

**BLT010 Processteknik för bioteknik- och livsmedelsindustrin,  
Delkurs 0304 Projektlaboration i enhetsoperationer**

**Lunds tekniska högskola  
VT -06**

# **Frystorkning av äpplen**



**Martin Bengtsson  
Tobias Brunberg  
Lena Chytraeus  
Lina Hansson  
Carola Johansson**

**Handledare: Anna Timgren**

## Abstract

Taste and texture of the product are the two most important factors, when developing an apple dessert using freeze-drying. Matlab was used to determine if temperature or pressure was the parameter limiting the freeze-drying process. The simulation showed that temperature was the limiting parameter and approximate drying times were estimated. Three experiments were done in order to investigate the effect of different temperature gradients on product quality. Temperature gradients of 1, 5 and 10°C·h<sup>-1</sup> were used, resulting in drying times of 19, 8 and 6 hours respectively. A final water content of 8-9 % was achieved in each experiment. The dehydration ratio (the amount of water reabsorbed divided by the amount of water lost in the freeze-drying process) was determined to approximately 0.35 g·g<sup>-1</sup>. Furthermore, a new thermal conductivity constant  $k_d$ , better adapted to reality, was estimated using experimental data. Based upon freeze-drying time and texture of the final product, the second experiment (8 h, 5°C·h<sup>-1</sup>) was considered the most advantageous.

# Innehållsförteckning

1.1 Principen för frystorkning .....	1
1.2 Frågeställning och hypoteser .....	1
1.3 Gruppens mål .....	1
2. Teori .....	2
2.1 Torkningsprocessen .....	2
2.2 Värme- och masstransport .....	4
2.2.1 Värmetransport genom det frusna lagret .....	4
2.2.2 Värmetransport genom det torra lagret .....	4
2.2.3 Masstransport .....	5
2.3.4 Torktider .....	6
3. Frystorkning av äpplen .....	7
3.1 Missfärgning .....	7
3.2 BRIX .....	7
4. Simulering .....	8
4.1 Simulering med avseende på värmetransport .....	8
4.2 Simulering med avseende på trycket .....	9
4.3 Slutsats av simuleringarna .....	10
5. Utförande .....	11
5.1 Förberedelser .....	11
5.2 Infrysning .....	11
5.3 Frystorkning .....	11
5.4 Efterarbete .....	12
6. Resultat och diskussion .....	13
6.1 Torkningsförlopp .....	13
6.2 Fukthaltsbestämning .....	15
6.3 Optimering av simulering .....	16
6.4 Återfuktning och sensorisk analys .....	16
6.5 Felkällor .....	18
7. Slutsatser .....	19
8. Källförteckning .....	20
Bilaga 1 Konstanter och variabler	
Bilaga 2 Matlab-filer för simuleringar	
Bilaga 3 Mätvärden	
Bilaga 4 Beräkningar	
Bilaga 5 Återfuktningförsök	

# 1. Inledning

## 1.1 Principen för frystorkning

Frystorkning är som namnet antyder torkning av nedfryst material. Alla erfarna vandrare har säkerligen haft med sig ett antal påsar av aluminiumfolie innehållande frystorkade maträtter som blandas med vatten, värms upp och förvandlas till ett ångande näringsrikt mål mat. Eller varför inte ta en titt i kryddskåpet, de flesta kryddor och örter är frystorkade för att behålla sina specifika egenskaper. Storsäljaren på denna marknad är dock livräddaren för alla morgontrötta studenter, kaffet! De största fördelarna med frystorkning är att materialets struktur bibehålls samt att viktiga näringsämnen och aromämnen bevaras. Detta möjliggörs tack vare de låga torkningstemperaturerna. Det bör dock tilläggas att det är en mycket energikrävande process som oftast tar längre tid än andra torkningsalternativ. Nedfrysningen såväl som frambringandet av vakuum i fryskammaren och den långt utdragna temperaturhöjningen kräver mycket energi och sett ur en ekonomisk synvinkel är det således en dyr process. Tidsaspekten gör att kostnaderna ytterligare ökar kostnaderna då produktiviteten per dygn blir lägre, men för mer värdefulla varor kan det vara det enda alternativet.<sup>1</sup>

## 1.2 Frågeställning och hypoteser

Målet för projektet är att optimera en frystorkningsprocess för äpplen, som ska torkas till 2 % fuktighet. Frukten ska användas till en äppeldessert som ska ingå i Grizzly Gourmet Foods utökade sortiment. Företagets främsta krav är att produktens konsistens efter återfuktning ska vara så lik den ursprungliga som möjligt. Frystorkningen sker i en frystork av märket Labonco Lyph-Lock 18, som står till projektgruppens förfogande.

Som utgångspunkt för projektet formuleras ett antal hypoteser. Inledningsvis antas att temperaturen är den begränsande faktorn för frystorkningsprocessen, en utvärdering av processen baseras därför på olika temperaturhöjningsintervall. Ett långsammare torkningsförfarande tros ge en skonsammare behandling av äpplena och därmed en högre kvalitet på slutprodukten. Ett alltför långt torkförlopp är dock orimligt då detta inte ger en ekonomiskt hållbar lösning. Då dessa hypoteser tas i beaktande optimeras processen med avseende på tid, temperatur och produktens kvalitet.

## 1.3 Gruppens mål

Målet med projektet är att utnyttja individens enskilda kunskaper och tillsammans skaffa nya gemensamma insikter för att inom en given tidsram lösa en problemställning. Gruppens arbete ska speglas av ett proaktivt och ingenjörsmässigt tankesätt. Handledarledda möten ska veckovis hållas för att utvärdera projektets framskridande och utveckling.

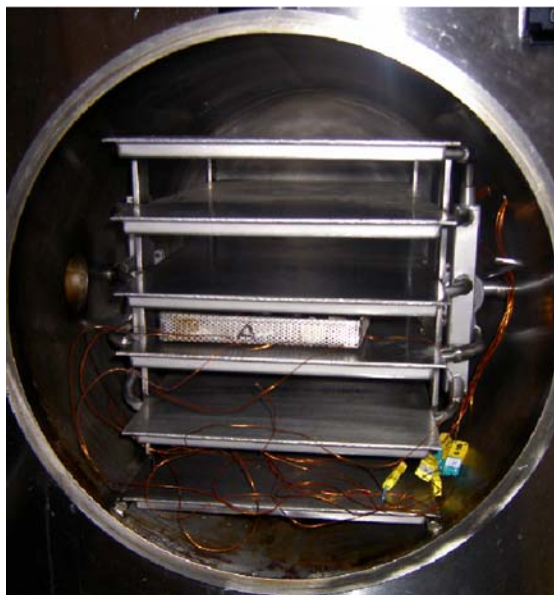
---

<sup>1</sup> Fellows, P., Food processing technology principles and practice, second edition, 2000, 22.1.1

## 2. Teori

### 2.1 Torkningsprocessen

I frystorkningsprocessen utnyttjas fenomenet sublimering, det vill säga att is övergår direkt till ånga. Torkgodset delas i små bitar som snabbt fryses ned till en mycket låg temperatur, vattnet bildar då iskristaller och separeras på så sätt från resten av produkten. När isen sublimerar kommer varan därför att bibehålla sin cellstruktur. Hastigheten med vilken nedfrysningen sker påverkar produkten såväl som torkningshastigheten. Snabb nedfrysning bildar små iskristaller som sublimeras lättare, men gör det svårare för ångan att transporteras ut på grund av att de små porerna som bildas utgör större motstånd för masstransporten. Långsam nedfrysning har motsatt effekt, stora iskristaller bildas som ger större porer vilket medför en snabbare torkningshastighet. De större porerna ger dock en mer instabil och porös slutprodukt.<sup>2</sup> Efter infrysningen läggs de nedfrysta bitarna på ett tråg som placeras på plattor i en torkkammare, se figur 1. Trycket sänks till vakuum och sedan tillförs värme, antingen genom att värma upp plattorna eller med hjälp av mikrovågor.



Figur 1. Frystork med plattuppvärmning

Torkningen kan delas in i två faser:

Under *sublimeringsfasen* förångas all is. Minimal fukthalt efter denna fas är 15 %.<sup>3</sup>

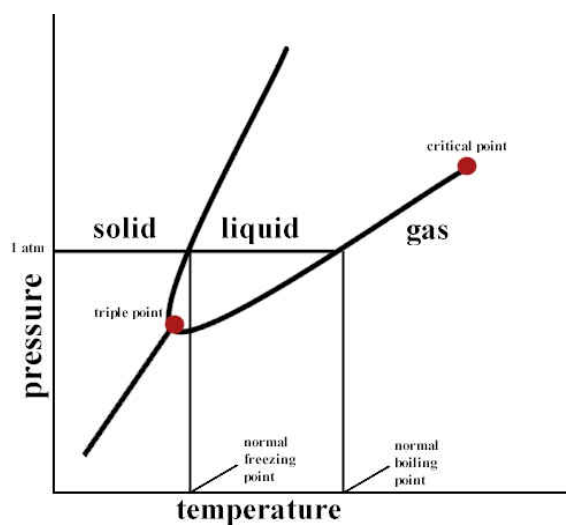
Under *desorptionsfasen* transporteras kvarvarande vattenånga ut ur torkgodset. Minimal fukthalt efter denna fas är 2 %.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Kessler, H.G., Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology, 2002, 290

