

Slutrapport

Energimyndighetens titel på projektet – svenska
Ligninbaserade batterier

Energimyndighetens titel på projektet – engelska
Lignin-based batteries

Organisation
Lunds universitet, 202100-3211
Kemiteknik
Box 124, 221 00 Lund

Namn på projektledare
Christian Hulteberg

Namn på eventuella övriga projektdeltagare
Rakel Wreland Lindström, KTH
Amirreza Khataee, KTH
Gunnar Henriksson, KTH
Monalisa Chakraborty, KTH
Omar Abdelaziz, LU
Mariona Battestini Vives, LU
Marcel van de Peppel, Miscancell

Nyckelord
Lignin, Reverse flow batteries, depolymerisation, techno-economic
assessment

Förord

Projektet har genomförts vid institutionerna för kemiteknik vid Lunds universitet och Kungliga tekniska högskolan i Stockholm. Båda institutionerna är tacksamma för de ekonomiska medel som tillförts från Energimyndigheten, men också det bidrag i form av framtagning av speciallignin som gjorts av det Nederländska företaget Miscancell.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	4
Inledning/bakgrund	5
Genomförande	7
Resultat	8
Diskussion	11
Publikationslista	11
Referenser, källor	16
Bilagor	18

Sammanfattning

Projektet syftade till att utveckla nya naturliga, vattenbaserade organiska redoxlösningar baserade på lignin, som elektrolyter i ett flödesbatteri. Dessa hade potential att drastiskt minska kostnaden för energilagring för stationära tillämpningar i jämförelse med till exempel motsvarande flödesbatterier baserade på vanadin eller Li-jonbatterier. I projektet modifierades biprodukten lignin från massa- och papperstillverkning genom att använda en ny metod för depolymerisering av lignin, som utvecklats vid kemiteknik på Lunds universitet. Lösningarna karakteriserades sedan elektrokemiskt i flödesbatteri vid kemiteknik på Kungliga tekniska högskolan i Stockholm. Inom ramen för projektet optimerades först den oxidativa depolymeriseringen för att generera lämpliga ligninfragment både som de var efter depolymerisering och efter ytterligare modifiering. För batterierna undersöktes egenskaper som cellresistans, kapacitetsbevarande och coulombisk effektivitet, och en teknoekonomisk studie genomfördes. Nästa steg i utvecklingen blir att fortsätta förbättra redoxlösningarna och skala upp processen till kommersiell skala.

Summary

The project aimed to develop new natural, water-based organic redox solutions based on lignin, to be used as electrolytes in a flow battery. These have the potential to drastically reduce the cost of energy storage for stationary applications compared to, for example, equivalent flow batteries based on vanadium or Li-ion batteries. In the project, the by-product lignin from pulp and paper production was modified using a new method for lignin depolymerization, developed at the Department of Chemical Engineering at Lund university. The solutions were then electrochemically characterized in a flow battery at the Department of Chemical Engineering at the Royal institute of technology, Stockholm. Within the framework of the project, the oxidative depolymerization was first optimized to generate suitable lignin fragments both as they were after depolymerization and after further modification. For the batteries, properties such as cell resistance, capacity retention, and coulombic efficiency were investigated, and a techno-economic study was conducted. The next step in the development will be to continue improving the redox solutions and scale up the process to a commercial scale.

Inledning/bakgrund

Det är såklart önskvärt att öka andelen förnybar elektricitet i elnätet, av miljö- och klimatskäl. En utmaning med en ökande andel förnybar elektricitet är att den typiskt är mer fluktuerande i naturen än traditionell baslast. Detta gäller främst för sol och vind, som är väderberorende. Ett sätt att jämna ut dessa variationer är att använda olika former av energilagring, till exempel batterier. Vanliga batterier är tunga, kostsamma och dyra, varför flödesbatterier ses som en potentiell möjlig väg för att möjliggöra lagring av elektricitet för längre perioder och till lägre kostnad. Flödesbatterier har en möjlighet att när elen produceras i överskott ladda en elektrolyt med elektroner, en elektrolyt som sedan kan lagras i tankar, för att sedan användas när behov finnes. Detta ger en större flexibilitet och möjliggör längre lagring än vad som är rimligt med vanliga batterier.

