

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Värmeisolerande och starka nanokompositiskum framställda med styrd sammanfogning	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Thermally insulating and strong nanocomposite foams by directed assembly	
Universitet/högskola/företag Stockholms Universitet	Avdelning/institution Institutionen för material- och miljökemi
Adress Arrheniuslaboratoriet, 10691 Stockholm	
Namn på projektledare Lennart Bergström	
Namn på ev övriga projektdeltagare [Klicka här och skriv]	
Nyckelord: 5-7 st Värmeledning, värmeisolering, skum, cellulosa, lera	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och utförts vid Institutionen för material- och miljökemi, Stockholms Universitet. Projektet har letts av Professor Lennart Bergström. Viktiga bidrag har givits av följande tidigare och nuvarande medlemmar i Bergströms forskargrupp: Bernd Wicklein, Andreas Fall, Nathalie Lavoine, Pierre Munier och Varvara Apostolopoulou Kalkavoura. Flera internationella och nationella samarbeten har också bidragit till projektet, t.ex. med Markus Antonietti, Shu-Hong Yu, Giovanni Camino, Federico Carosio, Junichiro Shiomi, Lars Wågberg samt med anställda vid Cellutech AB.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Summary	2
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	4
Resultat	5
Diskussion.....	8
Publikationslista.....	9
Referenser, källor.....	10
Bilagor	10

Sammanfattning

Energibehovet för att bygga hus och kommersiella byggnader samt för att skapa en behaglig inomhusmiljö uppgår idag till mer än 30% av världens totala energiförbrukning och är högre i Sverige med vårt kalla klimat. Minimering av

energiförluster med god värmeisolering är avgörande för att kunna rejält sänka energibehovet. Introduktionen av superisolerande material baserade på förnyelsebara råvaror skulle bidra till ett långsiktigt hållbart energisystem i Sverige genom en betydande energieffektivisering för uppvärmning av såväl befintliga som nybyggda byggnader och även sänka byggindustrins klimatbelastning. Vi har utvecklat nya processer baserade på styrd sammanfogning för att framställa superisolerande och brandbeständiga material baserade på främst förnyelsebara råvaror i nanoskala som t.ex. cellulosa, polymerer och lera. Arbetet har resulterat i 5 vetenskapliga publikationer och även bidragit till utvecklingen av ett patenterat cellulosebaserat skum.

Vi har konstruerat en skräddarsydd apparat för att noggrant mäta värmeledningsförmågan hos hygroskopiska lågdensitetsmaterial vid kontrollerad temperatur och luftfuktighet. Vi har utvecklat en enkel teoretisk modell som beskriver det starka luftfuktighetsberoendet av värmeledningsförmågan för nanocellulosebaserade skummer. I en studie av borsyra, en vanlig tillsats som används för att öka brandbeständigheten, visade vi att den pH-beroende reaktiviteten och specieringen av borsyra till borat vid högt pH kontrollerade tvärbindingen med cellulosa och även förmågan till karbonisering som har stor effekt på den brandskyddande förmågan.

Mekaniskt starka och lätta hybridskummer utvecklades i ett internationellt samarbete och vi visade att de hållbara materialen uppvisade mycket god brandbeständighet och låg värmeledningsförmåga. Styrd sammanfogning har använts för att framställa nanocellulosebaserade skummer med linjerade fibriller, vilket är av betydelse för de mekaniska och termiska egenskaperna. Vi studerar för närvarande hur värmeledningsförmågan och de mekaniska egenskaperna beror dels på sammansättning och storlek och form av de ingående organiska och oorganiska komponenterna, dels på strukturen hos såväl skummet och mikrostrukturen i cellväggarna. Det viktiga bidraget av den gränsskiktstermiskaresistansen till värmeledningen hos nanokompositkskummer att studeras med en kombination av experiment och simuleringar.

Summary

The energy needed to construct houses and commercial buildings, and to maintain a pleasant interior atmosphere, accounts for more than 30% of the world's total energy consumption. Thermal insulation plays a major role in controlling the energy efficiency of buildings and there is a need to substantially reduce the thermal conductivity significantly below the value for air. Introduction of super-insulating materials based on renewable raw materials would contribute to a sustainable energy system in Sweden through a significant improvement of the energy efficiency related to heating of new and older buildings, and also reduce the carbon footprint of the building industry. We have explored and developed novel, thermally insulating and fire retardant materials based on nanocomposites of renewable and widely abundant raw materials such as cellulose, polymers and clays. This work has generated scientific publications, and also contributed to an invention/patent that is currently being commercialised.

