

SLUTRAPPORT

Digitala tvillingar för hållbara återvinnings- anläggningar

Förstudie

Mats G. Larson, ReSpace

Anders Logg, ReSpace

Nils Ólafur Egilsson, Chalmers Industriteknik

Linnea Lindkvist, Chalmers Industriteknik

Audinisa Fadhila, Ragn-Sells

**RE:
SOURCE**

resource-sip.se

Slutrapport för projekt:

Digitala tvillingar för hållbara återvinningsanläggningar

Engelsk titel: Digital twins for sustainable recycling plants – feasibility study

Projektperiod: 2022 08 22 – 2023 04 30

Datum: 2023 06 26

Diarienummer: P2022-0269

Projektledare: Mats G. Larson

Organisation: ReSpace AB

Adress: Storgatan 14, 456 51 Smögen

Övriga projektdeltagare: Anders Logg, Nils Ólafur Egilsson, Linnea Lindkvist och Audinisa Fadhila

Nyckelord: Digitala tvillingar, Black Soldier Flies, återvinning, datainsamling, hållbart foder

RE:Source är ett strategiskt innovationsprogram och finansieras av

VINNOVA

 Energimyndigheten

FORMAS 

Förord

Projektet är en förstudie finansierat inom Energimyndighetens program Re:Source. Projektets partner är ReSpace AB, Chalmers Industriteknik samt Ragn-Sells. ReSpace är ett teknikbolag med fokus på digitala tvillingar. Chalmers Industriteknik är en stiftelse som bedriver forskning och utveckling i gränslandet mellan akademi och industri och som särskilt bidragit med kompetens inom cirkularitet. Ragn-Sells är en ledande aktör inom återvinning.

Projektet har en total budget om 100 7742 kr varav 500 000 kr är bidrag från Energimyndigheten, 107 742 kr är medfinansiering från ReSpace och 150 000 kr är medfinansiering från Ragn-Sells. Projektet har genomförts i nära samarbete med Ragn-Sells och är huvudsakligen baserat på noggranna studier av möjligheten att använda digital tvillingteknologi vid två olika anläggningar, varav en är en traditionell återvinningsanläggning för organiskt avfall och en är en testanläggning för återvinning av organiskt avfall med hjälp av fluglarver.

Innehåll

1	Sammanfattning.....	7
2	Summary.....	9
3	Inledning och bakgrund.....	11
4	Genomförande.....	13
4.1	Projektledning (AP1).....	13
4.2	Kartläggning av processer och datainsamling (AP2).....	14
4.2.1	BSF-pilotanläggningen i Orsa, Sverige.....	15
4.2.2	Anläggning för behandling av matavfall i Heden, Danmark.....	15
4.3	Utveckling av koceptmodell för digital tvilling (AP3).....	16
4.4	Genomförbarhetsanalys (AP4).....	16
4.5	Handlingsplan för implementering och expansion (AP5).....	17
5	Resultat och diskussion.....	18
5.1	Projektledning (AP1).....	18
5.2	Kartläggning av processer och datainsamling (AP 2).....	19
5.2.1	Fallstudie 1: BSF-pilotanläggningen i Orsa, Sverige (BSF Pilot).....	19
5.2.1.1	Livsmedelsindustrin/leverantör.....	21
5.2.1.2	BSF anläggningen i Orsa.....	21
5.2.1.3	Djurfoderproduktion.....	23
5.2.1.4	Fiskodlare.....	23
5.2.1.5	Regleringsaspekter (över hela värdekedjan).....	23
5.2.2	Fallstudie 2 Anläggning för behandling av matavfall i Heden, Danmark (Anläggning Heden).....	23
5.2.2.1	Inflöden.....	24
5.2.2.2	Processen.....	24
5.2.2.3	Utflöden.....	25
5.2.2.4	Verksamhetsnivå.....	25
5.2.2.5	Externa krav.....	25
5.3	Utveckling av konceptmodell för digital tvilling (AP 3).....	25
5.3.1	Black Soldier Fly (BSF) pilotanläggningen i Orsa, Sverige.....	26

5.3.2	Anläggningen för behandling av matavfall i Heden, Danmark.....	28
5.3.3	Datatyper och lämpliga format för lagring.....	30
5.3.4	Datatillgång nu och i framtiden.....	30
5.3.5	Sensorer	31
5.4	Genomförbarhetsanalys (AP 4).....	32
5.4.1	Risikanalys.....	33
5.4.1.1	Utveckling av Tvillingen	34
5.4.1.2	Användning av tvillingen.....	35
5.5	Handlingsplan för implementering och expansion (AP 5)	35
6	Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg	38
6.1	Generella slutsatser	38
6.2	Anläggningen i Heden	39
6.3	Anläggningen i Orsa.....	40
6.4	Nästa steg	40
7	Projektkommunikation	41
8	Referenser	42
9	Bilagor.....	44
9.1	Appendix A: Mock-ups för BSF-pilotanläggningen i Orsa	44
9.1.1	Login mock-up.....	44
9.1.2	Dashboard mock-up.....	45
9.1.3	Waste mock-up.....	46
9.1.4	Recipes mock-up.....	47
9.1.5	Planner mock-up (1).....	48
9.1.6	Planner mock-up (2).....	49
9.1.7	Calendar planner mock-up.....	50
9.1.8	Charts mock-up (1).....	51
9.1.9	Charts mock-up (2).....	52
9.1.10	Charts mock-up (3).....	53
9.1.11	Charts mock-up (4).....	54
9.1.12	Charts mock-up (5).....	55

9.2	Appendix B: Mockups för anläggningen av organiskt avfall i Heden, Danmark...	56
9.2.1	Dashboard mock-up	56
9.2.2	Charts mock-up (1).....	57
9.2.3	Charts mock-up (2).....	58
9.2.4	Charts mock-up (3).....	59
9.3	Appendix C. Kravspecifikation på en generell digital tvilling.....	60
9.3.1	Inledning	60
9.3.2	Syfte och mål	60
9.3.3	Funktionella krav	60
9.3.4	Icke-funktionella krav	61
9.3.5	Dokumentation och support	61
9.4	Appendix D. Datapunkter för insamling i BSF pilotanläggning i Orsa, Sverige. Ej för spridning	62
9.4.1	Livsmedelsindustrin/leverantör	62
9.4.2	BSF anläggningen i Orsa.....	62
9.4.3	Djurfoderproduktion	66
9.4.4	Fiskodlare	66
	Regleringsaspekter (över hela värdekedjan)	66

1 Sammanfattning

Det finns stora möjligheter att implementera digitala tvillingar i avfallshanteringsbranschen. Digitala tvillingar kan hjälpa operatörer att optimera processer i sina anläggningar genom att kombinera datainsamling, modellering och simulering. För att detta ska vara möjligt krävs att den digitala tvillingen har tillgång till realtidsdata om processen och har tränats upp med hjälp av historiska data för att kunna förstå och lära från tidigare erfarenheter.

I hanteringen av organiskt avfall med Black Soldier Fly-larver i BSF-pilotanläggningen i Orsa, Sverige, är en av de stora fördelarna simulering av larvernas tillväxt. Simulering av hur larvernas tillväxt påverkas av processens villkor, såsom temperatur och fukt, kan förkorta utvecklingstiden. Simuleringar kan även bidra till att optimera blandningen av inkommande foderblandningar. Ett forskningsinstitut i Tyskland har utvecklat en metod för att simulera hur olika blandningar av cement kan påverka betongens egenskaper. En liknande metod skulle kunna tillämpas för simulering av foderblandningar och larvernas tillväxt.

I matavfallsanläggningen i Heden, Danmark är det vara svårare att implementera simuleringar i samma omfattning som i BSF-pilotanläggningen, eftersom anläggningen är en mer basal process vars drift till stor del beror på personalens manuella sortering av avfall. Det är även svårt att få tillräckligt bra information om inkommande material. De största fördelarna med att skapa en digital tvilling av anläggningen i Heden är att kunna förstå den dagliga driften bättre och genomföra förutsägbart underhåll av maskiner för att minska oväntade driftstopp. Automatiserad datainsamling kan också användas för att jämföra olika anläggningar samt för att studera hur produktiviteten förändras över tid.

Under projektets gång genomfördes två studiebesök som bidrog till att ge deltagarna kunskap om anläggningarna. Studiebesöken bidrog till att ge en klarare bild av processerna och vilka potentiella utmaningar som kunde uppstå vid utveckling, implementering och användning av de digitala tvillingarna. En grundläggande litteraturstudie utfördes för att kartlägga hur digitala tvillingar används i avfallshantering i dagsläget. Detta för att skapa en bild av de lösningar som redan finns och vad som behöver utvecklas vidare. Litteraturstudien bidrog även till riskanalysen som utfördes med hjälp av resultat och kunskap som samlades in inom gruppen under projektets gång. Experter inom Ragn-Sells och andra relevanta aktörer intervjuades för att förstå hur en digital tvilling kan bidra till utvecklingen av avfallshanteringsbranschen i ett bredare perspektiv och hur den kan bidra till att öka cirkuläriteten av avfall.

För att kunderna ska förstå vad de digitala tvillingarna kan bidra med skapades mockups av anläggningarna med information om processerna. Dessa mockups skapades i samarbete med anläggningsansvariga för BSF-piloten och anläggningen i Heden med hjälp av förutbestämda frågeformulär.

Slutligen genomfördes en workshop med projektkonsortiet och utvalda personer hos Ragn-Sells för att dela information och resultat som skapats under projektets gång och för att diskutera hur digitala tvillingar kan bidra generellt i avfallshantering. Vid detta tillfälle delade Ragn-Sells med sig av sina erfarenheter av att använda digitala tvillingar i sin verksamhet.

Nästa steg i projektet är att börja samla in den data som har identifierats som nödvändig för att skapa en digital tvilling i respektive anläggning. Detta görs med hjälp av sensorteknik som har identifierats som lämplig för insamling av viktiga data och som tål den krävande miljön i avfallshanteringsprocessen. Det viktigaste steget är att skapa mjukvaran som ligger bakom den digitala tvillingen och som möjliggör simuleringar för att optimera processen.

Projektets syfte var att undersöka förutsättningarna för ett större projekt för att utveckla en digital tvilling för avfallshantering och att identifiera potentiella fördelar med att utveckla digitala tvillingar inom avfallsanläggningsbranschen. Eftersom avfallshantering är en bransch som för närvarande är relativt underutvecklad när det gäller digitalisering var det också en del av projektet att försöka ta fram en generell process för att skapa digitala tvillingar inom avfallshantering.

2 Summary

Implementing digital twins in the waste management industry presents significant opportunities. These digital replicas can aid operators in optimizing processes within their facilities through comprehensive models and sophisticated simulations. However, for this to be feasible, the digital twin must have access to real-time process data. It must also have been trained using historical data to learn from past experiences.

Consider the case of organic waste handling with Black Soldier Fly larvae in the BSF pilot plant in Orsa, Sweden. A key advantage here is the simulation of larvae growth. By simulating how process conditions like temperature and moisture affect larvae growth, the developmental timeline could be shortened. These simulations can also assist in optimizing the mixing of incoming material streams. Drawing on techniques developed by a German research institute, which simulates how different cement mixtures impact concrete properties, similar methods could be applied to the simulation of feed mixtures and larval growth.

At the food waste treatment plant in Heden, Denmark, simulation is not as straightforward as it is in the BSF pilot due to the facility's relatively simple process that requires highly manual labor. Additionally, it's challenging to obtain sufficiently detailed information about incoming material. Here, the primary advantages of creating a digital twin include better comprehension of daily operations and predictive machinery maintenance to minimize unexpected downtime.

Throughout the project, two study visits were organized, providing participants with insights about the facilities. These visits clarified the processes and potential challenges in developing, implementing, and utilizing a digital twin. A literature review was also conducted to understand current usage of digital twins in waste management, helping to chart the field's existing knowledge. This effort painted a picture of present solutions and areas needing further development. The literature also aided in a risk analysis undertaken during the project. To augment these findings, knowledge obtained during the project was incorporated, and experts from Ragn-Sells and other relevant stakeholders were interviewed. This process helped understand how digital twins could drive the waste management industry's evolution and boost waste circularity. Mockups of the plants, complete with process information, were developed in collaboration with the facility managers for the BSF pilot and the Heden facility, using predetermined questionnaires to understand how digital twins enhance plant efficiency. The project concluded with a workshop with the project consortium and selected Ragn-Sells members to share project insights and discuss the general benefits of digital twins in waste management.

The project's next phase involves gathering the identified necessary data to create a digital twin for each facility. Suitable sensor technology, capable of collecting essential data and withstanding the rigorous waste management environment, will be utilized. The primary focus will be to develop the software underpinning the digital twin, enabling simulations for process optimization.

The project's overall aim was to examine the prerequisites for a larger project developing digital twins for waste management and identify potential benefits in the waste facility industry. As the waste management industry is currently somewhat undeveloped in terms of digitization, part of the project's objective was also to outline a generic process for creating digital twins in waste management.

3 Inledning och bakgrund

Återvinningsanläggningar måste alltmer uppfylla samma krav som industriell tillverkning. I fallet med återvinningsanläggningar innebär detta att de förväntas leverera högre återvinningsgrader och kvalitet samt uppfylla ökade krav på spårbarhet och rapportering. Utmaningen är att råvaran i återvinningsprocessen inte är homogen, vilket gör att tekniska lösningar inte alltid kan replikeras. Digitalisering spelar en avgörande roll i övergången till en mer cirkulär ekonomi genom att samla kunskap om processerna. Digitaliseringen behöver implementeras på flera nivåer samtidigt - inom enskilda processer, hela anläggningar och i hela värdekedjan - för att kunna nå sin fulla potential.

I den pågående digitala omställningen av samhället, har begreppet "digitala tvillingar" blivit en central komponent [Rasheed et al. 2020]. En "digital tvilling" är en interaktiv, digital representation eller modell av ett verkligt system, utformat för att samla in och göra alla relevanta data som beskriver det fysiska systemet tillgängliga i realtid

Det finns i huvudsak fyra användningsområden för en digital tvilling:

Analys: Detta innebär att beskriva systemets egenskaper just nu, vilket ger en detaljerad bild av systemets nuvarande tillstånd och prestanda.

Prediktion: Genom att använda matematisk modellering eller maskininlärning kan digitala tvillingar ge insikter om hur ett system kan tänkas uppföra sig under olika betingelser. Detta möjliggör optimering av systemet och förbättring av dess prestanda.

Spårbarhet: Genom att kontinuerligt samla data om hur en ingående kvantitet propagerar i ett system kan en slutprodukt spåras tillbaka till sina ursprungskvantiteter. Vidare kan de olika processtegen kartläggas vilket lägger grunden för bevisbart hållbara och etiska processer.

Kommunikation: Digitala tvillingar är viktiga för att kunna förmedla nyttan och effekten av ett system till kunder, myndigheter och det omgivande samhället. De ger en tydlig och lättförståelig bild av hur systemet fungerar och vilka fördelar det medför.

Begreppet digitala tvillingar härstammar ursprungligen från tillverkningsindustrin, där det diskuterades redan 2002 enligt vetenskaplig litteratur [Grieves och Vickers 2017]. Från sin blygsamma start inom industriell tillverkning har det sedan dess expanderat till att omfatta en rad olika sektorer och industriella discipliner. I dagens digitala tidsålder har "digitala tvillingar" blivit en central del av digitaliseringsprocessen inom allt fler industrier. De används för att simulera och förstå alltmer komplexa processer. Användningsområdena är många och varierade. Till exempel används de nu för att modellera och förstå komplexa system på en skala som sträcker sig upp till hela städer

[Ketzler 2020]. Dessa "stadstvillingar" gör det möjligt att analysera och förutsäga stadens infrastruktur och system på en helt ny nivå, vilket bidrar till en effektivare och mer hållbar stadsplanering och förvaltning.

Inom avfallshantering kan digitala tvillingar vara ett värdefullt verktyg för att digitalisera, analysera och optimera resursutnyttjande. Genom att använda digitala tvillingar kan vi spåra och säkerställa att resurser används på bästa sätt för att maximera nyttan av avfallet. Detta gynnar både miljön och ekonomin. Tillgång till korrekt information är avgörande för att kunna implementera cirkulära processer [Preut et al. 2021]. En specifik utmaning är hanteringen av värdekedjor med flera aktörer, där informationsutbytet ofta brister [Bleiholder och Schmid 2018]. Genom att skapa en digital representation av essentiella delar av en cirkulär process kan en digital tvilling användas som grund för analys och optimering av processen. Den digitala tvillingen kan också ligga till grund för lagstadgad rapportering till berörda myndigheter, vilket är särskilt viktigt när regelverk, investeringar och andra incitament används för att främja övergången till hållbara och cirkulära processer [Wang och Wang 2019]. Den digitala tvillingen blir då ett kraftfullt verktyg för att optimera den cirkulära processen, minska kostnader, öka intäkterna samt uppfylla rapporteringskrav.

Digitala tvillingar har potential att bli en viktig del inom cirkulär ekonomi, särskilt inom området avfallshantering [Botín-Sanabria et al. 2022]. Även om det ännu inte finns mycket vetenskaplig litteratur specifikt riktad till de typer av avfallsanläggningar vi har undersökt i detta projekt, finns det gott om exempel från andra studier som visar hur digitala tvillingar kan bidra till att förbättra avfallshantering i urban miljö. I en studie av Cohen et. al (2021) undersöktes hur datamodeller kan användas för att samordna och integrera information om avfallshantering i städer. Genom att använda en digital tvilling kan forskare och beslutsfattare få en mer detaljerad förståelse för avfallshanteringsprocessen. Detta kan hjälpa till att identifiera områden för förbättringar och optimering.

