



Kemi – Skønheden og udyret

AF KARL ANKER JØRGENSEN

Naturen *versus* mennesket som kemiker

Når vi vender vores blik mod naturens skønhed, ser vi, hvor unik en kemiker naturen er! Alle de kemiske reaktioner, der finder sted i naturen, er gennem millioner af år optimerede til perfektion, og naturens mangfoldighed er baseret på dens forunderlige evne til at kontrollere kemiske reaktioner.

Mennesket har i mange hundrede år gjort fantastiske kemiske landvindinger, som er helt fundamentale for vores høje levealder og det højtudviklede samfund, som vi lever i. I sammenligning med naturens kemiske formåen er vi dog novicer. Når mennesker laver kemi, åbnes også døren til bagsiden af kemiens skønhed – nemlig udyret. Kemikeren besidder ikke naturens elegante evner til at kontrollere kemiske reaktioner, og i forsøget på at fremstille molekyler med bestemte egenskaber kommer vi desværre også til at lave andre molekyler, der kan ende som kemisk affald, og som kan gøre skade på naturen. Desuden findes mange af de molekyler, som fremstilles i laboratoriet, hverken i planter, dyr eller mennesker; så udover at have en potentielt helbredende virkning kan disse desværre også medføre bivirkninger – »de passer ikke ind i kroppens mangfoldighed af kemiske processer«.

Alt er dog ikke helt så sort-hvidt som beskrevet ovenfor. Ozon (O_3) – et af de mindste molekyler, der findes – eksisterer naturligt i stratosfæren og beskytter os mod farlig, ultraviolet stråling fra rummet. Men i takt med den industrielle revolutions indtog dannes ozon nu også i meget små mængder ved jordoverfladen, og her har det ikke samme beskyttende effekt som i stratosfæren. Tværtimod er ozon også et ustabil molekyle, som kan forårsage skade på levende organismer.

Naturens kemiker som skaberen af skønhed

Højt oppe på himlen fødes snefnug som fantastiske kunstværker. Snefnug er symmetriske og opstår ved, at ganske få vandmolekyler bindes til mikro-støvpartikler oppe i atmosfæren, og en spirende vand-



FIGUR 1. Et smukt eksempel på et snefnugs komplekse struktur og seks-grens-symmetri.

krystal derved dannes. Derefter begynder vanddamp at kondensere direkte på vandkrystallen, og snefnuggets komplekse symmetriske form med uendeligt mange variationer dannes (figur 1).¹

Der findes ikke nogen genetisk kode for dannelsen af snefnugs uendeligt mange komplekse og symmetriske former. Deres form er fuldstændigt tilfældig, og derfor findes der sandsynligvis ikke to snefnug, der er identiske.

Når foråret tager over i april måned, lyset får magt, og skoven springer ud, så vågner naturens kemiker op og skaber nyt liv. Til forskel fra den tilfældige dannelse af snefnug er kemien i de grønne nyudsprungne blade ikke tilfældig – den er kemisk optimeret til perfektion. Når bøgen er sprunget ud, starter fotosyntesen i bladene – en kemisk proces, som sandsynligvis har fundet sted i mere end 3,7 milliarder år (figur 2). Fotosyntesen er ikke kun den vigtigste biokemiske proces på kloden, den er også én af de ældste. Fotosyntesens råmaterialer er nogle af de simpleste molekyler, kuldioxid (CO_2) og vand (H_2O), og solens lys er energikilden. Produktet er energirige kulhydrater som sukrose, glukose og stivelse, der direkte eller indirekte er energigrundlaget for næsten alle økosystemer, nemlig ved at skaffe dem energi og kemiske byggeklodser. Som et affaldspro-

1. En fantastisk bog om snefnug: Libbrecht & Rasmussen 2004.



FIGUR 2. I planternes grønne blade findes bl.a. klorofyl, der ved hjælp af solens lys omdanner kuldioxid og vand til energigivende kulhydrater og affaldsproduktet ilt, som er livgivende for dyr og mennesker.

dukt dannes der ilt (O_2). Der er næppe tvivl om, at dette forløb er den vigtigste biologiske proces, da næsten alt liv på Jorden er afhængigt af fotosyntesen – direkte eller indirekte. Fotosyntesen er det smukkeste eksempel på naturens kemiske skønhed – to små molekyler og solens lys finder sammen og skaber energirige molekulære byggeklodser og et affaldsprodukt, som ikke bruges i de grønne blade, men derimod er livgivende for dyr og mennesker. Så i naturens kemiske processer går intet til spilde.

