



# ÚJ GENERÁCIÓS HŐSZIGETELŐ KOMPOZIT VÉKONYRÉTEG KUTATÁS-FEJLESZTÉSE

---

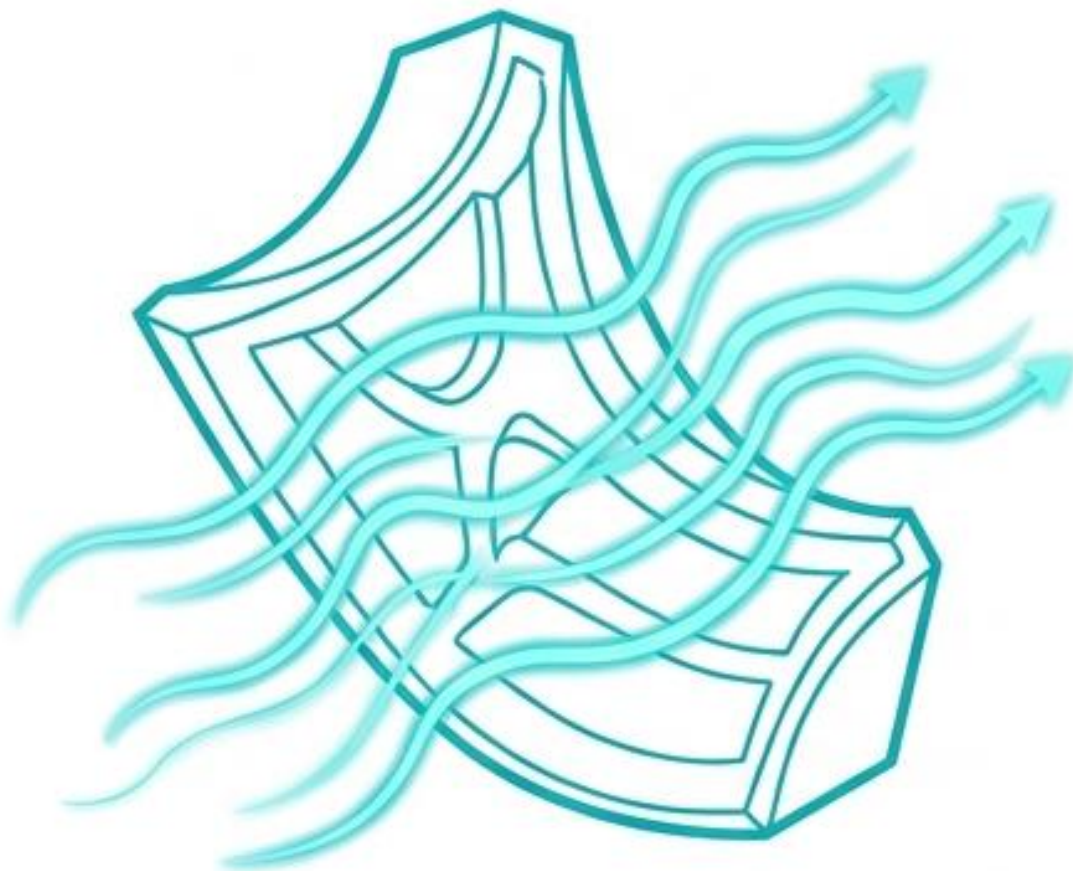
ATL Zrt.

Előadó: Nagy András vezérigazgató

Magyar Anyagtechnológiai Fórum – 2025.09.19.

**A hagyományos tömbi szigetelők nem alkalmazhatók extrém hőmérsékletű, komplex geometriájú felületeken vékonyréteggént.**

## **Ipari probléma és motiváció**



### **A kihívás**

Nagy felületű, változó geometriájú (pl. űrkutatás, ipari berendezések) elemek hőszigetelése.