Projektet har syftat till att utveckla nya naturliga, vattenbaserade organiska redoxlösningar baserade på lignin, som elektrolyter i ett flödesbatteri. Dessa har potential att drastiskt minska kostnaden för energilagring för stationära tillämpningar i jämförelse med till exempel motsvarande flödesbatterier baserade på vanadin eller Li-jonbatterier för den delen. I projektet modifierades biprodukten lignin från massa- och papperstillverkning genom att använda en ny metod för depolymerisering av lignin, som utvecklats vid kemiteknik på Lunds universitet. Lösningarna karakteriserades sedan elektrokemiskt i flödesbatteri vid kemiteknik på Kungliga tekniska högskolan i Stockholm. Inom ramen för projektet optimerades först den oxidativa depolymeriseringen för att generera lämpliga ligninfragment både som de var efter depolymerisering och efter ytterligare modifiering. Projektet har utförts under en treårs period med Lunds universitet och Kungliga tekniska högskolan som projektgenomförare, med stöd från energimyndigheten och det nederländska bolaget Miscancell.

Lignin har under många år betraktats som en attraktiv startpunkt för syntes av kemikalier och bränslen. Det har dock visat sig svårt att omvandla denna makromolekyl till nyttiga produkter då den är mycket stabil. Lignin har under miljoner år utvecklats för att hålla samman cellulosa och hemicellulosa i träd och är således förbättrad under lång tid mot både kemiska och biologiska angrepp. För att göra ligninet tillgängligt behöver den delas upp i mindre bitar, depolymerisering. Den vanligaste metoden för depolymerisering av lignin är Kraftprocessen som används för tillverkning av 76% av världens pappersmassa. Det finns några andra metoder som sulfittkokning (8%) och antrakinon, alcell och organocell (de tre sista totalt 16%) [5]. Ligninet i svartluten efter koket har molvikter över 100 000 g/mol med ett medeltal på ca 30 000 g/mol. Dessa höga molekylvikter gör det svårt att använda ligninet för produktion av

finkemikalier och därför har en hel del arbete lagts ner på depolymerisering av ligninet. Detta arbete brukar delas in i fem underkategorier, baserat på metoden som använts [6-11]:

1. Pyrolys
2. Krackning
3. Hydrogenolys
4. Hydrolys eller baskatalys
5. Superkritiska lösningsmedel

Ingen av dessa metoder har dock visat sig tillräckligt effektiv och selektiv för att producera korta fragment av lignin för syntes av finkemikalier och bränslen. Därför har ligningruppen vid Lunds universitet tagit fram en ny metod som med kort uppehållstid oxidativt kan depolymerisera lignin till små fragment och på så sätt skapa molekyler som kan användas på ett effektivt sätt [12].

Flödesbatterier är normalt sett baserade på dyra och giftiga metallbaserade redoxpar. Dessa lösningar pumpas från en tank till en annan genom en elektrokemisk cell för att laddas respektive laddas ur. Nyligen har icke-toxiska, billiga, vattenlösliga och kommersiellt tillgängliga organiska redoxpar, med tillräckligt låg standardpotential för de negativa sida, identifierats som utmärkta alternativ till metalljoner. Att finna ett lämpligt redoxpar för den positiva sida är dock fortfarande en utmaning. Den naturliga träpolymeren lignin kan vara en lovande kandidat eftersom den finns rikligt, kan fås för en extremt låg kostnad, miljövänlig och vattenlös. Våra initiala elektrokemiska karakteriseringar av lignosulfonat visar lovande reversibilitet. [13-19]

Problemet med nuvarande redoxpar är att de är för dyra för att kunna fungera i större utsträckning. För att ge en indikation på kostnadsmål har US DOE gett ett långsiktigt kostnadsmål på under 150 USD/kWh [20]. Vilket effektivt utesluter alla nuvarande vanadinbaserade batterier som hamnar i intervallet 300-800 USD/kWh. Till stor del beroende på kostnaden för vanadin (40-60%), som fluktuerat med flera 100% under den senaste 10-årsperioden. Att kunna använda ligninkomponenter, med en startkostnad på några USD/kg är en stor konkurrensfördel, samtidigt som det tillför en ytterligare dimension till nuvarande papper- och massabruk, som kan fungera som billiga lagringsplatser för varierande förnybar elektricitet.

