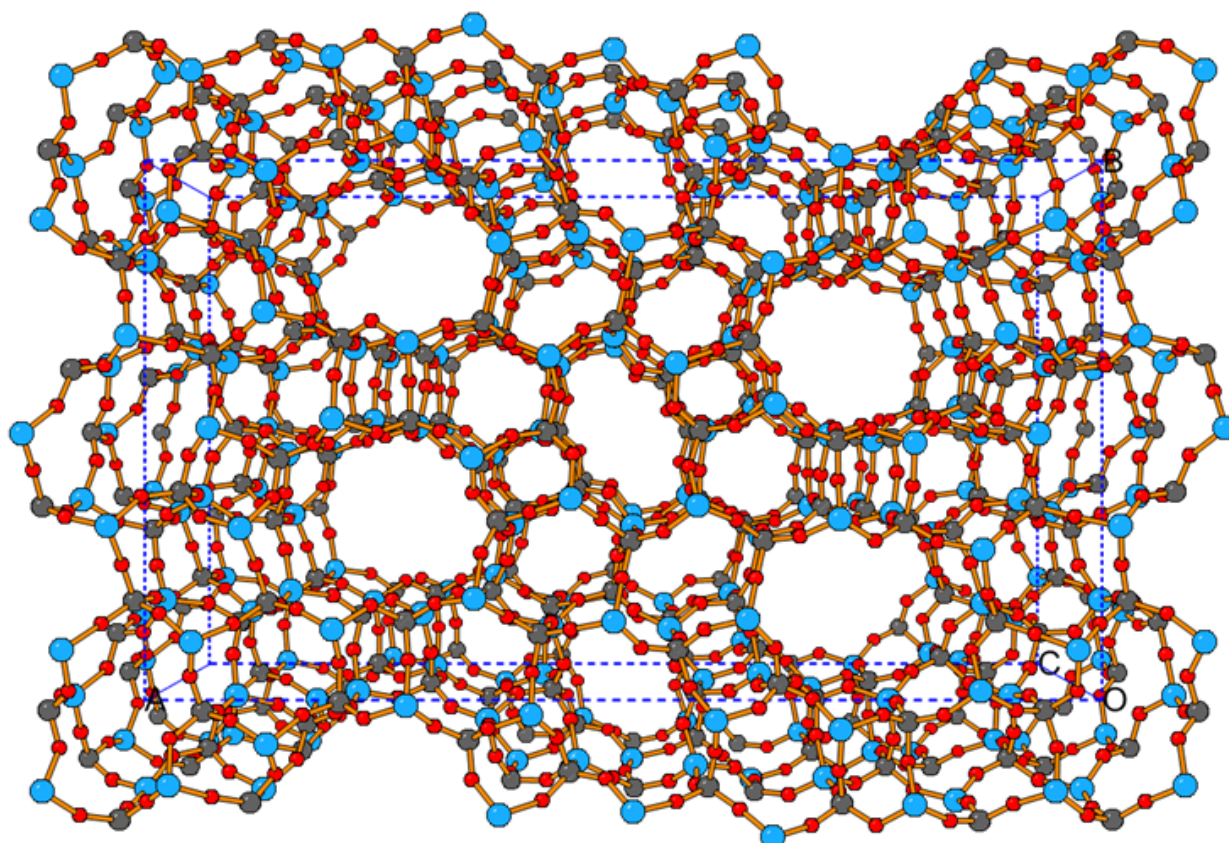


Fra CO₂ til bæredygtigt brændstof

En katalytisk fremstilling af dimethyl ether (DME)



Titel	Fra CO ₂ til bæredygtigt brændstof - en katalytisk fremstilling af dimethyl ether (DME)
Identifikationskode	CZ076
Navn	Clara Sophia Orth Gaarn-Larsen
Gymnasium	N. Zahles Gymnasieskole
Fagområde	NAT

