BioÄly - Demot - Pietsot

Biopohjaisten materiaalien vertailu anturimateriaalien näkökulmasta

3.1.2022
Tampereen Yliopisto

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Demon tavoitteet

- Tässä demossa vertaillaan erilaisia pietsosähköisiä materiaaleja anturien rakentamisen näkökulmasta.
- Vertailussa on mukana biomateriaalien lisäksi myös perinteisiä materiaaleja
  - Perinteisten materiaalien haasteet: esim. kierrätettävyys ja hinta
  - Biomateriaalien haasteet: esim. suorituskyky ja valmistustekniikoiden kypsyys
- Biopohjaisten anturimateriaalien merkityksestä
  - Antureiden kasvava määrä eri sovelluksissa
    - Energian harvestointi, IoT, fysiologiset mittaukset, point of care -sovellukset yms.
  - Ympäristöystävällisyys nousee yhä kriittisemmäksi suurempien volyymien vuoksi
  - Mitä vaihtoehtoja on tarjolla?
  - Mitä ominaisuuksia eri vaihtoehdoilla on?

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Mihin pietsomateriaaleja käytetään?

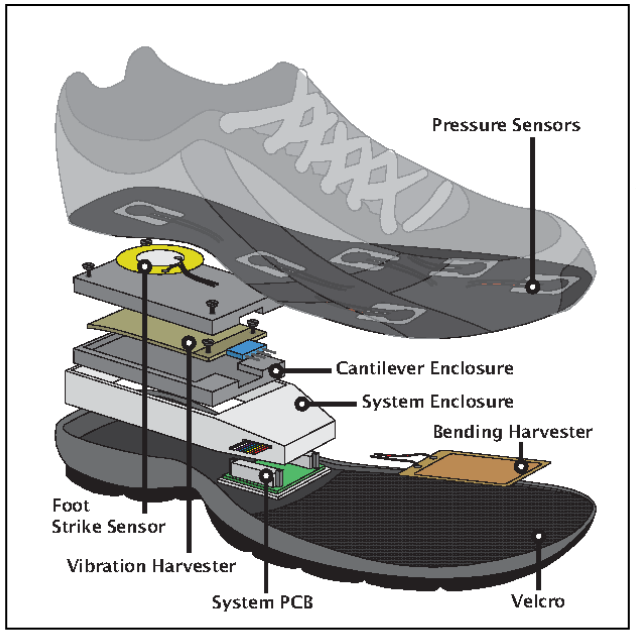
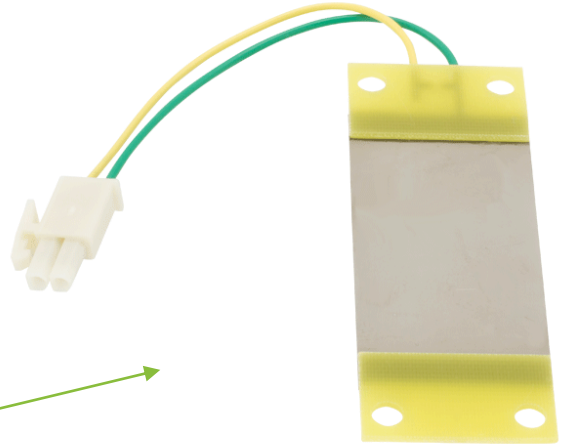


Fig. 1. Expanded view of the shoe system and all integrated components.

Meier at al. (2014)
https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6943668

Pietsomateriaalit sopivat käytettäväksi energian harvestoinnissa, jossa mekaaninen liike muutetaan sähköenergiaksi.

Liikkeen ei tarvitse olla puristavaa, vaan myös venymä voi aikaansaada jännitemuutoksen. Jotkin pietsomateriaalit toimivat lisäksi mekaanisina muuntimina, eli niiden fyysistä muotoa voidaan muuttaa ulkoisella jännitteellä.



Pietsomuunnin, mallia piezo.com D220-A4BR-2513XE

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Lähtömateriaalien ominaisuuksia

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Lähtömateriaalit							
Lähtömateriaalit	Sellua tuottava bakteeri ja sen ravinto (sakkaridit, mutta myös rasvat ja glyseroli mahdollisia), antibiootit/homeenesto	Puuperäinen selluloosa	Puuperäinen selluloosa, happo	Eliöpohjainen materiaali	Kasvitärkkelys	Vinylideenifluoridi	Polypropyleeni, metallinen elektrodi
Hyödynnetäänkö massavirtoja, jotka muuten menisi jätteeksi?	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä
Lähtömateriaalien hinnat	Esim. sokeri 1€/kg ja homeenesto 40€/50mg	1€/kg	1€/kg + happo	30-40€/kg	0,85€/kg (maissitärkkelys)	1000€/kg	1€/kg

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Valmistus 1/2

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Valmistus							
Valmistustekniikka	Tuotetaan ravinneliuoksesta (esim. jäteglyserolista) bakteerilla ja pestään	Mekaanisesti pilkottu puuperäisestä selluloosasta. Ligniinin erottelu--> fibrillointi.	Mekaanisesti pilkottu puuperäisestä selluloosasta. Ligniinin erottelu--> fibrillointi --> amorfisten alueiden poisto kemiallisesti	Esim. ravun kuorista saatava. Pesu, jauhanta, kemiallinen käsittely.	Maitohapon kondensaatio polymeeriksi; laktidin rengasrakenteen avaaminen metallikatalyytillä	Lähtömateriaali valmistetaan synteettisesti. Vinylideenifluoridin polymerisaatio ja poolaus. Roll-to-roll	Lähtömateriaali valmistetaan synteettisesti. Huokoisen kalvon poolaus. Metallipintojen lisääminen. (*)
Olemassa olevien tuotantoteknologioiden sovellettavuus	Täysin mahdollista tapauksissa, joissa mikrobeille suotuisa ympäristö on jo olemassa, esim. jätevesien käsittely ja entsyymiteollisuus	Paperiteollisuuden laitteiden käyttö teoriassa mahdollista	Paperiteollisuuden laitteiden käyttö teoriassa mahdollista	Paperiteollisuuden laitteiden käyttö teoriassa mahdollista	PLA:ta tuotetaan eri muotoisena (myös kalvona) paljon jo nykyisellään	Tuotetaan suuria määriä nykyisellään	Tuotetaan suuria määriä nykyisellään
Valmistuksen energiankulutus	Vain tasainen lämpötila vaaditaan, mutta vettä kuluu muihin verrattuna enemmän	Suuri, 6 kWh/kg lähtömassalle + kuivaus 2 kWh/kalvo	Suuri	Suuri	Suuri	Suuri (korkeat lämpötilat ja sähkökenttä poolaukseen). Samassa luokassa EMFi:n kanssa.	Suuri (korkeat lämpötilat ja sähkökenttä poolaukseen). Samassa luokassa PVDF:n kanssa.

