

Kartläggning av processvariationer och optimering av värmebehandling i produktionen av gurkmix

Examensarbete i Kemiteknik av

Johan Hallbeck

2021-01-27



Avdelning för Teknisk mikrobiologi, Lunds Universitet

Examinator: Ed van Niel

Handledare Lunds universitet: Jenny Schelin

Handledare Orkla Food Sverige AB

Sead Sekizovic

Yi Lu

Pernilla Arinder

Förord

Detta examensarbete gjordes som ett samarbete mellan Orka Foods Sverige AB och Lunds universitet. Arbetet genomfördes hösten 2020 samt lite av våren 2021. De första månaderna av arbetet genomfördes på plats på Orkla i Eslöv men corona tvingade större delen av arbetet att bedrivas på distans.

Först vill jag tacka min handledare Jenny från LTH som varit ett värdefullt bollplank genom hela arbetet och gett mig många värdefulla sparkar i baken när skrivandet fastnade. Sen vill jag tacka alla mina handledare på Orkla. Sead Sekizovic och Yi Lu som hjälpte enormt att känna mig välkommen på fabriken i Eslöv. De har även varit ovärderliga bollplank och hjälpt mig hitta all information jag behövt från Orkla. Pernilla Arinder har också varit ett jätteviktigt stöd som har kommit med många värdefulla kommentarer på arbetet.

Jag vill även tacka Ingegerd Sjöholm och Hans Bolinsson från institutionen för Livsmedelsteknik på LTH för hjälp med mätningar av de fysikaliska parametrarna på gurkmix. Slutligen vill jag tacka familj och vänner för all hjälp och stöd jag fått under projektets gång.

Abstract

Cucumber relish is a classical Swedish product that is produced in large scale in an Automatic process. The goal of this project was to map the process variations and optimize the heating process. The heating process consists of one tubular heat exchanger where the cucumber relish is heated and one holding cell where it is kept warm. To be able to do that, the physical properties that affect the heating of cucumber relish were needed to be measured.

The properties that were measured were density, specific heat capacity, heat conduction and viscosity. The properties were measured on three different kinds of cucumber relishes. The results were compared to theoretical calculated values and the values were reasonable with a margin of error of 3-20 %.

Process variations were analyzed from actual process data from 6 different production dates. Average values and standard deviation was evaluated for the process data. It was found that the temperature measurements in the process had a margin of error of about 2 °C and the flow had a standard deviation of 10-20 % of the total flow.

A model of the process was produced with the measured physical properties and data from the process variation. Possible energy savings were calculated with the model and it was found that there were possible energy savings of up to 20 %.

Svensk sammanfattning

Gurkmix är ett klassiskt svenskt korvtillbehör som produceras storskaligt i en semiautomatisk process. Syftet med detta arbete var att kartlägga processvariationer i produktionsprocessen samt undersöka möjligheten att optimera uppvärmningsprocessen. Uppvärmningsprocessen består av en tubvärmväxlare där gurkmixen värms och en hållarcell där den hålls varm. För att kunna optimera processen krävdes det även att fysikaliska egenskaper som påverkar värmebehandlingen mättes för gurkmixen.

De fysikaliska egenskaper som mättes var densitet, specifik värmekapacitet, värmeledningstal och viskositet. Resultaten från mätningarna jämfördes med teoretiskt beräknade värden och det konstaterades att de uppmätta värdena var rimliga. Mätningarna hade en felmarginal på 3-20 %.

Processvariationer analyserades från faktisk processdata från 6 olika körningar. Medelvärde och standardavvikelse analyserades utifrån data från cirka 50 timmar aktiv produktion. Man kom fram till att produktens temperatur varierade ca 4-6 °C i processen. Den parameter med störst variation var produktflödet som hade en standardavvikelse motsvarande 10-20 % av det totala flödet. Den stora variationen var en kombination av variation i flödet och felmarginal i flödesmätningen.

En modell över värmebehandlingen konstruerades utifrån de uppmätta fysikaliska parametrarna samt data från processen. Modellen användes för att undersöka hur värmebehandlingen kunde energioptimeras. Tre sätt att optimera processen upptäcktes: Man kunde isolera hållarcellen, förlänga hållarcellen eller minska uppvärmningen. Alla tre åtgärder minskar temperaturen som man behöver värma gurkmixen till och sparar upp till 20 % energi tillsammans.

Innehåll

Kartläggning av processvariationer och optimering av värmebehandling i produktionen av gurkmix ..	1
Förord	2
Abstract	3
Svensk sammanfattning	4
1. Inledning.....	7
2. Syfte och mål	7
3. Teori.....	7
3.1. Värmebehandling av gurkmix.....	7
3.2. Värmebehandling av livsmedel	8
3.3. Mikroorganismer och validering	13
4. Material och Metod.....	16
4.1. Material	16
4.2. Värmekurva	16
4.3. Densitet	17
4.4. Värmeledningstal.....	18
4.5. Viskositet	19
4.6. Processvariation	19
4.7. Processoptimering.....	20
4.8. Beräkning av specifik värmekapacitet.....	20
5. Resultat.....	20
5.1. Densitet	21
5.2. Värmeledningstal.....	21
5.3. Värmekurvor.....	22
5.4. Specifik värmekapacitet	23
5.5. Viskositet	24
5.6. Processvariation	25
5.7. Simulering.....	27
6. Diskussion	29
6.1. Rimlighetsanalys av uppmätta fysikaliska konstanter.....	29
6.2. Processvariation	31
6.3. Reducering av mikroorganismer	32

6.4.	Jämförelse av empiriskt och teoretiskt beräknade värmegenomgångstal för värmeväxlaren.....	33
6.5.	Diskusson av modell över processen.....	33
6.6.	Jämförelse mellan olika typer av hållarcell	34
7.	Framtida arbete.....	34
8.	Slutsatser.....	34
9.	Källförteckning.....	36
10.	Appendix.....	37
10.1.	Beräkning av värmegenomgångstal för värmeväxlare.....	37
10.2.	Beräkning av specifik värmekapacitet.....	39
10.3.	Beräkning av mikrobiologisk avdödning vid normal produktion	42
10.4.	Optimering av tillverkningsprocessen	43

1. Inledning

För 100 år sedan gjordes i princip all mat från grunden i varje hushåll. Man köpte eller odlade råvaror som sedan förädlades hemma i köket. Idag dyker den mesta maten upp nästan färdiglagad på bordet eftersom att den har producerats storskaligt i en fabrik. Eftersom så många personer äter den mat som producerats storskaligt så måste producenten kunna garantera produkterna som säljs är säkra att äta. Detta görs genom noggrant styra tillverkningsprocessen för respektive livsmedel.

En produkt som många säkert känner igen från korvkiosker i hela Sverige är Gurkmix. När man äter sin korv med Gurkmix är det nog inte så många som tänker på hur den faktiskt har producerats. Gurkmix produceras storskaligt i en semiautomatisk process. I en produktionsprocess finns det alltid variationer som beror på produkt och utrustning. Denna variation måste kartläggas och uppdateras regelbundet för att vara till grund för optimering av tillverkningsprocessen och riskutvärdering. Kartläggningen kan användas för vidare arbete i optimering, validering och utveckling av processen.

2. Syfte och mål

Syftet med detta arbete var att kartlägga processvariationer i produktionsprocessen samt undersöka om det gick att optimera uppvärmningsprocessen.

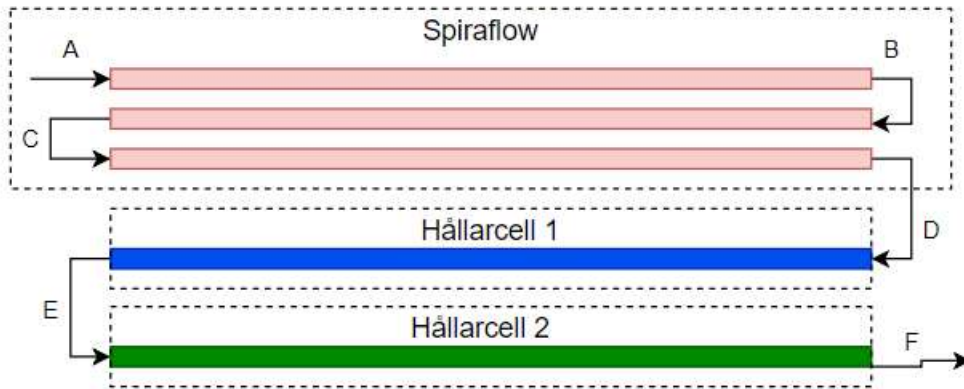
- Kartlägg värmebehandlingsprocessen och dess variationer
 - Gör en modell över uppvärmningsprocessen
 - Optimera processen utifrån kartläggning och variationer
 - Processen ska alltid uppnå tillräcklig reduktion av mikroorganismer
- Mät fysikaliska parametrar på olika slags gurkmix
 - Hur förändras densitet, specifik värmekapacitet, värmeledningstal och viskositet i temperaturintervallet 15-90 °C?

3. Teori

Avsnittet innehåller information om Värmebehandlingsprocessen för Gurkmix, relevanta mikroorganismer att beakta samt validering av processteg.

3.1. Värmebehandling av gurkmix

På Orkla Foods Sverige i Eslöv produceras en rad olika varianter gurkmix som är ett populärt tillbehör på många svenska middagsbord. Värmebehandlingen kommer vara fokus i detta projekt och därför visas en schematisk bild över värmebehandlingsprocessen i Figur 1. Innan gurkmix värmebehandlas hackas gurka och blandas med övriga ingredienser.



Figur 1. Visar schematiskt värmeväxlare och hållarceller. A: kall gurkmix delas upp i sju mindre rör när den går in i värmeväxlaren. B och C: gurkmixen går ihop till ett rör som svänger tillbaka in i värmeväxlaren. D: Gurkan från de sju rören går ihop igen och här mäts temperaturen efter värmeväxlaren. E: Här mäts temperaturen efter hållarcell 1. F: Här finns i dagsläget bara en analog termometer som mäter temperaturen innan den går vidare till indunstning.

Först värms gurkmixen i en tubvärmeväxlare. I tubvärmeväxlaren värms gurkmixen upp med motströms flödande ånga. I värmeväxlaren delas gurkan upp i sju stycken rör som är omslutna av ett större rör där ångan flödar i motsatt riktning. Efter värmeväxlaren finns det en hållarcell som består av ■■■ oisolerade rör där värmen sjunker. Hållarcellen är uppdelad i hållarcell 1 som består av ■■■ rör och hållarcell 2 som består av ■■■ rör. Värmebehandlingen har två effekter på gurkmixen, dels så reduceras mängden mikroorganismer till en acceptabel nivå också ändras konsistensen på gurkmixen. Efter värmebehandlingen justeras vatteninnehållet med en indunstare innan gurkmixen förpackas[1]

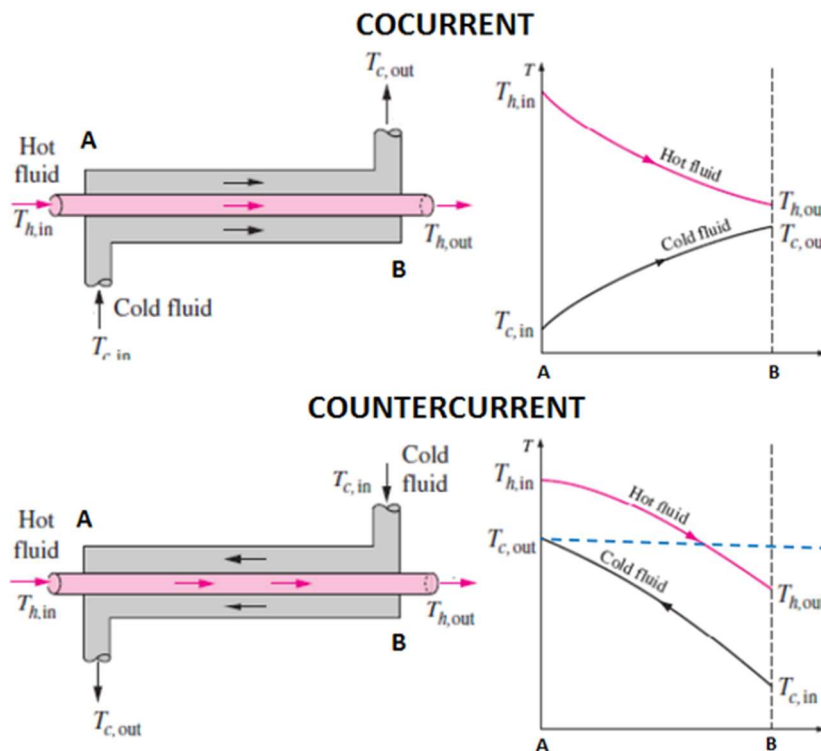
3.2. Värmebehandling av livsmedel

Livsmedel kan värmebehandlas på många olika sätt (t.ex. stekning, pastörisering, kokning) som alla både påverkar en rad parametrar på produkten såsom (konsistens, smak, utseende) men påverkar även antalet levande mikroorganismer i produkten.

För att kunna optimera värmebehandlingen är det viktigt att känna till fysikaliska parametrar såsom, densitet, specifik värmekapacitet, värmeledningstal, och viskositet för produkten samt hur själva värmeväxlaren är konstruerad.

3.2.1. Tubvärmeväxlare

Värmeväxlare är ett bra och energieffektivt sätt att hetta upp eller kyla ner en fluid som ofta används inom livsmedelsindustrin. Den enklaste värmeväxlaren är en tubvärmeväxlare som principiellt ser ut som Figur 2. De flesta värmeväxlarna är installerade motströms vilket innebär att den varma och kalla fluiden flödar åt olika håll, detta eftersom att effektiviteten för motströms värmeväxlare är bättre än medströms. Detta kan tydligt ses i temperaturprofilerna för de båda typerna av värmeväxlare i Figur 2. [2]



Figur 2. Schematisk bild över medströms (ovan) och motströms (nedan) tubvärmeväxlare samt deras temperaturprofiler.

I medströms Värmeväxlare är det omöjligt att värma den kalla fluiden varmare än utgångstemperaturen på den varma fluiden vilket är möjligt i motströms värmeväxlare. Det kan man tydligt se i temperaturprofilerna i Figur 2. Den varma fluiden kan antingen vara en varmare vätska eller en ånga som kondenserar. I produktionen av gurkmix värms gurkmixen med ånga. [2]

Den överförda energin föruppvärmningen av gurkmix ges av entalpiskillnaden vilken beskrivs av följande Ekvation 1.

$$(1) \quad Q = w_1 c p_1 \Delta_1 = w_2 \Delta H_{vap} + w_2 c p_2 \Delta_2 = k A \overline{\Delta T}_L$$

Indexen 1 och 2 motsvarar gurkmix och ånga respektive. Q är den överförda värmen, w är massflödet, cp är den specifika värmekapaciteten för vätskan, Δ är temperaturskillnaden på vätskan och ΔH_{vap} är den energi som avges när ånga kondenserar. Termen med ΔH_{vap} används endast om fluiden genomgår en fasförändring. Om energiförluster försummas så ska den avgivna värmen från den varma fluiden motsvara den upptagna värmen för den kalla fluiden (i detta projekt gurkmix) vilket även motsvarar värmen som överförs genom värmeväxlaren. A är värmeväxlarearean och $\overline{\Delta T}_L$ är den logaritmiska medeltemperaturen vilken beskrivs med följande Ekvation 2 med beteckningar från Figur 2.

$$(2) \quad \overline{\Delta T}_L = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln \frac{(T_{h,in} - T_{c,out})}{(T_{h,out} - T_{c,in})}}$$

Den logaritmiska medeltemperaturen uppskattar medeltemperaturskillnaden längs med värmeväxlaren under förutsättning att värmegenomgångstalet k är konstant. K är värmegenomgångstalet för värmeväxlaren och ett högre k -värde innebär en snabbare värmeöverföring. [2]

3.2.2. Värmegenomgångstal

Värmegenomgångstalet beskriver hur effektivt värmen från ångan på utsidan av rören i värmeväxlaren överförs till gurkan som flödar inne i rören. Detta värmegenomgångstal kan beräknas både teoretiskt och empiriskt. Empiriskt kan det beräknas med Ekvation 3 om man känner till egenskaperna för fluiderna på båda sidor av värmeväxlaren [2]. Om man bara räknar teoretiskt är det svårt att få med värmeförluster i värmeväxlaren. Därför har teoretiskt beräknade värmegenomgångstal jämförts med empiriskt beräknade jämförts i avsnitt 10.1.

