering determine the pressure drop. The model may be a very useful tool if these studies are implemented.



## **Förord**

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 min handledare Stefan Frodeson vars kunskap och vägledning har varit enormt viktig. Jag vill också rikta ett tack till Lars Petterson som hjälpt mig med utrustningen på Karlstads Universitet.

## Nomenklatur

$A$	Area	$m^2$
$C_p$	Specifik värmekapacitet	$J / (kg \cdot K)$
$d$	Diameter	$m$
$D_{AB}$	Diffusionskoefficient	$m^2/s$
$f$	Friktionskoefficient	
$Fr$	Froude-tal	
$g$	Tyngdacceleration	$m/s^2$
$h_m$	Massövergångstal	$kg / s$
$h_h$	Värmeövergångstal	$W / (m^2 \cdot K)$
$L$	Längd	$m$
$M_{H_2O}$	Molmassa vatten	$kg/mol$
$\dot{m}$	Massflöde	$kg / s$
$N$	Mängd (antal)	
$Nu$	Nusselt-tal	
$p$	Tryck	$Pa$
$p_{vo}$	Ångans partialtryck vid partiklens yta.	$Pa$
$p_{vg}$	Ångans partialtryck i gasfasen	$Pa$
$R$	Allmänna gaskonstanten	$J / (K \cdot mol)$
$Re$	Reynoldstal	
$RH$	Relativ fuktighet	
$R_b$	Kurvans böjningsradie	$a$
$r_0$	Rörets radie	$m$
$T$	Temperatur	$K$
$Sh$	Sherwood-tal	
$\dot{V}$	Volymflöde	$m^3/s$
$v$	Hastighet	$m/s$
$X$	Specifik luftfuktighet	$kg / kg$
$X_{max}$	Maximala specifika luftfuktigheten	
$\varepsilon_s$	Volymtäthet	
$\theta$	Vinkel	$^\circ$
$\lambda_p$	Konno & Saitos Friktionsfaktor	
$\lambda_{b,p}$	Friktionsfaktor i böj	
$\mu_{dyn}$	Dynamisk viskositet	$kg / (m \cdot s)$
$\mu_{MLR}$	Massflödeskvot	
$\rho$	Densitet	$kg/m^3$
$\emptyset$	Vinkelfaktor	
$\gamma$	Förlustkoefficient	



**Subscript**

<i>b</i>	Böj
<i>h</i>	Heat
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Vatten
<i>hfg</i>	Förångning
<i>L</i>	Luft
<i>p</i>	Partikel
<i>t</i>	torkning
<i>TS</i>	Torrsubstans
<i>tot</i>	Totalt
<i>å</i>	Ånga



## Innehållsförteckning

Inledning.....	1
Syfte .....	3
Mål .....	3
Metod.....	4
Modell - Tryckfall.....	5
Ingångssektion (Sektion 1).....	5
Böj (Sektion 2, 4 och 6) .....	5
Vertikal sektion (Sektion 1, 3 och 5).....	6
Horisontell sektion (Sektion 7) .....	7
Modell - Mass- och energibalanser.....	7
Modell - Torkning.....	9
Indata .....	10
Resultat .....	13
Temperatur.....	14
Fukthalt .....	15
Känslighetsanalys .....	17
Diskussion .....	19
Slutsats.....	24
Referenser.....	24

## Inledning

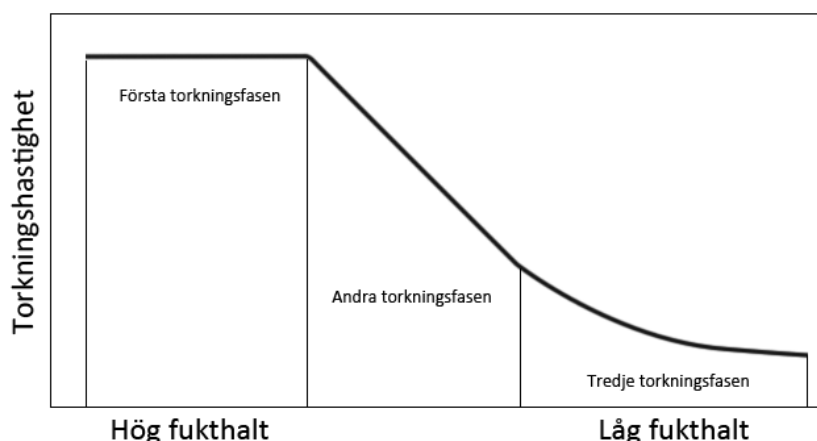
Pellets är ett träbaserat bränsle som ofta tillverkas av biprodukter från skogs- och pappersindustrin, till exempel sågspån. Användningen har ökat kraftigt de senaste årtiondena och eftersom det anses vara koldioxidneutralt är det ett viktigt hjälpmedel för att klara de uppsatta miljömålen som bland annat innebär att Sverige till år 2020 ska minska utsläppen av koldioxid med 40 % jämfört med 1990-års nivå (Pelletsförbundet, 2013) (Naturvårdsverket, 2014).

Pneumatisk transporttorkning är en typ torknings- och transportteknik som används i många industrier, bland annat mat-, pappers-, plast- och träindustrin. Tekniken innebär att material torkas och transporteras vid samma tillfälle. Den anses vara mycket tidseffektiv eftersom partiklarnas uppehållstid är kort samtidigt som kontaktytan mellan partiklarna och torkningsfluiden är stor. Några av fördelarna med en pneumatisk transporttork är att den kan byggas på små ytor eftersom den består av rörsystem vilket också gör processen dammfri.

Kombinationen gör tekniken lämplig att torka och transportera finkorniga material av olika slag (El-Behery, El-Askary, Hamed, & Ibrahim, 2012). Konstruktionen är enkel men teorin är komplex då många olika parametrar måste tas hänsyn till, till exempel partiklarnas och luftens hastighet, temperatur, tryckfall och andra materialegenskaper. (El-Behery et al., 2012).

En stor del av pelletstillverkarnas utgifter spenderas på att torka råmaterial. En undersökning har visat att cirka 27 % av de totala utgifterna spenderas på denna utpost (Thek & Obenberger, 2002). För att främja användningen av pellets är det viktigt att hela tiden forska/utreda nya metoder och tekniker för att ligga i framkant av utvecklingen för att pressa priset och fortsätta göra pellets till ett attraktivt val på energimarknaden.

Trä är ett hygroskopiskt material vilket innebär att torkningen kan befina sig i tre olika faser. Torkningshastigheten varierar beroende på vilken fas torkningen befinner sig i. En typisk torkningskurva där alla tre faser förekommer kan ses i figur 1 (Mujumdar, 2006).



**Figur 1. Ett exempel på en torkningskurva av ett hygroskopiskt material där alla tre torkningsfaser förekommer. Fritt efter (Mujumdar, 2006)**

Under den första torkningsfasen är partiklarnas yta täckt av vatten och torkningen kan likställas med torkning av våt yta. Med det menas att när energi tillförs till partikeln kommer vattnet att förångas och partikelns fukthalt att minska. Torkningshastigheten kan antas vara relativt konstant under den första torkningsfasen och den pågår när partiklarnas fukthalt är hög. Den andra fasen i torkningsprocessen är en övergångsperiod mellan den första och tredje fasen. Den kännetecknas av att vissa delar av partiklarnas yta är våt och andra delar är torra. Under den tredje torkningsfasen är partikelns yta helt torrlagd och allt vatten som finns kvar är bunden inuti partikeln. Partikeln torkas genom att värme konduktivt tränger in i partikeln och vattnet diffunderar till ytan där vattnet förångas. Torkningshastigheten är lägst i den tredje torkningsfasen (Mujumdar, 2006).

Att förutsäga en pneumatisk transporttorks kapacitet med avseende till utgående fukthalt och tryckfall är fördelaktigt för att effektivisera och förbättra torkprocessen. Ett problem i medelstora industrier är överdimensionerade maskiner vilket bidrar till en ökad miljöpåverkan, ökad energianvändning och i förlängningen större utgifter (EnergiEffektiviseringsFöretagen, 2012). Att förutsäga torkningskapaciteten och tryckfalllets skeenden i en pneumatisk transporttork skulle kunna hjälpa företag och industrier att effektivisera sin verksamhet och minska deras klimatpåverkan.

Studier har genomförts för att kunna förutsäga hur torkning påverkas under olika förhållanden. En studie där torkningsprocessen modellerades i samband med en U-böj visade att sektioner av denna typ kan höja torkningshastigheten till följd av det oregelbundna flödet (Hidayat & Rasmuson, 2007). En komparativ studie som jämförde ett antal metoder för att simulera visade att det med hjälp av ekvationer och modeller att det med gott resultat är möjligt att förutsäga fukthalten i en pneumatisk tork. Flertalet empiriskt framtagna korrelationer jämfördes och bäst utfall erhöles med Baeyens metod (El-Behery et al., 2012). De flesta studier som genomförts i ämnet har avsett en avgränsad del av torken och i det här arbetet har hela systemet behandlats.

En metod som frekvent används för att förutsäga tryckfallet i en pneumatisk transporttork är att dela in systemet i ett antal olika sektioner. Indelningen baseras på

rörets geometri där tryckfallet beräknas individuellt för varje sektion (Klinzing, Rizk, Leung, & Marcus, 2012). Ett förslag till en sådan uppdelning av sektioner är följande: Ingångssektion, horisontell sektion, vertikal sektion, lutande sektion och böjar (Ratnayake, 2005).

På Karlstads Universitet finns en försöksanläggning i form av en pneumatisk transporttork, hädanefter kallad KaU PTT, vars syfte är att forska och utveckla torkning av råmaterial. Det finns en avsikt att utreda möjligheten att förutspå tryckfallet och partiklarnas utgående fukthalt i torken för att bland annat planera försöken på ett effektivare sätt vilket skulle ge större möjligheter att anpassa försöken till syftet med undersökningen.

### **Syfte**

Syftet med studien är att bygga en modell som erbjuder en möjlighet att förenkla och effektivisera förarbetet vid försök som planeras i KaU PTT.