* Patentti US4654546A:
https://patents.google.com/patent/US4654546A/

Tampereen yliopisto

BioAly

PIRKANMAA

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

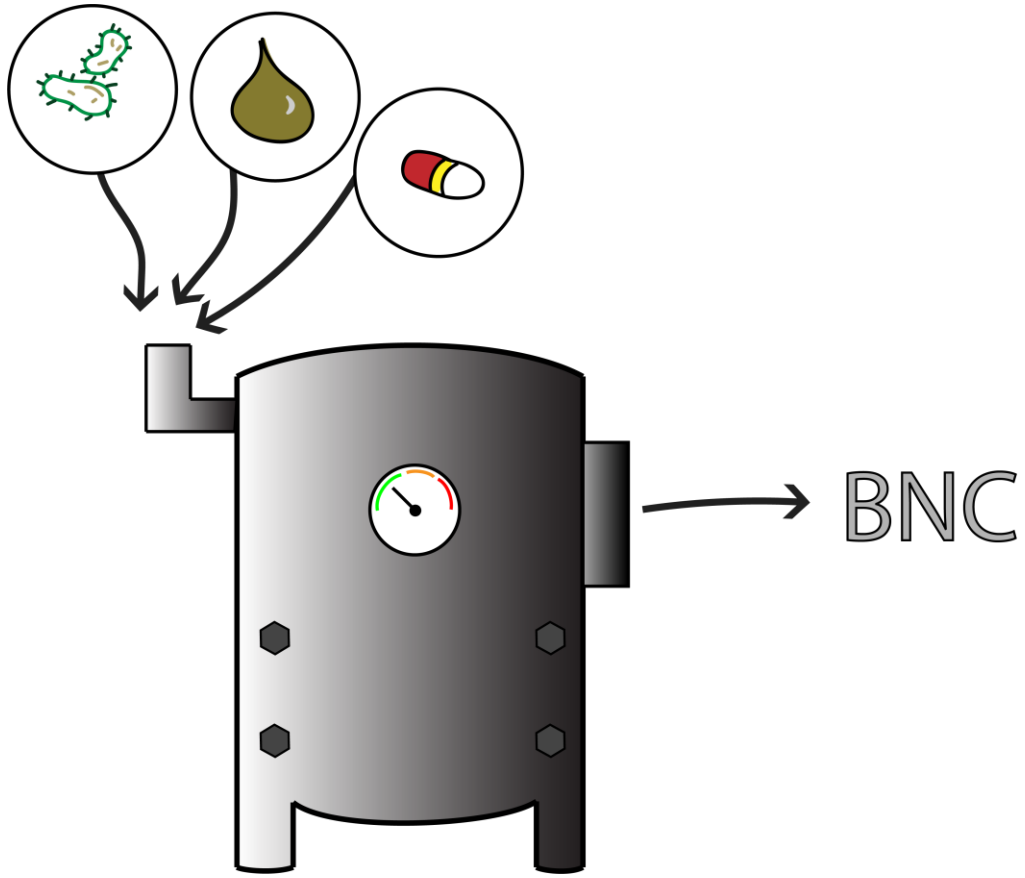
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Valmistus 2/2

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Valmistus							
Valmistusaika (raaka-aineelle)	Aloitettaessa pitkä, mutta bioreaktorissa tuotanto jatkuvaa ja skaalautuvaa	Raaka-aineesta kalvoksi pitkä, sillä vaatii hallitun kuivatuksen	Fibrillointi kestää kauemmin kuin MFC:llä	Jauhaminen on nopeampaa kuin MFC/NFC:llä.	PLA, PVDF, EMFi samaa luokkaa.	PLA, PVDF, EMFi samaa luokkaa.	PLA, PVDF, EMFi samaa luokkaa.
Valmistusaika (kalvolle)	Kalvon kasvaminen vie suurimman ajan	Valmistusaikaan vaikuttaa liukeneminen, valaminen ja kuivatus. Kuivatus vie suurimman ajan	Valmistusaikaan vaikuttaa liukeneminen, valaminen ja kuivatus. Kuivatus vie suurimman ajan	Valmistusaikaan vaikuttaa liukeneminen, valaminen ja kuivatus	Pellettien sulatus ja valaminen arkkikokoon, jäähdytys vaikuttavat aikaan.	PLA, PVDF, EMFi samaa luokkaa.	PLA, PVDF, EMFi samaa luokkaa.
Tarvittava valmistuslaitteisto	Bioreaktori, inkubaattori (laboratoriossa)	Mekaaninen jauhain, kuivatuslaitteisto	Mekaaninen jauhain, kuivatuslaitteisto	Mekaaninen jauhain, liuotuslaitteisto, kuivatuslaitteisto	Samankaltainen kuin PVDF ja EMFi, muttei sähkökenttää.	PVDF ja EMFi samankaltainen	PVDF ja EMFi samankaltainen

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Esimerkki valmistuksesta: bakteeri(nano)selluloosa eli BNC



