Projekt forskerspirer 2026

Kemisk opgradering af PET-plast



Titel	Kemisk opgradering af PET-plast
Identifikationskode	BA027
Navn	Andreas Lolk
Gymnasium	Gammel Hellerup Gymnasium
Fagområde	NAT - Naturvidenskab

Projekt forskerspirer 2026

Indhold

Indledning 2
Problemformulering 3
Formål og Afgrænsning 4
Teori 4
Polymerkemi 4
Overfladebinding og adsorption 5
Behandling af PET og kemisk opgradering 6
Carbonisation 6
Kemisk aktivering 7
Teoretisk besparelse 8
Udførelsen af projektet 11
Fra teori til praktik 11
Forsøg - Kemisk opgradering af PET 11
Budget 12
Konklusion 14
Anerkendelse 14
Litteraturliste 14
Bilag 18

Indledning

Klimaforandringer i dag er stærkt præget af mange forskellige faktorer, der hver især gør livet på Jorden med tiden sværere at opretholde. Forurening af kulstof, især i den kemiske forbindelse CO_2, er en af disse faktorer, der forringer klimaet grundet

drivhuseffekten[1]. Derfor har regeringen indgået aftaler om at sænke CO_2-udledningen med 70% i år 2030[2]. Hvis dette skal kunne lade sig gøre, må der tages noget initiativ. Et af disse initiativer er Carbon Capture and Storage (CCS), som er en proces, hvor man lagrer atmosfærens kuldioxid i andre materialer, så det fx ikke kan indgå i drivhuseffekten[3]. I mit projekt vil jeg undersøge, hvordan man kan omdanne polyethylentereftalat (PET), som er et hyppigt anvendt plast, til et porøst[4] carbonmateriale, der ved hjælp af CO2-adsorptionsteknologi kan lagre CO_2, og gøre det på en mere ressourcevenlig måde end hvad vi har lige nu, så teknologien kan udbredes på et bredere plan end det, vi allerede har. PET-plast kan omdannes til det ønskede porøse materiale ved først at gennemgå en carbonisationsreaktion, hvor carbonholdige materialer opvarmes uden oxygen for at fraspalte andre stoffer end carbon[5]. Derefter tages produktet og gennemgår en kemisk aktivering, der øger materialets porøsitet – en proces, som forklares nærmere i teoriafsnittet. Denne samlede proces, hvor PET-plast får adsorptionsegenskaber, kaldes kemisk opgradering af plasten.

Jeg er meget fascineret af denne form for plastgenanvendelse, da den hjælper med at løse to problemer. Både udledning af plastik i miljøet og udledning af CO_2 i atmosfæren er enormt skadelige for klimaet, og denne type plastgenbrug hjælper til med at løse begge problemstillinger.

Problemformulering

Hvordan kan man ved hjælp af et optimeret forhold mellem PET-affald og fosforsyre (H_3PO_4) fremstille omkostningseffektivt og porøst carbon, og hvordan vurderes

[1] (Landbrug og fødevarer)
[2] (Finansministeriet, 2022)
[3] (NIRAS, u.d.)
[4] Porøsitet beskriver små åbninger i et molekyles strukturer, der tillader andre stoffer at sætte sig fast (nature reviews materials, 2016)
[5] (KARR, JR., 1978)

økonomien samt bæredygtigheden i denne metode set i forhold til traditionelle opgraderingsprocesser?

Formål og Afgrænsning

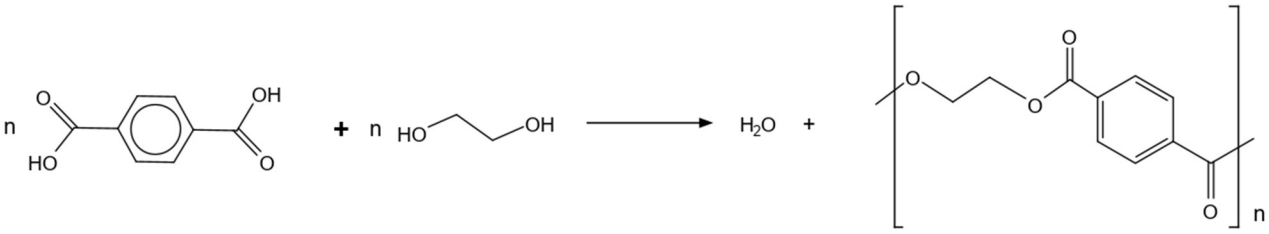
Jeg har til formål at undersøge muligheden for at udbrede CCS ved at finde et omkostningseffektivt alternativ til de nuværende benyttede processer, der er enormt omkostningsfulde[6]. For at have et realistisk projekt har jeg derfor valgt at kigge på én type plastik, nemlig PET, som er en velbeskrevet polymer og en bredt anvendt plastkilde. Dette er for at sikre en entydig kemisk udgangssammensætning i modelforsøget. Desuden kigger jeg på en mindre skala af kemisk opgradering, som ikke involverer højtryksudstyr, da projektet både skal holde sig inden for 20 tusind kroner og har til formål at gøre en dyr industriel proces billigere og lettilgængelig.

