

# CHALMERS



## EFFEKTIVISERING AV SEELUTION AB:S PRODUKTIONSANLÄGGNING

Kandidatarbete på civilingenjörsprogrammet inom maskinteknik

EMIR BEKRIC  
LEJLA ERDAL  
ALICE HALLÉN  
EMMA KARLANDER  
MARTYNA KRAJEWSKI  
RUBIJA REKANOVIC

---

Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Chalmers tekniska högskola  
Göteborg, maj 2020



KANDIDATARBETE IMSX15-20-01

# Effektivisering av Seelution AB:s produktionsanläggning

EMIR BEKRIC  
LEJLA ERDAL  
ALICE HALLÉN  
EMMA KARLANDER  
MARTYNA KRAJEWSKI  
RUBIJA REKANOVIC



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för industri- och materialvetenskap  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, maj 2020

Effektivisering av Seelution AB:s produktionsanläggning i Kristinehamn

Emir Bekric, Lejla Erdal, Alice Hallén, Emma Karlander, Martyna Krajewski,  
Rubija Rekanovic

© Emir Bekric, Lejla Erdal, Alice Hallén, Emma Karlander, Martyna Krajewski,  
Rubija Rekanovic, maj 2020.

Handledare: Clarissa González Chávez, Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Examinator: Björn Johansson, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Kandidatarbete IMSX15-20-01  
Institutionen för industri- och materialvetenskap  
Chalmers tekniska högskola  
SE-412 96 Göteborg

## Förord

Rapporten är skriven som ett kandidatarbete vid Chalmers tekniska högskola och utgör en del av examinationen av civilingenjörsprogrammet med inriktning på maskinteknik. Studien utfördes under vårterminen 2020 vid institutionen för industri- och materialvetenskap. Kandidatarbetet är skrivet på uppdrag av Seelution AB, ett Göteborgsföretag som producerar oljebaserade produkter och vaxemulsioner. Studien syftar till att undersöka hur företagets produktionsprocess för oljebaserade produkter och vaxemulsioner kan effektiviseras.

Vi vill tacka Seelution AB och deras anställda för att ha möjliggjort studien och bistått med information under arbetet. Framförallt vill vi tacka Krister Svanberg och Hampus Häggström för deras varma mottagande vid studiebesöket på fabriken i Kristinehamn. Vi vill även rikta ett stort tack till Clarissa González Chávez för det stöd, engagemang och den handledning vi erhållit under projektets gång. Vidare vill vi även tacka Johanna Beiron, Anna Köhler, Max Biermann och Fredrik Normann för den kunskap och den beräkningsmässiga vägledning som de har bidragit med under hela arbetet.

Göteborg, Maj 2020

## Sammanfattning

Seelution AB är ett snabbt växande, relativt nytt företag inom tillverkningsindustrin som specialiserar sig på emulsionsteknik och hållbara förpackningsbarriärer. Huvudkontoret ligger i Göteborg och tillverkningen av produkterna sker på fabriken i Kristinehamn som förvärvades 2016. Idag har Seelution AB cirka tio anställda och för att hålla jämna steg med en ständigt ökande efterfrågan finns ett behov av att genomföra energibesparande åtgärder samt optimera effektiviteten i produktionen.

Projektet avser att effektivisera Seelution AB:s produktionsanläggning. Metoderna som har använts för att uppnå syftet är energikartläggning inklusive termodynamiska beräkningar, värdeflödesanalys (VSM) och litteraturstudier. Ett studiebesök på företaget genomfördes också för att samla in data om produktionssystemet.

Som ett resultat av effektiviseringen visade beräkningarna att uppvärmning av råvarorna krävde mycket energi och att produktionens kapacitet inte nyttjades till fullo. VSM visade att fabriken ledtider är långa och att utformningen av bland annat lagret behöver förbättras. Energikartläggningen, VSM och litteraturstudierna resulterade i åtgärdsförslag, nedan redovisas de som anses ha störst potential:

- Tillvarata skrubbers värmeenergi
- Tillvarata värmeväxlarens värmeenergi
- Investera i ångfällor och termostatiska avluftare
- Omorganisera layouten för lagret
- Investera i sensorer i kunders tankar som kontinuerligt registrerar mängden produkt

I diskussionen analyserades de framtagna åtgärdsförslagen samt metoderna som användes med avseende på deras för- och nackdelar. Slutsatsen är att fabriken i Kristinehamn har områden som potentiellt kan förbättras. För närvarande fungerar fabriken väl med hänseende till att ingen överproduktion äger rum, ingen onödig bearbetning av produkterna sker och att ingen väntetid mellan processerna förekommer. Det finns emellertid ett stort behov av att minska energiförlusterna i produktionsflödet, och rekommendationerna är att Seelution AB slutför kartläggningen av värdeflödesanalysen och energikartläggningen för en mer effektiv produktion.

## Abstract

Seelution AB is a fast-growing, relatively new manufacturing company which specializes in emulsion technique and sustainable packaging barriers. The head office is in Gothenburg and the factory where the production takes place, which was acquired in 2016, is in Kristinehamn. Today Seelution AB has around 10 employees and to keep up with constantly increasing demand, it is required that several energy-saving measures are implemented, and that the production efficiency is optimized.

The project aims to streamline Seelution AB's production plant. The methods used to achieve this purpose are energy mapping including thermodynamics calculations, value stream mapping (VSM), and literature studies. The company was also visited to collect data about the production system.

As a result of the streamlining, the calculations showed that the heating process of the raw materials required a lot of energy and that the capacity of the production was not optimised. The VSM showed that the factory's lead times are long and that the layout regarding the inventory among other needs to be improved. The energy mapping, VSM and literature studies resulted in improvements for the production system, which are presented below:

- Utilize the energy generated by the scrubber
- Utilize the energy generated by the heat exchanger
- Invest in steam traps and thermostatic dehumidifiers
- Rearrange the layout for the inventory
- Invest sensors inside the customer tanks that register continuously the amount of product

In the discussion the results have been analyzed together with all methods based on their advantages and disadvantages. The conclusion is that the factory in Kristinehamn has areas of improvements. At present, the factory is well functioning with no overproduction taking place, no unnecessary processing, and no wait between processes. However, there is a great need of reducing energy losses in the production flow, the recommendations are that Seelution AB completes the value stream mapping and the energy mapping for a more effective production.

# Begreppslista

Här listas de begrepp av ämnesspecifika termer som förekommer i rapporten samt beteckningar från ekvationer.

|                                  |                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Betydande energianvändare</b> | (Definition enligt ISO 50001) Energianvändning som utgör en ansenlig energikonsumtion och/eller där potentialen för förbättring av energiprestanda är stor.             |
| <b>Dragande system</b>           | Tillverkning efter kundens verkliga behov                                                                                                                               |
| <b>Energianvändning</b>          | (Definition enligt ISO 50001) Metod eller form av användning av energi (ljus, värme, kyla, transporter, processer, produktionslinjer)                                   |
| <b>Energibärare</b>              | Ämne eller fysikalisk process som används för att transportera eller lagra energi                                                                                       |
| <b>Energieffektivisering</b>     | (Definition enligt ISO 50001) Förhållande eller annan kvantitativ relation mellan utfallet i form av prestanda, tjänster, varor eller energi och den tillförda energin. |
| <b>Energikonsumtion</b>          | (Definition enligt ISO 50001) Mängd energi som används (till exempel GJ, kWh, MWh)                                                                                      |
| <b>Entropi</b>                   | Energi som går förlorad till omgivningen                                                                                                                                |
| <b>IBC</b>                       | Standardiserad tank på 1000 liter som färdig produkt fraktas i till kund                                                                                                |
| <b>IDEF0</b>                     | Integration Definition for Function Modeling                                                                                                                            |
| <b>Kaizen</b>                    | Ständiga förbättringar (japanska)                                                                                                                                       |
| <b>Lean Production</b>           | Ideologi som går ut på att maximera kundnyttan och samtidig minimera slöseri av resurser genom olika typer av effektiviseringar och rationaliseringar                   |
| <b>MEFA</b>                      | Material och Energiflödesanalys/ Material and Energy flow analysis                                                                                                      |
| <b>Nedströms riktning</b>        | Råmaterial - förädlingsprocesser - leverans - slutanvändare                                                                                                             |
| <b>Pacemakerprocess</b>          | Process/steg som produktionsschemat baseras på, där flödet nedströms är kontinuerligt                                                                                   |
| <b>Supermarket</b>               | En metod för att hantera lager i syfte att åstadkomma ett dragande system                                                                                               |



**Sus-VSM**

Sustainable Value Stream Mapping

**Tryckande system**

Tillverkning efter en produktionsplan

**Uppströms riktning**

Slutanvändare - leverans - förädlingsprocesser - råmaterial

**VSM**

Value Stream Mapping

Beteckningar från ekvationer:

|           |                   |                         |
|-----------|-------------------|-------------------------|
| $c_p$     | [J/kgK]           | Specifik värmekapacitet |
| $e$       | [J]               | Yttre energi            |
| $h$       | [J/kg]            | Entalpi                 |
| $h_{fus}$ | [J/kg]            | Latent entalpi          |
| $M$       | [g/mol]           | Molmassa                |
| $m$       | [kg]              | Massa                   |
| $p$       | [Pa]              | Tryck                   |
| $Q$       | [J]               | Värmeenergi             |
| $s$       | [J/kg]            | Entropi                 |
| $T$       | [K]               | Temperatur              |
| $t$       | [s]               | Tid                     |
| $U$       | [J]               | Inre energi             |
| $V$       | [m <sup>3</sup> ] | Volym                   |
| $W$       | [J]               | Fysikaliskt arbete      |

# Innehållsförteckning

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 1 Inledning.....                                     | 1  |
| 1.1 Bakgrund .....                                   | 1  |
| 1.2 Syfte.....                                       | 2  |
| 1.3 Problemformulering.....                          | 2  |
| 1.4 Avgränsningar .....                              | 2  |
| 2 Produktionssystem .....                            | 3  |
| 2.1 Vaxemulsionsproduktion.....                      | 3  |
| 2.2 Oljeblandningsproduktion .....                   | 6  |
| 3 Teori .....                                        | 7  |
| 3.1 Termodynamisk grund.....                         | 7  |
| 3.1.1 Entalpi och fasövergång.....                   | 8  |
| 3.1.2 Energiekvationen .....                         | 8  |
| 3.1.3 Allmän energibalans .....                      | 10 |
| 3.1.4 Beräkning av specifik värmekapacitet .....     | 10 |
| 3.1.5 Latent värme .....                             | 10 |
| 3.2 Processkartläggning.....                         | 11 |
| 3.2.1 Principer för processkartläggning.....         | 11 |
| 3.2.2 VSM.....                                       | 12 |
| 3.2.3 IDEF0.....                                     | 14 |
| 3.2.4 Sus-VSM.....                                   | 15 |
| 3.2.5 MEFA .....                                     | 16 |
| 4 Metod .....                                        | 18 |
| 4.1 Litteraturstudier .....                          | 18 |
| 4.2 Energikartläggning .....                         | 19 |
| 4.2.1 Planering av kartläggning .....                | 20 |
| 4.2.2 Energikartering .....                          | 21 |
| 4.2.2.1 Beräkningar för oljeblandning .....          | 21 |
| 4.2.2.2 Beräkningar för vaxemulsion.....             | 23 |
| 4.2.3 Analys av energikartering.....                 | 26 |
| 4.3 Processkartläggning.....                         | 27 |
| 4.3.1 Översikt över processkartläggningsmetoder..... | 27 |
| 4.3.1 Val av kartläggningsmetod .....                | 28 |
| 4.3.2 Arbetsgång för kartläggning .....              | 32 |
| 5 Resultat.....                                      | 33 |
| 5.1 Energikartläggning .....                         | 34 |
| 5.1.1 Planering av energikartläggning .....          | 34 |
| 5.1.2 Energikartering .....                          | 36 |
| 5.1.2.1 Oljeblandning.....                           | 36 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.2.2 Vaxemulsion.....                                            | 36  |
| 5.1.3 Åtgärdsförslag baserade på genomförd energikartläggning ..... | 37  |
| 5.2 Processkartläggning.....                                        | 41  |
| 5.2.1 Kartläggning av nuvarande tillstånd, vaxemulsion.....         | 42  |
| 5.2.2 Identifiering av slöseri, vaxemulsion .....                   | 43  |
| 5.2.3 Kartläggning av nuvarande tillstånd, oljeblandning .....      | 44  |
| 5.2.4 Identifiering av slöseri, oljeblandning .....                 | 46  |
| 5.2.5 Åtgärdsförslag baserade på VSM .....                          | 47  |
| 6 Diskussion .....                                                  | 49  |
| 6.1 Diskussion av metodanvändning.....                              | 49  |
| 6.1.1 Litteraturstudier.....                                        | 49  |
| 6.1.2 Energikartläggning.....                                       | 49  |
| 6.1.3 VSM.....                                                      | 50  |
| 6.2 Diskussion av resultat.....                                     | 51  |
| 6.2.1 Energiberäkningar.....                                        | 51  |
| 6.2.2 Åtgärdsförslag.....                                           | 51  |
| Slutsatser .....                                                    | 54  |
| Källförteckning                                                     |     |
| Bilagor                                                             |     |
| Bilaga 1 – Sökhistorik vid litteraturstudier.....                   | i   |
| Bilaga 2 – VSM vaxemulsioner.....                                   | iii |
| Bilaga 3 – VSM oljeblandningar .....                                | iv  |

# 1 Inledning

I Sverige svarar ett fåtal branscher för majoriteten av industrins energianvändning. Kemiindustrin är en av dem, som tillsammans med massa- och pappersindustrin samt järn- och stålindustrin står för tre fjärdedelar av industrins totala energianvändning (Energimyndigheten, 2015). Den höga energiförbrukningen kan delvis förklaras av att energin ingår som en av huvudråvarorna i processerna, men det är också inom dessa branscher de största förlusterna kan upptäckas och det finns därmed ett stort behov av att energieffektivisera industrierna. Vidare finns ett behov av att kartlägga de olika processerna i produktionen i syfte att visualisera vilka brister som existerar samt redogöra hur dessa kan elimineras.

Seelution AB är ett företag tillhörandes kemiindustrin som specialiserar sig inom emulsionsteknik och hållbara förpackningsbarriärer och producerar en bred variation av oljebaserade produkter samt vaxemulsioner. Inga tidigare energistudier har genomförts på företaget och därav saknas kunskap om hur energikrävande produktionsprocesserna är, vilka delar av processerna som svarar för högst förluster, samt hur de olika processerna förhåller sig till varandra. Projektet syftar till att besvara dessa ovissheter genom att energieffektivisera Seelution AB:s produktionsprocess, samt att kartlägga de processer som anses vara relevanta. Industriella kartläggningsmetoder används som underlag, såväl som termodynamiska beräkningar. Projektet omfattar endast effektivisering av produktionsprocessen för ett fåtal utvalda produkter och kartläggningar begränsas till analys av nuvarande tillstånd samt underlag för möjliga åtgärder.

## 1.1 Bakgrund

Att minska på utsläpp och klimatavtryck har blivit allt mer tidsenligt för företag, något Motyka med flera skriver om i Deloittes energirapport (2019). Klimatförändringar kan innebära stora konsekvenser för människor såväl som för biologisk mångfald, och EPA (2018) visar att industrin fortfarande bidrar med en betydande del av utsläppen i världen. Därmed är det relevant att undersöka energiförbrukningen hos företag och se vilka effektivitetsåtgärder som kan implementeras. Inte nog kan det leda till minskat klimatavtryck, men effektiviseringar kan även bidra med ekonomiska incitament för företag att inleda förändringen. Detta påvisar Jan Lindérs text (2015) om Toyotas Lean Production, där Six Sigma berör idén om att analysera och optimera företagsprocesser för att sedan arbeta mot förbättring med hjälp av kartläggning av processer.

Seelution AB förvärvade sin produktionsanläggning 2016, och sedan förvärvet har företaget vuxit avsevärt och är därför i behov av att optimera produktionsanläggningen. Kandidatarbetet avser att identifiera var förbättringspotential i produktionssystemet finns och vilka åtgärder som kan göras för att effektivisera systemet. Arbetet kommer bland annat innefatta metoder för att förstå och undersöka tekniskt komplexa produktionssystem såväl som beräkningar av termodynamiska flöden.

## 1.2 Syfte

Projektet avser att skapa ett underlag för att effektivisera produktionsanläggningen för Seelution AB med hjälp av termodynamiska beräkningar och industriella kartläggningsmetoder.

## 1.3 Problemformulering

Seelution AB är i en expansiv fas och behöver därför optimera sin organisation. Områden med förbättringspotential behöver alltså identifieras, framförallt där stora förluster förekommer i produktionen. Seelution AB formulerade egna frågor angående produktionen som kunde vara intressanta att få svar på, såsom hur en fördubblad effekt på kyltornet skulle påverka tiden det tar att producera en sats, hur mycket driften av ångpannan kostar jämfört med direktverkande el, eller hur en temperaturhöjning alternativt sänkning på 10°C för ångan skulle påverka tiden det tar att värma en sats eller lagringstank.

En problemanalys utfördes som innefattade konsultation med institutionen för energiteknik på Chalmers Tekniska Högskola. Det konstaterades att frågorna som ställdes av uppdragsgivaren behandlar flera olika områden som behandlar djupgående termodynamik med värmetransporter, ekonomiska analyser och tidsoptimering av produktionsanläggningen. Frågeställningen hade krävt en avancerad nivå av termodynamiskt kunnande samt omfattande stöd från Seelution AB med avseende på att utföra mätningar för att kunna tillhandahålla stora mängder data. Med det i åtanke beslutades att med Seelution AB:s frågeställning som grund istället formulera en huvudfråga. Det valda fokusområdet är att kartlägga energiförluster samt effektivisera produktionen. Följande fråga ska besvaras under projektets gång:

- Hur kan produktionsprocessen för oljebaserade produkter och vaxemulsioner förbättras med avseende på energianvändning och effektivisering av produktion?

Den uppställda frågan kan i sin tur delas upp i följande frågeställningar:

1. Hur ser energiflödet i produktionsprocessen ut?
2. Vilka delar av produktionen har störst energiförluster?
3. Vilka delar av produktionen har störst effektiviseringspotential?
4. Vilka åtgärder kan implementeras för att minska energiförluster samt förbättra produktionsprocessen?

## 1.4 Avgränsningar

Produktionsprocessen avgränsas till att endast innefatta produktionen av emulsionstekniska produkter och oljeblandningar, där förpackningsbarriärer inte inkluderas i studien. Vidare avgränsas studien till att innefatta produktionen av två utvalda produkter, en vaxemulsion och en oljeblandning. Dessa processer valdes för att de representerade de två huvudsakliga

produktkategorierna som Seelution AB producerar, samt att de ansågs vara de mest energikrävande processerna.

Vid genomförandet av energikartläggningen innefattas endast energianvändningen i produktionsprocessen. Energianvändningen som tillkommer i stödprocesser, som exempelvis belysning och ventilation, inkluderas inte i kartläggningen. Vidare kommer energi- och processkartläggningen av systemet begränsas till analys av nuvarande tillstånd samt ge förslag på möjliga åtgärder. En konkret handlingsplan för implementeringen av åtgärderna omfattas alltså inte av detta projektarbete.

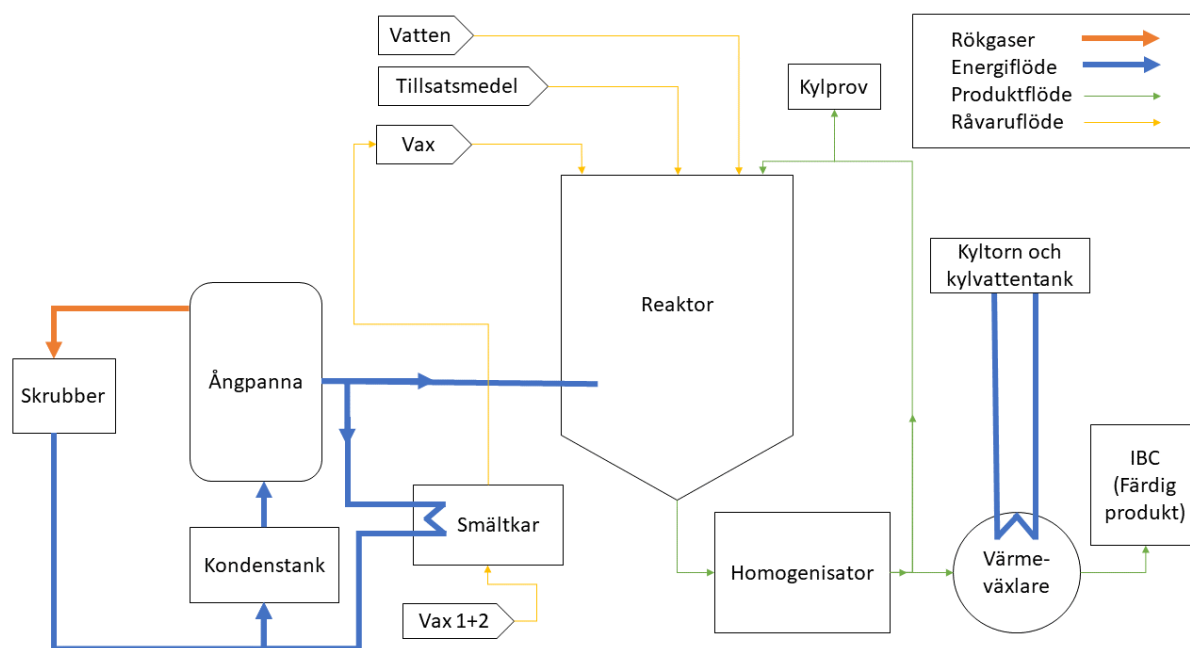
## 2 Produktionssystem

De två produktkategorier som undersöks är oljeblandningar och vaxemulsioner. Processerna inom dessa kategorier liknar varandra, men har olika stor energiförbrukning.

Produktionsprocesserna för de valda produkterna beskrivs nedan men på grund av sekretess namnges inte de specifika produkterna som används vid tillverkningen.

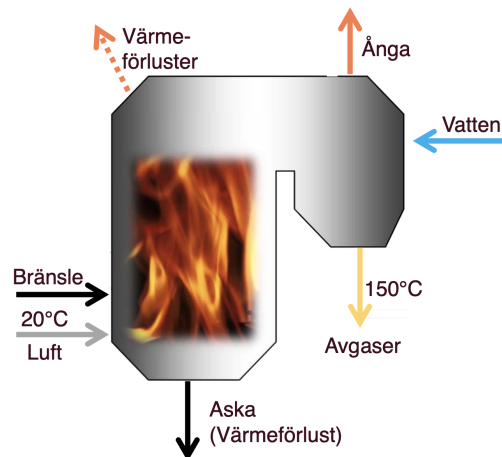
### 2.1 Vaxemulsionsproduktion

För att få en inblick i produktionen av vaxemulsioner ritades det totala systemet upp och visas i figur 1. Vid produktion av vaxemulsioner bearbetas produkten i ett flertal steg. I detta kapitel beskrivs de ingående komponenterna och hur de används vid produktionen av vaxemulsioner.



Figur 1. Processchema för vaxemulsion.

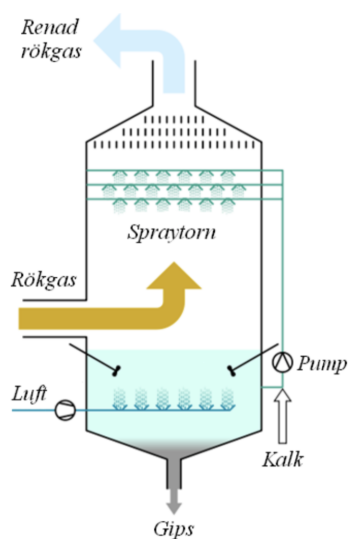
Det första steget i produktionsprocessen, uppvärmning av vatten till ånga som värmer smältkaret och reaktorn, sker i ångpannan genom förbränning av olja. Ångpannan har en kapacitet på 2 ton/h och består av två delar, förbränningskammaren och gassidan, se figur 2. Förbränningen utgörs av en oljebrännare och gassidan är den delen av ångpannan där matarvattnet värms upp till gas. Under produktionens gång sker förluster av ångan och påfyllningen i ångpannans kondensstank styrs automatiskt. Under 2018 eldades 92 m<sup>3</sup> olja vid uppvärmning av produktionsförloppet i fabriken i Kristinehamn till ett pris på 8043 SEK/m<sup>3</sup>. El-energianvändningen under 2018 uppgick till 329 MWh.



Figur 2. Visuell förklaring av ångpanna.