3.2.3. Fysikaliska parametrar

Gurkmix har en rad fysikaliska parametrar som har stor påverkan på värmebehandlingsprocessen. Alla parametrar kan både beräknas teoretiskt och experimentellt

3.2.3.1. Teoretisk beräkning av fysikaliska parametrar

Alla livsmedel består till största delen av kolhydrater, fett, protein, vatten och fiber. Allt annat brukar samlas ihop i en gemensam term som kallas för aska. Densitet, specifik värmekapacitet och värmeledningstal är för alla ämnen ovan beroende av temperaturen. Dessa samband ser liknande ut som det för värmeledningstalet för fett i Ekvation 3 [2].

$$(3) \quad k_{fett} = 1,8071 \cdot 10^{-1} - 2,7604 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,7749 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$$

Tre sorters gurkmix har analyserats i detta arbete. De tre olika sorterna av gurkmix kan enligt näringsinnehållet på respektive burk delas upp i beståndsdelarna i Tabell 1. Gurkmixen som analyserats beskrivs närmare i avsnitt 4.1.

Tabell 1. Visar näringsinnehållet för gurkmix A-C [1].

	Gurkmix A	Gurkmix B	Gurkmix C
Kolhydrater	18 g/100g	18 g/100g	21 g/100g
Protein	1,3 g/100g	0,8 g/100g	1,4 g/100g
Fett	0 g/100g	0 g/100g	1,2 g/100g
Fiber	0 g/100g	0 g/100g	0 g/100g
Vatten	79 g/100g	80 g/100g	75 g/100g
Aska	1,7 g/100g	1,2 g/100g	1,4 g/100g

Densitet (ρ), specifik värmekapacitet (C_p), och värmeledningstal (k) kan räknas ut med Ekvation 4-6 respektive. Summatecknet innebär att alla värden från Ekvation 3 på komponenterna i Tabell 1 summeras för att få det totala värdet [2].

$$(4) \quad \rho = \frac{1}{\sum\left(\frac{m_i}{\rho_i}\right)}$$

$$(5) \quad c_p = \sum m_i c_{p_i}$$

$$(6) \quad k = \sum k_i * \left(\frac{\frac{m_i}{\rho_i}}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \right)$$

I Tabell 2 redovisas teoretiskt beräknade värden för densitet, specifik värmekapacitet vid temperaturen 45 °C. Experimentellt framtagna värden för gurkmix kommer jämföras med teoretiska för att utvärdera styrkor och svagheter i båda metoderna [2].

Tabell 2. Teoretiskt beräknade fysikaliska parametrar beräknade utifrån näringsinnehållet på respektive burk.

	Densitet (kg/dm ³)	Specifik värmekapacitet (J/kg/K)	Värmeledningstal (W/m/K)
Gurkmix C	1,087	3548	0,57
Gurkmix A	1,078	3644	0,58
Gurkmix B	1,072	3670	0,59

3.2.3.2. Viskositet och flödesdynamik

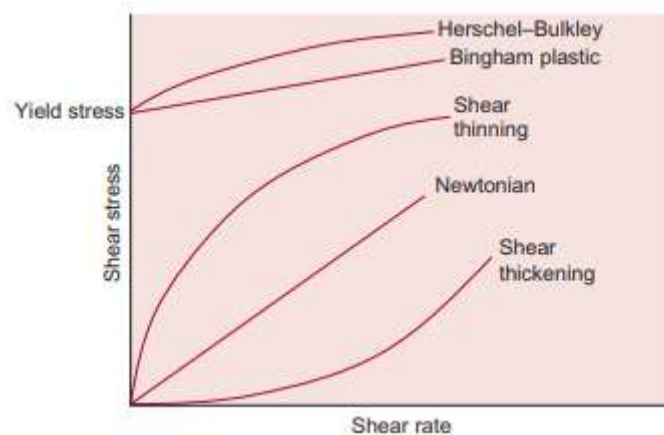
En viktig parameter för värmeöverföring i en tubvärmväxlare är viskositet. Viskositet beskriver i princip hur lättflytande eller trögflytande en vätska är. Detta i sin tur påverkar flödesdynamiken på vätskor. Vätskor som flödar genom ett rör kan antingen flöda laminärt eller turbulent. Laminärt flöde är väldigt kontrollerat och turbulent flöde har stor omrörning av vätskan. Detta gör att värmeöverföringen för en tubvärmväxlare går mycket snabbare om flödet på insidan är turbulent eftersom att omrörningen hjälper till att transportera värmen. Värmeegenomgångstalet för en värmväxlare är starkt beroende av vilken typ av flödevätskan på insidan har. [2]

3.2.3.2.1. Viskositet

En vätska kan visualiseras som en materia som är uppbyggd av flera lager. När en kraft appliceras så börjar lagren röra på sig. Storleken på kraften som krävs skiljer sig mellan olika vätskor och denna skillnad beror på att alla vätskor har ett inre motstånd mot rörelse. Detta motstånd kallas för viskositet och definieras som förhållandet mellan skjuvspänningen och förlängningen av vätskans plan. Ekvation 7 visar hur skjuvspänningen σ beror av viskositeten μ och skjuvhastigheten e .

$$(7) \quad \sigma = \mu \cdot e$$

Vätskor vars viskositet är oberoende av skjuvhastigheten kallas för Newtonska vätskor. Det finns följande kategorier av icke-newtonska vätskor som beskrivs i Figur 3.



Figur 3. Visar hur skjuvspänningen beror av skjuvhastigheten för olika slags vätskor

De flesta verkliga fluider är inte helt newtonska utan beter sig som någon av de olika vätskorna i Figur 3. Binghamplastiska (Bingham plastic och Herschel-Bulkley) fluider har ett initialt motstånd vilket betyder att det krävs en viss kraft innan de rör på sig. Exempel på dessa är tandkräm eller tuggummi. Skjuvförtunnande (Shear thinning) fluider har en minskande viskositet med skjuvhastighet. Exempel är målarfärg eller ketchup som känns tunnare ju snabbare man rör om. Skjuvförtjockande (Shear thickening) fluider har en ökande viskositet med ökande skjuvhastighet. Detta gör att fluiden blir tjockare ju snabbare man rör om och ett exempel på detta är blöt sand eller stärkelse löst i vatten. [3]

3.2.3.2.2. Flödesdynamik

En fluid som flödar vid låga hastigheter kommer att ha en väldigt välordnad hastighetsprofil. Denna typ av flöde kallas för laminärt flöde. Vid högra hastigheter kommer flödet inte vara alls lika ordnat och virvlar uppstår i fluiden och flödet är turbulent. För att avgöra vilken typ av flöde fluiden har används Reynolds tal. Reynolds tal är dimensionslöst och beskriver förhållandet mellan tröghetskrafter i fluiden och de viskösa krafterna som verkar på fluiden ekvation 8.

$$(8) \quad Re = \frac{\text{Tröghetskrafter}}{\text{Viskösa krafter}}$$

Vid låga Reynoldstal dominerar de viskösa krafterna och därför kommer fluiden ha en ordnad hastighetsprofil. Vid höga Reynoldstal är de viskösa krafterna väldigt små jämfört med tröghetskrafterna vilket gör att flödet blir turbulent. Reynolds tal beskrivs av ekvation 9 där μ är fluiden viskositet, δ är fluidens densitet, v är den linjära hastigheten och L är den karakteristiska längden för föremålet där fluiden flödar.

$$(9) \quad Re = \frac{L * v * \rho}{\mu}$$

Den karakteristiska längden L definieras som förhållandet mellan volymen och ytarean på det område som fluiden upptar. För omslutna kroppar kan ekvation 10 användas för att beräkna den karakteristiska längden som även kallas för hydraulisk diameter d_h .

$$(10) \quad L = d_h = \frac{4 \cdot (\text{area av vätskefyllt tvärsnitt})}{\text{Omkrets i kontakt med vätska}}$$

Vilken typ av flöde det är i en värmeväxlare spelar stor betydelse för värmegenomgångstalet k . Om flödet är turbulent så sker det en automatisk omrörning inuti värmeväxlaren vilket gör att värmen fördelar sig mer jämnt i röret och på så sätt så går värmeöverföringen snabbare. [2]

3.2.3.3. Densitet

Densitet beskriver hur kompakt ett ämne är och definieras som massa per volymenhet. Det är en väldigt viktig egenskap som påverkar både flödet och värmeöverföring av ett ämne. Inom livsmedelsteknik används två olika slags densitet: partikeldensitet och bulkdensitet. Bulkdensitet är den totala densiteten för en större mängd "partiklar" till exempel den totala densiteten för en låda med äpplen. Partikeldensitet är densiteten på för varje enskild partikel till exempel densiteten för varje äpple i exemplet ovan. Eftersom många livsmedel är en heterogen blandning av olika produkter med olika densitet så används ofta bulkdensitet vid beräkningar [2]. Gurkmix är ett typexempel på ett heterogent livsmedel med en blandning av hackad gurka, bitar av andra grönsaker och en vätska bestående av vatten, socker, ättika och diverse kryddor.

Det är avgörande att veta densiteten på gurkmix för att kunna analysera och optimera värmebehandlingen. Rören i värmeväxlaren har en viss volym som kommer vara fylld med gurka, densiteten kommer då påverka massan av gurka och eftersom den specifika värmekapaciteten är beroende av massan så påverkar densiteten indirekt hur mycket energi som behöver tillföras produkten.

3.2.3.4. Entalpi

Entalpi är en fysikalisk egenskap som beskrivs som summan av ett ämnes inre energi och dess tryckvolymarbete. Det är en extensiv storhet vilket innebär att massa påverkar entalpin. Både temperaturändringar och fasövergångar av ett ämne kan beskrivas med ändring i entalpi. Entalpiändring som sker vid temperaturökning beskrivs med specifik värmekapacitet. Specifik värmekapacitet definieras som den mängd energi en specifik massa behöver ta emot för att temperaturen ska stiga med 1 grad Celsius [2]

För uppvärmningen av gurkmix innebär det att ju högre specifik värmekapacitet gurkan har ju mer energi behöver tillföras för att få den önskade uppvärmningen för att uppnå den mikrobiologiska avdödning som krävs.

3.2.3.5. Termisk konduktivitet

Termisk konduktivitet eller värmeledningstal som det också kallas beskriver hur bra energi överförs genom ett material. Värmeledningstalet skiljer sig stort mellan olika material allt från metaller som aluminium och koppar med värmeledningstal på 3- 400 W/m/K till isolering som stenvull och glasull med värmeledningstal under 0,1 W/m/K [2].

Storleken på värmeledningstalet på gurkmix är väldigt viktig för uppvärmningen. Det som flödar i mitten av ett rör kommer ta längre tid att värma upp jämfört med det som flödar närmare kanten. Om flödet inuti värmeväxlaren är laminärt kommer det i princip inte ske någon omrörning alls av vätskan. Då kommer värmeledningstalet avgöra hur lång tid det tar för centrum att värmas upp. All gurkmix som produceras måste vara säker och därför är det avgörande att centrum av röret uppnår rätt temperatur vilket till stor del avgörs av värmeledningstalet.

3.2.4. *Modulering av värmebehandling*

För att kunna optimera en process är det viktigt att man konstruerar en modell över processen. Modeller är ofta semiempiriska vilket innebär att de är uppbyggda av både teoretiska och empiriskt uppmätta samband. I detta projekt har modellen konstruerats i Microsoft Excel som är ett kalkylprogram. När modellen är klar kan man ändra på olika parametrar och på så sätt optimera processen enligt valda parametrar.

3.3. Mikroorganismer och validering

Mikroorganismer finns överallt omkring oss och kan leva i de tuffaste förhållanden. En klar majoritet av alla mikroorganismer är ofarliga eller till och med positiva för oss människor men det finns en del som kan skada både livsmedel och människor. Dessa produktförstörande och patogena mikroorganismer är alltid ett hot mot såväl hållbarheten som säkerheten på livsmedel.

3.3.1. *Tillväxt och avdödning*

Mikroorganismer kan överleva och/eller växa i de flesta temperaturer så länge det finns tillgängligt vatten i flytande form. Tillväxten för mikroorganismer styrs av många olika faktorer. Några av de viktigaste faktorerna är temperatur, vattenaktivitet, pH-värde för omgivningen och tillgång till näring. I livsmedel vill man alltid undvika tillväxt av oönskade mikroorganismer och därför har det utvecklats en rad olika åtgärder för att förhindra tillväxt. Konserveringsmetoder som används genom tiderna har påverkat dessa parametrar på så sätt att patogena mikroorganismer får hämmad tillväxt. Till exempel så har saltning av mat sänkt vattenaktiviteten på produkten medan fermentering sänker pH-värdet. Tillväxten är långsammare vid lägre temperaturer och därför ska produkter där

mikroorganismer har lätt för att växa förvaras i kylskåp. Metoderna ovan bidrar till en ökad hållbarhet på produkterna genom att minska tillväxthastigheten för mikroorganismer. [4]

Tillväxthastigheten ökar med ökad temperatur upp till en viss temperatur då mikroorganismer börjar avdödas istället. Olika mikroorganismer är olika känsliga för höga temperaturer och börjar avdödas vid olika temperaturer. För att kunna jämföra värmetåligheten hos olika mikroorganismer använder man sig av D och z-värde. D-värde definieras som: tiden vid en specifik temperatur som krävs för att reducera antalet levande celler med en log10-enhet. Z-värdet definieras som: temperaturskillnaden som krävs för att ändra D-värdet med en log10-enhet. Med hjälp av D och z-värden kan man beräkna vilken upphettning av en produkt som krävs för att reducera mängden mikroorganismer till acceptabla nivåer. [4] Med D-värdet man beräkna andelen överlevande mikroorganismer vid konstant temperatur och tiden t beräknas enligt Ekvation 11.

$$(11) \quad \frac{N}{N_0} = 10^{-\frac{t}{D}}$$

Kvoten $\frac{N}{N_0}$ anger då hur stor del av mikroorganismerna som överlevt efter tiden t. [2]

3.3.2. Värmetålighet för relevanta mikroorganismer

Gurkmix har ett pH-värde under 4,3 [1] vilket förhindrar tillväxt av de flesta sjukdomsframkallande bakterier. I tillverkning av helkonserver är den farligaste mikroorganismen *C.botullinium* men det låga pH-värdet gör att den inte kan växa vilket gör att man inte behöver oroa sig för den så länge pH-värdet kontrolleras [5]. I faroanalysen för produktionen har man identifierat följande mikroorganismer som risker i olika delar av processen: *E. coli*, *Salmonella spp.* och *L. monocytogenes* [1]. Dessa skulle kunna finnas på råvaror och bör inte finnas i hög halt. De kan alla orsaka sjukdom vid låga halter och kontrolleras därför noggrant. D och z-värden organismerna finns angivna i Tabell 3.