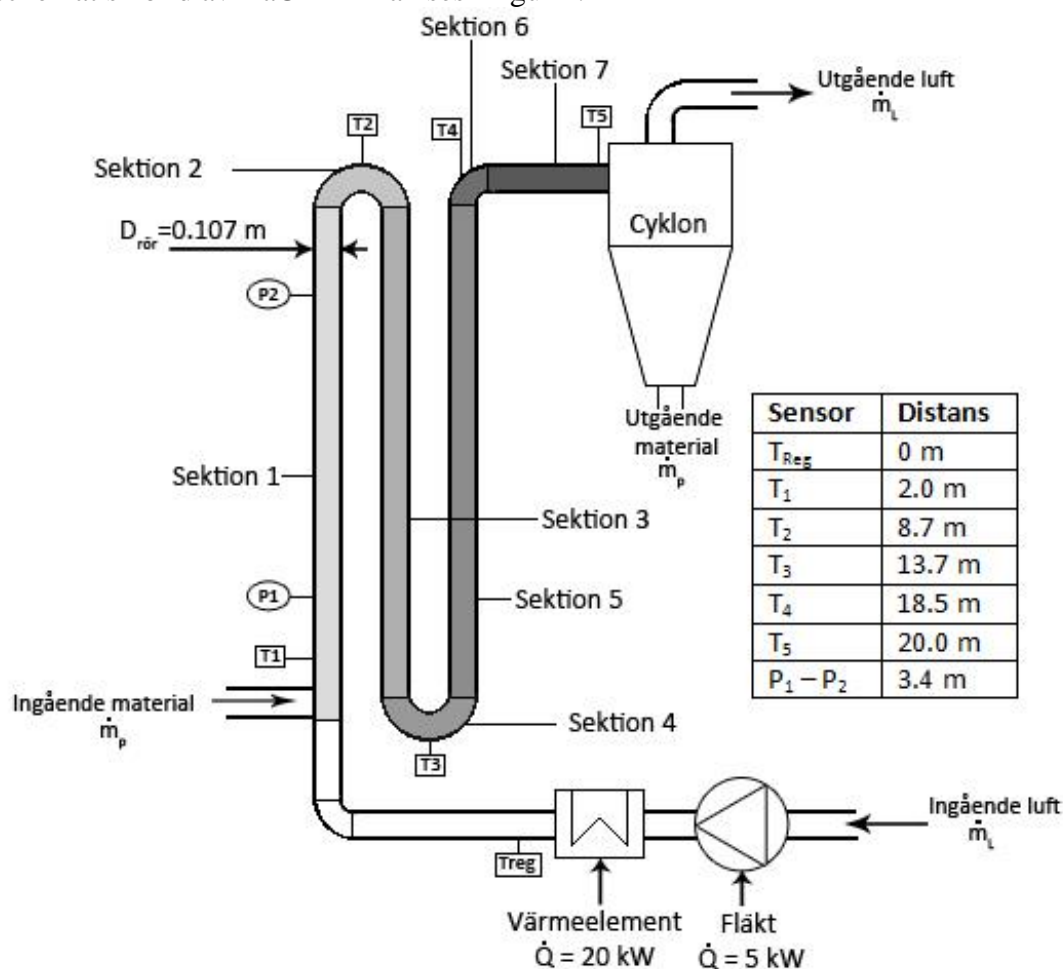
### **Mål**

Målet är att ta fram en modell av KaU PTT och analysera modellens styrkor och svagheter. Modellen ska hjälpa användaren att förutse vilka massflöden, fukthalter och tryckfall som krävs och kan förväntas under önskade förhållanden vid torkning av sågspån under den första torkningsfasen vilket skulle ge större möjligheter att effektivisera och precisera försöken i KaU PTT.

## Metod

För att svara på studerade frågor beslutades att bygga en teoretisk modell av KaU PTT. Modellen byggdes i beräkningsprogrammet Excel. Programmet valdes för att kunskapen om Excel var stor samt att modellen skulle bli så användarvänlig som möjligt. Modellens resultat jämfördes med testserier genomförda i KaU PTT. Materialet som studerades var sågspån och torkningen studerades i den första torkningsfasen.

I det här kapitlet beskrivs hur modellen är uppbyggd samt valet av ekvationer. Först redovisas hur tryckfallet beräknades beroende på vilken typ av sektion som behandlades. Efter det redovisas mass- och energibalanserna som användes samt en redogörelse för hur utgående fukthalt räknades ut. Slutligen beskrivs hur testserierna i KaU PTT genomfördes och hur modellens resultat jämfördes med mätdata. En schematisk bild av KaU PTT kan ses i figur 2.



Figur 2. En schematisk bild av KaU PTT. Figuren beskriver hur sektionuppdelningen gjordes. Temperatursensorerna och mätpunkternas positioner i torken redovisas.

I figur 2 visas att torken består av vertikala, horisontella och böjda sektioner. På torken fanns sex stycken temperatursensorer som var kopplade till en dator som loggade den registrerade temperaturen var tionde sekund. Tryckfallet mättes i en del av sektion 1. Sensorernas placering utgår från  $T_{Reg}$  som var placerad direkt efter värmeelementet. Alla sensorers placering kan ses i figur 2.

KaU PTT delades in i totalt sju olika sektioner vilket kan ses i figur 2. Sektionsindelningen utnyttjades när fukthalten beräknades genom att betrakta varje sektion som en kontrollvolym. Varje sektion tilldelades en kategori beroende på vilken typ av sektion som avsågs. Tabell 1 beskriver vilken/vilka typ varje sektion tilldelades.

**Tabell 1. Beskrivning av vilken typ varje sektion blev tilldelad.**

Sektion	Typ av sektion
1	Vertikal sektion, ingångssektion
2	Böj 180 °
3	Vertikal sektion
4	Böj 180 °
5	Vertikal sektion
6	Böj 90 °
7	Horisontell sektion

## Modell - Tryckfall

### *Ingångssektion (Sektion 1)*

I ingångssektionen accelereras partiklarna från vila till önskad hastighet vilket renderar ett tryckfall. Detta tryckfall beräknades enbart i ingångssektionen. Tryckfallet i ingångssektionen beräknades med ekvation (1) (Ratnayake, 2005).

$$\Delta p_L = \left(0.5 + \mu_{MLR} \frac{v_p}{v_L}\right) \rho_L \cdot v_L^2 \quad (1)$$

Massflödeskvoten  $\mu_{MLR}$ , är en kvot som beskriver massflödet material jämfört massflödet av luft som flödar genom torken. Massflödeskvoten bestämdes med ekvation (2) (Klinzing et al., 2012).

$$\mu_{MLR} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_L} \quad (2)$$

Luftens hastighet,  $v_L$  beräknades med ekvation (3) och för att uppskatta partiklarnas hastighet i röret användes ekvation (4) (Ratnayake, 2005).

$$v_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L A_{rör}} \quad (3)$$

$$v_p = \left(1 - 0.68 d_p^{0.92} \cdot \rho_p^{0.5} \cdot \rho_L^{-0.2} \cdot d_{rör}^{-0.54}\right) \quad (4)$$

### *Böj (Sektion 2, 4 och 6)*

Tryckfallet i en böjd rörsektion räknades ut med ekvation (5).  $\Delta p_L$  är tryckfallet som uppstår på grund av luftmolekylernas friktion och  $\Delta p_p$  uppstår på grund av partiklarnas friktion, i detta fall sågspånpartiklar (Ratnayake, 2005).

$$\Delta p_b = \Delta p_{b,L} + \Delta p_{b,p} \quad (5)$$

$\Delta p_L$  beräknades med Wypychs ekvation (6), givet att villkor (7) uppfylls (Ratnayake, 2005).



$$\Delta p_{b,L} = \frac{(0.00241 \cdot \theta_{vinkel})}{Re^{0.17}} \cdot \emptyset \cdot \left(\frac{R_b}{r_0}\right)^{0.84} \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot v_L^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$Re \left(\frac{r_0}{R_b}\right)^2 > 91 \quad (7)$$

Vinkelfaktorn,  $\emptyset$  är en faktor som varierar beroende på vilken vinkel som böjen har. Faktorn beräknades med ekvation (8-9) (Ratnayake, 2005).

om  $\left(\frac{R_b}{r_0}\right) < 19.7$  annars  $\emptyset = 1$

$$\emptyset_{90^\circ} = 0.95 + 17.2 \left(\frac{R_b}{r_0}\right)^{-1.96} \quad (8)$$

$$\emptyset_{180^\circ} = 1 + 116 \left(\frac{R_b}{r_0}\right)^{-4.52} \quad (9)$$

Partiklarnas del av tryckfallet räknades ut med ekvation (10) (Ratnayake, 2005).

$$\Delta p_{b,p} = \frac{1}{2} \cdot \mu_{MLR} \cdot \lambda_{b,p} \cdot \rho_L \cdot v_L^2 \quad (10)$$

Friktionsfaktorn,  $\lambda_{b,p}$  och Froude-talet,  $Fr$  bestämdes med ekvation (11, 12).

$$\lambda_{b,p} = 0.0097 \cdot (\mu_{MLR})^{0.5676} \cdot (Fr)^{0.9647} \cdot (\rho_L)^{-0.6232} \quad (11)$$

$$Fr = \frac{v_L}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (12)$$

### **Vertikal sektion (Sektion 1, 3 och 5)**

I vertikala sektioner består det totala tryckfallet, precis som beskrivits för böjar, av två delar; luftens och partiklarnas friktion. Det totala tryckfallet i en vertikal sektion beräknades med ekvation (13) (Ratnayake, 2005).

$$\Delta p_{tot,v} = \Delta p_L + \Delta p_p \quad (13)$$

För att beräkna tryckfallet för luftfriktion,  $\Delta p_L$  användes ekvation (14). Friktionskoefficienten,  $f$  beräknades med ekvation (15) (Ratnayake, 2005).

$$\Delta p_L = \frac{f \cdot \rho_L \cdot v_L^2 \cdot L}{2 d_{rör}} \quad (14)$$

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (15)$$

Partiklarnas del i tryckfallet beräknades med Klizings ekvation (16) (Ratnayake, 2005).

$$\Delta p_p = 2 \lambda_p \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_s) \cdot v_p^2 \cdot \frac{\Delta L}{d_{rör}} \quad (16)$$

Volymtätheten  $\varepsilon_s$  beräknades med ekvation (17) och beskriver hur stor volym luften tar upp i röret jämfört med hur stor volym partiklarna tar upp. Friktionsfaktorn  $\lambda_p$  är en faktor som tar hänsyn till partiklarnas närvaro i sektionen och den beräknades med Konno & Saitos ekvation (18) (Ratnayake, 2005).