Efter ångpannan flödar ångan vidare till skrubbern, en anordning som behandlar luft i syfte att rena luften från rökgaser och föroreningar samt att fukta luften. En annan möjlig funktion är att skrubbern kan ta tillvara på värmeenergi ur fuktiga gaser i industriella processer genom att kondensera vattenånga som existerar i rökgaserna som bildas i förbränningskammaren i ångpannan. Vattenångan i rökgaserna kommer dels från det fuktiga bränslet i sig, dels från vatten som bildas vid förbränningen med bränslets väte (Naturvårdsverket, 2015).

I fabriken i Kristinehamn används i nuläget en våtskrubber till att rena den ånga som bildas av rökgaserna genom att duscha rökgaserna med vatten, vilket fångar upp partiklar som sot och andra föroreningar. För att dessutom avlägsna svaveldioxid som uppstår vid förbränning av olja kan kalk tillsättas i vattnet så att svaveldioxiden reagerar med kalken och bildar gips som sjunker till botten. Vad som däremot inte utnyttjas i fabriken är skrubberns förmåga att ta tillvara på ångans värmeenergi, vilket är av stort intresse med tanke på de energieffektiviseringar som utreds. Figur 3 visar en skiss på den nuvarande skrubbern fabriken är utrustad med.

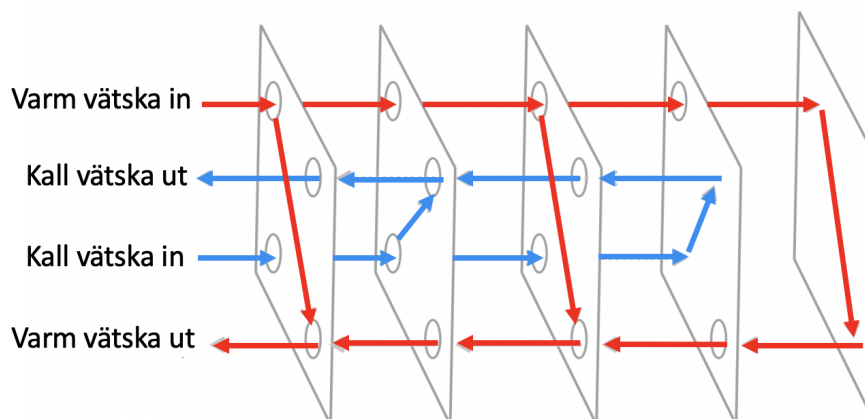


Figur 3. Visuell förklaring av en våtskrubber som renar rökgaser med spraytor.

Vid blandning av emulgator, olja och vatten i reaktorn har partiklarna från början olika storlek och bildar skikt, detta kan undvikas genom att utsätta blandningen för ett arbetstryck på 160 bar i homogenisatorn. Huvudkomponenterna i en homogenisator är de eldrivna hydrauliska pumparna som trycksätter lösningen som ska homogeniseras genom att tvinga lösningen genom en spalt. Beroende på hur stor spalten är kommer trycket och resultatet av homogeniseringen att variera därefter. När fluiden har tvingats genom spalten och alla partiklar i blandningen har samma storlek är homogeniseringen färdig och vätskan leds bort i ett utgående flöde. Flödet genom processen beror på trycket pumparna utövar på den ingående vätskan samt det tryck som bildas i hålrummet direkt efter spalten (Andersson, Behxhet, Karlsson och Petersson, 2006).

Nästa ingående komponent i produktionsflödet är plattvärmeväxlarna. Genom att låta strömmande fluider med olika temperatur flöda genom en värmeväxlare uppstår ett energiutbyte där energin från den varmare fluiden överförs till den kallare. I en plattvärmeväxlare har fluiderna inte någon direktkontakt med varandra utan flödar genom separata kanaler bestående av tunna plattor, se figur 4. I dessa kanaler kan flödena kopplas motströms eller medströms och på så sätt ges olika egenskaper, hos Seelution AB går kylvattnet från tanken motströms produktströmmen i de två existerande värmeväxlarna. En generell plattvärmeväxlare har en verkningsgrad på cirka 60–90%, där de med ett motströms flöde generellt sett har högre verkningsgrad och högre termisk effektivitet enligt Svensk ventilation (2018). Den kalla vätskan som passerar plattvärmeväxlarna kommer från kyltornet, vars syfte är att kyla ner den färdiga produkten efter homogenisatorn. Det kalla vattnet går från kyltornet genom plattvärmeväxlaren och sedan tillbaka till kyltornet.





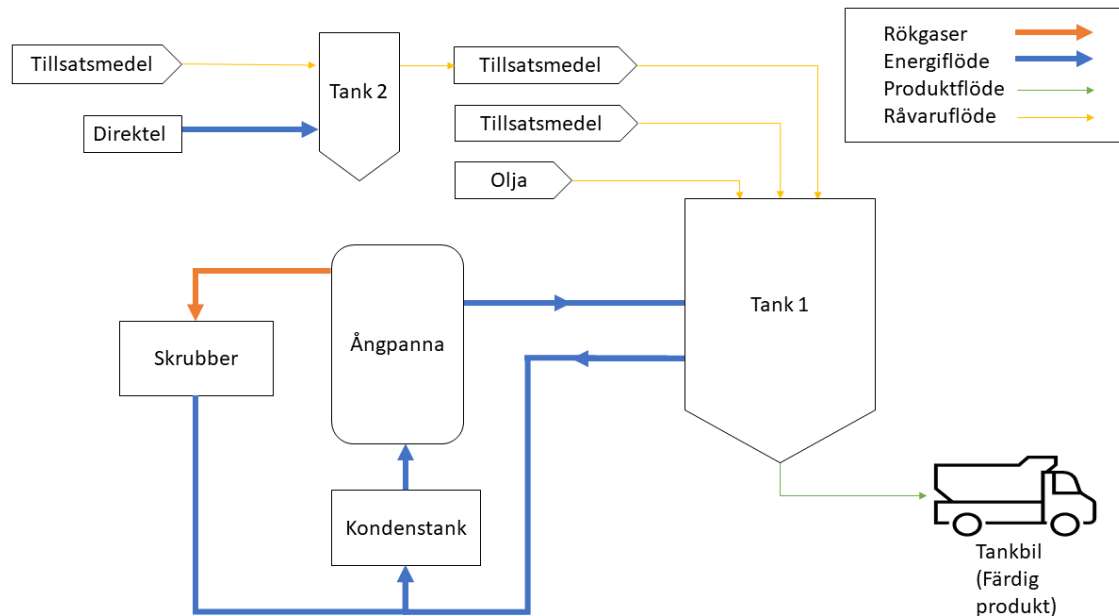
Figur 4. Förklarande bild över hur en motströmsplattvärmeväxlare fungerar, där de blå linjerna representerar den kallare vätskan och de röda den varmare vätskan.

Vid produktion av vaxemulsion blandas vax, vatten och tillsatsmedel. För en standardsats på 7,2609 ton värms först 1,09 ton vaxkakor till 44°C, vilket gör att de övergår från fast till flytande form. Smältningen sker i ett smältkar som värms upp av rör med vattenånga. När cirka halva mängden vax har smält startas uppvärmningen av 2,3 ton rumstempererat vatten i reaktorn. Reaktorn värms med direktånga vilket innebär att vattenånga tillsätts till mediet i tanken, kondenserar och blir en del av produkten. När vattnet i reaktorn har uppnått temperaturen 82°C adderas 288 kg tillsatsmedel, det smälta vaxet från smältkaret samt 800 kg ytterligare vax varefter blandningen värms under omrörning till 90°C. När blandningen har uppnått den önskade temperaturen tillsätts vatten och vattenånga under omrörning, till blandningen når totalvikten 7,25 ton och har temperaturen 90°C. Den sista råvaran som tillsätts är 10,9 kg tillsatsmedel varefter produkten går vidare till homogenisatorn. Efter att en första mängd produkt bearbetats i homogenisatorn plockas ett kylprov ut för att säkerställa att produkten håller önskad torrhet vid 24°C. Om kylprovets torrhalt ligger inom önskat intervall startas homogeniseringen av resten av produkten. Om kylprovets torrhalt inte ligger inom önskat intervall tillsätts mer vatten till blandningen varefter homogenisatorn startas och ett nytt kylprov plockas ut. När hela blandningen bearbetats i homogenisatorn kyls produkten ned från 90°C till 24°C med hjälp av värmeväxlare och pumpas slutligen ut till IBC-containerar i vilka produkten lagerhålls och levereras i. Den totala tiden för produktionsprocessen är cirka 5,5 timmar.

## 2.2 Oljeblandningsproduktion

Vid produktion av oljeblandning blandas och värms olja och tillsatsmedel. Komponenterna som används för att tillverka oljeblandningen är ångpannan och tankar där råvarorna blandas, se figur 5 där produktionsförloppet visualiseras. Tank 1 värms upp av ånga från ångpannan med hjälp av värmeslingor och tank 2 värms upp av direktel. För den maximala satsstorleken på 40 ton förvärms 1,2 ton tillsatsmedel till 40°C i tank 2 innan det tillsätts till tank 1, tillsammans med 32,8 ton olja och 6 ton tillsatsmedel i pulverform, och värms till 55°C. Den färdiga produkten lagerhålls i tank 1 fram till den pumpas ut till tankbil för leverans till kund. Innan produkten pumpas ut från tanken kontrolleras att temperaturen på blandningen är

mellan 50–55°C. Produktionsförloppet för oljeblandningen tar ca 17,5 timmar och sträcker sig över tre arbetsdagar.



Figur 5. Processchema för oljeblandning.

### 3 Teori

Projektet bygger på en mängd teoretiska förkunskaper samt litteraturstudier inom termodynamik. I syfte att öka förståelsen för innehållet i rapporten introduceras grundläggande begrepp och metoder. Avsnittet ger en översiktlig bild av teorin som de termodynamiska beräkningarna grundar sig på och introducerar begrepp som exempelvis entalpi, vilket kortfattat kan beskrivas som energimängd, och ångtabeller, som beroende på medium kan användas för att söka entalpi.

Eftersom det inledningsvis inte var självklart vilken processkartläggningsmetod som skulle användas genomfördes utförliga litteraturstudier för att undersöka möjliga kartläggningsmetoder. I avsnittet presenteras de kartläggningsmetoder som studerades och ansågs vara bäst lämpade för att uppfylla projektets syfte.

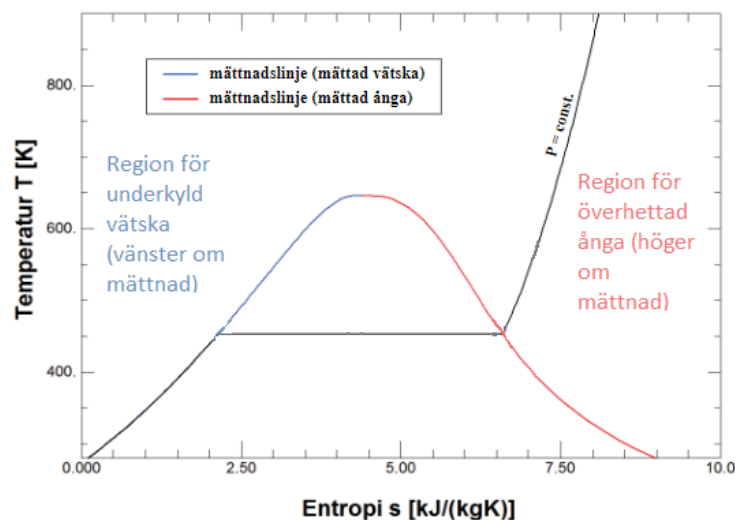
#### 3.1 Termodynamisk grund

Som en del av energikarteringen används termodynamiska ekvationer som underlag för analys av energiförluster som sker under transportsträckor eller under processer. Dessa beräkningar innehåller vissa nyckelbegrepp och metoder som är centrala för förståelsen av underlaget.

### 3.1.1 Entalpi och fasövergång

Vid undersökning av termodynamiska förluster är entalpi ett centralt begrepp. Entalpi kan beskrivas som den energimängd som existerar vid ett visst tillfälle, beroende på temperatur, tryck och tillstånd på det medium som beräkningarna utförs på (NASA, 2015). Entalpin beräknas på olika sätt beroende på förutsättningar om mediet i fråga, där ett exempel på en sådan förutsättning är om fluiden är en ideal gas eller inte (University of Kiel, 2020).

Vattenånga är det medium som den aktuella energikartläggningen främst hanterar och är inte en ideal gas, utan kan befinna sig i ett antal olika faser: underkyld vätska, mättad vätska, fuktig ånga, mättad ånga och överhettad ånga, se figur 6 (Biermann, Normann, Schmitz, 2019).



Figur 6: Mättnadskurva för vattenånga, med temperatur på y-axeln och entropi på x-axeln.

### 3.1.2 Energiekvationen

Energi inom termodynamik kan betecknas med Q och U beroende på vilken typ av energi som beskrivs. För ett mediums värmeenergi används Q, där Q beror av mediets massa, specifika värmekapacitet och temperatur. För ideala gaser och ideala vätskor (vätskor som anses inkompressibla) beräknas energin med följande ekvation (Beiron, 2020):

$$Q = m * c_p * dT \quad [1]$$

Om energi skall betraktas som en funktion över tid skrivs detta enligt:

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * dT \quad [2]$$

Om mediet inte är en ideal gas eller inkompressibel vätska bestäms entalpin för att beräkna värmeenergin. Detta beror på att en gas eller vätska som inte är ideal inte nödvändigtvis har ett konstant  $c_p$  vid temperaturhöjning, därav används entalpi för att ge ett säkrare resultat. Ekvationen blir då (Beiron, 2020):

$$Q = m * \Delta h \quad [3]$$

Med tidsderivata:

$$\dot{Q} = \dot{m} * \Delta h \quad [4]$$

Entalpi kan bestämmas med hjälp av ångtabeller, se tabell 1. För att använda ångtabeller behöver man känna till temperatur, tryck och vilket tillstånd ångan befinner sig i. För att bestämma entalpin för fall där temperatur och tryck inte är representerade i tabellen används interpolering. Vid interpolering antas ett linjärt samband gälla mellan två punkter. Ekvationen för linjär interpolering mellan två punkter ser ut om följande (Kungliga tekniska högskolan, 2013):

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad [5]$$

Tabell 1. Ångtabeller med entalpinivåer för vatten vid mättnadstillstånd, utgående från temperatur.

| <i>t</i> | <i>p</i> | volymitet          |            | inre energi |              |            | entalpi   |              |            | entropi   |              |            |
|----------|----------|--------------------|------------|-------------|--------------|------------|-----------|--------------|------------|-----------|--------------|------------|
|          |          | <i>v'</i>          | <i>v''</i> | <i>u'</i>   | $\Delta u_v$ | <i>u''</i> | <i>h'</i> | $\Delta h_v$ | <i>h''</i> | <i>s'</i> | $\Delta s_v$ | <i>s''</i> |
| °C       | kPa      | m <sup>3</sup> /kg |            | kJ/kg       |              |            | kJ/kg     |              |            | kJ/kg K   |              |            |
| 0,01     | 0,6113   | 0,001000           | 206,14     | 0,00        | 2375,3       | 2375,3     | 0,01      | 2501,3       | 2501,4     | 0,0000    | 9,1562       | 9,1562     |
| 5        | 0,8721   | 0,001000           | 147,12     | 20,97       | 2361,3       | 2382,3     | 20,98     | 2489,6       | 2510,6     | 0,0761    | 8,9496       | 9,0257     |
| 10       | 1,2276   | 0,001000           | 106,38     | 42,00       | 2347,2       | 2389,2     | 42,01     | 2477,7       | 2519,8     | 0,1510    | 8,7498       | 8,9008     |
| 15       | 1,7051   | 0,001001           | 77,93      | 62,99       | 2333,1       | 2396,1     | 62,99     | 2465,9       | 2528,9     | 0,2245    | 8,5569       | 8,7814     |
| 20       | 2,339    | 0,001002           | 57,79      | 83,95       | 2319,0       | 2402,9     | 83,96     | 2454,1       | 2538,1     | 0,2966    | 8,3706       | 8,6672     |
| 25       | 3,169    | 0,001003           | 43,36      | 104,88      | 2304,9       | 2409,8     | 104,89    | 2442,3       | 2547,2     | 0,3674    | 8,1905       | 8,5580     |
| 30       | 4,246    | 0,001004           | 32,89      | 125,78      | 2290,8       | 2416,6     | 125,79    | 2430,5       | 2556,3     | 0,4369    | 8,0164       | 8,4533     |
| 35       | 5,628    | 0,001006           | 25,22      | 146,67      | 2276,7       | 2423,4     | 146,68    | 2418,6       | 2565,3     | 0,5053    | 7,8478       | 8,3531     |
| 40       | 7,384    | 0,001008           | 19,52      | 167,56      | 2262,6       | 2430,1     | 167,57    | 2406,7       | 2574,3     | 0,5725    | 7,6845       | 8,2570     |
| 45       | 9,593    | 0,001010           | 15,26      | 188,44      | 2248,4       | 2436,8     | 188,45    | 2394,8       | 2583,2     | 0,6387    | 7,5261       | 8,1648     |
| 50       | 12,349   | 0,001012           | 12,03      | 209,32      | 2234,2       | 2443,5     | 209,33    | 2382,7       | 2592,1     | 0,7038    | 7,3725       | 8,0763     |
| 55       | 15,758   | 0,001015           | 9,568      | 230,21      | 2219,9       | 2450,1     | 230,23    | 2370,7       | 2600,9     | 0,7679    | 7,2234       | 7,9913     |
| 60       | 19,94    | 0,001017           | 7,671      | 251,11      | 2205,5       | 2456,6     | 251,13    | 2358,5       | 2609,6     | 0,8312    | 7,0757       | 7,9069     |
| 65       | 25,03    | 0,001020           | 6,197      | 272,02      | 2191,1       | 2463,1     | 272,06    | 2346,2       | 2618,3     | 0,8935    | 6,9375       | 7,8310     |
| 70       | 31,19    | 0,001023           | 5,042      | 292,95      | 2176,6       | 2469,6     | 292,98    | 2333,8       | 2626,8     | 0,9549    | 6,8004       | 7,7553     |
| 75       | 38,58    | 0,001026           | 4,131      | 313,90      | 2162,0       | 2475,9     | 313,93    | 2321,4       | 2635,3     | 1,0155    | 6,6669       | 7,6824     |
| 80       | 47,39    | 0,001029           | 3,407      | 334,86      | 2147,4       | 2482,2     | 334,91    | 2308,8       | 2643,7     | 1,0753    | 6,5369       | 7,6122     |
| 85       | 57,83    | 0,001033           | 2,828      | 355,84      | 2132,6       | 2488,4     | 355,90    | 2296,0       | 2651,9     | 1,1343    | 6,4102       | 7,5445     |
| 90       | 70,14    | 0,001036           | 2,361      | 376,85      | 2117,7       | 2494,5     | 376,92    | 2283,2       | 2660,1     | 1,1925    | 6,2866       | 7,4791     |
| 95       | 84,55    | 0,001040           | 1,982      | 397,88      | 2102,7       | 2500,6     | 397,96    | 2270,2       | 2668,1     | 1,2500    | 6,1659       | 7,4159     |

Ett mediums inre energi betecknas *U*, för ideala gaser och inkompressibla vätskor beräknas den inre energin med ekvationen (Biermann, Normann, Schmitz, 2019):

$$U(T_1) = U(T_0) + \int_{T_0}^{T_1} c \, dT, c = c_v = c_p \quad [6]$$

Där *U* är summan av rörelseenergin samt lägesenergin som existerar i objektet.

Från ekvation [6] kan den inre energin för en vätska som befinner sig i ett konstant tillstånd med referenstemperaturen 0°C härledas som:

$$U(T_1) = c * (T_1 - T_0) \quad [7]$$

Eftersom

$$U(T_0) = U_{ref} = 0, T_0 = T_{ref}$$

Definitionen för entalpi hos en ideal vätska är (Biermann, Normann, Schmitz, 2019):

$$H(T_1, p_1) = H(T_0, p_0) + \int_{T_0}^{T_1} c \, dT + v(p_1 - p_0), c = c_v = c_p \quad [8]$$

Från ekvation [8] kan entalpin för en vätska som befinner sig i ett konstant tillstånd med referenstemperaturen 0°C härledas som:

$$H(T_1, p_1) = c * (T_1 - T_0) \quad [9]$$

Eftersom

$$H(T_0, p_0) = 0, T_0 = T_{ref}, p_1 - p_2 = 0 \Rightarrow v(p_1 - p_2) = 0$$

### 3.1.3 Allmän energibalans

Genom att definiera systemgränsen för en stillastående process kan den allmänna energibalansen användas för att beräkna systemets inre energi. Ekvationen för den allmänna energibalansen, med avseende på förändring över tid, ser ut enligt följande (Biermann, Normann, Schmitz, 2019):

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) (h_i(t) + e_{y,i}(t)) + \sum_i \dot{Q}_i(t) + \sum_i \dot{W}_i(t) \quad [10]$$

där  $\frac{dU}{dt}$  är förändringen i inre energi över tid,  $e$  är tillförd yttre energi,  $\dot{Q}$  är tillförd värmeenergi och  $\dot{W}$  är tillfört mekaniskt arbete.

### 3.1.4 Beräkning av specifik värmekapacitet

Den specifika värmekapaciteten,  $c_p$ , är en fysikalisk storhet som anger ett ämnes förmåga att lagra värmeenergi. Detta innebär att värmekapaciteten anger hur mycket värmeenergi som erfordras för att höja temperaturen i ett medium.

SI-enheten för specifik värmekapacitet är J/kgK men kan också anges i J/molK. För att beräkna konstanten i SI-enheter kan följande konvektion användas (Nave, 2010):

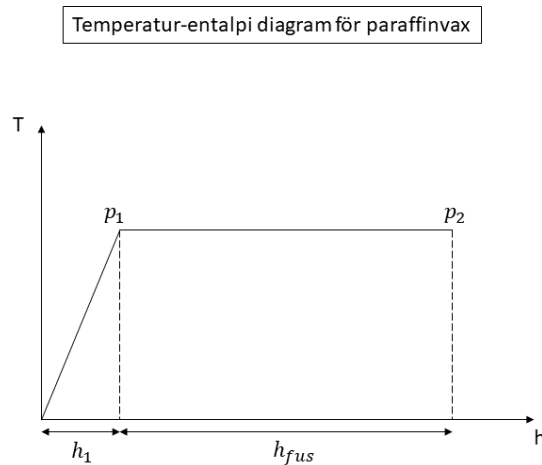
$$c_p = \frac{c_p}{M} \Leftrightarrow \frac{kJ}{kgK} = \frac{\left[\frac{J}{molK}\right]}{\left[\frac{g}{mol}\right]} \quad [11]$$

Värmekapaciteten för en blandning bestäms genom att mäta tiden det tar att värma blandningen en grad. Om detta inte är möjligt kan värdet beräknas genom att vikta värmekapaciteten för blandningens olika komponenter enligt ekvation (Thermtest, 2017):

$$c_{p \text{ blandning}} = \left(\frac{m_1}{m_{tot}}\right) * c_{p m_1} + \left(\frac{m_2}{m_{tot}}\right) * c_{p m_2} \quad [12]$$

### 3.1.5 Latent värme

Latent värme är den energi som krävs för ett medium att byta fas och kan betraktas som entalpiåtgången vid fasförändring, se figur 7. Latent värme, eller heat of fusion, är en konstant som anges i kJ/kg (Wikipedia, 2020).



Figur 7. T-h diagram som illustrerar entalpiåtgången vid uppvärmning,  $h_1$ , och fasövergång,  $h_{fus}$ , för paraffinvax.

Vid beräkning av värmeenergi vid en fasförändring används ekvationen (Beiron, 2020):

$$Q = m * h_{fus} \quad [13]$$

## 3.2 Processkartläggning

En processkartläggning analyserar den nuvarande produktionen med avseende på flöden av olika slag. Syftet är att kunna tillgodogöra sig befintlig kunskap och teknik, och för att få en god kännedom av hur systemet fungerar (Holweg, Davies, De Meyer, Lawson och W. Schmenner, 2018). Flera olika typer av kartläggningsmetoder analyserades för att kunna välja den metod som är mest lämpad för den data som är tillgänglig, och som lokaliserar effektiviseringspotential.