Tabell 3. D och z-värden för de sjukdomsframkallande mikroorganismer som är relevanta för produkten. Det finns olika värden för alla mikroorganismer från olika källor. De kombinerade värdena är D och z-värden för avdödning av mikroorganismer i en produkt som innehåller alla de nämnda mikroorganismerna i tabellen.

Mikroorganism	D-värde	z (°C)
<i>E. coli</i>	53,3 s (71,1°C) [6]	9,7 [6]
	3,2 s (71,1 °C) [7]	6,64 [7]
<i>Salmonella spp.</i>	40,1 s (71,1°C) [6]	8,7 [6]
	1,08 s (71,1 °C) [7]	6,57 [7]
<i>L. monocytogenes</i>	58,7 s (71,1 °C) [6]	9,3 [6]
	4,7 s (71,1 °C) [7]	7,95 [7]
Kombinerat	51,6 (71,1 °C) [6]	9,5 [6]
	6,1 (71,1 °C) [7]	7,37 [7]

I tabell 3 kan man se två olika D och z-värden för respektive mikroorganism från olika källor. D och z-värde har för båda källorna är experimentellt framtagna från livsmedel med ett pH-värde på cirka 4,5. Breidt et al. analyserade reduktion av *E.coli*, *Salmonella spp.* och *L.monocytogenes* på fem olika stammar av respektive mikroorganism. Mikroorganismer adderades till inlagd gurka med pH-värde 4,1–4,6 och hettades upp. Utifrån antal överlevande mikroorganismer efter upphettningen kunde man få fram D och z-värde för respektive mikroorganism [6]. Dufort et al. upprepade Breidts försök med nästan samma metod. En av stammarna hade bytts ut och analysen gjordes på en tomatpuré istället för inlagd gurka. Som man kan se i Tabell 3 så skiljer sig D och z-värden mellan de båda försöken trots likheterna i metod. Det är alltid ett problem att veta hur temperaturkänsliga mikroorganismer i aktuell produkt är.

Värmebehandling ska reducera mängden mikroorganismer till en acceptabel nivå. Vilken nivå som är acceptabel bestäms av flera faktorer: hur stor mängd mikroorganismer det finns i startprodukten, vilken hållbarhetstid och förvaring slutprodukten har samt hur känslig slutprodukten är. Om slutprodukten har lågt pH eller andra egenskaper som hämmar tillväxt så kan det minska hur mycket reducering som krävs.

När temperatur eller uppehållstid i värmebehandlingen varierar under en process finns det en risk att värmebehandlingen blir för dålig. Därför undersöks processvariationer i detta arbete för att kunna anpassa värmebehandlingen till den storlek på variationer som processen har kan man garantera en säker produkt under dess hållbarhetstid.

3.3.3. Validering

Alla metoder och maskiner som används inom livsmedelsproduktion måste valideras. En validering innebär att man visar att metod/utrustningen fungerar så som man tänkt och processen med dess normala variationer ger en säker produkt med rätt egenskaper. Mikroorganismer är som nämnt tidigare ett stort hot mot produktsäkerhet på livsmedel. Därför styrs mikrobiologiska faror enligt HACCP-principen. HACCP står för Hazardous Analysis Critical Control Points och är ett sätt att metodiskt gå igenom en process och hitta de viktigaste punkterna att kontrollera. [8]

För att se till att all livsmedelsproduktion sker på ett säkert sätt finns det lagstiftning och riktlinjer för livsmedelsproduktion. Lagstiftningen finns på både nationell (ex. Livsmedelsverket) och internationell nivå (ex. EG 178/2002). Utöver det finns det många olika standarder (ex. ISO och BRC) som företag kan följa för att säkerställa att deras produkter är säkra.

HACCP används över hela världen och består av 7 stycken steg som beskrivs nedan. Säkerhetsarbete med HACCP är en pågående process där ett företags HACCP-plan måste uppdateras med alla förändringar som görs.

HACCP princip 1: Identifiera faror

En faroanalys görs över hela processen där man försöker hitta alla potentiella faror i varje steg. Farornas allvarlighetsgrad och sannolikhet analyseras även

HACCP princip 2: Identifiera kritiska styrpunkter

Alla processteg analyseras systematiskt och de kritiska processtegen identifieras.

HACCP princip 3: Fastställa kritiska gränsvärden

Gränsvärden specificeras för varje styrpunkt som hittades i princip 2.

HACCP princip 4: Utarbeta uppföljningsförfaranden

Utveckla ett system för att säkerställa att de kritiska styrpunkterna kan styras i praktiken.

HACCP princip 5: Fastställa korrigerande åtgärder

Avgör vad som ska göras om mätvärden ligger utanför uppsatta gränsvärden för varje styrpunkt.

HACCP princip 6: Utarbeta verifieringsförfaranden och validera HACCP-programmet

Verifiera att alla styrpunkter kontrolleras på rätt sätt. Detta kan göras med både interna och externa kontroller.

HACCP princip 7: HACCP-dokumentation och – journaler

Dokumentering över arbetet med HACCP och kontrollen av de kritiska styrpunkterna.[8]

Innan ett företag kan göra en faroanalys över en process är det viktigt att veta i detalj hur hela processen fungerar. Om man inte har den ingående kunskapen över en process så kommer man inte

kunna göra en tillräckligt detaljerad faroanalys över en process och därmed inte kunna validera processen heller.

4. Material och Metod

I följande avsnitt beskrivs metoderna för de beräkningar och mätningar som gjorts. Produkterna som undersöktes beskrivs under material.

4.1. Material

Tre olika gurkmixeranalyserades. De tre produkterna som användes var: Gurkmix A gjord på färsk gurka, Gurkmix B gjord på fermenterad gurka samt Gurkmix C gjord på fermenterad gurka med senap. Bild på de tre olika produkterna finns i Figur 4.

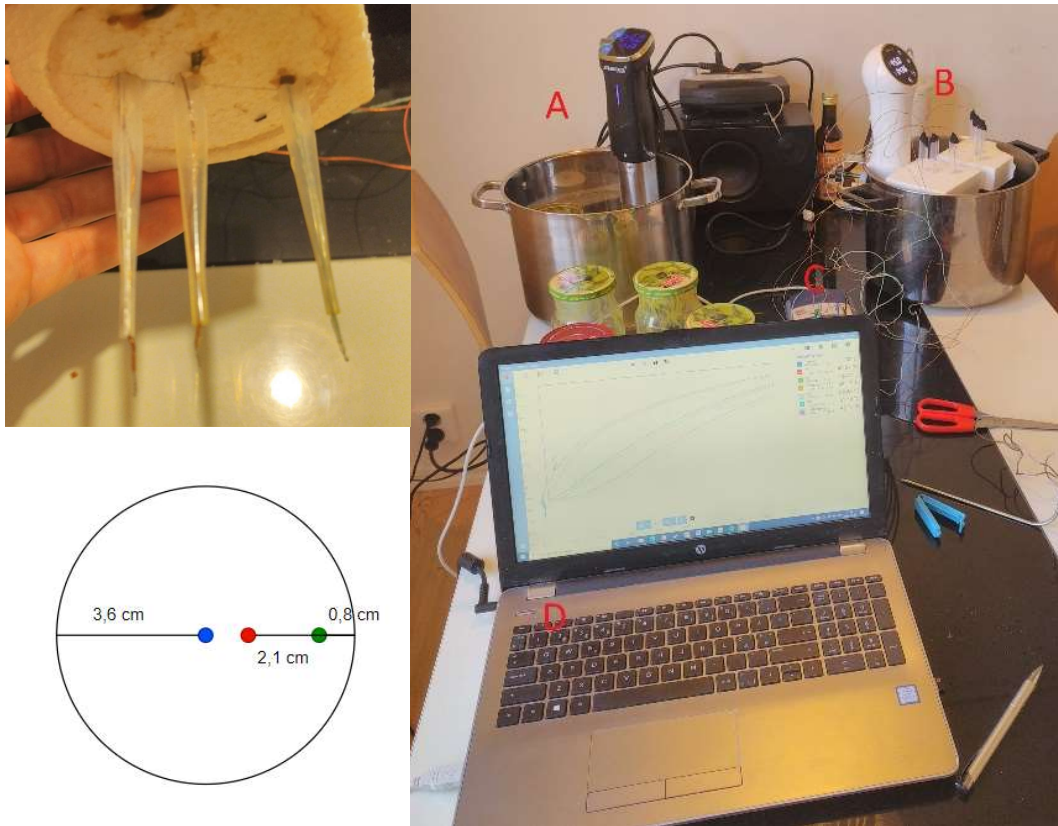


Figur 4. Bild på de tre produkterna som analyserades. Gurkmix A (vänster) är producerad på färsk gurka, Gurkmix B (mitten) är producerad på fermenterad gurka och Gurkmix C (höger) är producerad på fermenterad gurka och senap.

4.2. Värmekurva

För att simulera hur Värmebehandling av gurkmix sker i värmeväxlare i produktion gjordes detta försök där en konserverburk med gurkmix värmdes upp i ett vattenbad och där temperaturen för uppvärmningen mättes på tre olika punkter i burken.

Burkarna som användes var cylinderformade konserverburkar med en diameter på 7,6 cm och en höjd på 10,2 cm. Varje burk fylldes med gurkmix och därefter stoppades tre temperatursonder ner i burken enligt Figur 5A och 5B. Figur 5C visar hela labbuppsättningen med beteckningarna som används nedan.



FIGUR 5A. (uppe till vänster) Bild på anordning som gjorde att temperaturproberna hölls på samma ställe och gjorde mätningarna repeterbara. **FIGUR 5B.** (nere till vänster) Schematisk bild över temperatursondernas placering i burken. Alla sonder satt monterade på 5,5 cm från burkens topp. **FIGUR 5C.** (höger) Visar labbuppsättningen för försöket.

Burkarna ställdes i vattenbad A som värmdes med en sous vide cirkulator till önskad temperatur. När temperaturen på gurkmixen var homogen och hade uppnått temperaturen på vattenbad A fördes de över till vattenbad B som var 20 °C varmare. Densitet, värmeledningstal och specifik värmekapacitet är alla temperaturberoende. Därför valdes 20 °C som temperaturskillnad mellan vattenbad A och B för att inte de fysikaliska parametrarna skulle ändras allt för mycket under mätningen men att man skulle kunna mäta hela temperaturintervallet utan allt för många mätningar. Temperatursonderna var kopplade till en Picolog TC-08 (C) som loggade uppvärmningsförloppet på datorn (D). Varje mätning avbröts när temperaturen på sonden i mitten ökat 18-20 °C. Värmekurvor mättes vid tre olika temperaturintervall: 25-45 °C, 45-65 °C och slutligen 65-85 °C.

För att beräkna värmegenomgångstalet för metallburken upprepades mätningen ovan med burken fylld med vatten.

4.3. Densitet

Densiteten för olika sorters gurkmix mättes med hjälp av två vanliga köksvågar. Ett högt glas användes som behållare för alla mätningar. Först räknades volymen på glaset ut genom att väga hur mycket vatten vid 15 °C det rymde. Därefter fylldes glaset till bredden med gurka och vägdes. Eftersom volymen på glaset var känd så räknades gurkmixens bulkdensitet ut enligt följande Ekvation 12 där ρ är densitet, m är massan på gurkmixen och V är volymen på glaset.

$$(12) \quad \rho = \frac{m}{V}$$

Alla mätningar utfördes 5 gånger för att minska felmarginalen på resultatet. Densiteten mättes vid 3 olika temperaturer för att se hur den förändrades under produktionsförloppet. Temperaturerna som mättes var 4, 26, 48 och 65 °C. Bild på labbuppsättningen för både mätning av densitet och värmeledning finns i Figur 6.



Figur 6. Visar labbuppsättningen för mätning av densitet och värmeledningstal på gurkmix.

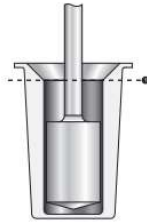
4.4. Värmeledningstal

En KD2 pro användes för att mäta värmeledningstal på olika sorters gurkmix. För mätningarna användes sonden KS-1 och de utfördes på det sätt som beskrevs i användarmanualen för KD2 pro [9]. Sondens var 6 cm lång och stacks ned i ett fyllt glas med gurkmix så sondens hade minst 1,5 cm gurkmix åt alla håll. Därefter mätte instrumentet värmeledningstalet genom att under 1 minut värma

upp sonden och mäta hur resistansen förändrades. Specifik värmekapacitet och värmeledningstal mättes parallellt med densiteten och mättes därför vid samma temperaturer.

4.5. Viskositet

Med hjälp av en Kinexus Pro+ reometer mättes viskositeten på gurkmixen. Två olika mätningar gjordes med en 14 mm bob (cylinder) i en kopp med en diameter på 25mm enligt Figur 7. Reometern mäter kraften som gurkmixen trycker på kanten när boben roterar.



FIGUR 7. Schematisk bild över bob i cylindern.

Mätinstrumentet användes enligt användarmanualen [10]. För att mäta fylldes cylindern till bredden med gurka varefter program valdes med en inkopplad dator. En mätning gjordes med konstant skjuvhastighet på 24 RPM med varierande temperatur från 10 - 90 °C. Den andra mätningen mätte viskositeten vid konstant temperatur då skjuvhastigheten varierades från 0,1-100 RPM. Den andra mätningen gjordes vid både 25 och 85 °C.

4.6. Processvariation

Alla parametrar i en process varierar i verkligheten till viss grad. För att kunna anpassa beräkningar till den faktiska processens variationer undersöktes det hur några parametrar varierade i värde under körning. De parametrar som undersöktes var: Flöde av gurkmix, Temperatur på gurkmix efter uppvärmning, Temperatur på gurkmix efter hållarcell samt tryck och storlek på ångflöde.

Processdata togs från 6 riktiga produktioner från 2020 på olika slags produkter. Det var bara data från produktion som analyserades, det vill säga bara mätdata då gurkmix faktiskt värmdes upp i värmeväxlaren. Utifrån data kunde medelvärde och standardavvikelse räknas ut för de olika processparametrarna. För Gurkmix A analyserades data från tre separata produktionstillfällen, för Gurkmix C data från två tillfällen och gurkmix B användes tyvärr endast mätdata från ett tillfälle. Vid varje produktionstillfälle analyserades data från cirka 6-12 timmars aktiv körning. Medelvärde och varians från flera olika produktionstillfällen lades ihop enligt Ekvation 13 och 14 respektive.

$$(13) \quad \bar{X}_c = \frac{\sum n_i \bar{X}_i}{\sum n_i}$$

$$(14) \quad s_c^2 = \frac{\sum n_i [S_i^2 + (\bar{X}_i - \bar{X}_c)^2]}{\sum n_i}$$

I Ekvation 13 och 14 är n antal mätpunkter för en mätning, S är standardavvikelse och X är medelvärdet.