Genomförande

Projektet har delats in och genomförts i fem arbetspaket. Att notera är att arbetspaketen leds av tre olika personer, Christian Hulteberg (CH), Rakel Wreland Lindström (RWL) och Gunnar Henriksson (GH). Arbetspaketen har varit:

1. Oxidativ lignindepolymerisering (CH)
2. Modifiering av ligninderivaten för ökad elektrontäthet (RWL)
3. Elektrokemisk utvärdering av ligninkomponenter i flödesbatteri (RWL)
4. Integrering och kostnadsanalyser av tekniken (CH)
5. Projektledning och dissemineringsaktiviteter (GH)

Arbetspaket ett leddes av CH och pågick månad 1-24 och använde nya reaktorer för att med kort uppehållstid depolymerisera lignin med hjälp av syre. Detta sker genom kontakt med nya katalysatormaterial och syftar till ett så högt utbyte som möjligt till användbara komponenter. I det här sammanhanget definieras sådana som de som kan användas för att transportera laddning och måste således vara vattenlösliga. En parameterstudie av olika reaktionsbetingelser, (lignintyp, uppehållstid, temperatur och katalysator) har använts för att bestämma de bästa betingelserna för att generera önskade komponenter. Viktigt är också det tekniskt lignin som är utgångspunkt, då olika växter och kokningsmetoder ger lignin med skilda egenskaper. På KTHs labbkokeri kan flera olika råvaror och massakokningsmetoder utföras. Speciallignin har också tillhandahållas av Miscancell, baserad på elefantgräs.

Arbetspaket två leddes även det av CH, och pågick månad 12-30 AP 2 och syftade till att omvandla de ligninfragment som erhålls i det första arbetspaketet till att både bli mer vattenlösliga och öka förmågan att bära laddning, och fungera vid olika redoxpotentialer. Detta gjordes främst genom att addera funktionella grupper så som nitrering, hydrolys, metylering, propylering och fenoladdition, gärna i kombination då dessa aktiveringar fyller olika syften.

Arbetspaket tre leddes av RWL och pågick månad 1-30. I arbetspaketet studerades de ligninbaserade elektrolyternas redoxkemi med klassiska elektrokemiska metoder. De mest lovande kandidaterna har karakteriserats i flödescell och effekten av koncentration, pH och temperatur studerades med avseende på prestanda och livslängd. Möjligheten att öka hastigheten för redoxreaktionerna genom modifikation/aktivering av de porösa elektroderna baserade på kolmaterial har undersökt.

Arbetspaketet fyra leddes av CH och pågick månad 30-36 av projektet. I det fjärde arbetspaketet gjordes ekonomiska kvantifieringar av den utvecklade tekniken. Kvantifieringen använder sig av teknikens begränsningar vad gäller överföring av laddning och kunde på så sätt undersöka i vilken skala denna typ av anläggning passar sig bäst. Vidare gjordes preliminära designers av system kring tekniken som jämfördes med kommersiella dito vad avser tekno-ekonomiska avväganden. De resulterande investeringskostnaden och vilka möjliga prissättnings strategier på elektricitet och årsproduktion är nödvändig för att få systemet att fungera bestämdes.

Arbets paket fem leddes av GH och pågick månad 1-36. Inom ramen för detta arbetspaket samordnades projektet. Möten ordnades och strategier för immaterialrätt och effektiv kommunikation togs fram.