### 3.2.1 Principer för processkartläggning

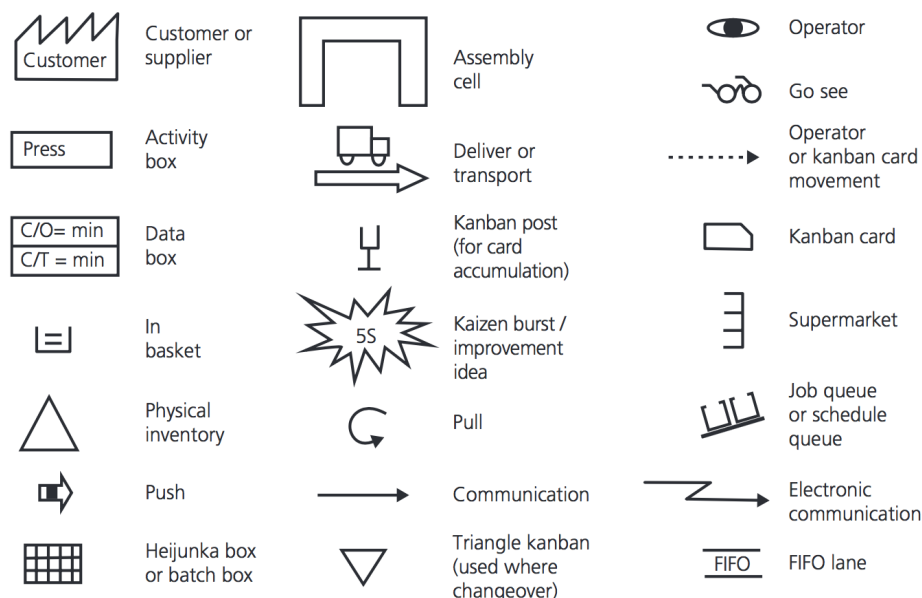
Grundtanken med processkartläggningen är att få en klar bild av processerna i produktionen, som tillsammans med andra typer av kartläggningar och beräkningar skapar en grund för framtida förbättringsarbeten. Holweg et al. (2018) menar att det finns tre regler att följa då produktionsprocesser ska analyseras:

- Att besöka produktionen och få se med egna ögon hur allt hänger ihop eftersom mindre förändringar i produktionen inte tydliggörs för ledningen emellanåt, vilket leder till att ledningen inte alltid har fullgod insyn i hur processen ser ut. Vidare är informationen om hela systemet oftast fördelad på flera personer, vilket är ytterligare en anledning att skaffa sig en egen samlad bild av det som behövs för vidare analys.
- Att förenkla processen så att endast fundamentala delar är med och att använda sig av nödvändiga antaganden.
- Att hålla sig till aktuell metodologi, alltså att använda sig av de standardiserade symboler som finns vid beskrivningar av systemet.

### 3.2.2 VSM

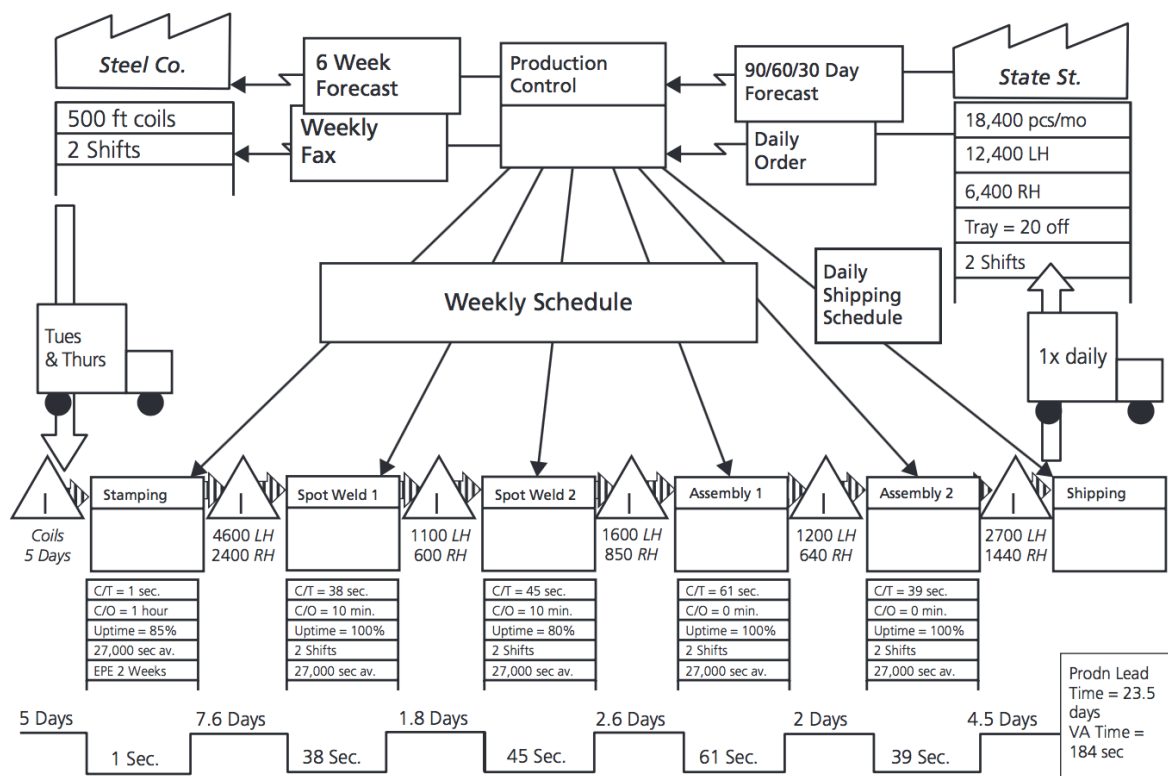
För att analysera hur produktionen ser ut i nuläget kan VSM användas som är en så kallad värdeflödesanalys. VSM har sitt ursprung i Lean Production (Lindér, 2015) och kan på ett visuellt sätt visa hur värdeflödet för olika processer i fabriken ser ut. Värdeflödet syftar på de aktiviteter som skapar mervärde, och de aktiviteter som är nödvändiga i förädlingsprocessen. Huvudmålet för VSM enligt Rother & Shook (2001) är att eliminera de icke-skapande aktiviteterna som benämns som slöserier.

Vanliga symboler som används kan ses i figur 8 och ritas ut på en karta med en tidslinje längst ned som visar tillverkningens ledtid. Kartan har olika slags pilar som illustrerar olika flöden, och med tidslinjen kan sedan förbättringspotential lokaliseras. Denna metod behöver dock kompletterande analyser för att få en helhetsbild till följd av att VSM inte täcker alla aspekter av produktionen men indikerar var ytterligare kunskap behöver genereras (Bellgran & Säfssten, 2005).



Figur 8. Vanliga symboler som används då värdeflödesanalys utförs (Holweg et al, 2018).

Värdeflödesanalysen är ett viktigt verktyg vid förbättringsarbete, där en förståelse för hela processen fås, från det att råvaror erhålls, till kunden får den färdiga produkten (Rother & Shook, 2001). Då VSM endast kartlägger en slags produkt är det viktigt att utföra flera analyser för de mest frekventa produkterna som tillverkas. I figur 9 fås ett exempel på hur en värdeflödesanalys kan se ut med en tidslinje längst ned samt den genererade outputen. Genererad output kan vara översikt över de viktigaste processerna, genomloppstid och tid för värdehöjning.



Figur 9. Exempel på en värdeflödesanalys med olika sorters flöden och pilar, samt med en tidslinje längst ned som visar ledtiden och den värdeadderande tiden (Holweg et al, 2018).

För att analysera processerna och flödet mellan dessa behövs input i form av olika data. Input kan vara kundkrav, cykeltid, ställtid, uptime, antalet operatörer, antalet produktvarianter, leveransvolym, arbetstid (minus raster), kassationer, dagliga ordrar, prognoser, veckoplaner med flera. Rother & Shook (2001) beskriver de vanligaste tidsbegreppen enligt följande:

*Cykeltid* - Med cykeltid menas den tid det tar för en artikel eller produkt att bearbetas i en process till dess nästa artikel/produkt kan bearbetas i samma process.

*Tid för värdehöjning* - Med tid för värdehöjning menas den totala ledtiden för alla processer som behandlar en produkt/artikel. Det är endast processer som tillför något värde på produkten och därför betraktas tiden som värdehöjande.

*Ledtid* - Med ledtid menas den tid det tar för en artikel eller produkt att bearbetas i en process eller ett värdeflöde från start till slut. Ledtid kan ha olika betydelse beroende på vilken process som avses, eftersom det kan avse en delprocess i tillverkningen men också tiden det tar från beställning till leverans av en produkt.

*Genomloppstid* - Med genomloppstid menas tiden det tar från och med att en produkt eller artikel börjar bearbetas till att den är helt färdigställd. Det är summan av den totala ledtiden för alla processer som behandlar produkten samt den totala tiden för mellanlagring.

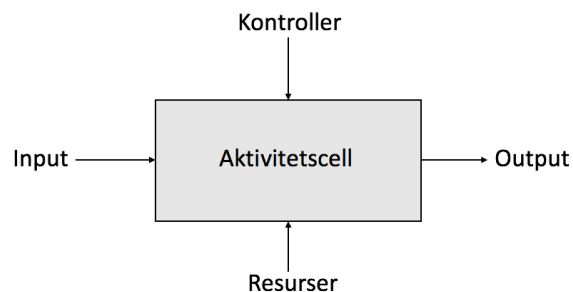


*Ställtid* - Med ställtid menas den tid det tar att ställa om produktionsurtrustning från att producera en typ av produkt eller artikel till en annan.

*Uptime* - Med uptime menas den tid som utrustningen är tillgänglig för den aktuella processen.

### 3.2.3 IDEF0

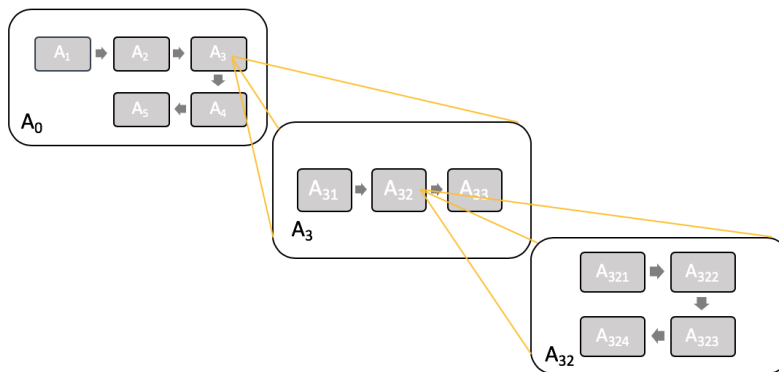
IDEF0 har sitt ursprung i US Air Force och används för att definiera processer med endast en typ av box kallad aktivitetscell. Aktivitetscellen beskriver alla typer av processer där varje box omvandlar input till output enligt Chartered Quality Institute (2013). Fyra slags pilar förmedlar olika typer av information, där även pilarnas position i förhållande till aktivitetscellen beskriver vad det är för pil, se figur 10.



Figur 10. Struktur för hur en aktivitetscell kan se ut.

Inputpilen illustrerar det som startar en process och som transformeras alternativt förändras i aktivitetscellen. Outputpilen illustrerar resultatet efter aktivitetscellen och som blir ny input till nästa cell. Exempel på input och output är material, objekt, människor eller dokument. Kontrollpilen används för att begränsa och rikta aktiviteterna i processerna, men kan bli svår att skilja från input. Skillnaden mellan kontroll- och inputpilen är att input transformeras för att skapa output, något som sällan sker med kontroller. Exempel på kontroller är lagstadgar, ritningar och organisation. Resurspilen står för de fysiska tillgångar och verktyg som krävs för att utföra processen, såsom personal, maskiner och verktyg (CQI, 2013).

Vidare kan processkartläggningen visualiseras på flertalet nivåer för att grundligt beskriva de olika delprocesserna. Detta ger upphov till en trädstruktur där tre till sex boxar används vid varje nivå. Att kartlägga systemet utförligt är fördelaktigt då till exempel nya produktvarianter ska introduceras på marknaden (Bellgran & Säfssten, 2005, s. 270). Med hjälp av de olika nivåerna sätts begränsningar ut för det system som analyseras, där nivå 0 visar systemet överskådligt för att sedan fokusera på de delprocesser som är intressanta för projektet enligt figur 11. Resultatet av IDEF0 visualiserar produktionssystemet utförligt och används till analys av systemet samt dokumentation.



Figur 11. En principiell skiss för vad som kännetecknar IDEF0:s trädstruktur.

### 3.2.4 Sus-VSM

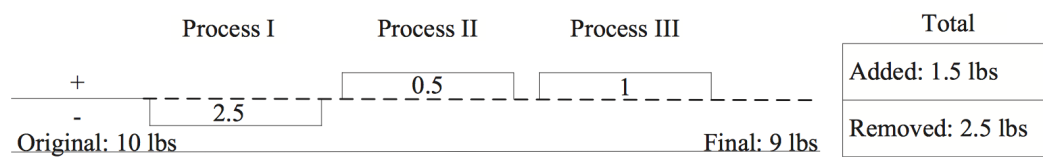
Då ett miljömässigt hållbart produktionssystem är väsentligt med avseende på jordens begränsade resurser, utvecklades Sus-VSM (Sustainable Value Stream Mapping) med den redan existerande VSM som grund. Målet med denna processkartläggningsmetod är att evaluera den ekonomiska, miljömässiga och sociala hållbarheten hos produktionssystemet (Faulkner & Badurdeen, 2014). Till skillnad från den klassiska VSM som endast fokuserar på den ekonomiska aspekten och analyserar systemet med olika tidsbegrepp, baseras Sus-VSM på en miljömässigt hållbar metod som sluter cirkeln i produktionsprocessen.

Den ekonomiska aspekten studeras enligt traditionell VSM med inputs såsom cykeltid, ställtid, antalet operatörer med mera. Den sociala och miljömässiga aspekten täcks av generella nyckelfaktorer för att sus-VSM ska kunna användas som en generell och visuell kartläggningsmetod, men för att verkligen täcka industrispecifika kartläggningar måste relevanta faktorer inkluderas för att anpassa sus-VSM till rådande sammanhang. Input för den miljömässiga hållbarheten kan vara vattenkonsumtion, råmaterialsförbrukning, och energiförbrukning. Enligt Faulkner & Badurdeen (2014) rör vattenkonsumtionen den mängd vatten som tillverkningsprocessen använder men inte det vatten som tillsätts i produkten då detta faller in under materialanvändning, och illustreras i figur 12.

| Process I |       |       | Process II |       |       | Process III |        |       | Total    |        |       |
|-----------|-------|-------|------------|-------|-------|-------------|--------|-------|----------|--------|-------|
| 1 gal     | 1 gal | 1 gal | 3 gal      | 3 gal | 0 gal | 10 gal      | 12 gal | 5 gal | Required | Used   | Net   |
|           |       |       |            |       |       |             |        |       | 14 gal   | 16 gal | 6 gal |

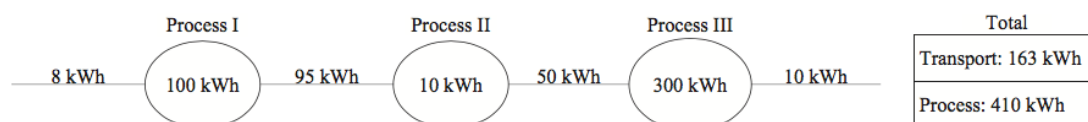
Figur 12. Visuell representation av vattenkonsumtionen i sus-VSM (Faulkner & Badurdeen, 2014).

Gällande råmaterialsförbrukningen täcker den in såväl den miljömässiga som den ekonomiska hållbarheten då den står för stora delar av tillverkningskostnaden och är en stor källa till materialavfall som skulle kunna återvinnas. Förutom övervakningen av råmaterialsförbrukning är det även relevant att observera material som tillförs eller bortförs vid varje process för att även visualisera den mellanliggande förbrukningen, vilket illustreras i figur 13. Faulkner & Badurdeen (2014) menar att då flera olika typer av råmaterial används i en process tas endast de viktigaste med i kartläggningen för att behålla enkelheten och översikten av kartläggningen.



Figur 13. Visuell representation av råmaterialförbrukningen i sus-VSM (Faulkner & Badurdeen, 2014).

Energikonsumtionen kartläggs då den direkt korrelerar till förbrukningen av icke förnyelsebara energikällor. Både energikonsumtionen för varje process samt den energi som förbrukas mellan processerna i form av transport eller förvaring tas med, där uppvärmning och nedkylning av produkt som förberedelse inför nästa steg i tillverkningsprocessen ingår i förvaring, och kan ses i figur 14. Energiförluster som kan härledas till de maskiner som används i tillverkningen och indirekta kostnader som inte beror av antalet produkter som tillverkas tas däremot inte med i kartläggningen då detta bedöms addera till komplexiteten till sus-VSM (Faulkner & Badurdeen, 2014).

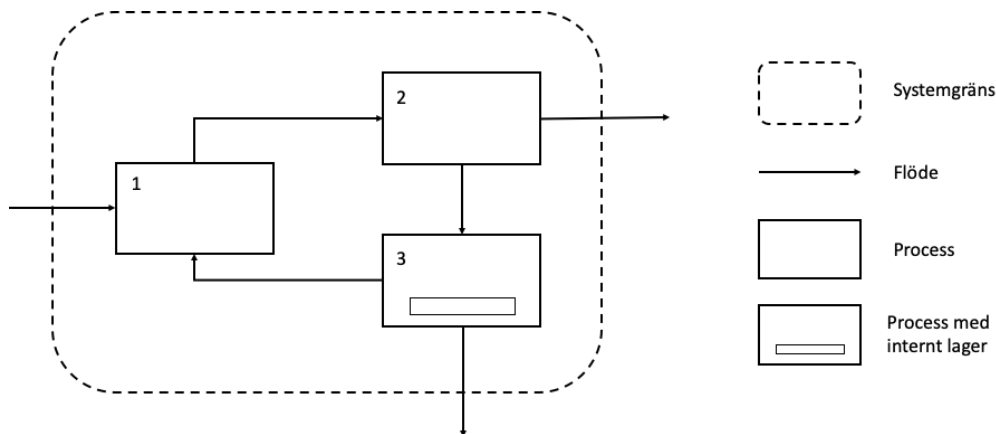


Figur 14. Visuell representation av energiförbrukningen i sus-VSM.

Den sociala hållbarheten evalueras med avseende på det fysiska arbetet och arbetsmiljön, men för att detta ska vara möjligt måste de anställdas hälsa och säkerhet mätas och kontrolleras regelbundet. Målet gällande det fysiska arbetet är att finna riskfyllda arbetsuppgifter där verktyget Physical Load Index (PLI) används och som introducerades av Hollman et al. (1999). Arbetsmiljön delas in i de fyra kategorierna Electrical Systems, Hazardous Chemicals/Materials Used, Pressurized Systems och High-Speed Components, som bedöms på en skala 1–5 där 1 är en existerande risk med låg inverkan och låg sannolikhet, och 5 är existerande risk med hög inverkan på arbetsmiljön och hög sannolikhet för att risken ska inträffa. Även ljudnivån granskas med hjälp av ekvationer där ljudnivåer som upplevs i arbetsmiljön mäts upp och används.

### 3.2.5 MEFA

MEFA (Material och Energiflödesanalys) används för att göra en systematisk analys av flöden och lager av material och energi i ett system. MEFA kan illustreras som en samling processer och flöden som är avgränsade med en systemgräns, se figur 15. Kartläggning av energiflöden görs för att kunna lokalisera de största energiförlusterna och implementera förbättringsåtgärder för att minska resursförbrukningen. En minskad resursförbrukning med bibehållen produktionsnivå resulterar i sin tur i minskad påverkan på miljön. Innan förbättringsåtgärder kan implementeras måste processer med låg verkningsgrad identifieras vilket kräver kännedom om material- och energiförbrukningen (Dewulf, De Meester & Alvarenga, 2016).



Figur 15. En MEFA modell och systemets ingående komponenter.

Systemgränsen visar vilka processer som ingår i det valda systemet. I en process omvandlas, lagras eller distribueras material eller energi. Lager innebär lagring av material, produkter eller energi och associeras alltid med en process. Ett flöde beskriver transport av material eller energi genom systemet, och förbinder alltid två processer eller en process med miljön utanför systemgränsen. Flöden mellan processer kallas för inputs eller outputs och de som korsar systemgränsen kallas import eller export. Det är viktigt att flöden inte förgrenar sig när man definierar systemet eftersom det försvårar beräkning av massbalans (Technische Universität Wien, 2012).

För varje process kan en mass- och energibalans upprättas där samtliga flöden in i en process subtraherat med samtliga flöden ut ur en process samt den lagrade massan och energin blir nettoförändringen. En sådan mass- och energibalans kan också göras över systemgränsen (Technische Universität Wien, 2012).

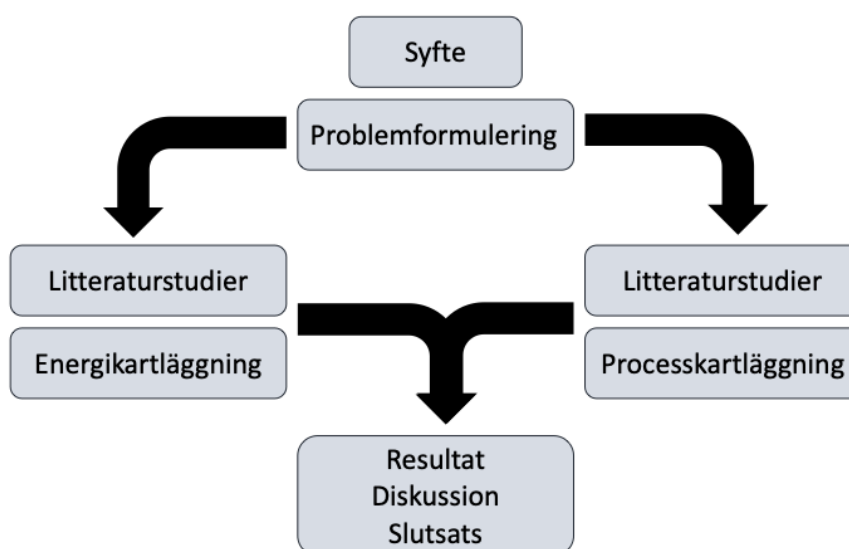
Den viktigaste informationen gällande energi- och materialförbrukning införskaffas från det berörda företaget genom ett besök. När informationen sedan kompletteras med information från andra källor kan beräkningar och analyser göras enligt MEFA metodologi. När en MEFA gjorts rekommenderas ytterligare datainsamling och intervjuer som kan styrka analysen, samt fotografering och videoinspelningar för ökad förståelse av systemet (Dewulf, De Meester & Alvarenga, 2016). Det är en iterativ process där systemet och informationen kontinuerligt korrigeras för att åstadkomma tillförlitliga värden (Brunner & Rechberger, 2004).

För att utföra en material och energiflödesanalys måste material- och energiförbrukningen för varje process vara kartlagd. Det är dock vanligt att företag inte har kännedom om varje enskild process och dess förbrukning. För att undersöka energiförbrukningen rekommenderas mätning med amperemeter där det är möjligt, annars ska beräkningar göras baserade på maskinens energiförbrukning och dess drifttid genom vilka energiförbrukningen kan uppskattas. För att fastställa materialförbrukningen mäts vikten av materialet som används i processen, och en massbalans kan upprättas genom att analysera mängden material som

importeras och exporteras i processen, samt mängden material som lagras (Dewulf, De Meester & Alvarenga, 2016).

## 4 Metod

Med hjälp av litteraturstudier och datainsamling blev mängden information stor och behövde därmed struktureras. Statens energimyndighet (2016) rekommenderar en steg-för-steg energikartläggning. Beräkningar som har utförts användes som bas för åtgärdsförslag relaterade till energiförbrukningar. För att identifiera åtgärdsförslag med avseende på produktionsprocessen undersöktes flera kartläggningsmetoder för att slutligen identifiera och använda den kartläggningsmetod bäst lämpad för analys av Seelution AB:s nuvarande system. Kartläggningen av energin och produktionsprocessen resulterade tillsammans i åtgärdsförslag för effektivisering av produktionen, vilket illustreras i figur 16.



Figur 16. Förtydligande av rapportens struktur.

### 4.1 Litteraturstudier

Under projektets gång utfördes litteraturstudier kontinuerligt för att erhålla kunskaper om ämnesområden som var nödvändiga för projektets genomförande. Litteraturstudierna utfördes i tre steg bestående av litteratursökning, urval och bearbetning. Inledningsvis görs en litteratursökning i ett antal databaser där sökord som hör till projektets syfte ingår. Därefter görs systematiskt urval av litteratursökningens resultat för att välja ut de bäst lämpade artiklarna och säkerställa att artiklarna svarar på projektets syfte. Slutligen bearbetas de utvalda artiklarnas innehåll genom att jämförelser mellan olika studiers resultat görs och resultatet organiseras under olika rubriker.

För att kartlägga systemets energi och processer var det nödvändigt att finna lämpliga kartläggningsmetoder. Alternativa kartläggningsmetoder undersöktes genom att litteratursökningar med sökorden *Energy Mapping*, *VSM*, *Sustainable VSM*, *IDEF0*, *MEFA*, etc. gjordes i databaserna Google Scholar och Chalmers bibliotek. För att erhålla relevanta sökträffar kombinerades sökorden även med sökordet *processindustri* för att specificera att kartläggningar på processer eftersträvades. För att kartlägga energin krävdes kunskap om termodynamisk teori och beräkningar samt indata om materialspecifika egenskaper, litteratursökningar med sökorden *enthalpy*, *specific heat capacity* etc. genomfördes i Google. För att erhålla kunskaper om komponenterna i produktionsprocessen utfördes även litteraturstudier med sökorden *scrubber*, *homogenisator* etc. Hur komponenterna kan effektiviseras undersöktes också med hjälp av litteraturstudier, sökorden kombinerades i dessa fall med sökordet *effektivisera*. Antalet sökträffar som litteratursökningen gav för respektive sökord redovisas i bilaga 1.