Naturens skønhed kommer ikke kun til udtryk i form af molekulære byggeklodser, som er med til at skabe og opretholde liv. Vi bringer gerne naturens skønhed ind i vores hjem. Når vores øjne fanger synet af smukke blomster i naturen – som måske senere vil pryde et bord – sker det ved, at elektroner i de molekyler, der giver blomsterne deres mangfoldighed af farver, »hopper op og ned«. Derved udsender blomsterne lysbølger, som i vores øjne opfanges af andre molekyler, der kan omsætte disse lysbølger via



FIGUR 3. Erik A. Frandsens udkast (til venstre) og scagliolaen (stukarbejdet) før farvesætning (til højre). Som færdig form er den opsat i Frederik VIII's Palæ, Amalienborg.

FIGUR 4. Narhvalens tand er et fascinerende eksempel på naturens komplekse skønhed – hvorfor vokser kun den venstre tand ud, og hvorfor er den altid venstresnoet? Foto: Paul Nicklen.



en række kemiske reaktioner til signaler, der sendes til hjernen, så vi »ser blomsterne«. Vi begynder nu at forstå de kemiske processer, der skaber farver i blomsterne, og hvordan de leder til andre kemiske processer i vores øjne. Men forståelsen for de kemiske processer i hjernen, der skaber billederne, fortaber sig i mørket. Vi kan dog glædes ved at have en flot buket blomster stående og i nogle dage nyde, hvad naturens kemiker på forunderlig vis har skabt, inden andre kemiske processer overtager, og blomsterne begynder at visne. Er vi heldige, så har billedkunstneren Erik A. Frandsen måske foreviget blomsterne (figur 3)!

Skønheden i naturens mangfoldige kemi kommer til udtryk på mange måder. Moderne forskning er begyndt at give forklaringen på nogle af de kemiske processer i naturen, der skaber planter og dyr. Men der findes også levende skabninger i naturen, hvor man som forsker fascineres af kompleksiteten i skønheden – og spørger sig selv hvorfor? Et sådant eksempel er narhvalens tand (figur 4).

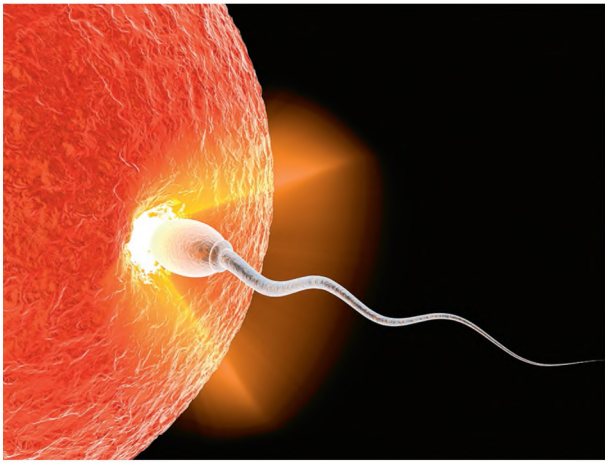
I middelalderen blev narhvalstanden anset for at været hornet fra fabeldyret enhjørningen. I 1600-tallet hjembragte danske og hollandske grønlandsfarere narhvalstænder, og med deres usædvanlige snoede form fandt de vej til europæiske fyrsters raritetskabinetter. I anledning af Christian V's salving i 1671 fik det danske kongehus udført en tronstol af narhvalstand, og den blev anvendt som salvingstronstol frem til 1840.

Men hvorfor er det kun narhvalens venstre tand, der vokser ud,² og hvorfor er den altid venstresnoet? Hvad er det for kemiske reaktioner, der finder sted under mineraliseringsprocessen inde i narhvalens kranie, som er årsag til denne finurlighed?

Naturens ultimative skønhed opstår, når sædcellen rammer ægcellens overflade, og kemiske forbindelser på sædcellens overflade sørger for, at æggets membran åbner sig og befrugtningen finder sted – og livet tager sin begyndelse. Herefter træder kemien i karakter – enzymer, receptorer og andre molekyler sørger for, at netop kun de molekyler, der er nødvendige for, at det befrugtede æg begynder at dele sig, finder sammen og reagerer med hinanden. Livet begynder at tage form og udvikles, og mennesket er hele livet igennem i kemiens favn. Kemiske reaktioner i vores krop sørger for, at vi kan se, smage, dufte, mærke, har følelser og alt det andet, som vi forbinder med at leve.

