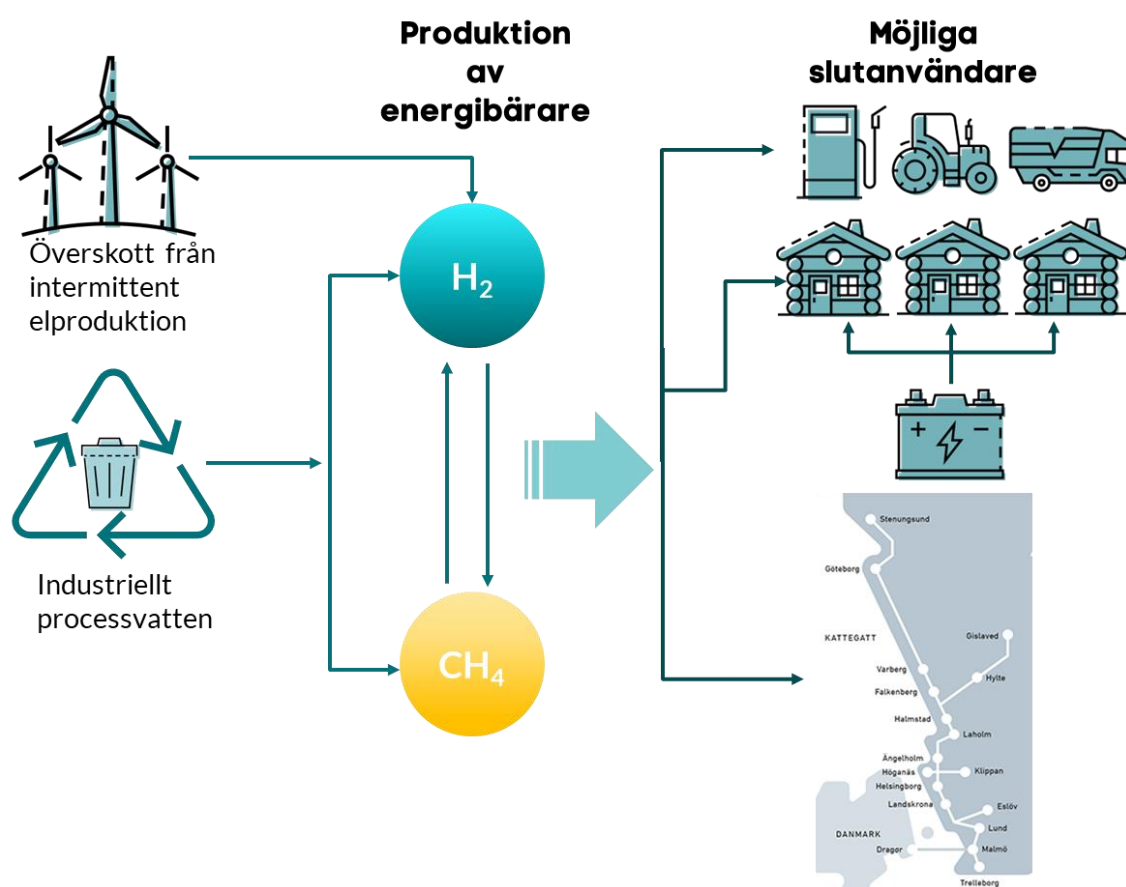




Slutrapport: Bioflex - Biobaserade energibärarens bidrag till ett flexibelt energisystem

Erika Lönntoft, Konstantinos Chandolias, Hanna Hasselqvist, Pavithra Gopalakrishnan och Sima Ajdari

Slutrapport: Bioflex - Biobaserade energibärarens bidrag till ett flexibelt energisystem

Erika Lönntoft, Konstantinos Chandolias, Hanna Hasselqvist, Pavithra Gopalakrishnan och Sima Ajdari

Abstract

Bioflex - biobased energy carriers and their contribution to a flexible energy system

Bioflex aims at increasing the flexibility, redundancy, and robustness of the energy system by integrating biobased energy carriers (biohydrogen/biogas) with electrolytic hydrogen. By combining 2 energy carriers, the project intended to investigate possible synergy effects between the different production pathways. The combination of energy carriers is expected to generate 3 main effects: more efficient resource utilization, increased share of biobased energy and increased flexibility in local energy systems.

The project performed a lab and pilot study of a two-stage bioprocesses, investigated synergy effects and flexibility in the interaction between the bioprocesses and electrolysis, techno-economic analysis of the system and an actor and stakeholder analysis. The goals of the project were to 1) demonstrate the two-stage bioprocess in pilot scale (TRL 5), reduce the hydraulic retention time (HRT) for biogas production by 50% and optimize nutrient supply, and 2) formulate an implementation plan and recommendations to the stakeholders.

The results from the lab and pilot study show that biohydrogen and biogas can be efficiently produced in a two-stage bioprocess and that this leads to higher carbon utilization (from substrate), higher energy recovery and lower emissions (from digestate). Comparisons with existing biogas production with the same process water indicate that the two-stage bioprocess in total delivers equal amounts of biogas compared to the base case, but more energy is produced in total since biohydrogen is also produced. Calculations with linear scaling would give approx. 30% more energy already in the first bioreactor. That scaling up in reality would be linear is however unlikely where a number of other conditions come into play. Therefore, this process needs successively to find key parameters for scaling effects.

Calculations on integration with electrolytic hydrogens show that it is beneficial to use waste heat from electrolysis to heat the bioprocesses, since heat costs are otherwise a large cost item for the two-stage bioprocess.

The techno-economic calculations show that the major cost driver for the entire system is the electrolysis system. The payback period is also highly dependent on the selling price of hydrogen. If the selling price of hydrogen is high, the payback period will be shorter.

The results from the stakeholder mapping and scenario analysis show that:

1. Collaborations are desired for sharing the risk when investing in this type of new technology. In particular, clear collaborations are required when it comes to symbiosis solutions.
2. Clear prerequisites for policy and regulations are requested from many parts of the value chain.
3. Biohydrogen is a niche and its possible position in the market needs further investigation.

4. The two-step bioprocess combined with electrolysis can increase the supply security of renewable energy sources locally and thus increase preparedness.
5. The replicability of the concept with the two-step bioprocess is assessed as high, since there are many different ways it could be done depending on local conditions, but the replicability decreases with increased complexity in the symbiosis solution.

Key words: Biomethane, biohydrogen, two-stage bioprocess, pilot study

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2024:114

ISBN:

2024

Innehåll

Abstract.....	1
Innehåll.....	3
Förord.....	4
Sammanfattning	5
1 Inledning	7
2 Genomförande	8
2.1 Labb- och pilotförsök	8
2.1.1 Reaktordesign.....	9
2.2 Energibalanser och integration med elektrolytisk vätgas	11
2.3 Teknoekonomi.....	11
2.3.1 Tvåstegsbioprocess för biovätgas- och biometanproduktion.....	11
2.3.2 Elektrolyssystemet.....	12
2.3.3 Design av det integrerade systemet: Tvåstegsbioprocess tillsammans med elektrolys	13
2.4 Aktörskartläggning och scenarioanalys	14
3 Resultat.....	14
3.1 Labb- och pilotförsök	14
3.2 Jämförelse av energidata från pilotförsök.....	16
3.3 Energibalanser och integration med elektrolytisk vätgas	16
3.3.1 Mass- och energibalanser	16
3.4 Teknoekonomi.....	20
3.5 Aktörskartläggning och scenarioanalys	22
3.5.1 Intervjustudie	22
3.5.2 Scenarioanalys.....	26
4 Diskussion och slutsatser.....	27
4.1 Nästa steg och rekommendationer.....	29
5 Publikationslista	30

Förord

Bioflex – Biobaserade energibärares bidrag till ett flexibelt energisystem är ett forskningsprojekt finansierat inom ramen för Bio+ programmet hos Energimyndigheten. Projektet pågår från januari 2022 till november 2024. Bioflex undersöker en tvåstegsbioprocess för produktion av biovätgas och biogas från processvatten från livsmedelsindustrin i symbios med elektrolytisk producerad vätgas.

Vi vill tacka alla intervjupersoner som har ställt upp på intervjuer till rapporten och även Nordic Sugar för tillhandahållande av processvatten för våra försök.

Erika Lönnroft

Sammanfattning

Bioflex syftar till att öka flexibiliteten, redundansen och robustheten i energisystemet genom att integrera biologiskt producerade energibärare (biovätgas/biogas) med elektrolytisk vätgas. Genom att kombinera två energibärare undersöker projektet möjliga synergieffekter mellan de olika produktionsvägarna. Kombinationen av energibärarna förväntas generera 3 huvudsakliga effekter: effektivare resursutnyttjande, ökad andel biobaserad energi och ökad flexibilitet i lokala energisystem.

Projektet har genomfört labb- och pilotstudie av tvåstegsbioprocessen, undersökt synergieffekter och flexibilitet i samspelet mellan bioprocesserna och elektrolys, tekno-ekonomisk analys av systemet och aktörsanalys. Målen med projektet var 1) att demonstrera tvåstegsbioprocessen kontinuerligt under 1,5 månad och minska uppehållstiden för biogasproduktion med 50% samt optimera näringsämnestillförsel 2) att ta fram en implementeringsplan och rekommendationer till aktörer.

Resultaten från labb- och pilotförsöken visar att biovätgas och biogas effektivt kan produceras i en tvåstegsbioprocess och att detta leder till högre kolanvändning (från substratet), högre energiutvinning och mindre emissioner (från rötresten). Jämförelser med befintlig biogasproduktion med samma processvatten tyder på att tvåstegsbioprocessen totalt levererar lika mycket biogas som normalfallet, men mer energi produceras totalt genom att addera biovätgas. Beräkningar med linjär uppskalning skulle ge ca 30% mer energi ut redan i första bioreaktorn. Att uppskalning i verkligheten skulle vara linjär är dock osannolikt där en rad andra förutsättningar kommer in. Därför behöver denna process skalas upp successivt för att hitta nyckelparametrar för skalningseffekter.

Beräkningar över integration med elektrolytisk vätgas visar att det är gynnsamt att använda restvärme från elektrolys för att värma bioprocesserna, eftersom värmekostnader annars är en stor kostnadspost för tvåstegsbioprocessen.

De teknoekonomiska beräkningarna visar att den stora kostnadsdrivaren för hela systemet är elektrolyssystemet. Återbetalningstiden är också starkt beroende av försäljningspriset av vätgas. Om försäljningspriset av vätgas är högt blir återbetalningstiden lägre.

Resultaten från aktörsanalysen visar att:

1. Samarbeten är önskvärda för att dela risken med att investera i denna typ av teknik som inte är demonstrerad i större skala. Speciellt krävs det tydliga samarbeten när det är fråga om symbioslösningar.
2. Tydliga spelregler kopplat till policy och regelverk är efterfrågat.
3. Biovätgas är en nisch och dess plats på marknaden behöver utredas vidare.
4. Tvåstegsbioprocessen tillsammans med elektrolys kan öka försörjningsgraden av förnyelsebara energikällor lokalt och därmed öka beredskapen.
5. Replikerbarheten av konceptet med tvåstegsbioprocessen bedöms som hög, då det finns många olika sätt det skulle kunna göras på beroende på lokala förutsättningar, men replikerbarheten minskar med ökad komplexitet i symbioslösningen.