Urvalet av artiklar gjordes därefter i två steg, där det första steget innefattar en primärgranskning av artiklarna och det andra steget innefattar en grundlig granskning av artiklarna som helhet. I det första urvalet granskades artiklarnas titel och sammanfattning för att avgöra artiklarnas relevans för projektet, där artiklar som bedömdes vara relevanta gick vidare till det andra urvalet där artiklarna lästes och kontrollerades för att säkerställa att de svarade på projektets syfte. Antalet artiklar som granskades, som togs med i det första urvalet och som slutligen valdes ut (andra urvalet) redovisas i bilaga 1. Slutligen bearbetades de utvalda artiklarna genom att innehållet organiserades under olika rubriker, artiklar som gav en allmän beskrivning av en viss kartläggningsmetod sorterades under en rubrik, medan artiklar som tillämpade en kartläggningsmetod på en viss process sorterades under en annan. Likheter och skillnader mellan olika artiklars metod och resultat observerades och sammanställdes även för att enklare få en överblick över artiklarna och underlätta fortsatt arbete. I de fall då artiklarna var sekundärkällor granskades primärkällan vilket i många fall resulterade i ytterligare användbara artiklar.

## 4.2 Energikartläggning

För att kunna effektivisera Seelution AB:s produktionsanläggning med avseende på dess energianvändning behöver energin först kartläggas. Enligt Statens energimyndighet (2018) är en energikartläggning en genomgång av hur mycket energi som tillförs och används för att bedriva en verksamhet. Energikartläggningen syftar till att ge förslag på hur energianvändningen kan minskas, där förslagen kan innebära investering i ny utrustning men också nya arbetssätt och rutiner i produktionen. Litteraturstudierna gav upphov till ett flertal artiklar som utgick från vägledning av Statens energimyndighet vid energikartläggning av produktionsprocesser. Statens energimyndighet presenterar en steg för steg-guide på hur en energikartläggning bör genomföras och erbjuder mallar, enkla checklistor och webbutbildningar som stöd. Ett beslut togs därmed om att energikartläggningen skulle baseras på den metod som energimyndigheten förespråkar, eftersom metoden är beprövad och används av företag i hela landet.

Enligt Statens energimyndighet (2016) bör en energikartläggning i tillverkande industri ske på ett strukturerat sätt och följa tre steg bestående av planering, energikartering samt analys och förslag till åtgärder. I kommande delkapitel redovisas arbetssättet som energimyndigheten rekommenderar, samt hur detta appliceras på energikartläggningen i projektet.

#### 4.2.1 Planering av kartläggning

Första steget i en energikartläggning enligt Statens energimyndighet (2016) är planering av kartläggningen. I detta skede bör fokus ligga på att samla in material som kan vara till hjälp och redan finns framtaget i verksamheten. Materialet kan bestå av energifakturor, tidigare energiredovisningar och genomförda energistudier, processscheman samt tidigare framtagna åtgärdsförslag på minskad energianvändning. Frågor som energikartläggningen syftar till att besvara bör ställas upp för att ge klarhet i vad som eftersträvas. Platsbesök på produktionsanläggningen bör också genomföras för att få en insyn i hur produktionsprocessen går till, samt genom dialog med de arbetande i produktionen få reda på hur de uppfattar att de kan påverka energikonsumtionen.

Vid planering av energikartläggningen upprättades inledningsvis frågor som kartläggningen skulle besvara. För kandidatarbetet ansågs det vara att bestämma energikonsumtionen för produktionsprocesserna så att detta sedan kunde användas som underlag för att effektivisera energiförbrukningen. Då inga tidigare energistudier har gjorts på Seelution AB:s produktionsprocesser saknas kännedom om grundläggande mätvärden för att bestämma energianvändningen i processerna. Därav beslutades det att kartläggningen skulle vara en överskådlig och förenklad modell. För att erhålla en förståelse för hur produktionsprocesserna fungerar arrangerades ett platsbesök till Seelution AB:s produktionsanläggning i Kristinehamn. Inför besöket upprättades en lista med vilken information som behövdes för att kunna påbörja kartläggningen.

Information som erfordrades:

- ☐ Förståelse för produkterna
- ☐ Förståelse för produktionsprocessen
- ☐ Produktdatablad
- ☐ Specifikationer över maskiner
- ☐ Tekniska datablad för råvaror
- ☐ Karta över produktionsanläggningen
- ☐ Information för att kunna rita processscheman
- ☐ Årlig energiförbrukning

Vid platsbesöket besvarades punkterna i listan genom en rundtur i produktionen där produktionspersonalen förklarade hur samtliga processer fungerade samt var energi tillförs och bortförs.

#### 4.2.2 Energikartering

Det andra steget i en energikartläggning enligt Statens energimyndighet (2016) är utförande av en energikartering. En energikartering görs för att se var energin används i systemet genom att en sammanställning av alla energibärare ställs upp. Sammanställningen ger uppfattning om vilka data som finns tillgänglig och vilka data som måste förbättras eller saknas helt. Data som används i en energikartering kan bestå av uppmätta, beräknade eller uppskattade värden, där alla antaganden och uppskattningar baseras på grundliga fakta för att sedan dokumenteras. Syftet med en energikartering är att ta fram hur mycket energi som konsumeras i systemet, samt vilka delar i systemet som står för högst konsumtion. Inledningsvis bör den totala in- och utgående energin kartläggas, genom att betrakta systemet som en black-box. Därefter kan systemet brytas ner i mindre delsystem och en energikartering av delsystemen utföras. Slutligen bör resultatet av den utförda karteringen kontrolleras.

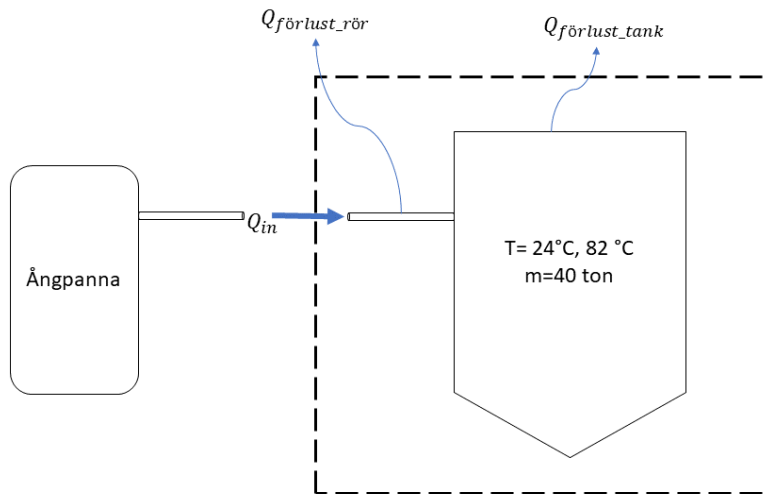
##### 4.2.2.1 Beräkningar för oljeblandning

Energiberäkningarna för oljeblandningen bestod av att bestämma energiåtgången för att värma produkten, energiförlusten då värmning pauserar, samt energiförbrukningen i rörledningarna under processen. Inledningsvis betraktades befintliga processscheman över oljeblandningen och sedan gjordes en förenklad bild som visualiserar systemet och dess energibalans, se figur 17. Efter detta konsulterades handledare i termodynamik för att kartlägga vilken data och vilka metoder som behövdes för att beräkna energin. Data samlades in efter hand under beräkningens gång och i korrelation med detta gjordes följande antaganden:

- Specifika värmekapaciteten för processoljan valdes efter undersökning till  $c_p = 196,06$  J/molK (NIST, 2020).
- Molmassan för processoljan valdes efter undersökning till  $M = 128,17$  g/mol (NIST, 2020).
- Ångan ut i systemet ansågs vara överhettad ånga med entalpin  $h_1 = 2756,9$  kJ/kg beräknad med hjälp av interpolering, ekvation [5]. Dessa slutsatser drogs efter att ha studerat ångtabeller med avseende på tryck och temperatur.
- Ångan innan tanken antogs vara mättad ånga med entalpin  $h_2 = 2703,2$  kJ/kg beräknad med hjälp av interpolering, ekvation [5]. Detta bestämdes genom att ångtabeller studerades med avseende på tryck och temperatur. Utifrån detta ansågs ångan vara fuktig ånga. Då inga mätningar i rören kunde utföras där andel ånga och kondensat bestäms, antogs istället mättad ånga för att förenkla beräkningarna. Detta antagande gjordes i samråd med en termodynamisk handledare där den gemensamma åsikten var att entalpiskillnaden mellan mättad ånga och fuktig ånga är försumbar.
- Ångan efter tanken antogs vara mättad vätska med entalpin  $h_3 = 473,6$  kJ/kg beräknad med hjälp av interpolering, ekvation [5]. Detta bestämdes genom att ångtabeller studerades med avseende på tryck och temperatur. Utifrån detta ansågs ångan vara kondensat, men då inga mätningar i rören kunde utföras där andel ånga och kondensat bestäms, antogs istället mättad vätska för att förenkla beräkningarna. Detta antagande



gjordes i samråd med en termodynamisk handledare där den gemensamma åsikten var att entalpiskillnaden mellan mättad vätska och kondensat är försumbar.



Figur 17. Förenklad systembeskrivning av oljeprocessen till för beräkningar.

Energiförlusten i tanken,  $\dot{Q}_{förlust\_tank}$ , beräknades genom att använda följande ekvationer och indata i tabell 2.

Tabell 2. Indata som används vid beräkningar av energiförlusten i tanken.

|       |               |   |              |
|-------|---------------|---|--------------|
| dT    | 2°C           | M | 128,17 g/mol |
| m     | 40 000 kg     | t | 33 timmar    |
| $c_p$ | 196,06 J/molK |   |              |

$$\dot{Q}_{förlust\_tank} = \dot{m} * c_{p1} * dT \quad [2]$$

Där  $c_{p1}$  med rätt SI-enhet bestäms

$$c_{p1} = \frac{c_p}{M} \quad [11]$$

Energiåtgången för uppvärmning av tanken,  $\dot{Q}_{vtot}$ , beräknades genom att använda följande ekvationer och indata i tabell 3.

Tabell 3. Indata som används för att beräkna energiåtgången för uppvärmning av tanken.

|       |      |       |            |
|-------|------|-------|------------|
| $T_1$ | 24°C | $T_6$ | 55°C       |
| $T_2$ | 39°C | m     | 40 000 kg  |
| $T_3$ | 37°C | $c_p$ | $c_{p1}$   |
| $T_4$ | 52°C | $t_1$ | 7,5 timmar |
| $T_5$ | 50°C | $t_2$ | 2,5 timmar |

$$\dot{Q}_{vtot} = \dot{Q}_{v1} + \dot{Q}_{v2} + \dot{Q}_{v3}$$

$$\dot{Q}_{vi} = \dot{m} * c_p * dT \quad [2]$$

Där  $\dot{Q}_{v1}$  beräknas för  $dT = T_2 - T_1, \dot{m} = \frac{m}{t_1}$

Där  $\dot{Q}_{v2}$  beräknas för  $dT = T_3 - T_4, \dot{m} = \frac{m}{t_1}$

Där  $\dot{Q}_{v3}$  beräknas för  $dT = T_5 - T_6, \dot{m} = \frac{m}{t_2}$

Energiförlusten i rörledningarna,  $\dot{Q}_{förlust\_rör}$ , beräknades genom att använda följande ekvationer och indata i tabell 4.

Tabell 4. Indata som används för beräkning av energiförlusten för rörledningar.

|       |              |
|-------|--------------|
| $h_1$ | 2756,9 kJ/kg |
| $h_2$ | 2703,2 kJ/kg |
| $h_3$ | 473,6 kJ/kg  |

$$\dot{Q}_{förlust\_rör} = \dot{m} * \Delta h, \Delta h = h_1 - h_2 \quad [4]$$

Där  $\dot{m}$  för ångan bestämmas

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{v1}}{\Delta h}, \Delta h = h_1 - h_2 \quad [4]$$

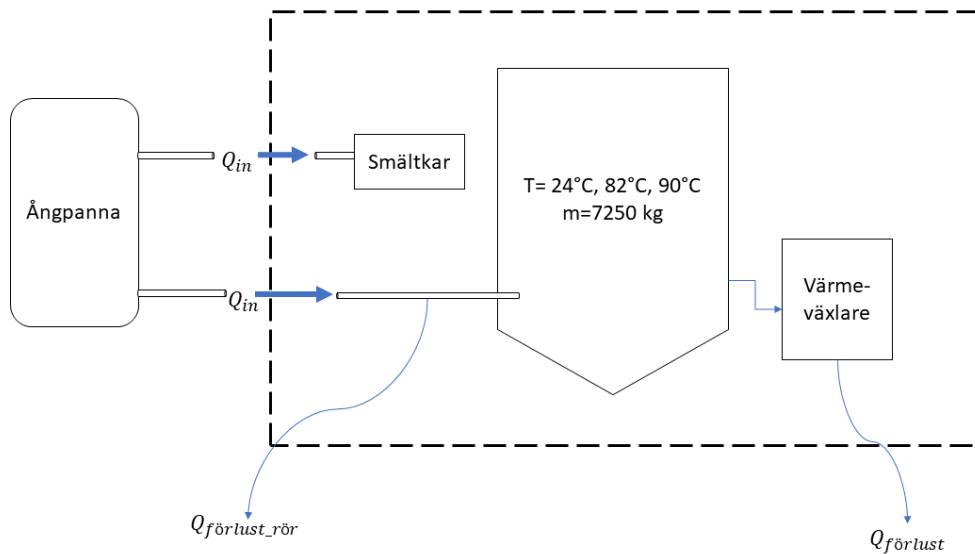
#### 4.2.2.2 Beräkningar för vaxemulsion

Energiberäkningarna för vaxemulsionen bestod av att bestämma energiåtgången för att smälta vax samt för att värma produkten. Energiförlusten i rörledningarna under processen är densamma som för oljeblandningen och behöver därför inte beräknas. Inledningsvis betraktades befintliga processscheman över vaxemulsionen och sedan gjordes en förenklad bild som visualiserar systemet och dess energibalans, se figur 18. Efter detta konsulterades handledare i termodynamik för att kartlägga vilken data och vilka metoder som behövdes för att beräkna energin. Data samlades in efter hand under beräkningens gång och i korrelation med detta gjordes följande antaganden:

- Specifika värmekapaciteten för vaxet valdes efter undersökning till  $c_{p\ vax} = 2,52$  kJ/kgK (Wikipedia, 2013).
- Specifika värmekapaciteten för vax- och vatten-blandning valdes genom att anta ett viktat  $c_{p\ blandning}$  [12].  $c_{p\ blandning}$  beräknades med avseende på slutprodukten men används även i tidigare skede där massan samt förhållandet mellan blandningen är annorlunda. Detta antagande gjordes i samråd med en termodynamisk handledare där den gemensamma åsikten var att skillnaden i värmekapacitet var försumbar.
- Ångan innan tanken antogs vara mättad ånga med entalpin  $h_2=2703,2$  kJ/kg, beräknad med hjälp av interpolering [5]. Detta bestämdes genom att ångtabeller studerades med

avseende på tryck och temperatur. Utifrån detta ansågs ångan vara fuktig ånga. Men då inga mätningar i rören kunde utföras där andel ånga och kondensat bestäms, antogs istället mättad ånga för att förenkla beräkningarna. Detta antagande gjordes i samråd med en termodynamisk handledare där den gemensamma åsikten var att entalpiskillnaden mellan mättad ånga och fuktig ånga är försumbar.

- Tillsatsmedlets inverkan på uppvärmningen av blandningen har försummats.
- För att förenkla beräkningar betraktas inte ångflödet som separerat vid smältning av vax och uppvärmning av blandning.



Figur 18. Förenklad systembeskrivning av emulsionsprocessen för beräkningar.

Energiåtgången för smältning av vax,  $Q_{vax}$ , beräknades genom att använda följande ekvationer samt indata i tabell 5.

Tabell 5. Indata som används för beräkning av energiåtgången för smältning av vax.

|              |             |
|--------------|-------------|
| $m_{vax}$    | 1890 kg     |
| $h_{fus}$    | 210 kJ/kg   |
| $c_{p\ vax}$ | 2,52 kJ/kgK |
| dT           | 20°C        |

$$Q_{vax} = Q_1 + Q_2$$

$$Q_1 = m_{vax} * h_{fus} \quad [13]$$

$$Q_2 = m_{vax} * c_{p\ vax} * dT \quad [1]$$

Energiåtgången för uppvärmning av emulsionen,  $Q_{uppvärmning}$ , beräknades genom att använda följande ekvationer samt indata i tabell 6.

Tabell 6. Indata som används för beräkning av energiåtgången för uppvärmning av emulsion.

|                     |             |  |               |                    |
|---------------------|-------------|--|---------------|--------------------|
| $m_1$               | 2300 kg     |  | $c_{p\ vax}$  | 2,52 kJ/kgK        |
| $m_{tot}$           | 7250 kg     |  | $T_{ref}$     | 0°C                |
| $m_p$               | 7260,9 kg   |  | $T_1$         | 24°C               |
| $m_{vax}$           | 1890 kg     |  | $T_2$         | 82°C               |
| $m_{vatten}$        | 5072 kg     |  | $T_3$         | 90°C               |
| $m_{tillsatsmedel}$ | 288 kg      |  | $T_4$         | 44°C               |
| $c_{p\ vatten}$     | 4,18 kJ/kgK |  | $h_{\dot{a}}$ | $h_2=2703,2$ kJ/kg |

$$Q_{uppvärmning} = m_{\dot{a}tot} * \Delta h \quad [3]$$

$$m_{\dot{a}tot} = m_{\dot{a}1} + m_{\dot{a}2} + m_{\dot{a}3}$$

Där  $m_{\dot{a}1}$ , ångmassan i första steget av produktionsprocessen, beräknas för uppvärmning av vatten

$$U_2 * m_2 - U_1 * m_1 = m_{\dot{a}1} * h_{\dot{a}} \quad [10]$$

$$U_1 = c_{p\ vatten} * (T_1 - T_{ref}) \quad [7]$$

$$U_2 = U_1 + \int_{T_1}^{T_2} c_{p\ vatten} dT \quad [6]$$

$$m_2 = m_{\dot{a}1} + m_1$$

$$m_{\dot{a}1} = \frac{m_1 * (u_2 - u_1)}{h_{\dot{a}} - u_2} \quad [10]$$

Där  $m_{\dot{a}2}$ , ångmassan i andra steget av produktionsprocessen, beräknas för uppvärmning av vax- och vattenblandning

$$U_3 * m_3 - U_2 * m_2 = m_{\dot{a}2} * h_{\dot{a}} + m_{vax} * h_{vax} \quad [10]$$

$$U_3 = c_{p\ blandning} * (T_3 - T_{ref}) \quad [7]$$

$$c_{p\ blandning} = \left(\frac{m_{vatten}}{m}\right) c_{p\ vatten} + \left(\frac{m_{vax}}{m}\right) * c_{p\ vax}, m = m_{tot} - m_{tillsatsmedel} \quad [12]$$

$$m_3 = m_2 + m_{\dot{a}2} + m_{vax}$$

$$h_{vax} = c_{p\ vax} * (T_4 - T_{ref}) \quad [9]$$

$$m_{\dot{a}2} = \frac{u_3 * (m_2 + m_{vax}) - u_2 * m_2 - m_{vax} * h_{vax}}{h_{\dot{a}} - u_3} \quad [10]$$

Där  $m_{a3}$ , ångmassan i tredje steget av produktionsprocessen, beräknas för uppvärmning av vax- och vattenblandning med ytterligare tillsättning av vatten

$$U_{a+v} * m_{a+v} = m_{a3} * h_a + m_v * h_v \quad [10]$$

$$U_{a+v} = c_p \text{ vatten} * (T_3 - T_{ref}) \quad [7]$$

$$m_{a+v} = m_{tot} - m_3 - m_{tillsatsmedel} \Leftrightarrow m_{a+v} = m_{a3} + m_v$$

$$m_{a3} = \frac{m_{a+v}(u_{a+v} - h_v)}{h_a - h_v} \quad [10]$$

Energiförlusten över värmeväxlare,  $Q_{förlust\_värmeväxlare}$ , beräknades genom att använda följande ekvation samt indata i tabell 7.

Tabell 7. Indata som används vid beräkning av energiförlusten för värmeväxlaren.

|                         |             |
|-------------------------|-------------|
| $m_p$                   | 7260,9 kg   |
| $c_p \text{ blandning}$ | 3,75 kJ/kgK |
| dT                      | 66°C        |

$$Q_{förlust\_värmeväxlare} = m_p * c_p \text{ blandning} * dT \quad [1]$$

#### 4.2.3 Analys av energikartering

Det tredje och sista steget i en energikartläggning enligt Statens energimyndighet (2016) är att analysera den genomförda energikarteringen och ge förslag till åtgärder för att minska energianvändningen. Statens energimyndighet inleder analysen med att framställa en lista på betydande energianvändare, det vill säga utrustning och system som står för hög energikonsumtion eller som erfarenhetsmässigt har stor besparingspotential. När betydande energianvändare tagits fram kan faktorer som påverkar energikonsumtionen för respektive energianvändare identifieras. Med utgång från de faktorer som påverkar energikonsumtionen ska åtgärder slutligen identifieras. I samband med att åtgärdsförslagen implementeras bör nyckeltal sättas upp för företagets energianvändning. Nyckeltal används som ett verktyg för att följa upp företagets utveckling och kontrollera att åtgärderna resulterar i förbättringar.

Åtgärder kan delas in i olika nivåer beroende på hur kostsamma de är, hur mycket planering de kräver, och om de kräver ombyggnation i verksamheten. Statens energimyndighet (2016) delar in åtgärder i tre nivåer vilka presenteras nedan:

1. *Rutiner och beteende*
2. *Enkla investeringar*
3. *Förändringar på systemnivå*

Nivå ett, *Rutiner och beteende*, behandlar åtgärder som kan implementeras utan att kostsamma investeringar behöver göras. Det kan handla om förändringar i rutiner och beteende till följd av att personalen blir medveten om var energianvändningen kan minskas i verksamheten. Nivå ett kräver planering, underhåll och uppföljning för att ge lönande resultat. Nivå två, *Enkla investeringar*, behandlar åtgärder som kräver inköp eller utbyte av enstaka komponenter, maskiner eller maskindelar som minskar energianvändningen. Nivå två kräver viss investering, men däremot inte lika mycket planering som nivå ett. Nivå tre, *Förändringar på systemnivå*, behandlar byte av hela system eller delar av system och genomförs ofta i samband med nybyggnation eller ombyggnation av verksamheten. Nivå tre kräver betydligt större investeringar än föregående nivåer.

För projektet inleddes analys av energikarteringen med att betrakta beräkningsresultaten. För en tydligare bild av hur dessa värden förhåller sig till varandra har energi- och materialflödena för produkterna illustrerats genom att skapa en blackbox, där även mängden energi och material som används står specificerad. Vidare jämfördes energiförlusterna med den totala mängden ingående energin i syfte att visa andelen förluster i systemet. Siffrorna sattes sedan i kontext genom att relatera energiförlusten till ekonomisk förlust. För att bestämma den ekonomiska förlusten användes den totala årskostnaden för oljan som förbränns i ångpanna, vilket nämns i Kapitel 2.1 Vaxemulsionsproduktion. Blackboxen ihop med de ekonomiska siffrorna utgjorde underlag för att sedan identifiera problemområden och etablera åtgärdsförslag. För att uppnå omfattande åtgärdsförslag konsulterades personal från Seelution AB samt att litteraturstudier betraktades. Problemområdena tillsammans med motsvarande åtgärdsförslag sammanställdes senare i en tabell.

### 4.3 Processkartläggning

För att kunna effektivisera Seelution AB:s produktionsanläggning med avseende på produktionsprocessen behöver produktionen först kartläggas. Litteraturstudierna gav upphov till ett flertal relevanta processkartläggningsmetoder som resulterade i att en Kesselringmatris användes som grund för valet av analysmetod. Kriterier som användes presenteras och poängsättningen analyseras. Efter val av metod presenteras den arbetsgång som följdes vid utförandet av processkartläggningen.

#### 4.3.1 Översikt över processkartläggningsmetoder

I tabell 8 fås en översikt över sammanställd input och output för analysmetoderna VSM, IDEF0, sus-VSM och MEFA som en förberedelse inför val av kartläggningsmetod.