Teori

Polymerkemi

Polyethylentereftalat er det, man inden for organisk kemi kalder en polyester, som er en gren af polymerer. Polymerer er større molekyler, der består af en rekursiv sammenkobling af et mindre molekyle, kaldet en monomer. Polyethylentereftalat dannes ved en kondensations-polymerisationsreaktion mellem tereftalsyre og ethylenglykol[7]. En polymerisationsreaktion sammenkobler monomerer i lange kæder og danner polymerer, mens kondensationsreaktioner er reaktioner, hvor større molekyler kobles sammen ved fraspaltning af et mindre molekyle, eksempelvis ved dannelsen af estere[8]. Heraf navnet polyester.

[6] (Royal Society of Chemistry, 2022)
[7] (Wikipedia, u.d.)
[8] (Hvilsted, 2016)



Figur 1. reaktionsskema for kondensations-polymerisationsreaktionen mellem tereftalsyre og ethylenglykol

PET er som sagt et hyppigt anvendt plastik, som bruges til f.eks. sodavandsflasker og er dermed let tilgængelige og desuden gratis, hvis vi taler om plastikskrald. For at spare penge kan man dermed gøre klogt ved at anvende sodavandsfalskere, som er blevet smidt ud. Dette reducerer både det plastikskrald, som er rundt omkring i verden, og giver os en stor kilde til at danne CO_2-lagrende materiale, som kan hjælpe os med at reducere udslippet af kuldioxid.

Overfladebinding og adsorption

Adsorption er når en adsorbat, som kan være fx atomer, ioner eller molekyler fra en gas, væske eller opløst fast stof, sætter sig fast på en adsorbent, en væske eller et fast stof[9]. Adsorption opdeles i to kategorier: fysisk og kemisk adsorption. Fysisk adsorption er den svagere form for adsorption og beskriver en kvantemekanisk vekselvirkning mellem adsorbaten og adsorbenten, hvor kvantefluktuationer i adsorbatens ladningsfordeling påvirker adsorbentens overflade sådan, at der dannes et positivt ladet ”hul”, der er en form for elektrostatisk ”image”[10] af adsorbatens ladningsfordeling[11]. Dette image tiltrækker adsorbaten til overfladen af adsorbenten[12].

[9] (Saheed , Azeez, & Suah, 2022)
[10] En teoretisk elektron med samme ladning som ladningsfordelingen adsorbaten, men med modsat fortegn, og som matematisk beskriver det ladningsvakuum, der opstår når adsorbatens elektroner frastøder elektronerne på adsorbentens overflade.
[11] (Massachusetts Institute of Technology, 1989)
[12] (Cambridge, 2012)

Kemisk adsorption er en eksoterm[13] proces, hvor der dannes en kemisk binding mellem adsorbat og adsorbenten[14].

Adsorption er den proces, der tillader porøse stoffer at lagre andre stoffer, som kuldioxid, og for rene uforandrede porøse carbonmaterialer er det den fysiske adsorption, der har betydning for at lagre CO_2. For at vi kan benytte PET-plast til adsorption af CO_2, skal vi have et porøst rent carbonmateriale, hvilket vi opnår ved at carbonisere det rene PET og derefter benytte den kemiske aktivering for at øge porøsiteten.

Behandling af PET og kemisk opgradering

Efterbehandlingen af den opsamlede plastik sker i de to processer: pyrolysen, som har til formål at reducere affaldet til rent kulstof[15], og den kemiske aktivering, som har til formål at forøge det indre overfladeareal af stoffet, det vil sige at forøge stoffets porøsitet[16].

Carbonisation

Carbonisation er en form for pyrolysereaktion, hvorved et stof opvarmes i et inert gasmiljø[17]. Dette fraspalter andre stoffer, der kan sidde på molekylet, og stoffet nedbrydes i mindre stykker[18]. Processen efterlader et meget carbonrigt produkt, hvilket er meget vigtigt, da det rene carbonstof, der efterlades, nu har nogle ”huller” dér, hvor andre atomer, ioner og molekyler nu end har siddet. Disse huller eller porer, som det hedder, er dér, hvor andre stoffer, eksempelvis CO_2, kan sætte sig fast og lagres. Carbonisation ændrer også strukturen af de lange og indviklede

[13] En kemisk reaktion, der foregår under omdannelsen af kemisk energi til varme- eller bevægelsesenergi
[14] (ScienceDirect, 2022)
[15] (Photonics.com)
[16] (ScienceDirect & Burchell, 1999)
[17] Et gasmiljø uden ilt, således at materialet ikke brænder
[18] (Photonics.com)

polymerkæder, der fremstår, og forsimpler dem. Derudover bliver den nye molekylære form, selvom der stort set udelukkende er kulstof tilbage, ikke til en grafittlignende struktur, der ellers er rent carbons naturligt mest stabile form, men carbonisationen giver derimod en mere ujævn struktur, hvor ujævnhederne har porøse egenskaber[19].