Utifrån detta är det viktigt att vidare titta på att skala upp processen i större pilotanläggningar. Olika utbyten av energigas behöver också undersökas för att skapa mer flexibilitet i processen och därmed tillgodose olika behovsägares önskemål och affärsstrategier. Olika typer av substrat behöver också undersökas, speciellt när det finns säsongsvariationer när det kommer till tillgången av biomassa för tvåstegsbioprocessen. Vissa typer av livsmedels- och jordbruksrestströmmar produceras exempelvis bara delar av året. För att få en högre lönsamhet av tvåstegsbioprocessen kan det vara önskvärt att hitta en substratkombination som kan medföra att processen kan köras året runt. Dessutom behöver konceptet utökas med koldioxidinfångning och användning för att göra processen så klimatneutral som möjligt. Detta behöver undersökas vidare i kommande projekt.

Det är också önskvärt att identifiera den aktör på marknaden som skulle kunna se en affär med biovätgas. Detta skulle underlätta i kommande steg.

1 Inledning

Biogasproduktion är en väletablerad process för att behandla biologiskt avfall och till exempel rena avloppsvatten från industri och hushåll. När vatten behandlas sker detta ofta i kombination med aerob biologisk rening. Vattnet renas på organiska föreningar och gör att vattnet kan släppas ut till närliggande vattendrag utan att bidra till övergödning och förorening, men samtidigt produceras värdefull energi som antingen kan användas som energikälla tillbaka in i en industriell process eller säljas för användning som fordonsgas eller liknande.

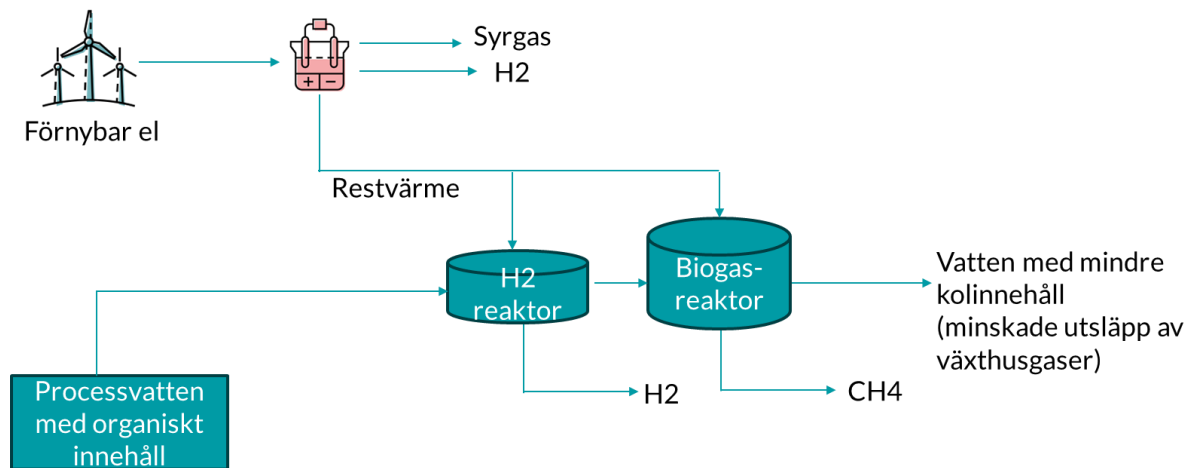
Trots att många delar av industrin har en stor efterfrågan på biogas för att kunna ersätta fossilbaserad gas i sina processer har biogasproduktion historiskt kämpat med lönsamhetsutmaningar och är till stor del beroende av styrmedel från EU och den svenska regeringen. För att uppnå klimatmålen ska sektorer elektrifieras i så stor utsträckning som möjligt, vilket också påverkar efterfrågan på biogas. Men det finns sektorer och delar av sektorer som inte går att elektrifiera, exempelvis när väldigt höga temperaturer krävs i en industriell process. Därför behövs energigaser fortsatt i energisystemet i de delar som inte kan elektrifieras. Dessutom visade energikrisen 2022-2023, med mycket höga priser på fossil naturgas och el, vikten av att hitta alternativa lösningar för att öka flexibiliteten och robustheten i energisystemet.

Här kan både biogas och vätgas bidra. Vätgas produceras idag främst från elektrolys där överskottsel från förnybara källor som vind- och solkraft spjälkar vatten för att få ut vätgas och syrgas. Detta sker med förluster om ca 30% och med mycket restvärme som en biprodukt.¹

Bioflex undersöker synergier och symbiosmöjligheter mellan biogas, biovätgas och elektrolytiskt producerad vätgas i syfte att bidra till ökad flexibilitet och robusthet i energisystemet. I tvåstegsbioprocessen har en biogasproduktion kompletterats med en till bioreaktor där vattnet först leds in och producerar biovätgas i en snabbare process. Därefter leds vattnet vidare till den vanliga biogasprocessen. Biovätgasprocessen kan ses som en typ av förbehandling till biogasprocessen, där målet är att 1) få ut mer energi totalt från processvattnet, 2) minska växthusgasemissioner från rötresten eftersom mer kolkälla har plockats ut från processvattnet samt 3) göra processen snabbare genom att kunna minska uppehållstiden i biogasreaktorn och biovätgasreaktorn.

I projektet har det utförts labb- och pilotförsök på processvatten från Nordic Sugar. Mass- och energibalanser för integration med elektrolytisk vätgas och teknoekonomiska beräkningar har också genomförts. Till sist har förutsättningar för implementering och replikering undersökts. Vi har studerat aktörskonstellationer och förutsättningar för implementering lokalt, med fokus på Eslöv och Lund med omnejd, samt analyserat hur replikerbarheten ser ut för konceptet.

¹ <https://www.iva.se/contentassets/62a4cod2e21e4b289541377c2942ad64/202205-iva-vatgasprojektet-syntesrapport.pdf>



Figur 1: Resursflöden i tvåstegsbioprocessen.

Den här rapporten summerar resultaten från alla delar av projektet. För mer detaljerade resultat hänvisas till respektive delrapport.

2 Genomförande

Genomförandet har haft ett tydligt tvärdisciplinärt angreppssätt med både labb- och pilotförsök, förenat med teknoekonomiska beräkningar, mass- och energibalanser för integration med elektrolitisk vätgas samt aktörskartläggning och scenarioanalys.

2.1 Labb- och pilotförsök

Pilotförsöken genomfördes i Indienz testanläggning där pilotförsök i liten skala kunde köras, men i industriellt relevant miljö (TRL 5).

Två typer av anaerobt inokulum användes i pilotstudien, rena bakteriestammar och en blandad odling från en biogasrötning. De rena bakteriestammarna erhöles som frystorkade kulturer från Leibniz Institute DSMZ-German Collection of Microorganisms and Cell Cultures (Braunschweig, Tyskland) och återupplivades enligt DMSZ-protokoll. Stammarna odlades genom användning av ett medium som utformats baserat på de tillväxtmedier som rekommenderas för respektive bakterier.

Det huvudsakliga substratet som användes som kol- och energikälla var processvatten från ett sockerbruk, Nordic Sugar i Örtofta, Eslöv, Sverige. Processvattnet samlades in under olika perioder från april 2022 till januari 2023. Processvattnets sammansättning var inte stabil under denna period, eftersom det vanligtvis fluktuerar under året. COD-styrkan i processvattnet är vanligtvis mellan 4 – 8 g/L, enligt Nordic Sugar. En komponentanalys av processvatten från april 2022 visade ingen signifikant mängd sockerarter och en halt på ca. 400 mg/L organiska syror. Det låga värdet beror på att vattenreningen är avstängd när betkampanjen inte körs, under stora delar av året.

Processvattnet som användes i resultaten som presenterades i pilotstudien samlades in i januari 2023 och hade en COD-styrka på 4,1 g/L. pH för processvattnet i biovätgasreaktorn hölls stabilt vid 6,8 med en syra/bas-buffert.

2.1.1 Reaktordesign

Biovätgasreaktorn (Figur 2) var en bubbelkolonntank (TBR) av metall med en total volym på 10 L, en arbetsvolym på 5 L och den var utrustad med en termisk vattenmantel för att kunna kontrollera temperaturen inuti reaktorn på ett effektivt sätt som inte krävde elektrisk värme. Reaktorn fylldes med 4,5 L plastbärare (typ AB16 och AA64) från Ingenjörsfirma Anders Löfqvist AB i Landskrona. Därefter ympades biovätgasreaktorn med inokulum och fylldes upp till 5 L volym med processvatten. Reaktorn värmdes till 65°C med varmt vatten från ett recirkulerande vattenbad. Under uppstarten av experimentet drevs reaktorn som en bubbelkolonn med N₂-sparging för effektiv massöverföring. Efter en veckas drift drevs reaktorn som en trickle bed (TBR) med gasrecirkulation från headspace till botten av reaktorn och vätskecirkulation från botten till toppen av kärlet.



Figur 2: Biovätgasreaktor (TBR)

Biogasreaktorn (Figur 3) var en continuous stirred tank reactor (CSTR) av metall med en total volym av 60 L, arbetsvolym av 20 L och en termisk vattenmantel. Reaktorns inre temperatur hölls vid 40 °C med varmt vatten från ett vattenbad.



Figur 3: Biogasreaktor (CSTR)

Under de första 5 dagarna av pilotverksamheten drevs reaktorerna separat och de matades med samma processvatten från substrattanken (1 m³ IBC tank). Under denna period sprutades N₂-gas in vid botten av biovätgasreaktorn för att gynna skapandet av biofilm på bärarna och öka massöverföringen. Från dag 6 drevs biovätgasreaktorn som en TBR, med recirkulation av gas från headspace till botten av reaktorn och vätskeåterföring från botten till headspace, utan N₂-sparging. De två reaktorerna var seriekopplade under denna period där vätskeutflödet från biovätgasreaktorn pumpades in i biogasreaktorn som inflöde. Därefter följde en period av stabilisering tills stabilt läge (steady state) uppnåddes i båda reaktorerna och pilotverksamheten avslutades efter 69 dagar.

Processvattnet förbehandlades i en värmeväxlare i 90 °C, i 4 – 5 minuter innan vattnet fördes in i biovätgasreaktorn. Det beslutades att använda denna förbehandling efter flera trial-and-error-försök att hämma den metanogena aktiviteten i processvattnet. Driftförhållandena för båda reaktorer och tidslängden presenteras i Tabell 1.

Tabell 1: Driftförhållande i pilotförsöket

Dag	HRT, Timmar		Kommentar
	Biovätgasreaktor	Biogasreaktor	
0 – 5	13,6	60,0	Biogasreaktorn matades direkt med processvatten
6 – 13	9,0	40,0	Reaktorerna kopplades i serie

Dag	HRT, Timmar		Kommentar
	Biovätgasreaktor	Biogasreaktor	
14 – 31	6,4	28,6	Instabil gasproduktion i båda reaktorer
32 – 69	4,5	20,0	Steady state

Gasprover samlades regelbundet in för analys eller analyserades med en gassensor. Vätskeproven erhöles var 24-28:e timme och de analyserades med en high pressure liquid chromatograph (HPLC)

2.2 Energibalanser och integration med elektrolytisk vätgas

En litteraturstudie genomfördes för att bedöma vilken elektrolysmo­dell som var mest lämpad att använda i integrationen med tvåstegsbioprocessen. Mass- och energibalanser över systemet beräknades och scenarier för olika uppställningar togs fram för att bedöma nyttan av de olika systemkonfigurationerna.