Tabell 8. Översikt över input, output samt övrigt innehåll för VSM, IDEF0, sus-VSM och MEFA.

|                | Input                                                                                                                                                                                   | Output                                                                                                                           | Fördelar                                                                                                                                         | Nackdelar                                                                                                   |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>VSM</b>     | Kundkrav, cykeltid, ställtid, uptime, antalet operatörer, antalet produktvarianter, leveransvolym, arbetstid (exklusive raster), kassationer mm, dagliga ordrar, prognoser, veckoplaner | Översikt över de viktigaste processerna, genomloppstid och tid för värdehöjning (skillnaden däremellan är förbättringspotential) | Visar var det finns behov av förbättringar, trycksymbolen ("Push") visar var det kan finnas tillverkning utan hänsyn till kundens aktuella behov | Beskriver inte hela systemet och hur olika produktvarianter förhåller sig till varandra                     |
| <b>IDEF0</b>   | Operatörer, verktyg, maskiner, material, energiförbrukning, lagstadgar, ritningar, organisation                                                                                         | Detaljerad insyn i samtliga delprocesser                                                                                         | Endast en typ av box, men flera nivåer av processkartläggning en analyseras                                                                      | Svårt att skilja mellan input och kontroller                                                                |
| <b>Sus-VSM</b> | Som traditionell VSM, samt energiförbrukning, vattenkonsumtion, råmaterial, ljudnivå                                                                                                    | Som för VSM samt identifiering av processer med hög energiförbrukning, riskfyllda arbetsuppgifter, problemområden i arbetsmiljön | Visar hur produktionen kan göras mer ekonomiskt samt socialt och miljömässigt hållbar                                                            | Kräver input som inte nödvändigtvis finns i nuvarande sammanhang                                            |
| <b>MEFA</b>    | Material och energi                                                                                                                                                                     | Identifierar processer med hög material- och energiförbrukning                                                                   | Fokuserar endast på energi och material, bedömer resursanvändning, intensitet och hållbarhet                                                     | För att analysen ska vara tillförlitlig är det viktigt att data som analyseras stämmer väl med verkligheten |

#### 4.3.1 Val av kartläggningsmetod

Kesselringmatrisen (Malmqvist, 2017) jämför de olika metoderna med hjälp av viktning, där totalpoängen indikerar den bästa metoden, se tabell 9. För att bedöma hur nödvändigt kriteriet är för att bistå förbättringsarbetet används en kriterieskala samt en uppfyllelseskala, som visar hur väl metoden uppfyller kriteriet, där viktningen för varje kriterium beräknas genom att multiplicera kriteriet (n) med uppfyllnadsgraden (g).

Kriterieskala (n):

- n = 5 Helt nödvändigt
- n = 4 Mycket stor önskvärdhet
- n = 3 Stor önskvärdhet
- n = 2 Liten önskvärdhet
- n = 1 Obetydlig önskvärdhet

Uppfyllelseskala (g):

- g = 4 Utmärkt
- g = 3 Mycket god
- g = 2 Godtagbar
- g = 1 Dålig
- g = 0 Otillräcklig

Kriterier som ansågs vara nödvändiga för att finna en lämplig kartläggningsmetod och som skulle bidra till att generera förbättringsförslag togs fram genom idégenerering. Totalt togs sju kriterier fram som benämns K1, K2, etcetera, och beskrivs samt motiveras i kommande stycken.

K1 beskriver om metoden går att tillämpa på aktuellt projekt. Saker som tas i åtanke är om all data finns tillgänglig eller kan tas fram, hur tillförlitliga data är och hur lång tid kartläggningen beräknas ta. Då projektet genomförs under begränsad tidsram ställdes krav på att data behöver vara lättillgänglig, och kriteriet bedömdes därmed vara *helt nödvändigt (5)* vid val av metod. VSM värderades uppfylla kriteriet *utmärkt (4)*, beroende på att data som metoden kräver är relativt enkel att ta fram vilket förenklar genomförandet. Tider som krävs går att mäta upp i produktionen och data som berör bland annat produkter, ordrar och operatörer är kända. Sus-VSM och MEFA, som utöver processer även tar hänsyn till bland annat energi och material, bedömdes uppfylla kriteriet *godtagbart (2)* då metoderna kräver mer omfattande data som fås ur ingående mätningar och i vissa fall beräkningar. IDEF0 bedömdes ha *mycket god (3)* uppfyllelse av kriteriet. IDEF0 ansågs ha något lägre uppfyllnadsgrad av kriteriet än VSM beroende på att IDEF0 generellt kräver mer erfarenhet för att kartläggningen ska bli korrekt utförd. Det är bland annat viktigt att kunna särskilja på olika ingående pilar för att få ett tillförlitligt resultat. IDEF0 kräver även information om maskiner och lokaler i form av ritningar. Tillgängliga ritningar anses inte vara helt tillförlitliga i den aktuella verksamheten, då de flesta är föråldrade. Att uppdatera ritningar skulle innebära ett tidskrävande arbete som till viss grad påverkar projektets genomförbarhet.

K2 tar hänsyn till om metoden förklarar vilka processer som finns i systemet, samt materialtillgångar, verktyg, personal med mera. Då målet med kartläggningen är att visualisera dessa processer, bedöms kriteriet ha *mycket stor önskvärdhet (4)*. IDEF0 bedömdes uppfylla kriteriet *utmärkt (4)*, vilket kan motiveras med att input som används i metoden är en genomgång av samtliga processer, verktyg, material med mera. Övriga metoder bedömdes ha *mycket god (3)* uppfyllelse, då metoderna tar hänsyn till samtliga produktionsmetoder men inte lika ingående som IDEF0. Vid kartläggning med MEFA klargör systemgränsen vilka processer som ingår i kartläggningen och hur material och energi flödar in respektive ut ur processerna. Om många processer ingår under samma systemgräns kan det innebära att enskilda processer endast beskrivs kortfattat då fokus istället läggs på systemet som helhet. VSM och Sus-VSM behandlar processer som ingår under hela produktens ledtid.

K3 behandlar hur väl metoderna beaktar hållbarhetsaspekter. Förbättringar i produktionsprocessen har historiskt gjorts ur ett ekonomiskt perspektiv men idag har miljöfrågor och social hållbarhet en viktig del i näringslivet. Med det i åtanke bedömdes kriteriet ha *mycket stor önskvärdhet (4)*. MEFA behandlar material och energikonsumtion och en minskning av förluster inom kategorierna ligger i linje med ett hållbarhetsperspektiv varför metoden bedömdes uppfylla kriteriet *mycket bra (3)*. VSM och Sus-VSM baseras på Lean Production som avser att lokalisera olika typer av slöseri, bland annat överproduktion



och onödiga transporter, vilket bidrar till minskad användning av resurser (Lindér, J., 2015). Med det som grund bedömdes VSM uppfylla kriteriet *mycket bra* (3). Sus-VSM behandlar dessutom också energi- och materialkonsumtion likt MEFA och bedömdes därför uppfylla kriteriet *utmärkt* (4). IDEF0 är en metod som är väldigt adaptiv och ger stor valmöjlighet i vad som analyseras som input. Materialflöden analyseras vanligtvis med metoden och det är möjligt att även analysera energiflöden, men är inte nödvändigt, varför metoden bedöms uppfylla kriteriet *mycket bra* (3).

K4 behandlar tidsaspekten för delprocesser i tillverkningen. Tillverkningsprocesser som tar längre tid att slutföra än nödvändigt bidrar till ett ineffektivt produktionsflöde och kriteriet bedöms därför ha *stor önskvärdhet* (3). Då IDEF0 och MEFA inte behandlar detta kriterium bedömdes detta som *otillräckligt* (0). VSM och sus-VSM har tider som input och uppfyller kriteriet *utmärkt* (4).

K5 beskriver hur väl metoden lokaliserar problemområden i produktionssystemet och bedömdes som *helt nödvändigt* (5) då syftet med processkartläggningen är att finna dessa områden. Då IDEF0 endast kartlägger produktionssystemet utan att lokalisera några problemområden bedömdes detta som *otillräckligt* (0). VSM och MEFA bedömdes ha *mycket god uppfyllelse* (3) då VSM finner flaskhalsar och identifierar den värdehöjande tiden, medan MEFA identifierar material- och energispill. Sus-VSM bedömdes uppfylla kriteriet *utmärkt* (4) eftersom den fungerar på samma sätt som VSM men tar även hänsyn till vattenkonsumtion, råmaterialsförbrukning, och energiförbrukning.

K6 beskriver hur väl metoden finner områden i produktionssystemet som inte nödvändigtvis ger upphov till problem men som kan effektiviseras, och bedömdes vara *helt nödvändigt* (5) då även detta ingår i syftet med kartläggningen. IDEF0 bedömdes uppfylla detta kriterium *dåligt* (1) som följd av att produktionssystemet visualiseras noggrant men kan bli svårt att använda till effektivisering. VSM bedömdes ha *mycket god uppfyllelse* (3) då resultatet visar den värdehöjande tiden för systemet, och därmed bedömdes sus-VSM uppfylla kriteriet *utmärkt* (4) eftersom metoden behandlar faktorerna som har nämnts innan såsom energiförbrukning med mera. MEFA ansågs uppfylla kriteriet *godtagbart* (2) då energiförbrukningen beräknas men erhöll ett lågt värde på grund av avsaknad av andra inputs.

K7 behandlar låg komplexitet, det vill säga hur lättförståelig och överskådlig processkartläggningen är för läsaren. Processkartläggningen görs bland annat för att få en tydlig bild av produktionsprocessen och därför är det önskvärt att metoden som används inte är för komplex, för att inte förlora överskådligheten. Samtidigt är det viktigt att lättbegripligheten inte erhålls på bekostnad av analysens grundlighet, varför kriteriet ansågs ha *stor önskvärdhet* (3). Eftersom MEFA kräver en stor mängd noggrann data som måste analyseras iterativt ansågs metoden uppfylla kriteriet *dåligt* (1). IDEF0 verkar till synes lätthanterlig men kräver att de ingående pilarna i aktivitetscellen, främst input och kontroller, kategoriseras korrekt. Utöver kan de olika nivåerna i analysen hämma överskådligheten varför metoden ansågs uppfylla kriteriet *godtagbart* (2). VSM och Sus-VSM ansågs båda

uppfylla kriteriet *utmärkt* (4) respektive *mycket bra* (3) eftersom båda metoderna visualiserar processen övergripande och tillåter generaliseringar i analysen. Sus-VSM bedöms som lite mer komplex då den utöver att behandla samma input som VSM dessutom analyserar material- och energiförbrukning samt social hållbarhet.

Kriterierna och uppfyllnadsgraden för respektive metod fördes in i Kesselringmatrisen varpå ett viktat värde erhöles för varje kriterium respektive metod. De viktade värdena summerades för varje metod där det sammanlagda värdet ger en indikation på hur väl alla krav uppfylls.

Tabell 9. Kesselringmatris med viktade kriterier.

| Kriterier                                 |   | IDEF0     |    | VSM    |    | Sus-VSM   |    | MEFA      |    |
|-------------------------------------------|---|-----------|----|--------|----|-----------|----|-----------|----|
|                                           | n | g         | t  | g      | t  | g         | t  | g         | t  |
| K1.Utförbar i praktiken                   | 5 | 3         | 15 | 4      | 20 | 2         | 10 | 2         | 10 |
| K2. Tar hänsyn till produktionsmetoder    | 4 | 4         | 16 | 3      | 12 | 3         | 12 | 3         | 12 |
| K3. Tar hänsyn till hållbarhetsaspekter   | 4 | 3         | 12 | 3      | 12 | 4         | 16 | 3         | 12 |
| K4. Tar hänsyn till tidsaspekten          | 3 | 0         | 0  | 4      | 12 | 4         | 12 | 0         | 0  |
| K5. Lokaliserar problemområden            | 5 | 0         | 0  | 3      | 15 | 4         | 20 | 3         | 15 |
| K6. Lokaliserar effektiviseringspotential | 5 | 1         | 5  | 3      | 15 | 4         | 20 | 2         | 10 |
| K7. Låg komplexitet                       | 3 | 2         | 6  | 4      | 12 | 2         | 6  | 1         | 3  |
| <b>Total</b>                              |   |           | 54 |        | 98 |           | 96 |           | 62 |
| <b>Rangordning</b>                        |   |           | 4  |        | 1  |           | 2  |           | 3  |
| <b>Beslut</b>                             |   | Eliminera |    | Behåll |    | Eliminera |    | Eliminera |    |

Resultatet av totalpoängen visade att den metod för processkartläggning som uppfyllde kriterierna bäst var VSM. Metoden erhöles höga värden för de kriterier som ansågs vara viktigast och där möjligheten till åtgärdsförslag befäste valet av VSM som processkartläggningsmetod. Vidare var enkelheten i utförandet tilltalande där även de olika formerna av input är relativt enkla att finna alternativt mäta på plats. IDEF0 och MEFA erhöles påtagligt lägre värden än VSM och Sus-VSM, av vilken anledning metoderna eliminerades ur urvalsprocessen. Metoderna tar inte hänsyn till cykeltider, vilket ansågs vara ett kriterium med stor önskvärdhet då många förbättringsområden i produktionsprocessen kan kopplas till tid. IDEF0 lokaliserar inte heller problemområden, vilket är ett kriterium som bedömdes vara helt nödvändigt vid val av metod. Sus-VSM uppfyllde flest kriterier på utmärkt nivå, dock var två av kriterierna endast godtagbart uppfyllda. VSM uppfyllde alla kriterier med mycket god eller utmärkt uppfyllelse, vilket talar för att metoden är kvalificerad på alla plan som efterfrågas.

#### 4.3.2 Arbetsgång för kartläggning

Vid utförandet av VSM användes arbetsgången som presenteras av Rother & Shook (2001). Som ett första steg valdes först vilka värdeflöden som skulle analyseras, där liknande produktfamiljer slogs samman och analyserades på samma karta. En karta över nutida tillstånd ritades upp för att lokalisera flaskhalsar samt för att finna den värdehöjande tiden. Enligt arbetsgången skall sedan en karta över framtida tillstånd ritas upp för att skapa ett effektivare framtida flöde. Dessa två kartor ger tillsammans en handlingsplan för hur de nya förbättringarna skulle implementeras i produktionssystemet.

Tillvägagångssättet för uppförandet av den nutida kartan bestod av en genomgång av produktionssystemet till fots för att få en uppfattning om hur flödet såg ut. Alla relevanta tider som behövdes mättes på plats för att få ett så realistiskt resultat som möjligt. De viktigaste processerna som var relaterade till materialflödet ritades ut längst ned på kartan i den ordning materialet färdades i, från vänster till höger. Informationsflödet ritades ut längst upp med start från höger till vänster. Existerande lager och mellanlager ritades ut mellan processerna, samt in- och utleveranser (Rother & Shook, 2001).

Som grund till den framtida kartan identifieras slöseri som kan finnas i produktionssystemet. Borgvall & Rodestrand (2017) beskriver de sju slöserierna som finns inom VSM, och som företag ska sträva efter att eliminera eller reducera. Dessa är:

*Överproduktion* - att producera i förväg innan efterkommande process eller kund kräver det, vilket leder till att tillverkningen är större än kundens efterfrågan. En annan form av överproduktion är då tillverkningen sker snabbare eller tidigare än beräknat, och är något som även kan ske hos företag som tillverkar efter kundorder. Detta anses vara den värsta formen av slöseri då övriga härstammar ur överproduktion.

*Väntan* - outnyttjad tid vid väntan på nödvändiga processer. Till exempel då operatörer väntar på att en process ska bli färdig, då utrustning havererar, väntan på material med mera. Väntan är en vanlig form av slöseri i olika typer av verksamheter.

*Överarbete* - extraarbete som kunden inte vill betala för. Det kan handla om tillverkning av högre kvalitet än önskat, eller utförande av onödiga arbetsmoment såsom tester eller inspektioner som kan anses vara nödvändiga men är i själva verket slöseri. Anledningen till att detta slöseri uppstår är bristfälliga eller opålitliga processer.

*Rörelser* - detta slöseri är kopplat till produktionens layout, där rörelser som inte medför något värde ingår, såsom att behöva gå en lång sträcka för att hämta nödvändiga verktyg eller material. Vidare hör även dålig ergonomi till detta slöseri, då vissa rörelser kan vara skadliga och inverka både personal och organisation negativt.

*Produktion av defekta produkter* - då defekta produkter tillverkas leder detta till extraarbete i form av korrigering av defekt produkt, som kunden heller inte vill betala för. Det kan även

leda till kassering av defekt produkt och som medför ekonomiska förluster för företaget. Defekta produkter kan uppstå till exempel på grund av felaktigt ifyllda uppgifter eller ofullständig orderinformation.

*Transporter* - den enda transporten som tillför värde till systemet är transporten av färdig produkt till kund. De interna transportererna inom verksamheten är slöseri, såsom truckar och transportbanor. Fokus för verksamheten ska ligga i att eliminera behovet av dessa transporter och inte effektivisera de. Fabrikens layout kan vara en orsak till onödiga transporter.

*Lager* - slöseri av lager leder till en rad olika problem som till exempel kapitalbindning eller dåligt utnyttjande av ytor som även kan dölja problem. Vidare kan lager resultera i en förlängning av ledtider som förminskar företagets förmåga att anpassa sig snabbt efter marknaden.

För att konstruera en framtida karta måste framförallt grundorsakerna för slöseri identifieras, som Rother & Shook (2001) menar är det viktigaste steget att fullfölja. Rekommendationerna är att följande frågor besvaras:

1. Vilken är taktiden?
2. Kommer ni att producera för en supermarket med färdiga produkter eller leverera direkt till kund?
3. I vilka processer kan ni ha ett kontinuerligt produktionsflöde?
4. Var måste ni ha en supermarket för att kunna styra flödet i processer som befinner sig uppströms?
5. Från vilken punkt i produktionskedjan (pacemakerprocessen) kommer tillverkningen att styras?
6. Hur kan ni jämna ut produktionsmixen i pacemakerprocessen?
7. Vilka delmängder kommer ni regelbundet att ta ut från pacemakerprocessen?
8. Vilka processer måste ni förbättra för att få det flyt i värdeflödet som ni har specificerat på kartan över det framtida tillståndet?

## 5 Resultat

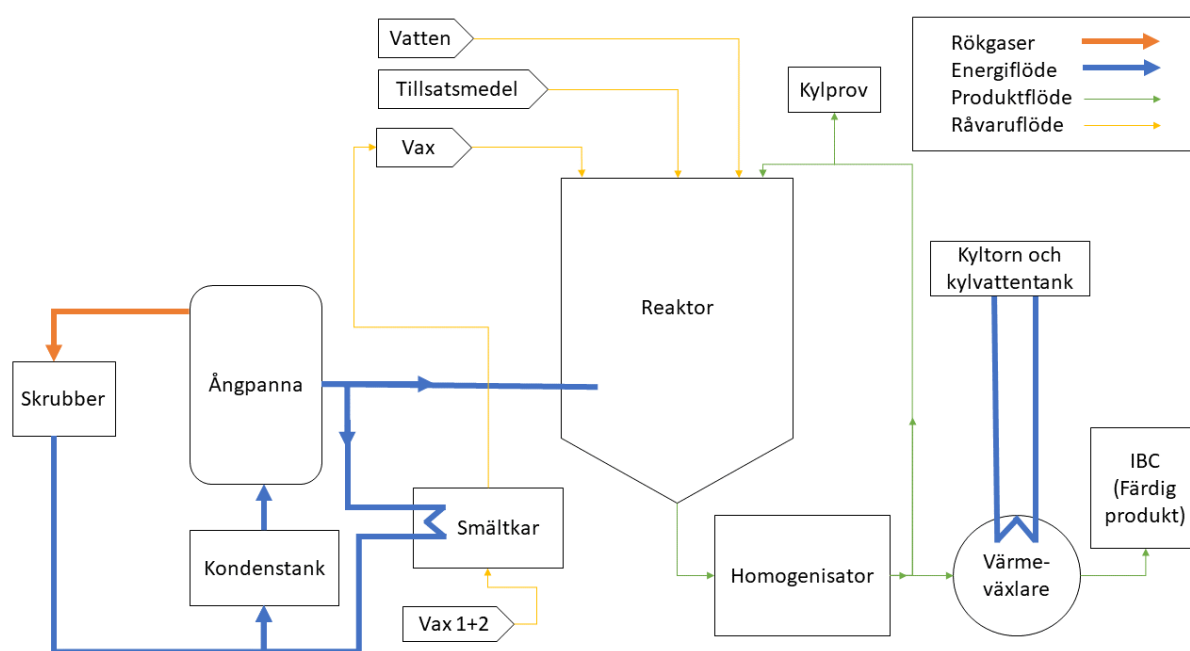
I detta avsnitt presenteras figurer, kommentarer och beräkningar som redogör resultaten från metoderna som utförts i föregående kapitel, och som ska besvara problemformuleringen. Bland annat presenteras slutresultaten från energikarteringen för oljeblandningen och vaxemulsionen, som visar vilka energiförluster som existerar i de olika produktionsprocesserna. Även processkartläggningen presenteras i sin helhet, som beskriver hur olika produktionsflöden ser ut samt vilka slöserier som uppmärksammas för fabriken. I värdeflödesanalysen presenteras slutligen åtgärdsförslag i syfte att reducera slöseri.

## 5.1 Energikartläggning

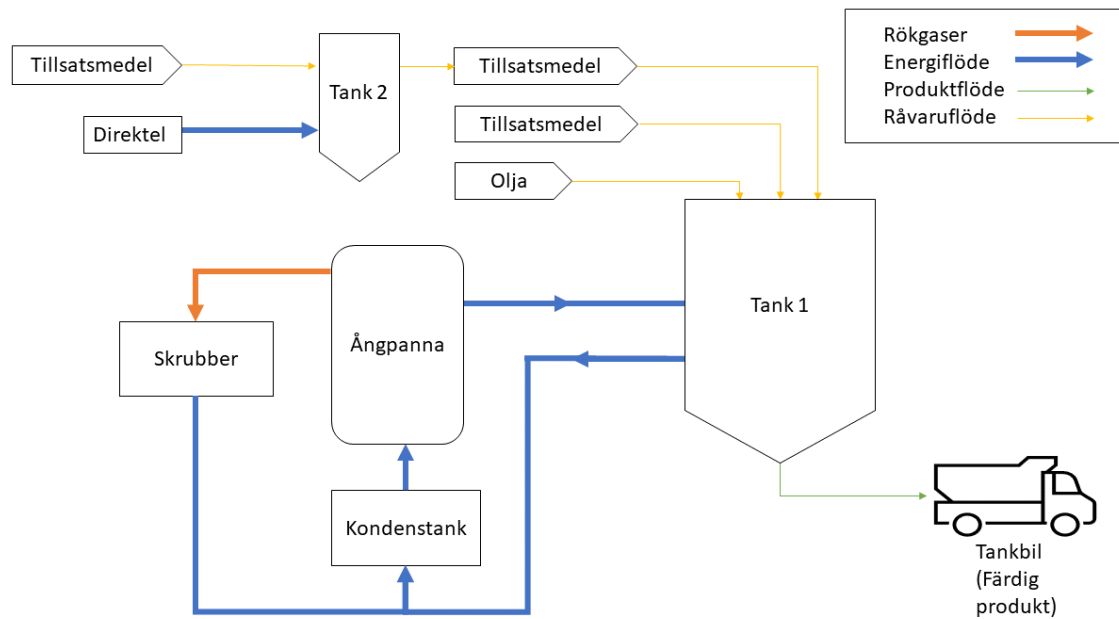
Energikartläggningen ämnar till att ge svar på de problemformuleringar som presenterades i det inledande kapitlet. Det efterfrågades hur energiflödet i produktionsprocessen ser ut, vilket resulterade i processscheman för de två produktvarianterna. Det efterfrågades även vilka delar av produktionen som har störst energiförluster där dessa identifierades med hjälp av de termodynamiska beräkningarna. Slutligen efterfrågades de åtgärder som kan implementeras för att minska energiförluster och förbättra produktionsprocessen. Åtgärderna tas då fram med hjälp av Energimyndighetens steg-för-steg-metod samt litteraturstudier och där en mängd åtgärdsförslag presenteras.