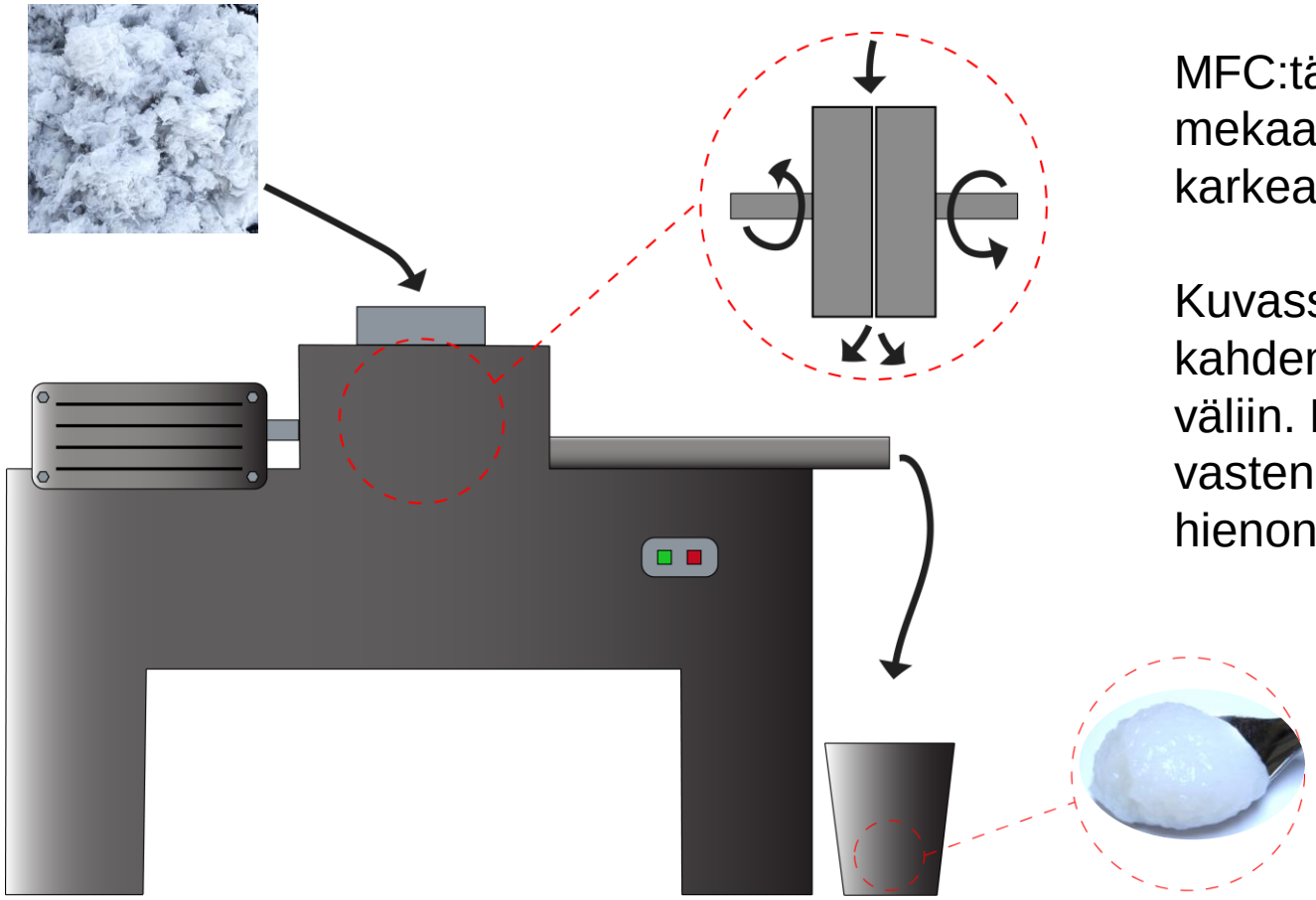
BNC:tä voidaan valmistaa pieniä määriä kerrallaan laboratorio-olosuhteissa käyttäen petrimaljoja ja inkubaattoria. Suurempiin määriin bioreaktori on tehokkaampi.

Kuvassa bioreaktorin toimintaan tarvitaan sellua tuottavia bakteereja, ravinneliuosta ja homeenestoa.

Bioreaktorista kerätty BNC pestään ja joko kuivataan tai sekoitetaan hyytelömäiseksi seokseksi, riippuen käyttökohteesta.

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Esimerkki massan valmistuksesta: mikrofibrilloitu selluloosa eli MFC



MFC:tä on mahdollista tehdä mekaanisesti jauhamalla karkeaa selluloosakuitua.

Kuvassa karkea kuitu ohjataan kahden lähekkäin olevan laipan väliin. Laipat pyörivät toisiaan vasten, ja välissä olevat kuidut hienontuvat pienemmiksi.