Livet er bestemt af kemiske reaktioner, som vi aldrig kommer til at se med det menneskelige øje. Vi kommer heller ikke til at se de molekyler, der dannes ved disse reaktioner. Men kemien i vores krop er så unik, at den kan kontrollere, om molekylerne, der

2. Normalt er narhvalen kun udstyret med en enkelt tand, og når den i sjældne tilfælde har to, er der som regel tale om en lang og en kort. Meget sjældent findes narhvaler, hvor begge tænder er vokset ud, men begge tænder er i de tilfælde venstresnoede.



FIGUR 5. Livet startes ved, at molekyler på sædcellens overflade sørger for, at ægcellens membran kan gennembyrdes og ægget derved blive befrugtet.

bliver dannet, skal blive til synssansen – så vi kan se skønheden omkring os; til det olfaktoriske system i næsehulen – så vi kan dufte naturens friskhed om foråret; eller til føleenerver i hudens overflade – så vi kan føle vores nærmeste.

Naturens kemiker som inspiration

Når sædcellen rammer ægcellens overflade (figur 5), begynder livets kemi ved, at enzymer indgår i katalyse, dvs. de øger hastigheden af en kemisk reaktion uden selv at forbruges. Enzymerne katalyserer i dette tilfælde de kemiske reaktioner, der gør det muligt for ægget at blive befrugtet. Livets udvikling og opretholdelse er bl.a. baseret på enzymernes katalytiske egenskaber – de er til stede på det rette sted og tidspunkt. Enzymernes rolle på Jorden er *meget større*, for alt i naturen er skabt ved hjælp af deres katalytiske egenskaber. Betydningen af katalyse kan ikke overvurderes!

Det moderne menneske og samfund kunne ikke have eksisteret uden katalyse. Ca. 70% af de nitrogenatomer, der findes i menneskets krop, stammer fra én industriel katalytisk kemisk reaktion – Haber-Bosch-processen – der fremstiller ammoniak, som anvendes til gødning. Ca. 70% af de menneskabte produkter, som vi er omgivet af, er fremstillet vha. katalyse, og 20-25% af verdensøkonomien er direkte eller indirekte baseret på katalyse.

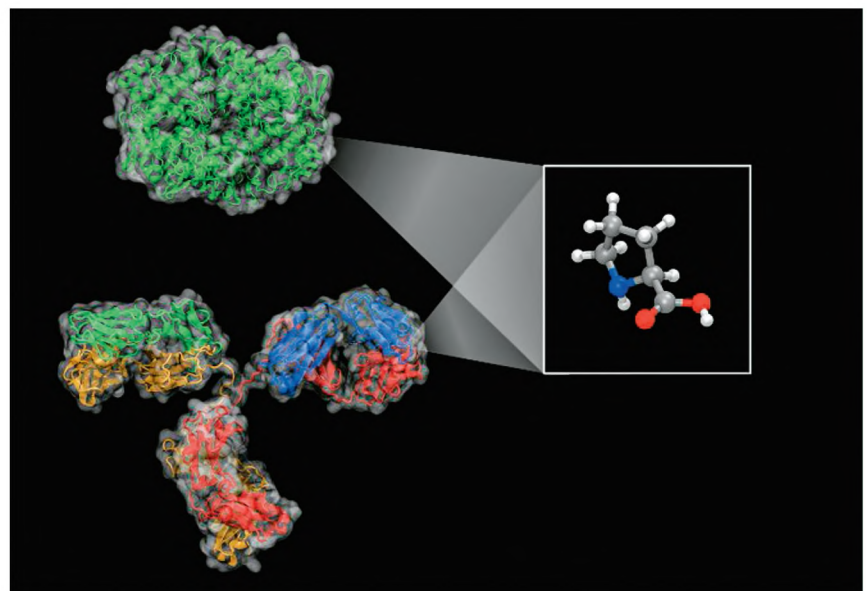
Katalyse kan finde sted på mange forskellige måder. Haber-Bosch-processen er baseret på »simpelt« jern som katalysator, og ved hjælp af processen produceres der årligt ca. 400 millioner tons nitrogenbaseret gødning. Hele 3-5% af verdens naturgas-

produktion bliver brugt ved denne proces, og hertil forbruges 1-2% af verdens årlige energiforbrug. Molekylet, der danner grundlaget for den nitrogenbaserede gødning i Haber-Bosch-processen, er et »meget simpelt molekyle«.