Potentialen för digitala tvillingar att bidra till cirkulär ekonomi, till exempel inom återtillverkning/återvinning inom byggbranschen eller elektroniksektorn, har identifierats som betydande i forskningslitteraturen [Wang och Wang 2019, Chen och Huang 2020]. Just nu utvecklas och utvärderas digitala tvillingar exempelvis för avloppsreningsverk i ett projekt som leds av Lunds Tekniska Högskola, och finansieras av Smart Built Environment [Arnell] där förväntningarna inkluderar ökad resursåtervinning och minskade driftskostnader.

När det gäller digitala tvillingar för återvinningsanläggningar känner vi bara till ett sådant exempel i Sverige, nämligen den digitala tvillingen som ReSpace har utvecklat för den Marina återvinningscentralen i Sotenäs. Den digitala tvillingen ger en tydlig bild av flöden och hantering i återvinningscentralen och bidrar även till ökad spårbarhet, vilket är viktigt för aktörer som utnyttjar återvunna flöden. Denna lösning är dock bara ett första steg mot en mer komplett plattform, som också omfattar automatisk inläsning av data från

processen samt mer generell hantering av aktörer och transaktioner. Den Marina återvinningscentralen bedrivs dock, i jämförelse med de flesta andra återvinningsanläggningar, i begränsad skala och med en stor andel manuellt arbete. Vi genomför denna studie för att undersöka tillämpbarheten och nyttan med digitala tvillingar för större, etablerade anläggningar som bedrivs med höga krav på effektivitet och affärsmässighet.

4 Genomförande

4.1 Projektledning (API)

Syftet med ledningen av projektet är att nå projektmålen från ansökan på ett effektivt sätt inom given tidsram och budget. Under projektet har projektledningens delats upp i följande huvudsakliga uppgifter:

Koordinering:

- Definiera projektets mål, omfattning och tidsramar.
- Skapa en projektplan med tydliga uppgifter, ansvar och tidsfrister för varje aktivitet.
- Tilldela resurser till aktiviteterna.
- Organisera regelbundna möten med projektteamet för att övervaka framsteg, lösa problem och samordna aktiviteter.

Sammanställning av resultat:

- Definiera de önskade resultat som ska uppnås inom projektet.
- Sätt upp mätbara mål för att utvärdera projektets framsteg.
- Följ upp och utvärdera projektets framsteg mot de uppsatta målen.
- Samla in data och information från projektteamet och andra relevanta källor för att utvärdera resultat och framsteg.
- Analysera och tolka resultaten för att dra slutsatser och fatta informerade beslut.

Rapportering:

- Skapa regelbundna delrapporter som innehåller information om projektets status, framsteg och eventuella avvikelser från planen.
- Dela rapporterna med intressenter, inklusive ledningsgruppen och andra relevanta aktörer.
- Förbered och presentera en sammanfattning av projektets status och framsteg vid ledningsmöten.

- Sammanfatta projektresultat i en slutrapport.

Kommunikation och kontakt med relevanta aktörer:

- Identifiera de viktigaste intressenterna för projektet, inklusive interna och externa parter.
- Håll regelbunden kontakt med intressenter för att informera om projektets framsteg, hantera förväntningar och lösa eventuella frågor eller problem.
- Använd olika kommunikationskanaler, som möten, e-post och rapporter, för att nå ut till intressenterna.

Presentation av projektresultat:

- Förbered en tydlig och engagerande presentation av projektresultaten för ReSource resultatdagar och Ragn-Sells framtidsdag.
- Skapa visuellt material, som presentationsslides eller affischer, för att illustrera projektets framsteg och resultat.

4.2 Kartläggning av processer och datainsamling (AP2)

Syftet med AP2 är att undersöka två anläggningar som Ragn-Sells driver för hantering av biologiskt avfall, den ena är i kommersiell drift med ett väl utvecklat system och den andra är en pilotanläggning, där processen är fortfarande under utveckling. Den kommersiella anläggningen finns på Fyn, Danmark, nära Odense, där biologiskt avfall behandlas för att tillverka pulp för biogasproduktion. Den andra är en Black Soldier Flies (BSF) pilotanläggning som Ragn-Sells driver i Orsa, där forskar Ragn-Sells på möjligheterna att uppgradera biologiska restströmmar genom omvandling av restströmmen till ett hållbart producerat insektsprotein. Anläggningarna ska kartläggas med hänsyn till hur processerna ser ut i respektive anläggning, vad för slags material leveras till anläggningarna, vilka källorna är, hur logistik och transport av materialet ser ut, vilka styrsystem är tillgängliga i anläggningarna och vad det är för produkt som tillverkas i anläggningarna. Kartläggningen omfattar även vilken data som i dagsläget finns tillgänglig, var i processen datan är tillgänglig, eller kan tillgängliggöras, och möjligheter till automatiserad insamling av data. Analysen omfattar också behovet av nya data, som i dagsläget inte samlas in, vilken behövs för att kunna utveckla en digital tvilling och möjliggöra effektiv dataanalys. De två anläggningar som inkluderas i studien beskrivs kort här nedan.

För att skapa en god överblick över processerna i respektive anläggning utvecklades ett frågeformulär, vilket inkluderade frågor om behandlingsprocesserna, tillgängliga data och behov av ytterligare data. I syfte att fånga fler perspektiv om behov av data över

anläggningen ställdes även frågor om nyckeltal som följs upp inom koncernen. Samma frågeformulär användes i båda fallstudierna. Frågeformuläret besvarades av ansvarig för respektive anläggning och efter att svaren analyserats följde en diskussion om hur tillgängliga data i dagsläget samlades in och användes. I samband med diskussionen ordnades studiebesök på anläggningarna för att öka förståelsen i gruppen om förutsättningarna för respektive avfallsbehandlingsprocess. För BSF-piloten utfördes studiebesöket virtuellt och för anläggningen i Heden var studiebesöket ett fysiskt platsbesök. Till slut utfördes en analys av och diskussion om data som i dagsläget inte är tillgänglig, antingen på grund av att den inte samlas in eller på grund av att mätmetoder och/eller sensorer saknas. Syftet med diskussionen var att förstå vilken kompletterande data som skulle kunna öka kunskapen om anläggningens och behandlingsprocessens prestanda och möjligheter till optimering.

En kravspecifikation för mockupsen beskrivs i Appendix C. Mockupsen för den digitala tvillingen försöker svara på två olika typer av krav, funktionella och icke funktionella. De funktionella kraven är datamodellering och simulering, datainsamling och analys, prediktiv analys, interaktivitet och integration. De icke funktionella kraven är säkerhet, prestanda, skalbarhet och tillförlitlighet.

4.2.1 BSF-pilotanläggningen i Orsa, Sverige

Lokalerna där BSF anläggningen befinner sig i har tidigare använts som lokaler för mjölmasksodling, så de är väl lämpade för odling av insekter. De inkommande flödena till anläggningen är främst restflöden från livsmedelsindustrin. Flödena är relativt rena, det vill säga att typen av matavfall som inkommer är stora mängder med en typ av livsmedel, t.ex. havre, yoghurt och äpplen. Anläggningen tar inte emot biologiskt avfall då lagstiftningen kräver ett foder som är garanterat fritt från animaliska biprodukter. Anläggningens produktionskapacitet är ganska begränsad och allt arbete i anläggningen utförs manuellt, både processer och datainsamling. I nuläget är produktionen enbart i forskningssyfte och tillverkar inte på industriell skala. Anläggningen är en pilotanläggning där Ragn-Sells forskar på hur BSF-larver på ett optimalt sätt kan ta hand om organiska restströmmar samtidigt som de utforskar möjligheter att tillverka foderprotein från larverna för till exempel laxodlingar.

4.2.2 Anläggning för behandling av matavfall i Heden, Danmark.

Anläggningen i Heden, Danmark, tar hand om biologiskt avfall från flera olika källor, hushållsavfall, livsmedelsindustrier och kommunalt avfall, och omvandlar det till ett pulp som sedan säljs vidare till biogasproduktion. Biogasanläggningen ligger intill avfallsbehandlingsanläggningen, vilket bidrar till en symbios mellan de två anläggningarna. Anläggningens kapacitet är på industriell skala och om den tillverkar mer pulp än vad biogasanläggningen intill kan ta emot säljer de pulpen vidare till andra

biogasproducenter. Syftet med anläggningen är kommersiellt vilket leder till att dess viktigaste roll är att ta emot avfall och omvandla det till pulp.

4.3 Utveckling av koceptmodell för digital tvilling (AP3)

I AP3 utvecklar vi en mock-up (konceptmodell) som visar lämpliga förslag på funktionalitet och design av digitala tvillingar för de två anläggningarna. En mock-up visar hur ett system kommer att se ut och fungera utan att systemet faktiskt skapas och visar vad den digitala tvillingen gör och hur den kan användas.

Vi tar vår startpunkt i en generell kravspecifikation (se Appendix C) för digitala tvillingar och anpassar till vår situation med två återvinningsanläggningar. Speciellt skall mockupen beskriva:

- Arbetsflöde
- Viktiga analyser
- Förslag på grafiska gränssnitt

I tillägg till detta skall vi, baserat på kartläggningen av processen i Arbetspaket 2, beskriva vilken typ av data som finns tillgänglig och hur den lämpligen lagras för att möjliggöra smidig hantering och analys. Säkerhet och äganderätt till datan skall också diskuteras. Slutresultatet är en mock-up som beskrivs i form av en detaljerad serie av bilder som visar designen av den digital tvillingen och tillhörande beskrivning av dess funktionalitet.

4.4 Genomförbarhetsanalys (AP4)

Det övergripande syftet med Arbetspaket 4 har varit att tydligt förstå om och hur användningen av digitala tvillingar kan bidra till att styra affärsbeslut och nå nya operativa mål som till exempel spårbarhet, ökad kvalitet, effektivisering inom processer och resursutnyttjande, minskat underhåll, ökad cirkularitet av näringsämnen samt uppnå nya krav från myndigheter. Målet med aktiviteterna som utfördes var att förstå nyttan och vilka möjligheter och hinder som finns vid utveckling av tvillingen, datainsamling, implementering och användning.

Under studiebesök (se sektion 4.2) och uppföljande intervjuer med ansvariga för respektive anläggning diskuterades bland annat behov av och möjligheter för ökad digitalisering, befintliga arbetssätt, KPI:er för verksamheten, möjligheter att tillgå data över processen och primära hinder för implementering av en digital tvilling. Därutöver

hölls en workshop med specialister från olika verksamhetsgrenar hos Ragn-Sells för att sprida informationen som hade tagits fram under projektet, inhämta ett bredare perspektiv kring användning av digitala tvillingar och få en tydligare bild av vilka incitament som finns att öka graden av digitalisering i verksamheten.

För att komplettera informationen från studiebesöken, intervjuerna och workshoppen utfördes en grundläggande litteraturstudie med fokus på hur digitala tvillingar har applicerats inom återvinningsindustrin och andra närliggande områden.

Slutligen utfördes en riskanalys för att möta eventuella hinder för utveckling och implementering samt användning av den digitala tvillingen. För respektive steg identifierades risker och förslag på åtgärder kopplade till tekniska, juridiska och mänskliga utmaningar.

4.5 Handlingsplan för implementering och expansion (AP5)

Syftet med arbetspaket 5 är att ta fram en handlingsplan för utveckling, implementering och användande av digitala tvillingar inom återvinning av organiskt material samt att utreda potentialen för spridning av konceptet till andra materialflöden. Handlingsplanen och idéerna för vidareutveckling av konceptet ska kunna ligga till grund för ett utvecklings- och innovationsprojekt där en digital tvilling utvecklas och testas av verksamheten.

Handlingsplanen baseras på resultatet från genomförbarhets- och riskanalyser utförda för de två fallstudierna, och identifierar de viktigaste aktiviteterna för utveckling och implementering av en digital tvilling för användning inom verksamheter som hanterar biologiska restströmmar i Sverige. I syfte att lyfta diskussionen och undersöka potentiell vidareutveckling av konceptet har det förts diskussioner med specialister med erfarenhet av digitalisering inom liknande områden samt med personer verksamma inom andra affärsområden hos Ragn-Sells. Därutöver har efterforskningar gjorts inom litteraturen för studier inom liknande användningsområden.

5 Resultat och diskussion

5.1 Projektledning (API)

Projektet har framgångsrikt genomförts med hjälp av den planerade projektledningsstrategin. Följande resultat har uppnåtts:

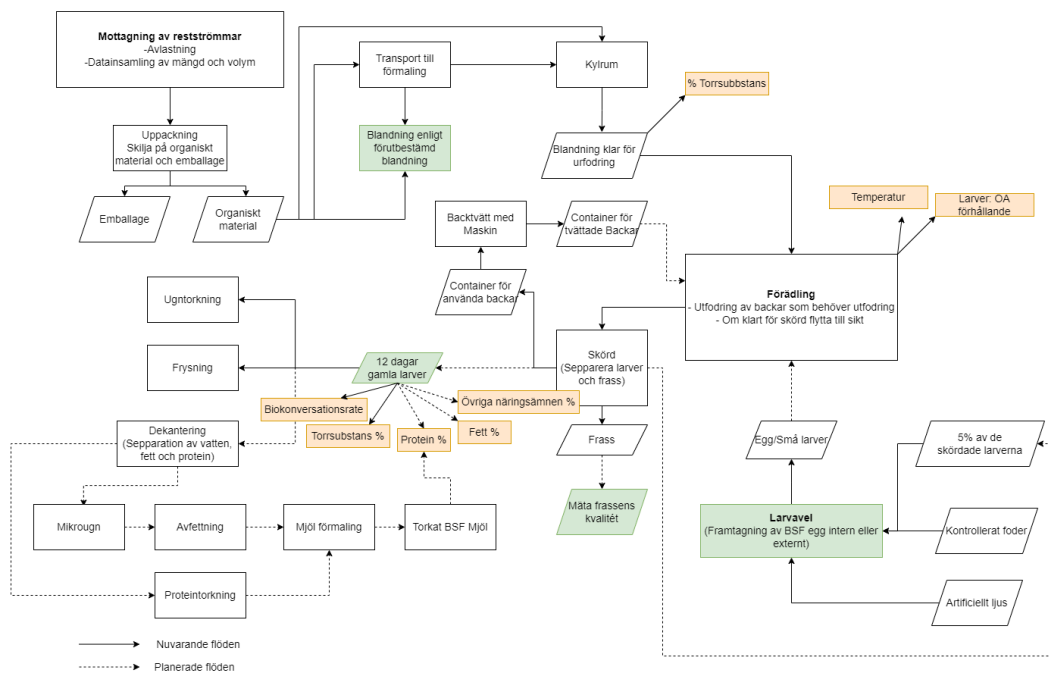
- **Koordinering:** Projektets mål, omfattning och tidsramar har tydligt definierats, vilket har gett en stabil grund för genomförandet. En projektplan har skapats, som innehåller tydliga uppgifter, ansvar och tidsfrister för varje aktivitet. Resurserna har allokerats och möten har hållits ca en gång per vecka för att övervaka framstegen, lösa problem och samordna aktiviteter.
- **Sammanställning av resultat:** De önskade resultaten för projektet har tydligt definierats och mätbara mål har satts upp för att utvärdera framstegen. Projektets framsteg har kontinuerligt följts upp och utvärderats mot dessa mål. Genom att samla in data och information från projektteamet och andra relevanta källor har en noggrann utvärdering av resultaten och framstegen kunnat göras. Analysen och tolkningen av resultaten har möjliggjort för projektledningen att dra slutsatser och fatta välgrundade beslut.
- **Rapportering:** Regelbundna delrapporter har skapats, vilket har en tydlig bild av projektets status, framsteg och eventuella avvikelser från planen. Vid ledningsmöten har en sammanfattning av projektets status och framsteg presenterats. En slutrapport har också sammanställts, vilken innehåller en summering av projektresultaten.
- **Kommunikation och kontakt med relevanta aktörer:** De viktigaste intressenterna för projektet har identifierats och hållits informerade genom regelbunden kontakt. Genom olika kommunikationskanaler har projektledningen effektivt kommunicerat projektets framsteg, hanterat förväntningar och löst eventuella frågor eller problem.
- **Presentation av projektresultat:** En tydlig och engagerande presentation av projektresultaten har framtagits. Visuellt material, såsom presentationsslides och affischer, har skapats för att illustrera projektets framsteg och resultat.

Sammanfattningsvis har projektet framgångsrikt genomförts genom noggrann koordinering, sammanställning av resultat, rapportering, kommunikation och presentation av projektresultat. De uppsatta målen har uppnåtts och projektet har levererat önskade resultat till intressenterna.

