

PER OLA ANDERSSON, EVA DALBERG, CECILIA DURING,
PETRUS HEMSTRÖM, LINDA H KARLSSON, CESAR LOPES



Per Ola Andersson, Eva Dalberg, Cecilia During,
Petrus Hemström, Linda H Karlsson, Cesar Lopes

Hydroorganogeler

En avskanning av forskningsfronten

Titel	Hydroorganogeler – En avskanning av forskningsfronten
Title	Organohydrogels – A Horizon Scanning
Rapportnr	FOI-R--5341--SE
Månad	Oktober
Utgivningsår	2022
Antal sidor	20
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	Försvarsmakten
Forskningsområde	Operationsanalys och strategisk planering
FoT-område	Program för forskningsskanning och teknisk prognos
Projektnr	E12226
Godkänd av	Malek Finn Khan
Ansvarig avdelning	Försvarsanalys

Bild/Cover: Shutterstock

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Forskningen om nya material är omfattande. Ett område som röner ökat intresse är geler och då specifikt hydroorganogeler. Hydroorganogeler är material som byggs upp av flexibla porösa tredimensionella polymera nätverk med vatten, organiska lösningsmedel och eventuellt andra substanser i porerna. Antalet publikationer inom området är under kraftig tillväxt. Intresset drivs av materialets egenskaper vilka kan vara intressanta i en rad tillämpningar. Det handlar t.ex. om hydroorganogelers flexibilitet och vidhäftningsförmåga, förmågan till självläkning, morfning, temperaturtålighet samt god elektrisk ledningsförmåga och värmeledningsförmåga.

En avskanning av vetenskaplig litteratur rörande hydroorganogeler (på engelska *organo-hydrogels*) har genomförts. Fokus för skanningen var frågeställningen huruvida hydroorganogeler är relevanta/intressanta för vidare forskning inom FOI, dvs. för eventuell tillämpning inom framtida försvarsförmågor. Avskanningen är initierad utgående från den identifierade forskningstrenden i publicerad litteratur.

Resultatet från avskanningen visar tydligt att det finns en lång rad intressanta och relevanta försvarstillämpningar där hydroorganogeler potentiellt kan ha en roll. Några exempel på särskilt intressanta tillämpningar är kroppsnära sensorer, batterifria sensorer och bioelektroniska enheter.

I rapporten framförs rekommendationer för framtida verksamhet. FOI bör fortsatt följa forskningen inom hydroorganogeler, men med en bredare ansats, omfattande fler liknande material. Vidare kan fördjupade studier/pilotprojekt inom något eller några utvalda områden övervägas, t.ex. utgående från någon eller några särskilt intressanta tillämpningar. I de fall den tekniska mognadsgraden bedöms vara tillräcklig skulle ett tekniskt prognosarbete kunna genomföras. Extern samverkan bör övervägas. Egen experimentell verksamhet, även i begränsad omfattning, kan bidra till att möjliggöra samverkan.

Nyckelord: Hydroorganogeler, organogeler, hydrogeler, material, avskanning, forskningsfront

Summary

There is extensive ongoing research in the domain of new materials. One area that has received enhanced interest is gels, specifically organohydrogels. These gels are composed by three-dimensional polymeric networks containing water, organic solvents, and sometimes, other substances in their pores. The number of publications within this area is growing fast. The main driving factors for the increasing interest are the inherent properties of organohydrogels, which makes them possible candidates for a multitude of applications. The material's flexibility, ability for self-adhesion and self-healing as well as its morphing ability are just some of the attributes that makes organohydrogels attractive. Organohydrogels are also temperature resilient and they have high electrical and thermal conductivities.

We have performed a horizon scanning of scientific peer-reviewed literature concerning organohydrogels. The focus of the scanning was to find out whether organohydrogels are relevant for further activities at FOI, particularly for applications within future military defence capabilities. The horizon scanning activity was initiated based on the identified trend in the peer-review literature.

The findings of the horizon scanning clearly shows that there are numerous military applications where organohydrogels potentially could play a role. Some examples worth noticing are wearable sensors, self-powered sensors and bio-electronic units.

This report presents recommendations for future work. It is suggested that FOI continues to follow the development of scientific knowledge in this area, although implementing a wider approach, also comprising other materials with similar properties as organohydrogels. Furthermore, in-depth studies of one or more fields might be considered, with regard to applications of particular interest. In cases where the technology readiness level is sufficiently high, performing a technology forecast could be relevant. Another recommendation is to consider external cooperation. Conducting own experimental research, although limited, may facilitate such cooperation.

Keywords: Organohydrogels, organogels, hydrogels, material, horizon scanning

Innehåll

1	Inledande översikt och rekommendationer	7
1.1	Hur har arbetet genomförts?	8
2	Vad är hydroorganogeler?	9
2.1	Vem forskar på hydroorganogeler?	10
3	Hydroorganogelers egenskaper och användning.....	12
3.1	Sammanfattande översikt.....	12
3.1.1	Syntes	12
3.1.2	Materialegenskaper	13
3.1.3	Sensortyper	13
3.1.4	Eftersträvad sensorprestanda.....	14
3.1.5	Tillämpningsområden.....	15
3.1.6	Styrkor hos hydroorganogeler	16
4	Handlingsalternativ	18
4.1	Utvalda referenser	19

1 Inledande översikt och rekommendationer

Hydroorganogeler valdes som ämne för avskanning inom projektet *Avskanning av forskningsfronten* under 2022 beroende främst på den starka ökningen av antalet publikationer inom området under de senaste åren.¹ Den här rapporterade avskanningen tar avstamp i en litteraturgenomgång med fokus på hydroorganogelers egenskaper och prestanda. Hydroorganogeler har potential för förbättrad prestanda inom en rad olika teknikområden, speciellt sensorer. Detta har orsakat den synnerligen starka tillväxten av antalet vetenskapliga publikationer under senare år.

Den övergripande frågeställningen har varit att undersöka om FOI fortsatt bör följa eller aktivt delta i forskningen inom hydroorganogeler, dvs. undersöka om området i förlängningen potentiellt kan vara relevant för Försvarmaktens framtida förmågebehov.

Resultatet från avskanningen visar tydligt att det finns en lång rad, för Försvarmakten intressanta och relevanta tillämpningar, där hydroorganogeler potentiellt kan ha en roll, exempelvis för att möjliggöra batterifria sensorer. Värdet av den nu genomförda avskanningen ligger därmed främst i att påvisa en pågående utveckling och potentiella framtida möjligheter inom en rad tillämpningsområden.

För att kunna svara på frågeställningen fullt ut skulle dock en jämförande värdering behöva genomföras för andra material med liknande egenskaper, där hydroorganogelers potential för olika tillämpningar utreds sida vid sida med andra material. Detta har inte rymts inom ramen för det nu genomförda arbetet, utan i denna rapportering kan endast slutsatser och rekommendationer presenteras baserade på värdering av hydroorganogeler i sin egen rätt.