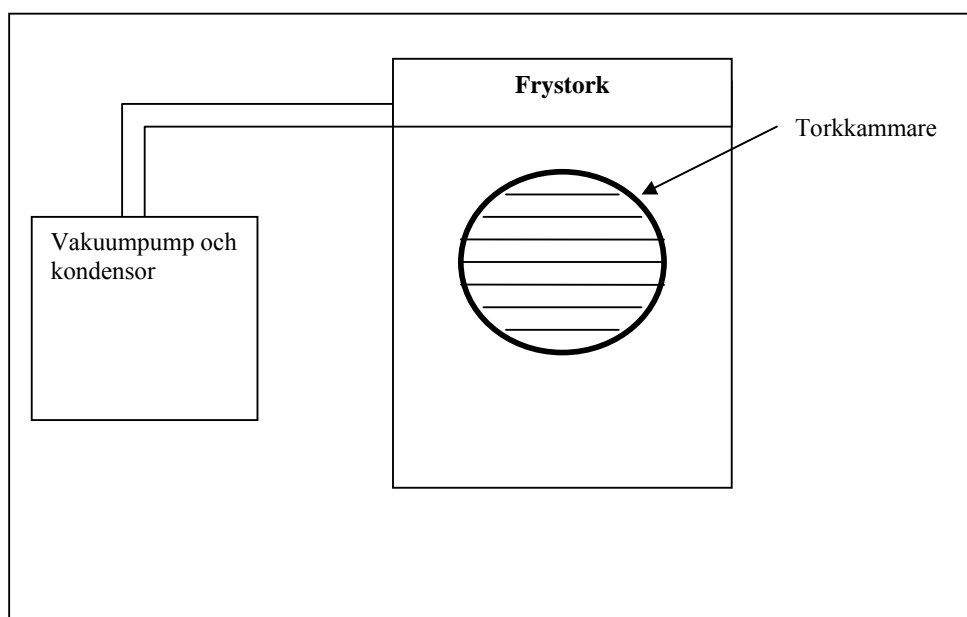
<sup>3</sup> Fellows, P., Food processing technology principles and practice, second edition, 2000, 22.1.1

Sublimeringen görs möjlig genom att hålla både tryck och temperatur under vattnets trippelpunkt, se figur 2 ( $T = 0,0098^{\circ}\text{C}$  och  $P = 610,8 \text{ Pa}$ ).<sup>4</sup>



Figur 2. Fasdiagram för vatten<sup>5</sup>

Sublimeringsfasen sträcker sig tills dess att all is övergått till gasfas. Om det är önskvärt att slutprodukten ska ha en fukthalt lägre än 15 % måste torkningsprocessen förlängas med en desorptionsfas. Desorption innebär att ångan som bildats vid sublimeringen transporteras ut med hjälp av den drivande kraften, vilken är skillnaden mellan vattenångans partialtryck inne i torkgodset och ute i kammaren. Partialtrycket för vattenånga ute i kammaren kan anses vara konstant eftersom en vakuumpump kontinuerligt leder bort vattenånga ut ur torkkammaren till en kondensator, se figur 3.



Figur 3. Schematisk skiss över frystorcken

<sup>4</sup> Kessler, H.G., Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology, 2002, 290

<sup>5</sup> [http://www.Chemistrycoach.com/Phase\\_diagram.html](http://www.Chemistrycoach.com/Phase_diagram.html), 2006-02-10

Andra faktorer som påverkar masstransporten ut är godsets porositet, det vill säga pordiameter och porlängd. Eftersom det rör sig om en sublimeringsprocess kan porerna anses vara helt gasfyllda (det vill säga endast gas transporteras ut) vilket gör att masstransporten kan jämföras med en transport genom en stagnant gasfilm, se ekvation 1.

$$N_A = k_G A (p_{\text{sublimering}} - p_{\text{kammare}}) \quad (1)^6$$

där  $k_G A$  är masstransportstermen för gas ( $k_G$ ) multiplicerat med masstransportytan ( $A$ ), för övriga beteckningar se bilaga 1.

Vattenångans partialtryck i torkgodset sjunker i takt med att ångan diffunderar ut, detta leder till att den drivande kraften minskar. Desorptionen upptar en stor del av torktiden eftersom det kommer att krävas mer energi för att torka bort den sista mängden ånga än den första. Vakuumpumpen är viktig för att skapa största möjliga drivande kraft, men även för att förhindra att godset återfuktas av ångan. Väl utanför fryskammaren kondenserar vattenången tillbaka till iskristaller då kondensorn håller en lägre temperatur än torkkammaren.

Sublimeringsprocessen påverkas av både mass- och värmetransport. Exempelvis kommer masstransport vara dominerande vid torkning av fasta material med fast porös struktur, då det uppstår en luftficka mellan godset och värmeplattan. Värmetransport dominerar däremot vid torkning av vätskor. I den aktuella frystoriken tillförs värme från undersidan såväl som från ovasidan, då värme även genereras från de ovanliggande plattorna. Därför antas torkningen ske lika fort från båda hållen. Det existerar två typer av värmetransport under torkförloppet. Dels värmetransport genom det frusna lagret, dels värmetransport genom det torkade lagret i takt med att godset blir allt torrare. Eventuella mass- och värmetransporter utanför godsets yta anses vara lika med noll då kammaren är isolerad och ingen konvention förväntas påverka förloppet.

## 2.2 Värme- och masstransport

### 2.2.1 Värmetransport genom det frusna lagret

Det frusna lagrets värmetransport påverkas av dess tjocklek, samt dess specifika värmeöverföringskapacitet, se figur 4. Då torkningen fortgår kommer tjockleken att minska vilket ökar värmeöverföringshastigheten.<sup>7</sup> Ekvation 2 visar mängden värme som avges till det frusna lagret. Den beskriver tydligt att om tjockleken på lagret minskar så ökar mängden avgiven värme och följaktligen också värmeöverföringshastigheten.

$$\dot{q}_{\text{frys}} = k_{\text{frys}} * \frac{T_{\text{kammare}} - T_{\text{sublimering}}}{s} \quad (2)^8$$

(för beteckningar se bilaga 1)

### 2.2.2 Värmetransport genom det torra lagret

Det torra lagrets värmetransport påverkas av tjockleken på det torkade lagret samt lagrets specifika värmeöverföringskapacitet, se figur 4. Den specifika värmeöverföringskapaciteten är dock betydligt lägre hos det torkade lagret än hos islagret vilket ger en mycket högre

<sup>6</sup> Föreläsningar Transportprocesser, Lunds Tekniska Högskola, 2004, kapitel 7, 26

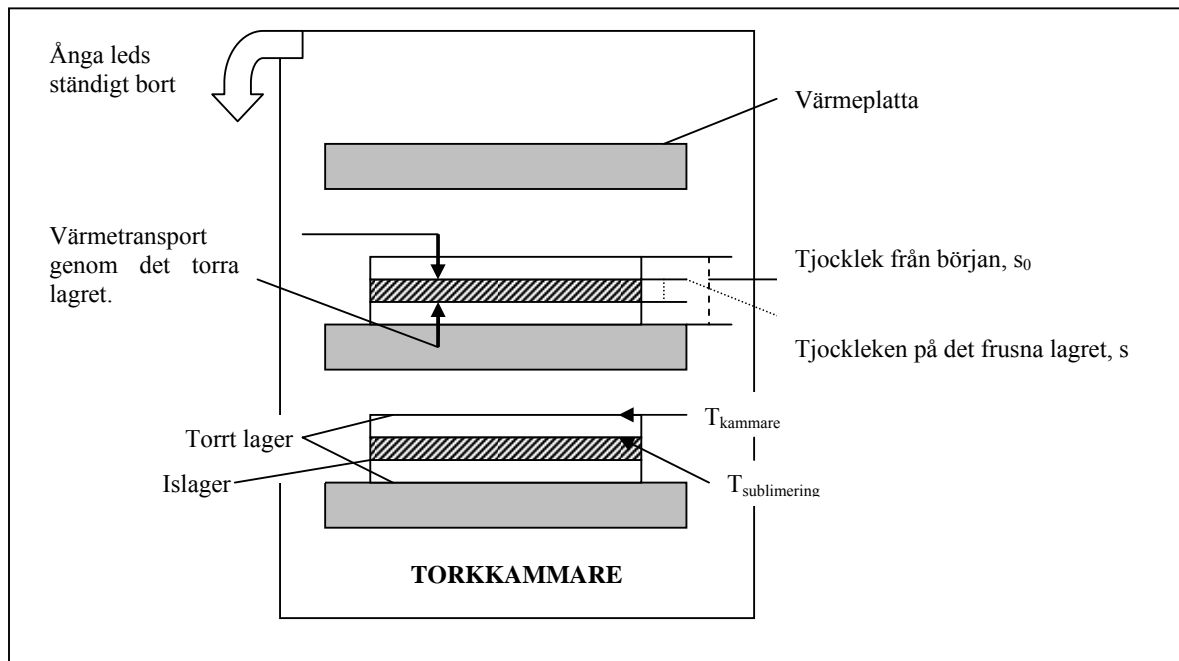
<sup>7</sup> Fellows, P., Food processing technology principles and practice, second edition, 2000, 22.1.1

<sup>8</sup> Kessler, H.G., Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology, 2002, 291

resistens mot transporten av värme. Allt eftersom torkningsprocessen fortskrider kommer dessutom tjockleken att öka vilket sänker värmeöverföringshastigheten. Detta beskrivs av ekvation 3:

$$\dot{q}_{torr} = k_{torr} * \frac{T_{kammare} - T_{sublimering}}{s_0 - s} \quad (3)^8$$

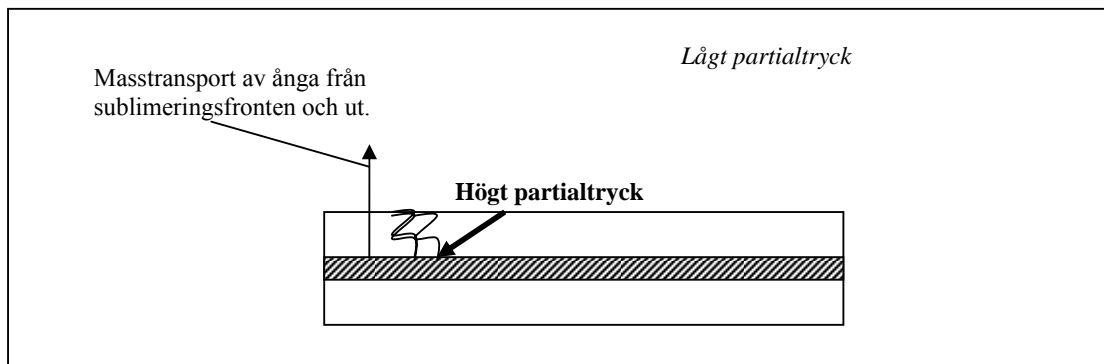
(för beteckningar se bilaga 1).