2.3 Teknoekonomi

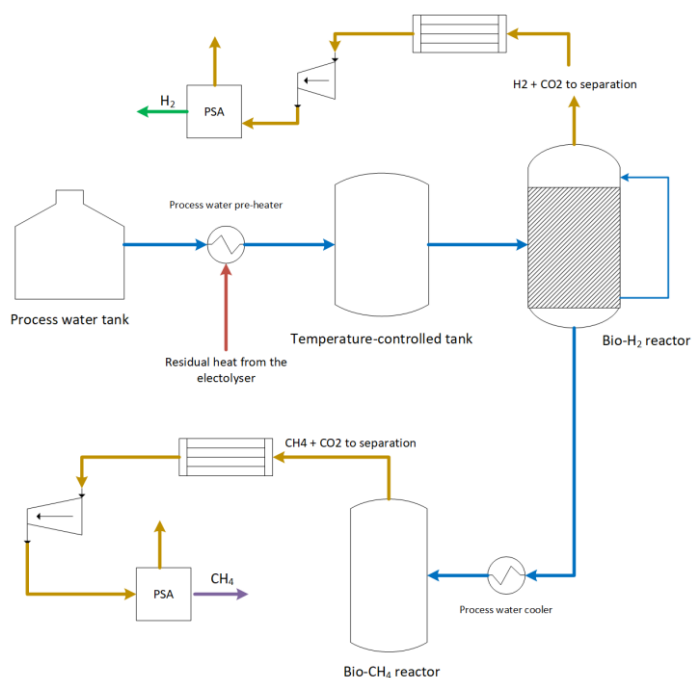
Aspen plus användes för att sätta upp systemet och beräkna teknoekonomiska förutsättningar i olika scenarier.

2.3.1 Tvåstegsbioprocess för biovätgas- och biometanproduktion

Driftförutsättningarna för tvåstegsprocessen diskuteras mer i delrapporten om lab- och pilotförsök samt teknoekonomi. Designöverbäganden för den storskaliga biovätgasreaktorn är baserade på James et al. (2009)² och Tapia-Venegas et al. (2015)³ Figur 4 visar utformningen av tvåstegsbioprocessen som ligger till grund för de teknoekonomiska utvärderingarna. Processvattnet förvärms först av restvärmen från elektrolysören och går sedan in i en isolerad, temperaturkontrollerad tank för att ge uppnå metaninhibering. En varmvattenkrets överför värme från elektrolysören till bioprocessen (visas inte i figuren). Biovätgasreaktorn är modellerad som en välblandad gas-vätskereaktor med pH- och temperaturkontroll. Den producerade biovätgasen i reaktorn kyls till 40°C och komprimeras till 21 bar uppströms genom PSA-enheten (Pressure Swing Adsorption) där biovätgasen separeras från CO₂. Nedströms från biovätgasreaktorn leds processvattnet efter kylning till metanreaktorn. Den producerade CH₄ separeras från CO₂ efter kylning och kompression i en PSA-enhet.

² James B., Baum G., Perex J., Baum K., Technoeconomic Boundary Analysis of Biological Pathways to Hydrogen Production, *National Renewable Energy Laboratory* (2009)

³ Tapia-Venegas, E., Ramirez-Morales, J.E., Silva-Illanes, F. et al. Biohydrogen production by dark fermentation: scaling-up and technologies integration for a sustainable system. *Rev Environ Sci Biotechnol* **14**, 761–785 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9383-5>



Figur 4: Design av tvåstegsbioprocessen för produktion av biovätgas och biometan

2.3.2 Elektrolyssystemet

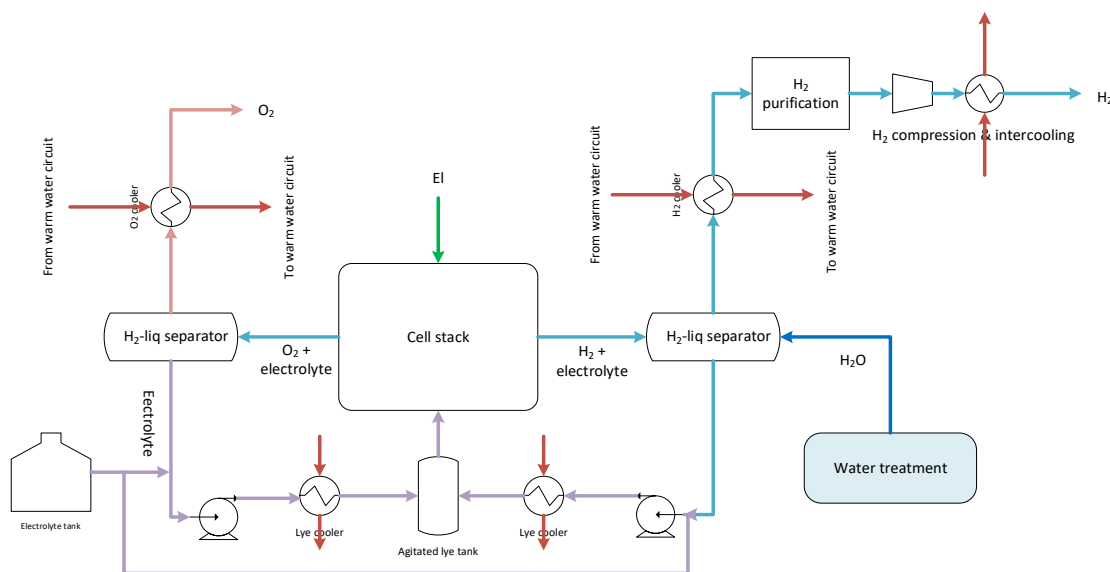
Den alkaliska vattenelektrolysören används baserat på resultaten av AP2. Utformningen av det alkaliska vattenelektrolyssystemet baseras på den kommersiella uppställningen som presenteras av Buttler och Spliethoff, (2018)⁴ och Sakas et al., (2022)⁵. Figur 5 visar systemets layout. Typiskt består en alkalisk elektrolyscell av två elektroder (t.ex. Ni-baserade) nedsänkta i en flytande elektrolyt (vanligtvis en 20-35 viktprocent vattenhaltig KOH-lösning) och åtskilda av ett poröst membran. Elektrolyten och gasmolekylerna av H₂ och O₂ som produceras av vattenuppdelningsreaktionerna separeras sedan i två slingor, där horisontella gravitationskärl för gas-vätskeseparator delar upp de två flödena i separata strömmar. Elektrolyten recirkuleras tillbaka till cellstapeln. Driftstemperaturen ligger vanligtvis mellan 60-90°C. Värme frigörs under elektrolysprocessen, och stapelns temperatur varierar med kraften till stapeln. Elektrolytttemperaturen hålls vanligtvis vid cirka 70°C. Temperaturen styrs i lut-kylarna. Strömmarna som lämnar cellstapeln antas vara vid 80°C baserat på den kommersiella AE-systemdesignen som presenteras av Sakas et al., (2022)⁶. Den separerade vätgasen kyls till sin daggpunktstemperatur för att underlätta fuktseparationen nedströms kylaren. Produkten vätgas kommer slutligen att trycksättas för att förbereda för rörledningstransport. Det antas att vätgasen kommer att trycksättas till 300 bar, vilket

⁴ Buttler A., Spliethoff H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **82**, 2440-2454 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>.

⁵ Sakas, G., Ibáñez-Rioja A., Ruuskanen V., Kosonen A., Ahola J., Bergmann O., Dynamic energy and mass balance model for an industrial alkaline water electrolyzer plant process, *International Journal of Hydrogen Energy* **47**, 4328-4345 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.126>.

⁶ Ibid

Wickström (2023)⁷ föreslår. Detaljerna i kompressionssystemet är baserade på förslag från Khan et al. (2021)⁸.



Figur 5: Flödesschema för elektrolyssystemet

2.3.3 Design av det integrerade systemet: Tvåstegsbioprocess tillsammans med elektrolys

Basdesignfallet antar dimensionerna av uppskattad fullskalig anläggning, dvs. 80 m³ biovätgas och 400 m³ biometanreaktor. Uppehållstiderna för reaktorerna baseras på de värden som använts i pilotstudien (AP1) som är 4 respektive 20 h för biovätgas- respektive biometanreaktorerna. Produktionshastigheterna för gaser (vätgas, metan och CO₂) i tvåstegsbioprocessen baseras på de stationära värden som uppnåtts vid pilottesterna. Baserat på fynden i AP1 bör processvattnet från Nordic Sugar förvärmas till 90°C i 3-5 minuter innan det går in i biovätgasreaktorn för att hämma metanproduktionen. Men eftersom maxtemperaturen i elektrolyssystemet är 80°C, används en lägre förvärmningstemperatur (75°C) uppströms fermenteringsreaktorn. Denna lägre temperatur kräver en längre uppehållstid på 30 minuter för förbehandlingen jämfört med de initiala rekommendationerna från AP1 som nämnts ovan. Andra förbehandlingsstrategier som blandning med andra substrat som innehåller syror eller en kombination av kemisk och termisk förbehandling har inte testats i detta projekt men kan vara effektiva för att hämma metanbildning. Dessa alternativ utforskas inte vidare här. Utformningen av varmvattenkretsen för värmeintegrering mellan de olika delarna av processen kan ses i bilaga för delrapport 1.

⁷ Wickström, A. Studie över restvärmens möjligheter, *RISE Research Institutes of Sweden* (2023)

⁸ Khan, M. A., Young, C., Mackinnon, C. B., & Layzell, D. B. (2021). The Techno-Economics of Hydrogen Compression. *Transition Accelerator Technical Briefs*, 1, 1–36. www.transitionaccelerator.ca

2.4 Aktörskartläggning och scenarioanalys

Arbetet har utförts med utgångspunkt i projektpartnerernas bidrag. Projektkonsortiet är noggrant sammansatt med akademi, forskningsinstitut, energibolag, kommun och demonstrationspartner. Denna bredd har skapat en bra grund för aktörskartläggning, då varje part har olika erfarenheter och ingångsvärden i konceptet. Projektinterna workshops fokuserade på aktörskartläggning där nyckelspelare och associerade organisationer identifierades. Utifrån aktörskartläggningen var det möjligt att identifiera vilka aktörer som skulle vara värdeskapande att djupintervjua. Intervjuerna täckte stora delar av värdekedjan och fokuserade främst på symbiosmöjligheter och de lokala förutsättningarna som finns i och kring Eslöv. Kravspecifikation på plats och andra förutsättningar som måste finnas på plats undersöktes också. Tillsammans med resultaten från aktörskartläggningen och djupintervjuerna kunde en scenarioanalys göras där replikerbarheten av olika uppställda scenarios analyserades.