Med detta i minnet besvaras den ställda frågan på flera sätt, utgående från olika perspektiv. Ur ett forskningsperspektiv rekommenderar vi att FOI fortsatt bör följa forskningen som bedrivs inom den typ av material som innefattar hydroorganogeler. Vidare bör en bredare ansats göras där fler materialtyper med liknande egenskaper omfattas. Detta angreppssätt för omvärldsbevakning skulle medge förutsättningar att skapa en mer heltäckande bild och därmed korrekt värdering. Dessutom säkerställs att snabb utveckling inom specifik forskning om andra geler och liknande material kan fångas upp.

Vi rekommenderar också att fördjupade studier/pilotprojekt inom något eller några utvalda tillämpningsområden övervägs. Dessa skulle antingen kunna vara inriktade mot jämförelser med andra intressanta liknande material eller bedrivs utgående från någon eller några av de tillämpningar där hydroorganogeler bedöms ha störst potential. Ett exempel på en specifik framtida försvarstillämpning är integrering av organisk elektronik i den mänskliga kroppen², kanske främst med nervsystemet³.

Egna laborativa studier kan vara relevanta, i synnerhet för potentiellt integritetskritiska tillämpningar. Att i viss utsträckning bedriva egen experimentell verksamhet kan även vara ett sätt att vara en intressant samarbetspartner. Samverkan med relevanta universitet och högskolor eller internationella partners bör övervägas.

Det noteras att den tekniska mognadsgraden (Technology Readiness Level, TRL) troligen är hög gällande vissa av de identifierade tillämpningsområdena vilket gör att det kan vara relevant och intressant att genomföra ett tekniskt prognosarbete. Ett exempel är forskningen inom smarta kroppsburna sensorer (eng. "wearables") för trådlös realtidsföljning av militär

¹ För mer detaljer kring urvalsprocessen, se Dalberg, E., During, C., Kindvall, G., Lindberg, A., *Urval av avskanningsämnen 2022 – beskrivning av metod och resultat*; FOI Memo 7868, 2022.

² Yang, Q. S.; Hu, Z. Y.; Rogers, J. A. Functional Hydrogel Interface Materials for Advanced Bioelectronic Devices. *Accounts of Materials Research* **2021**, 2 (11), 1010–1023. DOI: 10.1021/accountsmr.1c00142.

³ Berggren, M.; Glowacki, E. D.; Simon, D. T.; Stavrindou, E.; Tybrandt, K. In Vivo Organic Bioelectronics for Neuromodulation. *Chemical Reviews* **2022**, 122 (4), 4826–4846. DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00390.

personals hälsotillstånd, position och omgivning där energin potentiellt skulle kunna genereras av den som bär sensorn (eng. *self-powered*)⁴. Ur ett tillämpningsperspektiv rekommenderar vi därför att ett antal tillämpningar studeras parallellt för att sedan kunna värderas utgående från deras respektive militära nytta.

1.1 Hur har arbetet genomförts?

Denna rapport är resultatet av ett arbete genomfört av en arbetsgrupp bestående av fyra tekniska/vetenskapliga experter och två metodexperter/analytiker. Metodexperterna har ansvarat för arbetsmetod, urval av litteratur och genomförande av processen. De tekniska/vetenskapliga experterna har läst anvisat material och bedömt detta givet en fastställd mall. Bedömningarna diskuterades sedan under en heldagsworkshop⁵. Den här rapporten är en sammanställning av slutresultatet baserat på hela avskanningsprocessen. En uttalad ambition har varit att avskanningen ska genomföras med korta, sammanhängande tidsramar och tydligt begränsade resurser, främst av effektivitetsskäl, men också för att kunna nyttiggöra resultatet snabbare.

⁴ Wilson, J.R., Wearable electronics adapt to the infantry. *Military & Aerospace Electronics*, September 2016 (<https://www.militaryaerospace.com/articles/print/volume-27/issue-9/special-report/wearable-electronics-adapt-to-the-infantry.html>). (nedladdad 2022-09-08)

⁵ Denna workshop genomfördes på FOI i Kista 5 maj 2022. Vid workshopen deltog de tekniska/vetenskapliga experterna samt metodexperterna/analytikerna.

2 Vad är hydroorganogeler?

Geler är flexibla porösa tredimensionella nätverk bestående av polymerer och/eller kolloidala partiklar där porerna är fyllda med olika typer av lösningsmedel (vatten/saltlösningar och/eller organiska lösningsmedel) eller luft.

Hydrogeler och organogeler definieras av *The International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC)⁶ som geler där svällningsmedlet (eng. *swelling agent*) utgörs av vatten respektive ett organiskt ämne. Hydrogeler och organogeler är stora forskningsområden med ett antal kommersiella tillämpningar. På grund av sin biokompatibilitet återfinns dessa bl.a. inom kosmetika och matindustrin. Två välkända exempel på hydrogeler är kontaktlinser och svartvinbärsgele.⁷

Ett framväxande område, för vilket IUPAC ännu inte fastställt någon nomenklatur/definition för, är det som på engelska benämns *organohydrogels*. Vi har valt att använda *hydroorganogeler* som svensk benämning för denna klass av geler.

Hydroorganogeler kan sägas vara en hybrid mellan hydrogeler och organogeler. Hydroorganogeler framställs på liknande sätt som hydrogeler (tillverkningsprocessen för hydrogeler beskrivs senare i kap 3.1.1) eller genom att utgå från en hydrogel och delvis ersätta vattnet i gelen med ett organiskt lösningsmedel.⁸ Vattensubstitutionen genomförs för att förbättra prestandan för hydrogelen för specifika tillämpningar. Organiska lösningsmedel minskar gelens svällningsgrad och fryspunkt. De ger också en ökad interaktion mellan gelens polymerkedjor och förändrar därmed gelens mekaniska egenskaper.

Mycket av litteraturen som behandlar hydroorganogeler behandlar även det mycket närbesläktade området hydrogeler modifierade med salter, eftersom båda får liknande prestanda. Salter modifierar porvattnets struktur vilket påverkar fryspunkt och gelens svällningsgrad.

Förutom hydrogeler, organogeler och hydroorganogeler nämns i litteraturen även andra typer av geler:

- jongeler (eng. *ionogels*). Svällningsmedlet är en jonisk vätska med egenskaper som lågt ångtryck och utmärkt termisk stabilitet. Dessa föreningar har låg smältpunkt vilket innebär att de är vätskor i ett brett temperaturområde, inklusive rumstemperatur.⁹
- xerogeler, där vätskan fått avdunsta och ersatts med luft, under det att gelen tillåtit krympa.^{10,11}

⁶ IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by McNaught, A. D. & Wilkinson, A. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019) created by Chalk, S. J. ISBN 0-9678550-9-8. <https://doi.org/10.1351/goldbook>.