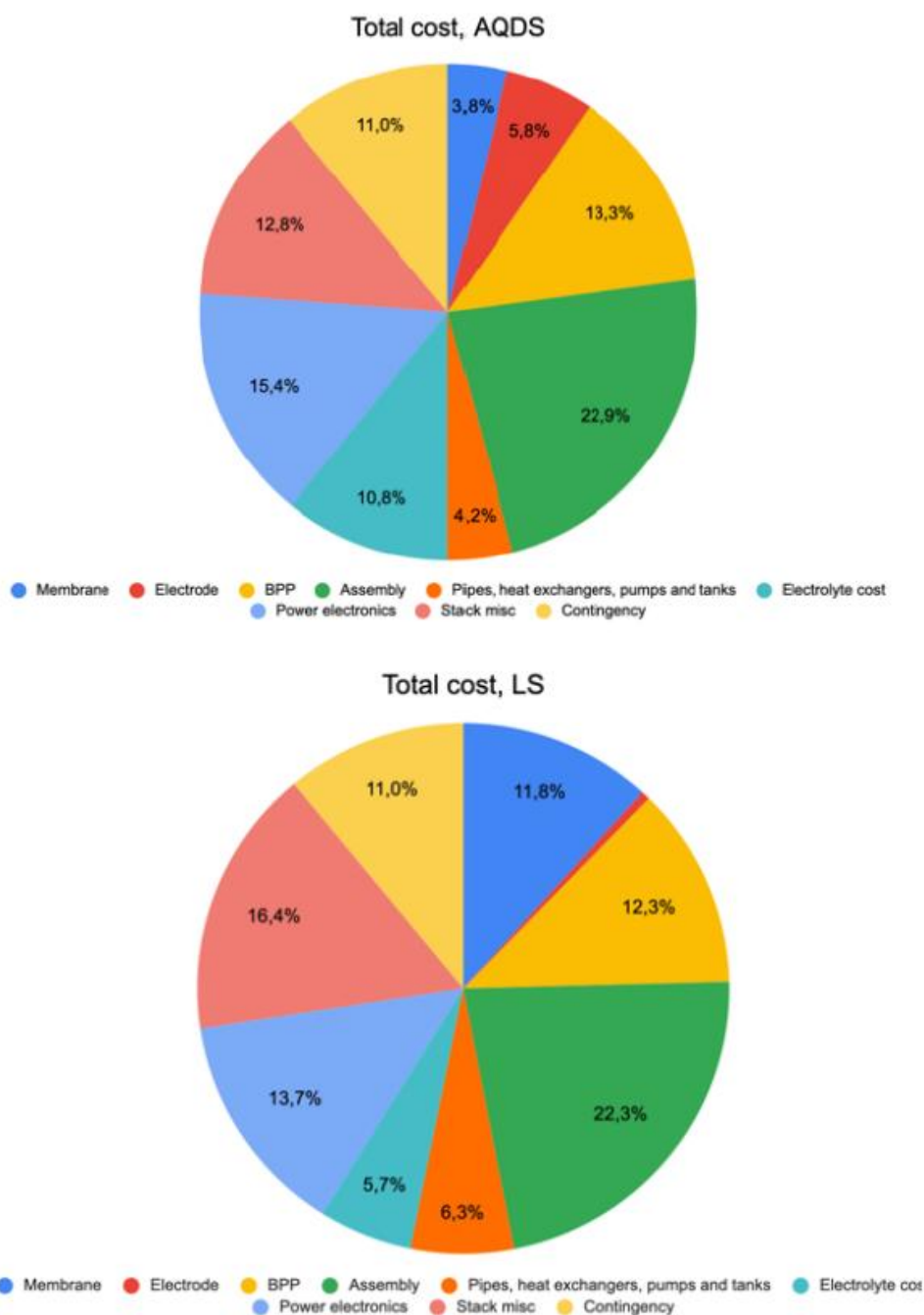
Projektet har karakteriserats av gränsöverskridande samarbete. Inte nog med att Monalisa Chakraborty från KTH spenderat mer än en vecka i Lund för att lära sig mer om lignindepolymerisering. Även Omar Abdelaziz från Lunds universitet spenderade tre månader i Anders Riisagers grupp katalyse og bæredygtig kemi på Danmarks tekniska universitet i Köpenhamn. Utöver Riisager har van der Peppel bidragit till projektet motsvarande en referensgrupp.

Resultat

När det kommer till depolymerisering av lignin inom projektet, har fokus legat på oxidativa depolymerisationsmetoder, som bryter ner lignin med hjälp av heterogena katalysatorer. Denna metod har fördelen av milda driftförhållanden och förmågan att producera riktade produkter som aromatiska aldehyder och syror. Det finns dock både utmaningar och möjligheter inom detta område. Katalysatorernas effektivitet är en viktig fråga, med problem som katalysatordeaktivering och urlakning av den aktiva fasen som måste lösas. Vidare är separationstekniker för att renframställa produkterna avgörande för att förbättra utbytet i processen, och avancerade analytiska metoder behövs för att bättre förstå och optimera depolymerisationen. Framtida riktningar inkluderar utveckling av stabila katalysatorer som kan återvinnas och återanvändas, effektiva separationsprocesser för att rena produkter, och ett fokus på hållbara, miljövänliga och ekonomiskt lönsamma metoder för användning av lignin. Arbetet med att förbättra ligninets egenskaper var svårare än det förutsetts. Att göra dessa mer vattenlösliga och öka förmågan att bära laddning, och fungera vid olika redoxpotentialer bygger på kemiska substitutionsmetoder som var svåra att få till. Främst att addera funktionella grupper genom nitring och fenoladdition, var utmanade och skulle behöva jobbas mer med framgent. De försök som gjordes visade inte på några signifikanta förbättringar av ligninet.