3 Resultat

3.1 Labb- och pilotförsök

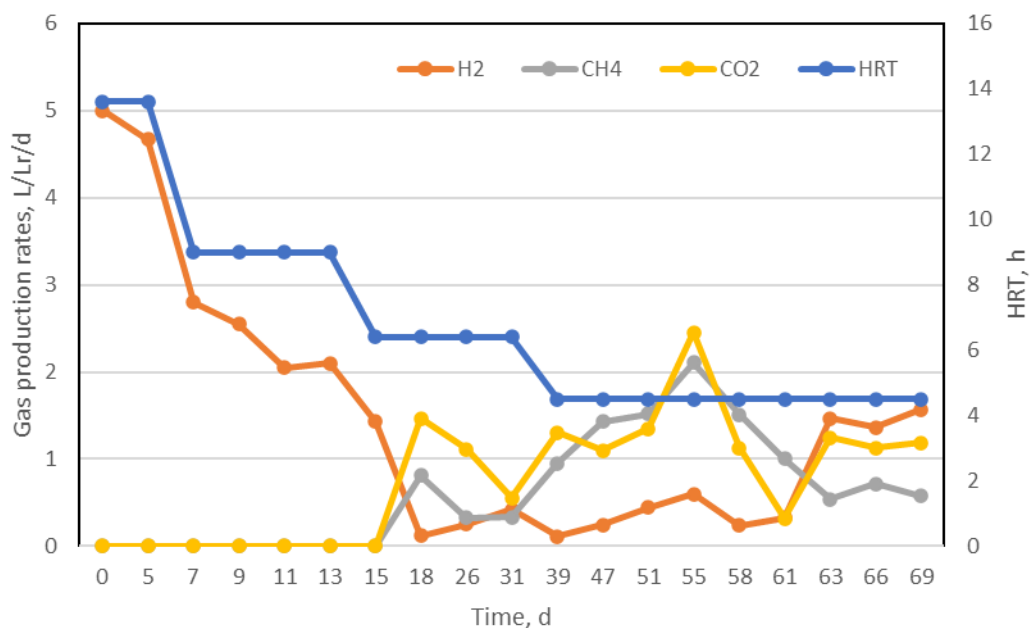
Labbförsöken kördes i 3 månader med syfte att identifiera vilka bakteriestammar som kan omvandla processvatten från sockerindustrin till biovätgas och biogas. Resultatet visade att biovätgasproduktionen är högre i reaktorer med rena bakteriestammar, men i praktiken är uppskalningen av processen utmanande då det blir svårt att nå sterila förhållande efter en lång tidsperiod. Resultaten som presenteras i denna rapport genererades med blandade bakteriestammar (enriched culture) som innehöll både rena och blandade kulturer.

Pilotförsöken demonstrerade produktionen av biovätgas och biogas (metan) i två seriekopplade reaktorer på TRL 5. Arbetet var uppdelat i två tidsperioder. Den första perioden med varaktighet från oktober – december 2022 användes för att testa olika uppsättningar, förbehandlingsmetoder och driftförhållanden för systemet. Resultaten som presenteras här genererades under den andra perioden mellan januari – april 2023.

Gasproduktionshastigheterna för biovätgas, metan och koldioxid presenteras i Figur 6 och Figur 7 i förhållande till tid och HRT. Gasproduktionshastigheterna som observerades i detta arbete var liknande eller till och med högre jämfört med andra tidigare studier. Den högsta biovätgas- och metanproduktionshastigheten som erhöles, i stationär drift, var 1,57 respektive 0,91 L/Lr/d dag 69 och 66. Det kan noteras att från en total produktionshastighet på 0,91 L/Lr/d av metan, producerade ca. 0,7 L/Lr/d i biovätgasreaktorn och 0,21 L/Lr/d i biogasreaktorn. En annan studie om produktion av biovätgas från hydrolyserad sockerrörs-bagasse (SCB) av *Clostridium butyricum* rapporterades en högsta biovätgasproduktion på 1,6 L/Lr/d, vid pH 5,5⁹. En annan studie som använde oxid/grafen nanokompositkatalysatorer i en mikrobiell elektrolyscell för att förbättra produktionen av biovätgas från sockerindustrins

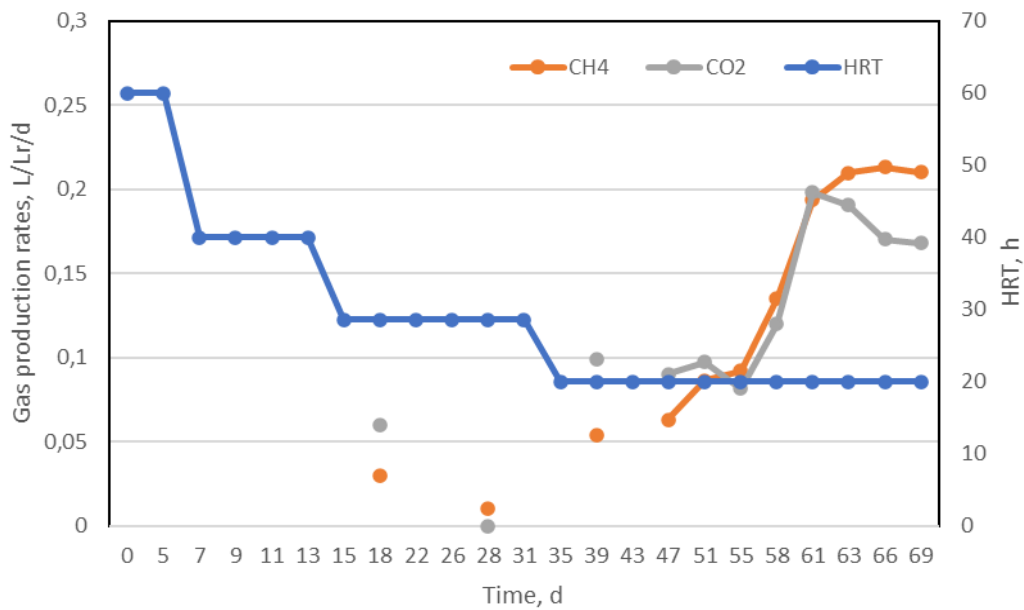
⁹ Pattra, S., et al., *Bio-hydrogen production from the fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate by Clostridium butyricum*. International journal of hydrogen energy, 2008. **33**(19): p. 5256-5265.

avloppsvatten, rapporterades en högsta produktion på ca. 0,1 L/Lr/d¹⁰. Biovätgasproduktionen var högre i början av experimentet på grund av N₂-sparging som skapade hög massöverföring i systemet. Omrörningstekniken med N₂ avslutades därför att det fanns utmaningar med gasläckage och höga driftskostnader. Efter detta driftades biovätgasreaktorn som en TBR och vätgasproduktionen minskade. En annan anledning till hög biovätgasproduktion under dag 0 – 5 var att det fanns rester av kolkomponenter i inokulum. Efter dag 63 nådde både biovätgas- och biogasproduktion stabilt läge och detta ger en indikation om hur lång tid ett liknande system behöver för att stabilisera sig.



Figur 6: Gasproduktionshastigheter i L per L working volume och dag (L/Lr/d) i jämförelse med uppehållstid i h (HRT) från biovätgasreaktorn, vid 65 °C.

¹⁰ Jayabalan, T., et al., *Enhancing biohydrogen production from sugar industry wastewater using metal oxide/graphene nanocomposite catalysts in microbial electrolysis cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 2020. **45**(13): p. 7647-7655.



Figur 7: Gasproduktionshastigheter i L per L working volume och dag (L/Lr/d) i jämförelse med uppehållstid i h (HRT) från biogasreaktorn, vid 40 °C.

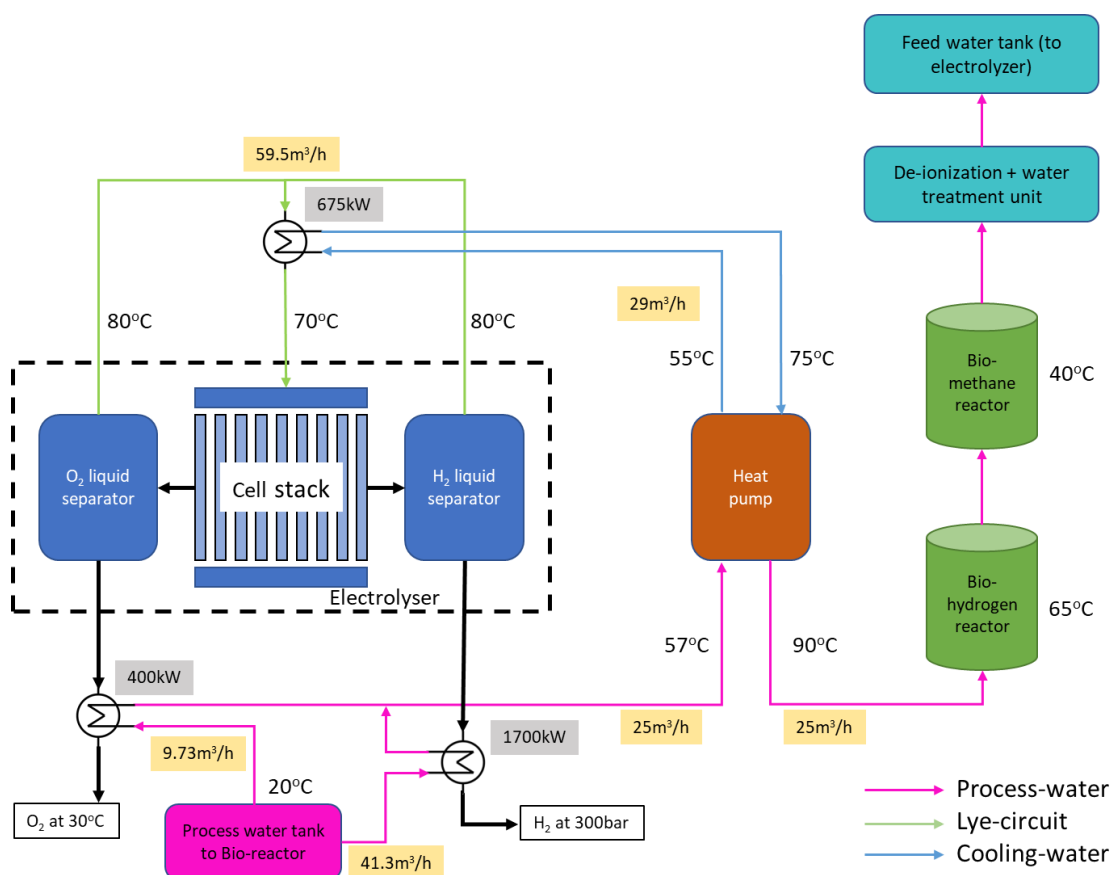
3.2 Jämförelse av energidata från pilotförsök

Utifrån pilotförsöken fick vi ut produktionshastigheter av biovätgas och biogas i de två reaktorerna. Genom beräkningar där en linjär uppskalning har tillämpats och jämförts med energiproduktion per dag i Nordic Sugars befintliga biogasanläggning kan vi se att tvåstegsbioprocessen potentiellt kan generera ca 20-30% mer energi ut totalt från första reaktorn när biovätgas och biogas samproduceras. I det här fallet får vi ut ungefär lika mycket biogas från de två reaktorerna som vid normalfallet, men mer energi adderas eftersom vätgas också produceras. Upphållstiden i biogasreaktorn har kunnat minskas med några timmar, pilotförsöken körde på en uppehållstid på 20h, medan Nordic Sugars normalfall är ca 1 dygns uppehållstid. Den stora skillnaden i uppehållstid fås i biovätgasreaktorn där försöken kördes med en uppehållstid på 4,5h vid stabilt läge. Detta innebär processen är mycket snabbare i jämförelse med en biogasprocess och därav kan mindre reaktorer användas.