Kemisk aktivering

Den kemiske aktivering er et mere omkostningseffektivt alternativ til den termiske aktivering, som foregår ved langt højere temperaturer[20]. Den kemiske aktivering benytter derimod kemiske reaktioner til at fremtvinge aktiveringen af stoffet og opdeles i tre punkter. Det første punkt er imprægningen, hvor det kemiske aktiveringsmiddel blandes grundigt med materialet, der skal aktiveres[21]. Det valgte aktiveringsmiddel er fosforsyre (H_3PO_4), som er et enormt effektivt aktiveringsmiddel[22]. Dette valg er truffet, da det tillader at lave varmebehandling ved lavere temperaturer, samt giver et højere udbytte pr. kg råmateriale, end andre metoder som base-aktivering og termisk aktivering[23]. H_3PO_4 er også et reagensmateriale, der kan bruges igen til senere aktiveringer med op mod 80% genanvendelighed[24]. Andet punkt er pyrolysen (varmebehandlingen), som her sker ved $400°C$. I denne proces er fosforsyre katalysator for fraspaltningen af andre stoffer end carbon, som ved carbonisationen, men vigtigst er, at den danner polyfosforsyrer[25].

$$nH_3PO_4 \rightarrow H_{n+2}P_nO_{n+3} + (n-1)H_2O$$

[19] (Rodriguez-Reinoso, 2004)
[20] (Carbon Service, 2021)
[21] (Carbon Service, 2021)
[22] (Özcan, 2018)
[23] (Carbon Service, 2021)
[24] (MDPI, 2022)
[25] (MDPI, 2022)

Disse polyfosforsyrer laver brodannelse, hvilket er, når polyfosforsyren danner fosfat-esterbindinger med hydroxygrupperne (OH-grupperne) på polymererne. Disse bindinger kan være mellem flere af polymerkæderne, hvilket danner 3-dimensionelle netværk i den kemiske struktur. Brodannelsen gør først og fremmest, at PET-plast ikke smelter under pyrolysen. Desuden fastlåser det strukturen af carbonskelettet, hvilket er vigtigt for det tredje punkt[26]. Ved tredje punkt sker rensningen af de aktiverede molekyler med en svag syre. Dette skyller resterende stoffer væk. Her bliver fosfatmolekylerne skyllet væk, hvilket efterlader porer i molekylestrukturen[27]. Altså bruges fosforsyre til at danne åbninger i carbonskelettet på ens behandlede materiale, og det skylles til sidst væk for at efterlade porer.

Teoretisk besparelse

Herefter er det relevant at undersøge omkostninger ved kemisk opgradering af PET-plast for at se, hvordan økonomiske besparelser kan opnås. Her sammenlignes den beskrevne metode for produktion af kemisk opgraderet carbon med to af de mest udbredte former. Først vil jeg påpege relevante økonomiske parametre for kemisk opgradering af carbonmateriale og sammenligne metodernes omkostninger pr. kg porøst carbon produceret. De to andre metoder er kemisk opgradering af biomasse med hhv. termisk aktivering og kemisk aktivering med kaliumhydroxid. Egenskaber og omkostninger er vist i tabellen i *figur 2* (ses på næste side).

[26] (PMC, 2022)
[27] (Carbon Service, 2021)

Omkostningskategori/ pr. kg produceret	1. PET + H_3PO_4 (Kemisk)	2. Biomasse + Damp (Fysisk/Termisk)	3. Biomasse + KOH (Kemisk)
Råmaterialepris	0,00 – 0,40$[28]	0,04 – 0,09$[29]	0,04 – 0,09$[30]
Kulstofudbytte	25 – 35%[31]	15 – 25%[32]	10 – 20%[33]
Reagensomkostning	0,80 – 1,40$[34]	0,00$[35]	2,50 – 5,00$[36]
Procestemperatur	450 – 600°C[37]	850 – 1000°C[38]	700 – 800°C[39]
Energiomkostning	0,40 – 0,70$[40]	0,80 – 1,30$[41]	0,60 – 0,90$[42]