Tampereen yliopisto

BioAly

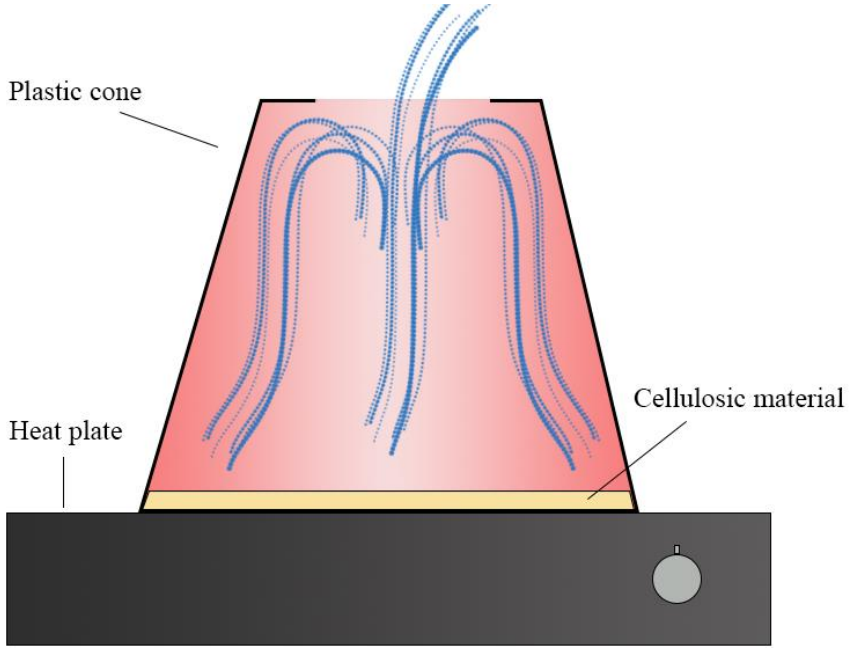
PIRKANMAA

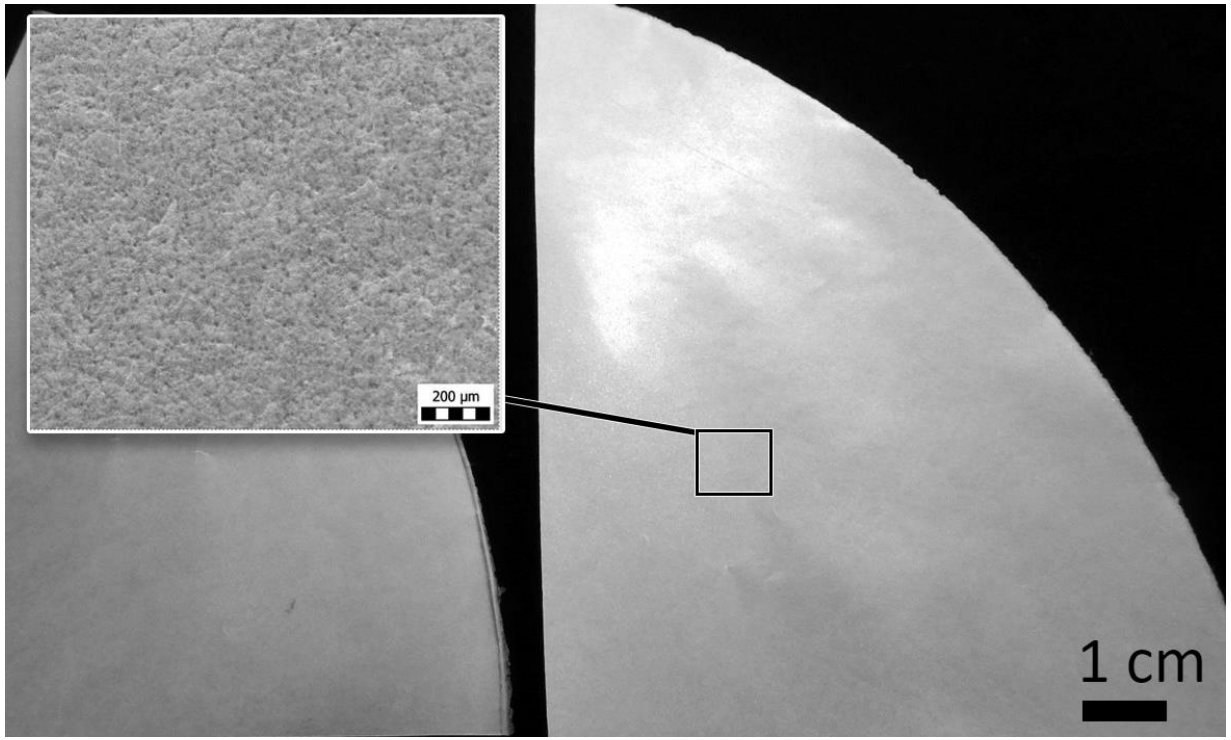
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Esimerkki kalvon valmistuksesta: mikrofibrilloitu selluloosa eli MFC

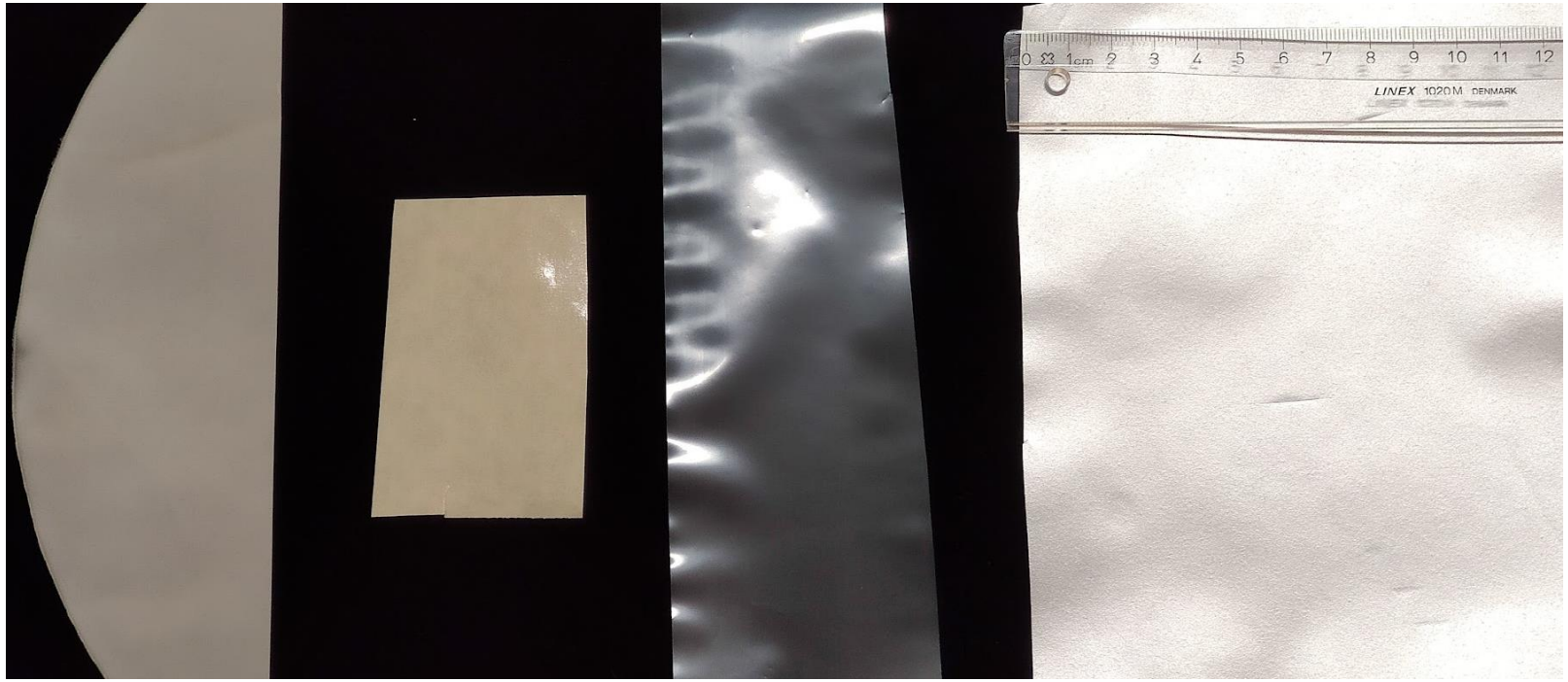




Veden ja MFC:n dispersio valetaan kalvoksi. Kuivumisen on oltava hallittua, sillä muuten kalvo murtuu ja/tai rypistyy.