Projekt Forskerspirer 2025

Indholdsfortegnelse

INDLEDNING	3
PROBLEMFORMULERING	3
FORMÅL OG AFGRÆNSNING	3
TEORI	5
<i>Fra CO₂ til Methanol</i>	<i>5</i>
<i>Katalyse som kemisk værktøj</i>	<i>5</i>
<i>Zeolitters sammensætning af atomer og krystalstruktur</i>	<i>6</i>
<i>Dannelse af DME</i>	<i>7</i>
METODE OG REFERENCEFORSØG	7
<i>Katalytisk test af en sur zeolit</i>	<i>7</i>
<i>Referenceforsøg uden katalysator</i>	<i>7</i>
PROJEKTETS UDFØRELSE	8
<i>De tre faser</i>	<i>8</i>
<i>Tidsplan og budget</i>	<i>9</i>
KONKLUSION	9
LITTERATURLISTE	11
BILAG	13
<i>Bilag 1 - Model af zeolit-struktur (forside)</i>	<i>13</i>
<i>Bilag 2 - Diagram over energiprofil</i>	<i>13</i>
<i>Bilag 3 - Model af Brøndsted-syre</i>	<i>14</i>
<i>Bilag 4 - Link til videoklip af katalytisk test af en sur zeolit (egen produktion)</i>	<i>14</i>
<i>Bilag 5 - Forsøgsopstilling</i>	<i>14</i>

INDLEDNING

I fremtiden må vi i stigende grad udnytte CO₂ som en kulstof-ressource, fremfor at betragte det som et uundgåeligt restprodukt fra forbrænding af kul, olie og gas. Det er derfor afgørende at udvikle ny teknologi indenfor det såkaldte Power-to-X koncept, hvor fornybare energikilder omdannes til grøn hydrogen, der så kan anvendes direkte eller bruges i fremstillingen af forskellige bæredygtige brændstoffer. Fælles for disse processer er at de alle afhænger af en effektiv katalysator, der kan øge produktionshastigheden. Ét af de mest lovende grønne brændstoffer er dimethyl ether (DME), da det kan anvendes i eksisterende dieselmotorer og på den måde være med til at erstatte fossile brændstoffer uden store omvæltningerne i vores nuværende infrastruktur. DME kan fremstilles i to katalytiske trin. I det første trin omdannes CO₂ og H₂ til methanol¹. I det andet trin omdannes methanol til DME via en syrekatalyseret dehydrering. I dette Forskerspirer-projekt vil jeg undersøge, hvordan en fast syre kan virke som katalysator. Desuden vil jeg demonstrere, hvorfor det kan være med til fremstille én af fremtidens grønne brændstoffer.

Jeg har altid været optaget af, hvordan naturvidenskabelig viden kan omsættes til konkrete løsninger på virkelige problemer. Særligt idéen om grønne brændstoffer har fascineret mig, fordi den forbinder små molekyler med globale energisystemer. Drømmen om en fremtid, hvor vi kan rejse og leve uden skulle bekymre os om vores klimaaftryk, er baggrunden for, at jeg har valgt netop dette forskerspirer-projekt.

PROBLEMMFORMULERING

Hvordan kan methanol omdannes til DME ved hjælp af sure katalysatorer, såsom zeolitter, og hvordan kan dette være med til at omdanne CO₂ til fremtidens grønne brændstoffer?

FORMÅL OG AFGRÆNSNING

Formålet med projektet er tredelt:

1. Først vil jeg undersøge, hvordan methanol kan omdannes til DME ved hjælp af sure katalysatorer, og hvordan katalysatorens kemiske egenskaber, såsom struktur, porøsitet og proton-tilgængelighed, påvirker reaktionens forløb.
2. Derudover vil jeg udvikle et demonstrationsforsøg, der viser, hvordan zeolitters sure egenskaber kan anvendes til at fremstille DME.

¹ Nielsen, N. D. (2020). Catalytic Methanol Synthesis. Technical University of Denmark. 13-15.

Projekt Forskerspirer 2025

3. Endeligt er det mit mål at omsætte denne kemiske forståelse til et anvendeligt undervisningsformat ved at udvikle et gymnasiekit (prototype), hvor forsøget kan gennemføres under sikre og didaktisk tilpassede betingelser. Intentionen er, at elever selv kan arbejde praktisk med katalyse og samtidig få indblik i, hvordan kemi har en stor betydning for udviklingen af nye klimarelevante teknologier.

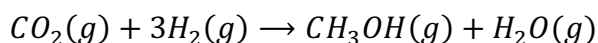
I projektet afgrænser jeg mig til at arbejde med DME som brændstof, selvom andre alternativer, såsom methanol, kerosen og ammoniak også indgår i porteføljen af fremtidens grønne brændstoffer. Disse teknologier er alle velbeskrevne i litteraturen med potentiel anvendelse til fly og skibe. Jeg har valgt at arbejde med DME, fordi det har et tilsvarende stort potentiale som alternativt brændstof til diesel i anden tung transport, for eksempel lastbiler.