Hela projektkonceptet bygger på att lignin, en biprodukt från massa- och pappersindustrin, är rik på kinongrupper, vilket gör det till en potentiell kandidat för RFB. Dock utgör dess elektrokemiska irreversibilitet en utmaning. Under projektets gång har deltagarna modifierat sodabaserat lignin och lignosulfonater genom oxidativ depolymerisering, vilket förbättrar dess elektrokemiska aktivitet. Det modifierade ligninet visar distinkta redox-toppar i cykliska voltammetritester. I RFB försök har det modifierade ligninet använts negolyt med kaliumferrocyanid som motpart. RFB:n visar god prestanda över 200 cykler med en genomsnittlig coulombisk effektivitet på 91%. Den modifierade ligninelektrolyten bibehåller sina (elektro)kemiska egenskaper även efter fyra månaders lagring, vilket indikerar god stabilitet och effektivitet. Vidare forskning om att förbättra ligninets elektrokemiska reversibilitet och att utforska andra typer av lignin för RFB-applikationer är rimliga fortsatta aktiviteter.

Redoxflödesbatterier (RFBs) har potential att stödja intermittenta el-källor och ge en stabilare elförsörjning. Dessa batterier är som bekant kända för sin höga kapacitet, långa livscyklar, snabba responstid och anpassningsförmåga. Vanadiumbaserade RFBs är de mest utvecklade, men på grund av höga kostnader och funderingar kring vanadinens tillgänglighet har ligninbaserade elektrolyter som ett hållbart alternativ inom ramen för detta projekt. Lignin, en biprodukt från pappersindustrin, har lovande egenskaper för energilagring och lignosulfonat, en ligninbaserad elektrolyt, valdes för vidare utveckling. En design för ett RFB med lignosulfonat utvecklades, inklusive val av strömkollektorer, membran och elektroder. En tekno-ekonomisk bedömning jämförde lignosulfonatbaserade (LS, vanadinbaserade och AQDS (9,10-antrakinon-2,7-disulfonsyra)-baserade RFBs. Kostnaden för lignosulfonatbatteriet beräknades till €10,8 miljoner, AQDS till €9,7 miljoner och vanadin till €16,6 miljoner. Figuren nedan visar hur kostnaden fördelar sig för de två första typerna av RFB.



För att visa på hur batterierna kan bidra till stabilitet i elnätet valdes året 2022 ut som ett basfall. För elområde 4 gjordes en studie för ett batteri med en energikapacitet om 20 MWh. Timvisa variationer i spotpriset beaktades, med en uppskattad laddnings- och urladdningstid på 8 timmar vardera, vilket resulterade i totalt 16 timmar per cykel för batteriet. Det antogs också att batteriet inte var värt att ladda om inte den möjliga intäkten från en cykel var minst 357 euro, för att begränsa antalet icke-

lönsamma cykler. Ett genomsnittligt värde av priset per kWh för de billigaste 8 timmarna av cykeln jämfördes med genomsnittet av de 8 dyraste timmarna, och skillnaden skalades för att uppskatta möjlig vinst för ett 20 MWh batteri. Under 2022 kunde 4 640 MWh potentiellt ha lagrats och återförts till elnätet över totalt 232 cykler. Detta hade lett till en intäkt på ca 7 111 000 kr.

Trots att lignosulfonatbatteriet visade jämförbara prestanda och kostnader med kommersiella vanadinbaserade RFB, är investeringskostnaden för hög för att vara lönsam just nu om rimliga avskrivningstider och räntor antas. Detta gäller även för de vanadinbaserade batterierna. Det finns dock hopp om framtida utveckling som kan sänka kostnaderna.

Diskussion

Som visats i resultatdelen kan även medelstora batterier bidra med mycket energi på årsbasis. I beräkningarna ovan har 20 MWh batterikapacitet antagits, vilket ger möjlighet att balansera upp emot 5 000 MWh på årligen. Ett batteri av denna storlek kan således buffra motsvarande ca 2 moderna vindkraftverks produktion. Att använda lignin som laddningsbärare i flödesbatterier förefaller vara en framkomlig väg för god prestanda, utan att öka behovet av fossila molekyler. Nästkommande steg är att förfina tekniken, besluta vilka redox par som bäst används och börja resan med att skala upp tekniken till full skala.