**Figur 4.** Schematisk skiss över mass- och värmetransportstransporterna i torkkammaren

### 2.2.3 Masstransport

Som nämndes ovan påverkas sublimeringsförloppet även av masstransport. Då värme tillförs höjs temperaturen vid isfronten, vilket resulterar i att även vattenångans partialtryck höjs. Då isen sublimeras kommer ångan att diffundera från området med högt partialtryck inne vid isfronten ut till kammaren där partialtrycket är lägre. Skillnaden i partialtryck fungerar således som en drivande kraft, se figur 5.



**Figur 5.** Partialtrycksskillnaden fungerar som drivande kraft och ångan transporteras ut från torkgodset. Vattenången vandrar från ett område med högre tryck till ett område med lägre tryck.



Faktorer som påverkar denna drivande kraft är trycket i torkkammaren, kondensorns temperatur och isens temperatur vid sublimeringsfronten.<sup>9</sup>

### 2.3.4 Torktider

Beroende på vilken del av den drivande kraften som dominerar torkhastigheten kan torktiden fastställas enligt olika modeller. Om tryckskillnaden dominerar kan torktiden beräknas enligt:

$$torktid = \frac{\rho_{torkgods} \cdot \varepsilon \cdot s_0^2}{\frac{b}{\mu} \cdot (P_{sublimering} - P_{kammare})} \cdot 2 \quad (4)^{10}$$

(för beteckningar se bilaga 1).

Om temperaturen i stället är den dominerande faktorn för torkningsförloppet kan torktiden beräknas med hjälp av:

$$torktid = \frac{\rho_{torkgods} \cdot \varepsilon \cdot s_0^2}{k_{torr} \cdot (T_{sublimering} - T_{kammare})} \quad (5)^{10}$$

(för beteckningar se bilaga 1).

I båda ovanstående ekvationer syns tydligt betydelsen av att dela torkgodset i tunna bitar inför frystorkning då torktiden är proportionell mot tjockleken i kvadrat. Detta innebär att en fördubbling av skivornas tjocklek resulterar i en fyra gånger så lång torktid. Det är ofta lättare att utnyttja önskade fukthalter för att beräkna torktid vid utvärderingar av torkprocesser. Fukthalten som anges i ekvation 6 är fukthalt med avseende på torrsvikt.

$$torktid = \frac{s_0^2 \rho_{torkgods} (Fukthalt_{början} - Fukthalt_{slut}) \cdot \lambda_{sublimering}}{8 \cdot k_{torr} (T_{kammare} - T_{sublimering})} \quad (6)^{11}$$

(för beteckningar se bilaga 1).

Ovanstående torktider tar endast hänsyn till sublimeringen, dock är desorptionsfasen också mycket tidskrävande och måste därför beaktas. Desorptionen utgör generellt 30-50 % av den totala torktiden.<sup>12</sup>

För att påskynda torkförloppet kan främst de faktorer som påverkar den drivande kraften maximeras. Kondensorns temperatur kan sänkas så mycket som möjligt, trycket i kammaren kan sänkas till lägsta möjliga (vakuüm) och slutligen kan temperaturen på brickorna höjas till precis under smältpunkten. Temperaturen bör dock höjas med viss försiktighet för att undvika att produktens cellstruktur förstörs eller att proteiner och näringsämnen denaturerar.

<sup>9</sup> Fellows, P., Food processing technology principles and practice, second edition, 2000, 22.1.1

<sup>10</sup> Kessler, H.G., Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology, 2002, 293

<sup>11</sup> Fellows, P., Food processing technology principles and practice, second edition, 22.1.1

<sup>12</sup> Nastaj, J.F., Ambrozel, B., Modeling of Vacuum Desorption in Freeze-Drying Process, *Drying Technology*, 2005, 23; 1693-1709

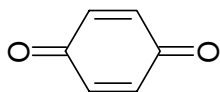
### 3. Frystorkning av äpplen

Då frystorkningsprocessen appliceras på äpplen är det viktigt att tänka på att produkten ser aptitlig ut. En viktig aspekt som då måste beaktas är hur missfärgning kan undvikas.

En annan aspekt som kan vara av intresse är att mäta andelen lösliga substanser i äpplets fruktsaft, en så kallad Brixmätning. Detta är användbart för den händelse att forskargrupper skulle vilja upprepa försöken och jämföra resultat. Då olika äppelsorter har olika mängd lösta substanser kan detta medföra att resultaten skiljer sig något från en äppelsort till en annan.

#### 3.1 Missfärgning

Det är viktigt att bearbetning av äppelbitarna genomförs så snabbt som möjligt innan infrysning så att en missfärgning ej hinner ske. Då äpplet skivas förstörs äpplets celler vilket leder till att enzymet polyfenoloxidas (fenolas) läcker ut och kommer i kontakt med luft. Katalyserat av luftens syre kan fenolas reagera med ofärgade polyfenoler i äpplet och oxidera dessa till kinoner, närmare bestämt o-benzokinon som har en svagt gulaktig färg, se figur 6.<sup>13</sup>



Figur 6. O-benzokinon

Kinon polymeriseras och bildar melanin vilket ger äpplet dess karakteristiska bruna missfärgning. Melanin är det ämne som bildas hos människan då man utsätts för sol och ger en mörkare hudton. Oxidationen avbryts vid infrysningen, men kan återupptas då temperaturen höjs under torkningen. Fenolas kräver temperaturer kring 90-95°C för att denatureras, och därmed inaktiveras. Dessa temperaturer uppnås dock aldrig vid frystorkning och en eventuell missfärgning måste därför tas i beaktning. Enzymet inaktiveras även av en rejäl pH-sänkning (pH 3) vilket kan åstadkommas genom att tillsätta askorbinsyra (C-vitamin). Detta kan dock ha viss påverkan på smaken. Ytterligare ett alternativ är att blötlägga äpplena i vatten direkt efter uppskärning och på så sätt hindra syre från att komma i kontakt med enzymet.<sup>13</sup>

#### 3.2 BRIX

Brixgrader är ett mått på tätheten hos en vätska och kan mätas med hjälp av ett instrument som kallas ljusrefraktometer. En vätskedroppe placeras på ett glas i instrumentet. Då ljus går igenom glaset, bryts det av och brytningen kan sedan relateras till hur mycket lösta partiklar som förekommer i lösningen. Enheten brixgrader är kalibrerad mot sockerlösningar med känd koncentration och en brixgrad motsvarar en procent löst socker i vatten vid 20°C. Vid mätning av brixgrader kommer andra lösta partiklar att påverka det erhållna värdet, man brukar därför ta hänsyn till detta med hjälp av omräkningstabeller för förhållandet mellan sockerhalten och totalhalten av lösta partiklar.<sup>14</sup>

<sup>13</sup> <http://it.civil.auc.dk/it/milvus/merkurius/livsmedelsteknik/kompendium/kap6.html> 2006-03-16

<sup>14</sup> Orange Book, Tetra Pak Processing Systems AB, second edition 2004, 20-21

## 4. Simulering

Vid optimering av en frystorkningsprocess krävs ett flertal experiment. För att få en uppfattning om tidsåtgången till varje enskilt försök gjordes tre olika simuleringar i Matlab med varierande temperaturgradienter. Aktuella m-filer återges i bilaga 2.

### 4.1 Simulering med avseende på värmetransport

Sublimering sker endast då is finns kvar, varefter desorption tar vid. Tiden för sublimeringen bestäms med hjälp av följande ekvation:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{(4 \cdot k_d \cdot (T_{kammare} - T_{sublimering}))}{(\rho_{apple} \cdot (M_1 - M_2) \cdot \lambda_{sublimering} \cdot z)} \cdot 3600 \quad (m \cdot h^{-1}) \quad (7)^{15}$$

(för beteckningar se bilaga 1).

Ekvationen beskriver torksträckan (det vill säga hur långt mot äppelskivornas centrum isfronten har förflyttats) som funktion av tiden, där  $z$  är sträckan (m). Ur ekvationen framgår att den drivande kraften är temperaturdifferensen mellan temperaturen i kammaren och temperaturen vid isytan. Det är dock viktigt att tänka på att en för hög temperatur på värmeplattorna leder till att isen i äpplet smälter. För att förhindra detta används temperaturgradienter, där man börjar på en låg temperatur och sedan höjer den efterhand. På så vis ökar den drivande kraften i takt med att vattenhalten i äppelskivorna minskar under torkförloppet. Detta ger en effektivare torkning. För att få en bra bild av torkförloppet väljs temperaturgradienterna  $1^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $5^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  samt  $10^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ .

För resultat av simuleringen se tabell 1 och figur 7.