Projektet beskæftiger sig ikke med fuld industriel procesoptimering, energiberegninger eller trykstyrede reaktorsystemer. I stedet tager jeg udgangspunkt i et enkelt katalytisk trin og anvender det som model. Zeolitter er gode eksempler på faste katalysatorer, der finder udbredt anvendelse i industrien. Mit formål med projektet er dog ikke at genskabe industrielle forhold, men at omsætte brændstofkemi til en letforståelig forsøgsmodel, der kan gennemføres inden for en gymnasial laboratorieramme og samtidig illustrere de kemiske principper bag katalytisk CO₂-omdannelse. Men principperne bag disse kemiske processer, vil være de samme, som hvis man ønsker at skalere og industrialisere med henblik på produktion af DME.

TEORI

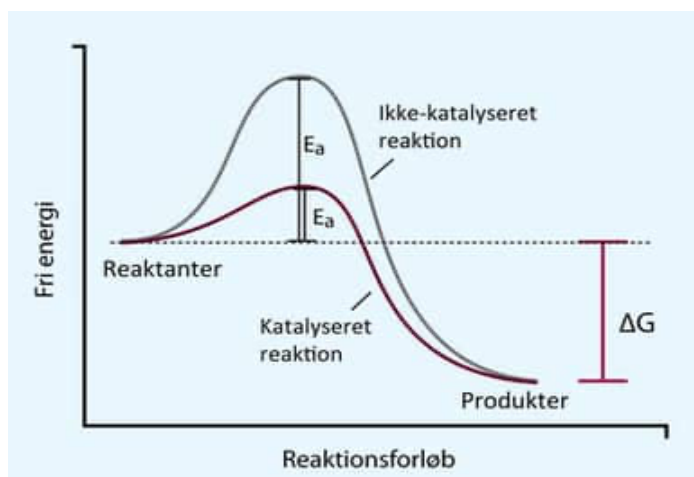
Fra CO₂ til Methanol

Selvom CO₂ typisk betragtes som et restprodukt fra forbrændingsprocesser, så kan det også bruges som kulstofkilde til fremstilling af syntetiske brændstoffer. Ved tilførsel af brint kan CO₂ omdannes til methanol via følgende reaktion:



Reaktionen forløber kun i begrænset omfang ved standardbetingelser, da CO₂ er et termodynamisk stabilt molekyle med stærke C=O-bindinger². For at forskyde ligevægten i retning af methanol kræves et højt tryk og en temperatur, der er høj nok til at omdanne reaktanterne, men lav nok til at undgå nedbrydning af produktet. Selvom disse betingelser er nødvendige, er de ikke tilstrækkelige til at sikre en industriel relevant produktion.

Katalyse som kemisk værktøj



Figur 1. Betydning af katalysatorens tilstedeværelse i en reaktion.

For at omdannelsen af CO₂ til methanol kan forløbe med en tilstrækkelig høj reaktionshastighed, anvendes en katalysator til at ændre reaktionsvejen og reducere aktiveringsenergien uden selv at blive forbrugt i reaktionen³. En katalysator påvirker ikke reaktionens ligevægt, men skaber en alternativ reaktionsmekanisme, hvor der dannes overgangstilstande med lavere energibarriere end i den ikke-katalyserede proces. Dette muliggør en øget om-

sætningshastighed uden et tilsvarende energiforbrug⁴. I stedet for at reagere frit i gasfasen bindes reaktanterne midlertidigt til en fast overflade, hvor de er mere tilbøjelige til at reagere med hinanden. Denne form for katalyse, hvor reaktanterne og katalysatoren har forskellige faser, betegnes heterogen

² Nestler, F., Krüger, M. Full, J., Hadrich, M. J., White, R. J., & Schaadt, A. (2018). Methanol Synthesis – Industrial Challenges within a Changing Raw Material Landscape. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(10).

³ Jacobsen, C. J. H., Schmidt, I., Boisen, A. & Johannsen, K. (2002). Katalytisk kemi - Et spørgsmål om miljø og ressourcer. Haldor Topsøe.

⁴ Biswal, T., Shadangi, K. P., Sarangi, P. K & Srivastava, R. K. (2022). Conversion of carbon dioxide to methanol: A comprehensive review. Elsevier, 298.

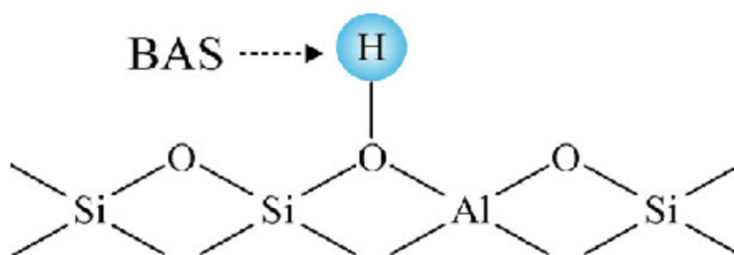
katalyse og er helt afgørende for industrien⁵. Katalysatorens aktivitet afhænger af mange forskellige parametre, herunder materialets sammensætning, krystalstruktur, overfladeareal, porøsitet og tilstedeværelsen af aktive bindingssteder.