5.2 Kartläggning av processer och datainsamling (AP 2)

5.2.1 Fallstudie 1: BSF-pilotanläggningen i Orsa, Sverige (BSF Pilot)

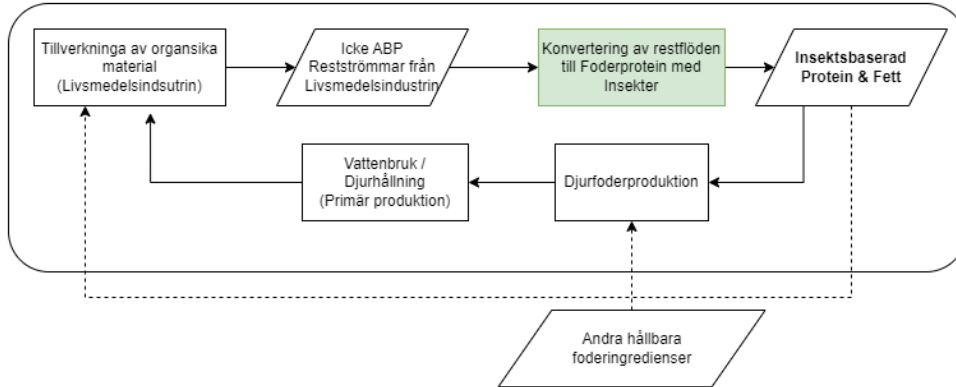
Kartläggningen av processer och data för fallstudien BSF Pilot presenteras i **Figur 1**. Denna visar hur processen ser ut från och med att avfallsströmmarna levereras till anläggningen till det att larverna skördas och förädlas till insats i foderproduktion. Då anläggningen är en pilotanläggning utförs i dagsläget inte allt det arbete som behöver finnas med i den slutgiltiga processen. Dock har framtida processer inkluderats i detta arbete i syfte att de ska inkluderas i den digitala tvillingen. I **Figur 1** presenteras befintliga flöden med heldragna linjer och planerade flöden med streckade linjer. Fyra delprocesser har identifierats vara av särskilt intresse för Ragn-Sells att utveckla vidare. Dessa delprocesser har markerats med grönt i **Figur 1**.



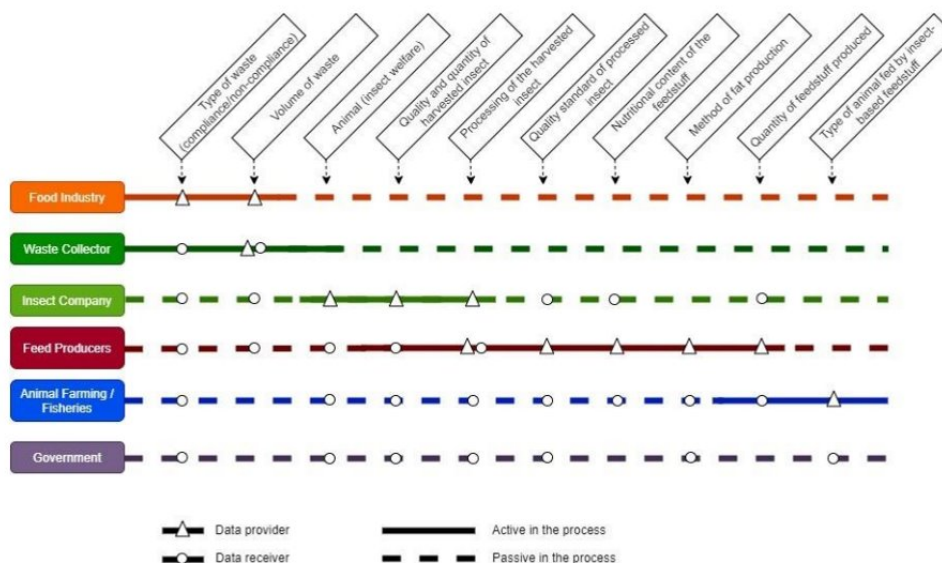
Figur 1: Kartläggning av BSF-pilotanläggningen i Orsa.

Utöver den interna processen i BSF-piloten har kartläggningen också inkluderat att identifiera vilka data som behöver delas i värdekedjan – från restflöde till ny produkt. En visualisering av hur en potentiell cirkulär värdekedja för framtagning av foderproteiner från restströmmar presenteras i **Figur 2**. Den grönmärkade rutan visar pilotanläggningens fokusområde. Kartläggningen av data i värdekedjan inkluderar vilken aktör som har datan som efterfrågas och vilken eller vilka aktörer som behöver

informationen samt om dessa aktörer har en aktiv eller passiv roll i insamlingen av data. Kartläggningen har utförts från Ragn-Sells perspektiv och visas i Figur 3.



Figur 2: Kartläggning av en cirkulär värdekedja för foderprotein.



Figur 3: Datapunkter och relevanta aktörer över hela värdekedjan.

Relevanta datapunkter för utveckling och användning av en digital tvilling i fallstudien BSF Pilot har identifierats för nedanstående delar och följer värdekedjan från livsmedelsindustrin (leverantör) till fiskodlaren (kund/konsument av foder) samt data för att uppfylla externa krav. En detaljerad förteckning finns i Appendix D (offentliggörs ej).

5.2.1.1 Livsmedelsindustrin/leverantör

Utöver vilken typ av restströmmar det är som levereras till anläggningen är det väldigt viktigt att få information om hygien och sjukdomar som eventuellt kan förekomma i matavfall. Datan samlas som regel inte in hos livsmedelsproducenter i dagsläget.

5.2.1.2 BSF anläggningen i Orsa

BSF anläggningen tar emot restströmmar från livsmedelsindustrin, vilket utgör ett substrat till larverna och omvandlar det till protein. Datan som bör samlas in omfattar följande delprocesser.

Mottagning av substrat

Anläggningens första steg där substratet tas emot och hanteras för vidareförädling.

Förbehandling, blandning av förutbestämt recept

Substratet (foder till larverna) blandas enligt förutbestämda recept som gör det lätt för larverna att konsumera det och då bidrar till maximal tillväxt av larver och optimal nedbrytning av substratet. Det är viktigt att substratblandningen har ett visst fukttinnehåll för att ge bra förutsättningar för larvernas tillväxt.

Utfodring av larver

Utfodring av larverna är det stadium där foderblandningen placeras i behandlingslådorna. Matning sker 3 gånger under en 12 dagars period (dag 1, 5 och 8). Vid den första utfodringen tillsätts även små larver i en bestämd mängd. Mängden material som matas in i processen under olika utfodringstider kan påverka biokonvertionsgraden, larvernas individuella vikt och mängden material som inte konsumeras av larver (obearbetade rester).

Bearbetning

Det tar 12 dagar för larverna att utvecklas tills det är dags för skörd. Under den tiden är behandlingsboxarna placerade i behandlingscellen med specifik temperatur, relativ luftfuktighet och ventilation (luftutbyte). Under hela bearbetningstiden tas behandlingslådor endast ut vid utfodring enligt de förutbestämda intervallerna och för att sköras, vilket händer efter 13 dagar i behandlingscellen.

Skörd

Skörden sker under den trettonde dagen efter första utfodringen. Processen innebär att separera de odlade larverna från frasset (larvernas avföring) och överblivna matrester. Det är viktigt att känna till biokonvertionsgraden (kg material tillförsel till kg materialproduktion, både larver och rester) för att mäta processproduktiviteten.

Efterbehandling/Förädling

Efter skörden förädlas larverna och rester från odlingen till flera användbara produkter. I pilotanläggning sker det för närvarande genom ugnstorkning vid 70 grader Celcius. Det är

viktigt att känna till torrsubstansen hos de skördade larverna eftersom detta påverkas starkt av substratets egenskaper. I framtiden ska torkade larver avfettas ytterligare för att producera rent insektsproteinmjöl.

Larvuppfödning

I uppfödningen, som är en viktig delprocess, produceras BSF-ägg som blir till små larver, vilka introduceras till produktionen efter fem dagar. Figur 4 visar larvernas livscykel. Uppfödningen består av flera steg; förpuppning, framväxande, parning, äggläggning och äggkläckning. Huvudinsatsen till uppfödningen är prepuppor (nästa steg efter larver) och en viktig utgående produkt är fem dagar gamla larver (5-DOL, 5 dagar gamla larver räknade sedan de kläcktes från äggen). Processen i sig påverkas av den omgivande miljön, genom temperatur, relativ fuktighet, typen av konstgjord ljuskälla samt larvernas matkälla.

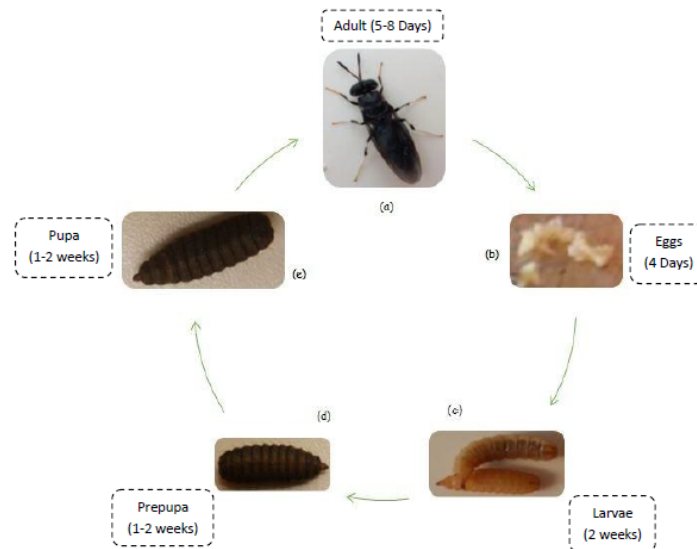


Figure 4: Life cycle of *Hermetia illucens* (BSF)

Figur 4: Livscykeln för en BSF fluga som referens för processen.

Förädling av skördade larver

De skördade larverna (separerade från frass och matavfall) måste bearbetas innan de blandas med annat material i djurfoderproduktionen. Produkten som tillverkas är BSF-mjöl, vilket är torkade, avfettade och pulveriserade BSF-larver med 95% DM, 40% protein (DM) och 25% fett (DM). Informationen som behöver kunna, enligt Aleksander Vidakoiv på SLU, delges om insektsmjölet är enligt den standardanalys av näringsammansättning,

som vanligtvis görs på foder ingredienser. (Denna information samlas i dagsläget inte in på grund av att anläggningen inte är kommersiell.)

5.2.1.3 Djurfoderproduktion

Detta steg innebär produktion av djurfoder, där insektsmjölet är en ingrediens. Avsedd användning i projektet har varit fiskfoder, men andra typer av djurfoder är också möjligt. Produktionen av djurfoder kräver olika typer av råvara. BSF-mjölet är tänkt att ersätta fisk- och sojamjöl som proteinkälla. Enligt Linkan Feed Ingredients är nedanstående information väsentlig för att använda BSF-mjöl i produktionen. (Denna information samlas inte in i dagsläget på grund av att anläggningen inte är kommersiell.)

5.2.1.4 Fiskodlare

Fiskodret som produceras kommer konsumeras av vattenbruk. För denna aktör är det viktigt att få tillgång till information som påverkar fiskens välmående och information som påverkar förutsättningarna att sälja produkten.

5.2.1.5 Regleringsaspekter (över hela värdekedjan)

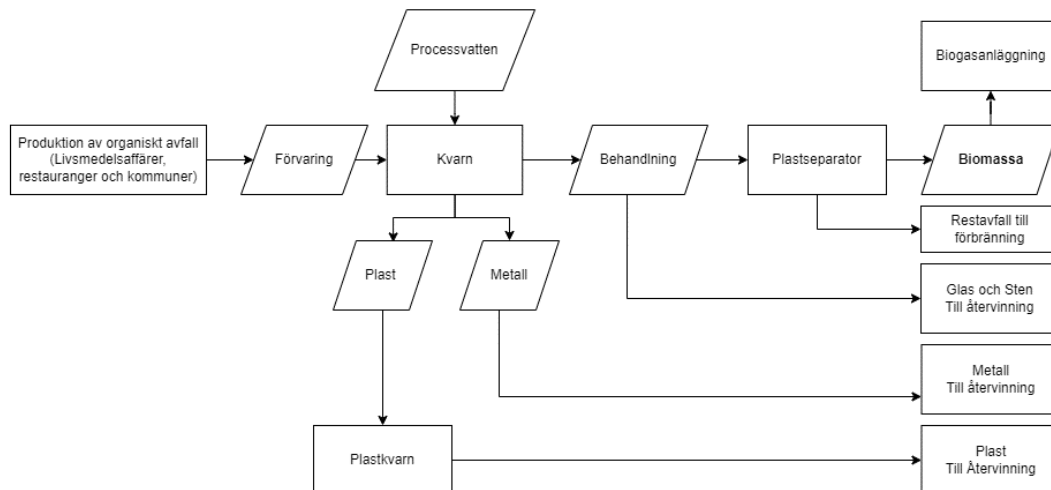
Jordbruksverket kräver att prover av fodret (över hela värdekedjan) analyseras på dess innehåll av potentiella sjukdomar och patogenhalter. (Denna information samlas inte in i dagsläget på grund av att anläggningen inte är kommersiell.)

Därutöver krävs av regleringsaspekten för värdekedjan att ett system för spårbarhet införs:

"Enligt lagstiftningen måste system för spårbarhet upprättas och tillämpas i anläggningen (enligt förordning (EG) nr 178/2002). För den enskilde foderföretagaren sträcker sig skyldigheten från den fysiska eller juridiska personen närmast före till företaget omedelbart efter i foderkedjan. Spårbarheten ska dokumenteras en väg bakåt och en väg framåt (se bilaga 2). Det måste säkerställas att leverantörer av originalmaterial, ingredienser, processhjälpmedel och råvaror tillämpar motsvarande grad av spårbarhet."

5.2.2 Fallstudie 2 Anläggning för behandling av matavfall i Heden, Danmark (Anläggning Heden)

Kartläggningen av Anläggning Heden presenteras i **Figur 5**. Den visar hur processen ser ut från och med att avfallsströmmarna levereras till anläggningen till och med att pulpen leveras till biogasanläggningen. Den visar även var de olika rejektströmmarna uppstår i processen. Vid tidpunkten för studiebesöket var plasttvätten i anläggningen inte i drift på grund av underhåll.



Figur 5: Kartläggning av avfallsanläggningen för organiskt avfall för biogas i Heden, Danmark.

I denna anläggning kategoriserades nuvarande och intressanta datapunkter i Inflöden, Processen, Utflöden och Verksamhetsmätetal.

5.2.2.1 Inflöden

Materialet som flödar in i anläggningen levereras med lastbilar, lastbilarnas vikt vid in- och utkörning mäts för att kunna estimeras det totala matavfallet som levereras med varje bil.

- Matavfall (Ton)

5.2.2.2 Processen

Behandlingsprocessen i Anläggningen Heden är en vanligt förekommande process för behandling av matavfall. Förutsättningarna att kontrollera och styra inflödets kvalitet är ganska dåliga och möjligheten att påverka kvaliteten på slutprodukten ligger främst i en väl fungerande process, maskinernas tillstånd och kanske framför allt operatörens erfarenhet och kunskaper. Följande relevanta datapunkter har identifierats, somliga mäts redan i dagsläget och somliga föreslås som kompletterande mätetal:

- Vatten (m³)
- Diesel (L)
- El (kWh)
- Mantimmar (Timmar)
- Föroreningar i pulpen (Föroreningar per cm²)
- Elförbrukning per maskin (Mäts inte idag)
- Pulp producerat per timme (Mäts inte idag)
- Vikt matavfall som matas in i hammarkvarnarna (Mäts inte idag)

- Frekvens för matning av hammarkvarn (Mäts inte idag)
- Anledning för driftstörningar
- Längd av driftstörningar (Mäts inte idag)
- Mantimmar per huvuduppgift (produktion, rengöring, underhåll) (Mäts inte idag)
- Exakt underhållskostnad per maskin (Mäts inte idag)
- Servicedata för varje maskin (Mäts inte idag)

5.2.2.3 Utflöden

Det är flera olika utflöden från processen, dels den primära produkten pulp, som säljs vidare till biogasproduktion, dels rejektflöden som material- eller energiåtervinns.

Datapunkter som har identifierats för mätning är följande:

- Material som skickas till förbränning (Ton)
- Mängd plast som sorteras (Ton)
- Mängd metall som sorteras (Ton)
- Mängd pulp som tillverkas och säljs (Ton)
- Mängd glas som sorteras och skickas till energiåtervinning (Ton)
- Pulpets torrsvikt (% eller Ton)
- Vikt av såld massa (Ton)
- Vikt på olika levererade kasseringar (Ton)

5.2.2.4 Verksamhetsnivå

Det är vissa mätetal som rapporteras internt på verksamhetsnivå, de som rapporteras och följs upp i dag är följande:

- Arbetsolyckor (Antal)
- Sjukskrivningar (Tid)
- Finansiella resultat
- Volym av in- och utförsäljning
- Nya kunder
- Olika energiförbrukningsåtgärder, CO2-rapportering
- Uppnådda besparingar

5.2.2.5 Externa krav

- Lukt/luftföroreningar från grannar och kommun
- Krav från Arbejdstilsynet (Arbetsmiljöverket)

5.3 Utveckling av konceptmodell för digital tvilling (AP 3)

Inledningsvis ges en sammanfattning av mockupsen för de två anläggningarna. Detaljerad beskrivning av mockupsen finns i Appendix A. Därefter diskuteras några tekniska

områden för digitala tvillingar, hur de kan användas för optimering, hur data lämpligen struktureras och vad vi kan förvänta om vikten av datainsamling framledes.