A. Pammo, H. Christophliemk, J. Keskinen, T. Björkqvist, S. Siljander, M. Mäntysalo and S. Tuukkanen
Nanocellulose films as substrates for printed electronics
Proceedings of Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS), 01-05 July, 2019, Helsinki, Finland. doi: 10.1109/MARSS.2019.8860931

Eri kalvoja vierekkäin:



Kuvassa vasemmalta oikealle: MFC, PLA, PVDF sekä EMFi. PLA:ta on saatavissa myös läpinäkyvänä.

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Ominaisuuksia standardeista

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Standardit							
Lämpötilan kesto	~230 C	~250C	~210C	~140 C	~250C	-70-150 C	-40-50 C
Liuottimien kesto	Liukenee vain väkeviin happoihin tai emäksiin. Sietää useita orgaanisia liuottimia.	Liukenee vain väkeviin happoihin tai emäksiin. Sietää useita orgaanisia liuottimia.	Liukenee vain väkeviin happoihin tai emäksiin. Sietää useita orgaanisia liuottimia.	Sitoo helposti vettä, ei kestä happoja.	Heikko (asetoni, kloroformi, metyleenikloridi)	Korkea	Kestää orgaanisia liuottimia, mutta ei voimakkaita hapettimia.
Vetolujuus	21 MPa	100-150 MPa	12 MPa	20,8 MPa	5,7 MPa (kalvo)	30 MPa (kalvo)	94 MPa
Youngin moduuli	15-18 GPa	15-17 GPa	1,5 GPa	2 GPa	4,4 Gpa	2,5 Gpa	2 MPa

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Ominaisuudet anturimateriaalina toimimisen suhteen

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Anturimateriaaliominaisuuksien selvittäminen							
Materiaaliominaisuuksien tunnettuus	Yksittäin hyvä, kokonaisuutena puutteellinen	Hyvä, suurimmat puutteet kalvon valmistukseen liittyvissä seikoissa	Hyvä, suurimmat puutteet kalvon valmistukseen liittyvissä seikoissa	Yleisesti hyvä, mutta kalvona tutkittu vähemmän kuin muina sovelluksina	Erittäin hyvä	Erittäin hyvä	Erittäin hyvä.
Materiaaliominaisuuksien selvittämisen toistettavuus	Vaikeutena kalvojen heterogeenisyys (esim. erot paksuudessa) laboratorio-olosuhteissa	Kalvonvalmistuksen optimointi vaatii materiaaleja ja aikaa, muuten tutkimus ei teoriassa ole vaikeaa	Kalvonvalmistuksen optimointi vaatii materiaaleja ja aikaa, muuten tutkimus ei teoriassa ole vaikeaa	Menetelmiä kalvon valmistamiseen on esitetty akatemiassa, teollista tuotantoa ei ole.	Erittäin hyvä (teollisesti tuotettua tasalaatuista kalvoa)	Erittäin hyvä (teollisesti tuotettua tasalaatuista kalvoa)	Erittäin hyvä (teollisesti tuotettua tasalaatuista kalvoa)
Suorituskyky: Pietsoherkkyys	10-20 pC/ [1]	5-15 pC/N [2]	10-20 pC/N [2]	4-6 pC/N [3]	5-15 pC/N	20-30 pC/N	170 pC/N
Suorituskyky: Aktuaattorikyky	ei	ei	ei	ei	ei	ei	kyllä, mm. kaiuttimissa
Kalvomateriaalin taivutettavuus	Hyvä	Kohtalainen	Kohtalainen	Hyvä	Hyvä	Erittäin hyvä	Hyvä

[1] R. Mangayil, S. Rajala, A. Pammo, E. Sarlin, J. Luo, V. Santala, M. Karp, and S. Tuukkanen
Engineering and Characterization of Bacterial Nanocellulose Films as Low Cost and Flexible Sensor Material
ACS Applied Materials & Interfaces **9**(22) (2017) 19048. doi: 10.1021/acsami.7b04927.

[2] S. Rajala, T. Siponkoski, E. Sarlin, M. Mettänen, M. Vuoriluoto, A. Pammo, J. Juuti, O. J. Rojas, S. Franssila, and S. Tuukkanen
Cellulose nanofibril film as a piezoelectric sensor material
ACS Appl. Mater. Interfaces **8**(24) (2016) 15607. doi: 10.1021/acsami.6b03597.

[3] A. Hänninen, E. Sarlin, I. Lyyra, T. Salpavaara, M. Kellomäki, S. Tuukkanen
Nanocellulose and chitosan based films as low cost, green piezoelectric materials
Carbohydrate Polymers **202** (2018) 418, doi: 10.1016/j.carbpol.2018.09.001.