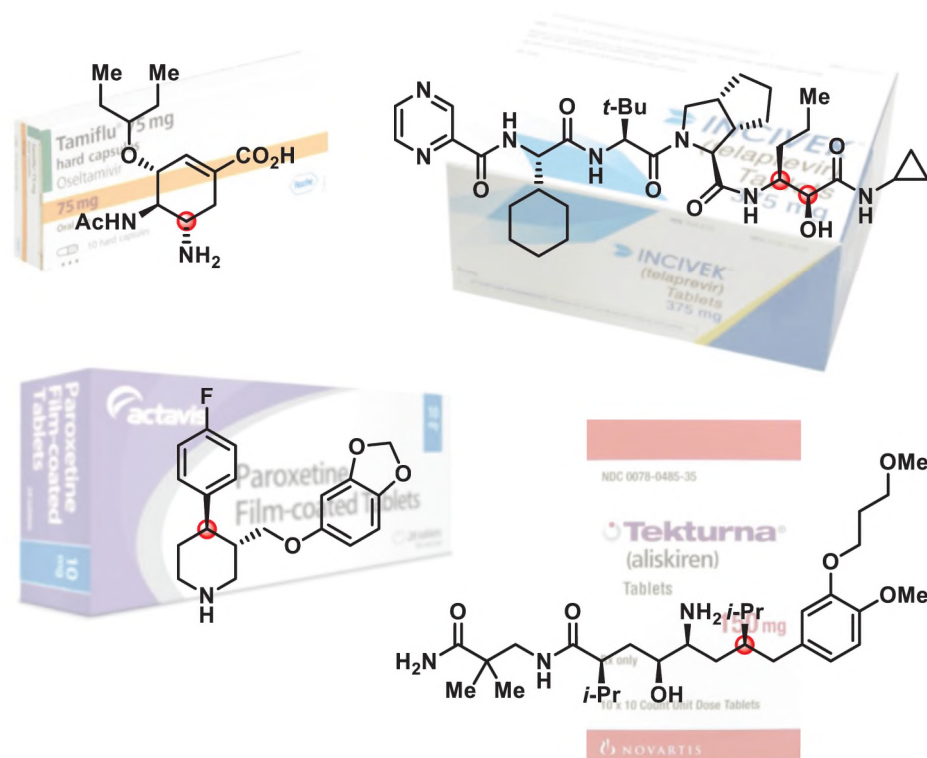
Ønsker man at fremstille mere komplicerede molekyler, som skal kunne anvendes til indbygning i andre endnu mere avancerede molekyler, f.eks. lægemidler, bliver man nødt til at tage mere avancerede katalysatorer – mere komplekse molekyler – i brug.

Enzymers katalytiske egenskaber er ikke kun fundamentale i forhold til at kunne fremme kemiske reaktioner i alt levende. De har også fundet plads i det kemiske laboratorium og i industrielle processer til syntese af molekyler. Men det er ikke kun enzymer, der kan katalysere kemiske reaktioner. Op gennem sidste halvdel af det 20. århundrede var der enorm fokus på metalkomplekser som katalysatorer for kemiske reaktioner. Anvendelsen af metalkomplekser til fremstilling af molekyler gik hurtigt sin sejrsgang og førte til, at kemikere bl.a. kunne kontrollere fremstillingen af dopamin. Derved blev det muligt at behandle Parkinsons sygdom, som er en degenerativ hjernesygdom, der associeres med mangel på signalstoffet dopamin i hjernen.

Ved indgangen til det nye årtusinde så en ny form for katalyse dagens lys. Kemikere begyndte på molekylært plan at forstå, hvordan enzymer katalyserer kemiske reaktioner. Samtidig fandt andre forskere ud af, at visse katalytiske antistoffer (dvs. antistoffer, der mulig-



FIGUR 6. I enzymer (øverst til venstre) og på overfladen af katalytiske antistoffer (nederst til venstre) sidder bl.a. aminosyren prolin (molekylet i den hvide ramme til højre), der har helt unikke katalytiske egenskaber.