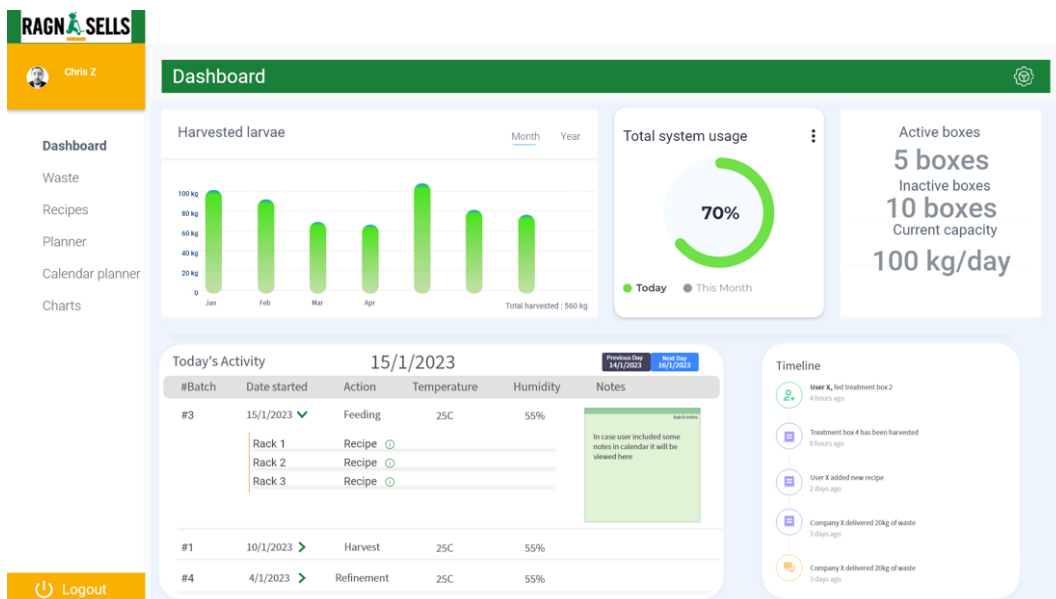
I det här projektet har vi undersökt hur digitala tvillingar kan bidra till värdeskapande i två fallstudier, BSF-piloten och anläggningen i Heden.

I BSF-piloten finns ett tydligt värdeskapande genom såväl analys som prediktion. BSF-piloten undersöker hur organiska restströmmar på bästa sätt kan användas för att producera högvärdigt protein. Det är därför mycket viktigt att på ett systematiskt sätt samla in och bokföra under vilka betingelser som de olika experimenten utförs. Detta kan med fördel göras i en digital tvilling. Den digitala tvillingen möjliggör då analys av data som kan användas för att förstå de experiment som utförs. Den digitala tvillingen kan också utrustas med funktionalitet för matematisk optimering, vilket innebär att systemet baserat på insamlade data kan bygga en matematisk modell som används för att prediktera bästa möjliga försöksbetingelser. Dessa betingelser kan sedan testas i nya experiment som förser den digitala tvillingen med ytterligare data, som i sin tur möjliggör en mer förfinad analys med syfte att ytterligare optimera processen.

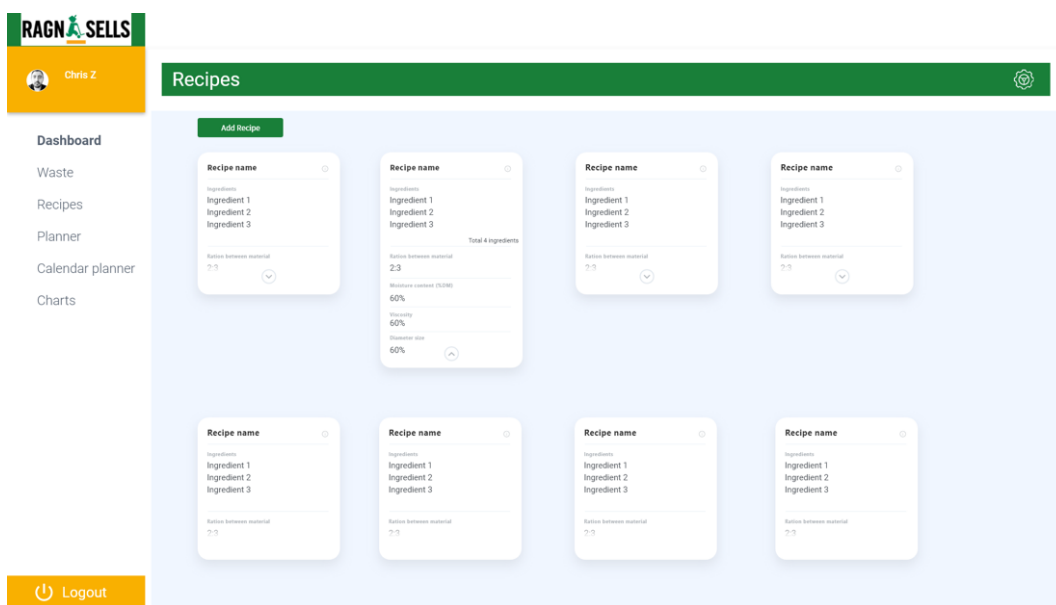
I anläggningen i Heden sker avfallshanteringen på ett mer traditionellt sätt, vilket innebär större utmaningar när det gäller såväl datainsamling som värdeskapande med hjälp av digital tvilling. Även här finns dock potentiella värdekedjor som en digital tvilling kan bidra med. Framför allt handlar det om att samla in och analysera data som rör kvalitet på inkommande avfall, kvalitet på utgående slutprodukt (pulp för produktion av biogas), samt energiåtgång (elförbrukning) i de olika stegen av avfallshanteringen. Ytterligare en möjlig användning av digitala tvillingar är att kunna jämföra produktivitet och kostnader för olika anläggningar.

5.3.1 Black Soldier Fly (BSF) pilotanläggningen i Orsa, Sverige

Systemet som beskrivs nedan är en digital tvilling till BSF-piloten. Systemet kräver att användarna loggar in och styr dem till en instrumentpanels sida som ger en snabb överblick av viktiga mätvärden, uppgifter och operationer. Användare kan registrera sig och lägga till avfallsleverans i systemet samt skapa recept baserat på avfall. Användare kan också experimentera med olika parametrar och planera hela processen med att mata larverna. Systemet bearbetar all information och ger användbara insikter till användarna samt föreslår framtida experiment. Systemet kan också föreslå receptersättningar baserade på en optimerings algoritm som används på insamlade data. Anläggningschefer kan använda en kalenderplanerare för att organisera och övervaka experiment. Systemet har en diagram-sida där användare kan se alla experiment och deras resultat och filtrera datat efter olika parametrar. Systemet övervakar också produktiviteten, antalet experiment och kostnaderna för anläggningen. Förfiningen av experiment kan också spåras och arbetstimmar för anställda kan övervakas.



Figur 6: Dashboard som ger en översikt av intressanta data samt receptplaneringsvy.



Figur 7: Vy för planering av och bokföring av recept.

Fördelarna med att ha ett sådant system i BSF-anläggningen inkluderar:

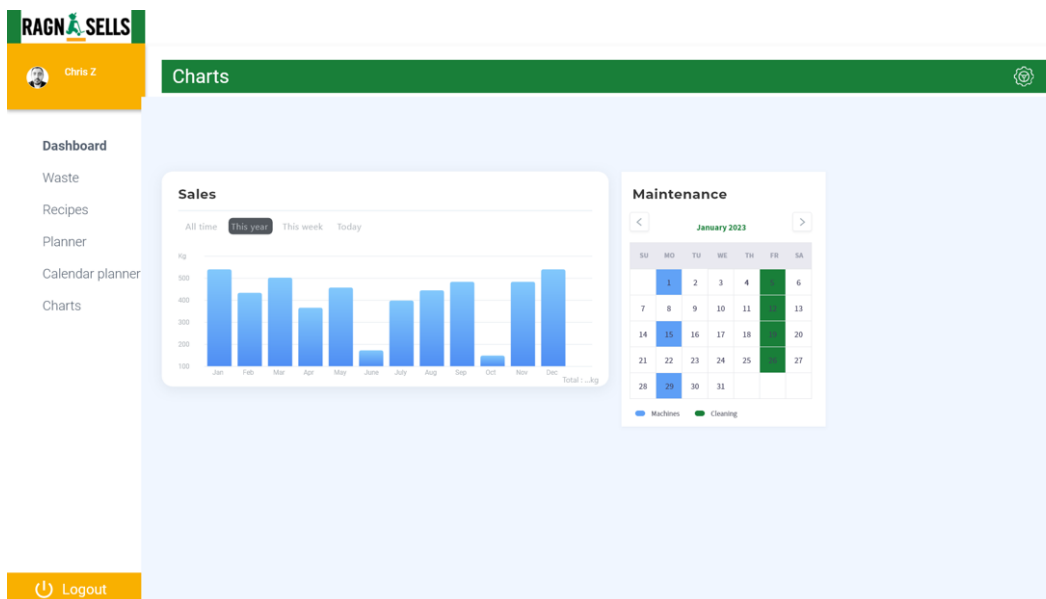
- **Ökad effektivitet:** många uppgifter kan automatiseras, såsom datainmatning, godkännandeprocesser och rapportering. Detta kan spara tid och minska fel, vilket leder till större effektivitet och produktivitet.

- Optimering av recept: Genom att samla data om hur recept och andra parameterar påverkar egenskaperna hos den slutliga produkten kan vi över tid bygga en datadriven modell som kan användas för att optimera receptens sammansättning.
- Förbättrat samarbete: Digitalisering av en anläggnings arbetsflöde kan göra det lättare för team att samarbeta, även om de inte är på samma plats. Detta kan förbättra kommunikationen och leda till bättre beslutsfattande.
- Förbättrad datahantering: Digitalisering av en anläggnings arbetsflöde kan bidra till att bättre hantera data och göra det lättare att komma åt och analysera. Detta kan hjälpa till att identifiera mönster och trender, fatta informerade beslut och förbättra prestanda.
- Ökad transparens: Det är lättare att spåra framsteg och identifiera flaskhalsar i arbetsflödet. Detta kan öka transparens och ansvar, vilket kan leda till förbättrad prestanda.

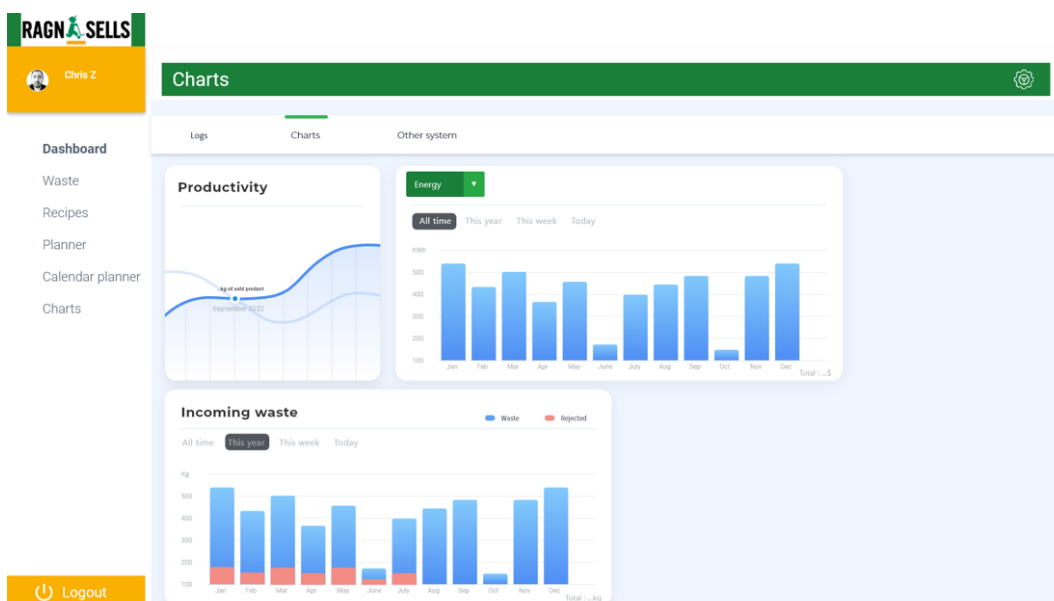
5.3.2 Anläggningen för behandling av matavfall i Heden, Danmark

Det nuvarande datainsamlingen vid anläggningen i Heden är relativt grundläggande. Huvudsakligen kan endast makroskopiska variabler som beskriver inflöde, tid och vikt, samt utflöde av olika produkter beskrivas med data. Det som direkt påverkar anläggningens produktionskapacitet är eventuella driftstopp eller nedsatt drift på grund av underhåll av maskiner. Detta hanteras genom att genomföra förbättringar av maskiner samt att sortera bort oönskade objekt i avfallet såsom större metallstycken.

Dock samlas vissa datapunkter fortfarande in. Anläggningen tar emot avfall som registreras i systemet, med spårning av de företag som levererar avfallet, volym, kvalitet och leveranstid. Vi har därför valt att utveckla en mockup som visar hur man på ett effektivt sätt kan presentera en översikt av anläggningens produktion inklusive in och utflöden. Mer precist finns ett diagram som övervakar det totala avfallet som levereras av varje företag, samt ett produktivitsdiagram som visar månatlig vikt av sålda produkter. Anläggningens utgifter spåras också, inklusive energiräkningar, vatten och dieselkostnader. Inkluderat i systemet är ett diagram som övervakar vikten av inkommande avfall under olika tidsperioder och markerar eventuellt avvisat avfall genom att markera det i rött. En försäljningstabell och underhållskalender är också inkluderade för att planera städaktiviteter och maskinunderhåll på en månadsbasis.



Figur 8: Översiktsbild med försäljning och planerat underhåll samt produktivitet, energiförbrukning, och inflöde.



Figur 9: Översiktsvy med produktivitet, energiförbrukning och inflöde av avfall över tid.

Systemet tillåter även en individ på företagsnivå att få tillgång till alla registrerade anläggningar i systemet och se viktig information genom diagram och grafer i realtid. Användaren kan välja att se den mest relevanta och väsentliga informationen för varje system eller ha fullständig åtkomst till data. Systemet möjliggör enkel navigering och erbjuder ett användarvänligt gränssnitt för att visa informationen. Detta möjliggör för

beslutsfattare på företagsnivå att fatta informerade beslut och vidta åtgärder baserade på realtidsdata från alla registrerade anläggningar.

5.3.3 Datatyper och lämpliga format för lagring

Den grundläggande data strukturen i den digitala tvillingen är en graf som modellerar processen där noderna utgör processteg och kanterna flödet mellan de olika processtegen. Till grafen läggs data på lämpliga platser. Till exempel hör en sensor som mäter flödet mellan två process steg naturligt till kanten som förbinder motsvarande noder och elförbrukningen för en viss maskin hör till motsvarande processnod. Detta ger en enkel beskrivning av en process som kan användas i allt från enkla fall till mycket komplexa processer.

Huvudsakligen samlar vi data av tidsserietyp som består av en sekvens av tidpunkter och motsvarande värden. I praktiken betyder det att vi mäter en kvantitet med en viss frekvens i tiden alternativt när det händer något specifikt. Dessa data kan enkelt sparas i form av en matris. För att spara utrymme och inte bygga upp orimliga mängder onödiga data väljer vi att sampla på en frekvens som är anpassad till hur mycket som händer i systemet. I fall då det sällan sker något men ibland sker mycket på kort tid kan vi använda adaptiv sampling. Allt detta kan hanteras i den digitala tvillingen.

Vår graf ger en naturlig nyckel till de olika sensorerna som också har en direkt fysisk mening i processen. Enklast är att numrera noderna och sedan beskriva kanterna med en lista av par av noder. Till varje kant och nod kan vi sedan tilldela se sensorer som hör till dessa.

I tillägg till tidsserier sparar vi andra filer, det kan vara dokument, som användarhandböcker, ljud och video samt kortare textfiler. Även dessa placeras in i en given plats i grafen. Vi undviker att bygga komplexa ontologier och att tillämpa mer komplexa databaslösningar. I stället väljer vi en lättviktig arkitektur där grafen som beskriver vår process utgör stommen för att organisera datan.

5.3.4 Datatillgång nu och i framtiden

Lite förenklat kan vi konstatera att idag samlas en minimal mängd data in runt återvinningsprocessen. Skälet är sannolikt att det i regel inte rör sig om en högprecisionsverksamhet med höga krav på kvalitet. I takt med att kraven på kvaliteten höjs genom nya regleringar och högre krav från miljömedvetna företag blir det dock allt viktigare att samla data och att använda den för att visa att ett företagsprocesser faktiskt lever upp till de krav man hävdar och som i allt högre grad utgör ett säljargument mot miljömedvetna kunder.

Den snabba digitaliseringen gör det också möjligt att kostnadseffektivt samla data via trådlöst uppkopplade sensorer och att därefter lagra, processa och analysera med hjälp av en digital tvilling. Vi kan därför förvänta att återvinningsindustrin måste gå mot en digitalisering av sin verksamhet.

Det finns emellertid utmaningar som huvudsakligen har att göra med att det är svårt att samla all den data som efterfrågas. Ser vi till exempel på anläggningen i Heden finns stora osäkerheter i kvaliteten på inkommande avfall och även ursprunget kan ibland vara osäkert eftersom avfallet hanteras i flera led av olika underleverantörer. Effektiv digitalisering av den cirkulära processen kan därför kräva mer genomgående förändringar av den grundläggande affären.

5.3.5 Sensorer

I en modern återvinningsanläggning spelar sensorer en avgörande roll för att effektivisera processen och säkerställa en högkvalitativ återvinning. Dessa sensorer möjliggör övervakning och styrning av olika parametrar och ger värdefull information som hjälper till att optimera återvinningsprocessen.

