

# Konceptuelt design af biobaserede værdikæder - for en bæredygtig fremtid

En Process Systems Engineering-strategi, der faciliterer overgangen til en cirkulær økonomi.

Af Nikolaus I. Vollmer<sup>1</sup>,  
Krist V. Gernaey<sup>1</sup>,  
Solange I. Mussatto<sup>2</sup>  
og Gürkan Sin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Process and Systems Engineering Center (PROSYS), DTU Kemiteknik

<sup>2</sup> Biomass Conversion and Bioprocess Technology Group, Novo Nordisk Foundation Center for Biosustainability, Danmarks Tekniske Universitet

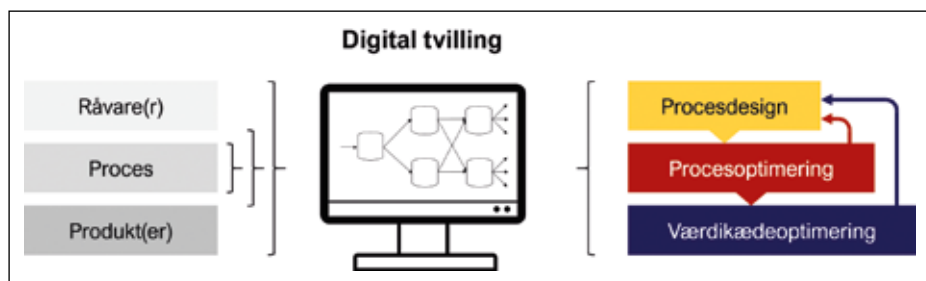
Verden står ved en skillevej, og antallet af studier, der bevidner dette, stiger dag for dag. I kølvandet på en voksende verdensbefolkning og stigende efterspørgsel på fødevarer, energi og forbrugsgoder, opstår problemer, der har en stor effekt på verdens klima. Dette udgør betydelige bæredygtighedsudfordringer for mange ressourcer. For at forebygge en forværring af denne situation, har FN udgivet deres "2030 Sustainable Development Agenda", der udpeger 17 mål for en mere bæredygtig fremtid [1]. Blandt disse er det mål nr. 12 – "ansvarlige forbrugs- og produktionsmønstre" – der særligt kræver, at verdens industrier tager ansvar og udvikler bæredygtige løsninger. Dette er tæt forbundet med begrebet "cirkulær økonomi" og værdikædekonceptet.

Værdikæder er på en makroøkonomisk skala defineret som bindeleddene mellem produktet på den ene side og råvarerne, som bruges i produktionen af det endelige produkt, på den anden side. I de nuværende produktionsmønstre er disse værdikæder klassisk lineære, når det kommer til at bruge fossile ressourcer som råvarer til energi, brændstof og produkter som plastik. Dette skyldes, at et større slutprodukt af disse værdikæder er kuldioxid (CO<sub>2</sub>).

I modsætning til dette implementerer cirkulære værdikæder princippet "den enes affald er den andens guld". Ved at bruge spildstrømme og produkter fra andre industrielle sektorer som råvarer kan de respektive værdikæder blive



Sammenligning af en lineær værdikæde med en cirkulær værdikæde i en bioøkonomisk kontekst.



Den digitale tvilling og de tre trin implementeret i softwareværktøjet.

cirkulære. I en bioøkonomisk kontekst, hvor man bruger rester fra landbrugs- og skovindustrier eller andre genanvendelige råvarer, bliver disse værdikæder ikke alene cirkulære, men også CO<sub>2</sub>-neutrale og dermed også bæredygtige. Ved at erstatte de nuværende kemiske produktionsprocesser med bioteknologiske alternativer kan de nuværende CO<sub>2</sub>-udledninger, der forårsages af industrien, blive reduceret dramatisk.

Når vi producerer forskellige produkter og energi fra en enkelt genanvendelig råvare, kan vi forøge bæredygtigheden af produktionsprocessen yderligere ved at maksimere procesintegration og intensivering. Resultatet kaldes et integreret bioraffineri [2]. Procesintegration og procesintensivering bidrager

betydeligt til adskillige af FN's bæredygtighedsmål og kan derfor betragtes som essentielle for biobaserede værdikæder i en bæredygtig fremtid.

Selvom bæredygtighedspotentialet er tydeligt, er der adskillige økonomiske forhindringer: På det overordnede procesniveau er det mest prominente spørgsmål, hvilket design der skal realiseres i praksis. Dette involverer beslutninger om valg af cellefabrikker i den bioteknologiske proces, udformning af downstream-processerne og valg af den ofte dyre forbehandlingsproces. På procesanlægsniveauet bliver man også nødt til at gennemføre optimering af de anvendte processer, og dette bestemmer det endelige udvalg af produkter, som produceres ud fra rå-

varerne. Ydermere inkluderer dette driftsoptimering af selve processerne. På et globalt niveau skal der træffes beslutninger om valg af råvarer og de respektive markeder for råvarer og produkter. Dertil skal variation af råvaretilgængelighed og af slutprodukternes pris inkluderes i analysen. Kun ved at adressere alle disse spørgsmål, på de tre nævnte niveauer, vil de påkrævede værdikæder blive robuste og dermed økonomisk leve- og bæredygtige.

### En systematisk designtilgang

Fra et Process Systems Engineering-perspektiv (PSE) kræver disse overvejelser en systematisk designtilgang. Dette kan opnås ved at anvende high-end PSE-koncepter sammen med viden fra bioprocessteknologi og cellefabriksdesign [3].