### 5.1.1 Planering av energikartläggning

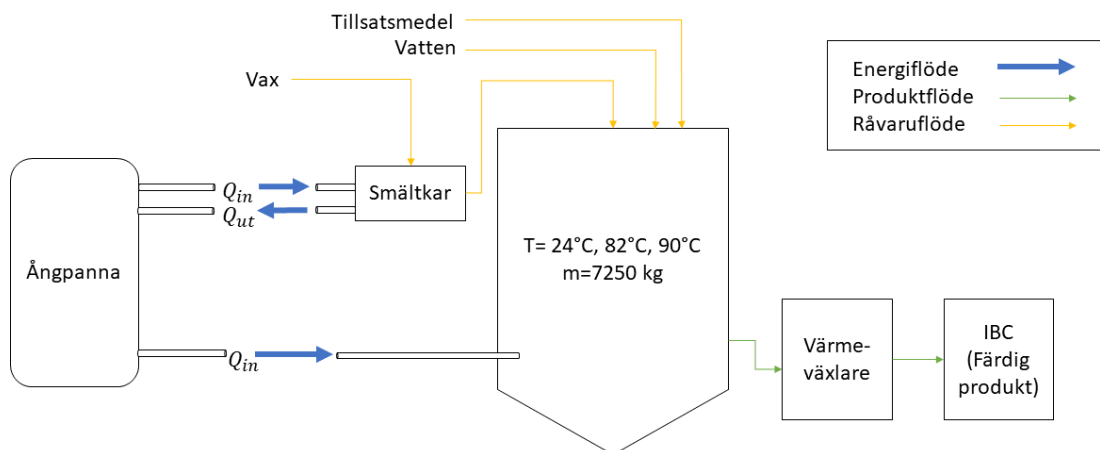
Efter platsbesöket hos Seelution AB:s produktionsanläggning kunde information som återhämtats användas för att rita upp processscheman för oljeblandningen samt vaxemulsionen. Två typer av processscheman fastställdes för respektive produkt, ett med en fullständig beskrivning av processen, se figur 19 respektive figur 20, samt en förenklad variant som endast visualiserade de delar av processen som var relevanta för de termodynamiska beräkningarna, se figur 21 respektive figur 22.



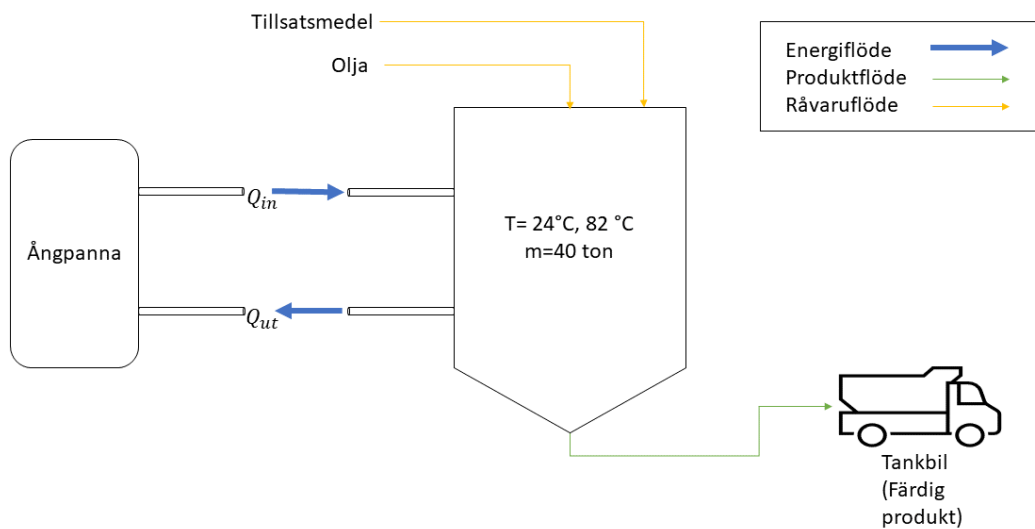
Figur 19. Processchema för vaxemulsion.



Figur 20. Processchema för oljeblandning.



Figur 21. Förenklat processchema för vaxemulsion som användes som grund vid beräkningar.



Figur 22. Förenklat processchema för oljeblandning som användes som grund vid beräkningar.

### 5.1.2 Energikartering

I följande avsnitt presenteras resultatet av de termodynamiska beräkningarna som har beräknats med hjälp av den teori som presenteras i Kapitel 3.1 Termodynamisk grund.

#### 5.1.2.1 Oljeblandning

För oljeblandningen har värmeförluster i rör och tankar har beräknats, såväl som den totala energin som krävs för uppvärmningen av tanken. Resultaten redovisas nedan.

Den totala förlusten av värmeenergi för oljeblandningen när den står utan värmning är

$$\dot{Q}_{förlust\_tank} = 2,047 \text{ kW} \Leftrightarrow Q_{förlust\_tank} = 243,2 \text{ MJ}$$

Värmeenergin som krävs för att värma upp oljeblandningen är

$$\dot{Q}_{vtot} = 33,78 \text{ kW} \Leftrightarrow Q_{vtot} = 2128 \text{ MJ}$$

Värmeenergiförlusterna som sker i rören är

$$\dot{Q}_{förlust\_rör} = 0,8066 \text{ kW} \Leftrightarrow Q_{förlust\_rör} = 50,7465 \text{ MJ}$$

#### 5.1.2.2 Vaxemulsion

För vaxemulsionen har värmeförluster i rör och värmeväxlare räknats ut samt energin som krävs för att värma reaktorn. Resultaten redovisas nedan.

Värmeenergin som krävs för att värma upp vaxkakorna är

$$Q_{vax} = 426,56 \text{ MJ}$$

Värmeenergin som krävs för att värma upp blandningen i reaktorn är

$$Q_{uppvärmning} = 1780,57 \text{ MJ}$$

Värmeenergiförlusterna som sker i värmeväxlaren är

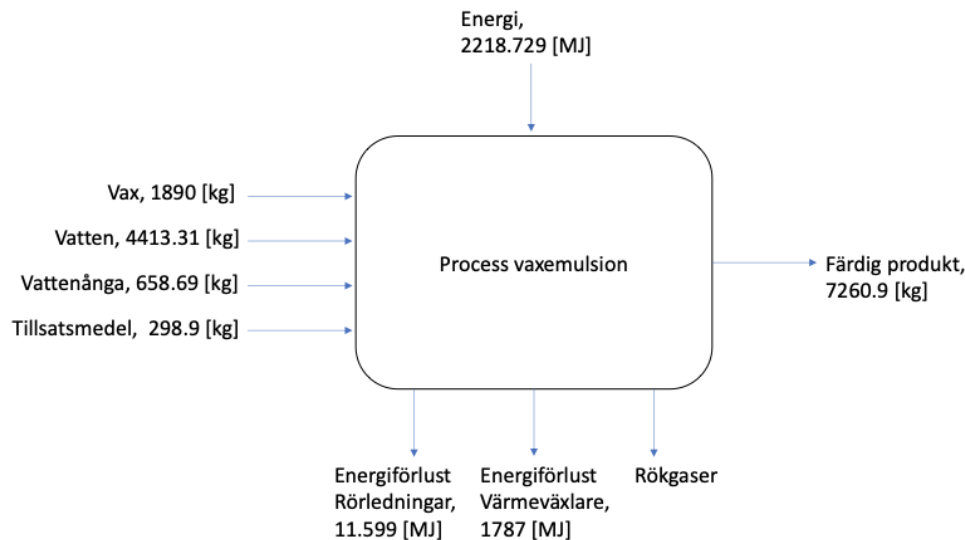
$$Q_{\text{förlust\_värmeväxlare}} = 1787 \text{ MJ}$$

Värmeenergiförlusterna som sker i rören är

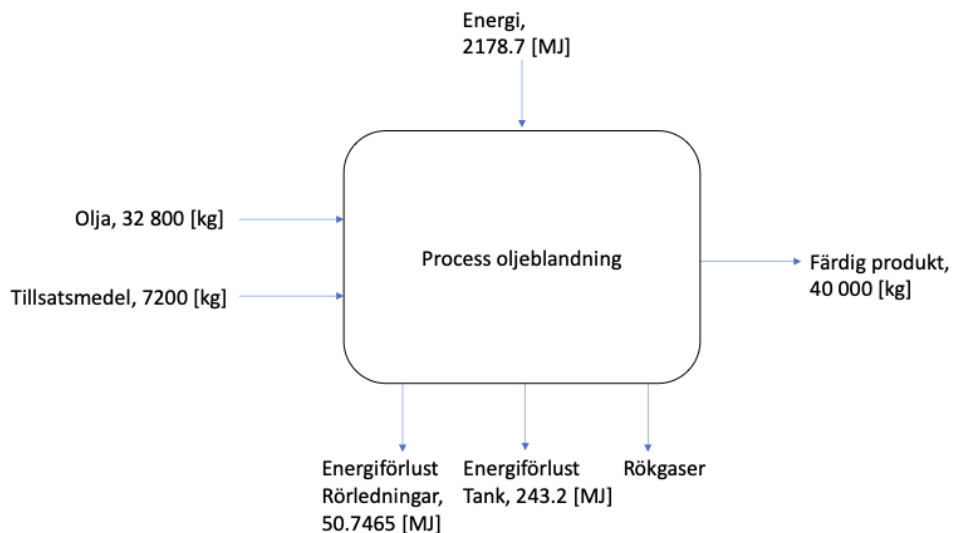
$$\dot{Q}_{\text{förlust\_rör}} = 0,8066 \text{ kW} \Leftrightarrow Q_{\text{förlust\_rör}} = 11,599 \text{ MJ}$$

### 5.1.3 Åtgärdsförslag baserade på genomförd energikartläggning

Inledningsvis analyserades resultatet presenterat i Kapitel 5.1.2 Energikartering och därifrån skapades en blackbox för varje produkt, se figur 23 respektive figur 24.



Figur 23. En blackbox som beskriver energi- och materialflödena för vaxemulsionsprocessen.



Figur 24. En blackbox som beskriver energi- och materialflödena för oljeblandningsprocessen.

Siffrorna från energiberäkningarna sattes sedan i kontext genom att betrakta hur stora energiförlusterna var i förhållande till den totala mängden energi samt vilka ekonomiska förluster detta medför, resultatet presenteras i tabell 10.



Tabell 10. Presentation av energiförluster samt ekonomiska förluster.

| Vaxemulsion                                                     |                 | Oljeblandning                                                  |                 |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|-----------------|
| Energiförlusterna utgör 45,2% av den totala energiförbrukningen |                 | Energiförlusterna utgör 7,8% av den totala energiförbrukningen |                 |
| $Q_{vax}$                                                       | 12 418,19 kr/år | $Q_{förlust\_tank}$                                            | 7086,85 kr/år   |
| $Q_{uppvärmning}$                                               | 51 885,81 kr/år | $Q_{vtot}$                                                     | 62 009,92 kr/år |
| $Q_{förlust\ värmeväxlare}$                                     | 52 073,18 kr/år | $Q_{förlust\_rör}$                                             | 1478,75 kr/år   |
| $Q_{förlust\_rör}$                                              | 338,4 kr/år     |                                                                |                 |

Med hänsyn till blackboxen, den ekonomiska aspekten, konsultation från Seelution AB samt genomförda litteraturstudier etablerades en tabell med åtgärdsförslag, se tabell 11, som redovisar problemområden och förslag till åtgärder som är kategoriserade efter nivåerna *rutiner och beteende*, *enkla investeringar* samt *förändringar på systemnivå*. Tabellen inkluderar förslag av förbättringar med avseende på komponenter i produktionssystemet samt förbättring av råvaran som används i produkten.

Tabell 11. Sammanställning av problemområden och motsvarande åtgärdsförslag.

| Sammanställning av åtgärdsförslag |                               |                                                                       |                                    |                                                                                             |                                                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Delsystem                         | Produkt                       | Beskrivning av problemområde                                          | Åtgärdsförslag                     |                                                                                             |                                                                           |
|                                   |                               |                                                                       | Rutiner & beteende                 | Enklare investeringar                                                                       | Förändringar på systemnivå (större investeringar)                         |
| Ångpanna                          | Oljeblandning och vaxemulsion | Beläggningar i ångpanna minskar varmvattnets och pannans effektivitet | Regelbunden rengöring av ångpanna. | Installera automatisk bottenblåsning och återvinna värme ur bottenblåsning (Armaterc, 2012) |                                                                           |
|                                   |                               | Låg kapacitet på panna medför längre uppvärmningstid för produkt      |                                    | Addera tillsatser som motverkar beläggningar (Kurita, 2020)                                 |                                                                           |
|                                   |                               |                                                                       |                                    |                                                                                             | Investera i ångpanna med högre kapacitet.                                 |
| Våt-skrubber                      |                               | Tar inte tillvara på energin i rökgaserna vid rening.                 |                                    |                                                                                             | Investera i utrustning som kan ta tillvara på energin i rökgaserna så att |

| Sammanställning av åtgärdsförslag |                                            |                                                                                                                                                                              |                       |                                                                                    |                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Delsyste<br>m                     | Produkt                                    | Beskrivning av<br>problemområde                                                                                                                                              | Åtgärdsförslag        |                                                                                    |                                                                                                                                                                                |
|                                   |                                            |                                                                                                                                                                              | Rutiner &<br>beteende | Enklare<br>investeringar                                                           | Förändringar på<br>systemnivå<br>(större<br>investeringar)                                                                                                                     |
|                                   |                                            |                                                                                                                                                                              |                       |                                                                                    | dess energi kan<br>nyttjas i systemet.                                                                                                                                         |
| Ång-<br>ledning                   | Olje-<br>blandning<br>och vax-<br>emulsion | Dåligt<br>layoutplanerade<br>ledningar orsakar<br>värmeförluster då<br>ången behöver<br>transporteras<br>längre sträcka än<br>nödvändigt.                                    |                       |                                                                                    | Dra om<br>rörledningar för att<br>skapa en bättre och<br>mer effektiv layout<br>där transportvägar<br>är de kortast<br>möjliga och<br>separation av<br>ångflödet<br>minimeras. |
|                                   |                                            | Dåligt<br>dimensionerade<br>ledningar<br>minskar<br>ångmassflödets<br>kapacitet och<br>sänker därför<br>ångans kapacitet<br>att värma<br>produkt.                            |                       |                                                                                    | Kontrollera<br>dimensionering av<br>ledningar med<br>avseende på<br>tryckfall,<br>avluftning och<br>dränering. (Statens<br>Energimyndighet,<br>2016)                           |
|                                   |                                            | Luft i ledningar<br>orsakar<br>försämrade<br>värmeöverföring<br>och minskar<br>ångmassflödets<br>kapacitet och<br>sänker därför<br>ångans kapacitet<br>att värma<br>produkt. |                       | Avlägsna luft med<br>automatiska<br>termostatiska<br>avluftare (Armaterc,<br>2012) |                                                                                                                                                                                |
|                                   |                                            |                                                                                                                                                                              |                       | Manuella ventiler<br>för avluftning<br>(Armaterc, 2012)                            |                                                                                                                                                                                |
|                                   |                                            | Kondensat i<br>ångledningar<br>orsakar korrosion<br>samt minskar<br>ångmassflödets<br>kapacitet och<br>sänker därför<br>ångans kapacitet<br>att värma<br>produkt.            |                       |                                                                                    | Installation av<br>kondensatavledare/<br>ångfällor som<br>avleder kondensat<br>och förhindrar att<br>ånga läcker ut.<br>(Armaterc, 2012)                                       |

| Sammanställning av åtgärdsförslag |                                          |                                                                                                        |                                                                                                       |                                                                                        |                                                                                                             |
|-----------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Delsyste<br>m                     | Produkt                                  | Beskrivning av<br>problemområde                                                                        | Åtgärdsförslag                                                                                        |                                                                                        |                                                                                                             |
|                                   |                                          |                                                                                                        | Rutiner &<br>beteende                                                                                 | Enklare<br>investeringar                                                               | Förändringar på<br>systemnivå<br>(större<br>investeringar)                                                  |
| Värme-<br>växlare                 | Vax-<br>emulsion                         | Beläggningar försämrar växlarens effektivitet kraftigt.                                                | Regelbunden rengöring av värmeväxlare motverkar beläggningar. (Johansson, Hamid, Akram & Bagge, 2018) |                                                                                        |                                                                                                             |
|                                   |                                          | Beräkningar visar att energin som frigörs vid värmeväxlaren går till spillo                            |                                                                                                       |                                                                                        | Ta vara på värmeenergin som genereras vid värmeväxlaren genom att leda in det uppvärmda vattnet i systemet. |
| Kyltorn                           | Vax-<br>emulsion                         | Bakterier ansamlas i kyltornet och påverkar dess effektivitet.                                         | Kontinuerligt underhåll och rengöring (Chemiclean, 2020)                                              |                                                                                        |                                                                                                             |
| Råvara                            | Oljebland<br>ning och<br>vaxemulsi<br>on | Beräkningar visar att uppvärmning av oljeblandning tar lång tid och är därav en energikrävande process |                                                                                                       | Byta ut oljan som används i oljeblandningen till en med fördelaktigare värmekapacitet. |                                                                                                             |

Vidare i detta kapitel presenteras några utvalda åtgärdsförslag ur tabell 11 mer ingående. Dessa är åtgärdsförslag som anses ha störst potential till energieffektiviseringar i kombination med de åtgärdsförslag som har kunnat styrkas med de termodynamiska beräkningarna.

Ett åtgärdsförslag som presenteras är att ta till vara på den värmeenergi som våtskrubbern i fabriken tillhandahåller. I dagsläget leds den fuktiga ångan som produceras från rökgasreningen i skrubbern rakt in i den kondensattank där kondenserad vattenånga från ångrören samlas. Blandningen i kondensattanken håller en temperatur på 50°C. Den fuktiga ångan från våtskrubbern håller dock betydligt högre temperatur och skulle kunna utnyttjas genom att ledas om för mellanvärmning, istället för att avge värme till vätskan i kondensattanken. Detta skulle innebära att en mindre mängd energi skulle gå åt för att producera överhettad ånga av den fuktiga ångan. Att integrera tillvaratagandet på värmeenergin skulle medföra en möjlig förändring av produktionslayouten i och med att extra rörledningar och utrustning kan behöva anskaffas, därmed anses åtgärdsförslaget tillhöra nivån *Förändringar på systemnivå*.

Likt våtskrubbern tas inte energin från värmeväxlaren tillvara på. Det uppvärmda vattnet som genereras när vaxemulsion kyls ned leds idag ut till kyltornet igen där det kyls ner till utomhustemperaturen. Om man skulle leda det uppvärmda vattnet in i systemet skulle man istället kunna mellanvärma vattnet i ångpannan och på ett energieffektivt sätt generera vattenånga till processerna i fabriken. Detta åtgärdsförslag tillhör nivån *Förändringar på systemnivå* då rör måste dras för att leda om vattnet från värmeväxlaren och in till ångpannan vilket är en omfattande process som kräver anskaffning av utrustning och material, inhyrd kompetens och eventuell förändring i layout.

För att optimera energiförbrukningen kan uppvärmningen av olja och vaxer i produkterna eventuellt effektiviseras genom att skynda på värmningen. Detta görs genom att byta ut oljan i produkten till en med mer fördelaktiga egenskaper vad avser uppvärmning, värmekapacitet och densitet. Åtgärden klassas som en *Enklare investering* i och med att åtgärden avser att endast förändra formuleringen och mängden vattenånga som krävs för att värma den utan att påverka produktionssystemet fysiskt.

Ånga är effektivt för att överföra stora mängder energi samtidigt som kostnaden för vatten är låg, vilket medför att användning av ånga som energibärare i processindustrin är vanligt. Risken för att förlora effekt i ångsystemet är dock hög om man inte har ett väl genomtänkt ångsystem som säkerställer systemets energikapacitet. När ångan transporteras i ledningarna kommer den i kontakt med ytor med lägre temperatur än sin egen. Då detta sker börjar ångan värma upp ytan genom att avge sin värme och omvandlas till kondensat. Kondensat i rören innebär att en del av flödet i rören inte längre är lika effektivt vid uppvärmning av produkt och kommer även påverka ångans massflöde. När massflödet sänks fås en lägre verkningsgrad från systemet då inte lika mycket energi kan flöda genom rören i samma hastighet, och därav sänks energieffektiviteten. Installation av ångfällor som motstår mekaniskt slitage och korrosion separerar kondensatet från ångan och leder bort det till ångpannan. Därmed förhindras kondensatet från att det ligger kvar i rören och sänker ångflödet. Detta åtgärdsförslag tillhör nivån större investeringar eftersom ledningar behöver dras om (Armatec, 2012).

Inverkan av luft i ångledningar ger negativa effekter såsom försämrad värmeöverföring och minskad distribuerad ångmängd, vilket beror på att luft är en dålig värmeledare. Åtgärder som kan göras för att förhindra luft i ångsystemet är att använda automatiska termostatiska avluftare. Dessa fungerar genom att utnyttja temperaturskillnader mellan ånga och luft. Detta åtgärdsförslag tillhör nivån *enklare investeringar* eftersom det endast innebär ett utbyte av enstaka partier i delsystemet (Armatec, 2012). Både avluftare och ångfällor kan vara goda åtgärder för att minska uppvärmningstiden av olja och vax, och kommer på så vis effektivisera energiåtgången.

## 5.2 Processkartläggning

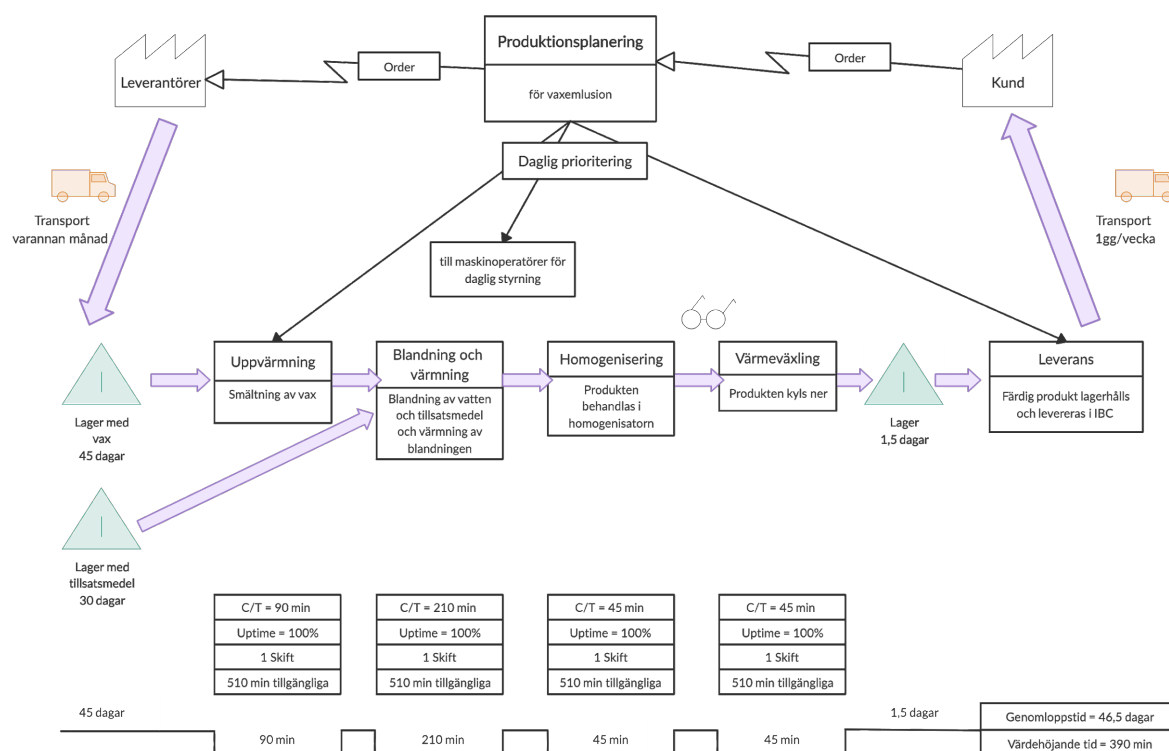
För att komplettera energikartläggningen och bidra till att finna åtgärder som kan implementeras för att minska energiförluster och förbättra produktionsprocessen, genomförs

även en processkartläggning. De två vanligast förekommande produktvarianterna analyseras, en oljeblandning och en vaxemulsion. Analysen resulterade i kartläggningar över nuvarande tillstånd som identifierar flaskhalsar och möjlighet till värdehöjning. Vidare identifieras de slöserier som finns i produktionssystemet varvid åtgärdsförslag utformas.

### 5.2.1 Kartläggning av nuvarande tillstånd, vaxemulsion

För kartläggningen av vaxemulsionsproduktionen beskrivs informations- och materialflödet, och illustreras i figur 25. För större format se bilaga 2. Informationsflödet består av kunder som beställer produkter med kort varsel via mail, vilket leder till att produktionen styrs helt av kundorder. Produktionsadministrationen beställer råvaror via mail från olika leverantörer. Maskinoperatörerna får sin information främst muntligt men får en överskådlig bild av produktionsprocessen för dagen via datorer.

Materialflödet startar då en order har lagts och tillverkningsprocessen startar. Tillverkningen har en enkel struktur med ett fåtal processer, där alla processer övervakas av två maskinoperatörer. Råvaror hämtas från lagret och tillverkningsprocessen startar genom uppvärmning och blandning av råvarorna, där manuellt arbete krävs när råvarorna tillsätts tankarna. Råvarorna blandas i reaktorn till rätt temperatur uppnåts inför nästa process. Efter homogenisatorn transporteras blandningen vidare genom två värmeväxlare till önskad temperatur är uppnådd. Mellan homogeniseringen och värmeväxlaren utförs tester för att kontrollera torrhalt i form av ett kylprov. Efter värmeväxlaren är produkten redo för leverans och pumpas in till IBC och inväntar leverans på lager.