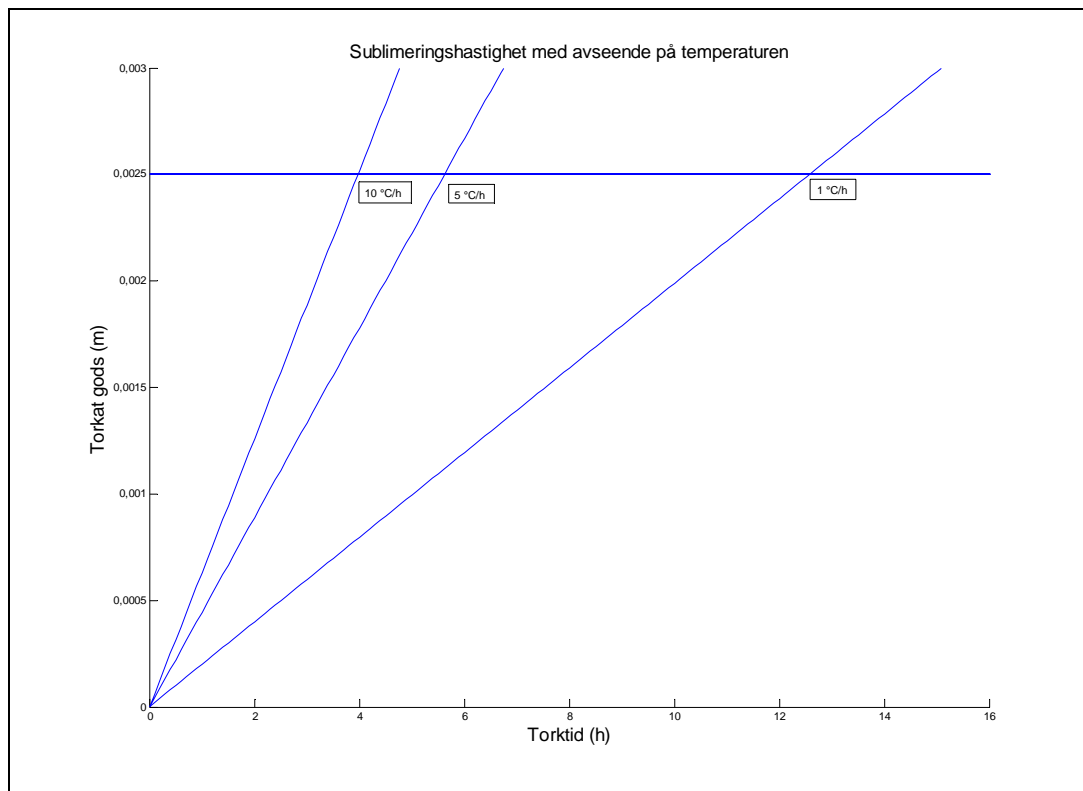
**Tabell 1.** Simulering med avseende på temperaturen gav följande tider för sublimering

Temperaturgradient ( $^\circ\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ )	Tid för sublimering (h)
1	12,6
5	5,6
10	4

För att uppnå en slutlig fukthalt på runt 2 %, måste extra tid för desorption adderas till tiden för sublimering. Desoptionsfasen antas vara 33 % av det totala torkförloppet.<sup>16</sup> Detta innebär att hälften av den beräknade tiden läggs till tiden för sublimering och de totala torktiderna blir därför 19, 8,25 samt 6 timmar.

<sup>15</sup> Fellows, P., Food processing technology principles and practice, 2000, second edition, 22.1.1

<sup>16</sup> Nastaj, J.F., Ambrozel, B., Modeling of Vacuum Desorption in Freeze-Drying Process, *Drying Technology*, 2005, 23; 1693-1709



Figur 7. Torksträckan som funktion av tiden

## 4.2 Simulering med avseende på trycket

Antagandet att temperaturen och ej trycket är den begränsande faktorn för torkningen bevisades genom ytterligare en simulering.

Tiden för sublimering bestäms med hjälp av följande ekvation:

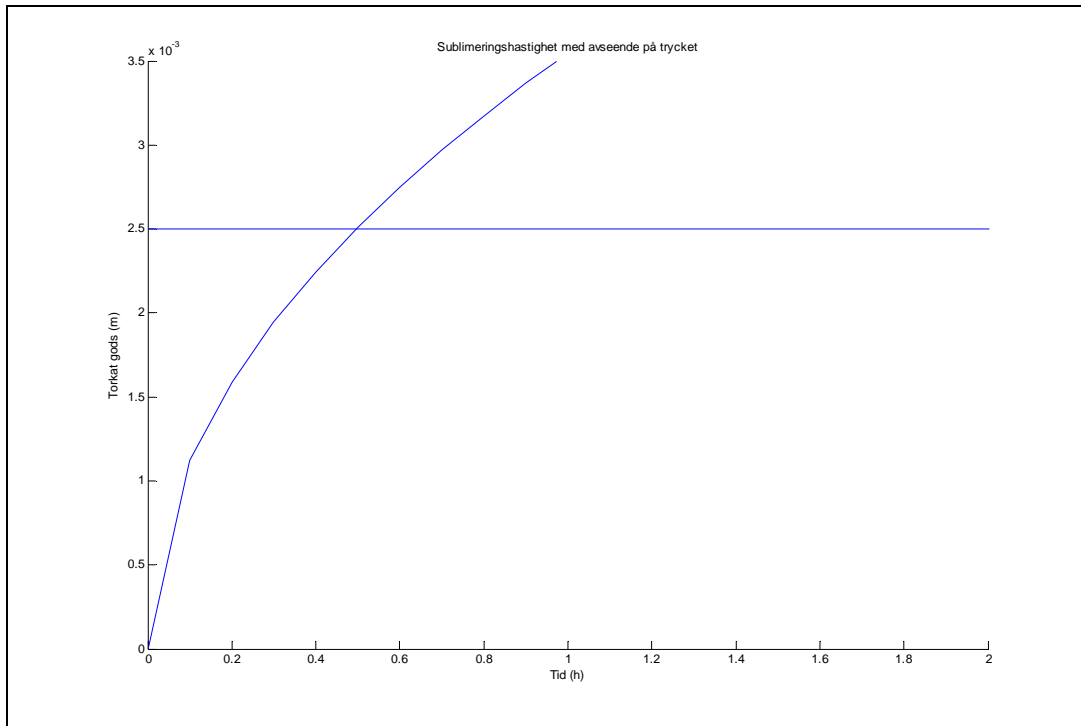
$$\frac{dz}{dt} = \frac{b}{\mu} \cdot \frac{(P_{sublimering} - P_{kammare}) \cdot 2}{(\rho_{äpple} \cdot \varepsilon \cdot z)} \quad (8)^{17}$$

(för beteckningar se bilaga 1).

Ekvationen beskriver torksträckan som funktion av tiden. Ur ekvationen kan ses att den drivande kraften är skillnaden i tryck vid isfronten och vid äppelytan. Genom att sänka trycket i vakuumkammaren minskar trycket vid äpplets yta vilket ger en större drivande kraft, detta ger då ett snabbare torkförlopp. Även här kan en gradient användas, därmed ökas tryckskillnaden efterhand, se figur 8.

Anmärkning: Labconco Lyph-Lock 18 har ett konstant tryck av 13 Pa i torkkammaren. ( $P_{kammare}$  i ekvation 8)

<sup>17</sup> Kessler, H.G., Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology, 2002, 291



**Figur 8.** Torksträckan som funktion av tiden

Tiden för sublimering med avseende på trycket bestäms till 0,48 h, se figur 8.

### **4.3 Slutsats av simuleringarna**

Genom att studera simuleringarna dras slutsatsen att temperaturen är hastighetsbestämmande vid frystorkningen, vilket tidigare antagits. Därför baseras försöken på temperaturgradienterna,  $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  samt  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ .

## 5. Utförande

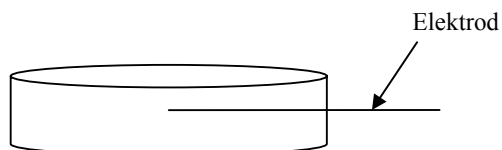
Gruppen genomförde tre frystorkningar. Den svenska äppelsorten Elise användes i samtliga försök. Denna sort valdes på grund av dess storlek, då en stor diameter behövs för att ej få med skal och kärnhus vid stansning av äppelskivor. Varje torkning delades in i följande fyra moment:

- Förberedelser
- Infrysning
- Frystorkning
- Efterarbete

### 5.1 Förberedelser

Försöket sattes igång genom att frysen, vilken användes för infrysning av äppelskivor, startades enligt manual. Efter detta kontrollerades alla elektroder som skulle användas till temperaturregistrering under både frysning och frystorkning. För att underlätta insättning av elektroderna stacks det hål i frukten med en synål och elektroderna kunde sedan placeras från sidan till skivornas mitt, se figur 9. Elektroderna kunde därefter kopplas till en dator. Äpplena skivades med hjälp av en skärmaskin till 5 mm tjocka skivor och identiska cirklar med diametern 30 mm stansades ut. 40 stycken äppelbitar placerades på ett tråg med nätbotten. I ett av försöken skars äpplena i 10 mm tjocka skivor och då användes endast 13 bitar. Tråget vägdes både med och utan skivor för att sedan sättas in i frysen.

Frystorken startades efter bruksanvisning. Torkprogrammet programmerades efter manual så att temperaturen skulle avläsas varje minut och stiga med önskat intervall.



**Figur 9.** Elektrodens placering

Brixmätning utfördes genom att pressa ut äppelsaft med en vitlökspress för att sedan applicera vätskan i brixmätaren. Totalt tog förberedelserna cirka 30 minuter.

### 5.2 Infrysning

Då frysen hade nått den önskade temperaturen  $-30^{\circ}\text{C}$  placerades tråget med äppelbitarna och elektroder i frysen. Det tog en timme för frysen att nå  $-30^{\circ}\text{C}$  och infrysningen tog därefter drygt 30 minuter.

### 5.3 Frystorkning

För att bibehålla lägsta möjliga temperatur i äpplena efter infrysning fördes de snabbt över till frystorken, som startades enligt manual. Vid de olika försöken höjdes temperaturen med antingen 1, 5 eller  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ .

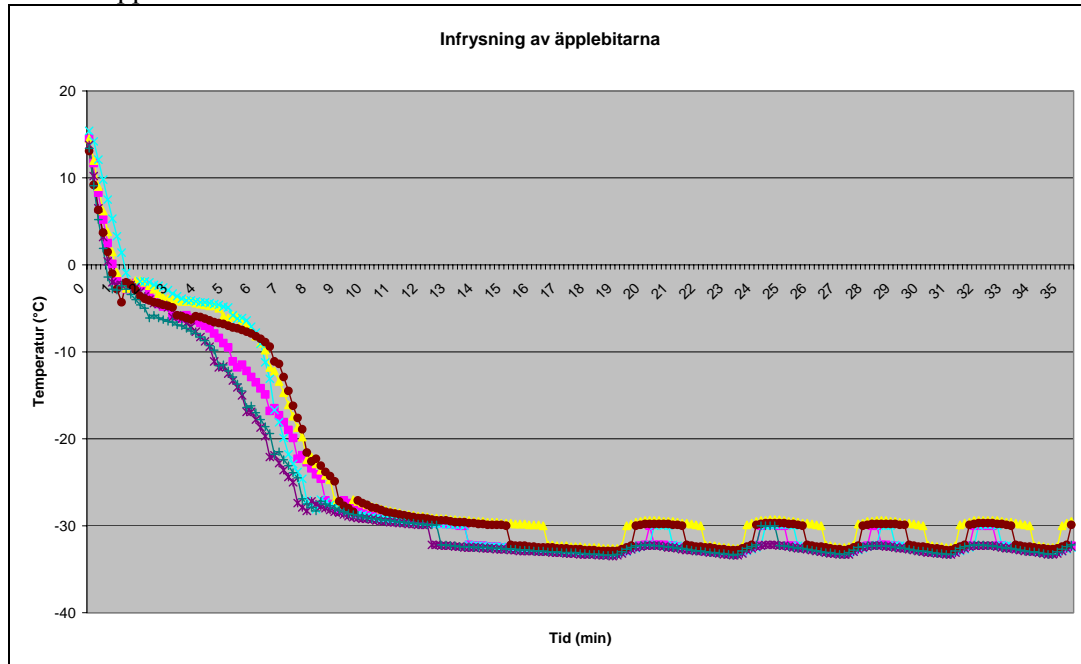
## **5.4 Efterarbete**

Efter frystorkningen vägdes trägen med äppelskivorna. Vissa bitar användes för återfuktning under 2 minuter vid 50 respektive 100°C. Frukten placerades först i en petriskål och vägdes innan uppvärmt vattnet tillsattes. Skivorna vägdes därefter igen, för att sedan smakas av. För att ta reda på ursprunglig fukthalt hämtades metallskålar från en excikator och vägdes med och utan frukt, därefter torkades de fullständigt torra i en ugn och vägdes sedan igen. Resterande äppelbitar placerades i återförslutningsbara burkar.

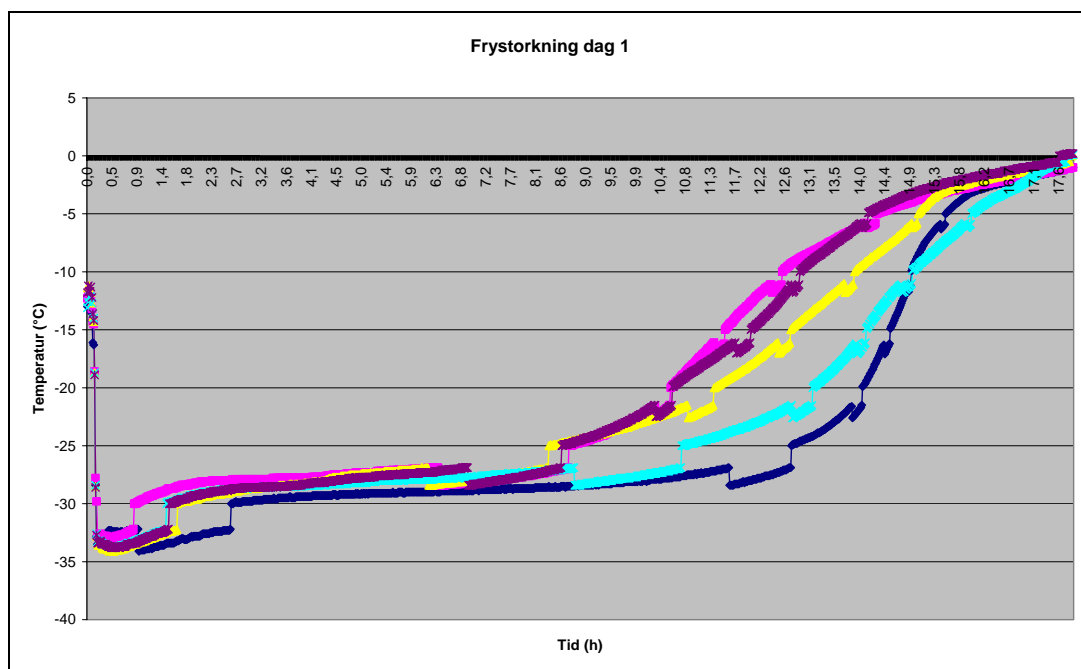
## 6. Resultat och diskussion

### 6.1 Torkningsförlopp

Nedan presenteras experimentella data för infrysning, försök 1, samt frystorkning för de tre olika försöken. Data registrerades med hjälp av fem elektroder, placerade i slumpmässigt utvalda äppelskivor.

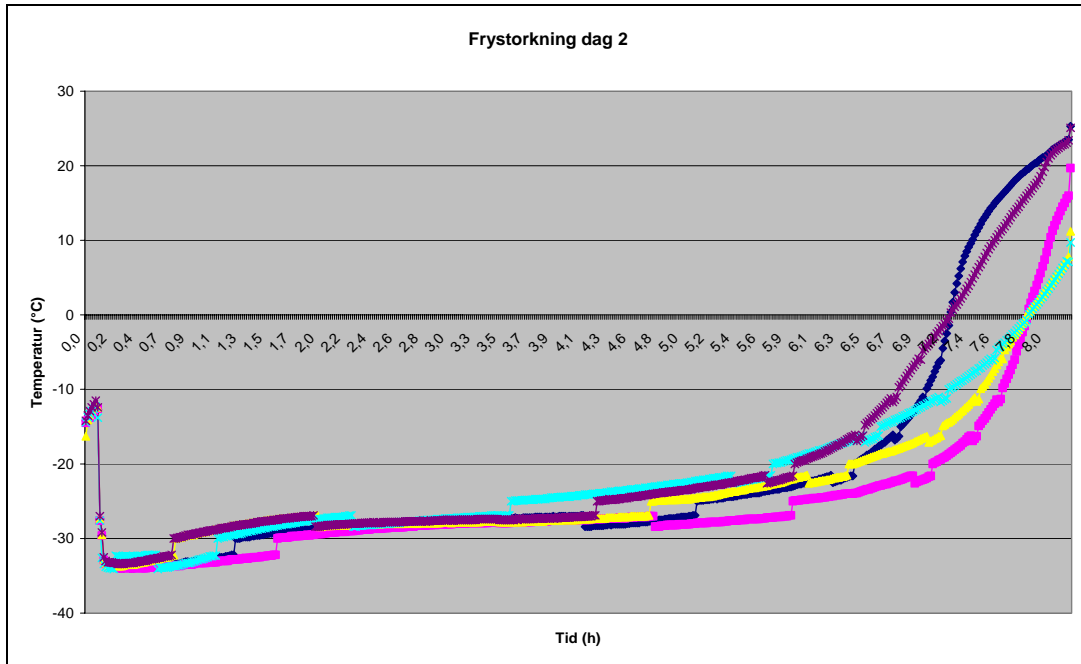


Figur 10. Temperaturprofil under infrysningsförloppet, försök 1.

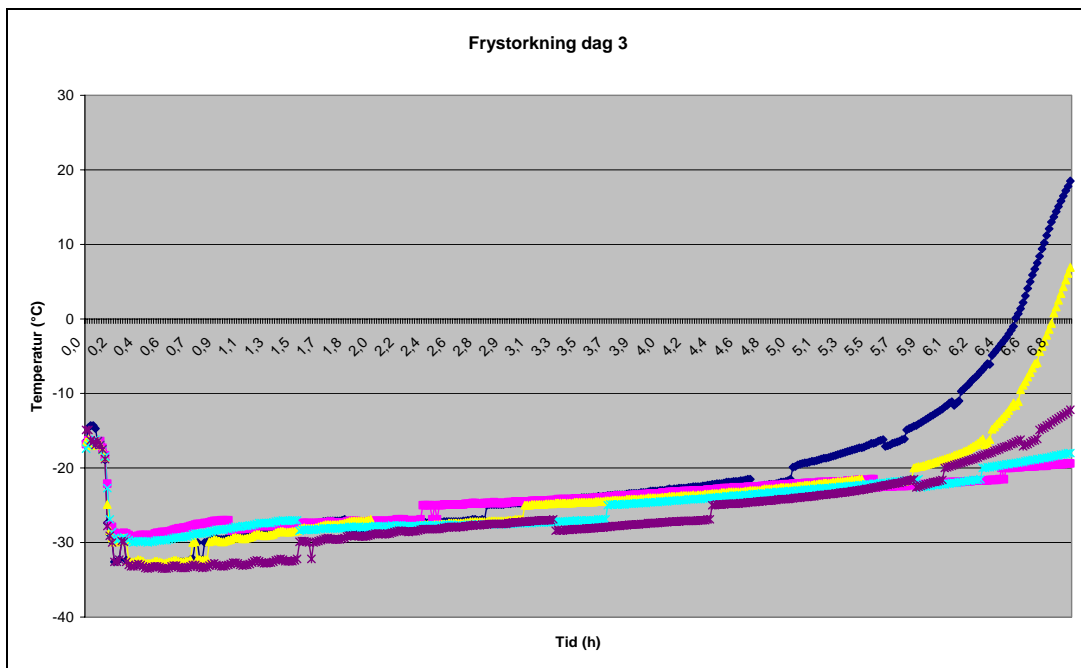


Figur 11. Temperaturprofil under frystorkningsförloppet, försök 1.





**Figur 12.** Temperaturprofil under frystorkningsförloppet, försök 2.



**Figur 13.** Temperaturprofil under frystorkningsförloppet, försök 3.

Äppelbitarna frystes ned inför varje försök till en temperatur på mellan 30-35°C, se figur 10. Infrysningsförloppets första fas visar sänkningen av vattnets temperatur till 0°C, därefter går all tillförd energi åt till bildning av iskristaller. Efter kristallbildningen sjunker temperaturen i frukten kraftigt tills frysens temperatur nås.