$$\varepsilon_s = 1 - \left( \frac{4 \cdot \dot{m}_p}{\pi \cdot r_{rör}^2 \cdot (\rho_p - \rho_l) \cdot v_p} \right) \quad (17)$$

$$\lambda_p = \frac{0.0285 \sqrt{g \cdot d_{rör}}}{v_p} \quad (18)$$

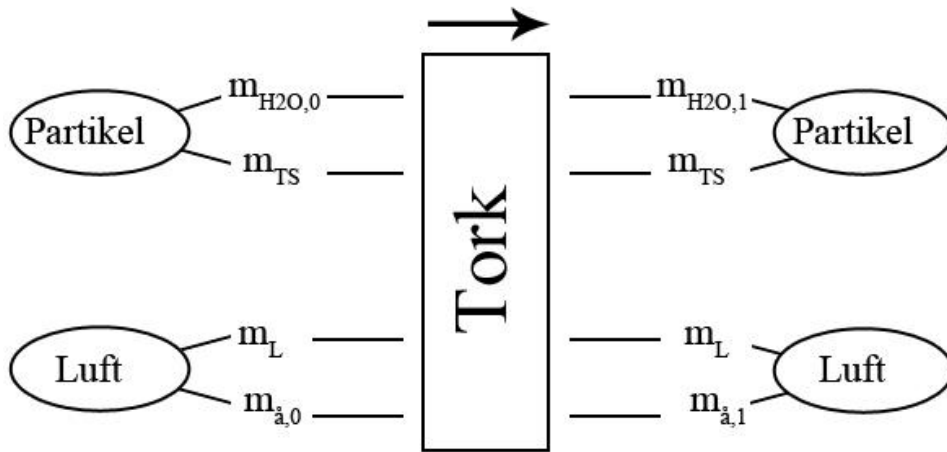
### Horisontell sektion (Sektion 7)

Tryckfallet i en horisontell rörsektion räknades ut med ekvation (19). För att uppskatta  $\Delta p_L$  och  $\Delta p_p$  användes ekvation (14, 16).

$$\Delta p_{tot,h} = \Delta p_L + \Delta p_p \quad (19)$$

### Modell - Mass- och energibalanser

Massbalansen för partiklar och luft beskrivs i figur 3. Massan torrsubstans (TS) och massan torr gas är oförändrad genom hela systemet. I en torkningsprocess där målet är att minska massan vatten i partiklarna kommer vatten att förångas och på så sätt vandra mellan partikeln och luften vilket innebär att partiklarnas fukthalt minskar.



Figur 3. Massbalansen för luft och vatten mellan luft och partikel i en torkningsprocess. Vatten vandrar från partikel till luft i form av ånga vilket minskar partikelns fukthalt.

Massan vatten i utgående partiklar kunde med hjälp av masstransporten mellan partikel och luft, beskrivas med ekvation (21) och massan ånga i utgående luft beskrivs med ekvation (20).

$$\dot{m}_{v,L,1} = \dot{m}_{a,L,0} + (\dot{m}_t \cdot t) \quad (20)$$

$$\dot{m}_{H_2O,p,1} = \dot{m}_{H_2O,p,0} - (\dot{m}_t \cdot t) \quad (21)$$

Drivkraften i en torkningsprocess är densitetsskillnad, i detta fall mellan luften och partiklarna. För att beräkna luftens specifika fuktighet i den utgående luften användes ekvation (22).

$$x = \frac{\dot{m}_{H_2O,0} + (\dot{m}_t \cdot t)}{\dot{m}_L} \quad (22)$$

Energibalansen för varje partikel i systemet beskrivs med ekvation (23). Partiklarna tillförs energi när värmeövergången mellan partiklarna och luften pågår och förlorar energi när vatten avges i form av vattenånga.

$$\Delta \dot{Q}_p = \dot{Q}_{h,p} - \dot{Q}_{hfg} \quad (23)$$

$\dot{Q}_{h,p}$ , är energiövergången mellan partikel och luft som sker till följd av temperaturskillnad. Övergången sker genom konvektion och metoden för att beräkna värmeövergången beskrivs i en senare del av metoden, ekvation (36). Förångningsenergin,  $\dot{Q}_{hfg}$  beräknades med ekvation (24) och den uppskattades med hjälp av förångningsentalpin samt masstransporten av ånga.

$$\dot{Q}_{hfg} = \dot{m}_t \cdot h_{fg} \quad (24)$$

Partiklarnas energiförändring i varje kontrollvolym beskrivs med ekvation (25). Med samma ekvation kunde partiklarnas utgående temperatur räknas ut.

$$\Delta \dot{Q}_p = (\dot{m}_{TS} \cdot C_{p,TS} + \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{p,H_2O})(T_2 - T_1) \quad (25)$$

Luftens energibalans beskrivs med ekvation (26). Utöver de termer som förekommer i ekvation (25) så adderas ytterligare två termer,  $\dot{Q}_{h,\dot{a}}$  och  $\dot{Q}_{förlust}$ .

$$\Delta \dot{Q}_L = \dot{Q}_{hfg} - \dot{Q}_{h,p} - \dot{Q}_{h,\dot{a}} - \dot{Q}_{förlust} \quad (26)$$

$\dot{Q}_{h,\dot{a}}$  är energin som krävs för att värma den från partiklarna avgivna ångan till lufttemperaturen och den beräknades med ekvation (27).

$$\dot{Q}_{h,\dot{a}} = \dot{m}_t \cdot C_{p,\dot{a}} \cdot (T_L - T_p) \quad (27)$$

Förlusttermen,  $\dot{Q}_{förlust}$  beskriver hur mycket energi som förloras till omgivningen. För att uppskatta hur stor förlusttermen så användes mätdata från testserierna. Tre olika mätningar analyserades då lufttemperaturen var 80 °C, 100 °C och 120 °C och värmeförlusterna varierade beroende temperaturen. Energiövergången som skedde till följd av värmeförluster beräknades med ekvation (28).

$$\dot{Q}_{förlust} = \dot{m}_{Luft} \cdot C_{pLuft} \cdot (T_1 - T_{omgivning}) \quad (28)$$

Med hjälp av ekvation (28) uppskattades ett  $\gamma$ -värde som användes i ekvation (29)

$$\dot{Q}_{förlust} = \gamma \cdot (T_1 - T_{omgivning}) \quad (29)$$

$\gamma$ -värdet visade sig variera beroende på ingående lufttemperatur. Värdet räknades ut för alla tre lufttemperaturer och  $\gamma$ -värdet approximerades med ekvation (30).

$$\gamma = (1.2867 + 0.043T_{ingående}) \quad (30)$$

När ekvation (29,30) slogs samman erhöles ekvation (31).

$$\dot{Q}_{förlust} = (1.2867 + 0.043T_{ingående}) \cdot (T_1 - T_{omgivning}) \quad (31)$$

Luftens energiförändring och utgående temperatur i varje kontrollvolym beskrivs med ekvation (32). Med samma ekvation uppskattades luftens utgående temperatur.

$$\Delta\dot{Q}_L = (\dot{m}_L \cdot C_{p,L} + \dot{m}_{\dot{a}} \cdot C_{p,\dot{a}})(T_2 - T_1) \quad (32)$$

## Modell - Torkning

För att räkna ut masstransporten mellan partiklar och luft i den första torkningsfasen användes ekvation (33) (Mujumdar, 2006).

$$\dot{m}_t = h_m \pi d_p^2 \left( \frac{M_{H_2O} p_{vo}}{RT_p} - \frac{M_{H_2O} p_{vg}}{RT_L} \right) \quad (33)$$

Massövergångstalet  $h_m$  löstes ut och beräknades med ekvation (34). Det finns många olika metoder för att räkna ut det dimensionslösa Sherwood-talet. I modellen användes Baeyens metod, ekvation (35) (Mujumdar, 2006).

$$Sh = \frac{h_m d_p}{D_{AB}} \quad (34)$$

$$Sh = 0.15 Re \quad (35)$$

Reynoldstalet,  $Re$  beräknades med ekvation (36) (Mujumdar, 2006).

$$Re = \frac{v_p \rho_L d_p}{\mu_{dyn}} \quad (36)$$

För att beräkna masstransporten är det nödvändigt att känna till vattenångans partialtryck vid partiklarnas yta samt i luften. Ångans partialtryck i luften uppskattades med ekvation (37) (The Engineering ToolBox, 2014).

$$p_{vg} = e^{\left( \frac{77.345 + (0.0057 + T_L) - \left( \frac{7235}{T_L} \right)}{T_L^{8.2}} \right) \cdot RH} \quad (37)$$

Under den första torkningsfasen betraktas partiklarnas yta som våt och partialtrycket vid partiklarnas yta beräknades med ekvation (38) (The Engineering ToolBox, 2014).

$$p_{vg} = e^{\left( \frac{77.345 + (0.0057 + T_L) - \left( \frac{7235}{T_L} \right)}{T_L^{8.2}} \right)} \quad (38)$$

Under torkningsprocessen kommer luften att värma partiklarna till följd av temperaturskillnaden mellan partiklarna och luften. Värmeövergången mellan de båda beskrivs med ekvation (39) (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Q_{h,p} = h_h A_p (T_L - T_p) \quad (39)$$

För att beräkna värmeövergångstalet,  $h_h$  användes ekvation (40) (Cengel & Ghajar, 2011).

$$Nu = \frac{h_h d_p}{k_g} \quad (40)$$

För att beräkna Nusselt-talet användes Baeyens metod, ekvation (41) (Mujumdar, 2006).

$$Nu = 0.15 Re \quad (41)$$

I modellen antogs partiklarna vara perfekta sfärer och varje partikels ytarea beräknades med ekvation (42).

$$A_p = \pi \cdot d_p^2 \quad (42)$$

För att beräkna den sammanlagda arean som exponeras mot luften av alla partiklar, uppskattades antalet partiklar som flödar per sekund beräknades med ekvation (43) och den totala ytarean räknades ut med ekvation (44)

$$N_p = \frac{\dot{m}_p}{\left(\frac{4\pi r^3}{4}\right) \cdot \rho_p} \quad (43)$$

$$A_{p,tot} = N_p \cdot A_p \quad (44)$$

Partiklarnas fukthalt,  $f$  är baserad på våta fukthalten och beräknades med ekvation (45) (The Engineering ToolBox, 2014).

$$f = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{TS}} \quad (45)$$

Luftens relativa fuktighet beräknades genom att använda ekvation (46).

$$RH = \frac{x}{x_{max}} \quad (46)$$

## Indata

I modellen antogs ett antal egenskaper för luft och partiklarna vara konstanta. Den specifika värmekapaciteten för vatten ( $C_{p,vatten}$ ), luft ( $C_{p,luft}$ ), sågspån ( $C_{p,TS}$ ) bestämdes till 4180 J/kg,K, 1007 J/kg,K, 1360 J/kg,K. Den ingående luftens specifika luftfuktighet och vattnets förångningsentalpi sattes till 15 g/kg och 4180 kJ/kg.