[28] (ResearchGate, 2022)
[29] (MDPI, 2022)
[30] (MDPI, 2022)
[31] (NC State University, 2017)
[32] (Harry & Francisco , 2006)
[33] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[34] (MDPI, 2022)
[35] Der bruges ingen kemikalier, kun vanddamp (H_2O)
[36] (MDPI, 2022)
[37] (ResearchGate, 2022)
[38] (Harry & Francisco , 2006)
[39] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[40] (MDPI, 2022)
[41] (MDPI, 2022)
[42] (MDPI, 2022)

Omkostningskategori/ pr. kg produceret	1. PET + H_3PO_4 (Kemisk)	2. Biomasse + Damp (Fysisk/Termisk)	3. Biomasse + KOH (Kemisk)
Reaktormateriale	Moderat pris[43]	Lav-Moderat pris[44]	Meget høj pris[45]
Samlet	2,80 − 4,20$[46]	1,20 − 2,20$[47]	5,50 − 10,00$[48]
Overfladeareal (S_{BET})	800 − 1500 m^2/g[49]	600 − 1000 m^2/g[50]	1800 − 3200 m^2/g[51]

Figur 2. Tabeloversigt over relevante egenskaber og omkostninger for de 3 metoder til kemisk opgradering. Dybdegående forklaring af tabellen ses i bilag 2.

Tabeloversigtens hovedpunkter er at kemisk opgradering af biomasse ved kemisk aktivering vha. KOH er den klart dyreste form, og da projektet har til formål at spare penge, kigger vi på de to mest omkostningseffektive: PET +H_3PO_4 og Biomasse + Damp, og navnene reduceres til hhv. PET og Bio. PET er omtrent dobbelt så dyrt som Bio, dog med den fordel at det har et større overfladeareal. Kemiske undersøgelser viser også, at PET-produktet kan lagre 80–150% mere CO2 end Bio-produktet pr. gram[52]. En anden vigtig pointe er, at selvom biomasse er genanvendelig, udleder den CO_2 ved produktion[53] og kan derfor være et problem for klimaet på kortere sigt.

[43] (Peters, Timmerhaus, & West, 1958)
[44] (Peters, Timmerhaus, & West, 1958)
[45] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[46] (MDPI, 2022)
[47] (MDPI, 2022)
[48] (MDPI, 2022)
[49] (ResearchGate, 2022)
[50] (Vangeyte, Gautier, & Jérôme, 2004)
[51] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[52] (Royal Society of Chemistry, 2022)
[53] (Klimabevægelsen)

Kilden til det PET, som jeg vil benytte til denne type kemisk opgradering, er ikke bare genanvendelig, i hvert fald så længe PET-plastik skal bruges i samfundet, men sparer også klimaet ved at fjerne et led i plastudledningen i naturen[54].

Udførelsen af projektet

Fra teori til praktik

Mit projekts formål kan koges ned til en sætning: Kan man forsøge at mindske både CO_2-udledning og effekten af plastik i miljøet på en økonomisk overskuelig måde? For at undersøge, hvorvidt det er muligt, må jeg benytte den teoretiske forståelse samt de overvejelser, der er beskrevet i forrige afsnit, til at beskrive et forsøg, der bedst muligt kan afklare dette. Derfor skal parametrene for forsøget konkretiseres:

Materialet til kemisk opgradering er valgt til at være PET-plastik fra sodavandsflasker, da det er en billig kilde, der også hjælper med udledningen af plastik. H_3PO_4 vælges som aktiveringsmiddel, da det er et billigere alternativ til baser om KOH, og er effektivt ved lavere pyrolysetemperaturer (400℃). Carbonisations- og pyrolyseprocesserne vælges til at foregå ved lave temperaturer (400℃), hvilket er billigere end alternative opgraderingsprocesser. Til sidst vælges demineraliseret vand frem for syrer eller baser til rensningsprocessen, da det er en stor økonomisk omkostning[55].

Forsøg - Kemisk opgradering af PET

1. Klargøring af råmateriale

Rene PET-sodavandsflasker renses, og plasten klippes eller kværnes til ensartede flager (1 - 3 mm) for at sikre en optimal overfladekontakt. Der afvejes 5,00 g PET-flager på en analytisk vægt.

2. Carbonisation (Termisk nedbrydning i inert miljø)

PET-flagerne overføres til en porcelænsdigel med tætsluttende låg (eller et reaktorrør med inert N_2-flow) for at sikre et iltfrit miljø. Diglen placeres i en muffelovn, hvor materialet opvarmes til 400°C uden oxygen, så flygtige bestanddele og andre stoffer

[54] (Royal Society of Chemistry, 2022)
[55] Rensning med syrer/baser koster både ekstra i materialer og i dyrere ætsesikkert udstyr.

end carbon fraspaltes. Denne carbonisationsreaktion efterlader det carbonrige produkt med et ujævnt, porøst skelet.