⁷ Se exempelvis Kaushik, I. et al., Organogelation: it's food application, *MOJ Food Process Technol.* **2017**, 4, 66–72.

⁸ Vi har under arbetet använt definitionen (formulerad på engelska), *by partially substituting the incorporated water of the hydrogels with an organic solvent, organohydrogels are formed*, inspirerat, men modifierat, från Zhou, D., Chen, F., Handschuh-Wang, S., Gan, T., Zhou, X., Zhou, X., Biomimetic Extreme-Temperature- and Environment-Adaptable Hydrogels, *ChemPhysChem* **2019**, 20, 2139–2154. DOI: 10.1002/cphc.201900545.

⁹ Cao, Z., Liu, H., Jiang, L., Transparent, mechanically robust, and ultrastable ionogels enabled by hydrogen bonding between elastomers and ionic liquids, *Mater. Horiz.* **2020**, 7, 912–918, DOI: 10.1039/c9mh01699f.

¹⁰ Yu, B., Sun, Z., Liu, Y., Zhang, Z., Wu, Y., Zhou, F., Improving anti-icing and de-icing performances via thermal-regulation with macroporous xerogel, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 37609–37616, DOI: 10.1021/acsami.1c08770.

¹¹ Job, N., Théry, A., Pirard, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J.-N., Béguin, F., Pirard, J.-P., Carbon Aerogels, cryogels and xerogels: Influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials, *Carbon* **2005**, 43, 2481–2494, DOI: 10.1016/j.carbon.2005.04.031.

- aerogeler, där porerna är fyllda med luft, vilket vid hög porositet leder till mycket lätta material.^{12,13}
- mikrogeler och nanogeler, är kolloidala gelpartiklar som består av kemiskt tvärbundna tredimensionella polymernätverk i storleksordningar mikrometer (mikrogeler) eller under 100 nm (nanogeler).¹⁴
- metallogeler, där metalljoner eller metallorganiska molekyler har introducerats i en hydrogel eller organogel¹⁵.
- aérohydrogeler, en blandning av aerogel och hydrogel. I dessa förekommer tre olika faser samtidigt (fast, vätska och gas). De är hydrogeler fyllda med mikropartiklar, t.ex. silikapartiklar.¹⁶

Det är även relevant att jämföra hydroorganogelers prestanda och tillämpningar med elastomerer, smarta tyger och liknande material eftersom de kan ha liknande egenskaper. Exempelvis är elastomerer polymerer som karaktäriseras av att kunna töjas betydligt utan att brista och återtar ursprunglig form då belastningen upphör. Många syntetiska fibrer utgörs av elastomerer. De två mest kända är gummi (en xerogel) och silikongummi, en vulkaniserad (tvärbunden) silikongel.

2.1 Vem forskar på hydroorganogeler?

Sökningar i den vetenskapliga databasen *Web of Science*¹⁷ ger vid handen att det främst är kinesiska forskare som publicerar artiklar inom området hydroorganogeler. Vid en sökning hittades 225 publikationer, där 192 kopplas till Kina.¹⁸ Långt efter följer USA, med 16 artiklar.¹⁹ Två publikationer har svenska medförfattare.

Att kinesiska forskare dominerar är vanligt inom vetenskaplig publicering, men dominansen är, baserat på vår erfarenhet från andra områden, särskilt stor i detta fall. Det har i tidigare avskanningar noterats att det kan inträffa att olika begrepp eller terminologi används för i grunden samma fenomen i olika länder. Att så kan bli fallet särskilt för nya, framväxande nischer inom forskningen är inte så konstigt. Detta skulle kunna vara en anledning till att forskare från ett enskilt land dominerar publikationerna i fallet organohydrogeler. Även andra orsaker kan finnas till dominansen, såsom särskilda incitament för publicering av den typ av översiktsartiklar som återfanns i sökningen. Exempel på sådana drivkrafter skulle kunna finnas inom meriteringssystemet inom området. Dessa frågor diskuterades i ett tidigt skede i arbetsgruppen. Att helt och fullt reda ut den här typen av frågor, som förstås är principiellt viktiga, skulle kräva tid och resurser som inte är rimliga att lägga i en avskanning av denna typ och omfattning. Det är således möjligt att den starka ökningen av antalet vetenskapliga publikationer inte speglar hela verkligheten. Däremot har vi inte haft anledning att ifrågasätta den vetenskapliga grunden på vilken våra resonemang om

¹² Wu, J., Fan, X., Liu, X., Ji, X., Shi, X., Wu, W., Yue, Z., Liang, J., Highly sensitive temperature-pressure bimodal aerogel with stimulus discriminability for human physiological monitoring, *Nano Lett.* **2022**, 22, 4459–4467. DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c01145.

¹³ Job, N., Théry, A., Pirard, R., Marien, J., Kocon, L., Rouzaud, J.-N., Béguin, F., Pirard, J.-P., Carbon Aerogels, cryogels and xerogels: Influence of the drying method on the textural properties of porous carbon materials, *Carbon* **2005**, 43, 2481–2494, DOI: 10.1016/j.carbon.2005.04.031.

¹⁴ Karg, M. et al., Nanogels and Microgels: From Model Colloids to Applications, Recent Developments, and Future Trends, *Langmuir* **2019**, 35, 6231–6255. DOI: 10.1021/acs.langmuir.8b04304.

¹⁵ Tam, A. Y.-Y., Wing-Wah, V., Recent advances in metallogels, *Chem. Soc. Rev.*, **2013**, 42, 1540–1567., DOI: 10.1039/c2cs35354g.

¹⁶ Wang, J., Wang, J., Sheng, Z., Du, R., Yan, L., Zhang, X., Solid-Liquid-Vapor Triphase Gel, *Langmuir* **2021**, 37, 13501–13511. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c02333.

¹⁷ Web of Science är en kommersiell databas för vetenskaplig litteratur, se <https://www.webofscience.com/>

¹⁸ Sökningen genomfördes 2022-03-14, med söksträngen *Organo-hydrogel* OR organohydrogel* OR hydrogel-organogel* OR Organogel-hydrogel**. Sökningen gjordes inom "all fields", vilket innebär att strängarna kan återfinnas i titel, abstract eller huvudtexten. Ingen begränsning finns bakåt i tiden.