Partiklarnas densitet antogs vara 400 kg/m<sup>3</sup>, antagandet var baserat på att träslaget antogs vara gran (The Engineering ToolBox, 2014). Partiklarnas diameter antogs vara 1.5 mm (Gustafsson, 2013).

De indata som varierades i modellen och som bestämdes efter att testserierna i KaU PTT slutförts var massflödet luft, massflödet sågspån, lufttemperaturer och ingående fukthalt. Värdena på ovan nämnda indata kan ses under rubriken resultat i tabell 4. Den ingående fukthalten varierades av två anledningar. För att underlätta genomförandet av testserierna då spånet kunde recirkuleras flera gånger utan att vatten behövde tillsättas till sågspånet vilket sparade mycket tid och arbete. Det gav också upphov till att fler olika scenarion undersöktes eftersom torkningshastigheten varierar beroende på sågspånets fukthalt vilket beskrivs i inledningen (figur 1).

Modellen kontrollerades genom att jämföra dess resultat med testserier genomförda i KaU PTT. Det fanns möjlighet att reglera KaU PTT och de värden som kunde justeras var lufttemperatur, volymflödet luft och massflödet sågspån. Egenskaper reglerades via en kontrollpanel.

Torken korrigerade fläkten och värmeelementet automatiskt så att temperatur och luftflöde hade önskad värde. Luftflödet var baserat på det dynamiska trycket i systemet och det dynamiska trycket beräknades med ekvation (47) (Gustafsson, 2013).

$$\dot{V} = 0.771 \cdot A_{rör} \cdot \sqrt{\Delta p_{dyn} \cdot \frac{\rho_{omgivning}}{\rho_{önskad temp}}} \quad (47)$$

Material tillfördes till torken via en matarskruv. Materialtillförseln kontrollerades genom att reglera frekvensen som matarskruvens roterade

För att bestämma materialets fukthalt togs ett prov som vägdes och sedan torkades i 103 °C i cirka 24 timmar. Provet vägdes återigen efter torkning för att avgöra hur mycket vatten som förångats och fukthalten bestämdes med ekvation (42).

Det fanns tillgång till cirka 150 kg sågspån som recirkulerades mellan testserierna. För att säkerställa att torkningsprocessen befann sig i den första torkningskurvan behövde spånets fukthalt höjas mellan serierna. Fukthalten ökades genom att i en omblandare tillsätta vatten till sågspånet. För att minska risken att materialet var skiktat fick sågspånet stå orört under tjugofyra timmar, vattnet kunde då diffundera och fördela sig jämnt.

Testserierna i KaU PTT gjordes enligt testmatrisen, tabell 2. Data samlades in från sensorerna som var monterade på torken. Utgående material samlades upp under två minuter för att bestämma utgående fukthalt och massflödet sågspån. Fyra prov togs på ingående material för att bestämma dess ingående fukthalt.

Testmatrisen som användes för testserierna i KaU PTT presenteras i tabell 2. Totalt genomfördes tjugofyra serier under olika förhållanden för att undersöka utgående fukthalt och temperaturer i olika delar av transporttorken.

**Tabell 2. Testmatrisen beskriver under vilka förhållanden som KaU PTT planerades att testas.**

Serie	$T_{\text{Luft}}$ [°C]	$\dot{m}_{\text{sågspån}}$ [kg/min]	$\dot{m}_{\text{Luft}}$ [kg/min]
1	80	1	5.5
2	80	2	5.5
3	80	1	5.0
4	80	2	5.0
5	80	1	6.0
6	80	2	6.0
7	80	1	7.0
8	80	2	7.0
9	100	1	5.5
10	100	2	5.5
11	100	1	5.0
12	100	2	5.0
13	100	1	6.0
14	100	2	6.0
15	100	1	7.0
16	100	2	7.0
17	120	1	5.5
18	120	2	5.5
19	120	1	5.0
20	120	2	5.0
21	120	1	6.0
22	120	2	6.0
23	120	1	7.0
24	120	2	7.0

Tryckfallet jämfördes i en vertikal sektion, sektion 1. Den första mätpunkten var placerad 0.8 m ovanför inmatningen av material och den andra mätpunkten var placerad 4.2 m ovanför inmatningen. Distansen mellan mätpunkterna var 3.4 m. Det genomfördes inga egna mätningar av tryckfallet i KaU PTT. Mätdata för tryckfallet erhöles från Sebastian Eriksson som under våren 2014 utförde tryckfallsmätningar i KaU PTT (Eriksson, 2014).

För att kontrollera hur väl resultatet från testserierna och simuleringar korrelerar jämfördes temperatur, fukthalt och tryckfall. Modellen simulerades efter att testserierna i KaU PTT genomförts för att förhållandena skulle efterliknas.

För att undersöka och analysera hur vissa antagna egenskaper påverkade resultatet gjordes en känslighetsanalys. Egenskaperna som analyserades var antalet partiklar ( $N_p$ ), partiklarnas densitet ( $\rho_p$ ) och partiklarnas diameter ( $d_p$ ).

## Resultat

I tabell 4 redovisas resultatet av testserierna som genomfördes i KaU PTT när serierna genomfördes enligt testmatrisen, tabell 2. Resultatet visade att massflödet av sågspån (torrsubstans, TS) och luft varierade trots identiska inställningar under flera av serierna. Den största skillnaden kan ses i serie 17-24 då massflödet sågspån (torrsubstans ,TS) var högre jämfört med serie 1-16. Den ingående fukthalten varierar mellan flera av serierna och det beror på att spånet recirkulerades vilket finns beskrivet i metoden. Data för serie 15 saknas på grund av felaktig provtagning.

De värden som presenteras i tabell 3 användes som indata till modellen när denna simulerades.

**Tabell 3. Resultatet i form av temperatur, fukthalter och massflöden för de testserier som genomfördes enligt testmatrisen, tabell 2.**

Serie	T <sub>in</sub> [°C]	f <sub>in</sub> [%]	$\dot{m}_{TS}$ [kg/min]	$\dot{m}_L$ [kg/min]	f <sub>ut</sub> [%]
1	80.2	40.9	0.71	4.91	35.9
2	80.2	40.9	0.95	4.84	37.1
3	80.2	40.9	0.73	4.60	37.3
4	80.3	40.9	0.98	4.55	37.9
5	80.2	40.9	0.76	5.70	35.1
6	80.2	40.9	1.04	5.75	36.4
7	80.2	40.9	0.67	6.79	33.3
8	80.1	40.9	1.09	6.92	35.6
9	100.3	34.7	0.83	4.97	26.9
10	100.3	34.7	1.13	4.94	29.1
11	100.2	27.3	0.98	4.34	20.8
12	100.3	34.7	1.22	4.58	29.1
13	100.2	27.3	1.01	5.81	20.2
14	99.8	34.7	1.19	5.70	28.2
15					
16	100.2	34.3	1.17	6.81	26.5
17	120.1	22.3	1.29	4.93	15.3
18	120.2	30.5	1.17	4.92	24.0
19	120.3	22.3	1.31	4.40	16.1
20	120.2	30.5	1.16	4.54	25.8
21	120.2	22.3	1.25	5.44	16.3
22	120.2	22.3	1.82	6.61	16.9
23	120.3	39.1	0.67	6.55	28.2
24	120.2	39.1	0.96	5.55	25.6



I tabell 4 presenteras resultatet av de tryckfallsmätningar som utfördes av Sebastian Eriksson (Eriksson, 2014).

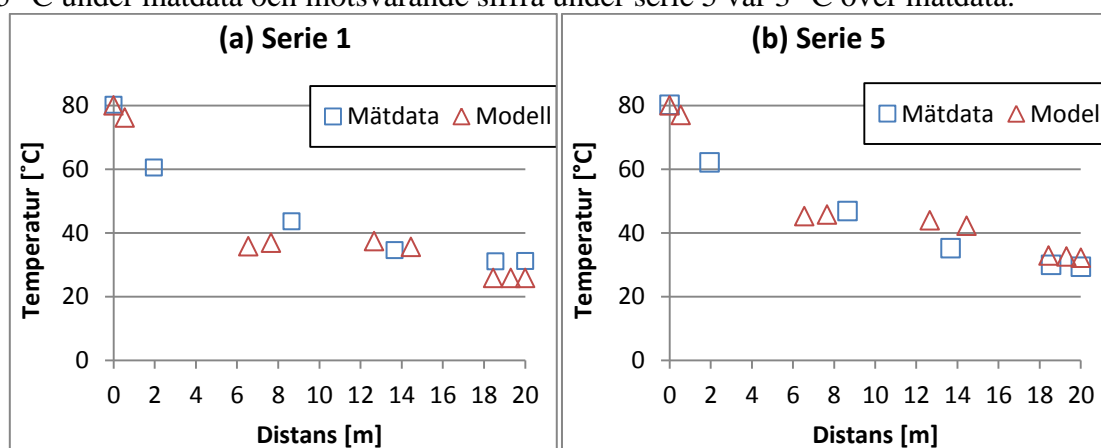
**Tabell 4. Resultatet, med avseende på tryckfallet, av de serier som genomfördes av Sebastian Eriksson.**

Serie	$T_{in}$ [°C]	$\dot{m}_{TS}$ [kg/min]	$\dot{m}_L$ [kg/min]	Tryckfall [Pa]
1	21.0	1.2	3.9	28
2	21.2	1.2	7.3	61
3	21.0	1.2	8.2	74
4	21.3	1.6	3.9	38
5	20.9	1.6	7.3	65
6	21.1	1.6	8.2	81
7	21.5	2.4	3.9	45
8	20.8	2.4	4.8	49
9	20.9	2.4	5.5	53

## Temperatur

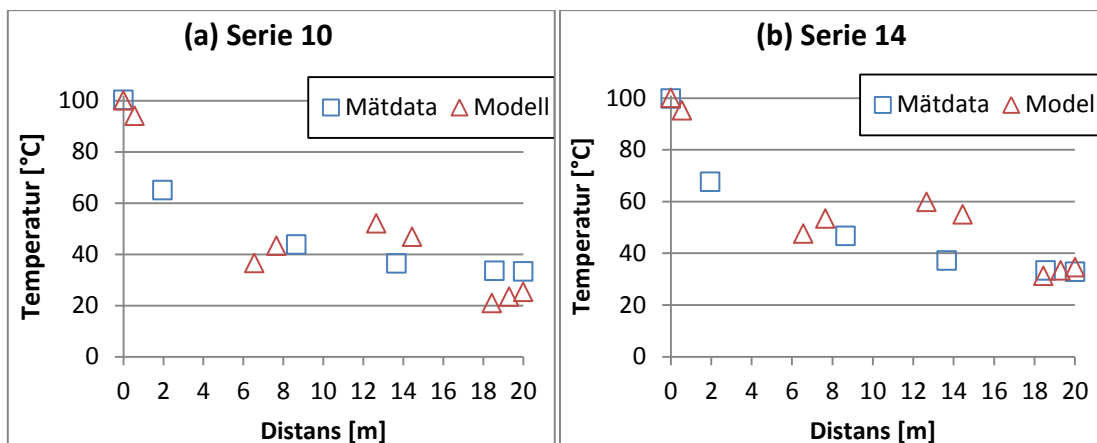
I figur 4-6 redovisas temperaturen som sensorerna registrerade samt vilken temperatur modellen förutsåg vid olika positioner i torken. Totalt finns sex olika serier redovisade, två för varje lufttemperatur.