3. Kemisk aktivering og polyfosfat-brodannelse

Det carboniserede produkt imprægneres og aktiveres kemisk ved hjælp af fosforsyre (H_3PO_4) som aktiveringsmiddel. Ved en kontrolleret varmebehandling på de ca. 400°C danner fosforsyren polyfosforsyrer, som skaber fosfat-esterbindinger (polyfosfat-broer) med polymerens hydroxygrupper. Dette fastlåser carbonskelettet og udvider materialets indre overfladeareal.

4. Udvaskning, neutralisering og rensning

Efter afkøling vaskes det porøse carbonmateriale grundigt med varmt demineraliseret vand for at fjerne overskydende fosforsyre og opløselige fosfatkomplekser. Suspensionen filtreres gennem et filterpapir, og vaskningen fortsættes, indtil filtratets pH-værdi når neutralitet, pH ≈ 7.

5. Direkte test af CO_2-adsorption

Produktet testes ved en volumetrisk metode, hvor man måler trykfaldet af CO_2-gas i et kammer med et kendt volumen, når gassen absorberes/adsorberes af materialet, for at se om produktet har den ønskede porøsitet (800-1500 m^2/g).

Budget

Tabellen i figur 3 viser det estimerede budget for at gennemføre det praktiske forsøg. Visse apparaturer og maskiner forventes at blive lånt via universitetssamarbejde (f.eks. KU).

Materiale / Udstyr	Antal	Pris i DKK	Kommentar
Fosforsyre (H_3PO_4, 85 % lab-grade)	1 L	850 kr.	Anvendes som kemisk aktiveringsmiddel til imprægnering af PET

Materiale / Udstyr	Antal	Pris i DKK	Kommentar
PET-affald (sodavandsflasker)	20 stk.	0 kr.	Indsamles gratis som genbrugsplast fra husholdning
Porcelænsdigle med låg	5 stk.	600 kr.	Til opbevaring af prøven under pyrolyse i muffelovn
Muffelovn	1 stk.	Lånes af KU	Til varmebehandling og carbonisation ved 400°C
Analytisk vægt	1 stk.	Lånes af KU	Til præcis afvejning af PET og fosforsyre
Laboratorieglasudstyr (bæreglas, tragte, filterpapir)	1 sæt	1.500 kr.	Til udvaskning, filtrering og rensning af det porøse carbon
Demineraliseret vand	10 L	200 kr.	Til vask og neutralisering af det aktiverede kul
pH-indikatorpapir / pH-meter	1 stk.	350 kr.	Til kontrol af neutral pH-værdi under vaskeprocessen
Uforudsete omkostninger / Forbrugsstoffer	-	1.500 kr.	Sikkerhedsudstyr (handsker, briller), ekstra filtre og smådele

Materiale / Udstyr	Antal	Pris i DKK	Kommentar
I alt		5.000 kr.	
Rest		15.000 kr.	

Konklusion

Jeg forventer, at forsøget vil kunne vise en pålidelig metode til at producere porøst carbonmateriale til brug i CCS-sammenhænge, på en måde, der er mere omkostningseffektiv end nuværende metoder, og som samtidig finder et brug til de store mængder plastik, der ellers udledes i naturen. Projektet bygger ikke på banebrydende ny teknologi, men på at kombinere kendte processer på en måde, der tillader at opnå projektets mål. Jeg forventer også at projektet viser at brugen af affaldsprodukter som PET er et vigtigt led i kampen mod klimaforandringer.

Anerkendelse

Tak til min forskerkontakt, Jonas Mccandless, for at have hjulpet med formatering, inspiration og researchforståelse. Derudover vil jeg sige tak til mit gymnasium, Gammel Hellerup Gymnasium, og særligt Kasper Lauest for at have gjort dette projekt muligt og tak til mine forskerspirervenner, som jeg har fået æren af at møde gennem projektet og som jeg har brugt som sparringspartnere. Til sidst tak til min dejlige kæreste for at have været den bedste støtte.

Litteraturliste

Cambridge. (2012, august 5). *Physisorption*. Retrieved from Cambridge Core: https://www.cambridge.org/core/books/abs/physics-at-surfaces/physisorption/13C5064AD30378F9280ED2819531683C

Carbon Service. (2021, oktober 9). *Hvad er aktivt kul*. Retrieved from Carbon Service: https://www.carbonservice.dk/hvad-er-aktivt-kul/#:~:text=Selve%20processen%20g%C3%A5r%20i%20alt%20sin%20enkelthed,kuldioxid%20gennemstr%C3%B8mmer%20materialet%20ved%20meget%20h%C3%B8je%20temperaturer.