Frystorkningsförloppet ser likartat ut för de tre försöken, se figur 11, 12 och 13. När äppelskivorna förflyttas från frys till frystork, värms de upp till ungefär -15°C. Vid insättning

i frystorken börjar isen på ytan av skivorna att sublimera och temperaturen i äppelskivorna sjunker eftersom energin till sublimeringen tas från äpplet. Detta fenomen kan förklara att temperaturen i äppelbitarna sjunker kraftigt i början av frystorkningsprocessen. Temperaturen ligger sedan relativt konstant mellan  $-25$  och  $-30^{\circ}\text{C}$  under sublimeringsfasen. Under denna period går all energi åt till att sublimera isen i äppelbitarna. Därefter inträffar ett tydligt uppvärmningsförlopp då desorption sker. Enligt figur 11 inträffar desorptionsfasen vid cirka 11 h. Enligt simulering borde desorptionsfasen börja vid 12,6 h. För försök 2, se figur 12, är motsvarande tid 5 till 6 timmar, vilket stämmer mycket bra överens med simuleringens resultat på 5,6 h. Desorptionsförloppet inleds vid 4 till 5 timmar i försök 3, se figur 13. Även detta resultat överensstämmer med det för simuleringen, värt att notera är att tre av elektroderna är placerade i 10 mm tjocka skivor. Sammanfattningsvis kan konstateras att de simulerade tiderna i stort sett överensstämmer med experimentella data även om det är svårt att utläsa ur graferna exakt var desorptionen börjar. Det kan inte med säkerhet sägas att tiden för sublimering i försök 1 ej överensstämmer med simuleringen endast baserat på dessa data.

## 6.2 Fukthaltsbestämning

Äpplenas ursprungliga fukthalt sattes i simuleringen till 85 %, enligt källa från Livsmedelsverket<sup>18</sup>. Enligt beräkningar efter frystorkning verifierades detta antagande, se tabell 2.

I försök 1, 2 och 3a har 5 mm tjocka skivor torkats, medan det i 3b använts 10 mm tjocka bitar.

**Tabell 2.** Fukthalt före och efter frystorkning

	Fukthalt före torkning (vikt-%, ww)	Fukthalt efter torkning (vikt-%, ww)
Försök 1 ( $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ )	85	9,0
Försök 2 ( $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ )	85	7,6
Försök 3a ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ )	85	9,2
Försök 3b ( $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ )	86	64

Trots att simuleringen för torkprocessen är enkel och bygger på flera antaganden och approximationer, stämmer de simulerade och verkliga resultaten förhållandevis bra överens. Målet för frystorkningen var att uppnå en slutlig vattenhalt på cirka 2 %. De experimentella fukthalterna beräknades till mellan 7,6 till 9,2 % (tabell 2, bilaga 3 och 4). En av anledningarna till att torkningsresultaten ej når önskad vattenhalt kan vara att desorptionsfasen tar längre tid än uppskattat. Enligt uppgift utgör desorptionsfasen mellan 30–50 % av det totala torkförloppet.<sup>19</sup> Då äpplena på grund av hög vattenhalt förmodas anta en porös struktur, vilket medför ett lågt motstånd för uttransport av vattenånga, valdes tiden för desorptionsfasen till 33 % av torkningen. Med avseende på erhållna resultat tycks antagandet angående desorptionstiden vara något lågt. En annan möjlig orsak till att resultaten avviker är att värmetransporten från plattorna i frystorken ej är likvärdig på över- och undersidan av

<sup>18</sup> [http://www.slv.se/templates/LDB\\_Search.aspx?id=6242](http://www.slv.se/templates/LDB_Search.aspx?id=6242) 2006-03-13

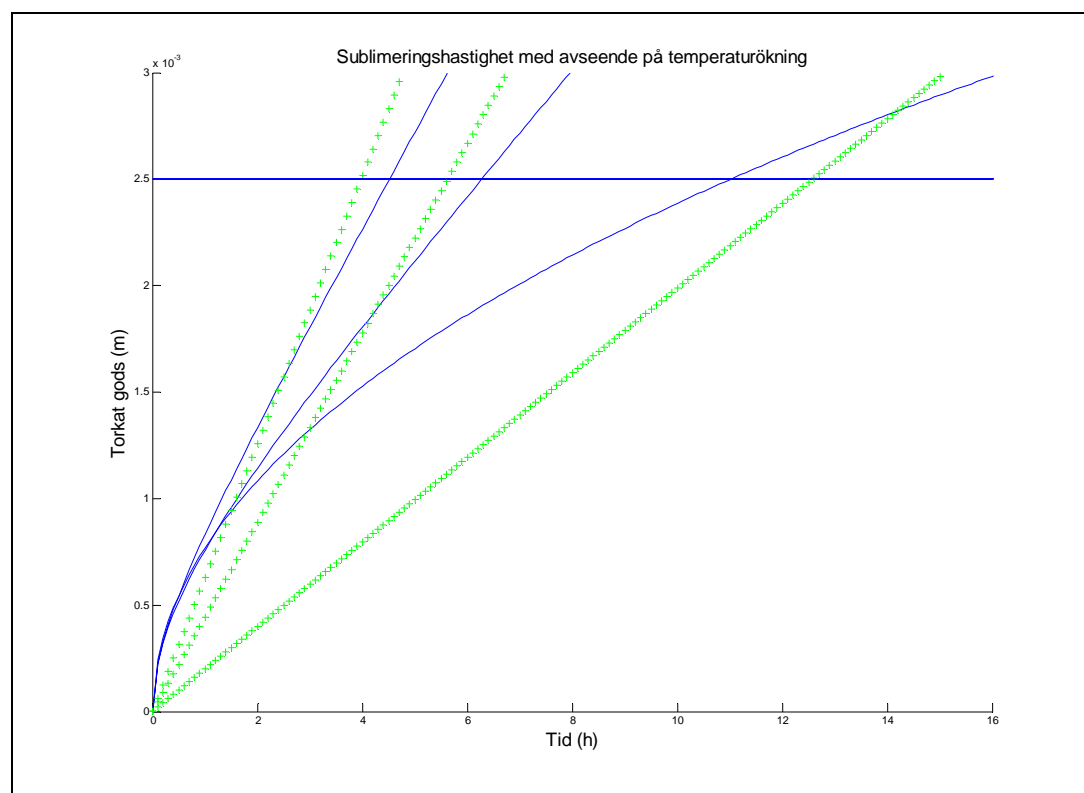
<sup>19</sup> Nastaj, J.F., Ambrozel, B., Modeling of Vacuum Desorption in Freeze-Drying Process, *Drying Technology*, 2005, 23; 1693-1709

äppelskivorna. Detta kan bero på det stagnanta luftskikt som existerar mellan ovansidan på frukten och den övre plattan.

Försök 3a och 3b genomfördes under samma betingelser, men den dubbla tjockleken i 3b gav upphov till ett mycket sämre resultat där en slutgiltig fukthalt på 64 % erhöles. Detta visar att torkgodsets tjocklek, vilket tidigare konstaterats i teorin, har stor betydelse.

### 6.3 Optimering av simulering

För att ytterligare optimera den framtagna modellen, har de experimentella värdena på temperaturen i äppelbitarna använts i simuleringen. Ett linjärt samband för temperaturens förändring över tiden har bestämts. Detta samband har sedan använts i Matlabsimuleringen. Ett nytt  $k_d$ -värde, vilket ger ett resultat som bättre stämmer överens med utförda försök, har därmed kunnat fastställas. Då  $k_d$ -värdet är specifikt för äppelsorten förekommer samma värde för alla tre försöken. Detta värde bestämdes till  $0,021 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .<sup>20</sup> Figur 13 illustrerar hur väl den nya simuleringen överensstämmer med experimentella data.



Figur 14. Jämförelse av värden från ursprunglig (grön) och korrigerad (blå) simulering

### 6.4 Återfuktning och sensorisk analys

De torra äppelskivorna undersöktes strukturmässigt. Bitarna från försök 1 visade sig vara mjuka och böjbara. Försök 2 uppvisade något stelare skivor, dock fortfarande ganska smidiga. Däremot var bitarna från försök 3 hårda och sköra, och gick lätt sönder.

Återfuktningstest av äppelskivorna utfördes vid 50°C och 100°C. Återfuktning vid 50°C genomfördes eftersom det är av intresse att jämföra dessa värden med tidigare publicerade

<sup>20</sup> Harper, J.C., *A.I. Ch.E. Journal*, 8 (3), 1962, 298-302

data i en forskningsrapport av Hammami et al.<sup>21</sup> Tester vid 100°C utfördes eftersom det ur praktisk synpunkt ansågs lämpligast då kokande vatten är lättast att tillsätta vid friluftaktiviteter.

**Tabell 3.** Resultat av återfuktning

	Fukthalt vid 50°C (g·g <sup>-1</sup> )	Fukthalt vid 100°C (g·g <sup>-1</sup> )
Försök 1	0,34	0,35
Försök 2	0,34	0,37
Försök 3a	0,39	0,35

Inga återfuktningstest utfördes för försök 3b (10 mm skivor), då dessa var så dåligt torkade att de inte höll sig fräscha till tidpunkten då smakanalysen genomfördes. Ungefär lika stora mängder vatten togs upp vid 50°C som vid 100°C, se tabell 3 och bilaga 5. Återfuktningstest i forskningsrapporten gav en upptagen vattenhalt på 0,50 – 0,60 g·g<sup>-1</sup> (gram återupptaget per gram borttorkat vatten).<sup>21</sup> En genomgående lägre fukthalt (0,35 g·g<sup>-1</sup>) konstaterades för genomförda experiment. Detta beror förmodligen på den lägre fukthalt (cirka 1 %) som uppnåddes i Hammamis rapport. Torrare äpplen kan naturligtvis även ta upp mera vatten vid återfuktning.

Brixmätare användes för mätning av lösliga substanser i fruktsaften. Mätningen gav ett resultat av 14 % lösliga substanser. Motsvarande värde för den äppelsort som använts i Hammamis studie (French Golden Delicious från Val de Loire) var 16,1 % lösliga substanser. Detta kan vara en annan förklaring till att återupptagen mängd vatten skiljer sig.

Efter frystorkning kontrollerades äppelbitarnas smak och konsistens genom återfuktning i två minuter vid två olika temperaturer, 50°C och 100°C.