FIGUR 7. Præparaterer til behandling af influenza (Tamiflu), hepatitis C (Incivek), depression (Paroxetine) og forhøjet blodtryk (Tekturna). Molekylerne er vist sammen med de pakninger, hvori de indgår, og den del af molekylerne, der indeholder de molekulære LEGO-klodser, som kan være baseret på forskning ved Institut for Kemi, Aarhus Universitet, er vist med røde cirkler.

gør fremstillingen af kunstige enzymer til fremme af kemiske reaktioner, som ikke forekommer naturligt i cellen) er i stand til at katalysere nogle af de samme reaktioner som enzymer.

Enzymer og katalytiske antistoffer er meget komplekse molekyler, der er sammensat af små organiske molekyler kaldet aminosyrer (figur 6). Det er lykkedes at identificere aminosyren prolin som helt central for enzymer og katalytiske antistoffers katalytiske egenskaber, og det viste sig, at prolin – uden at være bundet i enzymet eller i det katalytiske antistof – har helt unikke katalytiske egenskaber. Dermed var et helt nyt og meget kompetitivt forskningsfelt – organokatalyse – født. Kemikere har efterfølgende været i stand til bl.a. at modificere aminosyren prolins katalytiske egenskaber og derved fremstille nye typer af katalysatorer, der har ændret og forbedret fremstillingsprocesser til at syntetisere molekulære byggeklodser.

Dermed er det lykket at bringe den skønhed, som naturens kemiker besidder, ind i det kemiske laboratorium. Det nye forskningsområde organokatalyse er af den internationale paraplyorganisation for kemi, *International Union for Pure and Applied Chemistry*, blevet beskrevet som: »én af ti kemiske innovationer, der vil ændre vores verden«. ³

3. <https://iupac.org/iupac-announces-the-top-ten-emerging-technologies-in-chemistry/>

En mere intuitiv måde at beskrive denne nye, organokatalyse-baserede måde at fremstille molekyler på er at sammenligne den med at udvikle nye LEGO-klodser. Vi har alle set børn sidde og lege med LEGO-klodser og nydt deres kreativitet, når de sætter klodserne sammen til fantastiske bygningsværker – eller hvad de nu måtte finde på. Med organokatalyse har kemikere fået adgang til nye »molekulære LEGO-klodser«, som gør det muligt at fremstille nye molekyler med mange forskellige anvendelsesområder. Organokatalyse har udviklet sig fra primært at fokusere på grundforskning, hvor nye kemiske reaktioner blev udviklet, til i dag at være helt fundamental for fremstillingen af vigtige molekyler, der finder anvendelse i produktionen af bl.a. medicin og plantebeskyttelsesmidler. Ved Institut for Kemi, Aarhus Universitet, har vi udviklet nye organokatalyserede reaktioner, der har fundet vej til f.eks. patenter for industrielle processer til fremstilling af molekyler til behandling af influenza (Tamiflu), hepatitis C (Teleprevir), depression (Paroxetine) og forhøjet blodtryk (Tekturna) (figur 7). ⁴

Organokatalyse byder på en række fordele sammenlignet med andre metoder til industriel fremstilling af komplekse molekyler som dem, der er vist i figur 7. To

4. Se Reyes-Rodriguez, J.; Rezayee, N. M.; Vidal-Albalat, A.; Jørgensen, K. A. 2019.

af disse fordele er mere miljøvenlige fremstillingsprocesser med mindre mængder af uheldige affaldsprodukter og samtidigt et reduceret energiforbrug. Mere herom senere!

Kemikeren kan skabe skønhed - men åbner også døren til udyret

Udviklingen af det moderne menneske i vores moderne samfund går hånd i hånd med naturvidenskabens udvikling og ikke mindst kemiens banebrydende opdagelser.

Når jeg bevæger mig rundt i naturen og f.eks. ser solpaneler, der opfanger solens lys, som via organiske molekyler omsættes til elektricitet, tænker jeg på fotosyntesen i de grønne blade. Vindens susen får vindmøllernes vinger til at dreje rundt, og inde i vindmøllen omsættes vingens bevægelse til strøm via kemiske processer i materialer, der er baseret på bl.a. metaller tilhørende de sjældne jordarter. Jeg glædes ved, at kemikere her har været i stand til at fremstille moderne materialer, der er med til at skabe et mere bæredygtigt samfund. Når et familiemedlem eller en god ven er syg og bliver behandlet med medicin, fyldes jeg med glæde og stolthed over, at kemikere er i stand til at fremstille molekyler, som gør, at vedkommende bliver rask. Eksemplerne er utallige!