I processen mäts endast temperaturen på gurkmixen vid punkt D och E enligt beteckningarna i Figur 1. Den uppmätta temperaturen loggas och sparas digitalt. Vid punkt F efter hållarcell 2 sitter en analog termometer vars temperatur analyserades under ett produktionstillfälle under 2020. En GoPro-kamera monterades upp framför termometern och tog ett foto var 10:e sekund. Dessa bilder lades manuellt in i Excel där medeltemperatur och standardavvikelse för körningen kunde analyseras. Bilder togs även under den tid då det inte pågick någon produktion men genom att jämföra med produktionsdata kunde man välja ut de bilder som togs under produktion. Bilderna som togs såg ut som Figur 8.



FIGUR 8. En av bilderna som togs på den analoga termometern.

4.7. Processoptimering

I processoptimeringen gjordes en modell över värmebehandlingen i Excel. Modellen är uppbyggd av de experimentellt uppmätta parametrarna på gurkmix samt sammanställd mätdata över processvariationen. Vid varje flöde beräknades den minsta temperatur som gurkmixen behövde ha direkt efter värmeväxlaren. Denna temperatur jämfördes sedan beroende på om bara första eller båda hållarcellerna användes samt om de var isolerade eller ej. De exakta beräkningarna samt all data som modellen är uppbyggd av finns redovisade i appendix 10.4.

4.8. Beräkning av specifik värmekapacitet

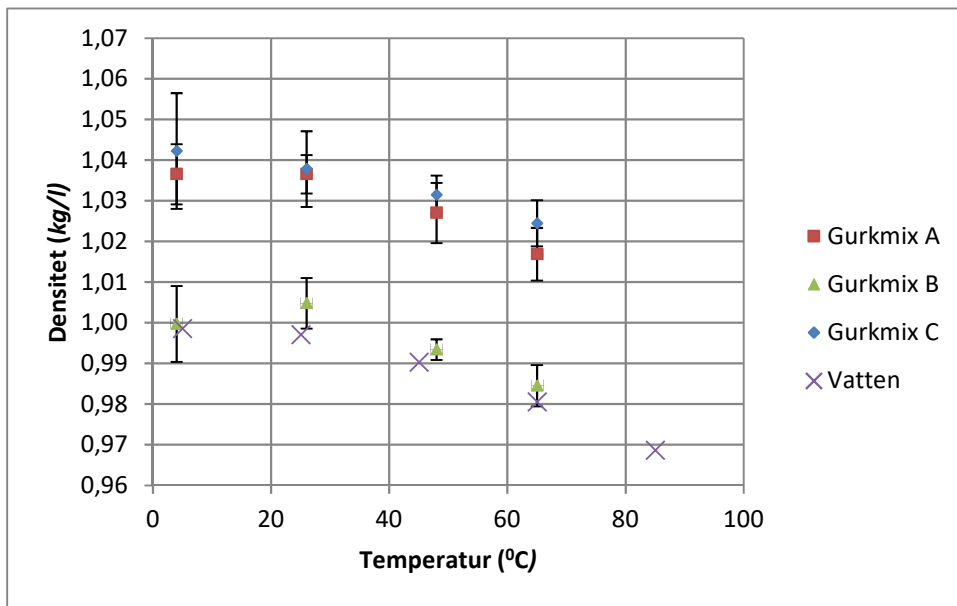
Den specifika värmekapaciteten räknades ut med hjälp av Heistlers metod och data från mätningen av värmekurvor. Heistlers metod samt de genomförda beräkningarna finns noggrant beskrivna i appendix 10.2.

5. Resultat

Här presenteras resultaten från de mätningar och beräkningar som gjorts. De flesta mätningar har gjorts för gurkmix A-C förutom viskositetsmätningen som endast genomfördes på gurkmix A. Eftersom att gurkmix innehåller minst 75% vatten jämförs varje av de uppmätta värdena med vatten.

5.1. Densitet

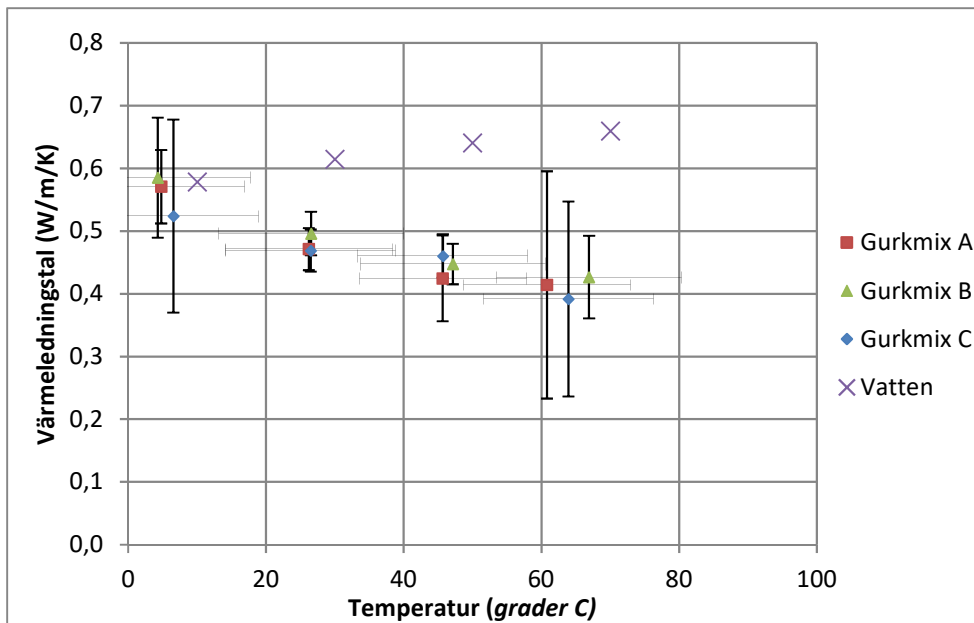
Resultaten från mätningen av densitet av gurkmix A-C redovisas i Figur 9 tillsammans med densiteten på vatten. Varje mätning upprepades 5 gånger och felmarginal visas på en konfidensnivå på 95%. Precis som vatten så minskar densiteten på gurkmix vid ökad temperatur



Figur 9. Densiteten som funktion av temperaturen för gurkmix A-C samt för vatten. Felmarginalens konfidensnivå är 95%.

5.2. Värmeledningstal

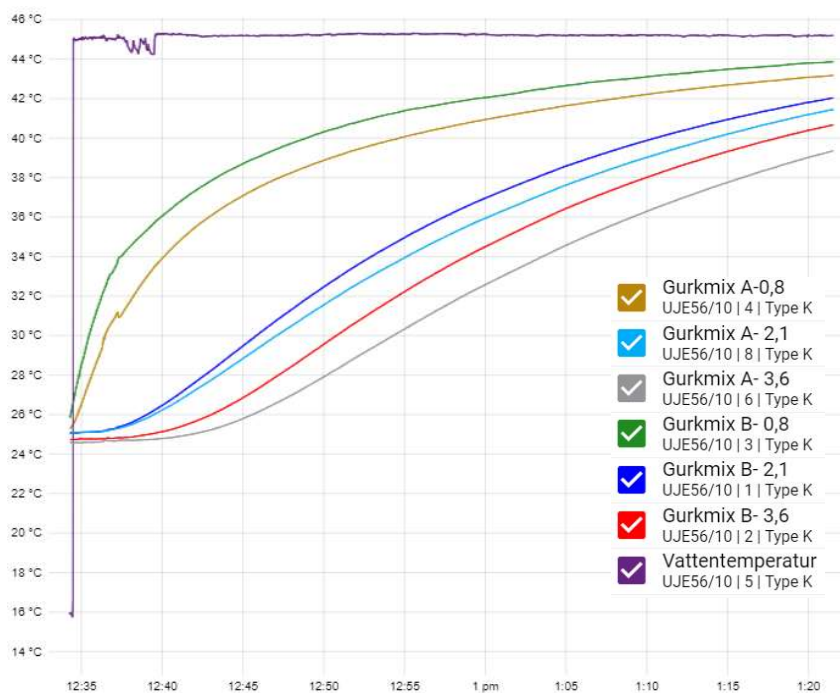
I Figur 10 visas hur värmeledningstalet varierar för de tre produkterna. För vatten ökar värmeledningstalet med ökande temperaturer medan värmeledningstalet för gurkmix minskar när temperaturen ökar.



Figur 10. Värmeledningstalet som funktion av temperaturen för gurkmix A-C. Felmarginalerna visas på en 95% konfidensnivå.

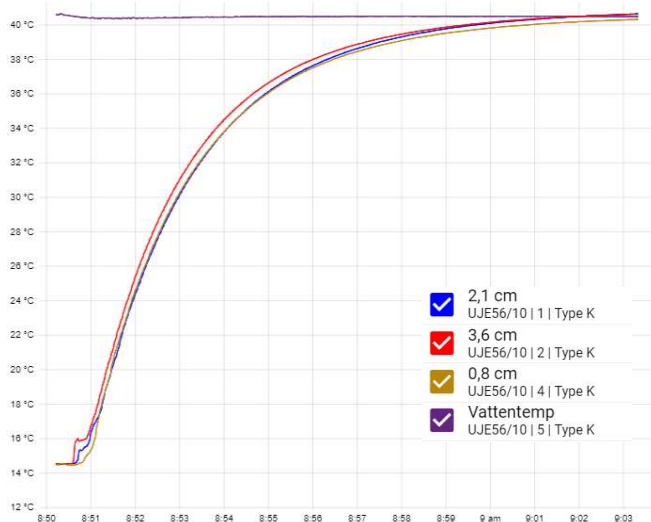
5.3. Värmekurvor

I Figur 11 visas värmekurvorna för mätning av gurkmix A och B. Den visar mätningen för gurkmix A och B med starttemperatur 25 °C och en vattentemperatur på 45 °C. Uppvärmningstiden till specifika temperaturer utnyttjades för att beräkna specifik värmekapaciteten för gurkmixen. Liknande värmekurvor som den i Figur 11 mättes för alla gurkmix vid temperaturerna som beskrevs i avsnitt 4.2. Data från värmekurvor används i avsnitt 10.2 för att beräkna specifik värmekapacitet för gurkmix.



Figur 11. Visar hur temperaturen på olika positioner i en burk med gurkmix A och B ökar när burken värms upp i ett vattenbad.

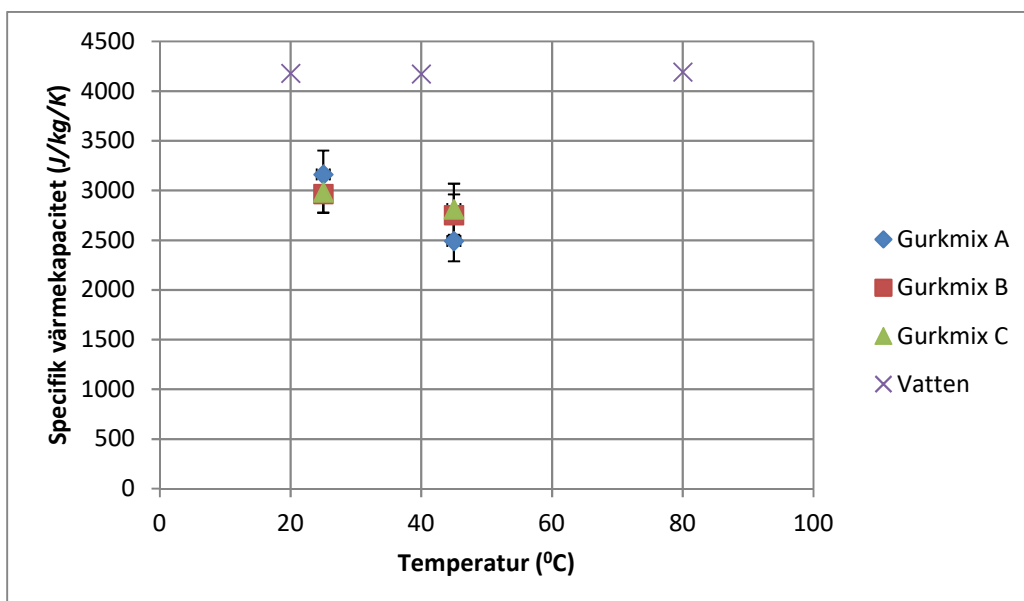
Samma mätning genomfördes även med burken fylld av vatten för att kunna beräkna värmeledningstalet för metallburkarna som användes. Värmeledningstalet för burkarna beräknas i avsnitt 10.2. Värmekurva för vatten visas i Figur 12 och där kan man se att temperaturen i burken är mycket mer homogen genom uppvärmningsförloppet jämfört med när gurkmix värmdes upp.



Figur 12. Temperaturkurva som visar temperaturen på olika positioner i en konservburk fylld med vatten.

5.4. Specifik värmekapacitet

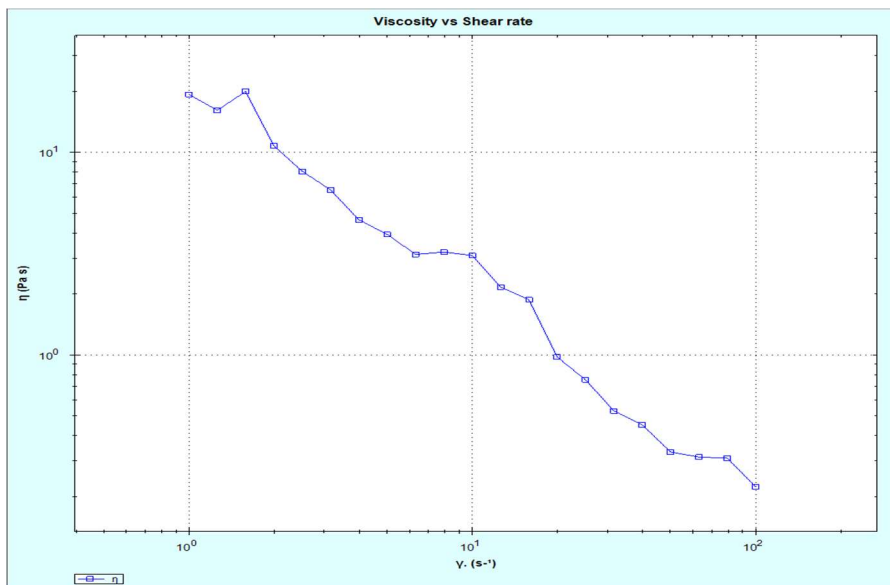
Utifrån värmekurvor och Heistlers modell beräknades specifik värmekapacitet för de tre produkterna. Specifik värmekapacitet för gurkmix A-C visas i Figur 13. Den specifika värmekapaciteten på gurkmix sjunker med temperaturen jämfört med den specifika värmekapaciteten på vatten som är mer eller mindre konstant



Figur 13. Visar hur den specifika värmekapaciteten beror av temperaturen på gurkmix och vatten. Felmarginalerna visas på en 95% konfidensnivå.