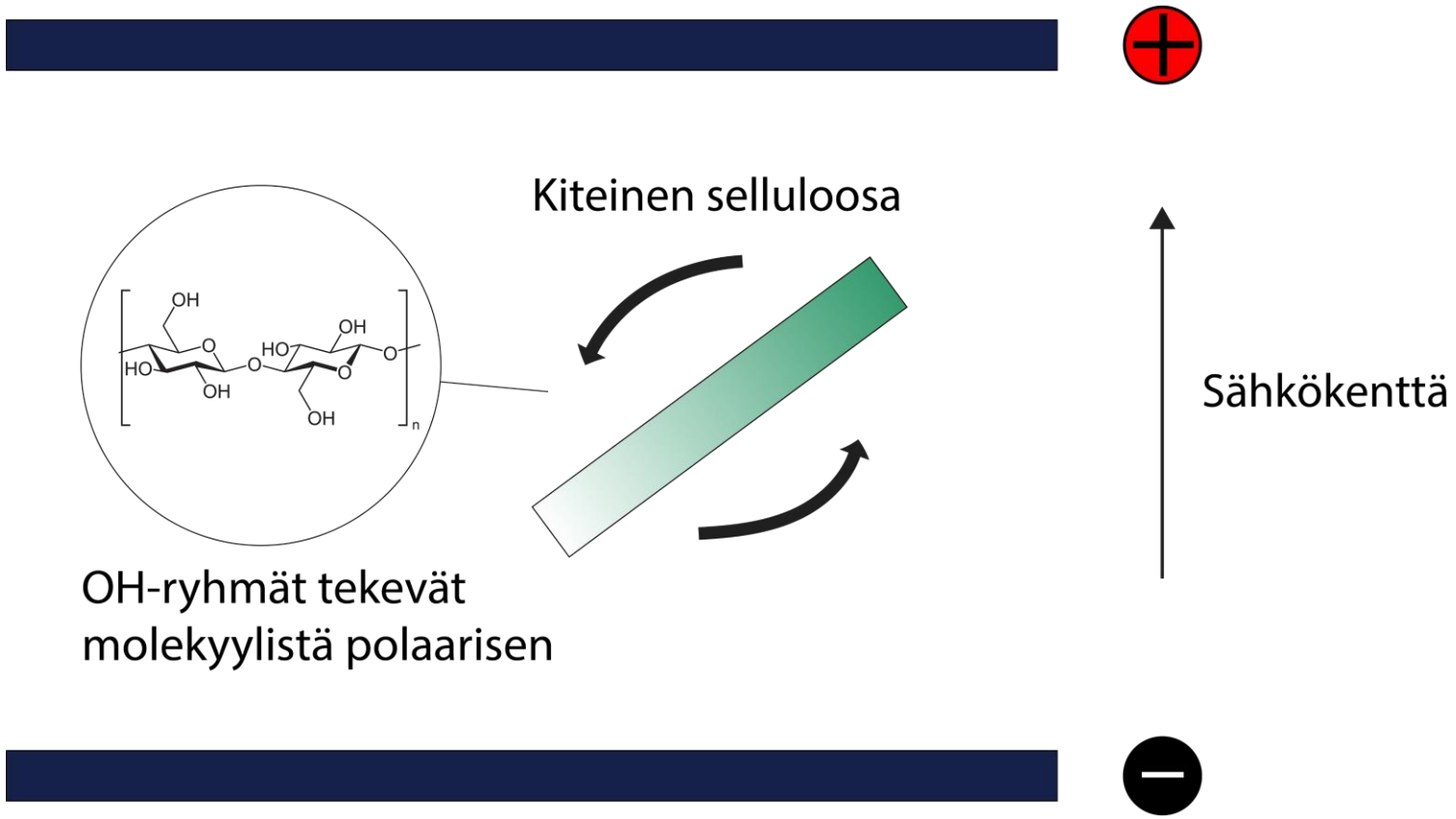
Kestävää kasvua ja työtä –ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Sovellettavuus

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Sovellettavuus							
Kestävyys	Bakteerisellulla on suuri kuidunpituus ja sitä kautta vetolujuus on erinomainen	Vetolujuus ja leikkausjännitteen kesto vain kohtalaisia	Todella lyhyt kuidunpituus tekee kalvosta heikkoa muihin verrattuna	Kuivana vetolujuus ym. ovat hyvät. Muistuttaa pehmeää muovia.	Hyvä vetolujuus ja leikkausjännitteen kesto, ei murru taitettaessa (mutta taitos jää kalvoon)	Kalvo on lujaa. Taitoksesta jää jälki.	Polypropyleeni on kestävää eikä väsy, mutta metalliset elektrodit eivät välttämättä kestä taittelua.
Ympäristön vaikutus materiaaliin	Sitoo kosteutta ja menettää märkänä osan vetolujuudestaan	Sitoo kosteutta, hajoaa märkänä helposti	Sitoo kosteutta, hajoaa märkänä helposti	Sitoo herkästi vettä, ja märkänä menettää rakenteellisen kestävyytensä, muuttuen geelimäiseksi.	Sitoo vain vähän kosteutta, pehmenee yli 60 asteen lämpötiloissa	Kestää useita liuottimia sekä hiilivetyjä. Sietää korkeita lämpötiloja (150 C) ominaisuuksien muuttumatta.	Perustuen polypropyleeniin, EMFi ei kestä yli 150 C:n lämpötiloja pehmentymättä eikä hapettavia yhdisteitä.
Onko olemassa vaihtoehtoinen käyttökohde kalvomateriaalille sellaisenaan (ilman anturisovellutusta)?	Haavanpeitteenä ja komposiiteissa	Pakkausmateriaaleissa ja muovin korvikkeena	Pakkausmateriaaleissa ja muovin korvikkeena	Lääketieteessä, elintarviketeollisuudessa sitomaan kosteutta ja kemikaaleja	Yleisesti muovina, mutta etenkin 3D-tulostuksessa PLA on suosituin filamenttimateriaali	Useita käyttökohteita kevyelle ja korkealaatuiselle muoville yleisesti.	Aktuaattorina.

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Anturisovellusten toteutuksen haasteet:

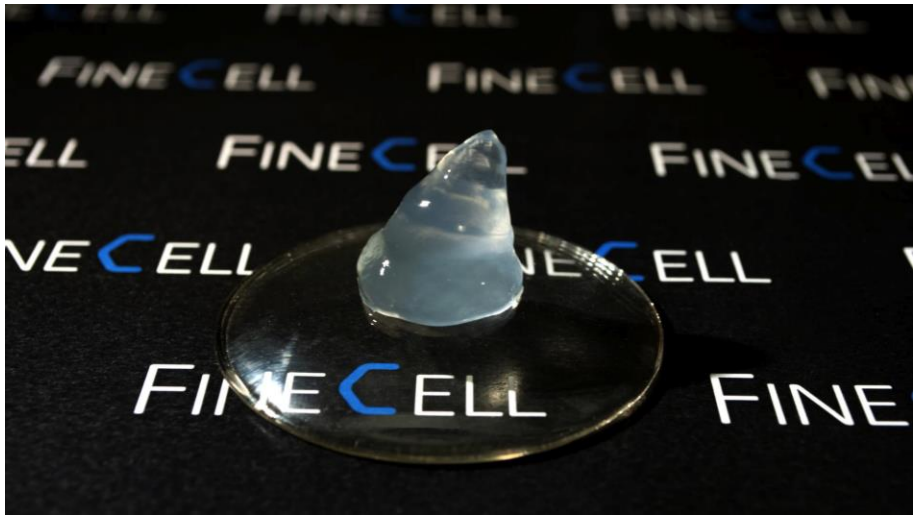


Selluloosasta valmistettujen kalvojen pietsoherkkyyttä laskevat selluloosakiteiden epäjärjestys.