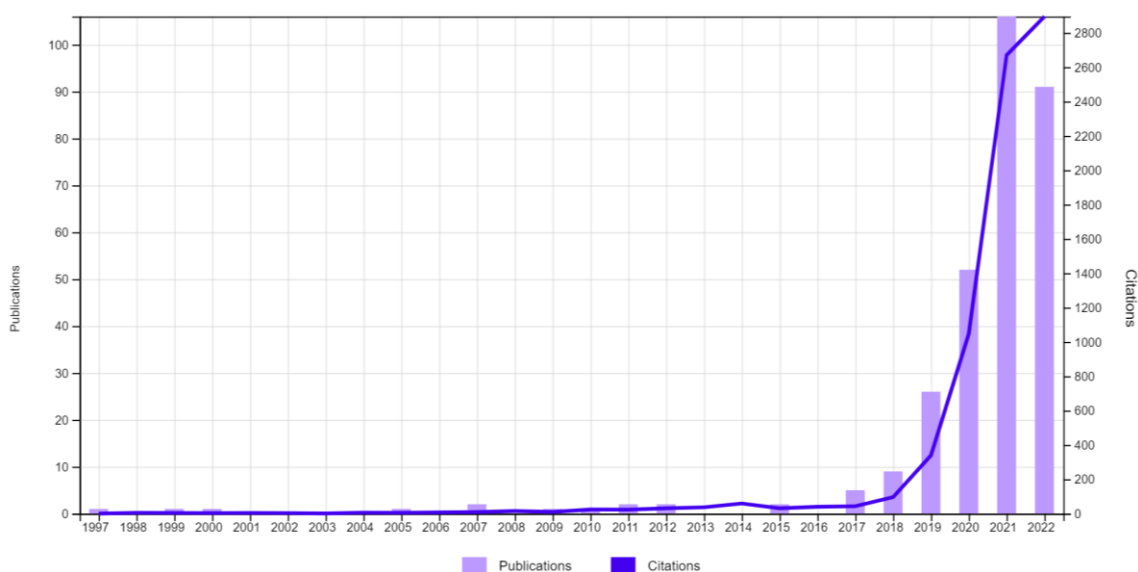
¹⁹ Enligt Web of Science klassning "countries/regions", dvs. varje artikel kopplas till ett specifikt land beroende på var författarna är baserade.

potentiella framtida tillämpningar vilar. Med andra ord, trenden påverkade att vi hittade området men inte själva bedömningarna.

Även finansiärerna domineras i stort sett helt av Kina. Det är enstaka publikationer som kopplas till finansiärer från andra länder.

Publikationerna återfanns främst inom forskningsområdena materialforskning, kemi och annan teknisk forskning²⁰.

Antalet publikationer har vuxit mycket kraftigt under senare år. Figur 1 visar antalet publikationer per år. Tillväxten är exceptionell, och var en grundorsak till att ämnet valdes ut för avskanning.²¹ Det bör särskilt noteras att data för 2022 (innevarande år) inte är komplett.



Figur 1: Antalet publicerade vetenskapliga artiklar inom hydroorganogeler per utgivningsår (på vänstra y-axeln) samt antal citeringar per år till de publicerade artiklarna (på högra y-axeln). Sökningen genomfördes 2022-09-22, varför data för innevarande år 2022 inte är komplett. Den använda söksträngen var *Organohydrogel* OR organohydrogel* OR hydrogel-organogel* OR Organogel-hydrogel** där dessa kan förekomma någonstans i dokumentet (inklusive titel, abstract eller huvudtext).

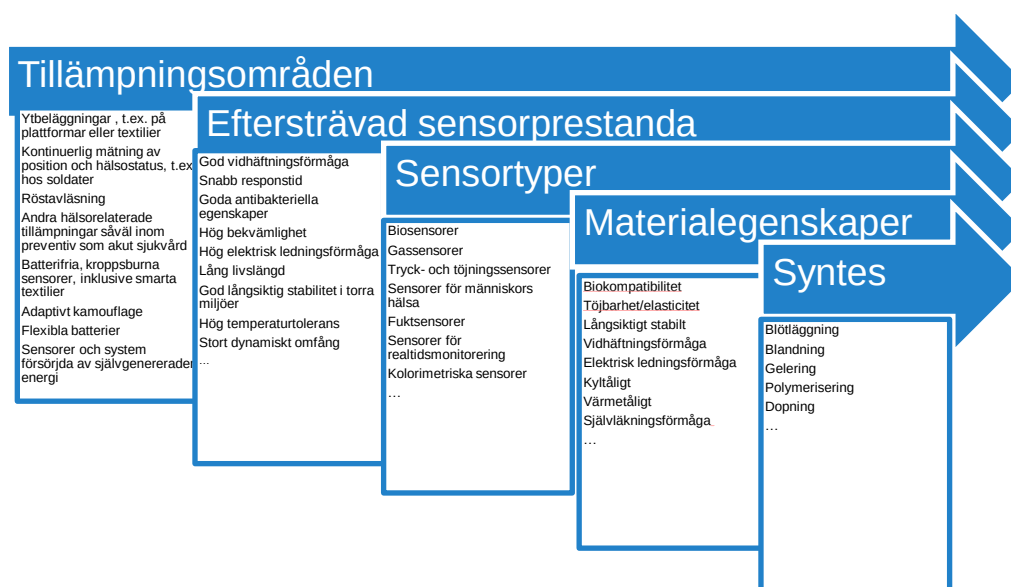
²⁰ Web of Science använder begreppet "Science Technology Other Topics".

²¹ Dalberg, E., During, C., Kindvall, G., Lindberg, A., *Urval av avskanningsämnen 2022 – beskrivning av metod och resultat*; FOI Memo 7868, 2022.

3 Hydroorganogelers egenskaper och användning

3.1 Sammanfattande översikt

Bilden nedan sammanfattar egenskaper hos hydroorganogelers och deras användning utgående från referenslitteraturen²². De aspekter som beaktas förklaras sedan närmare nedan.



Figur 2: Översiktlig indelning av hydroorganogelers egenskaper och användning som identifierats i referenslitteraturen.

3.1.1 Syntes

Framställning av hydroorganogelers kan ske på en rad olika sätt.²³ Hydroorganogelers kan bildas från färdiga hydrogeler genom att gelen blötläggs (eng. *soaking*, *immersion*) i en blandning av vatten och ett organiskt lösningsmedel, varvid en del av vattnet i hydrogelen byts ut mot det organiska lösningsmedlet via diffusion. Förhållandet mellan vattnet och det organiska lösningsmedlet kan varieras enligt önskemål. Via blötläggning kan även hydrogeler dopas med olika salter. Saltdopade hydrogeler får liknande egenskaper som hydroorganogelers.²⁴ Metoden kan även användas för att i efterhand ändra en hydroorganogelers vätskeförhållande, dvs. förhållandet mellan mängden vatten och det organiska lösningsmedlet.

En annan syntesmetod är att gelens samtliga beståndsdelar blandas med vatten och ett organiskt lösningsmedel och sedan geleras. Gelering innebär att gelbildningsenheterna (gelatorerna) i vätskan polymeriseras och/eller orienteras, vilket skapar ett nätverk. I de fall där polymeriseringen inte kan ske direkt med gelatorerna adderas molekyler som binder samman (tvärbinder) dem.