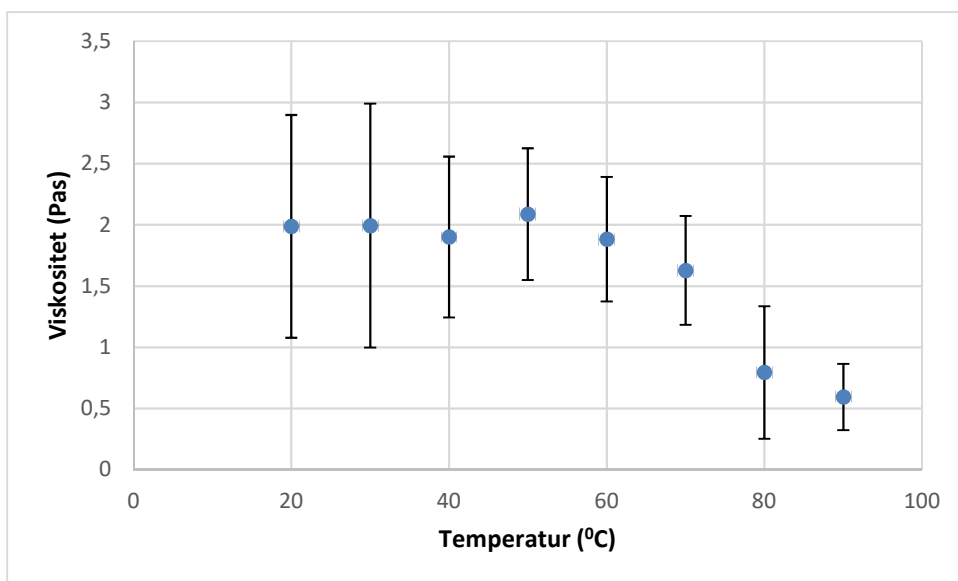
5.5. Viskositet

I Figur 14 visas hur viskositeten beror av skjuvhastigheten för gurkmix A. Viskositeten minskar med ökad skjuvhastighet vilket visar på att gurkmix är en skjuvförtunnande vätska.



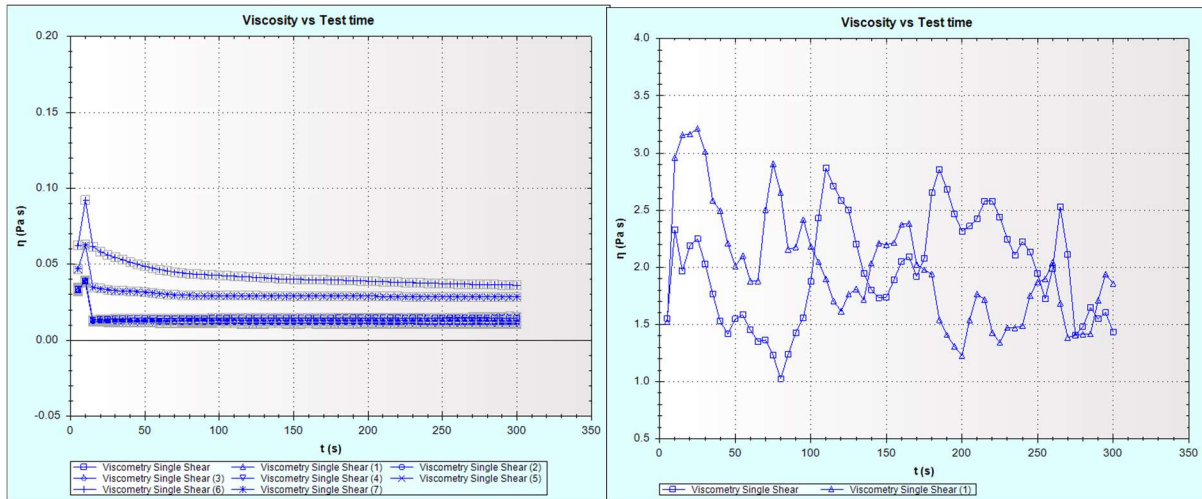
Figur 14. Visar hur viskositeten på gurkmix förändras med skjuvhastighet.

Figur 15 visar hur viskositeten beror av temperaturen vid konstant skjuvhastighet. Konfidensnivån för felmarginalen i Figur 14 är 95%. Viskositeten sjunker när temperaturen ökar.



Figur 15. Visar viskositetens temperaturberoende för Gurkmix A. Felmarginalen är angiven på 95 % konfidensintervall

Figur 16 visar hur den uppmätta skjuvspänningen förändras vid konstant temperatur och sjuvhastighet för gurkmix A och dess vätska. Efter en liten topp i början stabiliseras skjuvspänningen för vätskan efter en liten stund och är mer eller mindre konstant. För gurkmix A varierar skjuvspänningen ungefär lika mycket genom hela mätningen.



Figur 16. Figurerna visar hur Skjuvspänningen förändrades med tiden vid konstant temperatur och skjuvhastighet för Gurkmix A (höger) och endast lagen utan gurkbitar för Gurkmix A (vänster). De olika kurvorna är vid olika temperaturer.

5.6. Processvariation

Tabell 4 visar medelvärde och standardavvikelse för flöde, temperatur efter värmeväxlare, temperatur efter hållarcell samt ångtrycket vid produktion av olika slags gurkmix.

Tabell 4. Visar processvariationen för produktionen av gurkmix.

	Gurkmix C	Gurkmix A	Gurkmix B
Medelvärde flöde	████████	████████	████████
Standardavvikelse flöde	████████	████████	████████
Medelvärde Temp Värmeväxlare	████████	████████	████████
Standardavvikelse Temp Värmeväxlare	████████	████████	████████
Medelvärde temp hållarcell 1	████████	████████	████████
Standardavvikelse temp hållarcell 1	████████	████████	████████
Medelvärde ångflöde (% av max)	████████	████████	████████
Standardavvikelse ångflöde (%-enheter av max)	████████	████████	████████
Medelvärde ångtryck	████████	████████	████████
Standardavvikelse ångtryck	████████	████████	████████

Under cirka 2 timmar togs 6 bilder per minut på den analoga termometern efter hållarcell 2. Medeltemperatur och standardavvikelse för den analoga termometern samt medeltemperatur och standardavvikelse för de andra termometrarna under samma tid redovisas i Tabell 5.

Tabell 5. Medelvärde och standardavvikelse för temperaturer vid värmeväxlare och hållarceller under den tid som temperatur mättes vid hållarcell 2.

	Flöde	Värmeväxlare	Hållarcell 1	Hållarcell 2
Medelvärde	████████	████████	████████	████████
Standardavvikelse	████████	████████	████████	████████

Temperaturen på gurkmix mäts både före och efter hållarcell 1. I Tabell 6 visas det andelen mätningar då den uppmätta temperaturen efter hållarcellen är högre än den uppmätta temperaturen innan hållarcellen för respektive mätning.

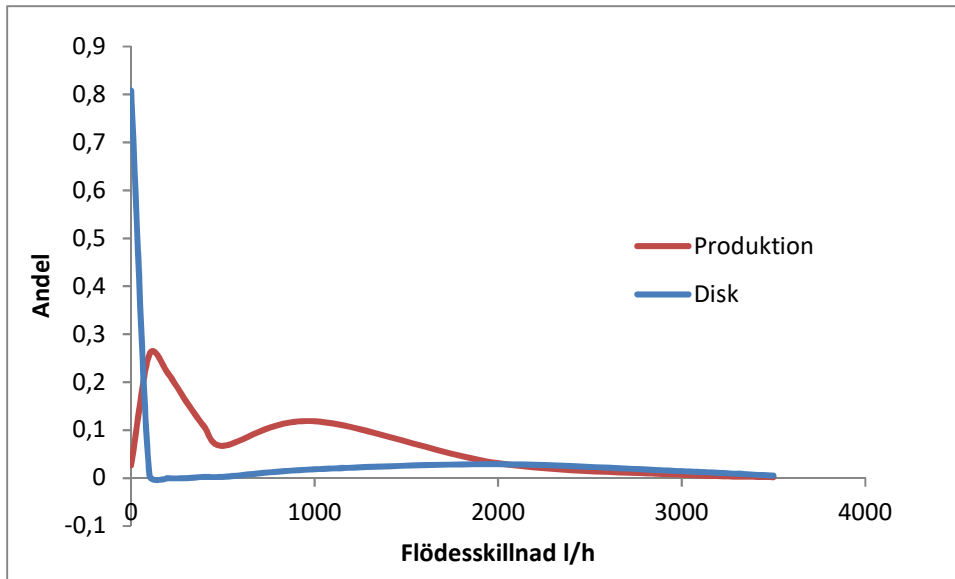
Tabell 6. Visar sannolikheten att den uppmätta temperaturen efter hållarcell 1 visar högre än den temperatur som mäts direkt efter värmeväxlaren.

Produkt	Mättillfälle	Sannolikhet (%)
Gurkmix A	1	6,0
Gurkmix A	2	1,9
Gurkmix A	3	0
Gurkmix C	1	1,2
Gurkmix C	2	6,1
Gurkmix B	1	36,7

Variationen i flöde beror av en kombination av variation i flöde samt en felmarginal i flödesmätningen. I Tabell 7 redovisas hur stor del av flödesvariationen som beror på felmarginal i flödesmätningen. I Figur 15 jämförs även hur stor skillnad det är i flöde mellan två på varandra följande mätpunkter under produktion av gurkmix samt under rengöring då det flödar vatten i rören.

Tabell 7. Visar medelvärdet av absolutbeloppet av skillnaden mellan två på varandra uppmätta flöden samt hur stor del av det totala medelflödet detta motsvarar.

Produkt	Mättillfälle	Medelvärde skillnad (l/h)	Andel av totalflöde(%)	Andel av standardavvikelse(%)
Gurkmix A	1	████████	8,6	44,3
Gurkmix A	2	████████	8,8	59,7
Gurkmix A	3	████████	19,3	83,3
Gurkmix C	1	████████	7,1	33,5
Gurkmix C	2	████████	7,7	80,1
Gurkmix B	1	████████	14,5	76,7



Figur 17. Visar hur stor andel av alla mätvärden som respektive flödesskillnad för både produktion och disk.

5.7. Simulering

Modellen beskrivs mer noggrant i avsnitt 10.4. För att kontrollera modellens noggrannhet användes flöden och temperaturer från faktiska körningar. För att modellen skulle kunna användas av flera personer gjordes ett användargränssnitt som visas i Figur 18. I användargränssnittet gjordes en förenkling för att inte behöva använda målsökning två gånger i rad. Förenklingen innebär att om användaren väljer att räkna på både hållarcell 1 och 2 så räknar man på en sammansatt hållarcell med konstant värmegenomgångstal och reduceringen av mikroorganismer sker vid temperaturen T2 genom hela hållarcellen. Det innebär att reduceringen blir lite större än vad den hade varit i verkligheten.

	A	B	C	D	E	N	O	P
1	Egenskaper Gurkmix							
2	Densitet	1000	kg/m ³					
3	Specifik värmekapacitet	3300	J/kg/K					
4	värmeledningstal	0,5	W/m/K					
5								
6	Egenskaper produktion							
7	Flöde	3800	l/h					
8								
9	Egenskaper mikroorganismer							
10	D-värde	20	s					
11	z-värder	10	degC					
12	Referenstemperatur	70	degC					
13	Reduceringsgrad	5						
14	Beräknad reduceringsgrad	5						
15	Kända temperaturer							
16	Tv vx	75,15831432	degC					
17	T1	72,94649038	degC					
18	T2	70,9528035	degC					
19	Lufttemperatur	25	degC					
20	Egenskaper isolering							
21	tjocklek	0,005	m					
22	värmeledningstal	0,5	W/m/K					
23								
24	Antal hållarceller							
25	Vill du räkna med hållarcell 1 och 2	ja						
26	Vilket värde vill du räkna ut?	Tv vx						
27	Målcell							
28	Målcell	1,44908E-06						

Instruktioner

Gröna fält måste fyllas i
 Blå fält måste fyllas i om man vill räkna på reducering av mikroorganismer
 Gula fält är frivilliga att fylla i
 Röda fält ska man inte skriva i

- Välj i de lila fälten vad du vill ha reda på. Beteckningar finns i figuren ovan
- Tryck på fliken data, konsekvensanalys och målsökning
- Följande ruta kommer upp
- Tryck att cell B28 ska vara målcell med värdet 0
- Fyll i rutan vars värde matchar namnet som står i cell B26

Målsökning

Målcell: \$B\$28

Värde: 0

Justerbar cell: \$B\$18

OK Avbryt

Figur 18. Användargränssnitt för modellen över de båda hållarcellerna med ifyllda exempelvärden.

För att kontrollera modellen jämfördes temperaturer beräknade med modellen med de som mättes i verkligheten. Man kan se i Tabell 8 att för gurkmix A och C stämmer de beräknade värdena bra

överens med verkliga värden. För gurkmix B skiljer det en del mellan uppmätt och beräknat värde och denna skillnad diskuteras i avsnitt 6.2.1.

Tabell 8. Jämför temperaturer uträknade med modell över processen jämfört med temperaturer tagna från den verkliga processen.

	Temperaturskillnad (°C)
Gurkmix A	+ 0,2
Gurkmix B	+ 1,9
Gurkmix C	- 0,3

Modellen i Figur 18 utnyttjades för att beräkna vilken temperatur som värmeväxlaren behövde värma till för att uppnå olika reduceringar av mikroorganismer. Den minsta effekten som krävdes av värmeväxlaren beräknades också för varje fall och därefter jämfördes effekten med den effekt som krävdes för att värma gurkmix A den temperatur som den värms till under verklig produktion.. Resultaten från beräkningarna redovisas i Tabell 9.

Tabell 9. Energibesparing för olika varianter av hållarcell. Kort hållarcell innebär att endast värmen i hållarcell 1 utnyttjas, lång hållarcell innebär att värmen från båda hållarceller används. Isolerad hållarcell innebär att man har lagt på 5 mm tjock isolering runt hållarcellen med ett värmeledningstal på 0,2 W/m/K. Reduceringsgrad innebär hur många logenheter antalet mikroorganismer reduceras med reduceringsvärden från Dz 1 eller Dz 2. Energibesparing beräknades för 6 logenheters reduktion jämfört med normal produktion.

Typ av hållarcell	Reduceringsgrad	Energibesparing
Kort hållarcell	Normal produktion	0 %
Lång hållarcell	Normal produktion	3 %
Kort isolerad hållarcell	Normal produktion	1 %
Lång isolerad hållarcell	Normal produktion	6 %
Kort hållarcell	6 log (Dz 1)	8 %
Lång hållarcell	6 log (Dz 1)	11 %
Kort isolerad hållarcell	6 log (Dz 1)	9 %
Lång isolerad hållarcell	6 log (Dz 1)	13 %
Kort hållarcell	6 log (Dz 2)	20 %
Lång hållarcell	6 log (Dz 2)	21 %
Kort isolerad hållarcell	6 log (Dz 2)	21 %
Lång isolerad hållarcell	6 log (Dz 2)	23 %

6. Diskussion

I detta avsnitt diskuteras rimligheten och felmarginaler på utförda mätningar. Uppmätta fysikaliska parametrar jämförs med teoretiska värden där skillnaden diskuteras. Processvariationen analyseras och bakgrunden till variansen diskuteras. Rimligheten av den konstruerade modellen samt energioptimeringen diskuteras slutligen.

6.1. Rimlighetsanalys av uppmätta fysikaliska konstanter

I alla mätningar som görs finns det en felmarginal. Ett mätfel kan antingen bero på slumpmässiga eller systematiska faktorer. Systematiska faktorer kan både bero på mätutrustningen och försöksuppsättningen. Slumpmässiga fel beror oftast på mätmetoden och visar hur repeterbar en mätning är. Felmarginal bör strävas efter att minimeras för att kunna presentera så noggranna mätvärden som möjligt.

6.1.1. Densitet

För att minimera de systematiska felen på mätningarna användes till en början två stycken olika köksvågar där samma mätningar genomfördes. De gav alltid exakt samma resultat så därför användes endast en av vågarna för större delen av mätningen. Eftersom att resultat från två olika vågar jämfördes så kan man med utsluta systematiska mätfel om inte båda vågar visade exakt samma systematiska fel vilket är osannolikt.