Vi lever i dag et liv baseret på naturvidenskab og nyder de goder, som den har skabt, som en selvfølgelighed. Vi ser kun skønheden - men intet er gratis. Kemi åbner døren til udyret, for når kemikeren ønsker at fremstille molekyler med bestemte egenskaber, bliver der ofte også fremstillet molekyler, som kan være skadelige for mennesker og natur, og udyret har her mange ansigter.

Når naturen laver kemi, kan der skabes molekyler, som udover at have en livsvigtig funktion i planter også har fundet anvendelse som medicin - ofte kaldet naturmedicin. Mennesket har gennem årtusinder brugt naturmedicin til helbredelse af sygdomme - nogle gange med positiv effekt. I dag ved man, at der i naturen findes mange molekyler, som nu klinisk bliver anvendt til behandling af sygdomme - og som kemikere er man benovet over, hvor komplekse disse molekyler kan være - og hvor fantastisk en kemiker naturen er. Et sådan eksempel er Taxol.

Taxol blev isoleret fra takstræet på den amerikanske vestkyst i 1971 og er senere med stor succes blevet introduceret i behandlingen af en række cancerformer som ovarie-, bryst- og lungecancer. Selvom Taxol er et

molekyle, der i sin tid blev udvundet fra naturen, så fremstilles det molekyle, der i dag anvendes i klinikken og har samme kemiske struktur som molekylet fra naturen, enten i et kemisk laboratorium eller ved fermentering. På trods af, at Taxol har sin oprindelse i naturen og har haft stor effekt i behandlingen af forskellige cancerformer, så har det også en række bivirkninger, som kan være til stor gene for patienterne - og det er her, udyret begynder at stikke hovedet frem.

Naturens molekyler er designede til at have helt specifikke funktioner og passe ind som en nøgle i en lås i naturens forunderlige kredsløb. Når sådanne molekyler kommer ind i menneskets krop, kan de få en helt anden funktion end den, de oprindeligt havde i naturen. De passer måske ind et helt andet sted i kroppens kemiske kredsløb og forårsager derved utilsigtede påvirkninger af kroppen, hvorved bivirkningerne gerne opstår.

Mange medicinalprodukter har ingen relation til molekyler i naturen. Her har kemikere været i stand til at syntetisere molekyler, der har fundet vej til behandling af sygdomme - men her er der også de samme udfordringer som ved Taxol, nemlig at disse molekyler også kan have bivirkninger og derved have skadelig virkning på os mennesker.

Det er her, at den moderne kemi står med store udfordringer - og de er ikke kun relaterede til det faktum, at både naturlige og menneskeskabte molekyler ikke alene har skønheden, men også rummer udyret, når de anvendes til f.eks. behandling af sygdomme. Udfordringerne er langt større - måske næsten uoverskuelige - fordi vi kemikere ikke mestrer naturens kemiske skønhed: Vi kan i dag fremstille molekyler, som naturen ikke kan nedbryde - tænk på plastik - og vi fremstiller molekyler, der kan være skadelige for både mennesker og naturen. Og ikke mindst besidder vi ikke naturens evne til at optimere og kontrollere kemiske reaktioner til perfektion, så udyret viser sig her i form af kemisk affald!

Derfor er grøn kemi - også kaldet bæredygtig kemi - et forskningsområde inden for kemi og kemiteknik, der får større og større fokus. Grøn kemi har som hovedformål at designe produkter og processer, der minimerer eller eliminerer brugen og genereringen af farlige stoffer, især med fokus på miljøkonsekvenserne, herunder reduktion af forbrug af ikke-vedvarende ressourcer.

Det er bl.a. i det lys, at kemisk affald skal ses, da kemisk affald opstår ved enhver kemisk proces. Mængden af affald varierer, afhængigt af hvor komplekse

molekyler der bliver fremstillet, og hvor store mængder der bliver fremstillet. Men hvor havner det kemiske affald?