På katalysatorens overflade bliver CO₂-og H₂-molekylerne aktiveret således, at de reagerer meget lettere og hurtigere med hinanden end i den ikke-katalyserede reaktion. Reaktionshastigheden afhænger derfor ikke kun af reaktionsbetingelserne, men i høj grad af katalysatorens overfladekemi. I methanolsyntesen anvendes typisk faste katalysator bestående af Cu, Zn og Al-oxider, der kan aktivere reaktanterne og stabilisere de nødvendige mellemprodukter ved en temperatur omkring 240°C og et tryk på > 50 bar. Valget af katalysator er afgørende for at sikre den mest effektive produktion.

Zeolitters sammensætning af atomer og krystalstruktur

Zeolitter er microporøse aluminumsilikater, der er opbygget af tetraedriske enheder bestående af et silicium af Si-atombundet til fire oxygenatomer⁶. Disse tetraeder kan forbindes i tredimensionelle strukturer via Si–O–Si-bindinger og danne meget stabile microporøse krystaller. Zeolitternes porøsitet er afgørende, da det giver et højt overfladeareal, hvorpå reaktanterne kan adsorbere, mødes og reagere med hinanden⁷.

Når et Si-atom bliver erstattet af et Al-atom giver det anledning til en negativ ladning i zeolitten. Denne ladningsforskel må derfor opvejes af en positivt ladet kation. Hvis kationen er en sur proton, (H⁺), kan zeolitten altså fun-



Figur 2. Brønstedssyres strukturform..

gere som en stærk Brønsted-syre, selvom den stadig er et fast materiale⁸. Det er disse egenskaber, der gør zeolitter særligt egnede i den syrekatalyserede kondensering af methanol molekyler i det næste trin i DME fremstillingen. Zeolittens høje porøsitet gør at methanol molekylerne let kan komme ind

⁵ Azhari, N. J., Erika, D., Ilmi, T., Gunawan, M. L. & Makertihartha, I.G.B.N. (2022). Methanol synthesis from CO₂: A mechanistic overview. Elsevier, 16.

⁶ Christiansen, S. E., Leth, K. T., Egeblad, K. & Christensen, C. H. Molekylesier - de vises sten. Technical University of Denmark.

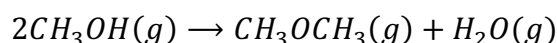
⁷ Van Der Voort, P., Vansant, E.F., & Vrancken, K.C. (2007). Characterization and Chemical Modification of the Silica Surface. Elsevier, 179(93), 59–77.

⁸ Cavallo, L., Chung, S., Li, T., Cazemier, J., Dokania, A., Galilea, A., Gascon, J., Mukhambetov, I., Nastase, S., Navarro de Miguel, J.C., Panarone, L., Ruiz-Martínez, J., Wang, Y. & Zaarour, M. (2023). Influence of active-site proximity in zeolites on Brønsted acid-catalyzed reactions at the microscopic and mesoscopic levels. CellPress, 3(6), 1–2.

i krystallen - lidt ligesom vand kan suges ind i en svamp. På denne måde er det altså ikke alene zeolittens kemiske sammensætning, men også dens særlige krystalstruktur, der er helt afgørende for dens katalytiske aktivitet.

Dannelse af DME

Når methanol kommer i kontakt med en zeolit, kan molekylerne midlertidig adsorbere på katalysatorens overfladen. Denne adsorption svækker bindingerne i methanol og øger sandsynligheden for, at to methanolemolekyler reagerer med hinanden. Under reaktionsbetingelser kan derfor ske en såkaldt kondensationsproces, hvor to methanolemolekyler omdannes til dimethyl ether (DME) og fraspaltning af vand:



Efter dannelsen frigives både produkt og vand i form af gas, hvilket gør det muligt for nye methanolemolekyler at reagere på zeolittens overflade. Zeolittens porøse struktur og fordeling af aktive overfladesteder har derfor stor indflydelse på, hvor effektivt og selektivt reaktionen forløber⁹. Ved at forstå sammenhængen mellem zeolittens kemiske sammensætning og struktur er det altså muligt at designe og udvikle endnu bedre katalysatorer til fremstilling af grønne brændstoffer.