Glaset som användes vid mätning av densitet fylldes till bredden med gurkmix. Överskott av gurkmix skrapades av men till slut var det laborantens ögonmått som avgjorde om glaset var helt fullt. För att minimera felmarginalen upprepades därför varje mätning fem gånger och i Figur 9 kan man se att felmarginalen för alla mätningar är under 2%.

Den uppmätta densiteten var mindre än den teoretiskt beräknade för alla tre varianter av gurkmix. Gurkmix består enkelt beskrivet av bitar av hackad gurka samt en lag som består av vatten samt det mesta av tillsatta ingredienser. Gurkbitarna håller sig förhållandevis krispiga även i den färdiga produkten vilket innebär att de inte blandas helt med lagen. Eftersom att gurkorna håller sig krispiga så är de lite mer porösa än en vätska vilket ger upphov till den lägre densiteten.

6.1.2. Värmeledningstal

Mätningen av värmeledningstal mättes med ett mätinstrument konstruerat just för att mäta värmeledningstal. I manualen för instrumentet var det angivet felmarginalen för mätningarna var $\pm 5\% \pm 0,01 \text{ W/m/K}$ [9]. Det stod inte i manualen vilken konfidensnivå felet var på och därför antogs det att det var på 95% konfidensnivå.

Mätfelet som stod angivet i manualen är det minsta fel mätningar av värmeledningstal kan ha med mätningar med det använda instrumentet. Om det uppmätta mätfelet var mindre än det angivna i manualen så ändrades mätfelet till det som angavs i manualen. Detta skedde för 4 av 12 mätningar.

Precis som densiteten så var de uppmätta värdena mindre än det teoretiska värdet för värmeledningstalet. Detta beror troligtvis på att gurkmix är en blandning av fast och flytande material. Överföring i gränsskiktet mellan två olika faser går långsammare än värmeledning i samma fas. Därför är det rimligt att värmeledningstalet är mindre i praktiken än i teorin.

Om man jämför värmeledningstal för gurkmix med värmeledningstal för vatten så kan man i Figur 10 se att värmeledningstalet för vatten ökar med temperaturen medan värmeledningstalet för gurkmix minskar med temperaturen. Den generella trenden för vätskor är att värmeledningstalet ökar med temperaturen eftersom att molekylernas rörlighet i vätskan ökar. För fasta material är det tvärt om eftersom att vid högre temperatur vibrerar molekylerna mer vilket hindrar värmeledning (DETTA STÄMMER MEN SKA LETA UPP EN BRA KÄLLA). Skillnaden kan till viss del förklaras av att gurkmix till stor del består av fast material. Det förklarar inte att värmeledningstalet sjunker så mycket vid ökad temperatur så det är något mer som spelar in. Det kan antingen vara mätfel från mätinstrumentet eller något helt annat. (KAN INTE FÖRKLARA DEN STORA MINSKNINGEN HELT)

6.1.3. Specifik värmekapacitet

Till skillnad från densitet och värmeledningstal så mättes inte specifik värmekapacitet med en direkt metod utan Heistlers metod användes. Heistlers metod är en indirekt metod där man genom mätning av temperatur kan beräkna den specifika värmekapaciteten enligt metoden som beskrivs i avsnitt 10.2.

I metoden finns det ett antal faktorer som kan bidra till det totala mätfelet. Heistlers metod är anpassad för en oändligt lång cylinder men burkarna som faktiskt användes i försöket var bara 10 cm höga vilket innebär att man inte helt kan försumma värmefflux i toppen och botten av burken. Men eftersom att burken täcktes med ett isolerande lock av frigolit och burken stod på botten av vattenbadet vilket minskade värmeöverföringen från det hållet. Därför antas just de faktorerna inte ha påverkat mätningarna så mycket. En faktor som kan ha påverkat mer är temperatursondernas mätnoggrannhet.

Temperatursonderna som användes antogs ha en mätnoggrannhet på $\pm 0,5$ °C. I Figur 11 visas en av de uppmätta värmekurvorna och där kan man se att uppvärmningen går långsamt för de sonder som sitter i mitten av burken. Att värma upp centrum av burken 0,5 °C tar 30–120 sekunder och den skillnaden påverkar den specifika värmekapaciteten med 1–4 %.

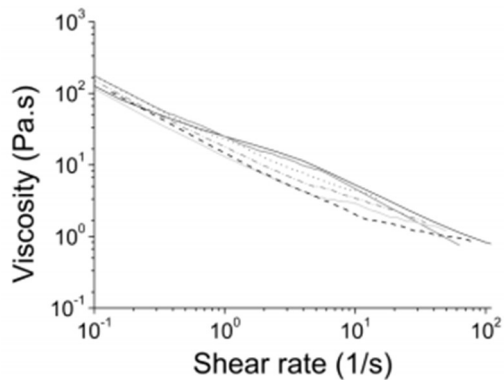
En tredje faktor som kan påverka är placeringen av temperatursonderna i burken. Placeringen på sonderna mättes med hjälp av linjal och passare. När sonderna placeras i burken finns det en viss risk att sondernas position ändras något. I Figur 11 kan man se att temperaturskillnaden mellan sonden vid kanten och sonden i mitten kan vara 10 °C vilket motsvarar 0,36 °C/mm. Tidigare beskrevs det hur 0,5 °C skillnad påverkade den specifika värmekapaciteten.

De tre faktorerna som beskrivs ovan är svåra att exakt mäta men man bör ha dem i åtanke när man utvärderar den specifika värmekapaciteten.

6.1.4. Viskositet

Gurkmixens viskositet mättes med en rotationsreometer. När den inre cylindern i reometern börjar rotera mäts kraften mellan vätskan och ytterväggen. När skjuvhastigheten och temperaturen är konstant så bör kraften mellan vätska och vägg vara konstant. När gurkmix mättes var kraften mellan gurkmix och yttervägg inte alls konstant eftersom att gurkbitarna påverkade mätningen. I Figur 16 kan man tydligt se hur den uppmätta viskositeten varierade vid mätning av gurkmix men var mer eller mindre konstant när endast lagen från gurkmixen mättes. Det är gurkbitarna som ger upphov till den stora felmarginalen i Figur 15.

Om en vätska inte är helt newtonsk så är viskositeten beroende av skjuvhastigheten. I Figur 14 kan man se att när skjuvhastigheten ökar så minskar viskositeten på gurkmixen. Det innebär att gurkmix är en skjuvförtunnande vätska. När skjuvhastigheten ökar från 1-100 minskar viskositeten från ungefär 10 Pas till ca 0,5 Pas. Ketchup är ett annat trögflytande skjuvförtunnande livsmedel vilket man kan se i Figur 19.



Figur 19. Viskositetens påverkan av skjuvhastighet för Heinz ketchup vid 23 °C [11].

6.2. Processvariation

För beräkning av processvariation användes mätdata från 3 körningar för gurkmix A, 2 körningar för gurkmix B och endast en körning för gurkmix C. Utifrån mätdata kunde medelvärde och standardavvikelse för de aktuella körparametrarna beräknas

6.2.1. Mätosäkerhet i temperaturmätningar

Temperaturen mättes med temperaturprober både innan och efter hållarcell 1. Eftersom att ingen värme tillsätts i hållarcellen så är det omöjligt att temperaturen stiger i hållarcellen. Därför borde den uppmätta temperaturen efter värmeväxlaren vara högre än temperaturen efter hållarcellen x sekunder senare där x är uppehållstiden i hållarcellen. Tabell 5B visar sannolikheten att detta sker och för alla mättillfällen utom ett så är det väldigt ovanligt att den uppmätta temperaturen ökar i hållarcellen. De gånger den uppmätta temperaturen ökat kan troligtvis förklaras med att alla termometrar har en inbyggd mätosäkerhet. Det enda mättillfället för gurkmix B visade dock att den uppmätta temperaturen efter hållarcellen var högre i 37 % av alla mätningar. Detta är avsevärt högre än alla andra mättillfällen vilket tyder på mättekniska problem vid just den mätningen. Det är därför värden från gurkmix B inte användes vid konstruktion av modellen.

Under just den mätningen mättes temperaturen på den analoga termometern efter hållarcell 2. De mättekniska problemen innebär att man inte helt kan lita på temperaturskillnaden över hållarcell 2. Som man kan se i Figur 8 så visar den endast temperaturen i hela grader. Det innebär att om den inte har något systematiskt fel så har man alltid minst en felmarginal på 0,5 °C eftersom att den inte kan läsas av noggrannare.

6.2.2. Mätosäkerhet i flödesmätningar

Flödet av gurkmix mäts med en flödesmätare. Rent logiskt i en process så borde flödet vara ganska konstant. Mätningar görs var 10e sekund och flödet borde inte variera allt för mycket på 10

sekunder. Detta till trots så varierar det uppmätta värdet i snitt 5-10% av det totala flödet vilket tyder på att flödesmätaren har en felmarginal i sina mätningar motsvarande 5-10%.

Standardavvikelsen på flödet som anges i tabell 4 är en kombination av mätosäkerheten på flödesmätaren och hur flödet faktiskt varierar under processen. I tabell 7 kan man se att skillnaden mellan två mätpunkter motsvarar 30-80% av den totala felmarginalen.

Gurkmix är en väldigt trögflytande produkt med massor av gurkbitar i och detta är nog den största anledningen till att mätosäkerheten på flödet är så stort. För att undersöka detta jämfördes hur stor skillnaden mellan två på varandra följande mätpunkter var vid produktion av gurkmix jämfört med under rengöring. Processen rengörs med en lutblandning som har ungefär samma flödesegenskaper som vatten. Figur 16 visar att flödet varierar mycket mer för gurkmix än för vatten. Man kan se att för disk är flödesavvikelsen noll för ca 80 % av alla mätvärden medan för produktion är det endast knappt 30 % av alla värden där flödesavvikelsen ligger så lågt. Då ska man även tänka på att flödet under rengöring följer ett förinställt program där flödet ska ändras något.

Genom att undersöka mätdata från fler körningar än vad som gjorts i detta projekt så kan man ännu bättre kartlägga hur stor del av variationerna i flödet som kommer från mätosäkerheten på flödesmätaren. Då kan man även bättre veta hur flödet varierar och den ökade kunskapen kan göra att man inte behöver värma produkten lika mycket vilket sparar energi.

6.2.3. Analys av processvariation

Medelvärde och standardavvikelse för relevanta körparametrar i Tabell 4 beskriver processvariationen för processen. Processvariationen är baserad på data från cirka 50 timmars aktiv produktion. För att kunna kartlägga processvariationen ännu bättre skulle man behöva analysera mer data.

Kartläggningen av processvariationen kan vara ett bra verktyg att använda vid optimering och validering av processen. Vid varje förändring som görs i en produktionsprocess är det viktigt att ha processvariationen i åtanke. Man behöver ha en tillräckligt stor säkerhetsmarginal så att processvariationen inte skapar osäkra produkter.

6.3. Reducering av mikroorganismer

En av de viktigaste anledningarna till varför livsmedel värmebehandlas är för att reducera mängden mikroorganismer och skapa en säker produkt. En faktor som spelar stor roll för uppvärmning är hur värmeståligen de kritiska mikroorganismerna är. Även om man har identifierat de kritiska mikroorganismerna för en process så finns det ändå svårigheter att välja rätt D och z-värden till de mikroorganismerna eftersom att det kan skilja sig extremt mycket mellan olika stammar och produkter vilket man kan se i Tabell 3.

Två olika källor hade genomfört nästan exakt samma försök med samma stammar men i olika produkter och på så sätt fått fram väldigt skilda resultat. D och z-värde från Breidt et al. låg ganska högt jämfört med motsvarande värden för samma mikroorganismer från Dufort et al. Därför analyserades den minsta uppvärmningstemperatur för avdödningsvärden från de båda källorna för att på så sätt få fram två rimliga scenarion som kan gälla för gurkmix. Om man utnyttjar höga värden för D och z så analyseras ett "worst case scenario" med den enda risken att man värmer för mycket.

Hur många logenheter som mikroorganismer bör reduceras med skiljer sig mycket mellan olika sorters produkter. I modellen gjordes beräkningar för vilken temperatur som krävdes för att reducera mikroorganismer 6 logenheter. Sex logenheters reduktion är en vanlig siffra att använda eftersom att BRC nämner den siffran i en av sina standarder [12]. Det kan vara så att en högre eller lägre reduktion hade varit mer optimalt men eftersom att gurkmix har lågt pH så bör den vara mer motståndskraftig än den kylda maten som BRCs sex logenheter bygger på och därför bör sex logenheter vara tillräckligt.

6.4. Jämförelse av empiriskt och teoretiskt beräknade värmeomgångstal för värmeväxlaren

Värmeomgångstalet för värmeväxlaren beräknades både teoretiskt och empiriskt. Det Teoretisk procentuellt

beräknade i tabell A6 var ungefär $1000 \text{ W/m}^2/\text{K}$ medan det empiriskt beräknade i Tabell A3 var cirka $300 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Det är fullt rimligt att det teoretiskt beräknade värdet är högre än det empiriska eftersom att det inte förekommer någon slags energiförluster alls för det empiriska värdet.

För att uppvärmning med kondenserande ånga ska vara effektivt är det viktigt att ångflödet är tillräckligt stort för att alla rör ska kunna täckas med ett lager kondenserad ånga eftersom att värmeöverföringstalet i vätska är mycket större än det för gas. Det antogs att mättad ånga gick in i värmeväxlaren och kondenserad vätska vid samma temperatur gick ut från värmeväxlaren. Vatten expanderar över 1000 gånger vid kokning vilket gör att om all ånga skulle kondensera så finns det inte tillräckligt med vätska för att omsluta rören vilket försämrar värmeöverföringen. Energiförluster tillsammans med att ånga inte helt täcker rören kan förklara det mesta av skillnaden mellan det teoretiska och empiriska värdet.

Det totala ångflödet har inte varit möjligt att mäta och därför har det inte gått att undersöka effektiviteten på värmeväxlaren.

6.5. Diskussion av modell över processen

Den konstruerade modellen över värmebehandlingen konstruerades i Excel. I modellen kan man skriva in körparametrar, egenskaper för gurkmixen, egenskaper för hållarcell och reduceringsparametrar för mikroorganism. Med hjälp av Excels målsökningsverktyg kunde den minsta temperaturen som krävdes för att uppnå en specifik reduktion av mikroorganismer beräknas. Man kunde också skriva in en starttemperatur och beräkna sluttemperatur samt reduktion utifrån det.

När temperatur och reduktion beräknades över båda hållarcellerna gjordes en förenkling för att slipp använda en iterativ process med flera fall av målsökning. När båda hållarcellerna användes antogs det att hela hållarcellen hade samma värmeomgångstal. Detta gjorde att reduktionen kunde beräknas vid den lägsta temperaturen och därefter kunde starttemperaturen beräknas med målsökning. Förenklingen ökade reduktionen med 5-20% beroende på flöde. Eftersom att avdöningen blir bättre så kan man använda beräkningen utan att äventyra säkerheten på produkten.