Initiativet "Fermentation-based manufacturing" (FBM) på Danmarks Tekniske Universitet søger at kombinere de sidste to elementer for at bidrage synergistisk til en ny biobaseret økonomi [4]. PSE-tilgangen fremmer disse synergier på flere skalaer, og fremmer også interaktionen mellem skalaerne ved at foreslå egnede op- og nedskaleringstrategier.

Denne tilgang er implementeret i et softwareværktøj i tre trin: procesdesign, procesoptimering og værdikædeoptimering. Den første systematiske softwareimplementering af disse trin er ækvivalent til en "digital tvilling" af dette bioraffinaderi.

Procesdesigntrinnet resulterer i en optimal proces for en bestemt mængde råvarer og en mængde produkter. Til dette udvikles mekanistiske modeller for alle mulige processtrin baseret på tilgængelig viden om hvert processtrin. Disse processtrin inkluderer forbehandlingen, fermenteringen og adskillige downstream-operationer til at udskille produktet fra fermenteringsvæsken. Eftersom mekanistiske modeller kan blive temmelig komplekse, vil hver model blive konverteret til en datadreven tvilling, dvs. en surrogatmodel. Disse surrogatmodeller er baseret på Machine Learning-teknikker og kan let blive implementeret i en såkaldt superstruktur. Superstrukturen tillader simulering af alle teoretisk mulige kombinationer af enhedsoperationer for at finde den optimale konfiguration for processen. Derefter optimeres den med det mål at maksimere produktionen af de ønskede produkter.

Procesoptimeringstrinnet skal optimere processen, både på niveauet af den enkelte enhedsoperation og på anlægsniveau. På dette stadie er yderligere processtrin inkluderet for at tage højde for muligheden for at producere flere forskellige produkter fra én enkelt råvare. Det er en iterativ procedure, hvor procesdesign bliver evalueret for alle mulige proceskonfigurationer. Ydermere inkluderer optimeringen af processen også en videre integrering og intensivering af procesnetværket for at forbedre den overordnede ydelse af anlægget, der designes. Efterfølgende kan man udlede en strategi over, hvordan man skal drive og regulere denne proces. Fremtidig drift og regulering er vigtige faktorer, som skal tages i betragtning, inden man starter konstruktionen af det faktiske anlæg.

Værdikædeoptimeringstrinnet afslutter udviklingen af den digitale tvilling: Dette inkluderer muligheden for at undersøge brugen af forskellige råvarer, afhængig af hvor anlægget skal placeres. Derudover bliver fluktuerende markedspriser for både råvarer og produkter taget i betragtning. Optimering af hele værdikæden ved brug af robuste kriterier skaber en løsning, som er økonomisk holdbar selv under usikre driftsbetingelser.

### Arbejdet med den digitale tvilling

Den komplette digitale tvilling tilbyder dermed udførelsen af scenarieanalyser. Med vurderingen af produktionen af et bestemt produkt for et bestemt marked, tilbydes der forslag og konklusioner om potentielt lovende forretningsstrategier for virksomheder, der kan fortælle en virksomhed, hvor de skal fokusere kernen af et bioraffinaderi for at opnå den mest effektive værdikæde, og hvilke der er de mulige markeder for råvarerne og produktet.

Ydermere kan usikkerheds- og sensitivitsanalyse bidrage med information om kritiske procesparametre og facilitere op- og nedskalering af en mulig implementering. Opskalering er som regel det mest kritiske skridt i konstruktionen af et nyt anlæg, og derfor vil robuste strategier øge succesraten af den praktiske implementering af et bioraffinaderi. Dertil kan det tilføjes, at risikovurdering kan illustrere mulige ulemper ved den undersøgte løsning og foreslå yderligere pointer til overvejelse af det foreslåede koncept til et bioraffinaderi. Dette involverer yderligere iterationer gennem de forskellige udviklingstrin (procesdesign, procesoptimering, værdikædeoptimering) i takt med, at anlægget gentagne gange optimeres på procesdesignstadiet med øget robusthed. Afsluttende kan det nævnes, at omkostnings- og dimensioneringsberegninger af anlægsmateriale og -udstyr fuldender den økonomiske vurdering af scenariet.

Overordnet set har det udviklede softwareværktøj et lovende potentiale til konceptuelt design og studie af forskellige bæredygtige værdikæder. Således giver det pålidelig information til beslutningstagning i en tekno-økonomisk og derudover også politisk kontekst. Det præsenterede koncept forventes at kunne facilitere omstillingen til en cirkulær, biobaseret økonomi. Ved denne nye udvikling af ingeniør softwareværktøjer håber vi på at kunne promovere FN's bæredygtighedsmål og bane vejen for en mere bæredygtig fremtid for os alle.

E-mail:

Nikolaus I. Vollmer: nikov@kt.dtu.dk

#### Referencer

1. <https://sustainabledevelopment.un.org/about>.
2. Mussatto, Dragone, in S. Mussatto (Ed.) *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*, Elsevier, 2016, 1-22.
3. Gargalo et al., *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, Vol. 56 (41), 11870-11893.
4. [www.fbm.dtu.dk](http://www.fbm.dtu.dk).

## Pipettecenteret

Kalibrering og service af alle fabrikater pipetter.

Vi kalibrerer både ved indsendelse eller på kundens adresse.

Salg af pipetter og laboratorie varer.



#### Pipettecenteret

Skovkanten 41 · 4700 Næstved  
Tlf. 55 73 62 05 · Mobil 30 33 32 49  
Email: [nielslindgaard@stofanet.dk](mailto:nielslindgaard@stofanet.dk)  
[www.pipettecenteret.dk](http://www.pipettecenteret.dk)