3.3 Energibalanser och integration med elektrolytisk vätgas

3.3.1 Mass- och energibalanser

Tre scenarier undersöktes, 1) Bioflex-konceptet där tvåstegsbioprocessen integreras med en elektrolys 2) enbart elektrolys kör där värmen används av ett lågtempererat fjärrvärmenät 3) enbart elektrolys kör och värmen används i ett högtempererat fjärrvärmenät. I den här rapporten presenteras resultaten för det första scenariot eftersom det motsvarar projektets koncept.



Figur 8: Processflöde över det integrerade konceptet med tvåstegsbioprocess kombinerad med elektrolys med enbart en värmepump

Projekt HyCoGen demonstrerar återvinning av värme från en 20 MW elektrolysör som producerar 400 kg/h vätgas. Figur 8 visar en möjlig layout för samverkan av bioprocessreaktorer med en mindre alkalisk elektrolysör på 5 MW med HyCoGen som referens¹¹. Fall 1 föreslår att värmeextraktionen är möjlig från elektrolysören för alla tre strömmar: vätgasström, syrgasström och elektrolytcirkulationsströmmarna runt stapeln. Värmeåtervinningen från cellstapeln görs genom en separat kylvattenslinga som körs med höga massflöden för att upprätthålla temperaturskillnaden över stapeln¹². Vidare används detta kylvatten i värmepumpen för att överföra värmen till processvattnet innan det går in i biovätgasreaktorn vid 90°C.

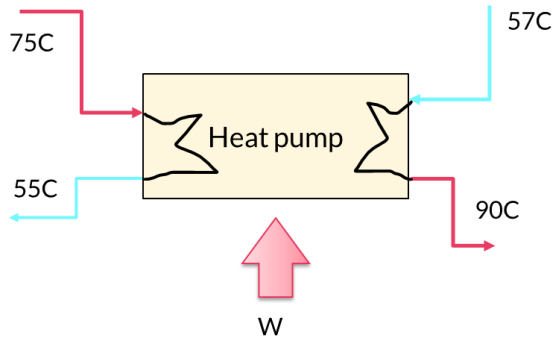
Under betkampanjen mellan september och januari används restvärmen från syrgas- och vätgasströmmarna till förvärmning av processvattnet och därefter i värmepumpen. Denna situation går bra med fall 1 när både bioreaktorerna och elektrolysören är i drift. Restvärmen från vätgasströmmen kan utvinnas från flera steg såsom vätgasreningssystem, första stegets kompression vid 1-30 bar och andra stegets kompression vid 30-300 bar. En kumulativ kylbelastning på 850 kW modelleras för vätgasströmmen och 200 kW för syrgasströmmen efter att de passerat genom

¹¹ RISE, "Hycogen: Systemperspektiv för effektiv produktion och användning av vätgas via koppling till fjärrvärme," RISE Research Institute of Sweden, 2023.

¹² Silhorko-Eurowater – A Grundfos Company, "Water treatment for green hydrogen: what you need to know," Hydrogen tech world, October 2022. [Online]. Available: <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>. [Använd 2023].

vätskeseparatorerna. Återcirkulationsslingan till elektrolysörstapeln strömmar vid 70°C genom en omröringsprocess¹³.

Genom att använda en kylvattenkrets för att utvinna värme från lutcirkulationsslingan kan kylvattentemperaturen stiga till 75°C. För att uppnå detta utbyter kylvattnet värme vid anod- och katodelektrolytåtercirkulationsslingorna vid höga massflödes hastigheter. Figur 9 visar värmeväxling mellan strömmar i värmepumpen.



Figur 9: Energibalans för värmepump

Uppvärmning som krävs för processvattnet (57 till 90°C) $Q_H = \dot{m}_{\text{process}} C_p \Delta T$

Om man antar att C_p för processvattnet är något mindre än rent vatten 4 kJ/kgK och densiteten är 1030 kg/m³. För att uppnå en HRT på 40h i biometanreaktorn, $\dot{m}_{\text{process}} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ eller 7,15 kg/s för en reaktorvolym på 1000 m³.

Värmebehov = $Q_H = 7.15 \cdot 4 \cdot (57 - 90) = 943.8 \text{ kW}$

$$\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \frac{\dot{Q}_H}{COP} \rightarrow \dot{Q}_H = \frac{COP \cdot \dot{Q}_L}{COP - 1}$$

..... Eqn.[x]

$$\dot{W} = Q_H - Q_L = \frac{Q_H}{COP}$$

Vid COP = 3.5 för värmepumpen, är det ingående värmebehovet för värmepumpen beräknat enligt ekvation [x], as $W = 943.8/3.5 \text{ kW} = 269.6 \text{ kW}$

Kylbehovet är $Q_L = Q_H - W = 943.8 - 269.6 = 674.2 \text{ kW}$

Massflödes hastigheter för kylvattnet kan beräknas från ekvationen,

$$Q_L = \dot{m}_{\text{coolingwater}} C_p \Delta T$$

$\dot{m}_{\text{coolingwater}} = 29.0 \text{ m}^3/\text{h}$ or 8.06 kg/s

Värmekapacitet för Lut = 3,101 kJ/kg K (vid 30 % aq.KOH)¹⁴, densiteten för Lut är 1309,7 kg/m³. Genom att använda den ackumulerade kapaciteten hos värmeväxlaren som krävs mellan Lut-kylvätska vattenövergången erhålls till 675 kW. Detta kommer att implementeras som två värmeväxlare vardera för anod- och katodåtercirkulationsslinga

¹³ V. A. J. J. Md Rizwan, "Design considerations for industrial water electrolyzer plants," *International Journal of Hydrogen energy*, pp. 37120-37136, 2021.

¹⁴ Ibid

med samma kapacitet, dvs, 350 kW. Massflödes hastigheten i lutcirkulationsslingan upprätthålls med centrifugalpumpar. Förbrukningen av ultrarent vatten för elektrolysörer enligt¹⁵ är 0,2 m³/h för 1 MW elektrolysör och ca 9 L/kg vätgas. I den nuvarande anläggningen krävs 1 m³/h ultrarent vatten för att en 5 MW elektrolysör ska producera 100 kg H₂/h.

Socketbetskampanjen är från september till januari och inställningstiden för att nå steady state är cirka 60 dagar för uppstart i pilotskala. Det antas att systemet når stabilt läge snabbare vid installation i fullskala.

Kompressorbelastningen antas vara 0,2 MW för varje steg av kompression av vätgas från 1-30 bar och 30-300 bar. Pumpbelastningen antas vara cirka 0,1 MW i systemet. Elektrolysörbelastningen varierar över åren på grund av försämring och ineffektivitetsavvikelsen antas vara 20 %, därför är elektrolysörens belastning mellan 5 MW och 6 MW.

Tabell 2: Energibalans för scenario 1

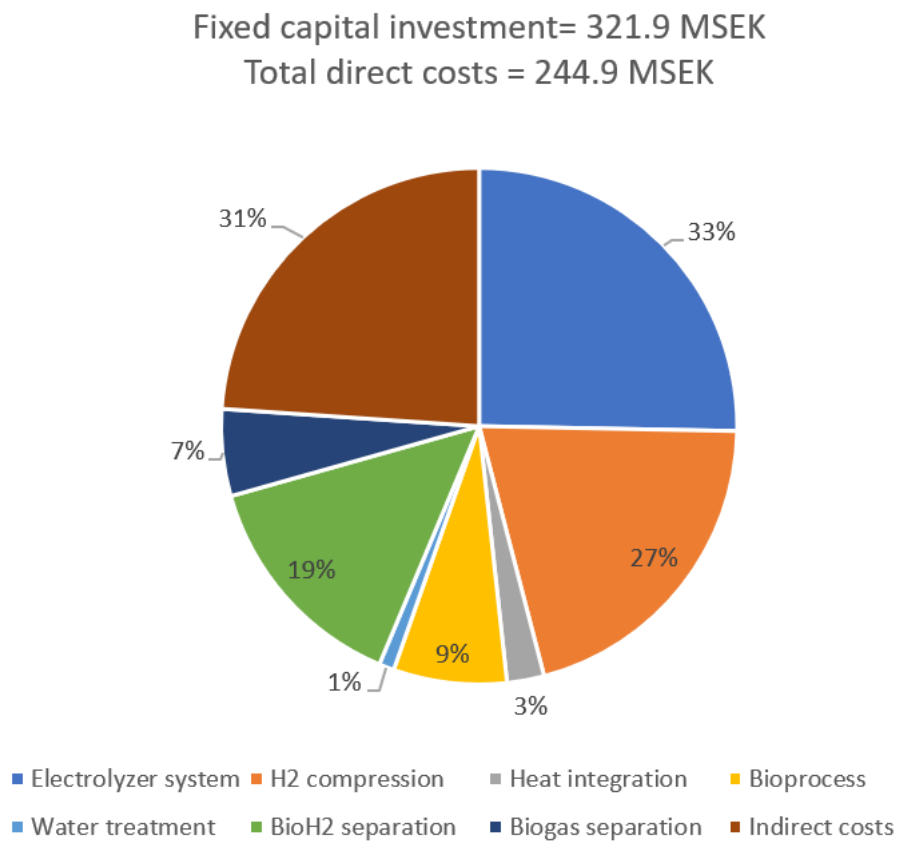
Electrical loads	(MW)	Description	(MW)	Losses	(MW)
Electrolyser load	5	Hydrogen produced HHV	4	Loss to environment	0.5
Pumps	0.1	Heat recovered Oxygen stream	0.2	Oxygen 30-20C	0.15
Compressor loads	0.4	Heat recovered Hydrogen stream	0.85	Loss to ambient from heat pump	0.05
Heat pump	0.26	Heat obtained from heat pump	0.943		
Misc.	0.35	Heat recovered from Electrical equipment cooling	0.1		
		Heat pump cooling	0.267		
		Total	6.39		0.7
		Efficiency	89%		

Effektivitet = 89% (BOL)