För att övervaka och kontrollera processer i anläggningen används även olika typer av miljösensorer. Dessa sensorer kan mäta parametrar som temperatur, fuktighet, gasutsläpp och luftkvalitet. Genom att ha kontinuerlig övervakning av dessa faktorer kan eventuella avvikelser eller problem upptäckas i tid. Detta underlättar för snabba åtgärder och minskar risken för negativ påverkan på både arbetsmiljö och miljö.

En annan viktig typ av sensor är viktsensorer. Dessa sensorer används för att mäta vikten av material som transporteras in och ut från anläggningen. Genom att ha exakt information om vikten på återvunnet material kan man övervaka återvinnings effektiviteten och säkerställa att återvinningsprocessen fungerar optimalt

Nya tekniker är under utveckling för att detektera och identifiera olika typer av avfall, inklusive plast, glas, metall och papper. Genom att installera dessa sensorer vid olika platser inom anläggningen kan operatörerna få realtidsdata om mängden och typen av avfall som bearbetas. Denna information möjliggör en mer effektiv sortering och vidare behandling av materialen.

Utöver dessa exempel finns det många andra typer av sensorer som kan vara anpassade för specifika behov inom återvinningsindustrin. Oavsett vilken typ av sensor som används är deras syfte att förbättra övervakning, kontroll och optimering av återvinningsprocessen.

Sammanfattningsvis spelar sensorer en avgörande roll i en återvinningsanläggning genom att möjliggöra övervakning, styrning och optimering av olika parametrar och processer. Genom att använda specialanpassade sensorer kan anläggningen uppnå högkvalitativ återvinning och bidra till en mer hållbar framtid genom effektiv resurshantering.

5.4 Genomförbarhetsanalys (AP 4)

Under en workshop med projektparter och inbjudna specialister från andra verksamhetsgrenar inom Ragn-Sells, diskuterades de framtagna mockupsen och de fördelar som användning digitala tvillingar kan ge (se 5.3). Syftet med diskussionen var att ringa in prioriterade utvecklingsbehov som en digital tvilling kan bidra till att lösa samt att resonera kring risker och hinder och därmed få en tydligare bild av genomförbarheten av ett utvecklings- och innovationsprojekt med införande av digitala tvillingar.

En digital tvilling som avgränsas till en produktions- eller behandlingsprocess skulle skapa möjligheter till effektivare processer, kvalitetssäkrade produkter, ökad kunskap om vilka inflöden som ska eftersökas och hur de ska förbehandlas för att processen ska fungera optimalt samt kunna verifiera uppfyllelse av lagkrav. Under workshopen framkom att de prioriterade behoven ligger i analys och prediktion, särskilt då produktens kvalitet varierar med kvaliteten på inflödet och man har en komplex behandlingsprocess med flera interna beroenden och det är fördelaktigt att kunna styra och finjustera processbetingelserna. Även spårbarhet är ett tydligt behov, särskilt i fallstudien BSF-pilot då det i livsmedelskedjan finns krav på att identifiera och verifiera innehållet i den organiska restströmmen.

Mellan de två fallstudierna finns det tydliga skillnader vad gäller möjligheten att kontrollera inflödet och tillgängliggöra sig data för detta. Skillnaden bottenar i krav i lagstiftningen, där det i BSF-piloten inte är tillåtet att hantera ett flöde som definieras som ett avfall då insekterna ingår i en livsmedelskedja [Lindow 2020], medan inflödet till anläggning Heden per definition är livsmedelsavfall. I det senare fallet finns en uppbyggd infrastruktur för avfallshantering från hushåll, butiker och livsmedelsindustri, i vilken avfall från olika källor sammanblandas utan större möjlighet att spåra det till enskilda avfallsproducenter. Det skulle krävas mycket stora förändringar för dessa uppströms aktörer i värdekedjan för att tillgängliggöra sig annan data än vad som i dagsläget samlas in (se sektion 5.2).

Fallstudierna skiljer sig också åt vad gäller processens komplexitet. För BSF-anläggningen, som involverar en levande organism, finns ett behov i att kunna modellera och optimera processerna för biologisk nedbrytning och larvtillväxt. En digital tvilling med den funktionaliteten kan då identifiera optimala produktionsbetingelser vid varje tillfälle och genom integrerade beslutsstöd kan förhållandena i anläggningen anpassas efter det. Om exempelvis ett avvikande mönster i larvernans tillväxt skulle identifieras, kan tvillingen ge rekommendationer för åtgärd, till exempel en förändrad fodersammansättning eller

föreslå annan tidpunkt för skördning. Möjligheten att simulera processen skulle även skapa fördelar om det kom nya externa krav, från kunder eller från ny lagstiftning.

Prioriterade behov för BSF-anläggningen finns kring att utveckla ny kunskap och möjlighet att optimera delprocesserna uppfödning (nya larver produceras), foderblandning, skördning (när larverna avlivas) och kvalitetskontroll. I fallet med anläggningen i Heden finns inte samma behov av att kunna modellera och optimera processbetingelserna. För en enskild anläggning av det här slaget finns potentiella nyttor i analys av driftsdata och möjligheterna till ett förbättrat underhåll av maskiner och andra redskap. Utifrån ett affärsperspektiv skulle det också kunna vara gynnsamt att samla all information om olika anläggningar i en gemensam databas för att kunna nyttja data från de olika anläggningarna gemensamt. I ett övergripande perspektiv är det givetvis fördelaktigt att anamma ett datadrivet beslutsfattande, men det kan uppnås även på andra sätt än att införa digitala tvillingar av anläggningar eller produktionsprocesser i verksamheten.

Utveckling och implementering av en digital tvilling för BSF-piloten har goda förutsättningar att bli ett lyckat utvecklings- och innovationsprojekt. BSF-piloten har bättre förutsättningar än anläggning i Heden vad gäller tillgång till data, både för inflödet och för den egna processen. Produktionen utgörs av en komplex process, som i dagsläget inte är helt känd och det finns ett incitament hos organisationen att studera, vidareutveckla och optimera odlingsprocessen. I en framtida uppskalad anläggning skulle delprocesserna och datainsamlingen behöva effektiviseras genom automatisering. Det är i sig ett utvecklingsprojekt, och ett mer omfattande sådant än utveckling av en digital tvilling. Av den anledningen bör tvillingen inkluderas i det större projektet för att säkerställa möjligheter för vidareutveckling och anpassningar efter nya driftsförutsättningar.

5.4.1 Riskanalys

Utveckling och användning av en digital tvilling för att optimera processer och fatta bättre beslut möter olika tekniska, juridiska och mänskliga utmaningar. Vi sammanfattar nedan de vanligaste riskerna som identifierats under projektets gång indelade i tekniska, juridiska, och mänskliga utmaningar inom stegen utveckling och användning av tvillingen, samt anger lämpliga åtgärder.

De mest kritiska riskerna inkluderar tillgång till tillräcklig mängd data, osäkerhet i modellering, dataägarskap, motstånd mot förändring, och datasäkerhet.

5.4.1.1 Utveckling av Tvillingen

Tekniska utmaningar

Risk: Otillräcklig data för att skapa en digital tvilling.

Åtgärd: Säkerställa tillräcklig datainsamling och valideringsmetoder.

Risk: Kompatibilitetsproblem med befintliga system.

Åtgärd: Genomföra en fullständig IT-miljöbedömning och säkerställa lämpliga integrationer.

Risk: Svårt att skapa digitala representationer av biologiska processer [Pylianidis et al. 2021].

Åtgärd: Skapa modeller som är baserad på systematisk insamling av data vilket möjliggör systemet att lära sig relevanta samband.

Juridiska utmaningar

Risk: Oklarhet kring dataägarskap.

Åtgärd: Tydliga avtal som specificerar ägarskap och rättigheter till datan som samlas in.

Risk: Icke-efterlevnad av dataskyddsförordningar.

Åtgärd: Säkerställa att all datahantering och datalagring följer GDPR och andra relevanta lagar.

Mänskliga utmaningar

Risk: Otillräcklig kompetens inom teamet för att utveckla digital tvilling.

Åtgärd: Låg risk, teamet har bra kompetens och kan enkelt komplettera eventuella kunskapsluckor.

Risk: Motstånd mot förändring bland personalen.

Åtgärd: Kommunicera tydligt fördelarna med den digitala tvillingen och skapa en stegvis plan för implementering.

5.4.1.2 Användning av tvillingen

Tekniska utmaningar

Risk: Tekniska fel som kan leda till felaktiga beslut baserade på den digitala tvillingen.

Åtgärd: Kontinuerligt underhåll och teknisk support.

Risk: Systemet är inte skalbart för framtida behov eller expansion.

Åtgärd: Säkerställa att den digitala tvillingen är flexibel och lätt att uppgradera.

Juridiska utmaningar

Risk: Dataintrång eller dataläckor.

Åtgärd: Starka datahanterings- och säkerhetsprotokoll.

Risk: Tvist om immateriella rättigheter till utvecklad programvara.

Åtgärd: Säkerställa att alla licensavtal och IPR-frågor är ordentligt klargjorda.

Mänskliga utmaningar

Risk: Användare har otillräcklig förtrogethet med att använda digitala tvillingar.

Åtgärd: Utbildning och användarstöd för att öka förtrogethet och förmåga att använda systemet.

Risk: Otillräcklig övervakning och felhantering på grund av bristande användarkompetens.

Åtgärd: Reglera och övervaka användningen, samt skapa effektiva felrapporterings- och hanteringssystem.

5.5 Handlingsplan för implementering och expansion (AP 5)

Återvinningsindustrin kan sägas vara i början av sin digitaliseringsprocess och behovet verkar i dagsläget vara fokuserat på att utforska och öka kunskapen, snarare än att implementera digitala tvillingar på bred front. Utveckling och implementering av digitala tvillingar är beroende av omfattande tillgång till data, vilket i många fall är ett betydande hinder inom återvinningsindustrin. Särskilt gäller det tillgång till data från uppströms aktörer i värdekedjan. Av de två fallstudierna i projektet bedöms en digital tvilling för BSF-piloten ha störst genomförbarhet, ha potential att bidra till en högre effektivitet och ge möjlighet att optimera recept och larvproduktion och samtidigt kunna ge ett betydande kunskapslyft. Av den anledningen har handlingsplanen avgränsats till att gälla denna del av verksamheten. De viktigaste aktiviteterna under utveckling, implementering och användning, inklusive vidareutveckling av konceptet av en digital tvilling beskrivs nedan.

Här fokuseras på aktiviteter av teknisk karaktär, men givetvis tillkommer viktiga aktiviteter såsom att utse ansvariga för olika delar, att säkerställa att resurser finns, att personal får den utbildning som behövs etc.

Utveckling och implementering

I och med att BSF odlingen i dagsläget sker i en pilotanläggning måste stor hänsyn tas till utveckling och uppskalning av processen. Utvecklingsbehovet för ett effektivt och uppskalat system är centrerat kring att automatisera processer och datainsamling. Utveckling av den digitala tvillingen är svår att särskilja från utveckling och uppskalning av processen, som sannolikt kommer att ske stegvis i kombination med en ökande grad av automatisering, och tvillingen behöver av den anledningen vara flexibel och lätt att uppgradera för att möta framtida krav på skalbarhet och expansion. Den digitala tvillingen kan på så vis bli ett värdefullt verktyg för att bättre förstå processen och att fatta beslut för en successiv uppskalning. En annan fördel som en digital tvilling kan bidra med är möjligheten att dela data i värdekedjan för ökad transparens och spårbarhet. Under implementeringen blir det fördelaktigt att samtidigt arbeta med perspektivet om hur den egna anläggningen berörs och kan fungera optimalt och med perspektivet om hur värdekedjan berörs och kan dra fördelar av att implementera system för delning av data. Nedan presenteras tre viktiga fokusområden under utveckling och implementering.

Grundstruktur för digital tvilling och datainsamling. Inom ramen för förstudien har tillgång till och behov av data för BSF-piloten kartlagts och förslag för en struktur för en digital tvilling har lagts fram. Inledande steg vid utvecklingen av en digital tvilling blir att bygga upp den enligt den grundstruktur som har presenterats och samtidigt ta fram ett detaljerat schema för systematisk insamling av data och dokumentation av processbetingelser. Det behöver även tas fram en plan för hur datainsamling kan automatiseras som linjerar med utveckling och uppskalning av anläggningen. I början är fokus på analys, men successivt som tvillingen byggs upp kan funktionaliteter adderas som ger möjlighet till prediktion.

Modellering och optimering. Processerna för larvtillväxt och nedbrytning av organiskt material är komplexa processer med flera inbördes beroenden. Modellering med ett datadrivet angreppssätt låter systemet successivt lära sig sambandet mellan in- och utdata. Av särskilt intresse är att öka kunskapen om hur olika blandningar av substrat till larverna påverkar effektivitet och kvalitet i både process och produkt, till exempel biokonverteringsgrad, tillväxttid och optimalt innehåll av proteiner och fett. En matematisk modell baserad på olika maskininlärningstekniker sätts upp och tränas med dataset från ett stort antal experiment med kontrollerade processbetingelser, i syfte att kunna optimera recepten.

Delning av data i värdekedjan och spårbarhet. En stor utmaning inom livsmedelskedjan är att restströmmar behöver omhändertas snabbt för att inte de biologiska nedbrytningsprocesserna ska gå för långt och materialet förstörs. Ett system för

datadelning mellan aktörer i värdekedjan ger möjlighet att styra restströmmar från exempelvis överproduktion, till en aktör som kan förädla flödet medan det fortfarande är användbart och därmed undvika en resursförlust. De tekniska förutsättningarna att dela data mellan aktörer är goda då det finns utvecklade system som går att integrera över värdekedjan. Det är viktigt att systemet inkluderar en lösning för spårbarhet, då kartläggningen av databehovet har visat att det i livsmedelskedjan är väsentligt att kunna både identifiera och verifiera ursprung och innehåll för den organiska restströmmen. Under utveckling och implementering kan en känd värdekedja användas för att sätta upp regler för systemet, om vilken data som ska delas och med vilka aktörer samt säkerställa datasäkerheten. Ett område att utforska vidare är hur myndigheter kan inkluderas i systemet och potentiella fördelar vid exempelvis tillståndshantering, tillsyn och kontroll samt rapportering.

Användning och vidareutveckling av konceptet

Testa och verifiera. Att arbeta utforskande med ett avgränsat case gör att erfarenheter kan byggas upp innan konceptet överförs till andra verksamhetsgrenar. Ökad kunskap om digitala processer i organisationen stärker möjligheterna för implementering i delar av verksamheten där genomförbarheten för en digital tvilling i dagsläget är lägre. Den digitala tvillingen utvecklas iterativt för att kunna lösa problem som identifieras under projektets gång.

Vidareutveckling till andra materialströmmar. Projektet har fokuserat på två fallstudier där biologiska restströmmar respektive ett biologiskt avfall omhändertas och uppgraderas till att bli en resurs för fortsatt användning, antingen som insats i djurfoder eller som biogas. I fallstudien BSF-pilot ingår resursen i en livsmedelskedja, vilket i sig omöjliggör uppgradering av ett flöde som definieras som ett avfall. Här kräver lagstiftningen att flödet är en restström, vilket också gör att tillgången till data bedöms som mer gynnsam än i den andra fallstudien. I ett vidare perspektiv där en annan typ av materialström ska uppgraderas, är det inte självklart att samma typ av lagkrav finns, det vill säga ett krav som avvisar uppgradering av ett flöde som definieras som avfall. Däremot bedöms det som sannolikt att det alltid kommer att behövas omfattande tillgång till data över inflödet, för att styra resursen till ett användningsområde med bibehållet, eller högre, värde. Oavsett vilken materialström konceptet ska vidareutvecklas för, blir det ett oundvikligt första steg att kartlägga förutsättningarna att tillgå data i tillräcklig omfattning för att utvecklingsatsningen ska vara bärande. Vid intervjuer av specialister inom andra verksamhetsgrenar hos Ragn-Sells har det uttryckts intresse för digitala tvillingar där behandlingsprocessen är komplex och tvillingen ger möjlighet att simulera processen och därmed kunna styra processbetingelserna för ett optimerat utfall. Exempel på processer som kan vara intressanta är vattenrening, behandling och uppgradering av oljeprodukter samt innovativa metoder att tillgå näringsämnen från avfallsflöden.

Delning av data i värdekedjan och spårbarhet. Under användningsfasen expanderas och vidareutvecklas systemet för datadelning till fler aktörer för att dels kunna möta behovet

av en uppskalad produktion, dels behovet av ett utvecklat beslutsstöd för uppströms aktörer att styra restströmmen till förädling innan nedbrytningsprocessen har reducerat värdet i materialet.

6 Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Trots att digitalisering inom avfallshantering fortfarande är underutvecklad, visar både generella och specifika slutsatser att investeringar i digitala lösningar blir alltmer nödvändiga på grund av ökade krav från myndigheter och kunder på förbättrad spårbarhet, dokumentation och sorteringskvalitet.

Digitala tvillingar presenterar en rad nya möjligheter, inklusive datainsamling och -visualisering, samt simulering och optimering av processer. De två undersökta fallen, anläggningarna i Heden, Danmark, och Orsa, Sverige, belyser dessa möjligheter samt de olika utmaningar som kan uppstå i implementeringsprocessen.

För att driva utvecklingen framåt krävs ett bredare engagemang från aktörer inom återvinningsindustrin och mer specifika studier av återvinningsprocesser. En prototypprogramvara för fortsatt utvärdering och testning kan också vara ett positivt nästa steg i denna resa mot en mer digitaliserad avfallshanteringssektor.