6.6. Jämförelse mellan olika typer av hållarcell

Med modellen kunde energibehovet jämföras mellan nuvarande körparametrar och de med modellen beräknade parametrarna. Fyra olika konstellationer av hållarcell jämfördes och deras resultat redovisades i Tabell 9. Den logaritmiska reduktionen var konstant när energin som krävdes i värmeväxlaren för att komma upp i rätt temperatur jämfördes mellan olika hållarceller. Resultatet visade att man kunde spara upp till 20 % energi genom att ändra konstellation på hållarceller samt värmebehandla mindre. För att kunna använda värmen från den andra delen av hållarcellen till reduktion av mikroorganismer krävs det att man kan styra temperaturen i den delen av hållarcellen också. Därför hade man behövt installera en ny termometer efter hållarcell 2 som är kopplad till loggsystemet.

Isolering av hållarcellen kunde spara upp till 10 % energi med den isoleringen som användes i exemplet. Det finns massvis av olika slags isolering med varierande värmeledningstal och tjocklek. Det viktiga om man ska isolera rören är att isoleringen klarar av fukt då det kan bli fuktigt på utsidan av rören.

Värmebehovet analyserades bara för ett flöde. För att få en komplett bild av förbättringspotentialen borde man ha analyserat temperaturer vid flera olika flöden eftersom att körparametrarna för processen behöver alltid ha tillräcklig säkerhetsmarginal för att den producerade produkten alltid ska vara säker vid normala processvariationer.

6.6.1. *Möjlighet att utnyttja indunstare för avdödning*

Efter värmebehandlingen indunstas gurkmixen innan den packas. Gurkmixen håller fortsatt hög temperatur i indunstaren vilket innebär att reduktion av mikroorganismer faktiskt fortsätter i det processteget. För att kunna räkna med värmen från indunstaren krävs det att även den biten av processen styrs med temperatur och flöde.

7. Framtida arbete

Detta arbete har ökat kunskapen om gurkmix samt variationerna i produktionen. Dessa kunskaper kan användas som underlag vid framtida optimeringar och valideringar av processen. En noggrannare kartläggning av processvalideringen kan göras genom att analysera mer data från körningar. Mer dataanalys kan även avgöra hur stor del av flödesvariationen som kommer från felmarginall i flödesmätningen. Det kan även undersökas närmare vilka D och z-värden som bör användas vid beräkning av reduktion av mikroorganismer för gurkmix. När en förändring av processen sker är det viktigt att utöver den mikrobiologiska avdödningen även undersöka hur skillnaden i värmebehandling påverkar de sensoriska egenskaperna på gurkmixen.

8. Slutsatser

Det huvudsakliga målet med arbetet var att kartlägga värmebehandlingsprocessen och dess variationer. I det ingick det även att analysera fysikaliska parametrar på gurkmix och undersöka om processen gick att optimera med avseende på energiförbrukning.

Densitet, värmeledningstal och specifik värmekapacitet för tre olika sorters gurkmix mättes. Mätmetoderna som användes hade en felmarginal på 3-20 % och skiljde sig från motsvarande teoretiskt beräknade parametrar för gurkmix.

Processvariationerna kartlades genom att medelvärde och standardavvikelse för körparametrar analyserades. Temperaturmätningarna i processen hade en standardavvikelse på ca 1 °C vilket innebär att temperaturen fluktuerar 4-6 °C under körning. Flödet hade ganska stor standardavvikelse på 10-20 % av totalflödet. Det verkade dock som att 40-60 % variationen berodde på felmarginal i flödesmätaren men mer analys behövs för att bekräfta det.

Modellen som konstruerades över processen beskrev den verkliga processen bra och utnyttjades för att beräkna hur stor möjlig energibesparing som kunde göras. Genom att minska värmebehandlingen, installera en ny termometer efter hållarcell 2 och isolera hållarcellen kunde man minska ångförbrukningen med 10-20 % beroende på vilka reduceringsparametrar som användes.

9. Källförteckning

1. Orkla foods Sverige, Internal documents, 2020
2. Singh, R. P.; Heldman D. R.; *Introduction to Food Engineering*, 5th ed., Food Science and Technology, **2014**.
3. Adams, M. R.; Moss, M. O. *Food microbiology*, 2nd ed., The Royal Society of Chemistry, **2000**
4. Rosengren, Å.; Nyberg, K.; *Rapport 8: Inläggning, gravning, syrning och konservering*, Livsmedelsverket Sverige, **2017**
5. Breidt, F. et al. *Thermal processing of acidified foods with pH 4.1 to pH 4.6*, Food protection trends, 34 (3) 132-139, **2014**
6. Hooper, G.; *Clause 5.2.5: Cooking (heating) instruction validation*, Camden BRI, BRC Global Standard for Food Safety, Issue 8, **2019**
7. *HACCP*, www.ruokavirasto.fi/sv/foretag/livsmedelsbranschen/gemensamma-krav-for-livsmedelsbranschen/egenkontroll/principer-av-egenkontroll/haccp, Livsmedelsverket Finland, **2019**, (Hämtad 210120)
8. Spurk, J. H.; Aksel, N.; *Fluid Mechanics*, 3rd ed., Springer, **2019**
9. *KD2 Pro Thermal properties Analyzer: operator's manual*, Decagon Devices Inc., **2016**
10. *Kinexus Series User Manual*, Malvern Instruments Ltd., **2014**
11. Dufort, E. L.; et al. *Thermal Processing Parameters to Ensure a 5-log Reduction of Escherichia coli O157:H7, Salmonella enterica, and Listeria monocytogenes in Acidified Tomato-based Foods*, Food protection trends, 37(6) 409-418, **2017**
12. Berta, M., et al. *Correlation between in-line measurements of tomato ketchup shear viscosity and extensional viscosity*, Journal of Food Engineering, 173: 8-14 **2016**
13. Alveteg M., *Handbook*, Department of chemical engineering, Faculty of Engineering, Lund University, **2017**

10. Appendix

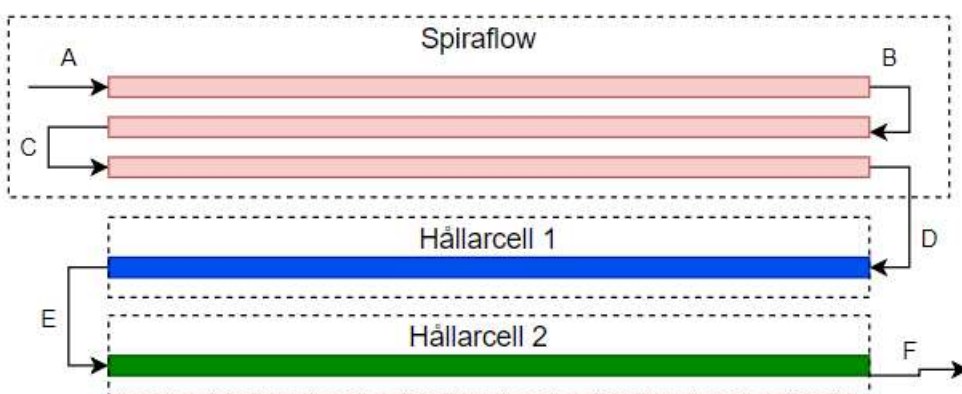
I detta avsnitt härleds de större beräkningarna som genomförts i detta arbete

10.1. Beräkning av värmegenomgångstal för värmeväxlare

Värmegenomgångstalet är viktigt eftersom att det säger hur mycket värme som överförs i värmeväxlaren per area. Detta beräknades först utifrån data från faktiska körningar i den riktiga produktionen. Dessa jämfördes med empiriskt och teoretiskt framtagna samband för värmegenomgångstal för en värmeväxlare som värms med kondenserande ånga.

10.1.1. Värmegenomgångstal utifrån faktiska körningar

Värmeväxlare och hållarceller ser schematiskt ut som Figur A1 med dimensioner som i Tabell A1.



Figur A1. Visar schematiskt värmeväxlare och hållarceller. A: kall gurkmix delas upp i sju mindre rör när den går in i värmeväxlaren. B och C: gurkmixen går ihop till ett rör som svänger tillbaka in i värmeväxlaren. D: Gurkan från de sju rören går ihop igen och här mäts temperaturen efter värmeväxlaren. E: Här mäts temperaturen efter hållarcell 1. F: Här finns i dagsläget bara en analog termometer som mäter temperaturen innan den går vidare till indunstning.

Tabell A1. Dimensioner på rören i värmeväxlare samt de båda hållarcellerna.

	Rördiameter	Längd	antal rör	Total ytarea
Värmeväxlare				
Hållarcell 1				
Hållarcell 2				

Värden från mätningar av fysikaliska data samt processparametrar är sammanställt i Tabell A2

Tabell A2. Körparametrar och fysikaliska parametrar för tre sorterna av gurkmix.

	Flöde	Temp Värmeväxlare	Temperatur Hållarcell 1	Specifik värmekapacitet	densitet	Ångtryck	Temperatur ånga	Värmeledningstal
Gurkmix C				2800 J/kg/K	1,016 kg/l			0,46 W/m/K
Gurkmix A				3300 J/kg/K	1,010 kg/l			0,43 W/m/K
Gurkmix B				3500 J/kg/K	0,980 kg/l			0,45 W/m/K

Utifrån värden från Tabell A1 och Tabell A2 samt Ekvation 1 och 2 i avsnitt 3.2.1 kan värmeegenomgångstalet för både värmeväxlaren och hållarcell 1 beräknas. Värmeegenomgångstalet skiljer sig en del mellan de olika produkterna och detta beror både på felmarginal i mätningar samt att värmeöverföringen skiljer sig lite mellan de olika produkterna. Beräkningarna ger följande värmeegenomgångstal i Tabell A3

Tabell A3. Värmeegenomgångstal för värmeväxlare och hållarcell 1 för tre olika slags gurkmix.

Gurkmix	Värmeegenomgångstal vvx	Värmeegenomgångstal H1
Gurkmix C	248 W/m ² /K	54 W/m ² /K
Gurkmix A	266 W/m ² /K	65 W/m ² /K
Gurkmix B	283 W/m ² /K	13 W/m ² /K

10.1.2. Värmeegenomgångstal utifrån teoretiska modeller

Teoretiska värmeegenomgångstal beror främst på värmeöverföringstalen h på båda sidor av röret samt av materialet röret är gjort av enligt Ekvation A1 [2].

$$(A1) \quad \frac{1}{k} = \frac{d_y}{h_i d_i} + d_y \sum \frac{\ln\left(\frac{d_{yj}}{d_{ij}}\right)}{2\lambda_j} + \frac{1}{h_y}$$

Indexen y , i och j betecknar ytter, inner och alla material som väggen är uppbyggd av. Diametern är d , värmeöverföringstalet är h , värmeegenomgångstalet är k och λ är värmeledningstalet för materialet j . Värmeöverföringstalet beror av det dimensionslösa talet Nusselts tal enligt Ekvation A2.

$$(A2) \quad Nu = \frac{hL}{\lambda}$$

Nusselts tal måste ofta uppskattas med hjälp av empiriskt framtagna samband. Det finns olika samband beroende på vilken slags system det gäller. För just flöde i rör finns det några olika samband. Vilket samband som ska användas avgörs av produkten i Ekvation A5 och där Reynolds och Prandtls tal beskrivs i Ekvation A3 och A4.

$$(A3) \quad Re = \frac{Lv\rho}{\mu}$$

$$(A4) \quad Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

$$(A5) \quad RePr \frac{d}{L}$$

L är den karakteristiska längden vilken just för flöde i ett cirkulärt rör är lika med rörets diameter. Alla parametrar som behövs för att beräkna $RePr \frac{d}{L}$ finns i Tabell A2. $RePr \frac{d}{L}$ var för alla gurksorter större än 50 vilket gör följande Ekvation A6 används för att beräkna Nusselts tal.

$$(A6) \quad Nu = 1,85 * \left(RePr \frac{d}{L}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Då kan värmeöverföringstalet beräknas vilket hittas i Tabell A4 tillsammans med Nusselts tal och faktorn $RePr \frac{d}{L}$.

Tabell A4. Beräknade värden för $RePr \frac{d}{L}$, Nusselts tal samt värmeegenomgångstal för insidan av rören i värmeväxlaren.

	$RePr \frac{d}{L}$	Nusselts tal	Värmeöverföringstal
Gurkmix C	48900	67,6	1245 W/m ² /K
Gurkmix A	60000	72,4	1246 W/m ² /K
Gurkmix B	58100	71,6	1290 W/m ² /K

Gurkmixen värms upp med ånga som kondenserar och för det finns det enkla samband för att uppskatta Nusselts tal. Det finns ett empiriskt samband som beskriver Nusselts tal när ånga kondenserar på horisontella rör. Sambandet beskrivs i Ekvation A7 och alla värden som används samt vad alla beteckningar betyder finns i Tabell A5. Värmeöverföringstalet för utsidan av röret kommer vara samma oavsett vad som flödar på insidan om vi antar att ångan har ungefär samma tryck oavsett produkt som produceras.

$$(A7) \quad Nu = 0,729 * \left[\frac{d^3 h_{lv} g (\rho_l - \rho_v)}{k_l \nu_l (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

Tabell A5. Beskriver alla beteckningar som används i Ekvation A7 samt deras värde. Det är antaget att vattenångan har trycket 3,5 bar och att rören i värmeväxlaren har en tjocklek på 1 mm. Värmeöverföringstalet är inte med i Ekvation A7 men uträknade med hjälp av definitionen av Nusselts tal i Ekvation A2.

Parameter	Beteckning i Ekvation A7	Värde
Rördiameter	D	0,027 m
Vaporiseringsentalpi	h_{lv}	2147,7 kJ/kg
Gravitationskonstant	g	9,82 m/s ²
Densitet för kondenserat vatten	ρ_l	925 kg/m ³
Densitet för vattenånga	ρ_g	2,163 kg/m ³
Värmeledningstal	k_l	0,677 W/m/K
Kinematisk viskositet för flytande vatten	ν_l	3*10 ⁻⁷ m ²
Mättnadstemperatur	T_{sat}	138,86 °C
Väggtemperatur	T_w	95 °C
Nusselts tal	Nu	10498
Värmeöverföringstal	h_y	263228 W/m ² /K

Den sista biten som behövs för att kunna beräkna det sammanlagda värmeegenomgångstalet är värmeledningen genom röret. Röret antas vara 1 mm tjockt och vara tillverkat av rostfritt stål 316L som har ett värmeledningstal på 16,3 W/m/K. Värmeegenomgångstalen kan då beräknas med Ekvation A1 och resultaten redovisas i Tabell A6.

Tabell A6. De teoretiskt beräknade värmeegenomgångstalen för värmeväxlaren.

	Värmeegenomgångstal
Gurkmix C	995 W/m ² /K
Gurkmix A	996 W/m ² /K
Gurkmix B	1028 W/m ² /K

10.2. Beräkning av specifik värmekapacitet

Under mätningen av värmekurvor fick man fram temperaturkurvor liknande den i Figur 11. Uppvärmningen är tidsberoende vilket innebär att temperaturen i burken både beror av position och tid. Detta gör beräkningarna svårare men det går att genomföra. Utifrån dessa temperaturkurvor och Heistlers modell kan den specifika värmekapaciteten beräknas. Heistlers modell bygger på att både temperaturfraktionen i Ekvation A9 och Fouriers tal i Ekvation A10 är kopplade till Biot talet i Ekvation A8.