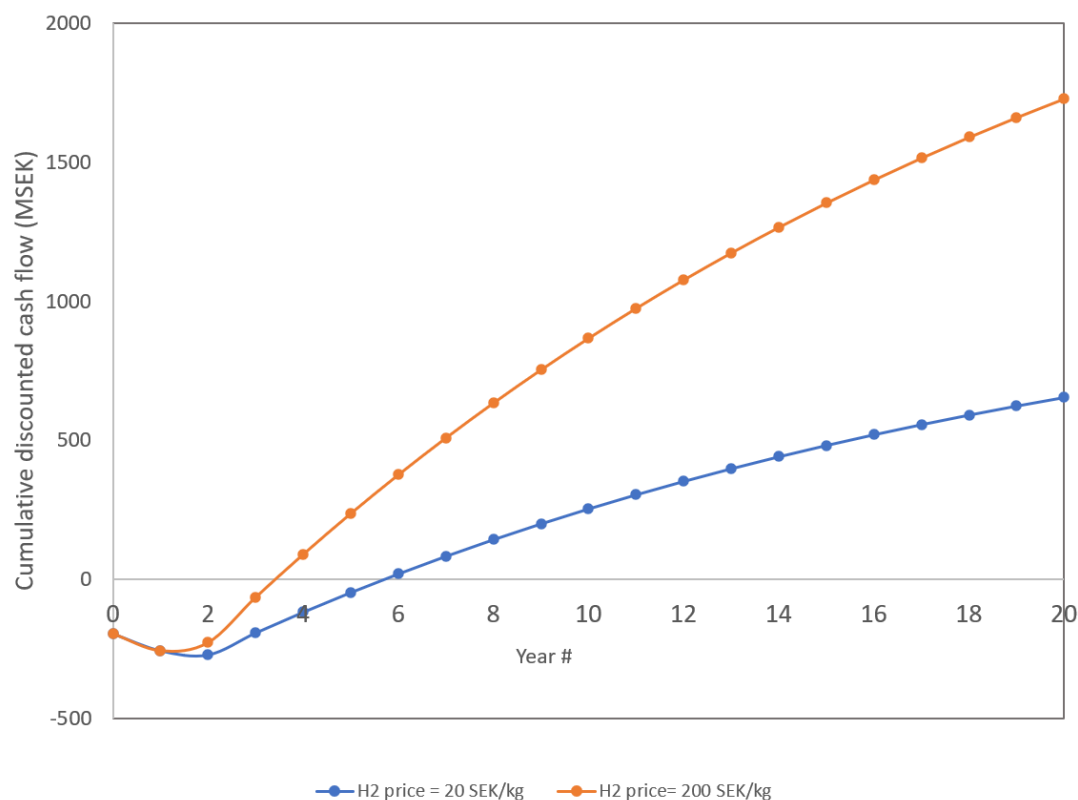
¹⁵ Silhorko-Eurowater – A Grundfos Company, "Water treatment for green hydrogen: what you need to know," Hydrogen tech world, October 2022. [Online]. Available: <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>. [Använd 2023].

3.4 Teknoekonomi

Nedan presenteras kostnaderna för det integrerade systemet på studienivå för basfallet. Bidraget från varje del av den integrerade processen till den totala kapitalkostnaden för processen visas i Figur 10. Systemets installerade kostnad domineras av elektrolysören och vätgas-kompressionssystemet, som bidrar till 55 % av den totala kapitalkostnaden, och lägger till upp till ca 245 MSEK. Den beräknade driftskostnaden är 37 MSEK/år och el är den största bidragsgivaren (75%), medan resten domineras av underhållskostnaden (särskilt av kompressorerna). Den beräknade utjämnade kostnaden för vätgas och biometan är 42 respektive 1880 kr/kg. Figur 11 visar det kumulativa diskonterade kassaflödet upp till 20 år från investeringen.

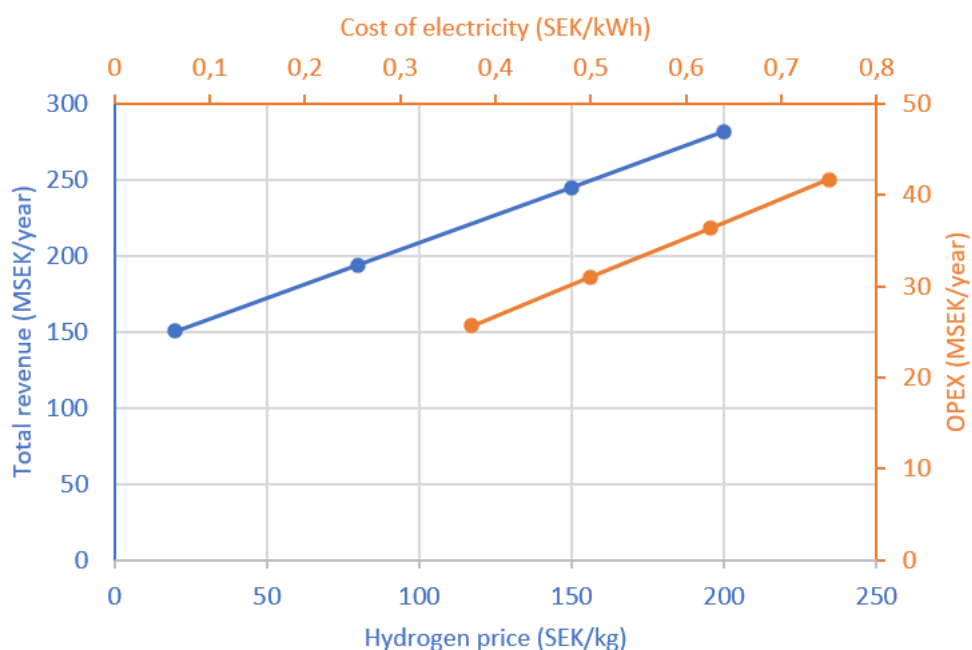


Figur 10: Kapitalkostnader allokerade för varje del av det integrerade systemet



Figur 11: Kumulativ diskonterat kassaflöde för två olika försäljningspriser av vätgas

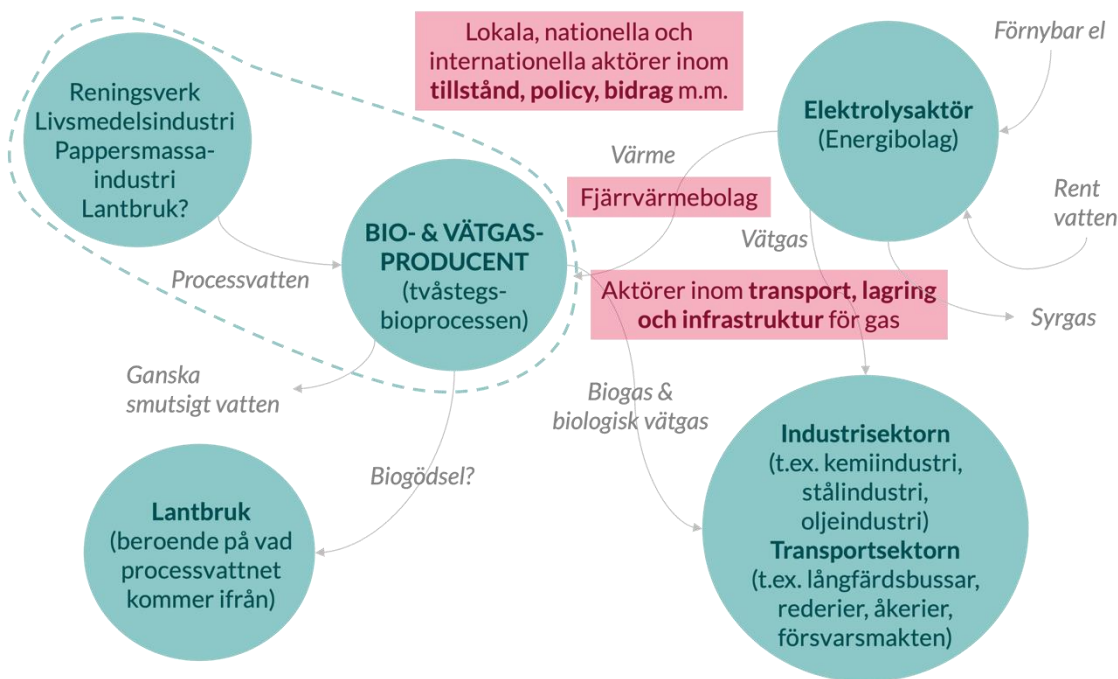
Intäkterna är i hög grad beroende av priset på vätgas. Det högsta priset för vätgas (200 kr/kg) ger en återbetalningstid på 4 år medan det lägsta priset (20 kr/kg) ger en återbetalningstid på 6 år för investeringen. Figur 12 nedan visar hur intäkterna och driftskostnaderna förändras med priset på vätgas och el.



Figur 12: Förändring i totala intäkter och OPEX genom försäljningspriset av vätgas och elektricitet respektive

3.5 Aktörskartläggning och scenarioanalys

Aktörskartläggningen visar på ett komplex system med många möjliga aktörer. Figur 13 illustrerar de olika identifierade aktörerna som behövs och möjliga samspel för ett framgångsrikt koncept.



Figur 13: Aktörer och resursflöden som är relevanta för en symbios mellan produktion av biogas och biovätgas med tvåstegsbioprocessen samt produktion av vätgas med elektrolys.

3.5.1 Intervjustudie

Från aktörskartläggningen identifierades ett antal aktörer som skulle vara intressanta att intervjua för att få en så bra förståelse som möjligt över systemet och täcka stora delar av värdekedjan. Aktörerna som intervjuades representerade substrattillhandahållare/behov av vattenrening (Nordic Sugar och VA Syd), slutanvändare (Gasum och Energigas Sverige), distributör (Krafringen gasnät), elektrolysaktör (Krafringen), teknikleverantör (Gasum) och kommun (Eslövs kommun). Resultaten från intervjustudien presenteras nedan.

3.5.1.1 Samarbete och placering

Det finns en stark önskan om att samarbeta mellan olika aktörer i värdekedjan, speciellt poängterar flera intervjupersoner att det är viktigt att samarbeta för att ta ner den ekonomiska risken när en ny process ska testas och implementeras. Krafringen lyfter t.ex. att de inte behöver äga och bygga elektrolys själva, eftersom de inte kan stå för risken själva, men gärna vill vara med. På liknande sätt resonerar VA Syd kring att det vore intressant att ha en extern aktör som jobbar på deras anläggning och att det kanske kan vara bättre att den aktören står för risken och att mycket då skulle kunna hända på kort tid. Samtidigt ökar komplexiteten när det är flera aktörer som ska samverka och när det finns beroenden mellan olika delar i processerna, vilket också pekas ut som en risk.

Exempelvis skulle det finnas risker i en symbios mellan tvåstegsbioprocessen och elektrolys om elpriserna är så höga att det inte är värt att köra elektrolysen. Samarbete anses alltså i det här fallet både kunna minska och öka risker.

Det finns redan idag flera exempel på lokal samverkan inom energiområdet, t.ex. mellan Eslövs kommun och Krafringen samt Krafringen och Nordic Sugar. Detta anses också vara viktigt för framtiden. Samtidigt är det utifrån intervjuerna oklart vilken aktör som skulle kunna vara drivande i att implementera just tvåstegsbioprocessen i symbios med elektrolys, och ytterligare intressenter skulle antagligen behöva involveras. Däremot verkar det finnas ett intresse av att utforska uppskalningsmöjligheter i nya forsknings- och demonstrationsprojekt där de ekonomiska riskerna initialt är lägre än fullskaliga investeringsprojekt.