6.1 Generella slutsatser

Avfallshanteringens digitalisering är fortfarande underutvecklad, men ökande krav från såväl myndigheter som kunder på förbättrad spårbarhet, dokumentation och sorteringskvalitet driver behovet av investeringar i digitala lösningar.

Digitala tvillingar kan användas för att samla och visualisera all tillgängliga data för en återvinningsprocess. Det är viktigt att den digitala tvillingen förses med data löpande i tiden så att den hålls uppdaterad och kan användas för att studera såväl hur väl processen fungerar som för att kunna fatta beslut om eventuella driftjusteringar. Huvuddelen av datan bör inhämtas automatiskt via koppling till sensorer och affärssystem.

Avancerade digitala tvillingar som samlar tillräckligt med data kan användas för simulering och optimering, antingen genom helt datadrivna modeller, så kallad maskininlärning, eller genom en kombination av datadrivna och analytiska modeller.

Skälet att man så långt som möjligt önskar använda analytisk modellering är att sådana modeller har en begränsad struktur; till exempel kan grundläggande fysikaliska principer inkluderas, och därmed minimeras behovet av data.

Givet att det idag helt saknas en automatiserad digital lösning för insamling, sammanställning och analys av data samt att de tillgängliga mängderna data är begränsade, kan goda steg framåt tas med begränsade investeringar.

Nyttorna med digitala tvillingar inkluderar översikt, kunskapsspridning, benchmarking, samt optimering av drift och processer.

6.2 Anläggningen i Heden

Anläggningen i Heden, Danmark, är en traditionell anläggning för hantering av organiskt avfall och huvudprodukten är en slurry som transporteras via en rörledning till en närliggande biogasanläggning som drivs av ett annat bolag. Vissa andra material produceras också som till exempel plast.

Den data som finns tillgänglig är huvudsakligen makroskopiska mått såsom vikt och tid för inkommande laster med avfall samt den mängd slutprodukt som anläggningen producerar. Vidare finns vissa data kring bemanning, driftstopp och total elförbrukning tillgängliga.

Mer finskaliga data är svår att erhålla eftersom lasterna med avfall ofta består av avfall från flera olika källor. I flera fall har denna data samlats in av underleverantörer som inte anger de ursprungliga källorna. Vidare är avfallet ofta paketerat i plastpåsar vilket försvårar visuell inspektion.

Belastningen på anläggningen kan också variera mycket eftersom kunder ibland måste göra sig av med större mängder avfall, till exempel olika typer av defekt mat.

Av dessa skäl är det svårt att använda en digital tvilling för detaljerad styrning av processen, men genom att samla de data som finns tillgängliga kan anläggningens dagliga drift, produktivitet och ekonomiska resultat studeras löpande. Över tid kan verksamhetsförbättrande åtgärder identifieras och utvärderas. Om flera anläggningar finns tillgängliga i systemet kan benchmarking genomföras och kunskaper om "best practices" spridas över organisationen med minimala kostnader.

6.3 Anläggningen i Orsa

Anläggningen i Orsa är en experimentell anläggning där en process för hantering av organiska restströmmar med hjälp av fluglarver utvecklas. Idén är att larverna äter en lämplig blandning av organiskt material (substrat) och efter tillväxt processas larverna för att kunna användas i till exempel djurfoder.

För anläggningen i Orsa kan detaljerad data samlas in om både inkommande material, processen i anläggningen och kvaliteten på slutprodukten. Eftersom substratet måste sorteras för att kunna användas som föda till larverna ställs höga processkrav, vilket möjliggör insamling av detaljerade data för olika processteg.

Det är särskilt intressant att studera optimering av anläggningens drift, speciellt olika recept och deras påverkan på larvernas tillväxt och slutliga egenskaper såsom protein-, fett- och vätskehalt.

För en fullskaleanläggning kan den digitala tvillingen användas för utvärdering, styrning och optimering av driften.

6.4 Nästa steg

För att effektivt gå vidare med studier om nyttan av digitala tvillingar för avfallshantering, är det flera strategier som kan övervägas.

Först och främst bör ett brett konsortium av aktörer inom återvinningsindustrin bildas. Detta konsortium bör inkludera avfallshanteringsexperter, teknikleverantörer, forskare, myndighetsrepresentanter och potentiella användare av de digitala tvillingarna. Genom att samla dessa aktörer kan ett forum för idéutbyte och kunskapsdelning skapas, vilket kan driva projektet framåt.

Parallellt med bildandet av konsortiet bör ett antal specifika återvinningsprocesser identifieras för studier. Dessa processer bör prioriteras baserat på faktorer som kvalitet och säkerhet i återvinningsprocessen. Exempel på sådana processer kan vara återvinning av kemiska produkter, elektronik och batterier. Studier av dessa processer bör omfatta insamling av detaljerade data, processanalys och identifiering av potentiella utmaningar och möjligheter för implementering av digitala tvillingar.

Med insikterna från dessa studier kan en prototyp-programvara för hantering av digitala tvillingar utvecklas. Denna programvara bör utformas för att effektivt samla in, analysera och visualisera data. Den bör utvecklas i en iterativ process, där programvaran ständigt testas, utvärderas och förbättras baserat på feedback och användarerfarenheter.

Efter att prototypprogramvaran har utvecklats, bör en noggrann utvärderingsprocess genomföras. Utvärderingsprocessen bör inkludera både tekniska tester och användarfeedback för att säkerställa att programvaran är robust, effektiv och användarvänlig.

För att säkerställa att alla aktörer inom konsortiet kan dra nytta av de digitala tvillingarna, bör det finnas en plan för kunskapsspridning och utbildning. Detta kan innebära att anordna workshops och seminarier, skapa utbildningsmaterial och genomföra webinarier för att hjälpa de involverade parterna att förstå och effektivt använda de digitala tvillingarna.

7 Projektkommunikation

Projektets resultat har beskrivits i denna rapport. Vidare har en presentation av projektresultaten tagits fram och presenterats vid en workshop med Ragn-Sells. Presentationen innehåller en beskrivning av digitala tvillingar, hur de kan användas, samt specifika projektresultat och slutsatser. Vi avser att använda valda delar av presentationen för att presentera projektet vid framtida konferenser och möten med andra intressenter. Ett antal kontakter har också tagits med andra aktörer inom återvinningsbranschen med syfte att marknadsföra projektet och etablera kontakter med potentiella samarbetspartner.

9 Referenser

[Arnell]

M. Arnell, "Digital tvilling för hållbar och resurseffektiv drift av avloppsreningsverk", <https://www.smartbuilt.se/projekt/innovationer-och-nya-tillampningar/tvilling-avloppsreningsverk/>.

[Bleiholder och Schmid 2018]

J. Bleiholder och J. Schmid, "Datenintegration und Deduplizierung", i *Daten-und Informationsqualität*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018, s. 121–140.

[Botín-Sanabria et al. 2022]

Botín-Sanabria, Diego M., Adriana-Simona Mihaita, Rodrigo E. Peimbert-García, Mauricio A. Ramírez-Moreno, Ricardo A. Ramírez-Mendoza, och Jorge de J. Lozoya-Santos. 2022. "Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review". *Remote Sensing* 14 (6): 1335.
<https://doi.org/10.3390/rs14061335>.

[Chen och Huang 2020]

Z. Chen och L. Huang, "Digital Twin in Circular Economy: Remanufacturing in Construction", i *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, nov. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/588/3/032014.

[EC] E. C. EC, "Harmonized System - General Information", https://taxation-customs.ec.europa.eu/customs-4/calculation-customs-duties/customs-tariff/harmonized-system-general-information_en.

[Grieves och Vickers 2017]

Grieves, Michael, och John Vickers. 2017. "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems". I *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, redigerad av Franz-Josef Kahlen, Shannon Flumerfelt, och Anabela Alves, 85–113. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

[Ketzler et al. 2020]

Ketzler, Bernd, Vasilis Naserentin, Fabio Latino, Christopher Zangelidis, Liane Thuvander, och Anders Logg. 2020. "Digital Twins for Cities: A State of the Art Review". *Built Environment* 46 (4): 547–73.
<https://doi.org/10.2148/benv.46.4.547>.

[Lindow 2020]

K. Lindow, "Ökad foderanvändning från matsvinn och restprodukter", 2020.

[Preut et al. 2021]

A. Preut, J. P. Kopka, och U. Clausen, "Digital twins for the circular economy", *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, nr 18, sep. 2021, doi: 10.3390/su131810467.

[Pylianidis et al. 2021]

C. Pylianidis, S. Osinga, och I. N. Athanasiadis, "Introducing digital twins to agriculture", *Comput Electron Agric*, vol. 184, maj 2021, doi: 10.1016/j.compag.2020.105942.

[Rasheed et al. 2020]

A. Rasheed, O. San, och T. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective", *IEEE Access*, vol. 8, s. 21980–22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.

[Wang och Wang 2019]

X. V. Wang och L. Wang, "Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0", *Int J Prod Res*, vol. 57, nr 12, s. 3892–3902, juni 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1497819.

10 Bilagor

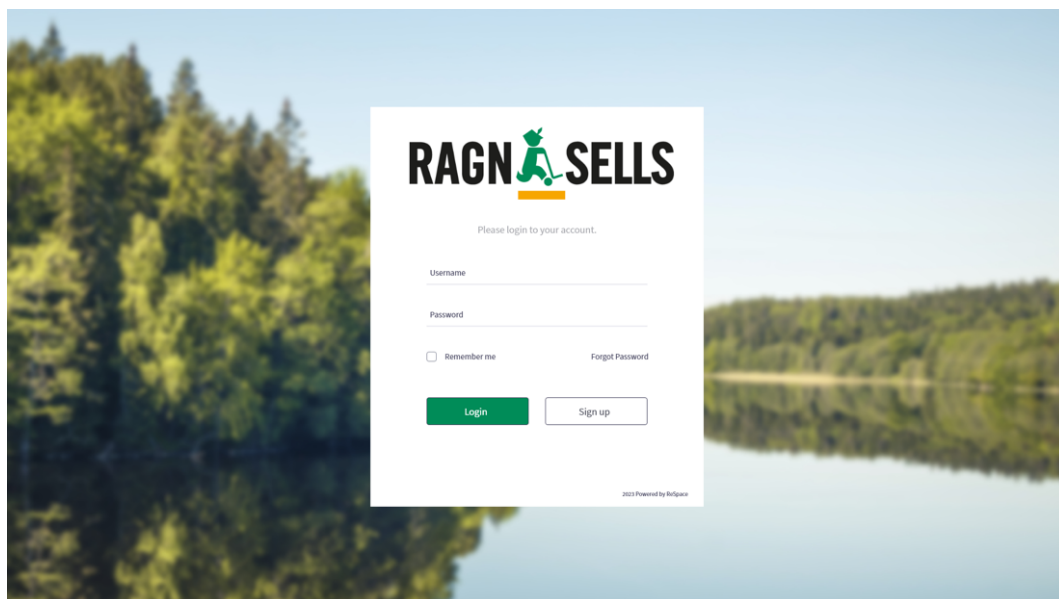
10.1 Appendix A: Mock-ups för BSF-pilotanläggningen i Orsa

Vi beskriver i detta appendix de modeller (mock-ups) som har tagits fram för den digitala tvillingen av anläggningen i Orsa som är en demoanläggning för odling av Black Soldier Flies (BSF).

Beskrivningen ges på engelska.

10.1.1 Login mock-up

Users must login to access the BSF system. Depending on their assigned role, users may have either limited or full access to the system's components.

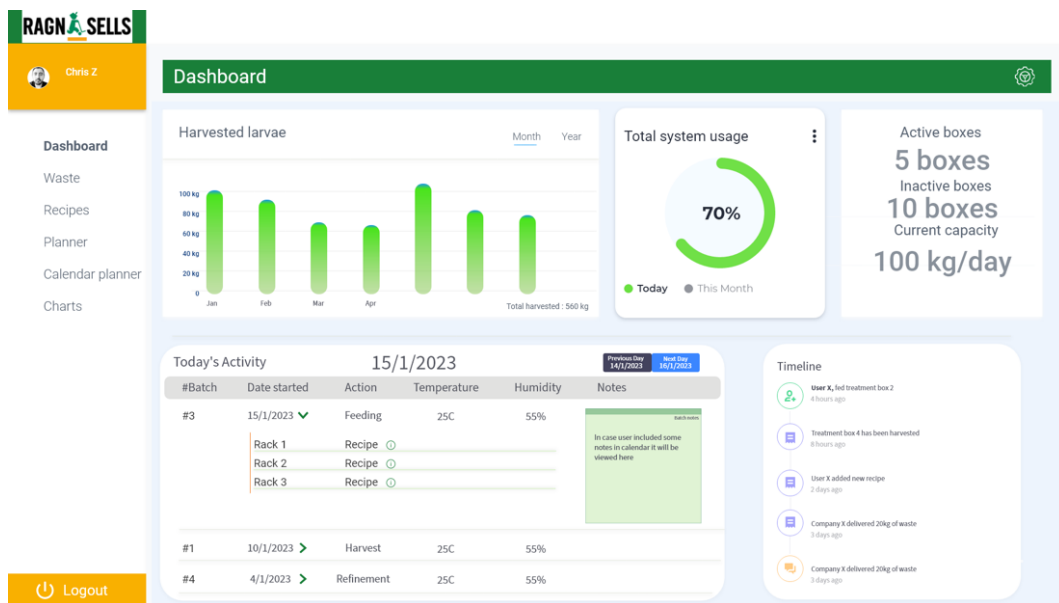


10.1.2 Dashboard mock-up

After logging in, users will be directed to the Dashboard page, where they can quickly preview essential metrics of the facility, such as monthly harvested larvae, current system usage percentage, current capacity, and active and inactive racks.

The same page also enables facility employees to view their daily or upcoming tasks. As depicted in the Dashboard mock-up, employees can check their to-do list and quickly identify any active batches requiring their attention. For instance, an employee may see that batch number three requires feeding for racks one, two, and three, and view the assigned recipe. Additionally, notes specific to tasks provide employees with further guidance on how to proceed.

Moreover, the Dashboard page displays a timeline of various facility actions, providing the facility manager with a rapid overview of operations, for instance, user activities, waste deliveries to the facility, newly added recipes, etc.

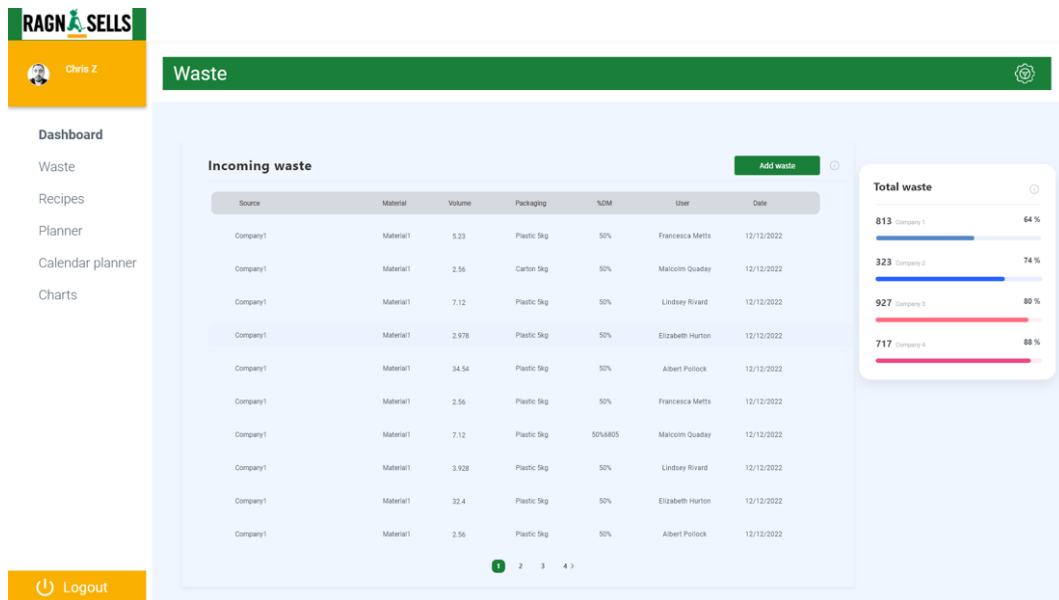


10.1.3 Waste mock-up

The initial stage of the process involves registering the incoming waste to the facility. This step requires tracking several details, including the company that delivered the waste, the type of material, the volume of the delivery, the packaging type, and the moisture content of the waste. Additionally, it is necessary to monitor the person who received the waste at the reception and the date of the delivery.