METODE OG REFERENCEFORSØG

Katalytisk test af en sur zeolit

For at undersøge kondenseringen af methanol til DME, har jeg afprøvet en forsøgsopstilling, hvor methanol-dampe bringes i kontakt med en varm ionbyttet zeolit (H-ZSM-5), der indeholder sure H⁺-ioner. Selvom reaktionsforholdene ikke er helt de samme, så kan forsøget altså illustrere den kemiske proces, der foregår under en industriel produktion. Jeg opsamlede små mængder af den fremstillede DME i et omvendt bægerglas fyldt med vand. Dernæst antændte jeg den meget energirige gas i en spektakulær flamme, der tydeligt viser, at DME kan anvendes som et brændstof¹⁰.

Referenceforsøg uden katalysator

Som led i mine indledende studier gennemførte jeg også et forsøg uden katalysator. Referenceforsøget formål var at undersøge om den sure zeolit-katalysator overhovedet havde en effekt, eller om

⁹ Nature Materials (2020). Zeolite catalysts come into focus. Nature Materials, 19 (1037).

¹⁰ Se bilag 4 for videoklip af katalytisk test af en sur zeolit.

Projekt Forskerspirer 2025

opvarmningen alene kunne skabe gode betingelser for dehydreringen af methanol og stadig danne DME under de givne forsøgsbetingelser.

Ved referenceforsøget uden katalysator skete der dog ingen synlig gasudvikling, der kunne opsamles i det omvendte bægerglas. Dette viser tydeligt effekten af den sure katalysator. Til sammenligning var der i forsøget med katalysator en tydelig gasudvikling, som let kunne opsamles og antændes. Dette indikerer dannelse af et brændbart produkt, hvilket beviser, at der højst sandsynligt dannes DME, selvom jeg endnu ikke har påvist dette vha. nogle kemiske analysemetoder.

PROJEKTETS UDFØRELSE

Mit projekt tager udgangspunkt i udviklingen af et undervisningskit, som skal gøre det muligt for gymnasieelever at arbejde eksperimentelt med omdannelsen af methanol til dimethyl ether (DME). Kittet skal både give eleverne indsigt i de kemiske processer og samtidig skabe en forståelse for de klimamæssige perspektiver ved at erstatte fossile brændstoffer.

De tre faser

Projektets første fase består i at etablere en forsøgsopstilling, hvor methanol bringes i kontakt med en syrekatalysator (H^+) og opvarmes ved hjælp af en kontrolleret varmekilde, såsom en varmepistol. Formålet er at fremkalde dannelsen af en gasfase bestående af vanddamp og DME, som kan opsamles i et vandbad og testes ved antænding. Denne opstilling fungerer som en model for det katalytiske trin, hvor methanol dehydreres til DME. Valget af en fast syrekatalysator muliggør en tydelig observation af produktdannelse under gymnasiale laboratoriebetingelser, uden behov for processtyring eller kostbart reaktorudstyr.



Figur 3. Forsøgsopstilling i laboratorium.

På baggrund af den eksperimentelle afprøvning kommer så selve samlingen af undervisningskittet, der systematiserer forsøgsopstillingen i en form, der kan reproducere i et standard gymnasielaboratorium. Kittet (prototypen) vil bestå af et lukket reaktionssystem i glas, gasopsamlingsmodul, varmekilde, de centrale kemiske komponenter og sikkerhedsvejledning til kontrolleret antænding af produktet. Fokus er at omsætte det kemiske princip for syrekatalyseret methanolomdannelse til en

Projekt Forskerspirer 2025

struktureret forsøgsprocedure, hvor katalysatorens rolle kan identificeres eksperimentelt. Når kittet er samlet og testet, vil tredje fase bestå i at producere flere eksemplarer, så det kan anvendes bredt i gymnasieundervisningen og til at begynde med testes på ét gymnasium. Det er vigtigt, at udstyret er holdbart og kan genbruges, mens forbruget af kemikalier er minimalt, så det er økonomisk realistisk og sikkert at bruge i undervisningen.

Tidsplan og budget

Projektet forventes gennemført over 4–5 måneder. Første måned anvendes til indkøb af udstyr og opstilling af den eksperimentelle model. De følgende to måneder anvendes til afprøvning og justering af forsøgsdesignet, herunder test af reproducerbarhed og sikkerhed. Den sidste fase på én til to måneder omfatter udarbejdelse af undervisningsmateriale og konstruktion af flere kit-enheder.