Publikationslista

Följande artiklar har publicerats, eller förbereds för publikation som ett resultat av projektet:

1) Monalisa Chakraborty, Mariona Battestini Vives, Omar Y. Abdelaziz, Gunnar Henriksson, Rakel Wreland Lindström, Christian P. Hulteberg, and Amirreza Khataee; Lignin-based Electrolytes for Aqueous Redox Flow Batteries, ACS Sustainable Chemistry & Engineering journal, 2024, 42, 15409-15417.

Sammanfattning: Lignin är en av de vanligaste biopolymererna på jorden, och finns till stor del i restströmmen från massa- och pappersindustrin. Teknisk lignin är vattenlöslig, giftfri och rik på kinongrupper; därför skulle det kunna vara en potentiell redoxämne för nästa generations vattenbaserade RFB. Trots att det har attraktiva egenskaper visar lignin dock inte ett reversibelt elektrokemiskt beteende. Därför implementerades här en enkel metod för att modifiera strukturen av sodabaserad lignin

genom oxidativ depolymerisation. Den modifierade ligninen visade god elektrokemisk aktivitet genom cyklisk voltammetri med distinkta redox-toppar, som matchar ligninmonomerer som vanillin och acetovanillon. Den modifierade ligninen användes som negolyt i RFB-uppsättningen med kaliumferrocyanid som motpart. RFB:n cyklades över 200 cykler med en genomsnittlig Coulombisk effektivitet på 91%. Dessutom bibehöll den modifierade ligninelektrolyten de (elektro)kemiska egenskaperna även efter fyra månaders lagring, vilket bevisades genom RFB-tester.

2) Omar Y. Abdelaziz, Mariona Battestini Vives, Smita V. Mankar, Niklas Warlin, Tran Tam Nguyen, Baozhong Zhang, Christian P. Hulteberg, and Amirreza Khataee; Recent strides toward transforming lignin into plastics and aqueous electrolytes for flow batteries, iScience journal, 2024, 27, 109418.

Sammanfattning: Lignin är en vanligt förekommande polyaromatisk polymer med ett brett spektrum av potentiella framtida användningsområden. Omvandlingen av lignin till värdefulla produkter medför dock en kostnad, och medel- till högvärdiga tillämpningar är därför lämpliga. Två exempel på dessa är polymerer (t.ex. som fibrer, mjukgörare eller tillsatser) och flödesbatterier (t.ex. som redoxämnen). Båda dessa områden skulle gynnas av ligninderiverade molekyler med potentiellt låg molekylvikt och hög (elektro)kemisk funktionalitet. En lovande väg för att erhålla sådana molekyler är oxidativ lignindepolymerisation, eftersom det möjliggör bildandet av ligninföreningar med flera funktionaliteter. En tillämpning med hög potential inom plastproduktion är syntesen av nya hållbara polymerer. Användning av organiska molekyler, såsom kinoner och heterocykliska föreningar, skulle vara ett viktigt steg mot hållbarheten hos vattenbaserade flödesbatterier.

3) Abdelaziz, O. Y., Clemmensen, I., Meier, S., Bjelić, S., Hulteberg, C. P., & Riisager, A. (2023). Oxidative Depolymerization of Kraft Lignin to Aromatics Over Bimetallic V–Cu/ZrO₂ Catalysts. Topics in Catalysis, 66(17), 1369-1380.

Sammanfattning: Katalysatorer med vanadin och koppar, lagda på en bärare av zirkoniumoxid användes för oxidativa depolymerisation av barrveds lignin, framställd med LignoBoostprocessen. Flertalet olika katalysatorer med vanadin och koppar, lagda på en bärare av zirkoniumoxid genom impregnering med incipient wetness tillverkades med olika förhållande mellan koppar och vanadin, och reaktioner utfördes i alkaliskt vatten vid 150 °C under ett O₂-tryck på 5 bar i 10 minuter. 1H–13C HSQC NMR-spektroskopi användes för produktidentifiering och

kvantifiering. Den mest lovande katalysatorn var när vandin och koppar förekom i förhållandet 1:2, vilket gav en total monomeryield på 9 viktprocent och den högsta selektiviteten för vanillin (59%). Klyvning av de huvudsakliga interenhetsbindningarna i ligninen, inklusive β -O-4-bindningarna och svårnedbrytbara C–C-bindningar, observerades också. Resultaten av denna studie visar potentialen hos V–Cu/ZrO₂-katalysatorsystemet för produktion av mervärdesaromater från tekniskt lignin under relativt milda förhållanden. Detta skulle bidra till en mer hållbar användning av en underutnyttjad sidoström i skogsbaserade industrier, förutsatt att katalysatoråteranvändning kan demonstreras framgångsrikt.