Finansministeriet. (2022, Juni 22). *Regeringen indgår bred aftale om en ambitiøs skattereform*. Retrieved from Finansministeriet: https://fm.dk/nyheder/nyhedsarkiv/2022/juni/regeringen-indgaar-bred-aftale-om-en-ambitioes-groen-skattereform/

Harry, M., & Francisco , R.-R. (2006). *Activated carbon.* Retrieved from ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780080444635/activated-carbon

Hvilsted, S. (2016, september 2). *Kondensationspolymerisation*. Retrieved from Lex.dk: https://lex.dk/kondensationspolymerisation

KARR, JR., C. (1978). *Carbonization Process*. Retrieved from ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbonization-process

Klimabevægelsen. (n.d.). *Hvad er problemet med biomasse?* Retrieved from Klimabevægelsen: https://www.klimabevaegelsen.dk/sos/hvad-er-problemet-med-biomasse

Landbrug og fødevarer. (n.d.). *Hvad er drivhuseffekten?* Retrieved from Landbrug og fødevarer: https://lf.dk/viden-om/klima/hvad-er-drivhuseffekten/

Massachusetts Institute of Technology. (1989). *Method of Images.* Retrieved from MIT: https://web.mit.edu/6.013_book/www/chapter4/4.7.html

Mattos, L., Rodino, E., Resasco, D., Passos, F., & Noronha, F. (2003, januar 15). *Partial oxidation and CO2 reforming of methane on Pt/Al2O3, Pt/ZrO2, and Pt/Ce-ZrO2 catalysts.* Retrieved from Elsevier: chrome-extension://ieepebpjnkhaiioojkepfniodjmjjihl/data/pdf.js/web/viewer.html?file=https://www.ou.edu/catalysis/pubs/2003-4.pdf#page=1&zoom=auto,-300,749

MDPI. (2022, march 1). *Chemical Activation of Lignocellulosic Precursors and Residues: What Else to Consider?* Retrieved from MDPI: https://www.mdpi.com/1420-3049/27/5/1630

MDPI. (2022, august 26). *Techno-Economic Analysis and Feasibility of Industrial-Scale Activated Carbon Production from Agricultural Pea Waste Using Microwave-Assisted Pyrolysis: A Circular Economy Approach*. Retrieved from MDPI: https://www.mdpi.com/2227-9717/10/9/1702

nature reviews materials. (2016, july 16). *Porous organic cages: soluble, modular and molecular pores.* Retrieved from nature reviews materials: https://www.nature.com/articles/natrevmats201653

NC State University. (2017). *Preparation and characterization of activated carbon from hydrochar by phosphoric acid activation and its adsorption performance in prehydrolysis liquor.* Retrieved from NC State University: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/preparation-and-characterization-of-activated-carbon-from-hydrochar-by-phosphoric-acid-activation-and-its-adsorption-performance-in-prehydrolysis-liquor/#:~:text=DOI%3A%2010.1016%2Fj.biortech.2013.03.164.%20Yorg

NIRAS. (n.d.). *NIRAS*. Retrieved from Carbon Capture and Storage: https://www.niras.dk/ordbog/carbon-capture-and-storage-ccs/

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (1958). *Plant Design and Economics*. Retrieved from McGraw-Hill Chemical Engineering Series: chrome-extension://ieepebpjnkhaiioojkepfniodjmjjihl/data/pdf.js/web/viewer.html?file=https://elbunkerdequimica.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/09/plant-design-and-economics-for-chemical-engineers-by-max-peters-klaus-timmerhaus-ronald-west-max-peters

Photonics.com. (n.d.). *Carbonization*. Retrieved from Photonics.com: https://www.photonics.com/Dictionary/carbonization/d8359

PMC. (2022, december 1). *Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review.* Retrieved from PubMed Central: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9720030/#:~:text=The%20most%20common%20activating%20chemicals%20are%20H3PO4%2C,the%20biomass%20activation%20steps%20utilizing%20phosphoric%20acid.

PubMed. (n.d.). *Activated carbon from biomass precursors using phosphoric acid: A review.* Retrieved from PubMed Central: https://www.mdpi.com/1420-3049/27/5/1630

ResearchGate. (2022, Januar). *Sustainability-inspired upcycling of waste polyethylene terephthalate plastic into porous carbon for CO2 capture.* Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/356977237_Sustainability-inspired_upcycling_of_waste_polyethylene_terephthalate_plastic_into_porous_carbon_for_CO2_capture#:~:text=This%20journal%20is%20%C2%A9%20The%20Royal%20Society,screen%20porous%20carbons%20pr

Rodriguez-Reinoso, F. (2004, juli). *Role of chemical activation in the development of carbon porosity*. Retrieved from ResearchGate:

https://www.researchgate.net/publication/239162244_Role_of_chemical_activation_in_the_development_of_carbon_porosity#:~:text=a%20chemical%20activation%2C%20where%20the%20activating%20agent,HO%2C%20CO%2C%20CO%2C%20CH%2C%20*%20aldehydes%2C%20etc.