Äppelbitarna från försök 1 hade bruna fläckar, ”slemmig” konsistens och endast en svag smak av äpple vid återfuktning av en temperatur på 50°C. Motsvarande test vid 100°C gav inga bruna fläckar. Bitarna var krispiga och hade en god och relativt fyllig äppelsmak. Rehydrering vid 50°C av äppelskivorna från försök 2 resulterade i en fin färg. Skivorna var godare och krispigare än motsvarande test i försök 1. Då kokande vatten användes erhöles godare och mustigare smak än för samma försök vid lägre temperatur. Äppelskivorna hade även en bra konsistens. Återfuktning av äpplen i försök 3 vid en temperatur på 50°C fick något slemmiga och bruna bitar. Äppelbitarnas konsistens var sämre vid 100°C än vid lägre temperatur. Färgen såg dock bra ut och äppelsmaken var god.

Vid den sensoriska analysen konstaterades att samtliga återfuktningar av skivor från de tre olika försöken vid 100°C gav naturligt färgade, goda samt väldoftande äpplen. Återfuktning av frukt vid 50°C frambringade missfärgade bitar med sämre doft, smak och konsistens (med undantag av försök 3, då konsistensen blev bättre vid en lägre temperatur). Den låga temperaturen gör att enzymet fenolas inte inaktiveras, därmed oxideras fenolerna och kinonerna polymeriseras i äpplet, detta orsakar missfärgningen. Den försvagade doft- och

---

<sup>21</sup> Hammami, C., René, F., Marin, M., Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response surface method. *International Journal of Food Science and Technology* 1999, 34, 145-160. Issn: 09505423

smakupplevelsen tros vara kopplad till en minskad frigörelse av aromämnen vid en lägre temperatur. Vid en högre temperatur upplevs mat i allmänhet aptitligare.

### **6.5 Felkällor**

Temperaturen i frystorken började stiga vid för lång infrysningsperiod. Detta innebär att uppstart av frystorkningen kan ha skett vid en något högre temperatur än beräknat. Vissa elektroder för temperaturmätning uppförde sig underligt. Vid försök 3 hade en extra torktimme lagts till för att äppelskivornas temperatur visade på att de inte nått desorptionsfas. Tiden för frystorkningen blev då 7 h istället för 6 h, som simuleringen visade. Elektroden var svåra att placera precis i äppelskivornas mitt. Dessa faktorer kan ha påverkat temperaturgrafernas utseende. En annan felkälla är att olika personer var involverade vid de olika försöken, reproducerbarheten blir då inte den bästa.

## 7. Slutsatser

Innan projektets början utformades ett antal hypoteser som under arbetets gång har kunnat verifieras. Matlabsimuleringar har bevisat att temperaturen är den faktor som begränsar torkförloppet. De försök som har genomförts visar att en längre torktid med lägre temperaturer ger en slutprodukt med bättre struktur.

Försöken har utförts på uppdrag av Grizzly Gourmet Foods AB. Företagets främsta krav är att produktens smak samt konsistens bevaras. Valet av frystorkningsprocess har därför baserats på dessa produkttegenskaper.

De tre försöken kan inte åtskiljas endast med avseende på smakförmåelse då likvärdiga resultat erhöles. Urvalsprocessen grundades istället på erforderlig tid för produktframställning samt äppelskivornas konsistens. Av de tre experiment som genomfördes värderas försök två högst. Det första försöket gav mjuka äppelskivor, något som är positivt ur förvarings- och transportsynpunkt. Processen tog dock överlägset längst tid, vilket medför den högsta produktionskostnaden. Försök tre däremot, gav hårda och bräckliga skivor som lätt smular sönder. Torkningsförloppet vid detta test stämde inte överens med simuleringen på ett tillfredsställande sätt, detta medförde att en extra timmes torkning erfordrades för att uppnå ett likvärdigt resultat som i försök ett och två. Vid den andra frystorkningen erhöles bitar av medelhård karaktär. Då den andra processen tar betydligt kortare tid än försök ett och utan att ge hårda bitar, som försök tre, samt följer simuleringen på ett bra sätt är denna att föredra.

Efter försöken har simuleringen optimerats för att anpassas till experimentella data och ett nytt  $k_d$ -värde som bättre stämmer överens med äppelsortens egenskaper har kunnat bestämmas.

Gruppens arbete har förflutit väl och den angivna tiden för projektet har utnyttjats optimalt. Vidare har utvärderingen av gruppens arbete genom handledda möten fungerat väl och hjälpt till att föra arbetet framåt. Problemen som uppstått under projektets gång har kunnat lösas på ett tillfredsställande sätt med ingenjörsmässiga tankegångar.

## 8. Källförteckning

### Litteratur

Fellows, P., Food processing technology principles and practice, second edition, 2000, 22.1.1

Hammami, C., René, F., Marin, M., Process-quality optimization of the vacuum freeze-drying of apple slices by the response surface method. *International Journal of Food Science and Technology*, 1999, 34, 145-160 Issn: 09505423

Harper, J.C., *A.I. Ch.E. Journal*, 8 (3), 1962, 298-302

Kessler, H.G., Food and Bio Process Engineering – Dairy Technology, 2002, 290-293

Nastaj, J.F., Ambrozel, B., Modeling of Vacuum Desorption in Freeze-Drying Process, *Drying Technology*, 2005, 23; 1693-1709

Orange Book, Tetra Pak Processing Systems AB, second edition 2004, 20-21

### Hemsidor

Chemistry coach:

[http://www.Chemistrycoach.com/Phase\\_diagram.html](http://www.Chemistrycoach.com/Phase_diagram.html), 2006-02-10

Livsmedelsverket:

[http://www.slv.se/templates/LDB\\_Search.aspx?id=6242](http://www.slv.se/templates/LDB_Search.aspx?id=6242), 2006-03-13

Ålborgs universitet:

<http://it.civil.auc.dk/it/milvus/merkurius/livsmedelsteknik/kompendium/kap6.html>, 2006-03-16

### Föreläsningskompendium

Föreläsningar Transportprocesser 2004, Lunds Tekniska Högskola, kapitel 7, 26

# Bilaga 1

## Beteckningar för konstanter och variabler

$q_{frys}$  = Värmetransport genom frusna lagret

$q_{torr}$  = Värmetransport genom torra lagret

$k_{frys}$  = Värmeöverföringskonstanten genom det frusna lagret

$k_{torr}$  = Värmeöverföringskonstanten genom det torra lagret

$k_d$  = Värmeledningstal för äpple

$T_{sublimering}$  = Sublimeringstemperaturen för aktuellt ångtryck det vill säga temperaturen vid isfronten

$T_{kammare}$  = Temperaturen på ytan av äpplet

$s_0$  = Tjocklek från start på det frusna lagret

$s$  = Tjockleken på det frusna lagret

$\rho_{äpple}$  = Äpplets densitet

$\varepsilon$  = Äpplets porositet

$b/\mu$  = Torra delens massöverföringsterm

$P_{sublimering}$  = Trycket vid isfronten

$P_{kammare}$  = Trycket vid äpplets yta

$M_1$  = Äpplets fukthalt med avseende på torrsvikt innan torkning

$M_2$  = Äpplets fukthalt med avseende på torrsvikt efter torkning

$\lambda_{sublimering}$  = Latent sublimationsentalpi

$z$  = Längd som äpplet har torkat

$V_1$  = Mängd vatten, vilket har försvunnit under frystorkning

$V_2$  = Mängd vatten, vilket har tagits upp under återfuktning



## Värden på konstanter och variabler

$$k_d = 0,0337 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°K}^{-1}\text{)}$$

$$T_{\text{kammaren}} = 251 + t \cdot g \text{ (°K)}, g \text{ är temperaturgradienten } \text{°K}\cdot\text{h}^{-1} \text{ och } t \text{ är tiden (h) från starten}$$

$$T_{\text{sublimering}} = -22 + 273 \text{ (°K)}$$

$$\rho_{\text{äpple}} = 787 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$$

$$M_1 = 5,67 \text{ (g}\cdot\text{g}^{-1} \text{ dw)}$$

$$M_2 = 0,176 \text{ (g}\cdot\text{g}^{-1} \text{ dw)}$$

$$\lambda_{\text{sublimering}} = (-0,0037 \cdot (T_{\text{sublimering}})^2 + 1,7502 \cdot T_{\text{sublimering}} + 2630,4) \cdot 1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$$

$$\frac{b}{\mu} = 45 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

$$P_{\text{isfront}} = 13 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{yta}} = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ (då temperaturen vid ytan är } -22\text{°C)}$$

$$\rho_{\text{äpple}} = 787 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\varepsilon = 0,85$$

## Bilaga 2

### Matlab-filer för simuleringar

#### Temperaturen som hastighetsbestämmande:

##### Main.m

```
function Main
tpsan=[0:0.1:24]; %Tiden är ett dygn
init=[0.000001]; %Torkningsförloppets början (m)
[t,z]=ode23(@under,tpsan,init);
hold on;
plot(t,z);
xlabel('Tid (h)');
ylabel('Torkat gods (m)');
title('Sublimeringshastighet med avseende på temperaturökning');
line ([0 24],[0.0025 0.0025])
```

##### Under.m

```
function dzdt=torktid(t,z)
dens=787.93; %densiteten för det frysta området
M1=5.67; %Fukttinhåll från början med avseende på d.w.
M2=0.176; %Fukttinhåll efter torkning med avseende på d.w.
Tyta=251.17+1*t; %Starttemperatur i kammaren med temperaturgradient
Tsub=251.17; %Sublimeringstemperatur vid isfronten
latvarme=(-0.0037*Tsub.^2+1.7502*Tsub+2630.4)*1000;
%latent sublimationsvärme
k=0.0337; %värmeledningstal i torkat område
dzdt=3600*4*k*(Tyta-Tsub)/(dens*latvarme*z*(M1-M2));
%Torkad sträcka som funktion av tiden. OBS addera en halvtimme för
vakuuminställning
```

#### Trycket som hastighetsbestämmande:

##### Main.m

```
function Main
tpsan=[0:0.1:24]; %Tiden är ett dygn
init=[0.000001]; %Torkningsförloppets början (m)
[t,z]=ode23(@under,tpsan,init);
hold on;
plot(t,z);
xlabel('Tid (h)');
ylabel('Torkat gods (m)');
title('Sublimeringshastighet med avseende på trycket');
line ([0 24],[0.0025 0.0025])
```

##### Under.m

```
function ekv=under(t,z)
dens=787; %Äpplets densitet
por=0.85; %Äpplets porositet
bgenommy=45*10^-9; %Den torra delens massöverföringsterm
pif=13; %Trycket vid isfronten (Pa)
pyt=1.21*10^-4; %Trycket vid ytan (Pa)
ekv=( (bgenommy) * (pif-pyt) *2) / (dens*por*z) *3600;
```

## Bilaga 3

### Mätvärden

Nedan presenteras samtliga resultat från de sex vägningar som utförts i samband med laborationen. I försök 1 höjdes temperaturen i frystorken med  $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ , i försök 2 med  $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$  och i försök 3 med  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ . Försök 3a hänvisar till standardexperiment med en skivtjocklek på 5 mm medan försök 3b gjordes med 10 mm tjocka äppelskivor.