I figur 4 visas temperaturen vid olika positioner i torken när ingående lufttemperaturen var 80 °C. Differensen mellan mätdata och modellsimulering varierar beroende på vart i torken de jämfördes. Diagrammet visar att temperaturen sänks kraftigt i början av torken och stabiliseras i senare delen. Under serie 1 var den simulerade sluttemperaturen 5 °C under mätdata och motsvarande siffra under serie 5 var 3 °C över mätdata.



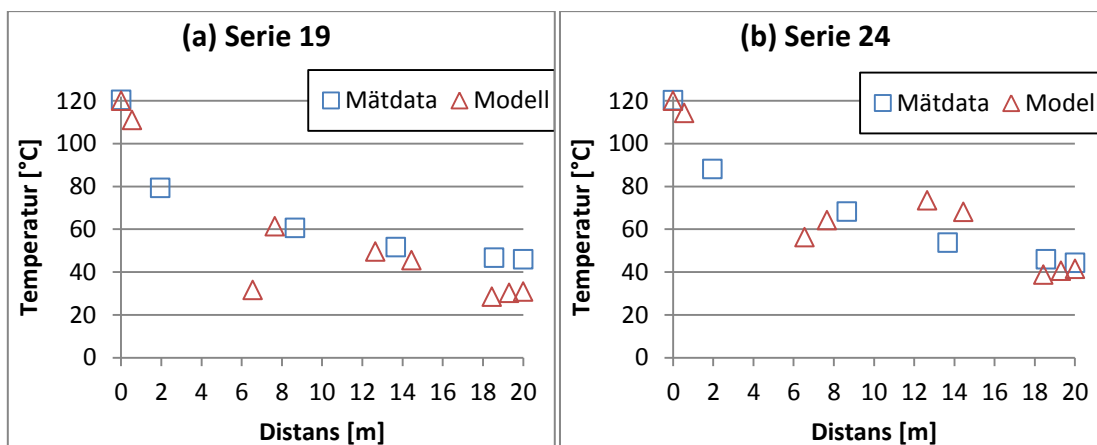
**Figur 4. Lufttemperaturens variation i olika delar av systemet, där 0 m är början och 20 m är slutet av transporttorken. Serie 1 (a),  $T_{Luft} = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_{TS} = 0.7 \text{ kg/min}$ ,  $\dot{m}_L = 4.9 \text{ kg/min}$ . Serie 5 (b),  $T_{Luft} = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_{TS} = 0.8 \text{ kg/min}$ ,  $\dot{m}_L = 5.7 \text{ kg/min}$ .**

Resultatet för serie 10 och 14 visas i figur 5. I mitten av torken simulerades att lufttemperaturen ökar samtidigt som mätdata visar att lufttemperaturen minskar. Under köning 10 var den simulerade sluttemperaturen 8 °C under mätdata och under serie 14 visade samma jämförelse 2 °C över mätdata.



Figur 5. Lufttemperaturens variation i olika delar av systemet, där 0 m är början och 20 m är slutet av transporttorken. Serie 10 (a),  $T_{\text{Luft}} = 100^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_{\text{TS}} = 1.1 \text{ kg/min}$ ,  $\dot{m}_{\text{L}} = 4.9 \text{ kg/min}$ . Serie 14 (b),  $T_{\text{Luft}} = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_{\text{TS}} = 1.2 \text{ kg/min}$ ,  $\dot{m}_{\text{L}} = 5.7 \text{ kg/min}$ .

I figur 6 jämförs serie 19 och 24. Under serie 19 simuleras en lägre temperatur i början av torken jämfört med mätdata och övriga simuleringar. Den simulerade sluttemperaturen för samma serie var  $15^{\circ}\text{C}$  under mätdata och motsvarande värde under serie 24 var  $3^{\circ}\text{C}$  under mätdata.

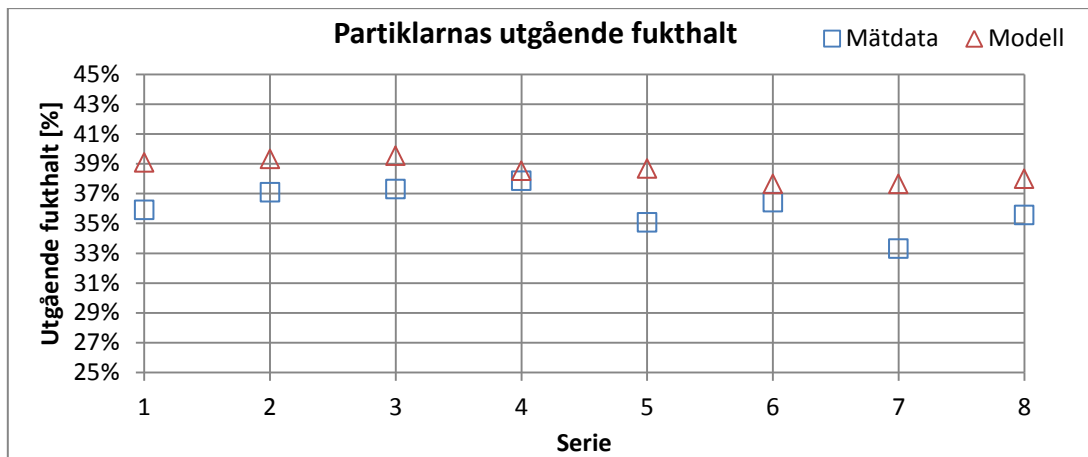


Figur 6. Lufttemperaturens variation i olika delar av systemet, där 0 m är början och 20 m är slutet av transporttorken. Serie 19 (a),  $T_{\text{Luft}} = 120^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_{\text{TS}} = 1.3 \text{ kg/min}$ ,  $\dot{m}_{\text{L}} = 4.4 \text{ kg/min}$ . Serie 24 (b),  $T_{\text{Luft}} = 120^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{m}_{\text{TS}} = 1.0 \text{ kg/min}$ ,  $\dot{m}_{\text{L}} = 5. \text{ kg/min}$ .

## Fukthalt

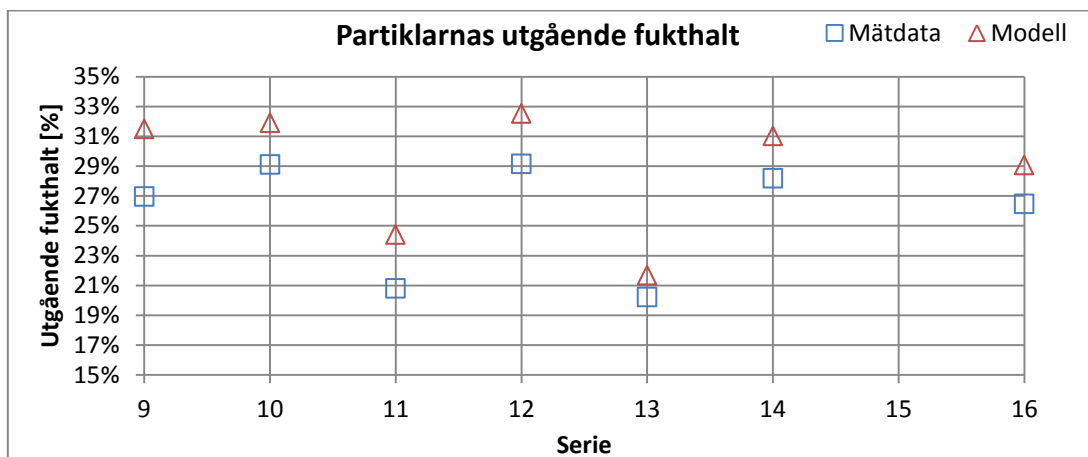
I figur 7-9 redovisas partiklarnas utgående fukthalt vid simulering av modellen och den uppmätta fukthalten. Alla serier redovisas.

I figur 7 finns data för de serier som genomfördes när lufttemperaturen var  $80^{\circ}\text{C}$ . Diagrammet visar att den utgående fukthalten för samtliga serier överstiger den uppmätta fukthalten. Modellen förutspådde fukthalten mellan 1–4 procentenheter över mätdata. Fukthalten förutsågs bäst under serie 4 då skillnaden var 1 procentenheter. Sämst förutsågs serie 7, differensen var då 4 procentenheter.