För att skapa en symbios med de resursflöden vi har undersökt finns det dessutom geografiska aspekter på samverkan att ta hänsyn till. Att ta hand om syrgasen som uppstår vid elektrolys bedömdes t.ex. vara nödvändigt att göra i nära anslutning till elektrolysen för att det ska vara lönsamt. Närhet till processvattnet är också avgörande, eftersom det skulle vara dyrt att transportera. Därför är just reningsverk eller industrier med processvatten intressanta platser för implementering. I och kring Eslöv är det också svårt att hitta ny mark att bygga anläggningar på eftersom bristen på naturmark redan är stor och för vätgasanläggningar har man t.ex. ställt sig positiv till lagring av vätgas på befintlig industrimark. Att använda befintlig industrimark för vätgasproduktion är också något som Krafringen ser ekonomiska fördelar i, eftersom man kan dra nytta av befintlig infrastruktur som vattenledningar, inhägnat område, asfalterade ytor etc. Detta stärker synen på att samarbete mellan olika aktörer kan vara gynnsamt även för att minska nyinvesteringskraven i grundläggande infrastrukturer.

VA Syd skulle ha fysisk plats för en ny reaktor för tvåstegsbioprocessen på några av sina befintliga anläggningar, där det också kan finnas ett värde i att komplettera anläggningen för att inte behöva fackla bort gas när det finns en överproduktion av gas som gasnätet inte kan ta emot. Om tvåstegsbioprocessen också ska ske i symbios med elektrolys tillkommer antagligen ytterligare krav, och funderingar fanns kring vilka säkerhetskrav som gäller för vätgas på utrustning, skyddsavstånd och transport.

3.5.1.2 Produktion

Produktionsmässigt skulle en tvåstegsbioprocess innebära ett antal olika justeringar i befintliga processer om den skulle implementeras hos exempelvis VA Syd. Det skulle bland annat krävas ändrade tillstånd och utökade säkerhetsrutiner för att hantera vätgas, men också en justering i de mikrobiella kulturer som används där det krävs nya stammar för att producera biovätgas. Tvåstegsbioprocessen innebär också att det blir ett nytt processteg som ska skötas som producenten måste avsätta resurser till. Det rör sig om en investeringsfråga, men VA Syd skulle gärna vilja nyttja det som idag luftas bort i utjämningsbassängerna och de har redan tidigare tittat på möjligheten att kunna ändra om i processen för att få större resursutnyttjande. VA Syd påpekar också vikten av att undersöka hur tvåstegsbioprocessen påverkar det slam som bildas. Samtidigt ses en stor potential i att kunna ta in fler restströmmar och att nyttja restströmmarna på ett bättre sätt.

Hos Nordic Sugar börjar maxkapaciteten för produktion att nås, även om de ser möjligheter till en viss utökning. Därför skulle en tvåstegsbioprocess där mindre

reaktorer kan användas för att få ut mer energi vara en möjlig lösning att titta vidare på för att öka produktionskapaciteten i befintliga anläggningar. Här finns det även restvärme som potentiellt skulle kunna styras om från andra applikationer för att nyttjas i tvåstegsbioprocessen, vilket därmed skulle minska behovet av symbios med elektrolytisk vätgas. Enligt Energigas Sverige kan avsättning av restvärme till en tvåstegsbioprocess generellt vara intressant även för andra aktörer på marknaden.

Kraftringen lyfter att en svårighet i hantering av vätgas är att den inte går att odörisera, vilket potentiellt skulle kunna vara en säkerhetsrisk i en tvåstegsbioprocess om det innebär att det är svårare att upptäcka läckage i jämförelse med en biogasprocess. Om däremot vätgas blandas in i biogasen för att nyttjas på gasnätet är detta inget problem. Risker kopplat till säkerhet för vätgas generellt betonas av Energigas Sverige. Det är viktigt med förebyggande arbete för att undvika olyckor. Energigas Sverige påpekar att alla bränslen är farliga om man hanterar dem fel, men i Sverige är allmänheten inte så vana vid gas, vilket kan påverka acceptansen för utbyggnad av bland annat nya gassatsningar.

3.5.1.3 Avsättning och affär

Det finns olika möjligheter för hur gaserna kan avsättas och vilka affärer som är intressanta och inte för de olika aktörerna, mycket beroende på hur man jobbar idag. Till exempel så bygger Gasums affärsmodell på att sälja metanmolekyler, vilket innebär att en tvåstegsbioprocess inte primärt är intressant eftersom vätgas inte är en del av deras affärsmodell. Det skulle kunna bli intressant om det finns en stor lönsamhetsmöjlighet där det blir ett signifikant ökat energiutbyte och om vätgasen kan reformeras (omvandlas) till metan eller om det möjliggör användning av fler substrat.

På liknande sätt är Nordic Sugars huvudsakliga intresse i tvåstegsbioprocessen om det går att få ut mer energi totalt. Nordic Sugar är också främst intresserade av en ökad metanproduktion, för att kunna använda detta direkt i sin process. Om en ökad metanproduktion kan uppnås med tvåstegsbioprocessen minskar behovet av inköpt gas från externa aktörer. Det kan i framtiden bli aktuellt att använda även vätgas i processen, men detta kräver ombyggnation av befintlig infrastruktur på platsen vilket kan vara svårt att få lönsamhet i för en verksamhet som Nordic Sugar som bara är i driftsfas en tredjedel av året.

För VA Syd skiljer sig förutsättningarna för affärer kring biogas och vätgas delvis jämfört med kommersiella aktörer. Deras affärsmodell bygger inte på att sälja gas utan på att rena vatten. Det ger VA Syd något större frihet i att utforska alternativa lösningar om detta kan motiveras utifrån andra värden än lönsamhet, men de ekonomiska aspekterna är också betydelsefulla. För VA Syd skulle det finns möjlighet till en större affär genom tvåstegsbioprocessen om det innebär att de har möjlighet att ta in mer restströmmar för rening och kan utöka sin verksamhet. Detta skulle kräva utökade tillstånd, vilket det av andra anledningar ändå finns planer för under 2024 eller 2025.

Biogasproduktionen från VA Syd går idag in på det lokala gasnätet. Kraftringen ser att det skulle vara möjligt att också blanda in vätgas i metangasen, men här är det viktigt att ta hänsyn till de fysikaliska egenskaperna hos de båda gaserna så att kvaliteten hos gasmixen inte påverkar slutanvändaren. Vätgas har ett högre energivärde per kilo, men lägre per volym. Detta innebär att när vätgas blandas in i en gasledning blir värmevärdet lägre och kan vid en för stor inblandning göra gasen svår att använda med kundernas

befintliga utrustning. Upp till 5% inblandning av vätgas i gasnätet bör dock inte vara något problem, förutom om det finns kunder som använder gasen som råvara, t.ex. inom kemiindustrin. Om vätgas skulle blandas in i gasnätet blir prissättning en utmaning, eftersom biogas och fossil naturgas som matas in i gasnätet idag prissätts utifrån naturgaspriset och därmed skulle också vätgasen behöva prissättas utifrån naturgaspriset och inte utifrån det aktuella marknadspriset för vätgas.

Ett alternativ till att använda gaserna internt eller transportera via gasnät är att komprimera gaserna för att de ska ta mindre plats och kunna transporteras iväg med lastbil eller liknande. VA Syd har redan övervägt detta för att kunna transportera bort biogas om produktionen är för stor för gasnätet, men det är svårt att veta om detta är lönsamt. I samband med detta skulle gaserna kunna uppgraderas till fordonsgas, där koldioxid tas bort. Krafringen lyfter att prisbilden för användning till drivmedel är bättre jämfört med avsättning inom industrin. Samtidigt minskar efterfrågan lokalt på metandrivna lätta fordon i och med elektrifieringsstrategin som finns i flera kommuner och regioner. I Eslöv finns exempelvis en strategi att alla lätta fordon i kommunens regi ska elektrifieras och biogasfordon ska fasas ut.

3.5.1.4 Beredskap och resiliens

I Eslövs kommun finns ett generellt beredskapsfokus, vilket inkluderar energifrågor. En viktig fråga är hur man kan få robusthet i systemen när det finns väldigt många konsumenter och få producenter. Krafringen lyfter att framtidens energiförsörjning inte bör bestå av stora anläggningar eftersom det ökar sårbarheten i energisystemet. Här kan exempelvis biogas ha en roll att spela i att vara en del av framtida lokala lösningar i mindre skala. En annan aspekt kopplat till samhällets resiliens är att det kan underlätta för t.ex. industrier om de har möjlighet att använda olika energikällor, som vätgas och biogas, och byta mellan dessa beroende på tillgång och pris. Energigas Sverige exemplifierar att detta görs redan idag, där vissa industrier vid behov snabbt kan gå från fossil naturgas till gasol. De ser också att flexibilitet skulle kunna bestå i att kunna reformera gaser, t.ex. biogas till vätgas, för att möta variationer i behov på tankstationer och liknande.

3.5.1.5 Policyutmaningar

En återkommande utmaning som lyfts i många intervjuer är frågan kring regelverk och policy. Flera aktörer upplever att förutsättningar på nationell nivå snabbt kan ändras, vilket gör det svårt att planera långsiktigt. Långsiktighet är viktigt för att kunna göra satsningar, och enligt en intervjuperson är det till och med viktigare med långsiktiga spelregler än att styrmedel är perfekt utformade. Det finns också frågetecken kring policy på EU-nivå bland aktörerna och hur den kommer att implementeras i Sverige. Osäkerheter som nämns på nationell och EU-nivå, som påverkar möjligheten att planera långsiktigt, är bland annat hur det blir med politiska stöd som produktionsstöd och skattebefrielse för biogas, om biovätgas kommer att kunna klassas som hållbar och om fossila alternativ kommer att stöttas eller inte i framtiden.

Lokala förutsättningar spelar också stor roll och kan ändras om det politiska styret ändras. En aktör påpekar att det är viktigt att politiker får möjlighet att förstå vad olika alternativ innebär. Energifrågor är generellt viktiga i Eslövs kommun, som haft problem med genomförande av planer på grund av kapacitetsbrist i elnätet. Aktörerna som

intervjuades upplevde att det finns goda förutsättningar att få politiskt stöd från både Eslövs kommun och Lunds kommun för att testa nya lösningar som bidrar till energiomställningen. I Eslöv har kommunen t.ex. varit med och finansierat biogasproduktion på Ellingeverket som drivs av VA Syd. Samtidigt styr region Skåne mot ökad elektrifiering inom kollektivtrafiken, snarare än att fortsätta med biogas eller satsa på vätgas, vilket inte bidrar till att driva bio- och vätgasproduktion lokalt.

3.5.2 Scenarioanalys

Utifrån resultaten från aktörskartläggningen och intervjuerna identifierades 7 olika scenarier för aktörssammansättning och roller i olika symbioslösningar. Nedan beskrivs scenarierna kortfattat.

Scenario 1: Egenanvändning av biogas och biovätgas. En industriaktör som själv håller i tvåstegsbioprocessen och kan använda sina egna restströmmar för denna. Industrin kan sedan använda den producerade biogasen och biovätgasen i sin verksamhet och är alltså inte i behov av några andra aktörer för någon del i processen. Upplägget är enkelt med det kräver en industri som har förutsättningar att använda båda gaserna.

Scenario 2: Egenanvändning av biogas, försäljning av biovätgas. Här sköts tvåstegsbioprocessen precis som i scenario 1 av en industri som redan producerar och använder biogas från sina restströmmar, men med skillnaden att biovätgasen säljs istället för att användas internt. För biogasproducenten innebär det en ny inkomstström. Samtidigt kan biogasproducenten behöva hitta ett fungerande samarbete med en annan aktör som ska sköta biovätgasaffären om biogasproducenten inte vill sköta detta själv.