Figur 25. Värdeflödesanalys av nutida tillstånd för vaxemulsionsproduktionen.

Eftersom Seelution AB:s produktion är baserad på kundorder och varje order har varierande satsstorlek har uppskattningar gjorts för de olika tidsbegreppen, främst med avseende på lagerhållningen av råvarorna då flera produkter använder sig av samma tillsatsmedel och vaxer. Syftet med uppskattningarna är att tillhandahålla en värdeflödesanalys som är representativ för den aktuella vaxemulsionen.

Värdeflödesanalysen har anpassats utefter informationen som Seelution AB kunde tillhandahålla. Produktionen av vaxemulsionen tillverkas efter ett recept som producerar en viss mängd och dubbleras eventuellt beroende på kundordern. För att värdeflödesanalysen skall spegla verkligheten i största möjliga utsträckning har uppskattningar gjorts baserat på standardsatsstorleken för vaxemulsionen som är 7,2609 ton. Stålltid analyseras inte alls eftersom processerna inte kräver några omställningar mellan de olika produkterna. Produktionen identifieras som ett dragande system eftersom planering och styrning av produktionen baseras på varje unik order.

Den nutida kartan åskådliggör främst hur länge råvaror och slutprodukt befinner sig på lager och hur stor del av genomloppstiden som är värdehöjande, vilket för vaxemulsionen är 0,58%. Den största delen av genomloppstiden består alltså av lagerhållning och bedöms vara ett problemområde. Samma råvaror används i flera olika produkter och måste lagerhållas i en större mängd för att kunna förse behovet för samtliga slutprodukter. Materialflödet innefattar inga mellanlager mellan de olika processerna och bedöms därför vara effektivt.

### 5.2.2 Identifiering av slöseri, vaxemulsion

Gällande vaxemulsionsproduktionen identifierades en rad olika slöserier. Dessa slöserier behöver sedan evalueras för att se i vilken omfattning de påverkar produktionen, samt hur de kan reduceras alternativt elimineras totalt.

*Överproduktion* - Produkten produceras mot kundorder, vilket innebär att den produceras i precis den mängd och vid den tidpunkt som den behövs. Det sker ingen produktion mot lager och därmed existerar inga slöserier kopplade till överproduktion.

*Överarbete* - Produkten har en homogen och återkommande kundkrets som specificerat vad de kräver av produkten. Seelution AB håller sig inom ramarna för detta och överarbetar således inte produkten.

*Rörelse* - Anläggningens layout är funktionell, vilket innebär att maskiner och verktyg är grupperade efter funktioner (Bellgran & Säfsten, 2005). Layouten medför att operatörerna får gå långa sträckor i anläggningen vid produktion av vaxemulsioner och då layouten inte är optimerad för den specifika produkten, vilket medför att onödiga rörelser uppstår. Produktionen är inte automatiserad utan sköts manuellt vilket medför att ytterligare onödiga rörelser uppstår. Under produktionen tillsätter operatörerna manuellt flera olika typer av tillsatsmedel i reaktorn. Detta innebär en försämring av de ergonomiska förutsättningarna då säckar på 25 till 30 kilogram behöver lyftas från marknivå och över axelhöjd. För att nå

reaktors topp där tillsatsmedel tillsätts behöver operatörerna ta sig upp till en plattform vilket medför onödiga rörelser. Onödiga rörelser uppkommer också vid avlastning av produkt från reaktor till IBC, där operatörerna efter varje fylld IBC måste hämta en truck eller palllyftare för att förflytta fylld IBC till sin lagringsplats, för att sedan hämta en ny IBC som skall fyllas.

*Transporter* - De interna transporterna i produktionsanläggningen är inte konsekventa eftersom den färdiga produktens transportväg planeras under produktionens sista timmar. Detta beror på att förvaring av färdig produkt planeras utefter den plats som finns tillgänglig vid den specifika tidpunkten. Det förekommer onödiga transportsträckor inom fabriken då lagringen inte optimerats för kortast väg från reaktor till lagring av IBC, eller den kortaste vägen från lagring till extern transport.

*Lager* - Lagerytorna är inte optimerade då det inte planeras i förväg var produkt skall lagras och produkten har ingen bestämd lagerplats. Därav uppstår ledtider när IBC ska placeras och förflyttas från reaktor och till extern transport.

*Produktion av defekta produkter* - Eftersom produkten produceras en sats åt gången och inte massproduceras, reduceras felen och uppkomsten av defekta produkter är obefintlig. Kontroller i form av kyltester utförs regelbundet för att säkerställa att produkten uppnår den torrhalt och kvalitet som erfordras.

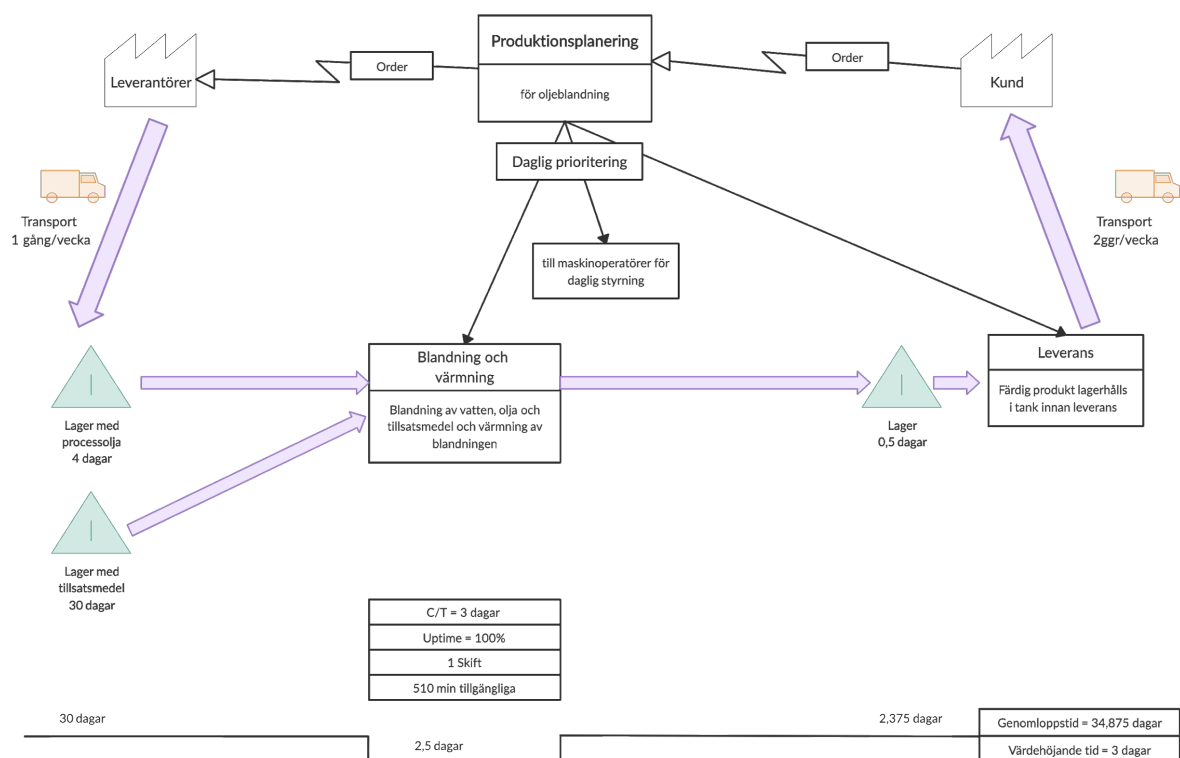
*Väntan* - I första skedet av produktionsprocessen smälts vaxet i ett smältkar för att sedan tillsättas till uppvärmt vatten. Smältning av vax tar cirka 1,5 timmar, vilket är en långsammare process än uppvärmning av vatten som tar cirka 50 minuter. I och med att smältan är ett mer tidskrävande moment leder det till en väntan på 40 minuter innan blandning kan påbörjas. Efter att blandningen lämnar homogenisatorn behöver kylprov tas innan den kan gå vidare till värmeväxlaren. Det uppstår då en väntan när kylprovet tas och analyseras eftersom produktionen inte kan fortgå innan blandningen uppnått erforderad torrhalt, där kylprovet tar i genomsnitt 5 minuter att utföra. Färdig produkt avlastas från reaktor till IBC-tankar. Eftersom en IBC endast rymmer 1000 liter och produkten produceras i en större mängd behövs flera IBC. Det uppstår en då väntan eftersom all produkt inte kan avlastas på en gång och färdig produkt väntar på att få tömmas. Vid bytet av IBC tar det 10 minuter för operatören att förflytta fylld IBC till sin lagringsplats, hämta en ny IBC och påbörja utpumpning på nytt. Under produktionsprocessen som tar 5,5 timmar uppkommer stor väntan för operatörerna. Operatörerna är under större delen av produktionen observatörer av processen som väntar på att kunna slutföra produktionsarbetet.

### 5.2.3 Kartläggning av nuvarande tillstånd, oljeblandning

För kartläggningen av oljeblandningsproduktionen beskrivs informations- och materialflödet nedan, och åskådliggörs i figur 26. För större format se bilaga 3. Informationsflödet består av kunder som beställer produkter med kort varsel via mail, vilket leder till att produktionen styrs helt av kundorder. Produktionsadministrationen beställer råvaror via mail från olika

leverantörer. Maskinoperatörerna får sin information främst muntligt men får en överskådlig bild av produktionsprocessen för dagen via datorer.

Materialflödet består av endast en process efter att samtliga råvaror har inhämtats och överförs till tanken. Råvarorna blandas och värms upp i en process som tar cirka 3 dygn. Den färdiga produkten inväntar sedan tankbilen, dit den pumpas då den ska transporteras till kund.



Figur 26. Värdeflödesanalys av nutida tillstånd för oljeblandningsproduktionen.

På samma sätt som för vaxemulsionsproduktionen har uppskattningar gjorts för de olika tidsbegreppen, främst med avseende på lagerhållningen då flera produkter använder sig av samma tillsatsmedel och processolja. Syftet med uppskattningarna är att tillhandahålla en värdeflödesanalys som är representativ för den aktuella oljeblandningen.

Värdeflödesanalysen har anpassats utefter informationen som Seelution AB kunde tillhandahålla, eftersom informationen erhöles i en del fall var baserad på produktion som tillverkar efter maxkapacitet, och en del fall var baserad på produktion mot specifika kundorder. För att värdeflödesanalysen skall spegla verkligheten i största möjliga utsträckning har uppskattningar gjorts baserat på den vanligast förekommande satsstorleken för oljeblandningen som är 13,5 ton. Stålltid analyseras inte alls eftersom processerna inte kräver några omställningar mellan de olika produkterna. Produktionen identifieras som ett dragande system eftersom planering och styrning av produktionen baseras på varje unik sats.

Den nutida kartan åskådliggjorde främst hur länge råvaror och slutprodukt befinner sig på lager, och hur stor del av genomloppstiden som är värdehöjande, vilket för oljeblandningar är



8,6%. Den största delen av genomloppstiden består alltså av lagerhållning som bedöms vara ett problemområde. Samma råvaror används i flera olika produkter och måste lagerhållas i en större mängd för att kunna förse behovet för samtliga slutprodukter. Materialflödet innefattar inga mellanlager mellan de olika processerna och bedöms därför vara effektivt.

#### 5.2.4 Identifiering av slöseri, oljeblandning

För oljeblandningsproduktionen identifierades flera olika slöserier. Dessa slöserier behöver sedan evalueras för att se i vilken omfattning de påverkar produktionen, samt hur de kan reduceras alternativt elimineras totalt.

*Överproduktion* - Produkten produceras mot kundorder, vilket innebär att den produceras i precis den mängd och vid den tidpunkt som den behövs. Det sker ingen produktion mot lager och därmed existerar inga slöserier kopplade till överproduktion.

*Överarbete* - Produkten har en homogen och återkommande kundkrets som specificerat vad de kräver av produkten. Seelution AB håller sig inom ramarna för detta och överarbetar således inte produkten.

*Rörelse* - På grund av fabriken layout och att produktionen är icke automatiserad samt icke standardiserad uppkommer onödiga rörelser. Operatörerna får manuellt tillsätta flera olika typer av tillsatsmedel vilket innebär dåliga ergonomiska förutsättningar. Operatörerna lyfter tunga säckar uppemot 30 kg från marknivå och över axelhöjd för att förflytta det till reaktorn där produkten tillsätts. För att nå reaktorns topp där tillsatsmedel tillsätts behöver operatörerna ta sig upp till en plattform vilket medför onödiga rörelser.

*Transporter* - Oljeblandningen förvaras i tanken fram till slutleverans till kund, då den pumpas direkt in i tankbil och därav sker inget slöseri av transporter.

*Lager* - Produkten produceras och lagerhålls i samma tank till avlastning sker. Detta medför att tanken inte kan komma till användning för andra produkter, eftersom den färdiga produkten lagerhålls fram till tankbilens ankomst.

*Produktion av defekta produkter* - Produkten produceras som en sats åt gången vilket reducerar risken för fel då det inte sker en massproduktion av produkten. Erfaren personal ser till att rätt produkt produceras på rätt sätt efter önskad formulering. Om misstag skulle ske finns det möjlighet att justera formuleringen under produktion ifall att produkten inte uppfyller önskad kvalitet och därför är det sällsynt att produkter kasseras. Eftersom produktionen inte är automatiserad kan det dock bli svårt för ny personal eller personer på upplärning att utföra sina arbetsuppgifter korrekt då utformningen av systemet kan inverka negativt och leda till felhantering.

*Väntan* - Processen för att blanda och värma oljeblandningen tar cirka 3 dagar på grund av lång uppvärmningstid. Detta gör att det tar lång tid för operatörerna att färdigställa en produkt, även om de kan utföra andra arbetsuppgifter där emellan. Det förhindrar även

användningen av tank 1 över en längre tid, som leder till att det uppstår väntan för produkter som kräver tank 1.

#### 5.2.5 Åtgärdsförslag baserade på VSM

Nulägesbeskrivningarna och analysen av slöseri visar att Seelution AB i dagsläget erfar problemområden i form av onödiga rörelser, väntan, onödiga transporter och långa cykel- och lagerhållningstider. För att kunna införa förbättringar inom de identifierade problemområdena har åtgärdsförslag utarbetats som utgår från de områden som kartläggningen visar är problematiska och där flest slöserier sker.

Garmer (2015) nämner att en förbättringsåtgärd som kan användas för att organisera arbetsutrymmet är 5S. En del utav 5S går ut på att se till att alla verktyg och material som används har fasta platser för att undvika att tid slösas på att leta efter verktyg och material. För att eliminera slöserierna med avseende på interna transporter rekommenderas att all lagerplats planeras för att utnyttjas som bäst. Råvaror som används frekvent bör placeras på bestämda lagerplatser närmast möjligt platsen där de används och där de är lättåtkomliga. Slutprodukt som är färdig för utleverans ska placeras på platser i fabriken för enkel hantering och transport. Även tomma och fyllda IBC-tankar bör sorteras och lagras på separata platser i fabriken för att underlätta de interna transporterna vid avlastning av färdig produkt till IBC-tankarna.

Slöserier identifierades även i form av onödiga rörelser. En del råvaror förvaras i tunga säckar i lagret där de hämtas manuellt. Enligt Jonsson och Mattsson (2011) kan ett automatiserat hanteringssystem vara effektivt för frekventa materialflöden. För att underlätta tunga lyft bör säckarna förvaras högre än markhöjd exempelvis på en hylla i lagret, eller lyftas med hjälpmedel som liftar eller truckar. Doseringen av de råvaror som används mest i produktionen kan underlättas genom automatisering, där en maskin doserar önskad mängd av diverse råvaror.

Värdeflödesanalyserna visar på långa cykeltider i en del av delprocesserna, främst vid uppvärmning av olja som uppgår till 3 dagar. För att undvika flaskhalsar bör det undersökas om processen går att effektivisera. Analyserna tydliggjorde även att av den totala genomloppstiden var en ytterst liten del värdehöjande tid, främst på grund av de långa lagerhållningstiderna. För att minska den totala genomloppstiden bör företaget minska lagringen av främst råvaror, och därmed frigöra utrymme för ett mer organiserat lager. För att minska lagringen kan inköp av råvaror planeras så att mindre leveranser sker mer frekvent.

Kartläggningen av informationsflödet visar att kundorder inkommer endast några dagar innan önskad leverans av produkt. För att planeringen av produktionen ska ske med mer framförhållning rekommenderas att kunderna införskaffar sensorer i sina tankar som läser av mängden produkt kontinuerligt, då dagens sensorer endast registrerar när slutprodukten nästan är helt förbrukad. Detta medför att Seelution AB endast har några dagar på sig att

tillverka önskad produkt vilket i sin tur leder till ineffektivitet i form av slöserier i form av långa lagerhållningstider av råvaror.

## 6 Diskussion

Syftet med detta arbete är att effektivisera energikonsumtionen för Seelution AB:s produktionsanläggning med termodynamiska beräkningar och industriella kartläggningsmetoder som underlag. Att effektivisera ett produktionssystem kan göras med avseende på många faktorer och arbetet behöver därför avgränsas. Projektets avgränsningar medförde en energikartläggning där analyser av energiförluster utfördes, samt en kartläggning av produktionens nuvarande material- och informationsflöden. Dessa kartläggningar resulterade i identifierade problemområden som analyserades för att få fram åtgärdsförslag. Nedan presenteras en diskussion av de metoder som har använts samt de resultat som har uppkommit.

### 6.1 Diskussion av metodanvändning

Metoderna som användes anpassades till Seelution AB:s produktion då vissa metoder såsom VSM vanligtvis används inom tillverkningsindustrin. Avgränsningar fick även göras för både energi- och processkartläggningen, där endast de grundläggande stegen utfördes för att skapa en grund till företaget som sedan kan användas till det fortsatta utvecklingsarbetet. I de fall då metodanvändningen har inneburit många antaganden är intrycket att detta har lett till mer approximativa resultat med större osäkerhet, medan metoder som är mer informativt strukturerade i regel betytt motsatsen.

#### 6.1.1 Litteraturstudier

Litteraturstudier utfördes genom i stort sett hela projektarbetet och låg till grund för de övriga metoderna. Det är en väl beprövad metod för att erhålla nya kunskaper inom respektive ämnesområde och en metod som visat sig ge goda resultat i tidigare projekt. En nackdel att ta hänsyn till är att det systematiska urvalet av ett fåtal artiklar inte alltid representerar helheten. Ju fler artiklar som väljs ut till granskning desto större sannolikhet är det att informationen stämmer överens med verkligheten, samtidigt som informationen blir mer omfattande utifrån de anpassningar som behöver göras och mängden input som krävs.

#### 6.1.2 Energikartläggning

Metoden som rekommenderas av Statens energimyndighet är informativ och strukturerad men också väldigt omfattande. Organisationer som använder metoden har fyra år på sig att göra en detaljerad analys för de betydande energianvändarna och forma åtgärdsförslag (Statens energimyndighet, 2016). Projektets omfattning krävde att metoden avgränsades till att endast innefatta grundläggande steg. Metoden utgår från att en stor del av siffrorna på energianvändningen redan finns framtagna i företaget och stort fokus läggs på att analysera energianvändningen och identifiera åtgärdsförslag. I verkligheten fanns inget färdigt underlag tillgängligt, varefter beräkningar behövde utföras för att kartlägga energianvändningen. Metoden gav bra riktlinjer för vilka olika steg som kartläggningen skulle innefatta men det saknades underlag för hur själva energikarteringen skulle genomföras beräkningsmässigt, och metoden behövde därför kompletteras med termodynamiska utföranden.

Energikartläggningen har förenklats avsevärt ur ett termodynamiskt perspektiv och täcker inte varje energikonsumerande aspekt av produktionen. De framräknade resultaten är korrekta utifrån de ekvationer och antaganden som valts att användas, men är bristfälliga i det avseende att de ger en förenklad bild av processerna och speglar inte den verkliga produktionens omfattning. Med det i åtanke skall det understrykas att alla antaganden och förenklningar som beslutats har gjorts i samråd med doktorander från institutionen för energiteknik på Chalmers och är välgrundade. Även valet av ekvationer har goda belägg för att användas, men hade gett ett säkrare resultat om de hade kombinerats med mer utförliga mätdata från Seelution AB.

### 6.1.3 VSM

VSM är en metod som enligt Rother & Shook (2001) “har varit på modet i många år i Sverige...” (förord). Det är alltså en metod som är beprövad och som Kesselringsmatrisen visade förmedlade den output som eftersöktes. Den presenterade arbetsgången användes men anpassningar och uppskattningar fick göras för att processtillverkningen skulle kunna analyseras med metodens upplägg.

VSM visade sig underlätta förståelsen för produktionssystemet då endast material- och informationsflöden illustrerades för att förstå hur värdeflödet rörde sig genom fabriken. Metoden används mestadels inom tillverkningsindustrin men Rother & Shook (2001) presenterar flera sätt att anpassa VSM till processindustrin som till exempel beräkning av takttid med avseende på satsstorlekar. För Seelution AB:s produktion användes dock inte takttiden då kundorder kan skilja sig markant från varandra och bedömdes därför inte ge en rättvis bild av produktionen. Analysen av produktionen som baserades på de slöserier som presenterades var användbar och belyste flera problemområden som sedan undersöktes. Vidare uppfattas VSM som en anpassningsbar metod då mängden output som genereras baseras på mängden input och VSM kan då utföras på olika nivåer med avseende på detaljer.

För att kunna utföra en kartläggning rekommenderar Rother & Shook (2001) att det finns en person som är ansvarig för utförandet, och som känner till de olika material- och informationsflödena. Detta nämns dock vara ovanligt hos de flesta företag, som fokuserar mer på att förbättra delprocesserna istället för att ta hänsyn till hela det värdeskapande flödet, och så var även fallet för Seelution AB. Vidare betonas att för att få en helhetssyn behöver samtliga produktvarianter kartläggas, vilket kan vara problematiskt om ett företag har många olika produktvarianter. Då VSM har sitt ursprung inom bilindustrin finns den vanligaste tillämpningen inom tillverkningsindustrin, där den mest förekommande formen av produktion är massproducering. Detta kräver anpassningar hos företag som tillverkar efter kundorder. Dessa anpassningar kan medföra att vissa funktioner inom VSM inte kan appliceras, men VSM bibehåller ändå sitt huvudsakliga syfte, vilket är att visualisera material- och informationsflöden.

## 6.2 Diskussion av resultat

I detta stycke diskuteras resultatet av kandidatarbetet. Detta avser det framräknade resultatet från energikartläggningen samt de mest centrala åtgärdsförslagen som genererats.

### 6.2.1 Energiberäkningar

Resultatet av energiberäkningarna är grunden till samtliga åtgärdsförslag presenterade i tabell 11 och har därför en stor inverkan på resultatet av kandidatarbetet. Därav råder osäkerheterna kring de värden som beräknades i energikartläggningen. Osäkerhet i resultatet grundar sig främst i energiförlusterna i rören och uppvärmningsfasen. Dessa värden som har beräknats är tämligen låga med tanke på att Seelution AB har uppmärksammat specifikt dessa två processer ihop med rörledningarna som energibovar, vilket inte anses reflekteras av resultatet. Energiåtgången, och därmed kostnaden för rörledningarna och uppvärmningen av produkt uppgår inte i en siffra som borde vara oroande eller stå ut för ett företag med en produktvarians om 24 stycken olika produkter.

### 6.2.2 Åtgärdsförslag

Att ta tillvara på den fuktiga ångan från våtskrubbern genom att mellanvärma den i ångpannan och skicka ut den till systemet är en beprövad idé som fungerar väl i praktiken. Dock finns inga termodynamiska beräkningar som stödjer tesen om att detta skulle effektivisera produktionen. Åtgärdsförslaget är baserat på information dels från litteraturstudier där det rekommenderas att använda våtskrubbernns ånga (Naturvårdsverket, 2015), och även från personalen i produktionen som menar att energin som skulle kunna utvinnas från skrubbern inte nyttjas ordentligt. Anledningen till detta är att när Seelution AB förvärvade produktionsanläggningen fanns våtskrubbern redan på plats och hade inte optimerats i syfte att leda fuktig ånga in i ångpannan. Att göra denna förändring är kategoriserad som en *förändring på systemnivå (större investering)* vilket reflekterar företagets situation där man är medveten om förbättringsområdet men inte tagit tag i arbetet då det är en omfattande förändring som kommer kräva både kapital, layoutförändringar för ångrören och eventuellt ny utrustning (Svanberg, 2020).