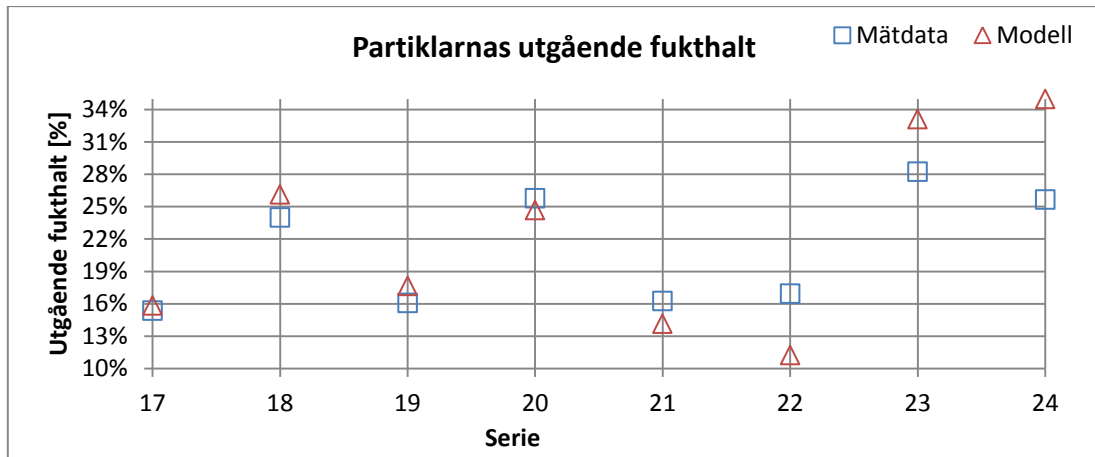
**Figur 7. Jämförelse av partiklarnas utgående fukthalt. Uppmätt fukthalt jämförs med modellens simulerade fukthalt. Alla serier i figuren genomfördes då ingående lufttemperatur var 80 °C.**

Resultatet av de serier som genomfördes då lufttemperaturen var 100 °C kan ses i figur 8. Modellen simulerade en högre fukthalt jämfört med mätdata under samtliga serier. Bäst förutsågs serie 13 då differensen var 1 procentenheter, sämst simulerades serie 1 då skillnaden var 4 procentenheter.



**Figur 8. Jämförelse av partiklarnas utgående fukthalt. Uppmätt fukthalt jämförs med modellens simulerade fukthalt. Alla serier i figuren genomfördes då ingående lufttemperatur var 100 °C.**

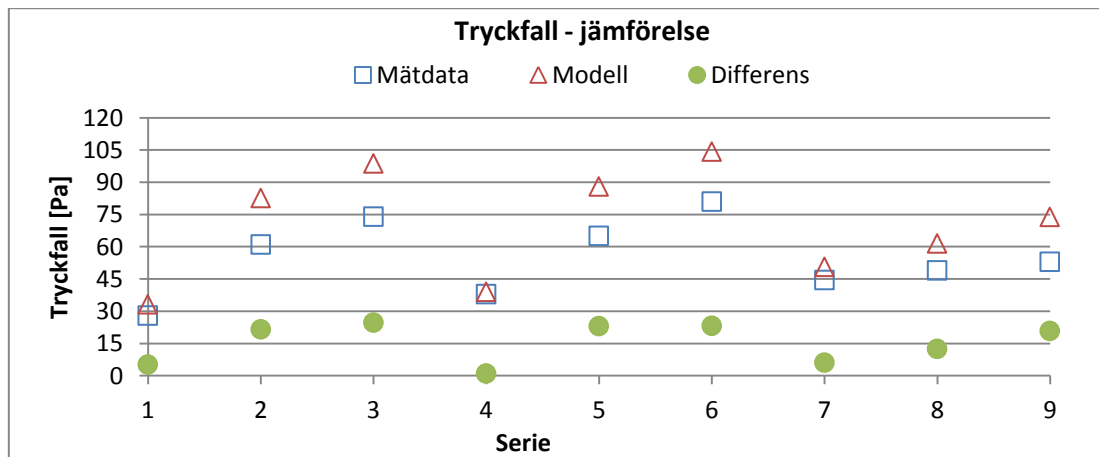
Resultatet av serierna då lufttemperaturen var 120 °C redovisas i figur 9. Den simulerade fukthalten varierar mellan att ibland överskatta och underskatta fukthalten samtidigt som den under några serier överensstämmer med mätdata. Under serie 17-21 varierade differensen mellan 0.5 – 2 procentenheter. Under serie 22-24 var differensen större, mellan 5-9 procentenheter.



Figur 9. Jämförelse av partiklarnas utgående fukthalt. Uppmätt fukthalt jämförs med modellens simulerade fukthalt. Alla serier i figuren genomfördes då ingående lufttemperatur var 120 °C

### Tryckfall

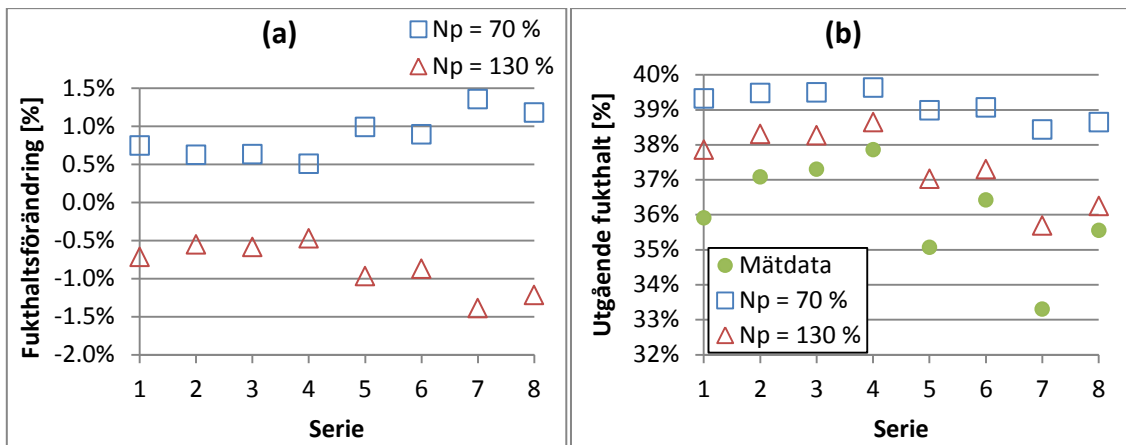
I figur 10 jämförs det uppmätta tryckfallet och det simulerade tryckfallet i sektion 1. Modellen förutspådde ett högre tryckfall i sex av nio serier. Tre av serierna överensstämde väl med mätdata.



Figur 10. Jämförelse av simulerat och uppmätt tryckfall i sektion 1.

### Känslighetsanalys

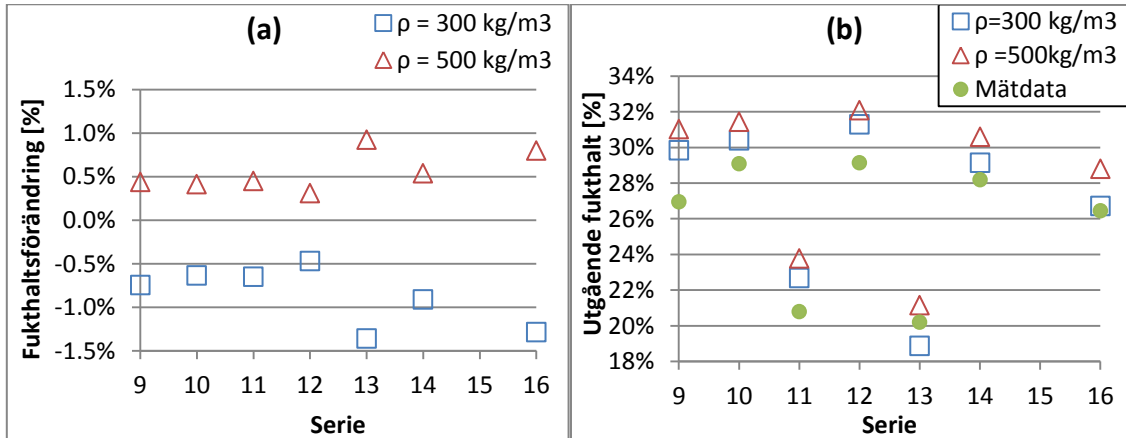
Antalet partiklar räknades ursprungligen ut med ekvation (43). I känslighetsanalysen gjordes försök att minska antalet partiklar med 30 % och att öka antalet partiklar med 30 %. Figur 11 (a) beskriver hur många procentenheter som den utgående fukthalten förändras jämfört med det ursprungliga antagandet och i (b) redovisas vilken utgående fukthalt partiklar hade.



Figur 11. Känslighetsanalys av hur utgående fukthalt påverkas när antalet partiklar ökas och minskas med 30 %. (a) beskriver hur många procentenheter utgående fukthalt förändras och (b) beskriver partiklarnas utgående fukthalt.

När antalet partiklar ökas kommer den utgående fukthalten och partiklarnas slutgiltiga temperatur att minska och det motsatta när antalet partiklar minskas.

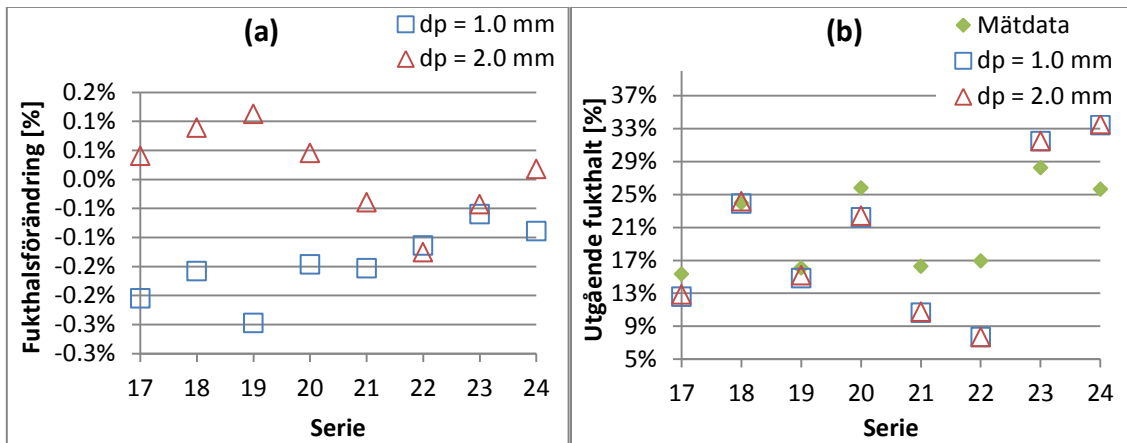
I figur 12 visas hur partiklarnas utgående fukthalt och luftens temperatur förändras när densiteten ökas och minskas. Utgående fukthalt jämförs mot det ursprungliga antagandet att partiklarnas densitet var  $400 \text{ kg/m}^3$ . Partiklarnas densitet ökades till  $500 \text{ kg/m}^3$  och minskades till  $300 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 12. Känslighetsanalys av hur utgående fukthalt förändras då partikeldensiteten förändras. (a) beskriver hur många procenter utgående fukthalt förändras och (b) beskriver partiklarnas utgående fukthalt.

När partiklarnas densitet ändras till  $300 \text{ kg/m}^3$  minskar den simulerade utgående fukthalten. Då partiklarnas densitet ändras till  $500 \text{ kg/m}^3$  ökas den simulerade utgående fukthalten.