Mængderne af kemiaffald fra den kemiske industri er enorme. Her er nogle eksempler:⁵ Ved raffinering af olie til benzin og andre petroprodukter (som er de simpleste kemiske forbindelser) dannes der ca. 10% affald, hvilket årligt løber op i mere end 10.000.000 tons affald. Når f.eks. medicinalprodukter fremstilles, dannes der meget mere kemisk affald end de ca. 10%, der dannes ved raffinering af olie. Ved fremstilling af 10 mg aktivt stof i en tablet kan der let dannes 500 mg affald – hvad der nok er værd at tænke over, næste gang en tablet skal indtages. Fremstillingen af medicinalprodukter er *meget* mindre end de mængder, der bruges til olieraffinering, men årligt dannes der dog ca. 100.000 tons affald af medicinalindustrien. Selv solpaneler, der opfattes som leverandør af grøn og bæredygtig energi, producerer store mængder affald. Vindmøllens vinger er svært nedbrydelige og er med til at skabe affald, der også skal bortskaffes.

Dette var nogle få eksempler, men da der er rigtig mange industrielle kemiske produktioner, er den samlede mængde kemisk affald enorm. Men hvad sker der med affaldet, og hvor ender det?

Tidligere endte meget af det kemiske affald i naturen, hvilket nogle steder har haft meget store og

alvorlige konsekvenser; meget kemisk affald er også blevet brændt af. I den del af verden, hvor vi lever, er udledningen af kemisk affald direkte ud i naturen nede på et minimum, men mange steder i verden ledes kemisk affald stadig direkte ud i naturen uden tanke på, hvilke enorme miljøkonsekvenser det kan få. I dag brændes meget kemisk affald af ved høj temperatur, hvorved affaldsmængden reduceres væsentligt, men der dannes ikke desto mindre en del restaffald, som skal bortskaffes. Samtidig dannes der store mængder CO₂ ved forbrændingen, som derved giver et meget stort klimaaftryk og er med til at forøge mængden af CO₂ i atmosfæren. I det nordlige Europa deponeres meget af det kemiaffald, som ikke kan brændes eller fjernes lokalt på andre måder, på en ø i den smukke Oslofjord (figur 8).

I fjorden ligger Langøya, en ca. 3 km lang og 500 meter bred ø. Her begyndte man i 1650'erne udvindingen af kalk, og senere blev der fremstillet cement på øen. Da cementproduktionen i 1985 blev nedlagt, var bruddet 45 meter under havets overflade. Siden 1993 er det åbne kalkbrud blevet brugt til deponi af farligt kemisk affald, og der modtages hvert år ca. 1.000.000 ton farligt affald. Deponiet vil efter planen være fyldt før 2025.⁶ Hvor skal kemisk affald fra vores del af verden deponeres, når depoterne på Langøya er fyldt op?

FIGUR 8. Langøya i Oslofjorden, hvor der deponeres ca. 1.000.000 tons kemiaffald om året.



5. Se Sheldon, R. A. 2007.

6. Miljødirektoratets tillatelse Arkiveret maj 20, 2015 fra Internet Archives: [https://da.wikipedia.org/wiki/Langøya_\(Re\)](https://da.wikipedia.org/wiki/Langøya_(Re)).



FIGUR 9. Grøn og bæredygtig kemi er løsningen på fremtidens kemiske udfordringer.

Her står det moderne samfund overfor enorme udfordringer. Hvordan fjerner man fortidens kemiske synder fra naturen? Hvordan udvikler man nye kemiske processer, der er meget mere bæredygtige end mange af de processer, der anvendes i dag? Hvordan udvikler man nye molekyler med egenskaber, der er meget mere skånsomme mod planter, dyr og mennesker end de molekyler, der anvendes i dag? Tænk bare på potentialet i f.eks. at kunne fremstille medicin uden bivirkninger, eller plantebeskyttelsesmidler, der ikke belaster naturen med forurening af grundvandet.