4) Abdelaziz, O. Y., Clemmensen, I., Meier, S., Costa, C. A., Rodrigues, A. E., Hulteberg, C. P., & Riisager, A. (2022). On the Oxidative Valorization of Lignin to High-Value Chemicals: A Critical Review of Opportunities and Challenges. ChemSusChem, 15(20), e202201232.

Sammanfattning: Effektiv värdeökning av lignin är en lovande väg om vi ska kunna ersätta nuvarande petroleumbaserade råvaror och etablera mer hållbara och konkurrenskraftiga lignocellulosabioraffinaderier. Massa- och pappersbruk samt andragenerationsbioraffinaderier producerar stora mängder lågvärdigt tekniskt lignin som biprodukt, vilket ofta förbränns på plats för energiåtervinning. Denna artikel är av översiktskaraktär och fokuserar på omvandlingen av tekniska ligniner genom oxidativ depolymerisation med hjälp av heterogena katalysatorer. Den granskar den aktuella litteraturen som beskriver användningen av olika heterogena katalysatorer vid oxidativ depolymerisation av lignin och inkluderar en jämförelse av metoder, katalysatorbelastningar, reaktionsmedier och typer av katalysatorer som används, samt reaktionsprodukter och utbyten. Vidare diskuteras nuvarande tekniker för bestämning av produktutbyten och produktåtervinning. Slutligen beskrivs utmaningar och förslag för framtida tillvägagångssätt.

5) Monalisa Chakraborty, Mariona Battestini Vives, Omar Y. Abdelaziz, Gunnar Henriksson, Rakel Wreland Lindström, Christian P. Hulteberg, and Amirreza Khataee; Lignosulfonate, a Potential Redox Species for Aqueous Redox Flow Batteries, manuscript under construction.

Sammanfattning: För tidigt för att kunna sammanfatta i detalj, men utgår från lignosulfonaters egenskaper och hur det passar som redoxämnen i RFB.

6) Omar Y. Abdelaziz, Mariona Battestini Vives, Monalisa Chakraborty, Gunnar Henriksson, Rakel Wreland Lindström, Christian P. Hulteberg, Amirreza Khataee; Oxidative Depolymerization of Lignin to Aqueous Electrolytes for Sustainable Redox Flow Batteries, manuscript under construction.

Sammanfattning: För tidigt för att kunna sammanfatta i detalj, men fokuserar mot cykling och användning av oxidativ depolymerisering för att framställa lämpliga elektrolyter från lignin.

Utöver artiklar har ett studentprojekt på magisternivå för kemiteknikstudenter genomförts

7) Paula Cerenius, Lina El Manira, Emil Hed, Sarah Wolfe, Omar Y. Abdelaziz, Christian P. Hulteberg, and Amirreza Khataee; Techno-Economic Assessment of Lignin-based Redox Flow Batteries, Project in Feasibility Studies on Industrial Plants (KETN25) course, 2023.

Sammanfattning: En tekno-ekonomisk utvärdering gjordes av fem studenter på magisternivå vid Lunds universitet på ett RFB med lignosulfonat och jämfördes med andra möjliga RFB-designer, en vanadinbaserad och en med AQDS. Den tekno-ekonomiska bedömningen för det lignosulfonatbaserade RFB visade jämförbara värden med de kommersiellt tillgängliga vanadinbaserade RFB:erna, både i prestanda och pris, vilket indikerar potential i den mer hållbara elektrolyten. De totala kostnaderna för de olika systemen beräknades enligt följande: lignosulfonatbatteri €10,8 miljoner, AQDS €9,7 miljoner och vanadin €16,6 miljoner.

Utöver dessa publikationer presenterades resultaten vid ett antal konferenser i USA, Storbritannien, Norge och Sverige.

8) Abdelaziz, O.Y., Vives, M.B., Chakraborty, M., Henriksson, G., Lindström, R.W., Hulteberg, C.P. and Khataee, A.; Oxidative Depolymerization of Lignin to Aqueous Electrolytes for Redox Flow Batteries, The 2024 AIChE Annual Meeting, San Diego Convention Center and Hilton San Diego Bayfront, San Diego, CA United States, October 27–31, 2024.