I figur 13 visas en känslighetsanalys av partiklarnas diameter. Från början antogs partikeldiametern vara  $1.5 \text{ mm}$  och i känslighetsanalysen ökas och minskas diametern till  $1.0 \text{ mm}$  och  $2.0 \text{ mm}$ .



Figur 13. Känslighetsanalys av hur utgående fukthalt påverkas då partiklarnas diameter förändras. (a) beskriver hur många procenter utgående fukthalt förändras och (b) beskriver partiklarnas utgående fukthalt.

Partiklarnas utgående fukthalt är i stort sett oförändrad när diameter ökas till 2.0 mm och minskas till 1.0 mm.

## Diskussion

Som tidigare beskrivits pågår ett stort antal processer och många egenskaper påverkar transporttorkens prestationskapacitet. I det här arbetet behandlades hela systemet vilket har inneburit att vissa förenklingar gjorts. KaU PTT består av flera olika typer av sektioner som i sin tur skapar olika typer av flöden och tryckfall och det har undersökts om det med ekvationer går att beskriva tork- och transportprocessen i KaU PTT. Torken delades in i sju olika sektioner.

### Temperatur

För att analysera modellen jämfördes temperaturen vid olika positioner i torken i sex olika diagram. Flera av jämförelserna korrelerade med mätdata, i synnerhet när det gällde den utgående sluttemperaturen och några jämförelser överensstämde mindre bra. Att den utgående temperaturen var lika i flera fall är ett tecken på att energibalansen är korrekt antagen eftersom det ger en indikation på att den totala energiövergången mellan luft, partiklar och omgivning är korrekt.

Ett mindre bra tecken i temperaturjämförelsen är att temperaturkurvans form i de flesta fall är annorlunda jämfört med testdata vilket också ger upphov till fundering huruvida energibalansen mellan luft och partikel verkligen är korrekt. En möjlig anledning till kurvornas form är valet av kontrollvolym (sektioner). Kontrollvolymernas storlek och i förlängningen, luftens och partiklarnas uppehållstid varierar stort beroende på vilken typ av sektion som undersöktes. En annan möjlig förklaring till kurvornas form är att värmeövergångstalet inte är korrekt. I arbetet användes Baeyens metod men det finns en uppsjö av olika empiriskt framtagna metoder för att uppskatta värmeövergångstalet och en förändring av talet skulle förändra värmeövergången och därmed temperaturen. I modellen antogs alla partiklar vara perfekt sfärer, i verkligheten varierar partiklarnas form stort, vilket ger upphov till olika stor yta bland partiklarna. Ju större yta som är exponerad mot luften desto större värme- och massövergång sker. Känslighetsanalysen

(figur 13) visade att då partiklarnas storlek minskades ledde det till att partiklarnas utgående fukthalt minskade. Då partiklarnas diameter minskades till 1.0 mm ledde det till att den utgående fukthalten minskade med som mest 0.3 procentenheter under testade förhållanden. Den trovärdigaste förklaringen till att fukthalten minskar är att varje partikels totala volym blir mindre vilket leder till att mindre vatten finns lagrad i partiklarna vilket gör det lättare att minska fukthalten.

Genom att studera temperaturdiagrammen kan en tydlig trend urskiljas för alla serier. Den simulerade temperaturen är för samtliga serier lägre än mätdata 6.5 m in i systemet vilket är positionen mellan sektion 1 och 2, se figur 2. Med andra ord har luften och partiklarna precis passerat sektion 1 där både luft och partiklar haft en lång uppehållstid. Eftersom energi- och massbalansen är baserade på ingångsvärdena i varje kontrollvolym (sektion) är det troligt att energiövergången överdrivs i de längre sektionerna vilket stöds av att samma trend kan observeras i sektion 3 och 5.

Temperaturgraferna för de serier då lufttemperaturen var 80 °C hade i allmänhet bäst form gentemot mätdata. Trots det sker i mitten av torken en energiövergång från partiklarna till luften. Under serie 1-4 var den simulerade sluttemperaturen lägre än mätdata och under serie 5-8 var högre än mätdata. När det jämförs med resultatet i tabell 3 kan det konstateras att modellen simulerar lägre sluttemperatur när massflödet minskar vilket är ett möjligt samband. Om sambandet är korrekt ökar energiövergången mellan partiklar och luft när massflödet luft minskas. Däremot går det inte att se något samband mellan den simulerade temperaturen och simulerade fukthalten.

Temperaturkurvorna när lufttemperaturen var 100 °C och 120 °C har samma form som kurvorna för 80°C med skillnaden att extrempunkterna i mitten av torken är högre och lägre. Serie 19 utmärker sig framför andra då lufttemperaturen ökar från 32 °C till 61 °C mellan 6.5 m och 7.7 m. En anledning till att extrempunkterna skiljer sig kan vara att mängden energi i systemet är högre vilket gör att energiövergången mellan luft och partiklar blir större. Med samma resonemang som tidigare diskuterats resulterar det i större temperaturskillnader.

En bidragande orsak till att den slutgiltiga temperaturen inte skiljer mer trots kurvornas form kan vara att jämvikt i systemet slutligen uppnås. Det finns anledning att ifrågasätta huruvida temperaturskillnaden i torken har någon påverkan när sluttemperaturen överensstämmer med mätdata. I teorin borde den simulerade temperaturen inuti torken påverka partiklarnas simulerade fukthalt eftersom temperaturen påverkar partialtrycket som i sin tur påverkar masstransporten mellan partiklar och luft. När lufttemperaturen är högre leder det till att vattenångans densitet ökar vilket innebär att drivkraften för torkning blir större.

### *Fukthalt*

I figur 7-9 jämförs simulerad och uppmätt fukthalt. Resultatet visade att den simulerade fukthalten, när lufttemperaturen var 80 °C och 100 °C, var relativt jämnt underskattad vilket kan ses som ett gott tecken eftersom det kan tyda på att något eller några värden är underskattade i modellen. Känslighetsanalysen visade att både antalet partiklar och partiklarnas densitet hade stor påverkan på resultatet och det finns anledning att misstänka att dessa värden skulle behöva korrigeras. Genom att minska partiklarnas

densitet från det ursprungliga antagandet  $400 \text{ kg/m}^3$  och att öka antalet partiklar skulle jämförelsen mellan modell och mätdata överensstämja bättre.

I figur 7 redovisas fukthalterna då den ingående lufttemperaturen var  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . En gemensam faktor för de serier då fukthalten simulerades bäst är att massflödet av sågspån var högre jämfört med andra serier. När massflödet sågspån var högre var det genomsnittliga felet 1.6 procentenheter och samma siffra då massflödet spån var lägre var 3.3 procentenheter. Modellen förutsåg med andra ord partiklarnas utgående fukthalt bättre när massflödet TS var cirka  $1 \text{ kg/min}$ . Samma trend kan urskiljas i figur 8 men där är trenden är dock inte lika tydlig. När  $\dot{m}_{\text{TS}}$  var högre var differensen 2.9 procentenheter och då massflödet var lägre var skillnaden 3.2 procentenheter. När massflödet av sågspån minskas borde partiklarnas utgående fukthalt minska vilket kan ses vid testserier som genomfördes i KaU PTT. Modellen simulerar till viss del en lägre fukthalt men inte i samma storlek som kan observeras i mätdata. Det är svårt att se någon tydlig förklaring till differensen mellan simulering och mätdata men det troligaste förklaring är, som diskuterats tidigare, att massövergångstalet underskattas när flödet av sågspån är lågt. Ett högre massövergångstal skulle leda till lägre utgående fukthalt.

I figur 9 jämfördes den utgående fukthalten när den ingående lufttemperaturen var  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Fukthalten överensstämmer bra under de första serierna (17-21) och under övriga serier var differensen betydligt större. Skillnaden mellan serie 17-21 och serie 21-24 var att massflödet av luft var lägre under de förstnämnda. Då den ingående lufttemperaturen är  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  verkar det som att fukthalten simuleras närmare mätdata när massflödet luft är lägre. En av förklaringarna till det är som tidigare beskrivits att mindre mängd energi gör att modellen snabbare kan simulera jämvikt i systemet.

Generellt sett överensstämmer fukthalten bättre än förväntat om man har i åtanke att temperaturkurvorna konsekvent utmärkte sig negativt då lufttemperaturen var  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vid testserier som genomfördes i KaU PTT uppmättes under serie 22 ett massflöde TS på  $1.8 \text{ kg/min}$  vilket är den klart högsta siffran för alla serier. Ett mätfel kan inte uteslutas vilket skulle förklara den stora differensen i utgående fukthalt, 6 procentenheter.

Enligt modellen sker i stort sett all torkning fram till  $14.5 \text{ m}$  i torken. Inte ens vid  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  kunde någon större torkning observeras efter denna punkt. Enligt modellen skulle det inte göra någon skillnad om torken förlängdes med  $10 \text{ m}$  eller förkortades med  $5 \text{ m}$ . Den utgående fukthalten är i princip oförändrad. I praktiken skulle det kunna innebära att de sista två vertikala sektionerna (Sektion 3, 4, 5 och 6) i princip är värdelösa för torkning av sågspån. Enligt modellen skulle det vara möjligt att ta bort sektionerna om den sista horisontella sektionen (Sektion 7) förlängdes. För att partiklarna ska nå en lägre utgående fukthalt skulle troligen mängden energi i systemet behöva ökas. Då mängden energi ökas tar det längre tid för partiklar och luft att nå jämvikt och på så sätt utnyttjas en större del av systemet. Det kan göras genom att öka den ingående lufttemperaturen eller att öka massflödet av luft. Inga testserier genomfördes vid högre lufttemperaturer än  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  och därför testades aldrig modellen vid högre temperaturer än ovan nämnd.



## *Tryckfall*

Eftersom tryckfallet endast kunde jämföras i en sektion (sektion 1) är det svårt att avgöra hur väl det simulerade tryckfallet i hela torken stämmer överens med verkligheten. Som tidigare skrivits består torken av många olika delar och olika typer av sektioner där luften och partiklarna påverkas på olika sätt vilket ger upphov till olika stora och typer av tryckfall. I figur 10 jämfördes det förutspådda tryckfallet med mätdata.