We have constructed a customized device for measuring the thermal conductivity of hydrophilic, low-density materials under controlled temperature and relative humidity conditions. We developed a simple model that is able to capture the strong relative humidity dependence of the thermal conductivity of hygroscopic nanocellulose-based foams. In a study on boric acid, a commonly used additive to improve the fire retardancy, we showed that the pH-dependent reactivity and speciation of boric acid into borate anions at high pH controlled the molecular cross-linking pathways and carbonisation of cellulose, which has a significant effect on the fire retardant properties.

Mechanically strong and lightweight inorganic-organic hybrid foams were developed in a collaborative project and we showed that the mechanically resilient materials exhibited excellent fire resistance and thermal insulation properties. Directed assembly has been utilized to prepare nanocellulose-based foams with highly aligned nanofibrils, which is of importance for the mechanical and thermal properties. We are currently elucidating how the heat transfer depends on the composition, size and shape of the nanocellulose, and the cellular structure and the microstructure of the cell walls. The important contribution of the interfacial thermal resistance to the thermal conductivity of nanocomposite foams will be studied by combining experimental work with simulations.

Inledning/Bakgrund

Energibehovet för att bygga hus och kommersiella byggnader samt för att skapa en behaglig inomhusmiljö uppgår idag till mer än 30% av världens totala energiförbrukning och är högre i Sverige med vårt kalla klimat. Minimering av energiförluster med god värmeisolering är avgörande för att kunna rejält sänka energibehovet. Dagens isolermaterial som expanderad polystyren (EPS), polyuretanskum och glas- och mineralull har relativt dåliga prestanda med en värmeledningsförmåga om $30\text{--}40 \text{ mW}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$. Stora vinster finns i en reduktion av den termiska ledningsförmågan för isolermaterial till värden som betydligt understiger värdet för luft ($25 \text{ mW}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$), med sådana material kan man praktiskt kunna nå den energieffektivitet som t.ex. krävs för passiva hus. Med dagens isolermaterial krävs mycket tjocka isolerskikt som riskerar att inkräkta på boendeytan och även förfula byggnadens utseende. Alla av dagens polymerbaserade isolermaterial produceras från fossila kolväten och framställningen av aerogeler är energikrävande. Cellulosa har använts som isolermaterial under lång tid men dagens cellulosabaserade material har i dagens utformning relativt dålig prestanda med en värmeledningsförmåga omkring $35\text{--}50 \text{ mW}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$. Introduktionen av ett superisolerande material baserat på förnyelsebara råvaror skulle bidra till betydande energieffektivisering för uppvärmning av såväl befintliga som nybyggda byggnader och även sänka byggindustrins klimatpåverkan.

Det finns idag inget superisolerande förnyelsebart material med en värmeledningsförmåga under $18 \text{ mW}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$. Nya och mycket lovande resultat har visat att starka, flambeständiga och lätta skummer bestående av främst nanocellulosa och grafenoxid och kan uppvisa superisolerande egenskaper med värmeledningsförmåga så låg som $15 \text{ mW}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, mindre än hälften av dagens

polymerbaserade isolermaterial. En viktig del av arbetet har varit att undersöka hur hållbara, främst nanocellulosa-baserade nanokompositiskummer med mycket låg värmeledningsförmåga och god brandbeständighet kan framställas.

Superisolerande material kräver att de tre viktiga bidragen till värmeledningsförmågan: konduktion, konvektion och värmestrålning, kan kontrolleras och minimeras. Nanokompositer kan även uppvisa en gränsskiktstermisk resistans som med studier på kolnanorör har visat sig vara betydande och viktig för att minimera konduktansen. Vi kommer att undersöka hur värmeledningsförmågan beror på materialens struktur och sammansättning och i detalj klargöra hur upptaget av vatten påverkar värmeledningen.