Royal Society of Chemistry. (2022, Januar 10). *Sustainability-inspired upcycling of waste polyethylene terephthalate plastic into porous carbon for CO2 capture*. Retrieved from Green Chemistry: https://pubs.rsc.org/gc/article/24/4/1494/729906/Sustainability-inspired-upcycling-of-waste

Saheed , I. O., Azeez, S. O., & Suah, F. B. (2022, december 15). *Adsorption*. Retrieved from ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/adsorption

Science Direct. (n.d.). *Adsorption*. Retrieved from Science Direct.

ScienceDirect. (2022, juli). *Chemisorption*. Retrieved from ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/chemisorption

ScienceDirect, & Burchell, T. (1999). *Chemical Activation*. Retrieved from ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/chemical-activation

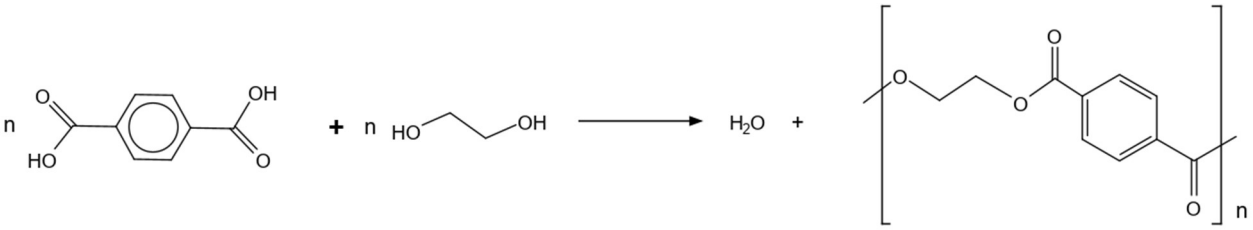
Vangeyte, P., Gautier, S., & Jérôme, R. (2004, august 2). *About the methods of preparation of poly(ethylene oxide)-b-poly(ε-caprolactone) nanoparticles in water: Analysis by dynamic light scattering*. Retrieved from ScienceDirect: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092777570400305X

Wikipedia. (n.d.). *Polyethylene terephtalate*. Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate

Özcan, F. A. (2018, november 11). *Preparation and Characterization of Activated Carbon*. Retrieved from European Journal of Engineering Research and Science: https://eu-opensci.org/index.php/ejeng/article/download/60939/11974#:~:text=Therefore%2C%20the%20surface%20area%20of%20the%20carbons,KOH%20develops%20effectively%20microporosity%20with%20some%20mesopores.

Bilag

Bilag 1 - kondensations-polymerisationsreaktionen mellem ethylenglykol og tereftalsyre ved dannelsen af polyethylentereftalat (PET)



Bilag 2 - Tabeloversigt over omkostninger for forskellige metoder til kemisk opgradering

Omkostningskategori/ pr. kg produceret	1. PET + H_3PO_4 (Kemisk)	2. Biomasse + Damp (Fysisk/Termisk)	3. Biomasse + KOH (Kemisk)
Råmaterialepris	0,00 – 0,40$[56]	0,04 – 0,09$[57]	0,04 – 0,09$[58]
Kulstofudbytte	25 – 35%[59]	15 – 25%[60]	10 – 20%[61]
Reagensomkostning	0,80 – 1,40$[62]	0,00$[63]	2,50 – 5,00$[64]

[56] (ResearchGate, 2022)
[57] (MDPI, 2022)
[58] (MDPI, 2022)
[59] (NC State University, 2017)
[60] (Harry & Francisco , 2006)
[61] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[62] (MDPI, 2022)
[63] Der bruges ingen kemikalier, kun vanddamp (H_2O)
[64] (MDPI, 2022)

Omkostningskategori/ pr. kg produceret	1. PET + H_3PO_4 (Kemisk)	2. Biomasse + Damp (Fysisk/Termisk)	3. Biomasse + KOH (Kemisk)
Procestemperatur	$450 - 600°C$[65]	$850 - 1000°C$[66]	$700 - 800°C$[67]
Energiomkostning	$0,40 - 0,70\$$[68]	$0,80 - 1,30\$$[69]	$0,60 - 0,90\$$[70]
Reaktormateriale	Moderat pris[71]	Lav-Moderat pris[72]	Meget høj pris[73]
Samlet	$2,80 - 4,20\$$[74]	$1,20 - 2,20\$$[75]	$5,50 - 10,00\$$[76]
Overfladeareal (S_{BET})	$800 - 1500\ m^2/g$[77]	$600 - 1000\ m^2/g$[78]	$1800 - 3200\ m^2/g$[79]