Tabell 1. Vagningsresultat före frystorkning

Försök	Totalvikt (g)	Vikt per bit (g)
1 (40 bitar)	102,1	2,55
2 (40 bitar)	98,1	2,45
3a (40 bitar)	102,7	2,57
3b (13 bitar)	73,3	5,64

Tabell 2. Vagningsresultat efter frystorkning

Försök	Totalvikt (g)	Vikt per bit (g)
1 (40 bitar)	17,0	0,42
2 (40 bitar)	16,4	0,41
3a (40 bitar)	16,7	0,42
3b (13 bitar)	28,9	2,22

Tabell 3. Vagningsresultat före torkning i ugn

Försök	Totalvikt (g)	Vikt per bit (g)
1 (9 bitar)	3,782	0,42
2 (9 bitar)	3,591	0,40
3a (8 bitar)	3,444	0,43
3b (3 bitar)	7,027	2,34

Tabell 4. Vagningsresultat efter torkning i ugn

Försök	Totalvikt (g)	Vikt per bit (g)
1 (9 bitar)	3,481	0,39
2 (9 bitar)	3,410	0,38
3a (8 bitar)	3,103	0,39
3b (3 bitar)	2,388	0,80

Tabell 5. Vagningsresultat före återfuktning

Försök	Totalvikt (g)	Vikt per bit (g)
1 (5 bitar, $50^{\circ}\text{C}$ )	2,09	0,42
1 (5 bitar, $100^{\circ}\text{C}$ )	2,15	0,43
2 (5 bitar, $50^{\circ}\text{C}$ )	2,08	0,42
2 (5 bitar, $100^{\circ}\text{C}$ )	2,09	0,42
3a (3 bitar, $50^{\circ}\text{C}$ )	1,32	0,44
3a (3 bitar, $100^{\circ}\text{C}$ )	1,15	0,38

**Tabell 6.** Vägningsresultat efter återfuktning

<b>Försök</b>	<b>Totalvikt (g)</b>	<b>Vikt per bit (g)</b>
<b>1</b> (5 bitar, 50°C)	5,70	1,14
<b>1</b> (5 bitar, 100°C)	5,85	1,17
<b>2</b> (5 bitar, 50°C)	5,53	1,11
<b>2</b> (5 bitar, 100°C)	5,86	1,17
<b>3a</b> (3 bitar, 50°C)	3,81	1,27
<b>3a</b> (3 bitar, 100°C)	3,40	1,13

## Bilaga 4

### Beräkningar

#### Försök 1

##### Beräkning av äpplets ursprungliga fukthalt

Vikt av en äppelskiva före frystorkning:  $\frac{102,1}{40} g = 2,5525 g$  (tabell 1, bilaga 3)

Vikt av en äppelskiva efter torkning i ugn:  $\frac{3,4807}{9} g = 0,3867 g$  (tabell 4, bilaga 3)

$\frac{2,5525 - 0,3867}{2,5525} = 0,8485 \approx 85 \%$  (avdrivet vatten efter torkning i ugn, det vill säga äpplets totala vattenhalt, i förhållande till äpplets ursprungliga totalvikt)

##### Beräkning av äpplets fukthalt efter frystorkning (samt desorptionsförlopp)

Vikt av en äppelskiva efter frystorkning:  $\frac{17}{40} g = 0,425 g$  (tabell 2, bilaga 3)

Total vattenhalt i en äppelskiva före frystorkning:  $2,5525 \cdot 0,8485 = 2,1658 g$  (enligt beräknad procentsats ovan)

$\frac{2,1658 - (2,5525 - 0,425)}{0,425} = 0,0902 \approx 9 \%$  Total vattenhalt i äppelskiva före frystorkning

minus avdrivet vatten i frystorkningsprocessen ger total kvarvarande vattenmängd i en skiva. Division med äppelskivans totala vikt efter frystorkning ger skivans slutgiltiga fuktighetshalt.

#### Försök 2

##### Beräkning av äpplets ursprungliga fukthalt

Vikt av en äppelskiva före frystorkning:  $\frac{98,1}{40} g = 2,4525 g$  (tabell 1, bilaga 3)

Vikt av en äppelskiva efter torkning i ugn:  $\frac{3,4103}{9} g = 0,3789 g$  (tabell 4, bilaga 3)

$\frac{2,4525 - 0,3789}{2,4525} = 0,8455 \approx 85 \%$

##### Beräkning av äpplets fukthalt efter frystorkning (samt desorptionsförlopp)

Vikt av en äppelskiva efter frystorkning:  $\frac{16,4}{40} g = 0,41 g$  (tabell 2, bilaga 3)

Total vattenhalt i en äppelskiva före frystorkning:  $2,4525 \cdot 0,8455 = 2,0736 g$

$\frac{2,0736 - (2,4525 - 0,41)}{0,41} = 0,0759 \approx 8 \%$

### Försök 3a

#### Beräkning av äpplets ursprungliga fukthalt

Vikt av en äppelskiva före frystorkning:  $\frac{102,7}{40} g = 2,5675 g$  (tabell 1, bilaga 3)

Vikt av en äppelskiva efter torkning i ugn:  $\frac{3,1033}{8} g = 0,3879 g$  (tabell 4, bilaga 3)

$$\frac{2,5675 - 0,3789}{2,5675} = 0,8524 \approx 85 \%$$

#### Beräkning av äpplets fukthalt efter frystorkning (samt desorptionsförlopp)

Vikt av en äppelskiva efter frystorkning:  $\frac{16,7}{40} g = 0,4175 g$  (tabell 2, bilaga 3)

Total vattenhalt i en äppelskiva före frystorkning:  $2,5675 \cdot 0,8524 = 2,1885 g$

$$\frac{2,1885 - (2,5675 - 0,4175)}{0,4175} = 0,0922 \approx 9 \%$$

### Försök 3b

#### Beräkning av äpplets ursprungliga fukthalt

Vikt av en äppelskiva före frystorkning:  $\frac{73,3}{13} g = 5,6385 g$  (tabell 1, bilaga 3)

Vikt av en äppelskiva efter torkning i ugn:  $\frac{2,3879}{3} g = 0,7960 g$  (tabell 4, bilaga 3)

$$\frac{5,6385 - 0,7960}{5,6385} = 0,8588 \approx 86 \%$$

#### Beräkning av äpplets fukthalt efter frystorkning (samt desorptionsförlopp)

Vikt av en äppelskiva efter frystorkning:  $\frac{28,9}{13} g = 2,2231 g$  (tabell 2, bilaga 3)

Total vattenhalt i en äppelskiva före frystorkning:  $5,6385 \cdot 0,8588 = 4,8423 g$

$$\frac{4,8423 - (5,6385 - 2,2231)}{2,2231} = 0,6419 \approx 64 \%$$

## Bilaga 5

### Återfuktningsförsök

#### Försök 1

50°C: Vattenupptag per äppelskiva,  $V_1 = \frac{5,70 - 2,09}{5} g = 0,72 g$  att jämföras med

$V_2 = (2,55 - 0,42) g = 2,13 g$  vatten som drevs bort per äppelskiva. (tabell 1,2,5 och 6, bilaga 3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0,72}{2,13} g = 0,34 g \cdot g^{-1}$$

100°C: Vattenupptag per äppelskiva,  $V_1 = \frac{5,85 - 2,15}{5} g = 0,74 g$  att jämföras med

$V_2 = (2,55 - 0,42) g = 2,13 g$  vatten som drevs bort per äppelskiva. (tabell 1,2,5 och 6, bilaga 3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0,74}{2,13} g = 0,35 g \cdot g^{-1}$$

#### Försök 2

50°C: Vattenupptag per äppelskiva,  $V_1 = \frac{5,53 - 2,08}{5} g = 0,69 g$  att jämföras med

$V_2 = (2,45 - 0,41) g = 2,04 g$  vatten som drevs bort per äppelskiva. (tabell 1,2,5 och 6, bilaga 3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0,690}{2,04} g = 0,34 g \cdot g^{-1}$$

100°C: Vattenupptag per äppelskiva,  $V_1 = \frac{5,86 - 2,09}{5} g = 0,75 g$  att jämföras med

$V_2 = (2,45 - 0,41) g = 2,04 g$  vatten som drevs bort per äppelskiva. (tabell 1,2,5 och 6, bilaga 3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0,75}{2,04} g = 0,37$$

#### Försök 3a

50°C: Vattenupptag per äppelskiva,  $V_1 = \frac{3,81 - 1,32}{3} g = 0,83 g$  att jämföras med  $V_2 = (2,57 -$

$0,42) g = 2,15 g$  vatten som drevs bort per äppelskiva. (tabell 1,2,5 och 6, bilaga 3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0,830}{2,150} g = 0,39 g \cdot g^{-1}$$

100°C: Vattenupptag per äppelskiva,  $V_1 = \frac{3,40 - 1,15}{3} g = 0,75 g$  att jämföras med  $V_2 = (2,57 -$

$0,42) g = 2,15 g$  vatten som drevs bort per äppelskiva. (tabell 1,2,5 och 6, bilaga 3)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{0,75}{2,15} g = 0,35 g \cdot g^{-1}$$