Projektet har letts av Professor Lennart Bergström och främst bedrivits vid Institutionen för material-och miljökemi, Stockholms Universitet. Projektet har bedrivits under 4-årsperioden 2015-2018 med huvudsaklig finansiering från Energimyndigheten. Intensiteten har varierat under projektperioden och påverkats av t.ex. rekrytering av doktorand och postdocs, samt av doktorandens barnledighet under perioden maj 2018 till januari 2019.

Genomförande

Arbetet har till största delen utförts inom den forskargrupp som leds av prof. Lennart Bergström (projektledare). Det mesta av arbetet har utförts av Varvara Apostolopoulou Kalkavoura (doktorand; planerad disputation 2020) och Pierre Munier (masterstudent, numera doktorand) tillsammans med Nathalie Lavoine (postdoc, numera Assistant Prof vid North Carolina State University, USA), Andreas Fall (postdoc, numera projektledare vid RISE Bioeconomy, Sverige) och Bernd Wicklein (postdoc, numera forskare vid Materials Science Institute of Madrid, Spanien).

Viktiga samarbeten inom ramen för projektet innefattar:

1. Markus Antonietti, Max Planck Institute of Colloids and Interfaces, Potsdam-Golm, Germany (nya processmetoder och sammansättningar)
2. Shu-Hong Yu, Department of Chemistry, University of Science and Technology, Hefei Hefei, China (nya processmetoder och sammansättningar)
3. Giovanni Camino och Federico Carosio, Torino Polytechnical University, Italy (brandbeständighet)
4. Junichiro Shiomi, University of Tokyo (värmeledning)
5. Lars Wågberg, KTH (nya processmetoder och sammansättningar)

Projektet har fokuserat på att sammanfoga nanomaterial från förnyelsebara råvaror till lättviktsskum med mycket låg värmeledningsförmåga samt god styrka. Projektet har fokuserat på två frågeställningar:

1. Utveckla nya sammanfogningsmetoder och sammansättningar för att producera lättviktsskum med superisolerande egenskaper.

2. Bestämma hur värmeledningsförmågan beror på sammansättning, skumstruktur samt fuktighet och temperatur samt att utveckla modeller för att beskriva värmeledningen i isotropa och anisotropa biobaserade skum.

Vi har använt ett stort antal metoder för att framställa och studera de biobaserade lättviktsskummen. Skummen har framställts genom istemplering i egenkonstruerade apparat samt genom skummning i tensidnehållande dispersioner.

Skummen struktur har undersökts med hjälp av svepelektronmikroskopi, transmissionselektronmikroskopi, röntgentomografi, atomkraftsmikroskopi, röntgen diffraktion samt med lågvinkelspridning vid Maxlab och Petra III. Värmeledningsförmågan i axiell och radiell riktning har undersökts med en s.k. Hot Disk TPS2500 instrument som har modifierats av oss så att mätningar kan utföras vid kontrollerad luftfuktighet och temperatur. Mekaniska egenskaper har bestämts med en mekanisk testmaskin, Instron 5944. Brandbeständigheten har utvärderats med en kombination av UL94 brandtest, ASTM D2863 som bestämmer syreindex, samt termogravimetrisk analys (PerkinElmer TGA 7).

Resultat

Projektresultaten sammanfattas nedan. Sammanfattningen baseras på den information som till största delen redan är publicerad och ges därför på engelska. Resultatdelen är strukturerad enligt de två huvudsakliga frågeställningar som projektet har adresserat.

Development of new processing routes and compositions to produce lightweight foams with superinsulating and fire retardant properties

We have reviewed the main processing routes and significant properties of nanocellulose-based foams and aerogels (1). Challenges, such as how to produce long-term stable wet foams or how to avoid structural collapse of the material during solvent removal using e.g. supercritical drying, were discussed and recent advances in the use of ice templating to generate iso- or anisotropic foams with tunable mechanical and thermal properties were highlighted. We also discussed how the porous architecture and properties of nanocellulose-based foams and aerogels can be tailored for applications in e.g. thermal insulation.

Aligning cellulose or chitin nanofibers can enhance both the stiffness and the strength of films and foams. We have investigated how directional freezing can be used to control the orientation of fibrous cellulose nanoparticles of different aspect ratios (2). The effect of freezing rate and particle concentration on the degree of orientation has been quantified and we have determined how salt-induced aggregation and gelation affects the degree of orientation. The interconnected particle networks formed hydrogels where the micro- and macrostructure of the frozen material is preserved. The gels can be refrozen to create foams having honeycomb pore structures and high particle alignment. The

robustness of the freeze cast cellular nanocellulose structure opens up the possibility to post-process the cellular structure by wet-chemistry in the gel state.