Scenario 3: Egenanvändning av biogas och försäljning av biovätgas, i symbios med elektrolys. Detta scenario utökar scenario 2 med en symbios med en elektrolysaktör som hanterar transport och försäljning av både vätgas producerad med elektrolys och biovätgas. Aktörerna kan utbyta resurser med varandra, där t.ex. restvärme från elektrolysen kan värma bioprocesserna. Det behövs dock tas i beaktning att elektrolysen kan stängas ner vid höga elpriser, så tvåstegsbioprocessen kan inte vara beroende av endast restvärme som värmekälla.

Scenario 4: Reformering av biovätgas till biogas. Industrier eller producenter som bara är intresserade av biogas skulle ändå kunna nyttja tvåstegsbioprocessen för att få ut mer biogas genom att reformera den producerade biovätgasen. Detta skulle innebära en enklare affärsmodell med större replikerbarhet eftersom endast en produkt produceras till slut. Det behöver undersökas om det är lönsamt att kombinera tvåstegsbioprocessen med reformering, även om resursutnyttjandet från tillgänglig biomassa ökar.

Scenario 5: Två producenter som säljer biogas respektive biovätgas. Två aktörer hanterar tvåstegsbioprocessen tillsammans och ansvarar sedan själva för försäljning av var sin av gaserna. Tydliga avtal krävs då mellan de två producenterna som reglerar bland annat fördelning av kostnader kopplade till substratet och markanvändning.

Scenario 6: En producent som säljer biogas och biovätgas genom gasnätet. En aktör hanterar tvåstegsbioprocessen och säljer sedan både biogas och biovätgas

blandat på gasnätet. Detta kan vara ett alternativ i de fall det finns befintlig infrastruktur för gas och användarna på gasnätet klarar av en liten inblandning av vätgas. En fråga är dock kring lönsamheten i att blanda in vätgas på biogasnätet, men det skulle kunna vara ett första steg i de fall det inte finns en lämplig vätgasmarknad ännu.

Scenario 7: En producent som säljer biogas, försäljning av biovätgas i symbios med elektrolys. En aktör producerar biogas som säljs medan en annan aktör säljer och distribuerar biovätgas, på samma sätt som i scenario 5 men vätgasproducenten producerar även vätgas med elektrolys. När symbiosen inkluderar elektrolys blir systemet mer komplext och är svårare att replikera. Distributionen av vätgas skulle dock bli enklare, eftersom samma distributionssystem kan användas för både biovätgas och elektrolytisk vätgas.

4 Diskussion och slutsatser

Pilotförsök

Detta arbete visade att det tillgängliga processvattnet kan användas för både metan- och vätgasproduktion. Resultaten indikerar att båda gaserna kan produceras med stabila produktionshastigheter efter en uppstartsperiod. En innovativ egenskap i detta arbete var upplägget för förbehandlingen av processvattnet. Processvattnet värmebehandlades med en värmeväxlarenhet för att undvika metanproduktion. En del av värmen som krävdes för värmeväxlaren tillfördes från varmvattnet i biovätgasreaktorns vattenmantel. Denna metaninhiberingsmekanism var dock inte konstant framgångsrik. Från dag 6 till dag 55 observerades en ökning av metan- och koldioxidproduktionen i vätareaktorn på grund av ineffektiv förbehandling av processvattnet. Detta var ett resultat av periodisk igensättning av värmeväxlarens kanaler med partiklar från processvattnet. Värmeväxlaren kopplades därför bort och spolades med vatten. Som en alternativ behandling höjdes temperaturen till 70 °C medan pH sjönk till 5 – 6 under 1 timme, varje vecka i biovätreaktorn. Slutligen sjönk metan-nivåerna medan biovätgasproduktionen ökade efter dag 55 och systemet stabiliserades efter dag 63.

Viktiga slutsatser har dragits från pilotarbetet för uppskalningen av processen:

- Processvattnet måste behandlas innan det går in i vätareaktorn. 3-5 min vid 900°C föreslås.
- En förbehandlingstank föreslås där substratet kommer att homogeniseras för att undvika sedimentering och igensättning av utrustning.
- Processvattnets sammansättning och COD-styrka fluktuerar under året och detta kan orsaka instabilitet i systemet.
- Det föreslås att man undersöker kontrollen av pH med en annan avfallsström istället för tillsatta kemikalier.
- Den berikade blandkulturen visade sig vara mer robust och uppnådde högre avkastning jämfört med de rena stammarna.

För det framtida arbetet mot uppskalning krävs optimering av driftförhållandena. Samrötning med en annan avfallsström kan också gynna systemets utbyte och effektivitet. Slutligen krävs drift av reaktorerna under längre tid.

Jämförelsen mellan producerad energi från piloten och normalfallet hos Nordic Sugar innehåller många osäkerheter och beräkningsdata har därför inte presenterats i sin helhet. Vår linjära uppskalning tyder på en ökad energiproduktion på mellan 20-30% i första reaktorn jämfört med Nordic Sugars befintliga biogasanläggning beroende på om vi jämför med normalproduktion eller maximal produktion. Jämförelsen ger en indikation av potentialen med tvåstegsbioprocessen, men eftersom en helt linjär uppskalning är osannolik behöver fler studier genomföras för att få ut bättre nyckeltal för skalningsindikatorer. Bioprocesser följer normalt sett inte en linjär uppskalningsfaktor eftersom processernas prestation är ett komplex system där bland annat massöverföringsproblem kan uppstå, men systemet kan i andra delar uppnå fördelar vid större skala. Detta behöver alltså utredas vidare för att tydligt kunna uttala sig om hur mycket mer energi tvåstegsbioprocessen kan leverera i förhållande till en vanlig biogasprocess.

Tekno-ekonomi

Den integrerade processens ekonomiska genomförbarhet har utvärderats. Med tanke på osäkerheten i kostnadsuppskattningarna (minst $\pm 30\%$) och känsligheten hos den utjämnade kostnaden för vätgas och metan och intäkter för kostnaden för kompression, elektrolys och priserna på vätgas och el beroende på perspektiven för priserna, integrerad process skulle potentiellt kunna vara ett ekonomiskt alternativ samtidigt som resurseffektiviteten för de två processerna ökar.

Aktörsanalys

Följande slutsatser kan dras från aktörskartläggningen, intervjuerna och scenarioanalysen:

1. Samarbeten är önskvärda för att dela risken med att investera i denna typ av ny och otestad teknik. Speciellt krävs det tydliga samarbeten när det är fråga om symbioslösningar.
2. Tydliga spelregler kopplat till policy och regelverk är efterfrågat.
3. Biovätgas är en nisch och dess plats på marknaden behöver utredas vidare.
4. Tvåstegsbioprocessen tillsammans med elektrolys kan öka försörjningsgraden av förnyelsebara energikällor lokalt och därmed öka beredskapen.
5. Replikerbarheten av konceptet med tvåstegsbioprocessen bedöms som hög, då det finns många olika sätt det skulle kunna göras på beroende på lokala förutsättningar, men replikerbarheten minskar med ökad komplexitet i symbioslösningen.

Resultaten visar att en symbios mellan en tvåstegsbioprocess och elektrolytiskt producerad vätgas kräver samarbete mellan flera aktörer i värdekedjan. En marknadsaktör som vågar investera i biovätgas kan underlätta sådana samarbeten. Biovätgas är en nischprodukt, producerad på liknande sätt som biogas men med samma användningsområde som elektrolytiskt producerad vätgas. Därför passar biovätgas inte självklart in varken hos aktörer som producerar biogas eller aktörer som producerar vätgas i större skala med elektrolys.

Ett alternativ är att reformera biovätgas till biogas, vilket efterfrågats av flera intervjupersoner. Detta kräver vidare utredning av de teknoekonomiska förutsättningarna, eftersom vinsterna med ett ytterligare processteg måste överstiga

energiförlusterna. En fördel är att infrastruktur för extern transport och hantering av vätgas inte behövs, samt att koldioxidemissionerna minskar då koldioxid används med biovätgas för reformering till biogas.

Lokala system som tvåstegsbioprocessen i symbios med elektrolytisk vätgas kan öka energisystemets robusthet genom att minska beroendet av större leveranskedjor. Tvåstegsbioprocessen i symbios med elektrolys skulle också kunna bidra med flexibilitet till elsystemet genom att elektrolysen stängs t.ex. vid kapacitetsbrist i nätet eller när elproduktionen är låg i förhållande till efterfrågan. Detta kräver dock andra värmekällor för bioprocesserna, eftersom de inte bör värmas med el vid sådana tillfällen. Alternativt kan bioprocesserna saktas ner, både flödesmässigt och temperaturmässigt, och på så sätt bidra till flexibilitet i elsystemet.

4.1 Nästa steg och rekommendationer

I ansökan föreslogs att nästa steg skulle vara att köra en större pilotanläggning vid en befintlig biogasanläggning. Denna strategi bedöms fortfarande vara det aktuella nästa steget för utveckling av processen. Alternativa förbehandlingar behöver också undersökas för att minska behovet av högt tempererad värme. Konceptet kommer vidareutvecklas för att även kunna fånga in och använda den koldioxid som bildas i både biovätgasprocessen och biometanprocessen. Detta kommer utöka symbioskonceptet ytterligare i strävan mot ett resurseffektivt energidrivet bioraffinaderi.

Nästa steg är att skala upp processen i större pilotanläggningar. Olika utbyten av energigas behöver också undersökas för att skapa mer flexibilitet i processen och därmed tillgodose olika behovsägares önskemål och affärsstrategier. Dessutom behöver olika typer av substrat undersökas, speciellt när det finns säsongsvariationer när det kommer till tillgången av biomassa för tvåstegsbioprocessen. Vissa typer av livsmedels- och jordbruksrestströmmar produceras exempelvis bara delar av året. För att få en högre lönsamhet av tvåstegsbioprocessen kan det vara önskvärt att hitta en substratkombination som kan medföra att processen kan köras året runt. Alternativt behöver man förstå hur lönsamheten påverkas om det finns säsongsvariationer i tillgången på biomassa. Om symbios med elektrolys övervägs kan driften av den också variera säsongvis, eller med kortare intervall, beroende på elpriser. Det är då viktigt att förstå om sådana variationer överlappar med tillgången på biomassa eller inte. Dessutom behöver konceptet utökas med koldioxidinfångning och användning för att göra processen så klimatneutral som möjligt. Detta behöver undersökas vidare i kommande projekt. Slutligen är det också önskvärt att identifiera den aktör på marknaden som skulle kunna se en affär med biovätgas. Detta skulle underlätta i kommande steg.

5 Publikationslista

1. Gopalakrishnan, P. (2024) Bioflex - Synergies with electrolytical hydrogen. RISE rapport 2024:36 ISBN: 978-91-89896-91-8
2. Chandolias, K., Ajdari, S., Lönntoft, E. (2024) Bioflex - pilot study and techno-economic evaluation of the Bioflex concept. RISE rapport:112 ISBN 978-91-89971-91-2
3. Lönntoft, E., Hasselqvist, H. (2024) Bioflex – aktörskontellationer. RISE rapport: 113 ISBN 978-91-89971-92-9

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Industriell omställning
RISE Rapport 2024:114
ISBN: 978-91-89971-93-6