9) Vives, M.B., Chakraborty, M., Abdelaziz, O., Khataee, A., van de Peppel, M., Henriksson, G., Lindström, R.W. and Hulteberg, C.; Sustainable Redox Flow Batteries Using Lignin-Based Electrolytes, The 2023 International Conference on Resource Sustainability (icRS), Guildford, Surrey, the United Kingdom, August 7–9, 2023.

10) Mariona Battestini Vives, Monalisa Chakraborty, Omar Y. Abdelaziz, Amirreza Khataee, Christian P. Hulteberg; Lignin-based electrolytes for redox flow batteries via oxidative depolymerization, The Energy Transition retreat at Mossbylund, Sweden, January 11-12, 2024.

11) Mariona Battestini Vives, Monalisa Chakraborty, Omar Y. Abdelaziz, Amirreza Khataee, Christian P. Hulteberg; Lignin-based electrolytes for redox flow batteries via oxidative depolymerization, Nordic Wood Biorefinery Conference, Sweden, October 15-17, 2024.

12) Monalisa Chakraborty, Mariona Battestini Vives, Omar Y. Abdelaziz, Gunnar Henriksson, Rakel Wreland Lindström, Christian P. Hulteberg, and Amirreza Khataee; Towards sustainable redox flow battery (RFB) with lignin-based electrolyte, Nordbat conference, Norway, September 24-27, 2024.

Referenser, källor

- [1] O. Wallberg, Extraction of lignin from kraft cooking liquor by ultrafiltration, PhD Thesis, Lund University, Sweden, 2005.
- [2] Arkell et al., Process Performance in Lignin Separation from Softwood Black Liquor by Membrane Filtration, *Chem. Eng. Res. Des.*, 92 (2014), 1792
- [3] L. Stigsson, Final Report for a Mistra Innovation Project Green Gasoline, 2014.
- [4] Jáuregui-Haza et al. Solubility of hydrogen and carbon monoxide in water and some organic solvents, *Lat. Am. Appl. Res.* 34 (2004) 71
- [5] Zhao et al. Depolymerization and Deoxygenation of Lignin, in: K. Triantafyllidis et al. (Eds.), *Role Catal. Sustain. Prod. Bio-Fuels Bio-Chemicals*, Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands (2013): pp. 289
- [6] Huber et al. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering, *Chem. Rev.* 106 (2006) 4044
- [7] Zakzeski et al. The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals, *Chem. Rev.* 110 (2010) 3552
- [8] Amen-Chen et al., Production of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: a review, *Bioresour. Technol.* 79 (2001) 277
- [9] Brebu and Vasile, Thermal degradation of lignin—a review, *Cellul. Chem. Technol.* 44 (2010) 353
- [10] Ragauskas et al., Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery, *Science*. 344 (2014) 1246843.
- [11] Xu et al. Lignin depolymerisation strategies: towards valuable chemicals and fuels, *Chem. Soc. Rev.* 43 (2014) 7485
- [12] Abdelaziz et al., Oxidative Depolymerization of Kraft Lignin for Microbial Conversion, (2019) *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 7 (13). 11640

- [13] Wedege et al. Organic Redox Species in Aqueous Flow Batteries: Redox Potentials, Chemical Stability and Solubility. *Sci. Reports.* 6 (2016) 39101.
- [14] Leung et al. Recent developments in organic redox flow batteries: A critical review. *J. of Power Sources.* 360 (2017) 243
- [15] Khataee et al., *J. of Mat. Chem. A.* 5 (2017) 21875
- [16] Wedege et al. *Angewandte Chemie Int. Ed.* 55 (2016) 7142
- [17] Khataee et al. *Nano Energ.* 62 (2019) 832
- [18] Arnbjerg et al. *J. of Chem. Education.* 96 (2019) 1465
- [19] Khataee et al., *J. of The Electrochem. Soc.* 165 (2018) A3918
- [20] U.S. Department of Energy, Grid Energy Storage Report, <https://www.energy.gov/oe/downloads/grid-energy-storage-december-2013>, 2013

Bilagor

I det elektroniska systemet har alla publicerade publikationer bifogats och den studentrapport som gjorts har också bifogats i sin helhet.