Polymer-based materials in e.g. insulating and building applications requires a high degree of flame retardancy. The ability to strongly reduce the flammability of nanocellulose hybrid foams is important for the development of e.g. sustainable and eco-friendly thermal insulation materials. Boric acid is one of the most frequently used flame retardants for cellulosic materials. Boric acid is known to promote polymer degradation and char formation but this a complex process being influenced not only by the specific reactions and complexes that boric acid may have formed with the polymer matrix during preparation, but also by *in-situ* reactions of boric acid with the polymer during thermal exposure and combustion. Boric acid can form ester bonds with polyols and anhydrides with carboxylic acid groups but it is not well understood how such *in-situ* reactions may improve the flame retardancy.

We have studied the pH-dependent complexation of boric acid (BA) and borate (B) with cellulose nanofibers (CNF) and the effects on flame retardancy (3). We have investigated the chemistry of the pH-dependent cross-linking of boric acid or borate with nanocellulose, and shown that the molecular pathway at neutral and alkaline conditions strongly influenced the flame retardancy. We showed that the pH-dependent speciation of boric acid into borate anions at high pH, and the different reactivity of boric acid and borate anion toward the diol and carboxylic acid functional groups on the nanocellulose backbone, controlled the molecular cross-linking pathways. Thermal analysis showed that char oxidation is slowed down and shifted to higher temperatures, and that the formation of the volatile and combustible levoglucosan is less abrupt in the CNF-borate hybrids compared to CNF that has not been cross-linked. Analysis of the thermally annealed residues showed that the formation of a CNF-borate hybrid promoted charring and complete transformation of the polysaccharide at 450°C into a graphitized structure. Preparation of freeze-cast foams from nanocellulose-borate hybrids with the addition of sepiolite clay results in complete suppression of polymer ignition.

In a collaborative project between the University for Science and Technology, Hefei, China, The max Planch Institute for Colloids and Interfaces in Germany and Stockholm University, we have designed a novel phenol-formaldehyde-resin (PFR)/SiO₂ composite aerogel with a 3D binary network by a direct co-polymerization and nanoscale phase separation strategy (4). The PFR and the inorganic SiO₂ constituents formed interpenetrating binary network structures in the aerogel with domain sizes below 20 nm. The highly porous PFR/SiO₂ composite aerogel was shown to be highly mechanically resilient and the thermal conductivity in dry air of 24-28 mW m⁻¹K⁻¹ is significantly lower than commercial insulating materials like expanded polystyrene. The PFR/SiO₂ aerogels displayed outstanding fire retardancy and was able to sustain a high-temperature flame without disintegration. The PFR/SiO₂ composite aerogel with a silica content of 70% could resist ~1300 °C flame without disintegration and prevented the temperature on the non-exposed side to increase above 350 °C. This suggests that the material could provide extended protection against fire-induced collapse of

reinforced concrete structures. The excellent fire retardancy, low thermal conductivity and mechanical flexibility of the composite aerogel can be integrated with architectural materials for architectural and transport applications.

Finally, we have also participated in the development of an invention/patent that describes how cellulose-based foams can be produced. The patent is owned by Cellutech AB (since Nov 2018 acquired by StoraEnso AB) (5).

Heat transport in nanocomposite foams: effect of structure, composition and humidity and temperature

We have developed an experimental setup, which can perform accurate measurements of the thermal conductivity within a wide range of temperatures and relative humidity (2-80% *RH*) (6). The thermal conductivity (λ , mW/mK) of the foams was measured using the TPS 2500 S Hot Disk Thermal Constants Analyzer. We designed and built a customized cell that allowed the relative humidity (*RH*) to be controlled within the range 2-80 % *RH* using a P2 Cellkraft humidity. The temperature of the foams was controlled (261–314 K) by immersing the customized cell in a temperature controlled silicon oil bath. This unique and customized device allowed us to perform accurate measurements on biobased foams over a wide range of *RH* and temperature. Measurements of the thermal conductivity at controlled temperature and humidity of hygroscopic cellulose nanofibril- and nonionic polyoxamer-based foams have been performed using the customized hot disk device. We found that the thermal conductivity of isotropic CNF- and nonionic polyoxamer-based foams increased more than 3 times as the temperature and relative humidity increased from 261 K and 2% *RH*, to 314 K and 80% *RH*. We showed by complementary measurements that both the moisture uptake and the moisture transport properties have a significant influence on the thermal conductivity of the CNF- and nonionic polyoxamer-based foams.