²² Sammanställningen baseras huvudsakligen på experternas genomläsning av 12 översiktsartiklar. Experterna läste 6 artiklar var, dvs. varje artikel lästes av två experter. Artiklarna återfinns i referenslistan sist i rapporten.

²³ Se exempelvis Zhang, Z.; Hao, J. Bioinspired organohydrogels with heterostructures: Fabrications, performances, and applications, *Advances in Colloid and Interface Science* **2021**, 292, 102408. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102408.

²⁴ Zhou, X.; Li, C.; Zhu, L.; Zhou, X. Engineering hydrogels by soaking: from mechanical strengthening to environmental adaptation, *Chem. Commun.* **2020**, 56, 13731–13747. DOI: 10.1039/d0cc05130f.

Framställningsmetoderna är relativt enkla men har olika nackdelar. Blötläggning tar tid då lösningsmedelsutbytet endast sker med diffusion och begränsas av att geler generellt krymper när vattnet byts ut mot ett organiskt lösningsmedel. Det bildas då ett mindre genomträngligt "skinn" på ytan vilket gör att utbytet sker allt långsammare ju mer vatten som byts ut²⁵. Gelering i blandningar av vatten och ett organiskt lösningsmedel kan ske endera genom polymerisering eller genom att polymerer löses upp och sedan fälls ut till en gel (oftast via uppvärmning följt av nedkylning). Här kan dock polymerernas löslighet i lösningsmedelsblandningen påverka homogeniteten i den färdiga gelen (sedimentering).

Gelering kan bland annat ske genom polymerisering, manipulering av polymerers löslighet eller tvärbinding via joninteraktioner och åstadkoms genom exempelvis

- uppvärmning
- bestrålning med ultraviolett ljus
- behandling med ultraljud
- frysning och upptining i upprepade cykler.

I teorin är det enkelt men i praktiken är det komplicerat att framställa nya geler, eftersom många variabler måste överensstämma vilket gör att små variationer får stor effekt på resultatet. Vid industriella processer med väl utvecklade recept har dessa variationer eliminerats.

3.1.2 Materialegenskaper

Särskilt viktiga materialegenskaper som beskrivs i referenslitteraturen är:

- Biokompatibilitet, dvs. dels att materialet inte är giftigt (toxiskt), dels att det inte orsakar en immunresponsiv påväxt av fibrös beläggning på själva materialet eller på annat sätt är dåligt eller opraktiskt att använda i eller på biologiska vävnader.
- Hög elasticitet, vilket innebär att materialet är följsamt.
- Stabilt över tid, dvs. att de önskvärda egenskaperna inte degraderas över tid och att materialet har lång livslängd i aktuella miljöer.
- God vidhäftningsförmåga, vilket innebär att materialet har en god vidhäftning mot olika typer av ytor, t.ex. som beläggning på utvalda ytor och i komplexa system.
- God elektrisk ledningsförmåga, vilket är en nödvändig förutsättning för en rad sensortillämpningar.
- Kyl- samt värmetåligt, dvs. kan användas vid såväl låga temperaturer, som i det här fallet innebär -30 °C, eller höga, med vilket här avses temperaturer upp till 50 °C.
- Självläkningsförmåga, dvs. förmågan att på egen hand återställas om materialet utsätts för mekaniska skador. Detta är också kopplat till förmågan att återgå till sin ursprungliga form (eng. *shape memory*).
- Formförändringsförmåga, s.k. morfning, dvs. kontrollerad förändring av materialets form, utseende eller skepnad.

Ytterligare intressanta egenskaper har identifierats, bland annat vid kontakt med vatten och transparens för synligt ljus. Dessa kan vara särskilt intressanta för vissa tillämpningar, se vidare 3.1.5.

3.1.3 Sensortyper

I den i studien använda referenslitteraturen delas ofta sensorer in i typerna:

- Biosensorer, vilka ingår som en del i bioanalytiska system, där en biologisk signal omvandlas till ett mätbart svar.
- Gassensorer, vilka kan detektera och identifiera olika typer av gaser som förekommer i ett mer eller mindre utsträckt område och kan utgöra en del av ett säkerhetssystem.

²⁵ Zhou, X.; Li, C.; Zhu, L.; Zhou, X. Engineering hydrogels by soaking: from mechanical strengthening to environmental adaptation, *Chem. Commun.* **2020**, 56, 13731–13747. DOI: 10.1039/d0cc05130f.

- Tryck- och töjningssensorer, vilka mäter förändring av en yta som utsätts för mekanisk påverkan. Vanligast i den genomlästa litteraturen är bärbara rörelsesensorer (eng. *motion detection*) som används inom t.ex. sport, medicinteknik och rehabilitering för rörelseutvärdering eller sensorer för att mäta andningsfrekvens (eng. *breath rate*).
- Sensorer för människors hälsa (eng. *human health detection sensors*) som bärbara eller implanterade sensorer. Dessa mäter hälsoparametrar, oftast i form av bio-, gas- eller töjsensorer eller kombinationer av dessa.
- Fuktsensorer, som används för att mäta vattenhalten i ett ämne eller område.
- Kolorimetriska sensorer vilka ändrar färg vid detektering av exempelvis specifika kemiska substanser och ultraviolett strålning²⁶.

Dessutom finns ett antal andra typer av sensorer som identifierats i studien: sensorer för miljöövervakning, sensorer för flexibel elektronisk utrustning (eng. *flexible electronic devices*), mikrofoner för att mäta halsvibrationer vid tal för att identifiera vad som sägs och sensorer specialiserade för detektion av små, svärmätta molekyler eller andra ämnen.

3.1.4 Eftersträvad sensorprestanda

Särskilt eftersträvarsvärd prestanda för sensorerna som listas i referenslitteraturen är:

- God vidhäftningsförmåga, dvs. att sensorn kan ansluta tätt mot lämplig yta såsom hud, metall, plast, glas etc. Även anpassningsbar formbarhet har betydelse, t.ex. att materialet är följsamt vid rörelse.
- Kort responstid. Responstid är tiden från att sensorn utsätts för stimuli till dess en respons detekteras. En kort responstid är av mycket stor betydelse för exempelvis säkerhetstillämpningar och optimering av bränslecellers prestanda.
- Goda antibakteriella egenskaper. Genom att sensorn innehåller eller beläggs med antibakteriella ämnen kan bakterietillväxt på denna förhindras. Därigenom kan sensorn bäras på eller i kroppen utan fara för användaren, eller användas i vatten utan risk för spridning av bakterier från sensorn.
- Hög bekvämlighet (eng. *comfortableness*), dvs. att sensorn kan bäras under lång tid utan att orsaka problem eller hindra bäraren på något vis.
- Hög elektrisk ledningsförmåga. För att få tillräckligt hög noggrannhet vid mätning i ämnen med låg elektrisk konduktivitet, exempelvis rent vatten, krävs hög ledningsförmåga.²⁷ Hög elektrisk ledningsförmåga förbättrar känsligheten och därmed prestandan i sensorer för exempelvis gasdetektion, taligenkänning, hälsoövervakning, svettningssintensitetsövervakning, temperaturövervakning, termoelektriska tillämpningar, elektronisk hud (eng. *electronic skin*), och bärbar/flexibel elektronik²⁸.
- Lång livslängd (eng. *long working life*), dvs. att sensorn kan användas under lång tid utan att prestandan degraderas eller att underhåll krävs.
- God långsiktig stabilitet i torra miljöer såsom öknar (eng. *long-term stability in arid environments*), vilket ställer särskilda krav bl.a. gällande att sensorn ska motstå uttorkning över tid och bibehålla sin funktionalitet. I hydroorganogeler uppnås nästan automatisk långsiktig stabilitet mot uttorkning genom att en del av dess vatten är

²⁶ Wen, G.-Y.; Zhou, X.-L.; Tian, X.-Y.; Xie, R.; Ju, X.-J.; Liu, Z.; Faraj, Y.; Wang, W.; Chu, L.-Y. Smart hydrogels with wide visible color tenability, *NPG Asia Materials* **2022**, *14*, 29. DOI: 10.1038/s41427-022-00379-3.

²⁷ Ye, Y.; Zhang, Y.; Chen, Y.; Han, X.; Jiang, F. Cellulose Nanofibrils Enhanced, Strong, Stretchable, Freezing-Tolerant Ionic Conductive Organohydrogel for Multi-Functional Sensors, *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 2003430. DOI: 10.1002/adfm.202003430.

²⁸ Wu, Z.; Yang, X.; Wu, J. Conductive Hydrogel- and Organohydrogel-Based Stretchable Sensors, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13*, 2128–2144. DOI: 10.1021/acsami.0c21841.

utbytt mot organiska lösningsmedel. Stabilitet mot uttorkning på ca nio månader i normal atmosfär har exempelvis visats.²⁹

- Kyl- samt värmeståligt, dvs. hög tolerans för såväl låga som höga temperaturer för att sensorn ska kunna användas i såväl varma som kalla miljöer.
- Stort dynamiskt omfång (eng. *wide sensing range*). Genom att kunna registrera såväl små som stora värden utökas sensorns användbarhet. Exempelvis att kunna registrera små rörelser (andningsfrekvens) såväl som stora rörelser (följa soldats rörelsemönster).

Därtill finns en lång rad andra eftersträvarvärda egenskaper, exempelvis anpassningsbarhet, flexibilitet, mekanisk robusthet och multifunktionalitet.

3.1.5 Tillämpningsområden

De ovanstående kategorierna baseras på faktiska beskrivningar i den referenslitteratur som avskanningen omfattat. När det gäller potentiella tillämpningsområden av intresse för Försvarmakten, fick en mer indirekt ansats användas för att identifiera potentiella tillämpningar. En diskussion genomfördes därför under en workshop på FOI med fokus på vad som är särskilt intressant och relevant för Försvarmaktens förmågebehov. Beskrivningen av potentiella tillämpningar för hydroorganogeler nedan, återspeglar följaktligen inte vad som återfinns i litteraturen, utan är baserad på idéer och värderingar som framkom vid diskussionen under workshopen.

Potentiellt intressanta tillämpningar finns för ytbeläggningar t.ex. i form av självrengörande ytor, friktionsreducering för ytor i vatten, smutsavstötande textilier eller isavstötning på kalla ytor. För plattformssystem är ytbeläggningar för att förhindra beväxning på t.ex. fartygsskrov (eng. *anti-fouling*) intressant. Beväxning medför högre energiförbrukning och påverkar fartygssignaturen negativt. Kemikalier som används vid behandling av fartygsskrov är ofta miljöfarliga och behandlingen behöver ske upprepat, t.ex. årligen. Alternativ till dagens avisningsmedel av flygplansvingar, som idag sker med hjälp etylenglykoler och vatten med mindre tillsatser av andra ämnen, är ett annat relevant tillämpningsområde.

Det finns flera potentiellt intressanta tillämpningar för ledningsfunktioner, bl.a. att registrera egna soldaters position och hälsostatus (t.ex. stress och utmattning). En annan tillämpning är medicinsk vård på distans (telemedicin). Materialen skulle även kunna användas för igenkänning/identifiering av egen trupp, samtidigt som sådan märkning kan göras optiskt osynlig för andra. Tekniker för igenkänning och identifiering för att förhindra förfalskningar skulle kunna användas.

En ytterligare potentiellt intressant tillämpning av hydroorganogeler är röstavläsning där en sensor på halsen känner av talade ord.³⁰ Detta skulle i förlängningen kunna möjliggöra röststyrning av autonoma enheter även i extremt bullriga miljöer, exempelvis väpnad strid. I dagsläget är det dock endast påvisat för enstaka ord, dessutom på kinesiska vilket kan underlätta ordidentifiering då det är ett tonspråk.

Andra hälsorelaterade tillämpningar kan vara att mäta utandningsluftens sammansättning för att detektera individers hälsostatus eller för att stoppa blödningar. Tillämpningar finns då för såväl preventiv sjukvård (stötta kroppen inifrån) som för akutvård (stoppa pågående kraftiga blödningar).

²⁹ Wu, J.; Wu, Z.; Lu, X.; Han, S.; Yang, B.-R.; Gui, X.; Tao, K.; Miao, J.; Liu, C. Ultrastretchable and Stable Strain Sensors Based on Antifreezing and Self-Healing Ionic Organohydrogels for Human Motion Monitoring, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 9405–9414. DOI: 10.1021/acsami.8b20267.

³⁰ Li, X. B.; Zhang, E. D.; Shi, J.; Xiong, X. Y.; Lin, J. M.; Zhang, Q.; Cui, X. H.; Tan, L. Q.; Wu, K. Waterborne Polyurethane Enhanced, Adhesive, and Ionic Conductive Hydrogel for Multifunctional Sensors, *Macromolecular Rapid Communications* **2021**, *42*, 2100457. DOI: 10.1002/marc.202100457.

Olika tillämpningar finns för batterifria, kroppsburna sensorer. Sensorerna kan också vara direkt integrerade i kläder, s.k. smarta textilier (eng. *e-textiles*), vilka förväntas få stor betydelse både civilt och militärt framöver. Hydroorganogeler bedöms generellt ha potential för tillämpningar där en koppling mellan vävnad och elektronik är av intresse. Det är också tänkbart med uniformstextilier som ändrar färg om de utsätts för vissa farliga ämnen och därmed varnar för att man befinner sig i fara.