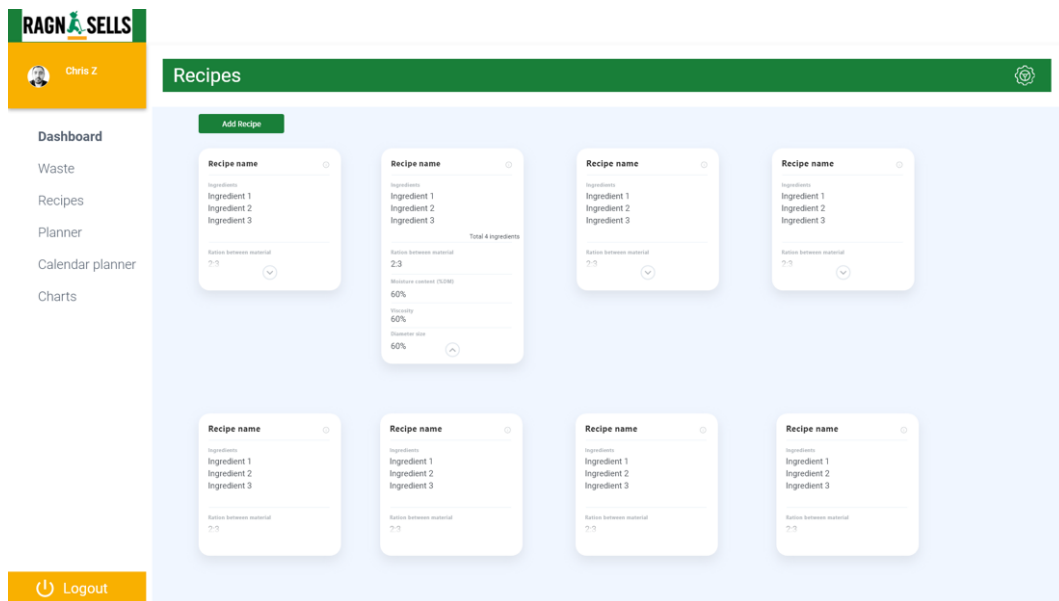
To register and add the waste delivery to the system, users can simply click on the "add waste" button and fill in the necessary information in the input window provided.

A quick analysis of the total waste each company delivers to the facility can be viewed on the right side of the screen.



10.1.4 Recipes mock-up

This screen provides users with the ability to experiment and create recipes based on the waste delivered to the facility. A recipe may consist of multiple materials, and an important characteristic of the incoming waste is its moisture content. Based on literature, it is ideal to achieve a feed mixture with a moisture content as close to 70% as possible. Users can begin creating their initial recipes in the input window provided.



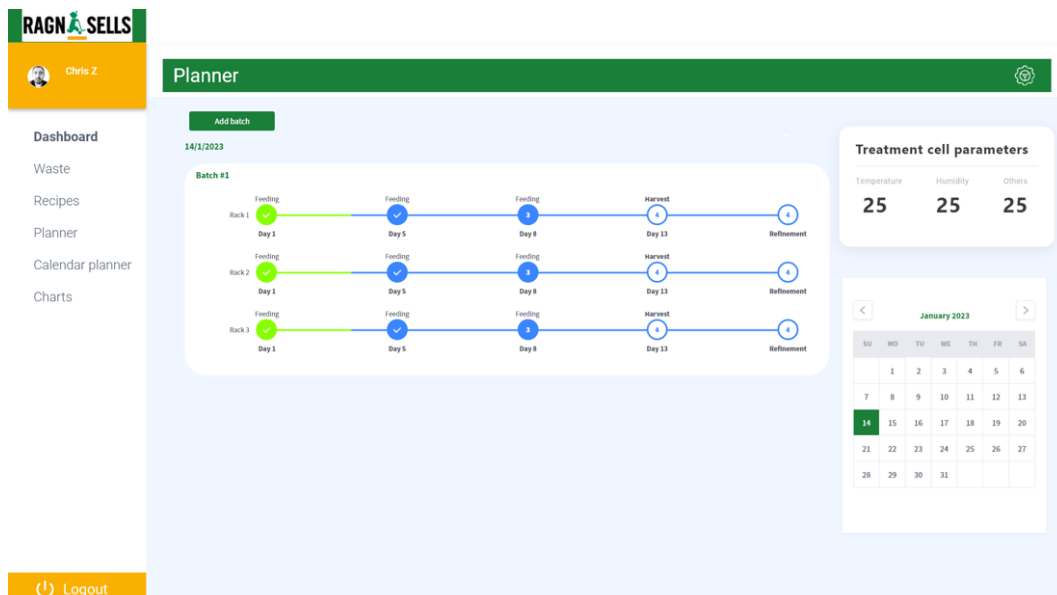
10.1.5 Planner mock-up (1)

After creating recipes, users can start planning the entire process and experiment by inputting different parameters. For example, on day one, the user can define the initial amount of larvae and choose which recipe to feed them. The process begins, and a progress bar appears, providing an overview of the current treatment box's stage. Users can pre-plan and decide on recipes for future feeding days or select them on the day of feeding.

On day 13, users need to take out the treatment box and harvest the larvae. By clicking on the "Harvest" node, users can enter relevant data, such as the weight of harvested larvae, dry matter of harvested larvae, and weight of residue.

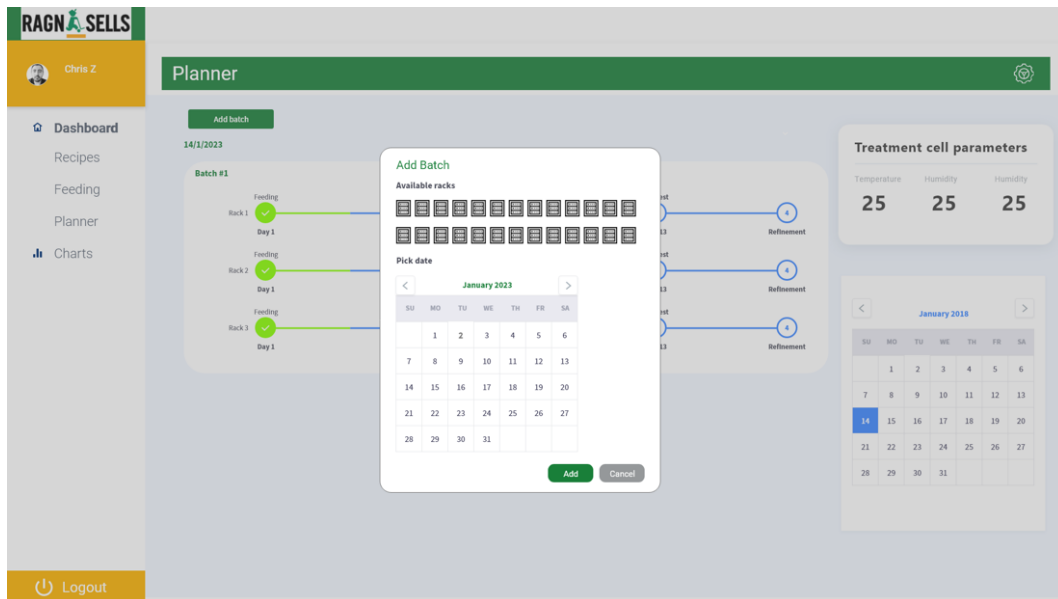
The refinement process follows the harvesting, where users input information relevant to the cooking process, such as input wet larvae weight (kg), output dry larvae weight (kg), and the quality of the product, such as protein or fat content.

Once all data is collected, the system processes the information and provides useful insights to users to understand the success rate by considering all the experiment's parameters. As the system gathers more data, it will suggest future experiments based on previous knowledge to find the best combination of parameters for the highest quality end product.



10.1.6 Planner mock-up (2)

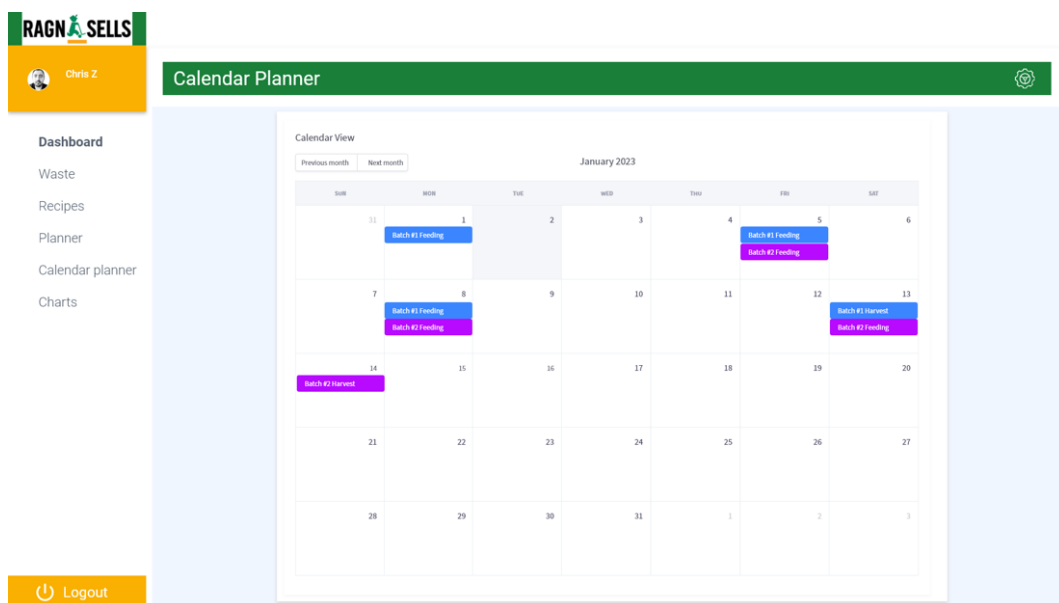
When the "add batch" button is clicked, an input window appears, and the system displays a list of currently inactive racks. The user can then select the desired racks to include in the current batch by clicking on them and assigning them to a specific date.



10.1.7 Calendar planner mock-up

Like the normal planner, the calendar planner is a tool that facility managers can use to organize and oversee experiments. One of the benefits of using the calendar planner is the ability to view upcoming days or weeks with low workloads and plan accordingly, providing a helpful overview for effective scheduling.

As the facility manager starts creating an experiment by assigning a recipe, the system may recommend replacing the original recipe added by the facility manager with an alternative option. The system gathers data from experiments and user parameters over time, using an optimization algorithm to learn and predict the most effective combination of parameters that will yield optimal results. Furthermore, it is important to know the bioconversion ratio to measure process productivity. Another important factor we are interested in is the nutritional profile of the end product such as the protein content or the fat content.



10.1.8 Charts mock-up (1)

An important part of the system in order to understand the end results of the experiments are charts. On this screen we can view all the experiments that have been created together with the results of those experiments. More specifically, the user can view all the batches, what was the harvested larvae in weight, the dry matter, under what temperature and humidity the experiment was done, which recipe was used and what was the bioconversion rate.

The screenshot shows the 'Charts' page in the RAGN SELLS system. The page has a sidebar on the left with navigation options: Dashboard, Waste, Recipes, Planner, Calendar planner, and Charts. The main content area is titled 'Charts' and contains a table with the following columns: Batch #, Harvested larvae, %DM, Temperature, Humidity, Recipe, Bioconversion, and Date. The table contains 8 rows of data. A 'Logout' button is visible at the bottom left.

Batch #	Harvested larvae	%DM	Temperature	Humidity	Recipe	Bioconversion	Date
1	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
2	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
3	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
4	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
5	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
6	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
7	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy
8	.kg	%	.celsius	%	.recipe_name	%	.mm/dd/yy

10.1.9 Charts mock-up (2)

An important feature of the charts is filtering. For example, if we select a particular recipe and show only the batches that used it, we can compare each of the experiments and what results they yielded. Ideally, we would expect similar results and if not try to understand why there is a deviation. Perhaps there are other parameters other than the recipe fed that affect the result such as temperature, humidity etc.

The screenshot shows the RAGN SELLS application interface. The top navigation bar includes the logo, a user profile for 'Chris Z', and a 'Charts' header with a settings icon. A left sidebar contains navigation options: Dashboard, Recipes, Feeding, Planner, and Charts. A bottom bar has a 'Logout' button.

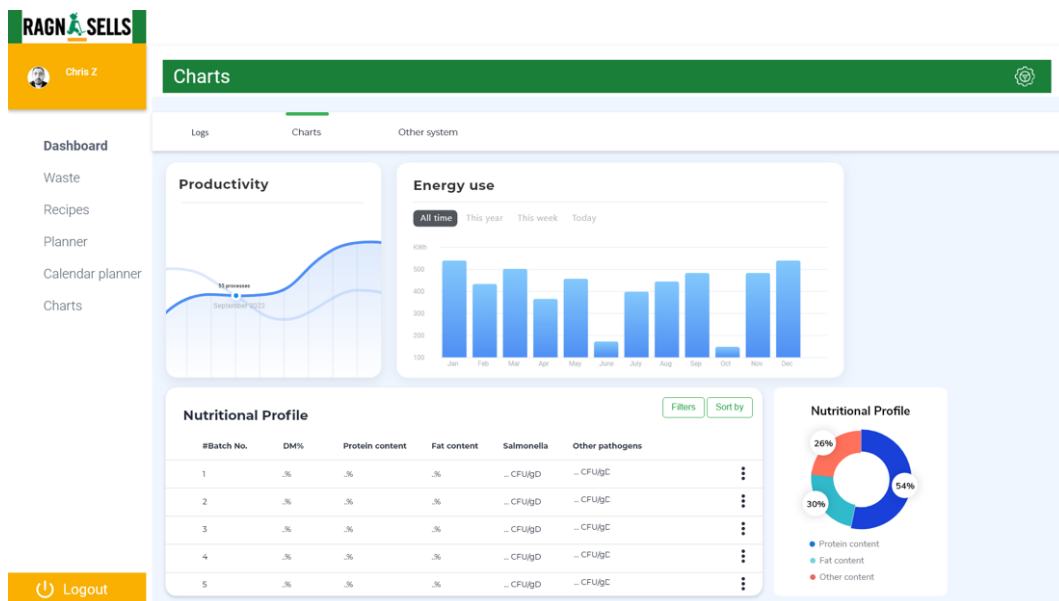
The main content area displays a table with columns: Batch #, Harvested larvae, %DM, Temperature, Humidity, Recipe, Bioconversion, and Date. The table contains 8 rows of data. A 'Parameters' modal is open in the center, allowing users to filter the data by %DM, Temperature, Humidity, and Recipe. The modal includes 'From' and 'To' dropdowns for each parameter and a 'Confirm' button.

Batch #	Harvested larvae	%DM	Temperature	Humidity	Recipe	Bioconversion	Date
1	.kg	.%	°celsius	.%	recipe_name	.%	.mm/dd/yy
2	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy
3	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy
4	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy
5	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy
6	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy
7	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy
8	.kg	.%			recipe_name	.%	.mm/dd/yy

10.1.10 Charts mock-up (3)

On this screen we can see on the top left a graph of the productivity of the facility. Moreover, we monitor the number of experiments of each month. We can also view the costs of energy and perhaps other expenses of the facility in the top right graph.

We have also included the nutritional profile of each experiment. By selecting one of the rows, we get a visual graph of the nutritional content of the end product such as protein, fat and other contents.



10.1.11 Charts mock-up (4)

Here we can view our employees and their work hours. We can also add new users to the system by clicking on the “add new” button as shown on the mock-up.

The screenshot displays a web application interface for 'RAGN SELLS'. The user is logged in as 'Chris Z'. The main navigation menu includes Dashboard, Waste, Recipes, Planner, Calendar planner, and Charts. The 'Charts' section is active, showing a 'Nutritional Profile' table and a 'Staff' table. The 'Nutritional Profile' table lists 5 batches with columns for #Batch No., DM%, Protein content, Fat content, Salmonella, and Other pathogens. The 'Staff' table lists 5 staff members with columns for NAME and Workhours. A donut chart on the right shows the composition of the nutritional profile: Protein content (26%), Fat content (30%), and Other content (54%).

Nutritional Profile

#Batch No.	DM%	Protein content	Fat content	Salmonella	Other pathogens
1	.%	.%	.%	...CFU/gD	...CFU/gC
2	.%	.%	.%	...CFU/gD	...CFU/gC
3	.%	.%	.%	...CFU/gD	...CFU/gC
4	.%	.%	.%	...CFU/gD	...CFU/gC
5	.%	.%	.%	...CFU/gD	...CFU/gC

Staff

	NAME	Workhours
<input checked="" type="checkbox"/>	.name	.hours
<input type="checkbox"/>	.name	.hours
<input checked="" type="checkbox"/>	.name	.hours
<input type="checkbox"/>	.name	.hours
<input type="checkbox"/>	.name	.hours

Nutritional Profile

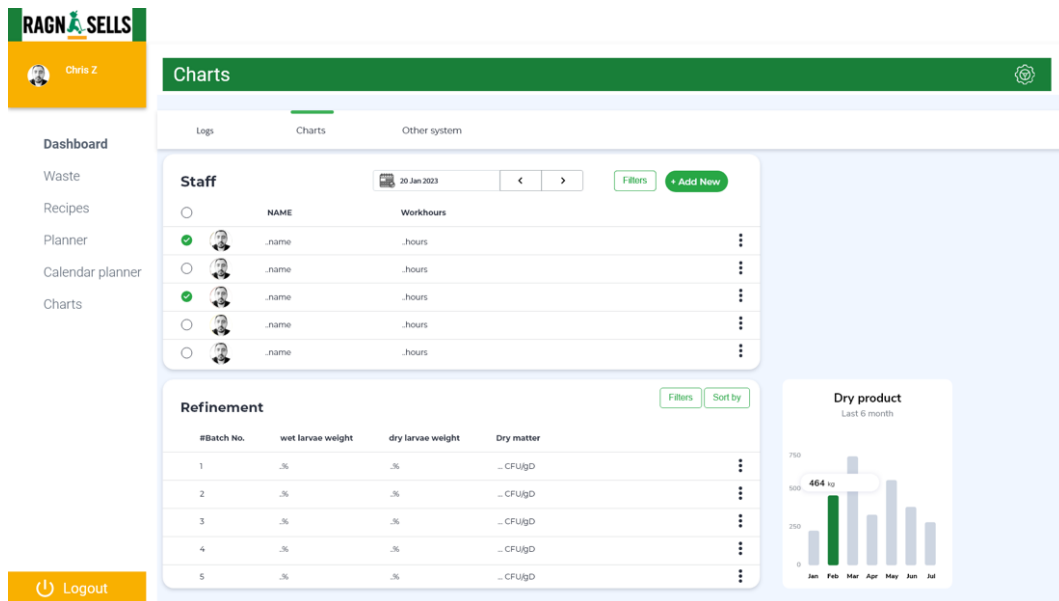
- 26% Protein content
- 30% Fat content
- 54% Other content

Logout

10.1.12 Charts mock-up (5)

One interesting table that can be viewed is the refinement process of the experiments. After harvesting, the larvae go through a refinement process (cooking), and we monitor the weight before and after the cooking process.