Likt våtskrubbern finns det andra komponenter i produktionssystemet vars energi är försummad. Utifrån beräkningarna är resultatet att den energi som går förlorad från värmeväxlaren skulle kunna driva hela uppvärmningen av vaxemulsionen. Detta är dock inte en sanning då hänsyn måste tas till att förluster uppstår mellan det kalla och varma mediet när dessa utbyter värmeenergi, samt att värmeenergi går förlorad när det uppvärmda vattnet leds in till ångsystemet. Det uppvärmda vattnet kommer aldrig anta en temperatur över 90°C och i och med att vattnet inte är trycksatt innebär detta att det inte finns någon ånga i mediet. Möjligheten finns då att leda in varmvattnet till ångpannan för att värma det till överhettad ånga för att sedan åter skickas ut i systemet. På så vis kommer man uppnå en energisnål uppvärmning och ta tillvara på energin som genereras från värmeväxlarna. Denna förändring är av typen *Förändringar på systemnivå (större investeringar)*, då rör måste dras för att leda om vattnet från värmeväxlaren och in till ångpannan. Detta är en omfattande process som

kräver anskaffning av utrustning och material, inhyrd kompetens och eventuell förändring i layout (Svensk ventilation, 2018).

För åtgärdsförslaget angående att byta ut oljan i produkten till en med fördelaktigare värmekapacitet, så är detta en process som måste utredas grundligt och innebär att företaget är tvungna att formulera om oljeblandningen. Detta är en process som kan vara både lång, dyr och eventuellt omöjlig. Men om den möjligheten inte utforskats än så är det en åtgärd värd att fundera över (Tryggö, 2020).

Systemets innefattande ledningar, armaturer och utrustning har också förbättringspotential. Att minska värmeförlusterna i de kanaler luften färdas är både ekonomiskt och miljömässigt fördelaktigt, då det sänker både energiförbrukningen och driftkostnaderna. Incitamenten att effektivisera rören är flera. Exempelvis hade en anpassad dimensionering av rören tillåtit ett ökat massflöde och därmed en ökad kapacitet att värma produkterna (Beiron, 2020).

Installation av ångfällor och termostatiska avluftare hade även dessa bidragit med ökad kapacitet då korrosion och luft avlägsnas (Armatec, 2012). Större förändringar av rören kräver dock underlag i form av investeringskalkyler för att få vetskap om vilka kostnader en uppgradering av ångledningarna skulle innebära. Förslag på underlag kan vara redogörande av hur stor omställning införandet av dessa komponenter hade inneburit för produktionsprocessen. Skulle åtgärdsförslagen innebära omfattande förändringar som begränsar produktionen på kort sikt kan det innebära att investeringen inte heller blir lönsam långsiktigt, inte minst för att leveransmöjligheterna till kund under omställningen kan minska.

De åtgärdsförslag som erhöles ur VSM bedöms alla som relevanta ur effektiviseringssynpunkt. Värdeflödesanalyserna för både oljeblandningen och vaxemulsionen indikerade att bland annat ledtiderna för processerna behövde effektiviseras. Rother & Shook (2001) argumenterar att:

Ju kortare som tillverkningens ledtid är, desto kortare är även den tid som förflyter mellan företagets betalning för råvaror och betalning från kunden för de produkter som tillverkats. En kortare ledtid i tillverkning kommer att förbättra värdet för lageromsättningen. (s. 26)

Vidare visade analysen att tiden för lagerhållningen behöver förbättras då den inverkar negativt på den värdehöjande tiden, där framförallt vaxemulsionsproduktionen visade på andelen värdehöjande tid endast låg på 0,58%. Dock visar inte VSM komplexiteten bakom hur olika produktfamiljer förhåller sig till varandra vilket medför att lagerhållningen inte är rättvist presenterad i nuläget, och det beräknade värdet kan betraktas som en form av avvikelse. Av denna anledning behövs en totalanalys av hela produktionssystemet utföras i form av kartläggning av det totala värdeflödet för alla produktfamiljer (Holweg et al. 2018). Oljeblandningsproduktionen erhöles ett bättre värde där andelen värdehöjande tid låg på 8,6%, vilket kan betraktas som något bättre än normala siffror, där Holweg et al. (2018) argumenterar att vanligtvis identifieras 95–99% av den totala ledtiden som slöseri.

Enligt Braglia, Frosolini och Zammori (2009) beaktas generellt inte variationen av den ingående data för processerna vid en värdeflödesanalys. Det bidrar till osäkerhet i resultaten eftersom variationer av data har en betydande inverkan på resultatet och således analysen av slöserierna. Vid analysen av Seelution AB:s produktionsflöde var den tillgängliga informationen för bland annat lagerhållningen av råvaror för specifika slutprodukter inte tillgänglig varefter antaganden baserade på lagerhållningen för samtliga råvaror gjordes. Det bidrar till att variationen för de specifika slutprodukterna inte har analyserats och resultaten av lagerhållningstiderna bör specificeras och analyseras mer noggrant innan de kan anses gälla.



## Slutsatser

Företag och organisationer har idag ett ökande behov av att minska sina utsläpp och effektivisera sin produktion. Projektarbetet avser att stödja detta behov genom att kombinera industriell erfarenhet och akademisk insikt. Projektet syftar till att undersöka hur produktionsprocessen för oljebaserade produkter och vaxemulsioner kan effektiviseras. Baserat på genomförda kartläggningar av energi och processer kan slutsatser dras om att en förändring av produktionslayouten, rutiner och arbetssätt samt uppdatering av utrustning är viktiga faktorer att beakta för att minska energiförlusterna och förbättra produktionsprocesserna. Resultatet indikerar att störst energiförluster uppkommer i samband med ångavgång till omgivningen, och att produktionens effektivitet kan förbättras bland annat genom en optimering av lagerhanteringen.

Seelution AB är ett växande företag som specialiserar sig på emulsionsteknik och hållbara förpackningsbarriärer. Projektet analyserar produktionen för en vaxemulsion och en oljeblandning som lämpligast representerar Seelution AB, och som ansågs vara de mest energikrävande processerna. För att kunna lokalisera problemområden med störst effektiviseringspotential användes olika kartläggningsmetoder som innefattade energi respektive processer.

För att kartlägga hur mycket energi som tillförs och används för att bedriva en verksamhet, används Statens energimyndighet (2016) steg-för-steg-metod. Energikartläggningen syftar till att ge förslag på hur energianvändningen kan minskas, där förslagen kan innebära investering i ny utrustning men också nya arbetssätt och rutiner i produktionen. Energikartläggningen visade att det finns en stor effektiviseringspotential i processerna genom att problemområden kunde identifieras och åtgärdsförslag tas fram, kartläggningen visar dock inte i vilken ordning åtgärdsförslagen ska prioriteras utan detta är något som bör undersökas vidare. Litteraturstudierna som genomfördes i samband med analysen av energikartläggningen identifierade vissa delar av processen som problemområden. Beräkningarna påvisade dock inte att alla identifierade områden var problematiska, vilket medför att verkligheten inte alltid stämmer överens med teori och en mer djupgående analys av åtgärdsförslagen blir nödvändig.

För att kartlägga processerna och deras värdehöjande flöden används VSM. Förutom att belysa en del problemområden visade värdeflödesanalyserna också på att det finns flera områden där produktionssystemet är väl genomtänkt och inte bidrar till de analyserade slöserierna, främst inom överproduktion, överarbete och produktion av defekta produkter. Eftersom Seelution AB producerar mot kundorder tillverkas inte mer än kunden beställt och således sker ingen överproduktion som benämns som det största slöseriet. VSM visade även att alla delprocesser var värdehöjande för båda produkterna, vilket innebär att produktionen inte innefattar några delprocesser som bearbetar produkten utan att tillföra ett mervärde till slutprodukten. Produktionsprocessen är utformad så att produkten kan bearbetas utifall att den inte uppnår önskad kvalitet och därför förekommer ingen produktion av defekta

produkter. Seelution AB:s produktion av oljeblandningar och vaxemulsioner är välfungerande med avseende på nuläget men behöver effektiviseras för att kunna hantera en ökad orderfrekvens.

Med den gjorda energikartläggningen som grund bör Seelution AB vidare analysera de framtagna åtgärdsförslagen. Åtgärdsförslagen bör prioriteras efter hur stor påverkan de har på den totala energianvändningen i relation till hur genomförbara de är. Effekten av hur en enskild åtgärd påverkar övriga system bör undersökas för att säkerställa att åtgärden leder till ett totalt sett energieffektivare system. För åtgärder som tillhör nivån *förändringar på systemnivå*, är det lämpligt att genomföra investeringskalkyler för att undersöka om åtgärderna är ekonomiskt lönsamma. Rekommendationen är att Seelution AB även ska slutföra värdeflödesanalysen genom uppförandet av den framtida kartan, som tillsammans med den nutida kartan resulterar i en handlingsplan.

När Seelution AB beslutar om vilka åtgärder som ska behandlas ska det finnas en plan på när i tiden dessa ska genomföras. Denna handlingsplan ska med konkreta värden hjälpa företaget att uppnå det framtida tillståndet, och åtgärda de problemområden som har lokaliserats genom att implementera åtgärdsförslagen. Handlingsplanen ska bestå av en karta över det framtida tillståndet, en eventuellt mer detaljerad processkarta eller fabrikslayout, samt en ettårig handlingsplan. Den ettåriga handlingsplanen ska bestå av detaljerade planer för vad som ska utföras, när det ska ske samt innehållet i varje arbetssteg. Planen ska även innehålla mätbara mål i form av nyckeltal, samt tydliga avstämningpunkter satta vid fastställda tider och med de ansvariga namngivna. Efter att åtgärderna har implementerats bör regelbunden uppföljning ske för att kontrollera att åtgärderna resulterar i förbättringar.

Projektet bidrar med att kvantifiera energiåtgången samt energiförlusterna för produktionsprocesserna hos Seelution AB. Det termodynamiska resultatet bidrar med ny kunskap, då energikonsumtionen, energiförlusterna och deras efterföljande kostnader tidigare varit okända.

Tillämpningen av VSM har visualiserat material- och informationsflödena i Seelution AB:s nuvarande tillstånd, samt lokaliserat de problemområden som finns med hjälp av identifiering av de sju olika slöserierna. Utifrån dessa områden togs åtgärdsförslag fram som därmed kompletterar energikartläggningen utifrån det produktionstekniska perspektivet. Områden som Seelution AB tidigare inte hade planer på att förbättra som exempelvis lagret visade sig vara i stort behov av effektivisering, främst med avseende på mängden råvaror i lagret och var alla produkter placeras. Även om värdeflödesanalyser mestadels används inom tillverkningsindustrin, gick det att anpassa metoden till kundstyrd produktion med hjälp av relevanta anpassningar och uppskattningar, vilket företaget kan använda sig av när de ska göra en framtida VSM-karta. Seelution AB hade sedan tidigare inte gjort liknande kartläggningar på fabriken, vilket innebar att underlag i syfte att genomföra förändringar saknades. Rapporten bidrar alltså med konkret material som kan användas för att motivera inledandet av en förändringsprocess.

## Källförteckning

Andersson, J., Behxhet, G., Karlsson, A. & Petersson, L. (2006). *Högtryckshomogenisering*. Institutionen för livsmedelsteknik, Lunds tekniska högskola.

Armatec. (2012). *Handbok: Ånga och kondensat*. Hämtad 2020-04-25 från:  
[https://www.armatec.com/globalassets/armatec-se/sidor/trycksaker/pdfer/handbok-anga-2012\\_rev\\_2019.pdf](https://www.armatec.com/globalassets/armatec-se/sidor/trycksaker/pdfer/handbok-anga-2012_rev_2019.pdf)

Beiron, J. Doktorand, Institutionen för energiteknik, Chalmers tekniska högskola. Personlig kommunikation den 3 maj 2020.

Bellgran, M., & Säfsten, K. (2005). *Produktionsutveckling: Utveckling och drift av produktionssystem*. Lund: Studentlitteratur.

Biermann, M., Normann, F., & Schmitz, M., (2019). *Formel- och tabellsamling: Termodynamik med Energiteknik*, Chalmers Tekniska Högskola.

Borgvall, A., & Rodestrand R. (2017). *Utvecklad value stream mapping för en varierande produktion mot kundorder: En fallstudie vid Karl Hedin Emballage AB*. Högskolan i Gävle, Gävle.

Braglia, M., Frosolini, M., & Zammori, F. (2009). *Uncertainty in value stream mapping analysis*. International Journal of Logistics: Research and Applications. volym. 12, 435–453.

Brunner P. H. & Rechberger H. (2004) *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. New York: Lewis Publishers.

Chartered Quality Institute. (2013). *Quality World: Tools of the trade - IDEF0*. Hämtad 2020-04-10 från:  
[http://www.syque.com/quality\\_tools/tools/Tools19.htm](http://www.syque.com/quality_tools/tools/Tools19.htm)

Chemiclean (2020). *Kylsystem*. Hämtad 2020-04-25 från:  
<https://www.chemiclean.se/kyla/>

Dewulf, J., De Meester, S., & Alvarenga, R. A. F. (2016). *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies*, (Volym 1). John Wiley & Sons.

Energimyndigheten. (2015). *Energianvändning och energitillförsel - Underlag till Energikommissionen*.  
[http://www.energicommissionen.se/app/uploads/2015/12/Underlagsrapport-till-Energikommissionen\\_anv%C3%A4ndning-och-tillf%C3%B6rsel\\_Energimyndigheten.pdf](http://www.energicommissionen.se/app/uploads/2015/12/Underlagsrapport-till-Energikommissionen_anv%C3%A4ndning-och-tillf%C3%B6rsel_Energimyndigheten.pdf)

EPA. (2019). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. Hämtad 2020-04-05 från: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>

Faulkner, W., & Badurdeen, F., (2014). *Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance*. Hämtad 2020-04-25 från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614005113>

Garmer, K. (2015), *Effektivare med 5S-metoden* (2:1). Hämtad 2020-05-06 från: <https://www.prevent.se/globalassets/documents/prevent.se/arbetsmiljoarbete/verksamhetsutveckling/5s/effektivare-med-5s-metoden.pdf>

Hollman, S., Klimmer, F., Schmidt, K. & Kylian, H. (1999). Validation of a questionnaire of assessing physical work load. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* 25(2), 105-114.

Holweg, M., Davies, J., De Meyer, A., Lawson, B., & W. Schmenner, R. (2018). *Process Theory: The Principles of Operations Management*. Hämtad 2020-04-05 från: <http://web.a.ebscohost.com.proxy.lib.chalmers.se/ehost/ebookviewer/ebook?sid=4e41ef33-7d18-425c-aeb7-5b4843c14360%40sessionmgr4008&vid=0&format=EB>

Johansson, D., Hamid Akram A., & Bagge, H. (2018). *Metod för optimal rengöring av värmeväxlare*. Hämtad 2020-04-05 från: <https://ichb.se/innehall/fordjupning/sa-ofta-bor-smutsiga-varmevaxlare-rengoras/>

Jonsson, P., & Mattsson S-A., (2011). *Logistik: Läran om effektiva materialflöden*. Lund: Studentlitteratur.

Kungliga tekniska högskolan. (2013). *Interpolation och polynomanpassning*. Hämtad 2020-05-13 från: [https://www.math.kth.se/na/SF1514/nums13/lecture\\_material/interpolation.pdf](https://www.math.kth.se/na/SF1514/nums13/lecture_material/interpolation.pdf)

Kurita (2020). *Flexibla behandlingsprogram och tjänster för ånggeneratorer och värmesystem*. Hämtad 2020-04-05 från: <https://www.kurita.eu/se/boiler-water-heating-systems>

Lindér, J. (2015). *Scientific Management, den svenska modellen och Lean Production - en kritisk granskning*, Chalmers tekniska högskola.

NASA. (2015). *Enthalpy*. Hämtad 2020-05-12 från: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/enthalpy.html>

Naturvårdsverket. (2015). *Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökgaskondensering*. Hämtad 2020-03-02 från:  
<https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8196-9.pdf>

Nave, R., (2010). *Specific Heat*. Hämtad 2020-05-13 från: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/spht.html>

NIST. (2020). *Naphthalene*. Hämtad 2020-04-15 från:  
<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=naphthalene&Units=SI>

Roth, M., & Shook, J. (2001). *Lära sig att se: Att kartlägga och förbättra värdeflöden för att skapa mervärden och eliminera slöseri*. Göteborg: Lean Enterprise Sweden.

Statens energimyndighet. (2016). *Vägledning för energikartläggning i tillverkande industri*. ISSN 1403-1892

Statens energimyndighet. (2018). *Vad är en energikartläggning?*  
<http://www.energimyndigheten.se/nrp/stod-for-energikartlaggning-i-sma-och-medelstora-foretag/vad-ar-en-energikartlaggning/>

Svanberg, K. Production engineer, Seelution AB. Personlig kommunikation den 5 maj 2020.

Svensk ventilation. (2018). *Olika typer av värmeväxlare*. Hämtad från 2020-03-05:  
<http://www.svenskventilation.se/ventilation/varmevaxlare/>

Technische Universität Wien. (2012). *Building a MFA Model*. Hämtad 2020-04-05 från:  
<http://www.stan2web.net/support/mfa-basics/building-a-mfa-model>

Thermtest. (2017). *Rule of Mixtures Calculator*. Hämtad 2020-04-22 från:  
<https://thermtest.com/rule-of-mixtures-calculator>

Tryggö, D. Business development manager, Seelution AB. Personlig kommunikation den 5 maj 2020.

University of Kiel. (2020). *Enthalpy and heat capacity at constant pressure*. Hämtad 2020-05-12 från: [https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/td\\_kin\\_i/kap\\_1/backbone/r\\_se20.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/td_kin_i/kap_1/backbone/r_se20.html)

Wikipedia. (2020). *Enthalpy of fusion*. Hämtad 2020-05-13 från:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy\\_of\\_fusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy_of_fusion)

Wikipedia. (2013). *Paraffin Wax*. Hämtad 2020-04-17 från:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin\\_wax](https://en.wikipedia.org/wiki/Paraffin_wax)

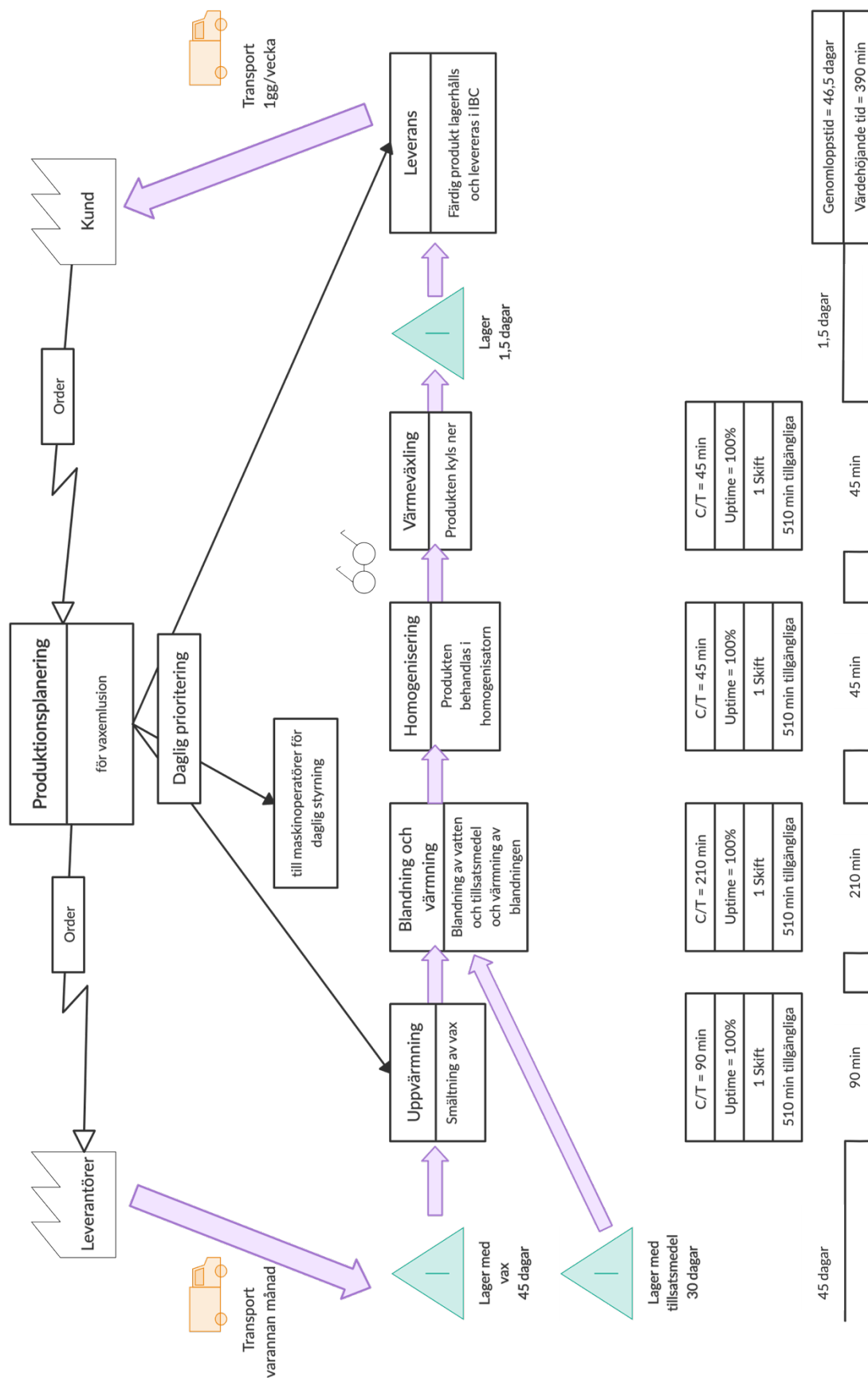
# Bilagor

## Bilaga 1 – Sökhistorik vid litteraturstudier

| Sökord                                   | Databas          | Antal träffar       | Antal granskade källor | Urval 1 | Urval 2 |
|------------------------------------------|------------------|---------------------|------------------------|---------|---------|
| Effektivisera scrubber                   | Google           | 3 340               | 8                      | 3       | 1       |
| Effektivisera värmeväxlare               | Google           | 30 700              | 10                     | 4       | 1       |
| Energianvändning i industrin             | Google           | 270 000             | 7                      | 3       | 1       |
| Energieffektivisering/ Energy efficiency | Google Scholar   | 6 700/<br>5 450 000 | 28/<br>17              | 8/<br>2 | 2/<br>0 |
|                                          | Chalmers Library | 166/<br>3 938 063   | 10/<br>7               | 2/<br>2 | 1/<br>0 |
| Energieffektivisering processindustri    | Google Scholar   | 246                 | 16                     | 8       | 1       |
| Energikartläggning/ Energy mapping       | Google Scholar   | 651/<br>3 940 000   | 24/<br>6               | 8/<br>2 | 3/<br>0 |
|                                          | Chalmers Library | 15/<br>902 052      | 15/<br>18              | 2/<br>1 | 0       |
| Energikartläggning processindustri       | Google Scholar   | 44                  | 20                     | 4       | 1       |
| Enthalpy                                 | Google           | 9 030 000           | 7                      | 1       | 3       |
| Homogenisator                            | Chalmers Library | 358                 | 2                      | 2       | 1       |
| IDEF0                                    | Google Scholar   | 22 900              | 20                     | 6       | 1       |
|                                          | Chalmers Library | 2 875               | 18                     | 3       | 0       |
| Linjär interpolation                     | Google           | 16 300              | 3                      | 1       | 1       |
| Material and energy flow accounting      | Google Scholar   | 1 450 000           | 22                     | 7       | 3       |
|                                          | Chalmers Library | 340 880             | 18                     | 2       | 0       |
| Scrubber                                 | Chalmers Library | 17                  | 4                      | 3       | 1       |

| Sökord                                     | Databas          | Antal träffar     | Antal granskade källor | Urval 1 | Urval 2 |
|--------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------------|---------|---------|
| Specific heat capacity                     | Google           | 385 000 000       | 10                     | 5       | 2       |
| Sustainable Value Stream Mapping           | Google Scholar   | 317 000           | 21                     | 6       | 1       |
|                                            | Chalmers Library | 75 865            | 19                     | 3       | 0       |
| Termostatisk avluftare                     | Google           | 322 000           | 5                      | 3       | 1       |
| Värdeflödesanalys/<br>Value Stream Mapping | Google Scholar   | 765/<br>2 540 000 | 29                     | 13      | 2       |
|                                            | Chalmers Library | 17/<br>312 905    | 9                      | 3       | 2       |
| Värdeflödesanalys processindustri          | Google Scholar   | 44                | 18                     | 7       | 1       |
| Värmeväxlare                               | Chalmers Library | 83                | 4                      | 2       | 1       |
|                                            | Google           | 1 400 000         | 3                      | 2       | 1       |
| Ångfälla                                   | Google           | 3 800             | 5                      | 3       | 1       |

## Bilaga 2 – VSM vaxemulsioner





## Bilaga 3 – VSM oljeblandningar