Förhållandet mellan internt och externt värmemotstånd på burken spelar stor roll för uppvärmningen. Internt motstånd innebär hur lätt värmen leds genom gurkan i burken. Det externa motståndet betyder hur lätt värmen överförs från det värmande mediet till ytan på burken. Detta definieras som Biot talet och beskrivs i Ekvation A8. k är värmeöverföringstalet för metallburken, d_c är radien på behållaren och k är värmeledningstalet.

$$(A8) \quad N_{Bi} = \frac{k d_c}{k}$$

Om Biot talet är större än 40 så antar man att det inte finns något externt värmemotstånd utan den klart hastighetsbestämmande faktorn är hur snabbt värmeöverföringen sker på insidan. Om Biot talet är mellan 0,1 och 40 så påverkar både det interna och externa motståndet uppvärmningen och om Biot talet är under 0,1 så finns det inget internt motstånd.

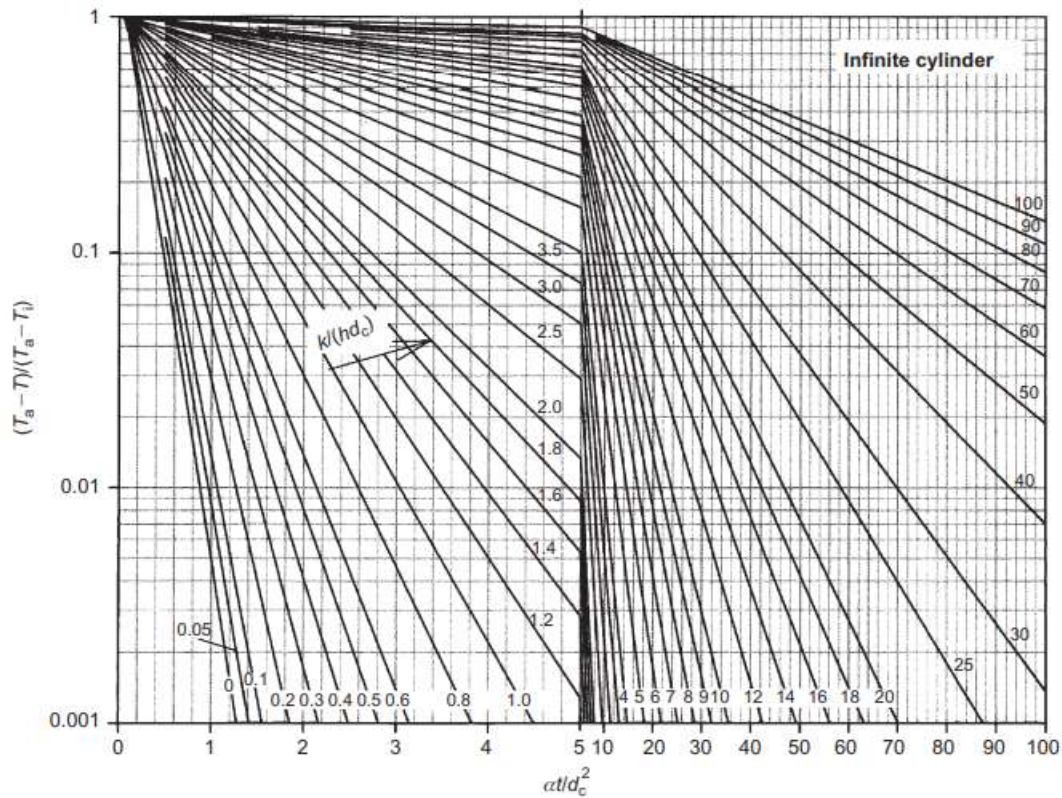
Temperaturfraktionen i Ekvation A9 visar hur långt uppvärmningsprocessen kommit. T_a är temperaturen på utsidan av behållaren, T är den nuvarande temperaturen i centrum och T_i är starttemperaturen.

$$(A9) \quad T_f = \frac{(T_a - T)}{(T_a - T_i)}$$

Fouriers tal i Ekvation A10 visar hur lång tid det tar för mitten av burken att uppnå temperaturen T . α är värmediffusiviteten, t är tiden som gått sedan start och d_c är radien på burken.

$$(A10) \quad Fo = \frac{\alpha t}{d_c}$$

Heistlers metod beskriver ett samband mellan Ekvation A8-A10 och utifrån det sambandet kan man konstruera ett Heistler diagram som det i Figur A2.



Figur A2. Heistler diagram för en oändlig cylinder [2].

Utifrån temperaturkurvorna samt densitet och värmeledningstal på gurkan kan man beräkna α i Fouriers tal. Värmediffusivitet beror av densitet, specifik värmekapacitet och värmeledningstal enligt Ekvation A11.

$$(A11) \quad \alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

Med Ekvation A8-A11 ovan kan den specifika värmekapaciteten beräknas. För att beräkna Biot talet krävs det att man vet värmeövergångstalet vilket beräknas med hjälp av data från mätning av värmekurvor för vatten. Tabell A7 visar parametrar och ekvationer som användes för att beräkna värmeövergångstalet.

Tabell A7. Parametrar och ekvationer för att beräkna värmeövergångstalet.

Ekvation (A12)	$\frac{mc_p \Delta T}{t} = kA \overline{\Delta T}_L$
Ekvation (A13)	$\overline{\Delta T}_L = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}$
Massa (m)	372 g
Specifik värmekapacitet (c_p)	4178 J/kg/K
Temperaturskillnad vatten (ΔT)	20,6 °C
Tid (t)	352 s
Ytarea burk (A)	0,023 m ²
Temperaturskillnad slut (Δ_1)	2,3 °C
Temperaturskillnad start (Δ_2)	22,9 °C

Värmeöverföringskoefficient (k)	450 W/m ² /K
---------------------------------	-------------------------

Den specifika värmekapaciteten beräknades med data från värmekurvor vid flera olika tillfällen. Biot talet för gurkan beräknades med Ekvation A8 och var lika med 40. Fourier tal beräknades grafiskt i Figur A2 för biot tal 40 vid olika temperaturkvoter som redovisas i Tabell A8.

Tabell A8. Grafiskt beräknade fourier tal vid olika temperaturkvoter. Biot talet antas vara 40.

Temperaturkvot $T_f = \frac{(T_a - T)}{(T_a - T_i)}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Fourier tal $Fo = \frac{\alpha t}{d_c}$	0,45	0,38	0,30	0,26	0,20

Från temperaturkurvorna vid respektive temperatur och fysikaliska parametrar på gurmik kunde specifik värmekapacitet beräknas vid varje kombination av fourier tal och temperaturkvot. Använda parametrar för en av beräkningen av specifik värmekapacitet av gurmik A vid 25 °C och temperaturkvot 0,5 redovisas i Tabell A9

Tabell A9. Tabellen visar de parametrar och värden som användes i beräkning av c_p för Gurmik A vid 25 °C

Temperaturkvot (T_f)	0,5
Fourier tal (Fo)	0,2
Biot tal (N_{Bi})	40
Vattentemperatur (T_a)	45 °C
Starttemperatur gurmik A (T_i)	24,5 °C
Temperatur gurmik A	34,8 °C
Karakteristisk dimension (d_c)	3,6 cm
Tid (t)	1878 s
Värmediffusivitet (α)	1,38 *10 ⁻⁷ m ² /s
Densitet (ρ)	1037 kg/m ³
Värmeledningstal (λ)	0,57 W/m/K
Specifik värmekapacitet (c_p)	3983 J/kg/K

Beräkningen i Tabell A9 genomfördes 3-5 gånger per temperaturkurva och gurmik. Den specifika värmekapaciteten redovisas i Figur 13.

10.3. Beräkning av mikrobiologisk avdödning vid normal produktion

I tabell 3 i avsnitt 3.3.2 anges D och Z-värden för produktförstörande mikroorganismer. Kommande analyser kommer baseras på de kombinerade D och z-värdena från de båda källorna.

För att kunna utnyttja D och z-värden för att räkna på avdödning av mikroorganismer krävs det att man vet både temperatur och uppehållstid. D-värdet för respektive mikroorganism är definierad vid en specifik temperatur men temperaturen under processen varierar stort. För att kunna jämföra två

olika värmebehandlingar vid olika temperaturer räknar man om avdödningen vid alla temperaturer T till den temperatur T_R som D-värdet är definierat vid enligt Ekvation A13 [2].

$$(A13) \quad t_r = t \cdot 10^{\frac{T-T_R}{z}}$$

Därefter kan man beräkna hur stor reduktion av mikroorganismer man uppnått genom att summera avdödningen för respektive del av värmebehandlingen. Gurkmix antas gå in i värmeväxlaren vid 15 °C och därefter värms den till cirka 88 °C. När värmen förändras mellan två punkter antas avdödningen ske vid den lägsta av temperaturerna för att på så sätt anta ett "worst case scenario". Eftersom att gurkmixens ingångstemperatur till värmeväxlaren är så låg (15 °C) så antas avdödningen i värmeväxlaren vara försumbar. Det finns bara mätdata på temperaturen efter hållarcell 2 från en enda körning och därför antas det att temperaturminskningen är lika stor för alla produkter. Reduceringen för de nuvarande körparametrarna beräknades med Ekvation A13 och redovisas i Tabell A10.

Tabell A10. Visar den logaritmiska reduktionen av respektive mikroorganism både med och utan att räkna med värmebehandlingen som sker i hållarcell 2. Medelvärde för flöde och temperatur i Tabell A2 användes.

	Uppehållstid (s)		Kombinerad [6] ($D_{71,1}=51,6$ s)		Kombinerad [7] ($D_{71,1}=6,1$ s)	
	H1	H2	Exkl H2	Inkl H2	Exkl H2	Inkl H2
Gurkmix C	■	■	■	■	■	■
Gurkmix A	■	■	■	■	■	■
Gurkmix B	■	■	■	■	■	■

10.4. Optimering av tillverkningsprocessen

För att optimera processen användes en modell som tillverkats med tidigare nämnda ekvationer och mätvärden. Modellen gjordes i Microsoft Excel. I Tabell A11 och A12 redovisas en sammanställning av de ekvationer och definition av beteckningar som modellen är uppbyggd av.

Tabell A11: Visar en sammanställning av de parametrar som används i ekvationerna i TABELL.

Värmeegenomgångstal	$\frac{1}{k} = \frac{d_y}{h_i d_i} + d_y \sum \frac{\ln(\frac{d_{y_j}}{d_{ij}})}{2\lambda_j} + \frac{1}{h_y}$	Ekvation A1
Reynolds tal*Prantls tal	$RePr = \frac{Lv\rho c_p}{\lambda}$	Ekvation A5
Värmeöverföringstal	$h = \frac{1,85 \cdot (RePr * \frac{d}{L})^{1/3} \cdot \lambda}{L}$	Ekvation A14
Överförd värme i värmeväxlare	$W = F\rho c_p \Delta T = kA\Delta\bar{T}_L$	Ekvation A15
Logaritmisk medeltemperatur	$\Delta\bar{T}_L = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\ln \frac{\Delta_1}{\Delta_2}}$	Ekvation A16
Reduktion av mikroorganismer	$N = \frac{t \cdot 10^{\frac{T-T_R}{z}}}{D}$	Ekvation A13

Tabell A12. Visar definitionen av de beteckningar som används i ekvationerna i Tabell A11.

Namn på parameter	Beteckning	Namn på parameter	Beteckning
-------------------	------------	-------------------	------------

värmeegenomgångstal	k	Volymflöde	F
Diameter	d	Temperaturskillnad	ΔT
Värmeöverföringstal	h	Logaritmisk medeltemperatur	$\overline{\Delta T}_L$
värmeledningstal	λ	Effekt	W
Reynolds tal	Re	uppehållstid	t
Prantls tal	Pr	Referenstemperatur	T_R
Karakteristisk längd	L	D-värde	D
Hastighet	v	z-värde	z
Specifik värmekapacitet	c_p	Antal logaritmiska reduceringar	N
Ytarea/värmeväxlararea	A	Densitet	ρ

Utifrån de totala värmeegenomgångstalen i Tabell A3 och de inre värmeöverföringstalen i Tabell A8 kunde summan av termerna från rörväggen och yttre värmeöverföringstal beräknas med hjälp av Ekvation A1. Denna summa bidrar till det totala värmeegenomgångstalet för hållarcellen. Resultaten för respektive gurkmix visas i Tabell A13.

Tabell A13. Inre värmeöverföringstal samt summa av termerna från rörvägg och yttre värmeöverföringstal för respektive gurkmix.

	Gurkmix A	Gurkmix B	Gurkmix C
Inre Värmeöverföringstal	655 W/m ² /K	622 W/m ² /K	662 W/m ² /K
Bidrag från rör och yttre värmeöverföring	73,1 W/m ² /K	59,3 W/m ² /K	13,4 W/m ² /K

Eftersom att värdet på gurkmix C skiljer sig så mycket från de andra två så kommer det inte användas i kommande beräkningar och anledningen till detta förklaras noggrant i avsnitt 6.2.1. Då det inte skiljer så mycket i rördiameter mellan hållarcell 1 och 2 så antas bidraget från rör och yttre värmeöverföring vara samma i de båda. Ett medelvärde mellan gurkmix A och B kommer användas för bidraget från rör och yttre värmeöverföring användes i modellen.

Den minsta temperatur som gurkmix behövdes värmas till för att antalet mikroorganismer skulle reduceras med 6 logenheter beräknades i modellen. Anledningen till att just 6 logenheter valdes var för att det är en vanlig reduceringsgrad inom livsmedelsindustrin då BRC rekommenderar den reduceringen i ett av sina dokument 12. Reduceringen beräknades för de D och z-värden och referenstemperaturer som redovisas i Tabell A14.

Tabell A14. De olika D-värden, z-värden och referenstemperaturer som användes. Reduceringsparametrar från de båda källorna användes i modellen. Dz 1 kommer från Breidt et al. [6] och Dz 2 är enligt värden i Dufort et al. [7].

	D (s vid T_{ref})	Z (°C)	T_{ref} (°C)
Dz 1[6]	51,6	9,5	71,1
Dz 2[7]	6,1	7,37	71,1

Eftersom att de fysikaliska parametrarna är ganska lika för gurkmix A-C antogs det att den möjliga energibesparingen skulle vara ungefär lika stor för alla produkter. Därför analyserades endast gurkmix A i Tabell A15. Effekten som krävdes för att värma gurkmix A till temperaturen beskriven i

Tabell A2 användes som normalvärde. Därefter beräknades den minsta temperatur för att uppnå samma avdödning och 6 logenheters reduktion med värden från Dz 1 och Dz 2. När isolerad hållarcell analyserades användes 5 mm tjock isolering med ett värmeledningstal på 0,2 vilket är ett normalt värmeledningstal för isolering [13].

Tabell A15. Redovisar hur mycket energi som sparas genom att bara behöva värma upp till temperaturen i kolumn 3. Endast värden vid 4000 jämfördes. Alla värden jämfördes med uppvärmningen av gurkmix A

Typ av hållarcell	Reduceringsgrad	Minsta temperatur som krävs °C	Energibesparing
Kort hållarcell	21 log (Dz 1)		0 %
Lång hållarcell	21 log (Dz 1)		3 %
Kort isolerad hållarcell	21 log (Dz 1)		1 %
Lång isolerad hållarcell	21 log (Dz 1)		6 %
Kort hållarcell	6 log (Dz 1)		8 %
Lång hållarcell	6 log (Dz 1)		11 %
Kort isolerad hållarcell	6 log (Dz 1)		9 %
Lång isolerad hållarcell	6 log (Dz 1)		13 %
Kort hållarcell	6 log (Dz 2)		20 %
Lång hållarcell	6 log (Dz 2)		21 %
Kort isolerad hållarcell	6 log (Dz 2)		21 %
Lång isolerad hållarcell	6 log (Dz 2)		23 %