The widely used Künzel's model was unable to accurately describe the thermal conductivity of the hygroscopic, low-density CNF and nonionic polyoxamer-based foams. We have developed an empirical model based on the linear relation between λ_{wet} of the biobased foams with the moisture content by mass that was able to describe the thermal conductivity of the investigated foams over the entire *RH*-range. Analysis of the moisture uptake and moisture transport properties suggests that Künzel's model is valid for materials with relatively high densities and (very) high water vapor resistance factors ($\mu \geq 7$), while the new empirical model is valid for foams with low densities and low water vapor resistance factors ($\mu \leq 1$). Combining accurate measurements of thermal conductivity at controlled temperatures and relative humidity with the empirical model developed in this study provides a viable way for predicting the thermal performances of hygroscopic, low-density foams.

Our work has shown that it is poorly understood why the radial thermal conductivity of CNF foams lies below the thermal conductivity of air. Therefore, in an ongoing study, we have combined measurements of the thermal conductivity of ultra-light anisotropic CNF foams prepared using CNF with different

dimensions and surface properties. We investigated how the thermal conductivity is related to the microstructure of the foam walls, the crystallinity and alignment. Additionally, attempts were made to correlate the anisotropic thermal conductivity to the important contributions and we have in collaboration with the group lead by Prof Junichiro Shiomi at University of Tokyo performed a simulation study to elucidate the contribution of the interfacial thermal resistance to the heat transfer.

Diskussion

Resultat som är av särskilt stor betydelse för ett hållbart energisystem kan delas in i tre huvudkategorier:

1. Inom projektets ram har nya sammansättningar för biobaserade lättviktsmaterial (skummer) utvecklats och utvärderats. En av dessa sammansättningar har patenterats och överförs till Cellutech AB för vidare kommersialisering. En annan sammansättning baserad på en organisk/oorganisk hybrid resulterade i en mycket intressant kombination av hög mekanisk styrka och flexibilitet, mycket god brandbeständighet och relativt lågvärmeledningsförmåga. Denna typ av material har potential för att på ett enkelt och säkert sätt integreras med andra konstruktionsmaterial (t.ex. olika fasadmaterial).
2. Projektet har genererat ny grundläggande kunskap om hur värmeledningen av hygroskopiska biobaserade skum påverkas av luftfuktigheten. Tack vare konstruktionen av den nya mätcellen är det nu möjligt att utföra mätningar av hur värmeledningsförmåga hos hygroskopiska lättviktskum beror på luftfuktigheten och temperaturen. Denna unika apparatur har rönt ett stort intresse och vi har kontaktats av flera andra forskargrupper som önskar inleda samarbeten. Den första serien av mätningar på ett isotropt kompositiskum användes för att utveckla en enkel modell som kan förutsäga hur värmeledningsförmågan beror på densiteten och luftfuktigheten. Denna kunskap är av stor betydelse för att utvärdera för vilka tillämpningar och miljöer biobaserade lättviktsmaterial är mest lämpade. Det pågående arbetet kommer förhoppningsvis att öka förståelsen hur den riktningsberoende (parallellt och tvärs porriktningen) värmeledningsförmågan beror på luftfuktigheten. Vi är särskilt intresserade att klargöra hur den gränsskiktstermiska resistansen beror på vattenupptag samt fiberriktningen. Våra preliminära resultat tyder på att den gränsskiktstermiska resistansen är betydande i normalriktningen mot fiberriktningen och att vattenupptaget och svällningen av de sammanfogade nanofibriller kan ha stor effekt på värmeledningsförmågan.
3. Projektet har genererat ny grundläggande kunskap om borsyras pH-beroende interaktion med cellulosa och hur interaktionen påverkar brandbeständigheten. Denna kunskap kan användas för att genom enkel pH-kontroll framställa cellulosabaserade material med mycket god brandbeständighet.