Suorituskykyistä anturia varten kiteet voidaan suunnata yhdensuuntaisiksi voimakkaan ulkoisen sähkökentän avulla, kun materiaali on vielä märkää. Käytännössä tämä ei ole kuitenkaan helppoa.

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Anturisovellusten toteutuksen haasteet:



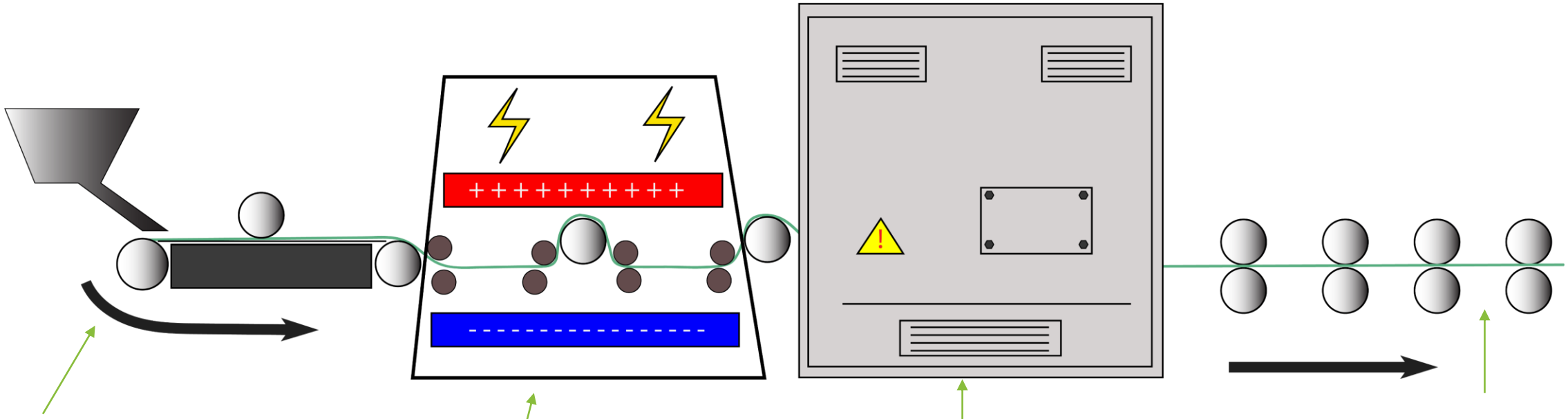
Selluloosahydrogeeliä.
http://www.finecell.se

Kaikki tässä dokumentissa esitellyt uusiutuvat materiaalit sitovat kosteutta. Selluloosaa ja kitosaania myydään myös valmiina hydrogeelinä. PLA:n tapauksessa kosteuden sitoutuminen ei muuta materiaalin ulkoista olemusta mutta se voi vaikuttaa PLA:n fyysisiin ominaisuuksiin.

Anturisovelluksissa suojaus kosteudelta tulee ottaa huomioon rakenteellisen lujuuden ja anturin suorituskyvyn kannalta.

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Nanoselluloosakalvojen tuotannon skaalauksen haasteet



Massa lisätään linjalle ja valetaan kalvoksi.

Kalvo poolataan pietsoherkkyyden kasvattamiseksi.

Kuivatuksen on oltava hallittua, jotta kalvo pysyy tasaisena ja ehjänä.

Mahdollinen jälkikäsittely suojaa kalvoa esim. kosteutta vastaan.

Tampereen yliopisto

BioAly

PIRKANMAA

Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

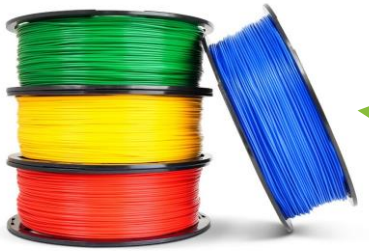
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Uusiutuvien materiaalien eräitä muita käyttökohteita:

Bakteerisellua voidaan käyttää haavanpeitteenä ja osana komposiitteja.

Sabbagh et al. 2018
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-76573-0_30-1

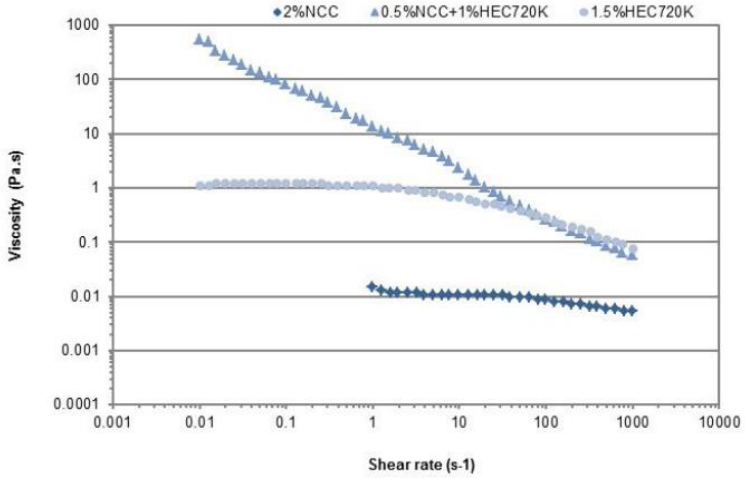
CNC sopii käytettäväksi muovin täyteaineena sekä viskositeetin säätelyyn.