Budgettet fordeles på glasudstyr og laboratoriekomponenter (ca. 10.000 kr.), katalysatorkemikalier og methanol (ca. 4.000 kr.) samt opbygning af sikre varme- og gasopsamlingsmoduler (ca. 4.000 kr.). Til trykt eller digitalt opsat vejledningsmateriale afsættes ca. 2.000 kr. Den samlede udgift forventes at ligge på ca. 20.000kr.

Tidsrammen for projektets gennemførelse vil være ca. 4–5 måneder: 1 måned til indkøb og sammensætning, 2 måneder til test og tilpasning samt yderligere 1–2 måneder til produktion og udarbejdelse af undervisningsmateriale.

KONKLUSION

Jeg forventer, at projektet vil vise, at syrekatalyseret dehydrering af methanol kan fungere som en model for dannelsen af DME og dermed illustrere et centralt trin i katalytisk CO₂-valorisering. Demonstrationsforsøget viser, hvordan en aktiv katalysator kan fremstille brændbart DME, og hvordan der til sammenligning ikke dannes noget produkt uden katalysator. Dette kan tydeliggøre betydningen af katalyse indenfor den grønne omstilling. Set i et bredere perspektiv kan denne tilgang anvendes til at diskutere mekanismer, der ligger til grund for industrielle Power-to-X-processer. Et fremtidigt udviklingsspor kunne være at undersøge andre zeolitter og undersøge, hvordan struktur og porøsitet påvirker selektivitet og udbytte. Jeg håber, at projektet kan vise, hvordan katalysatorbegrebet kan gøres eksperimentelt tilgængeligt, og bidrage til en dybere forståelse for nogle af de kemiske processer, der er helt afgørende for vores hverdag. Hvis dannelsen af et DME kan demonstreres i en gymnasial laboratorieramme, viser det, at brændstofkemi og CO₂-udnyttelse ikke kun kan studeres på universitetet, men også kan udforskes på tidligere uddannelsesniveauer, som kan vække en interesse for yderligere undersøgelser og forskning til gavn for samfundet.

Projekt Forskerspirer 2025

ANERKENDELSE

Jeg vil gerne takke min forskerkontakt lektor Jerrik Mielby, DTU Kemi, for hans faglige vejledning og inspiration i forbindelse med mit projekt. Derudover vil jeg gerne takke til professor Søren Kegnæs, DTU Kemi, for hans kreative og faglige sparring om projektet. Til sidst vil jeg takke min vejleder Christel Tvedegaard Lund (N. Zahles Gymnasieskole) for støtte og vejledning under Forskerspirerforløbet, samt de andre forskerspireddeltagere, der har motiveret og inspireret mig.