Morfning, dvs. form- eller färgförändring, kan användas för adaptivt kamouflage. Förändringen kan styras genom stimuli, exempelvis temperatur eller ljus.³¹

Mjuka material såsom hydroorganogeler kan användas för att tillverka flexibla batterier som kan tåla ett brett spektrum av temperaturer (såväl fryståliga som användbara i torra, varma klimat). Flexibla batterier kan vara attraktiva för olika typer av autonoma farkoster eller robotar, kanske särskilt små s.k. mjuka robotar (eng. *soft robotics*).

Slutligen skulle materialen kunna användas i tillämpningar där självgenererande energi ger ytterligare uthållighet. Det kan exempelvis omfatta autonoma, elektriskt självdrivna optiska sensorer, vilka kan arbeta utan extern kraftkälla. Dessa kan drivas av signalen som den optiska sensorn ska detektera (en självaktiverande, solcellsliknande egenskap), eller friktions-/vibrationsbaserad mekanisk energi. I större skala kan man tänka sig detta på större ytor, t.ex. på fordon eller andra plattformar. I alla dessa fall finns potential för ökad uthållighet, minskad sårbarhet, samt ökat oberoende. Dessutom finns potential för reducerad storlek och vikt.

En annan tillämpning av hydrogeler som också skulle kunna vara av militärt intresse är gelhydrofoner för undervattensbruk. Gelens låga akustiska impedans relativt vattnet, jämfört med keramiska material, medför att mindre del av ljudvågorna reflekteras. Detta ökar den potentiella känsligheten för hydrofonen.³² Hydroorganogelers förbättrade mekaniska egenskaper bör även här vara eftersträfvansvärda, ett problem är dock den kontinuerliga kontakten med vatten som med tiden kommer att ersätta det organiska lösningsmedlet i hydroorganogelen. Detta är ett generellt problem och förekommer även vid kontakt med andra vätskor med högt vatteninnehåll, exempelvis blod.

3.1.6 Styrkor hos hydroorganogeler

Givet de egenskaper som hittills beskrivits och den potential till praktisk användning hydroorganogeler bedöms ha, hur väl står sig hydroorganogeler jämfört med andra, alternativa material? Detta är en relevant fråga som den genomförda avskanningen, fokuserad på hydroorganogeler, inte ger förutsättningar att besvara fullt ut. Frågan diskuterades dock kortfattat vid workshopen, om än med det begränsade perspektiv som var tillgängligt.

- Vidhäftningsförmåga – det bedömdes att geler generellt har en stor fördel avseende vidhäftningsförmåga jämfört med exempelvis elastomerer. Hydroorganogeler är också mer användbara i fler miljöer, från luft till hav och även i oljor, men mellan olika geler är det inte en särskiljande egenskap.
- Biokompatibilitet – generellt har hydroorganogeler bra förutsättningar för detta, men i vilken grad beror på vilket organiskt lösningsmedel som valts. Det kan finnas tveksamheter för att använda organiska lösningsmedel på eller i kroppen. Biokompatibiliteten är också beroende av viskositeten, som även den bör vara kompatibel med viskositeten hos vävnader i kroppen.
- Temperaturtålighet – förutsättningar finns för ett brett temperaturspann vilket tillsammans med temperaturtåligheten gör hydroorganogeler mycket intressanta för en rad tillämpningar.

³¹ Zhang, Z.; Hao, J. Bioinspired organohydrogels with heterostructures: Fabrications, performances, and applications, *Advances in Colloid and Interface Science* **2021**, 292, 102408. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102408.

³² Gao, Y.; Song, J. F.; Li, S. M.; Elowsky, C.; Zhou, Y.; Ducharme, S.; Chen, Y. M.; Zhou, Q.; Tan, L. Hydrogel microphones for stealthy underwater listening, *Nature Communications* **2016**, 7. DOI: 10.1038/ncomms12316.

- Flexibilitet och självläkning är egenskaper som förvisso finns hos vissa andra geler men verkar vara mer utmärkande för hydroorganogeler.
- Morfning – eventuellt är detta en starkt önskvärd egenskap hos hydroorganogeler, eftersom det för t.ex. adaptivt kamouflage är attraktivt om form och färg adaptivt kan förändras. Det finns dock vissa frågetecken kring exempelvis storlek och form som kan skapas. De främsta utmaningarna är hur förändringarna ska styras. Hydroorganogelerna svarar på externa fysikaliska och kemiska förändringar, såsom pH, temperatur och svällningsgrad (dvs. vilket lösningsmedel som använts). De kan även reagera på ljus och elektriska signaler, vilka är lättare att kontrollera.
- Elektrisk ledningsförmåga och värmeledningsförmåga – värmeledningsförmågan bedöms vara god då hydroorganogeler innehåller stora mängder vatten. Den elektriska ledningsförmågan för hydroorganogeler kan kontrolleras genom dopning med ledande material eller förändring av salthalten.

4 Handlingsalternativ

Hydroorganogeler är enbart ett exempel bland flera liknande material och utgör ett relativt litet forskningsområde. För FOI:s forskning och Försvarsmaktens behov är det i huvudsak de nyskapande tillämpningarna som litteraturen pekar ut som är intressanta. Även om forskningsområdet är smalt, tas en bred palett av intressanta tillämpningar upp i litteraturen, och det påvisas en rad områden där hydroorganogeler potentiellt skulle kunna ge förbättrad prestanda jämfört med andra material. Då vår avskanning fokuserats mot en enskild materialtyp, går det som påpekats inte att göra en komplett och rättvisande jämförelse, utan att även genomföra en mycket bred avskanning på material med liknande egenskaper. Värdet av den nu genomförda avskanningen ligger därmed främst i att påvisa en pågående utveckling och möjligheter inom en rad tillämpningsområden. Varje tillämpning medför specifika krav. Det vore därför rimligt att i eventuella framtida avskanningar utgå från enskilda intressanta tillämpningar och utvärdera vilka material som är särskilt passande för varje specifik tillämpning. För att möjliggöra bedömning av dessa tillämpningars militära nytta, kan tekniska prognoser inom utvalda tillämpningar vara lämpliga.

Det konstaterades vid workshopen att FOI fortsatt bör följa forskningen inom den typ av material som hydroorganogeler är ett exempel på. När ett forskningsområde tillväxer så pass snabbt som här observerades, kan det bero på att ett moget forskningsfält börjat appliceras i helt nya tillämpningar. Sådana områden kan vara extra viktiga att följa då möjligheterna för disruptiva genombrott är stora i dessa fall. Omvärldsbevakningen behöver göras brett. Detta för att möjliggöra en mer heltäckande bild och inte riskera att missa om/när en snabb utveckling sker inom någon specifik del av forskningen om nya geler eller andra material. Alternativt kan en ny avskanning göras av området inom något år för att se hur området utvecklats med risk att då hamna på efterkälken.