Publikationslista

Zhi-Long Yu, Ning Ying, Varvara Apostolopoulou-Kalkavoura, Bin Qin, Zhi-Yuan Ma, Mei-Yi Xing, Chan Qiao, Lennart Bergström, Markus Antonietti, Shu-Hong Yu, "Fire-retardant and thermally insulating phenolic-silica aerogels", *Angewandte Chemie*, 57, 4538-4542 (2018)

Varvara Apostolopoulou-Kalkavoura, Korneliya Gordeyeva, Nathalie Lavoine, Lennart Bergström, "Thermal conductivity of hygroscopic foams based on cellulose nanofibrils and a nonionic polyoxamer", *Cellulose*, 25:1117-1126 (2018)

Nathalie Lavoine, Lennart Bergström, "Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties and applications", *J. Mater. Chem. A*, 5, 16105-117 (2017)

P. Munier, K. Gordeyeva, L. Bergström, A. B. Fall, "Directional freezing of nanocellulose dispersions aligns the rod-like particles and produces low-density and robust particle networks", *Biomacromolecules*, 17, 1875-1881 (2016)

Bernd Wicklein, Darko Kocjan, Federico Carosio, Giovanni Camino, Lennart Bergström, "Tuning the nanocellulose-borate interaction to achieve highly flame retardant materials" *Chemistry of Materials*, 28, 1985-1989 (2016)

NT Cervin, L. Bergström, LE Wågberg, NFC stabilized foam, **US Patent 9,556,325** (2017). Transferred to Cellutech AB.

Presentationer vid vetenskapliga konferenser:

Varvara Apostolopoulou-Kalkavoura

- 5th International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials, 6-10 March 2017 | Lisbon, Portugal (poster)
- EUROMAT 2017, 17-22 September 2017, Thessaloniki, "Thermal conductivity of isotropic nanocellulose-based foams in humid air" (oral)

Lennart Bergström

- MRS Fall meeting, Nov 29-Dec 4, 2015, Boston, USA, (invited talk), "Surface-Modification and Assembly of Nanocellulose-Based Hybrids and Foams"
- ICC4, Oct 17-20, 2017, Fukuoka, Japan (oral presentation), "Nanocellulose-based hybrid materials"
- Green Chemistry NZ, Dec 8-9, 2017, Wellington, NZ (oral presentation), "Sustainable routes to green materials"
- ACS 256, Aug 19-23, 2018, Boston, USA (invited talk), "Nanocellulose-based self-assembled materials"

Referenser, källor

1. Nathalie Lavoine, Lennart Bergström, "Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties and applications", *J. Mater. Chem. A*, 5, 16105-117 (2017)
2. P. Munier, K. Gordeyeva, L. Bergström, A. B. Fall, "Directional freezing of nanocellulose dispersions aligns the rod-like particles and produces low-density and robust particle networks", *Biomacromolecules*, 17, 1875-1881 (2016)
3. Bernd Wicklein, Darko Kocjan, Federico Carosio, Giovanni Camino, Lennart Bergström, "Tuning the nanocellulose-borate interaction to achieve highly flame retardant materials" *Chemistry of Materials*, 28, 1985-1989 (2016)
4. Zhi-Long Yu, Ning Ying, Varvara Apostolopoulou-Kalkavoura, Bin Qin, Zhi-Yuan Ma, Mei-Yi Xing, Chan Qiao, Lennart Bergström, Markus Antonietti, Shu-Hong Yu, "Fire-retardant and thermally insulating phenolic-silica aerogels", *Angewandte Chemie*, 57, 4538-4542 (2018)
5. NT Cervin, L. Bergström, LE Wågberg, NFC stabilized foam, **US Patent 9,556,325** (2017). Transferred to Cellutech AB.
6. Varvara Apostolopoulou-Kalkavoura, Korneliya Gordeyeva, Nathalie Lavoine, Lennart Bergström, "Thermal conductivity of hygroscopic foams based on cellulose nanofibrils and a nonionic polyoxamer", *Cellulose*, 25:1117-1126 (2018)

Bilagor

Administrativ bilaga (bilaga 1)

Kopior på artiklar skickas på begäran