I de flesta fall simuleras ett högre tryckfall av modellen. De tre serier som visade bäst resultat var då massflödet av luft var som lägst. Denna trend kan observeras under alla tryckfallsjämförelser. Differensen ökar konsekvent när massflödet luft ökas vilket skapar en frågan huruvida ekvationerna för att uppskatta tryckfallet som uppstår på grund av luftens friktion verkligen är korrekt. I modellen användes ekvation (14) och (15) för att beräkna denna del och ekvationerna bör studeras närmare och andra metoder bör uppmärksammas och jämföras för att tryckfallet ska uppskattas så nära mätdata som möjligt.

## *Känslighetsanalys*

Känslighetsanalysen, figur 11-13 visade att antagandet om antalet partiklar hade störst påverkan på slutresultatet. Just detta antagande var också det grävsta av de tre eftersom det visade sig svårt att hitta data och antalet partiklar antogs slutligen med ekvation (40). Det är möjligt och till och med troligt att det ursprungliga antagandet var felaktigt vilket skulle innebära ett förändrat resultat. Då antalet partiklar som flödar genom systemet ökas resulterade det i att partiklarnas utgående fukthalt minskade. Den troligaste anledningen till det är att summan av alla partiklar ytarea blir större när antalet partiklar ökas vilket gör att en större area är exponerad mot luften och det resulterar i en större masstransport mellan partiklar och luft. Även partiklarnas densitet påverkade den utgående fukthalten, genom att anta en lägre partikeldensitet kunde en lägre utgående fukthalt simuleras. Analysen visade att då antalet partiklar ökades med 30 % kunde den utgående fukthalten minskas med så mycket som 1.5 procentenheter. Då densiteten minskades till  $300 \text{ kg/m}^3$  kunde också partiklarnas utgående fukthalt också minskas med som mest 1.5 procentenheter. Det innebär att då ovan nämnda egenskaper förändras samtidigt kunde den simulerade fukthalten minskas med totalt tre procentenheter vilket är mer än differensen mellan modellen och mätdata i flera av serierna.

## *Felkällor*

En möjlig felkälla då testserierna genomfördes i KaU PTT var att blandningen av sågspån kan ha varit ofullständig. Omblandaren hade emellanåt svårigheter med att hantera sågspånets höga fukthalt. Det finns en risk att vattnet i spånen inte var jämnt fördelat och en eventuell konsekvens av det skulle vara att partiklarnas ingående fukthalt under vissa serier är felaktigt vilket i förlängningen skulle innebära en felaktig jämförelse. Om sågspånets ingående fukthalt var felaktigt skulle det resultera i att indata till modellen också var felaktigt vilket skulle uppenbara sig då utgående fukthalt jämfördes med mätdata.

### *Hur kan modellen användas?*

I det här avsnittet kommer tre möjliga scenarion att beskriva hur modellen kan användas. I varje scenario kommer sågspånets ingående fukthalt som ska torkas till fukthalten 20 %. Med hjälp av modellen kan det uppskattas vilken temperatur och massflöde av luft och TS som krävs för att göra det möjligt. Det är på det här sättet som modellen är tänkt att kunna användas, när testserier av KaU PTT planeras.

I det första scenariot är sågspånets ingående fukthalt 40 % som ska torkas till 20 % i KaU PTT. Modellen visade att det var svårt att åstadkomma torkning till dessa nivåer. Det var möjligt men det krävdes att extrema värden användes. Enligt modellen krävs att den ingående lufttemperaturen är 180 °C, massflödet luft 25 kg/min och massflödet TS 0.5 kg/min. Enligt modellen skulle materialet torkas till 20.1 %. När modellen jämfördes mot mätdata testades inte några flöden eller temperaturer i närheten av ovan nämnda vilket gör resultatet mycket osäkert.

I det andra scenariot testades modellen när den ingående fukthalten var 30 % och skulle torkas till 20 %. Enligt modellen kommer materialet att torkas till 20 % om ingående lufttemperatur är 120 °C och massflödet av luft och TS är 7.10 kg/min och 0.8 kg/min. Sista scenariot som undersöktes var när materialet skulle torkas från 25 % till 20 %. Modellen förutspådde att det var möjligt om ingående lufttemperatur var 80 °C och massflödet luft och TS var 6.5 kg/min och 1.3 kg/min.

Modellen kan också användas för att approximera hur stor effekt som behöver tillföras till fläkten som finns i torken. På så sätt kan modellen utnyttjas för att energieffektivisera torkning och transport av material genom att jämföra tryckfallet under olika förhållanden. Ett lågt tryckfall är fördelaktigt eftersom energianvändningen då blir mindre. Ytterligare studier rekommenderas för att undersöka hur väl det simulerade tryckfallet överensstämmer med verkliga värden.

### *Förbättringsåtgärd*

För att förbättra modellen vore det fördelaktigt att minska några av de större kontrollvolymerna eftersom det skulle ge en mer dynamisk modell. En modell med större dynamik skulle antagligen göra förändring av lufttemperatur mer realistisk. En annan förbättringsåtgärd vore att studera och bestämma materialets egenskaper närmare, exempelvis antalet partiklar, densitet och partikelstorlek. Om dessa kunde bestämmas skulle modellen kunna förbättras ytterligare eftersom antalet osäkerheter i systemet skulle minska. Ytterligare ett förbättringsförslag är att jämföra olika metoder för att bestämma värme- och massövergångstalet. I studien användes som tidigare beskrivits Baeyens metod men det finns flertalet andra metoder som skulle kunna användas vilket skulle påverka resultatet i form av värme- och massövergång. För att förbättra modellens möjlighet att förutsäga tryckfallet i hela torken vore det fördelaktigt om tryckfallet kunde jämföras i hela torken. Det skulle lösas genom att montera ett antal mätpunkter, förslagsvis minst en mätpunkt i varje sektion.

En fungerande modell har potential att bli mycket användbar då tidsödande arbete kan sparas. Mindre förarbete till försöken skulle frigöra tid för andra arbeten. Det skulle ges större möjligheter att planera och rikta försöken till syftet med undersökningen. Exempel på det är att ett specifikt försök ska genomföras så skulle ett mindre antal

testserier behöva testas i KaU PTT. Testserierna skulle inte behöva varieras så mycket som tidigare eftersom modellen kan approximera vilken fukthalt och vilket tryckfall som kan förväntas under testserierna.

## Slutsats

- Vid låga lufttemperaturer (80 °C och 100 °C) underskattade modellen konsekvent partiklarnas utgående fukthalt. Ett förbättrat resultat kunde observeras då massflödet av sågspån ökades från cirka 0.7 kg/min till cirka 1.0 kg/min.
- Vid högre lufttemperatur (120 °C) varierade resultatet mellan att ibland förutsäga rätt fukthalt och ibland över- och underskatta fukthalten. Modellen presterade klart bättre då luftflödet av luft var lågt (cirka 4.0-4.5 kg/min).
- Simuleringar och mätningar av temperatur i olika delar av KaU PTT överensstämde generellt sett dåligt då en energiövergång från partiklarna till luften kunde observeras i mitten av systemet. Bäst resultat erhöles då mängden energi i transporttorken var som lägst, med andra ord då lufttemperaturen, massflödet av luft och sågspån var som lägst.
- Den utgående lufttemperaturen simulerades i de flesta fall med gott resultat.
- Modellen förutsåg i de flesta fall ett högre tryckfall än vad som kunde uppmätas. Modellen simulerade tryckfallet bäst då massflödet av luft var lågt (cirka 4.0 kg/min). Då massflödet av luft var högre ökade differensen mellan det simulerade och uppmätta tryckfallet.
- Modellen fungerar bäst vid lägre lufttemperatur (80 °C och 100 °C), vid låga massflöden av luft (cirka 4.0 kg/min) och då massflödet av sågspån är cirka 1.0 kg/min. Modellen kan användas som hjälpmedel vid planering av försök i KaU PTT då ovan nämnda förhållanden råder.

## Referenser

- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. (4<sup>th</sup> ed. In SI units). New York: McGraw-Hill.
- El-Behery, S. M., El-Askary, W. A., Hamed, M. H., & Ibrahim, K. A. (2012). Numerical simulation of heat and mass transfer in pneumatic conveying dryer. *Computer & Fluids*, 68, 159-167.
- Energieffektiviseringsföretagen. (2011). *Spara energi i mindre industrier*. Hämtad 2014-05-16, från [http://www.energimyndigheten.se/Global/F%C3%B6retag/Belysning/industrier\\_eef\\_23feb\\_lowx.pdf](http://www.energimyndigheten.se/Global/F%C3%B6retag/Belysning/industrier_eef_23feb_lowx.pdf)
- Eriksson, S. (2014). *Prediktering av tryckfall i en pneumatisk transport genom modellering och mätningar* (Kandidatuppsats). Karlstad: Institutionen för ingenjör- och kemivetenskaper, Karlstads Universitet.

- Gustafsson, M. (2013). *Utvärdering av prestanda för en pneumatisk tork* (Kandidatuppsats). Karlstad: Institutionen för ingenjers- och kemivetenskaper, Karlstads Universitet.
- Hidayat, M., & Rasmuson, A. (2007). Heat and mass transfer in U-bend of a pneumatic conveying dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 85(3), 307-319.
- Klinzing, G., Rizk, F., Leung, L., & Marcus, R. (2012). *Pneumatic Conveying of Solids: A theoretical and practical approach* (3<sup>rd</sup> ed.). Dordrecht: Springer.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of Industrial Drying* (3<sup>rd</sup> ed.). Singapore: CRC Press.
- Naturvårdsverket. (2014). *Etappmålen*. Hämtad 2014-03-05, från <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Etappmal/>
- Pelletsförbundet. (2013). *Om pellets*. Hämtad 2014-05-12, från <http://pelletsforbundet.se/om-pellets>
- Ratnayake, C. (2005). *A Comprehensive Scaling Up Technique for Pneumatic Transport Systems*. Porsgrunn: Department of Technology, Telemark University College.
- The Engineering ToolBox. (2014). *Moisture Content*. Hämtad 2014-04-15, från [http://www.engineeringtoolbox.com/moisture-content-d\\_1821.html](http://www.engineeringtoolbox.com/moisture-content-d_1821.html)
- The Engineering ToolBox. (2014). *Water Vapor and Saturation Pressure in Humid Air*. Hämtad 2014-04-15, från [http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-air-d\\_689.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-air-d_689.html)
- The Engineering ToolBox. (2014). *Wood Densities*. Hämtad 2014-05-08, från [http://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d\\_40.html](http://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d_40.html)
- Thek, G., & Obenberger, I. (2002). *Wood pellet production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions*. Stockholm: Swedish Bioenergy Association.