LITTERATURLISTE

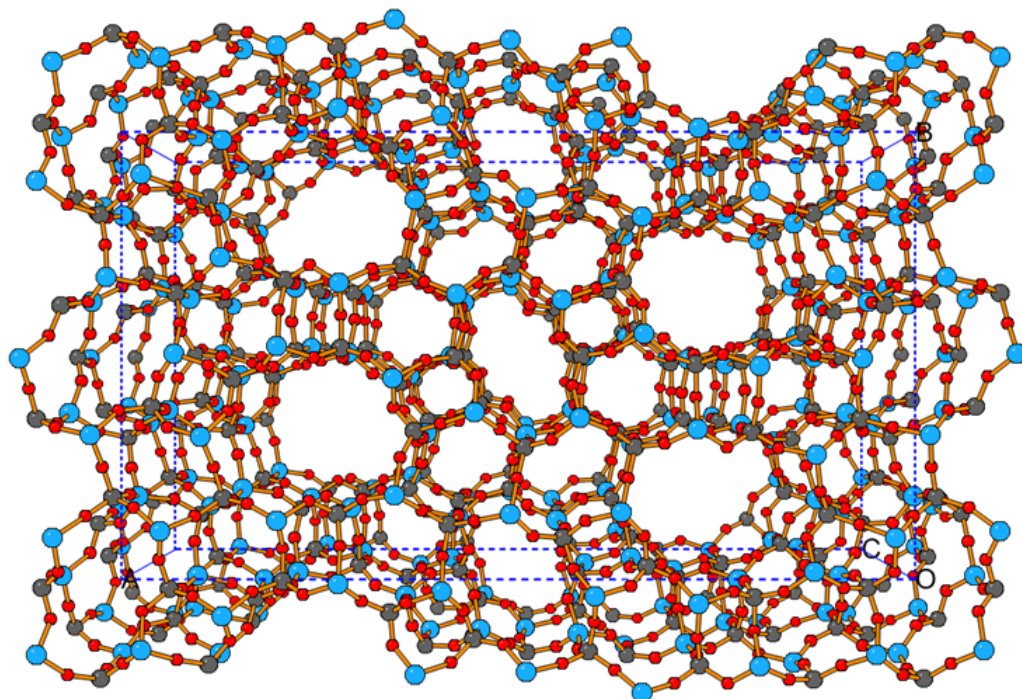
- 1) Azhari, N. J., Erika, D., Ilmi, T., Gunawan, M. L. & Makertihartha, I.G.B.N. (2022). Methanol synthesis from CO₂: A mechanistic overview. *Elsevier*, 16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022003814> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 2) Bhan, A. & Iglesia, E. (2008). A Link between Reactivity and Local Structure in Acid Catalysis on Zeolites. *ACS Publications*, 41(4). <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ar700181t> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 3) Biotech Academy. Enzymers rolle i brødbagning. Biotech Academy. <https://www.biotechacademy.dk/undervisning/gymnasiale-projekter/enzymer-og-broedbagning/enzymers-rolle-i-broedbagning/> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 4) Biswal, T., Shadangi, K. P., Sarangi, P. K & Srivastava, R. K. (2022). Conversion of carbon dioxide to methanol: A comprehensive review. *Elsevier*, 298. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653522007925> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 5) Bouchy, C., Chizallet, C., Larmier, K. & Pirngruber, G. (2023). Molecular Views on Mechanisms of Brønsted Acid-Catalyzed Reactions in Zeolites. *ACS Publications*, 123(9). <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.2c00896> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 6) Cavallo, L., Chung, S., Li, T., Cazemier, J., Dokania, A., Galilea, A., Gascon, J., Mukhambetov, I., Nastase, S., Navarro de Miguel, J.C., Panarone, L., Ruiz-Martínes, J., Wang, Y. & Zaarour, M. (2023). Influence of active-site proximity in zeolites on Brønsted acid-catalyzed reactions at the microscopic and mesoscopic levels. *CellPress*, 3(6), 1-2. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667109323000428> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 7) Chai, Y., Dai, W., Guan, N. Li, L. & Wu, G. (2021). Confinement in a Zeolite and Zeolite Catalysis. *ACS Publications*, 54(13). <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.accounts.1c00274> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 8) Christiansen, S. E., Leth, K. T., Egeblad, K. & Christensen, C. H. Molekylesier - de vises sten. *Technical University of Denmark*. <https://www.kemi.dtu.dk/-/media/Institutter/Kemi/Gymnasietilbud/kapitlerNy-eKemiske/pdf/molekylesier4.ashx?la=da> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 9) Deng, F., Xu, J. & Zhao, X. (2020). Solid-state NMR for metal-containing zeolites: From active sites to reaction mechanism. *Researchgate.net*, 14(2), 159-160. https://www.researchgate.net/publication/338769755_Solid-state_NMR_for_metal-containing_zeolites_From_active_sites_to_reaction_mechanism (sidst åbnet: 26/10/25)

Projekt Forskerspirer 2025

- 10) Jacobsen, C. J. H., Schmidt, I., Boisen, A. & Johannsen, K. (2002). *Katalytisk kemi - Et spørgsmål om miljø og ressourcer*. Haldor Topsøe.
- 11) Lee, J. K., Turrina, A., Zhu, L., Seo, S., Zhang, D. Cox, P. A., Wright, P. A., Qiu, S. & Hong, S. B. (2014). An Aluminophosphate Molecular Sieve with 36 Crystallographically Distinct Tetrahedral Sites. *Angew Chem Int Ed*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201402495> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 12) Nature Materials (2020). Zeolite catalysts come into focus. *Nature Materials*, 19 (1037). <https://www.nature.com/articles/s41563-020-00819-x#citeas> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 13) Nestler, F., Krüger, M. Full, J., Hadrich, M. J., White, R. J., & Schaadt, A. (2018). Methanol Synthesis – Industrial Challenges within a Changing Raw Material Landscape. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(10). <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/dd92ec38-4d91-48f4-a8d9-127292f89f84/content> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 14) Nielsen, N. D. (2020). Catalytic Methanol Synthesis. *Technical University of Denmark*. 13-15. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/241043150/Niels_D_Nielsen_KT.pdf (sidst åbnet: 26/10/25)
- 15) Palčić, A. & Valtchev, V. (2020). Analysis and control of acid sites in zeolites. *Elsevier*, 708(606). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926860X20303884> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 16) Trachta, M., Bludský, O., Vaculík, J., Bulánek, R. & Rubeš, M. (2023). Investigation of Brønsted acidity in zeolites through adsorbates with diverse proton affinities. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39667-5> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 17) Van Der Voort, P., Vansant, E.F., & Vrancken, K.C. (2007). Characterization and Chemical Modification of the Silica Surface. *Elsevier*, 179(93), 59–77. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167299106815119> (sidst åbnet: 26/10/25)
- 18) Warring, S. L., Beattie, D. A. & McQuillan, A. J. (2016). Surficial Siloxane-to-Silanol Interconversion during Room-Temperature Hydration/Dehydration of Amorphous Silica Films Observed by ATR-IR and TIR-Raman Spectroscopy. *ACS Publications*, 32(6). <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.5b04506> (sidst åbnet: 26/10/25)