A chart that shows the weight of the dry product from the last 6 months is included on this screen, allowing the facility manager to further monitor the facility productivity.



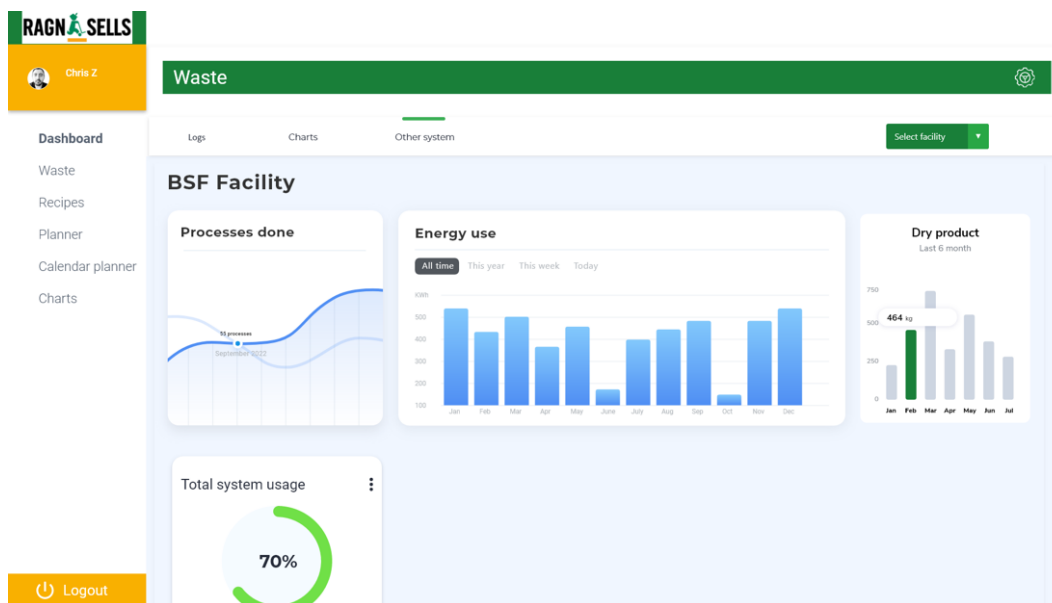
10.2 Appendix B: Mockups för anläggningen av organiskt avfall i Heden, Danmark

Vi beskriver i detta appendix de modeller (mock-ups) som har tagits fram för den digitala tvillingen av anläggningen i Odense som är en avfallsanläggning för hantering av organiskt avfall. Notera att endast modeller som bygger på idag tillgängliga data har inkluderats.

Beskrivningen ges på engelska.

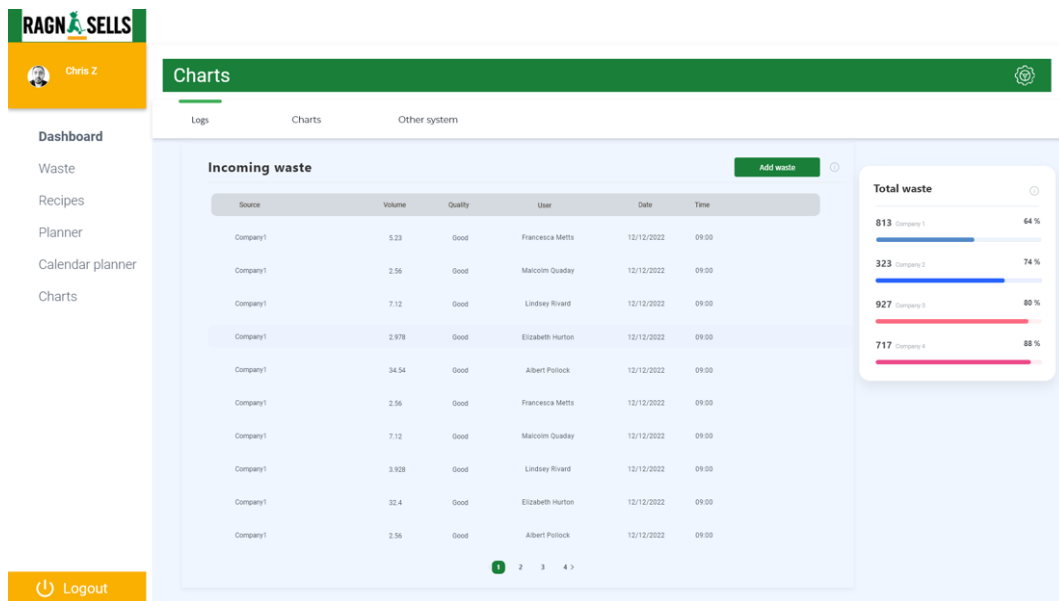
10.2.1 Dashboard mock-up

This screen showcases how someone at the corporate level can access all registered facilities in the system and view crucial information in real-time through charts and graphs. The user can choose to view the most relevant and essential information of each system or have complete access to the data.



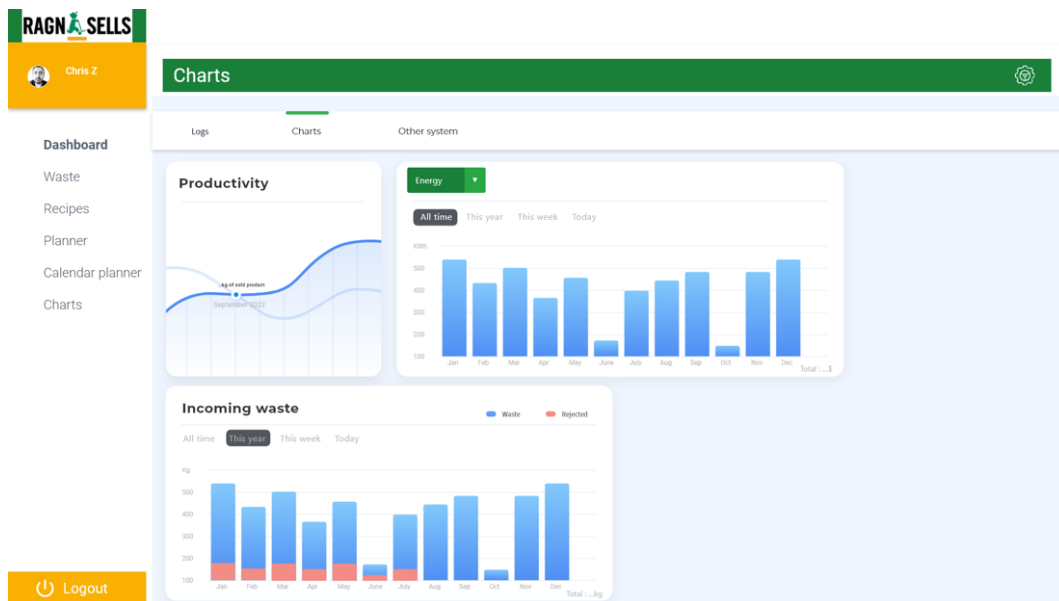
10.2.2 Charts mock-up (1)

The Danish facility receives incoming waste that is registered into the system. Our tracking system includes monitoring the companies that deliver the waste, the volume, the quality (assessed through visual inspection), and the date and time of each delivery. A graph that monitors the total waste delivered by each company can be previewed on this screen.



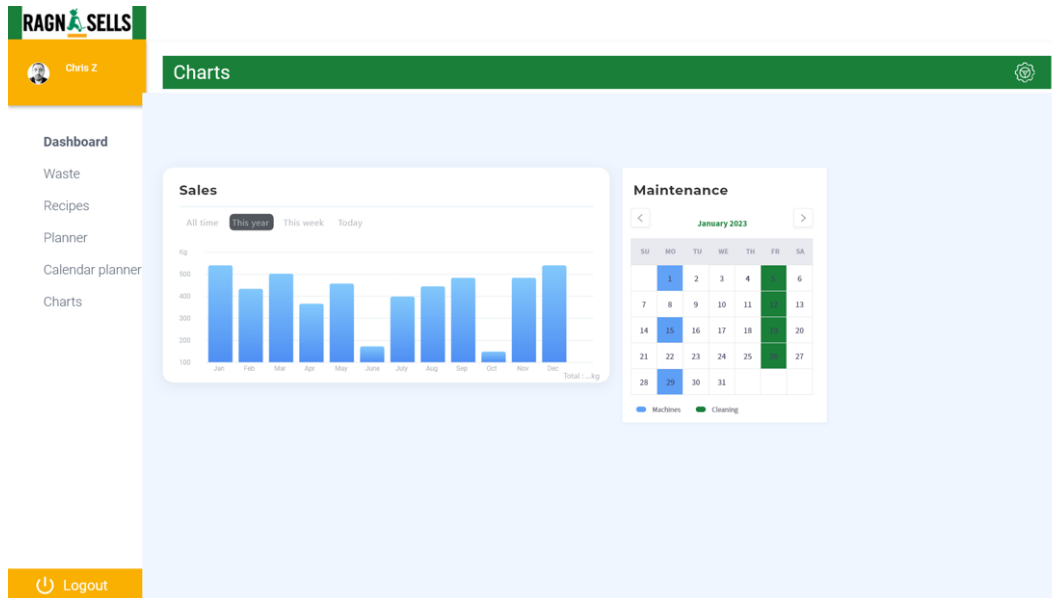
10.2.3 Charts mock-up (2)

A productivity graph displays the monthly weight of sold products. Additionally, we maintain a chart of the facility's expenses, including energy bills, water, and diesel costs. At the bottom of the screen, there is another chart that tracks incoming waste weights over different time frames, with rejected waste marked in red due to not meeting legal requirements or other factors.



10.2.4 Charts mock-up (3)

We have included a sales table and a maintenance calendar for scheduling both machinery and facility cleaning activities on a monthly basis.



10.3 Appendix C. Kravspecifikation på en generell digital tvilling

10.3.1 Inledning

Denna kravspecifikation gäller för utvecklingen av en digital tvilling, vilket är en virtuell kopia av en fysisk enhet eller ett system. Den digitala tvillingen är utformad för att replikera, simulera, förutse och optimera den fysiska enhetens prestanda i realtid.

10.3.2 Syfte och mål

Syftet med den digitala tvillingen är att skapa en detaljerad, datadriven förståelse av prestanda och tillstånd för en fysisk enhet. Genom att replikera den i en virtuell miljö, kan vi förbättra dess prestanda, förlänga dess livslängd och minska kostnaderna för underhåll och reparation.

10.3.3 Funktionella krav

3.1 Datamodellering och simulering: Den digitala tvillingen ska kunna modellera och simulera den fysiska enhetens beteende under olika driftsförhållanden. Den bör kunna hantera flera typer av data, inklusive tidsseriedata, händelsedata och multimodala data.

3.2 Datainsamling och analys: Den digitala tvillingen ska ha förmågan att samla in, bearbeta och analysera data från den fysiska enheten via IoT-sensorer och andra datakällor. Detta bör inkludera realtidsanalys och historisk dataanalys.

3.3 Prediktiv analys: Digitala tvillingen bör kunna använda maskininlärning och AI för att förutse framtida beteenden och identifiera eventuella problem eller prestandaavvikelser innan de uppstår.

3.4 Interaktivitet: Användare ska kunna interagera med den digitala tvillingen, till exempel genom att ändra parametrar, testa olika scenarier och utföra vad-om-analyser.

3.5 Integration: Den digitala tvillingen bör kunna integreras med andra IT-system, såsom verksamhetssystem (ERP), underhållssystem (CMMS/EAM), IoT-plattformar och databaser.

10.3.4 Icke-funktionella krav

4.1 Säkerhet: Den digitala tvillingen ska ha starka säkerhetsåtgärder, inklusive dataskydd, kryptering, och autentisering för att skydda dataintegriteten och användarnas privatliv.

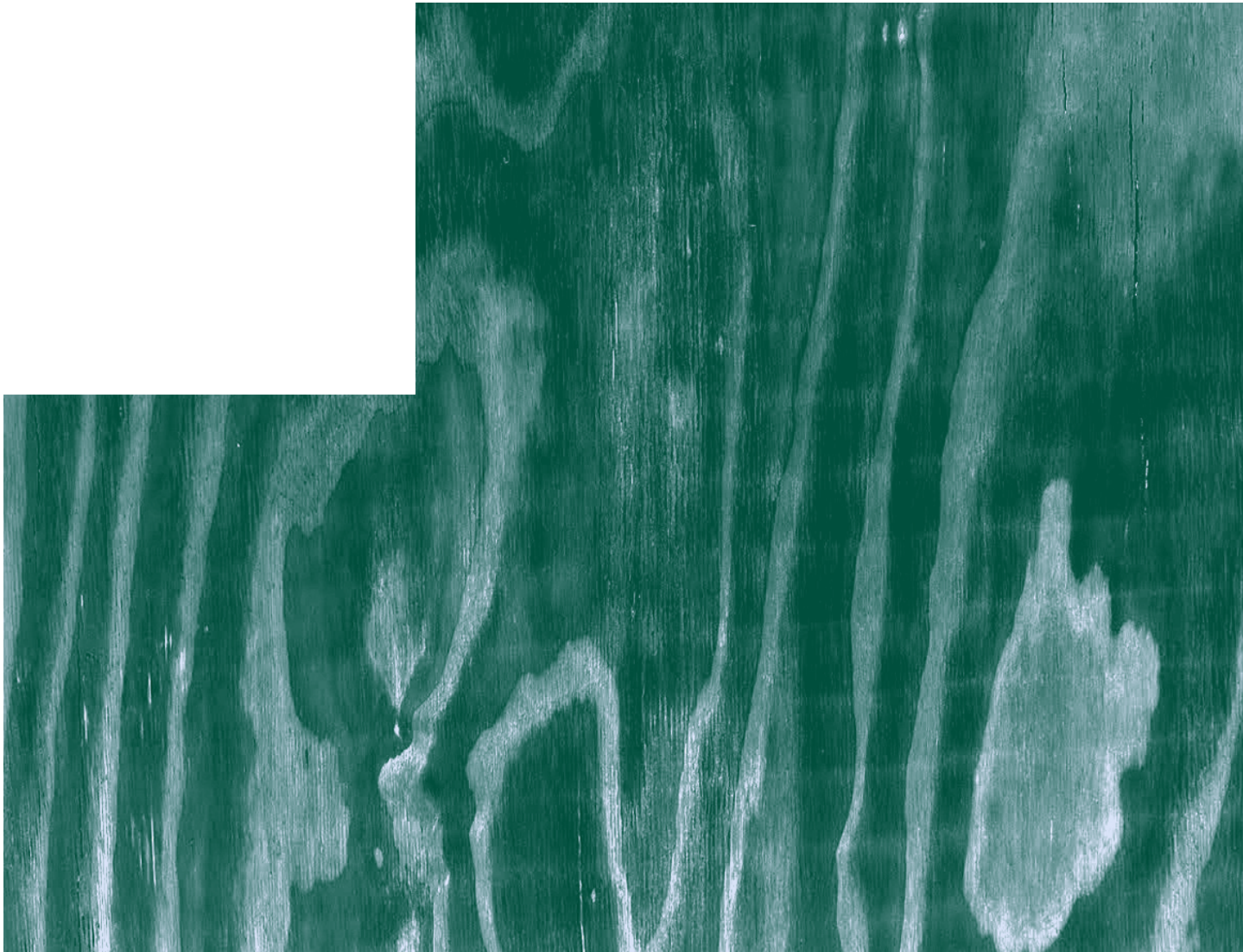
4.2 Prestanda: Den digitala tvillingen bör kunna hantera stora datamängder och utföra snabba simuleringar och analyser. Den bör också ha låg latens för realtidsapplikationer.

4.3 Skalbarhet: Den digitala tvillingen bör kunna skalas upp eller ned beroende på datastorlek och användarantal. Den bör kunna hantera stora datamängder och en stor mängd samtidiga användare.

4.4 Tillförlitlighet: Den digitala tvillingen bör vara pålitlig och exakt i sina simuleringar och analyser. Den bör kunna köra 24/7 utan avbrott eller prestandaförlust.

10.3.5 Dokumentation och support

Utbildningsmaterial, användarmanualer och teknisk support bör tillhandahållas för att hjälpa användarna att förstå och effektivt använda den digitala tvillingen. Supporten bör vara tillgänglig 24/7 och kunna ge snabb och effektiv hjälp vid problem eller frågor.



RE:Source är ett strategiskt innovationsprogram som fokuserar på att utveckla cirkulära, resurseffektiva materialflöden. Vårt mål är att uppnå en hållbar materialanvändning där vi håller oss inom planetens gränser.