Var och en av de ovan listade potentiella tillämpningarna skulle vara intressanta att göra egna avskanningar/tekniska prognoser/pilotprojekt inom. Sådan verksamhet kräver, pga. områdets multidisciplinära karaktär, deltagande från flera kompetenser inom FOI. En viktig frågeställning är huruvida dessa, var och en i sig, intressanta tillämpningar verkligen går att realisera. I nästan alla tillämpningar är det, minst, en kombination av kompetens inom kemi och elektronik som krävs, förutom relevant domänskunskap. Det är därför rimligt att välja ett eller ett fåtal särskilt intressanta tillämpningar för vidare studier.

Några tillämpningar som vi bedömer vara särskilt värda att uppmärksamma är kroppsnära och batterifria sensorer, samt bioelektroniska enheter. Detta kopplar till framväxande områden som flexibel elektronik och integrering av organisk elektronik i den mänskliga kroppen.

Samverkan med relevanta universitet och högskolor eller internationella partners kan vara intressant. Den civila forskningen inom materialområdet är generellt mycket omfattande. Att samarbeta med universitet och högskolor kan därför krävas för effektiv omvärldsbevakning avseende den vetenskapligt publicerade forskningen eller för att få tillgång till specifik kompetens eller experimentella resurser. Samarbete med internationella partners kan ge insikter i särskilt relevanta tillämpningar som inte publiceras öppet.

För att vara en intressant samarbetspartner är det också relevant att bedriva egen experimentell verksamhet, speciellt inom materialområdet. I det sammanhanget kan det krävas specifik infrastruktur. Även om den egna experimentella verksamheten endast bedrivs i begränsad omfattning, kan den skapa möjligheter för ett fruktbart informationsutbyte. Experimentell verksamhet är förstås särskilt intressant att bedriva i egen regi avseende tillämpningar för vilka forskningen inte bör bedrivas öppet.

4.1 Utvalda referenser

Följande översiktsartiklar, i rapporten omnämnda som referenslitteratur, användes som underlag till den workshop som genomfördes som del av avskanningen.

- Chang, X.; Chen, L.; Chen, J.; Zhu, Y.; Guo, Z. Advances in transparent and stretchable strain sensors, *Advanced Composites and Hybrid Materials* **2021**, 4, 435–450. DOI: 10.1007/s42114-021-00292-3
- Ding, Q.; Wu, Z.; Tao, K.; Wei, Y.; Wang, W.; Yang, B-R.; Xie, X.; Wu, J. Environment tolerant, adaptable and stretchable organohydrogels: preparation, optimization, and applications, *Mater. Horiz.* **2022**, 9, 1356–1386. DOI: 10.1039/d1mh01871j
- Huang, J.; Fang, R.; Zhao, T.; Liu, M. Bioinspired functional organohydrogels with synergistic multiphases heterostructure, *Polymer* **2020**, 190, 122214, DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122214
- Jian, Y.; Handschuh-Wang, S.; Zhang, J.; Lu, W.; Zhou, X.; Chen, T. Biomimetic anti-freezing polymeric hydrogels: keeping soft-wet materials active in cold environments, *Mater. Horiz.* **2021**, 351–369. DOI: 10.1039/d0mh01029d
- Lay, C. L.; Koh, C. S. L.; Lee, Y. H.; Phan-Quang, G. C.; Sim, H. Y. F.; Leong, S. X.; Han, X.; Phang, I. Y.; Ling, X. Y. Two-photon-assisted polymerization and reduction: emerging formulations and applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, 12 (9), 10061– 10079. DOI: 10.1021/acsami.9b20911
- Xu, Y.; Rong, Q.; Zhao, T.; Liu, M. Anti-Freezing multiphase gel materials: Bioinspired design strategies and applications, *Giant* **2020**, 2, DOI: 10.1016/j.giant.2020.100014
- Zhang, J.; Zhang, Q.; Liu, X.; Xia, S.; Gao, Y.; Gao, G.; Flexible and wearable strain sensors based on conductive hydrogels, *Journal of Polymer Science* **2022**, 1–16. DOI: 10.1002/pol.20210935
- Zhang, W.; Zhang, Y.; Zhang, Y.; Dai, Y.; Xia, F.; Zhang, X. Adhesive and tough hydrogels: from structural design to applications, *Journal of Materials Chemistry B* **2021**, 9, 5954–5966. DOI: 10.1039/d1tb01166a
- Zhang, Z.; Hao, J. Bioinspired organohydrogels with heterostructures: Fabrications, performances, and applications, *Advances in Colloid and Interface Science* **2021**, 292, 102408. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102408
- Zhou, D.; Chen, F.; Handschuh-Wang, S.; Gan, T.; Zhou, X.; Zhou, X. Biomimetic Extreme-Temperature- and Environment- Adaptable Hydrogels. *ChemPhysChem* **2019**, 20, 2139– 2154. DOI: 10.1002/cphc.201900545
- Zhou, X.; Li, C.; Zhu, L.; Zhou, X. Engineering hydrogels by soaking: from mechanical strengthening to environmental adaptation, *Chem. Commun.* **2020**, 56, 13731–13747. DOI: 10.1039/d0cc05130f
- Wu, Y.; Luo, Y.; Cuthbert, T. J.; Shokurov, A.; Chu, P. K.; Feng, S-P.; Menon, C. Hydrogels as Soft Ionic Conductors in Flexible and Wearable Triboelectric Nanogenerators, *Advanced Science* **2022**, 9, 2106008, DOI: 10.1002/advs.202106008

Några övriga utvalda översiktsartiklar som också kan användas som introduktion till området listas nedan.

Chen, F.; Xu, Z.; Wang, H.; Handschuh-Wang, S.; Wang, B.; Zhou, X. Bioinspired Tough Organohydrogel Dynamic Interfaces Enabled Subzero Temperature Antifrosting, Deicing, and Antiadhesion, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, 12, 55501–55509. DOI: 10.1021/acsami.0c17163

He, Z.; Yuan, W. Adhesive, Stretchable, and Transparent Organohydrogels for Antifreezing, Antidrying, and Sensitive Ionic Skins, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 1474–1485. DOI: 10.1021/acsami.0c18405

Yang, Q.; Hu, Z.; Rogers, J. A. Functional Hydrogel Interface Materials for Advanced Bioelectronic Devices, *Acc. Mater. Res.* **2021**, 2, 1010–1023. DOI: 10.1021/accountsmr.1c00142

Wu, Z.; Yang, X.; Wu, J. Conductive Hydrogel- and Organohydrogel-Based Stretchable Sensors, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 2128–2144. DOI: 10.1021/acsami.0c21841

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se