PLA on erittäin monikäyttöinen, mutta erityisesti 3D-tulostamisessa se on suosittua filamenttimateriaalina.

TECHNOLOGY OVERVIEW

Cellulose Nanocrystals (CNC), also known as Nanocrystalline Cellulose (NCC), have been found to be effective thickening agents and rheology modifiers, particularly when combined with conventional water soluble polymeric thickeners (e.g. hydroxyethyl cellulose; HEC).



Viscosity vs. shear rate of hydroxyethyl cellulose (HEC) alone, HEC with 0.5% CNC, and HEC with 2% CNC. (Note: CNC = NCC above)

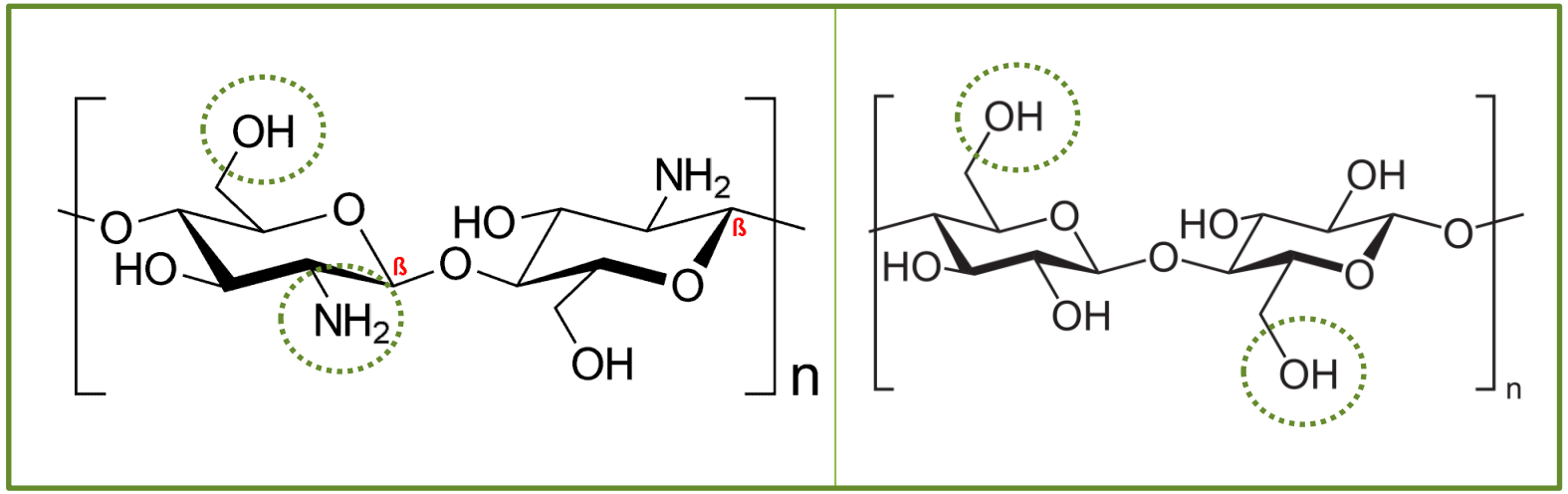
https://innotechalberta.ca/

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Uusiutuvien materiaalien eräitä muita käyttökohteita:

Kitosaania voidaan käyttää suodatusprosesseissa apuna sitomaan pienhiukkasia. Lisäksi sen käyttöä komposiittina muovien ja biomateriaalien kanssa sekä esimerkiksi lääkeaineiden sitojana/ luovuttajana tutkitaan.

MFC:tä voidaan nanokiteisen selluloosan (CNC) tapaan käyttää täyteaineena tai komposiiteissa vahvistamaan paperi- tai muovirakenteita.



Kitosaanin (vasemmalla) ja selluloosan kemialliset rakenteet muistuttavat toisiaan. Amino- tai hydroksyyliryhmät tarjoavat kiinnittymiskohdan komposiiteissa ja materiaalin funktionalisoinnissa.

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Kierrätettävyys ja hävitettävyys

Arviointikriteerit:	Bio-pietsot					Kaupalliset vaihtoehdot	
	Bakteeripohjainen selluloosa	**Mikrofibrilloitu selluloosa (MFC)**	**Nanofibrilloitu selluloosa (NFC)**	**Kitosaani**	**PLA**	**PVDF**	**EMFi (orientoitu polypropyleeni)**
Kierrätettävyys ja hävitettävyys							
Sisältääkö haitallisia yhdisteitä	Ei	Ei	Nanokokoiset sellukiteet voivat olla ärsyttäviä tai jopa haitallisia	Ei	Ei	Ei (kun käytetään alhaisemmassa kuin polymeerin hajoamislämpötilassa)	Ei
Talteenotettavat komponentit	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Mahd. metallielektrodi
Sensorimateriaalien hajoavuus	Hajoaa luonnossa	Hajoaa luonnossa	Hajoaa luonnossa	Hajoaa luonnossa	Hajoaa luonnossa, mutta hitaasti	Ei hajoa	Ei hajoa

Tampereen yliopisto
BioAly
PIRKANMAA
Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma
Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020
Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Yhteenveto

- Pelkkä biomateriaalien parempi kierrätettävyys ei ole riittävä ominaisuus niiden yleistymisen tueksi.
- Biomateriaaleiden suorituskyky ja valmistuksen skaalaus tulee saada samalle tasolle kuin öljypohjaisilla tai synteettisillä materiaaleilla.
- Lisätietoa materiaalien yksittäisistä ominaisuuksista löytyy akateemisista julkaisuista varsin hyvin.
- Valmistuskustannusten vertailu on haastavaa tuotannollisista syistä johtuen ja koska materiaalien alkuperä vaihtelee paljon. Teollista tuotantoa anturisovelluksiin ei ole olemassa.
- Biomateriaalitutkimuksen ja -tuotannon suurimmat haasteet ovat suorituskykyisempien anturiominaisuuksien kehittämisessä ja tuotannon skaalauksessa.
- Skaalautumisen kehittämistä edistää biopohjaisten materiaalien käyttö monissa muissakin sovelluksissa ja julkinen paine luopua kertakäyttöisten öljypohjaisten muovien käytöstä.