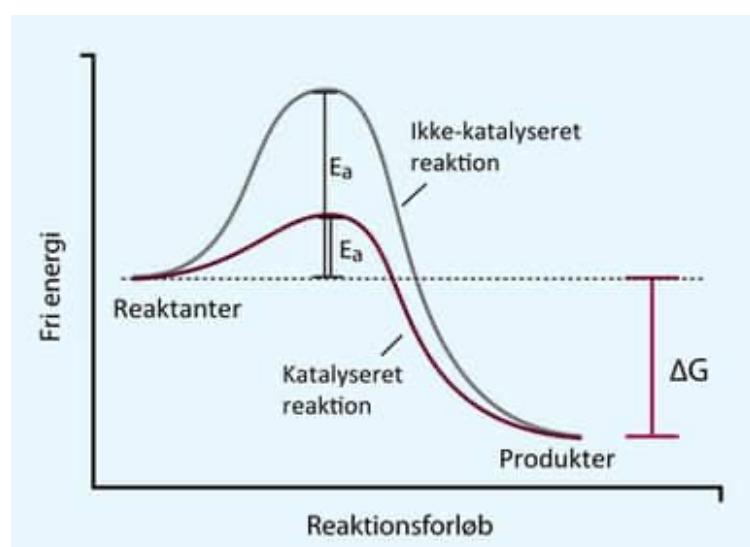
BILAG

Bilag 1 - Model af zeolit-struktur (forside)



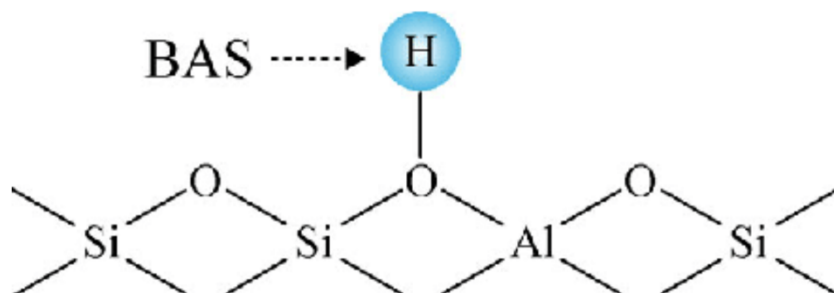
Lee, J. K., Turrina, A., Zhu, L., Seo, S., Zhang, D. Cox, P. A., Wright, P. A., Qiu, S. & Hong, S. B. (2014). An Aluminophosphate Molecular Sieve with 36 Crystallographically Distinct Tetrahedral Sites. *Angew Chem Int Ed.* <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201402495>

Bilag 2 - Diagram over energiprofil



Biotech Academy. Enzymers rolle i brødbagning. Biotech Academy. <https://www.biotechacademy.dk/undervisning/gymnasiale-projekter/enzymer-og-broedbagning/enzymers-rolle-i-broedbagning/>

Bilag 3 - Model af Brøndsted-syre



Deng, F., Xu, J. & Zhao, X. (2020). Solid-state NMR for metal-containing zeolites: From active sites to reaction mechanism. *Researchgate.net*, 14(2), 159-160. https://www.researchgate.net/figure/Bronsted-acid-sites-BAS-and-Lewis-acid-sites-LAS-on-zeolites_fig1_338769755

Bilag 4 - Link til videoklip af katalytisk test af en sur zeolit (egen produktion)

Privat YouTube-link til videoklip af katalytisk test af en sur zeolit i laboratorium.

<https://youtube.com/shorts/mTj5KVBLYeo?feature=share>

Bilag 5 - Forsøgsopstilling



Billede taget fra egen forsøgsopstilling i laboratorium ved referenceforsøg.