En kemikers drøm

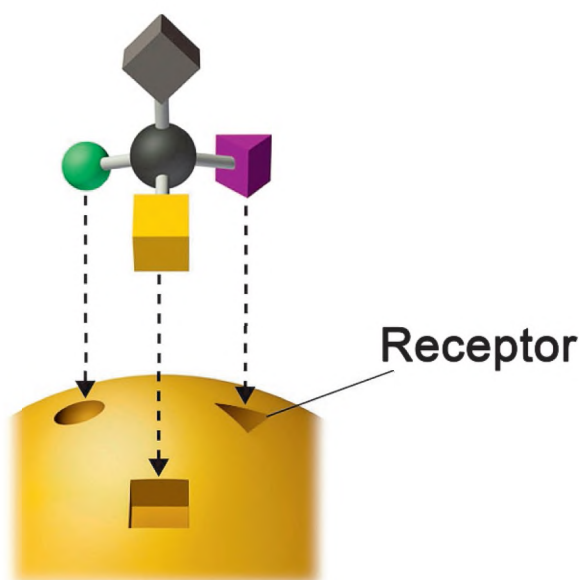
Benny Andersen-citatet – der sigter til kvinderne – »det er besværligt med, det er umuligt uden« – rammer også plet for kemien. Vi kemikere har åbnet døren til udyret, men da vi endnu ikke formår – og måske aldrig kommer til – at besidde naturens elegante evne til at kontrollere kemiske reaktioner og fremstille molekyler med den kompleksitet, der skal til, så de ikke udøver skade på naturen og mennesket, så står vi med et stort ansvar på vores skuldre.

Politikerne skal skabe rammerne – men det er forskerne, der skal komme med løsningerne. Det er os kemikere, der med hjælp fra andre naturvidenskabelige discipliner skal gå forrest for at løse de store udfordringer, som er blevet skabt, og det kræver en meget bred kemisk forskningsindsats.

Den nye form for katalyse – organokatalyse – som vi har været med til at udvikle, er forhåbentlig et af de mange forskningsområder, som kan bidrage til at

lukke døren til udyret. Organokatalyse er ofte blevet beskrevet som grøn og bæredygtig kemi. Denne nye form for kemi har sit udgangspunkt i naturens kemi, symbolsk vist i figur 9, hvor naturens grønne blade er stoppet ned i reagensglas.

En af skønhederne ved naturens kemi er, at naturens molekyler passer som »en nøgle i en lås« ind i andre molekyler, hvorved de udøver deres funktion (figur 10). Naturen er så viseligt indrettet, at den kun fremstiller de molekyler, der er nødvendige, for at værtsorganismen kan overleve og formere sig.



FIGUR 10. Model af, hvordan naturens molekyler passer som »nøglen i en lås« i en receptor, når de skal udøve deres funktion i f.eks. en plante.

Ved at bringe naturens kemiske principper ind i laboratoriet, som det er tilfældet med organokatalyse, har man nu fået mulighed for at kontrollere kemiske processer på nye måder. Dette har gjort det muligt at fremstille molekulære byggeklodser, som passer ind i »nøgle-lås-princippet« i figur 10, og derved forhåbentlig reducere u hensigtsmæssige påvirkninger på levende organismer. Men perspektiverne kan være meget større. Når organokatalyse integreres i fremstillingen af komplekse molekyler, kan man reducere miljøpåvirkningerne væsentligt. Man kan benytte simple og mindre miljøbelastende start-molekyler, opnå højere effektivitet ved de enkelte reaktioner, samt udføre reaktionerne med mindre energiforbrug. Alle disse parametre kan være med til at gøre disse nye kemiske processer mere miljø- og klimavenlige til gavn for os alle.

Så der er håb for, at skønheden i den menneskeskabte kemi kommer til at overskygge udyret, men udfordringerne eksisterer. Det vil måske her være på sin plads med et citat af en af rockmusikkens legender Neil Young: »If you follow your dreams, you might get lost.« Men hvis man som forsker ikke tør drømme stort, så løser vi ikke de store udfordringer, som menneskeheden står over for – og bæredygtighed med udgangspunkt i naturens fantastiske kemi kan være med til at gøre en forskel.

Litteratur

- Libbrecht, K.; Rasmussen, P. 2004: *The Snowflake. Winter's Secret Beauty*, Colin Baxter Photography Ltd., Scotland.
- Reyes-Rodriguez, J.; Rezayee, N. M.; Vidal-Albalat, A.; Jørgensen, K. A. 2019: »The Prevalence of Diarylprolinol Silyl Ethers as Catalysts in Total Synthesis and Patents«, i: *Chem. Rev.* 2019, 119, 4221.
- Sheldon, R. A. 2007: »The E Factor: Fifteen years on«, i: *Green Chemistry* 2007, 9 1273.