[65] (ResearchGate, 2022)
[66] (Harry & Francisco , 2006)
[67] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[68] (MDPI, 2022)
[69] (MDPI, 2022)
[70] (MDPI, 2022)
[71] (Peters, Timmerhaus, & West, 1958)
[72] (Peters, Timmerhaus, & West, 1958)
[73] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)
[74] (MDPI, 2022)
[75] (MDPI, 2022)
[76] (MDPI, 2022)
[77] (ResearchGate, 2022)
[78] (Vangeyte, Gautier, & Jérôme, 2004)
[79] (Mattos, Rodino, Resasco, Passos, & Noronha, 2003)

Beskrivelse af tabelværdierne i bilaget:

Råmaterialeprisen for PET-plast fra kasserede sodavandsflasker er 0,00 til 0,40 USD pr. kg, da plasten kan indsamles gratis som affald, hvilket fjerner udgiften til jomfrueligt materiale og mindsker plastudledningen i naturen. Til sammenligning koster biomasse 0,04 til 0,09 USD pr. kg, men udleder CO2 under produktionen.

Kulstofudbyttet ved PET-metoden ligger på 25 til 35 %, hvilket skyldes, at fosforsyre danner polyfosfat-broer og fosfat-esterbindinger med polymerens hydroxygrupper, som fastlåser carbonskelettet under pyrolysen. Til gengæld har biomasse med damp et udbytte på 15 til 25 %, og biomasse med KOH har et udbytte på 10 til 20 %. Reagensomkostningerne for PET og fosforsyre er 0,80 til 1,40 USD pr. kg, men metoden har den fordel, at op mod 80 % af fosforsyren kan genanvendes i efterfølgende aktiveringer. Dampmetoden bruger ingen kemikalier og koster 0,00 USD i reagenser, hvorimod KOH-aktivering er meget dyr med 2,50 til 5,00 USD pr. kg.

Procestemperaturen for PET-metoden ligger på 450 til 600 grader, og i projektets specifikke model helt nede på 400 grader, fordi fosforsyre virker som katalysator, hvilket holder energiomkostningerne nede på 0,40 til 0,70 USD pr. kg. Dampaktivering kræver markant højere temperaturer på 850 til 1000 grader og dermed højere energiomkostninger på 0,80 til 1,30 USD pr. kg, mens KOH kræver 700 til 800 grader. Reaktormaterialerne til PET og damp kræver en moderat pris, hvorimod KOH-metoden kræver meget dyre materialer på grund af det aggressive reagens.

Samlet lander produktionsprisen for PET-metoden på 2,80 til 4,20 USD pr. kg, hvor dampmetoden er billigst med 1,20 til 2,20 USD pr. kg, og KOH er dyrest med 5,50 til 10,00 USD pr. kg. Til gengæld opnår PET-produktet et stort indre overfladeareal på 800 til 1500 kvadratmeter pr. gram, hvilket overgår dampmetodens 600 til 1000 kvadratmeter pr. gram. Kemiske undersøgelser i projektet viser, at PET-produktet som følge heraf kan lagre 80 til 150 % mere CO2 pr. gram end biomasse-damp-produktet.

Projekt forskerspirer 2026

Bilag 3 - Budgetoversigt

Materiale / Udstyr	Antal	Pris i DKK	Kommentar
Fosforsyre (H_3PO_4, 85 % lab-grade)	1 L	850 kr.	Anvendes som kemisk aktiveringsmiddel til imprægnering af PET
PET-affald (sodavandsflasker)	20 stk.	0 kr.	Indsamles gratis som genbrugsplast fra husholdning
Porcelænsdigle med låg	5 stk.	600 kr.	Til opbevaring af prøven under pyrolyse i muffelovn
Muffelovn	1 stk.	Lånes af KU	Til varmebehandling og carbonisation ved 400°C
Analytisk vægt	1 stk.	Lånes af KU	Til præcis afvejning af PET og fosforsyre
Laboratorieglasudstyr (bæreglas, tragte, filterpapir)	1 sæt	1.500 kr.	Til udvaskning, filtrering og rensning af det porøse carbon
Demineraliseret vand	10 L	200 kr.	Til vask og neutralisering af det aktiverede kul
pH-indikatorpapir / pH-meter	1 stk.	350 kr.	Til kontrol af neutral pH-værdi under vaskeprocessen

Projekt forskerspirer 2026

Materiale / Udstyr	Antal	Pris i DKK	Kommentar
Uforudsete omkostninger / Forbrugsstoffer	-	1.500 kr.	Sikkerhedsudstyr (handsker, briller), ekstra filtre og smådele
I alt		5.000 kr.	
Rest		15.000 kr.	