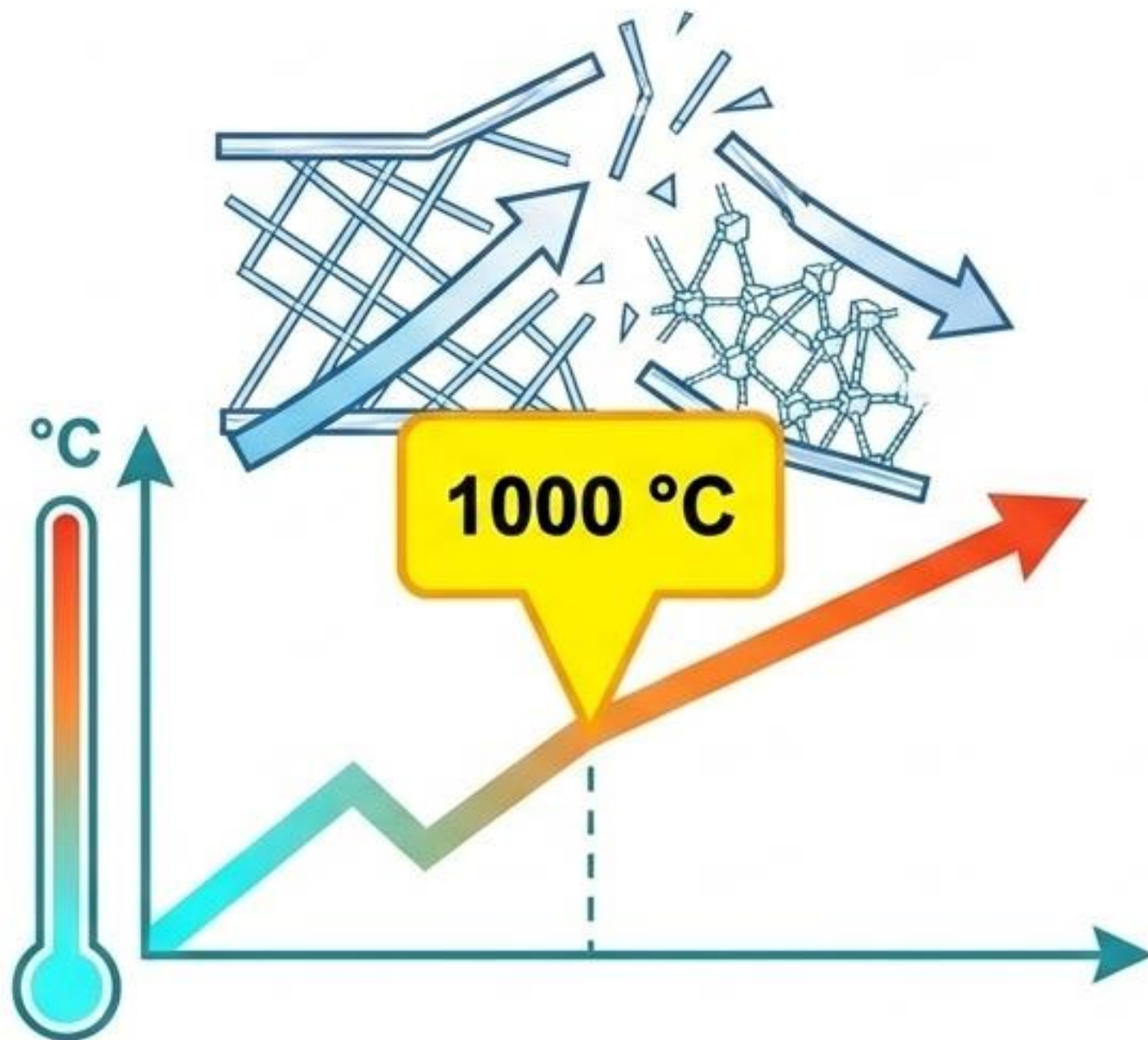
A jelenlegi vékonyréteg bevonatok magas hőmérsékleten (1000 °C felett) elvesztik integritásukat.

### **A követelményrendszer**

Szükség van egy ultrakönnyű, nagy porozitású, kompozit alapú szervesetlen oxid rendszerre, amely felületre kenhető, és ellenáll az extrém hőterhelésnek.

Az irodalomban ismertetett  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kriogélek pórusszerkezete 1000 °C felett összeomlik az  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  fázisátalakulás miatt.

## A hagyományos hőszigetelő rendszerek korlátai



- A hagyományos alumínium-oxid rendszerek hővezetési tényezője (0,10 – 0,50 W/mK) nem elégséges ultravékony szigeteléshez.
- 1000 °C-nál bekövetkező kritikus fázisátalakulás.
- A porózus szerkezet megsemmisülése (összeomlás), ami a szigetelőképeség drasztikus csökkenéséhez vezet.

**Célunk egy 1500 °C felett is stabil, 70% porozitású, hierarchikus szerkezetű szál-erősített mátrix létrehozása.**

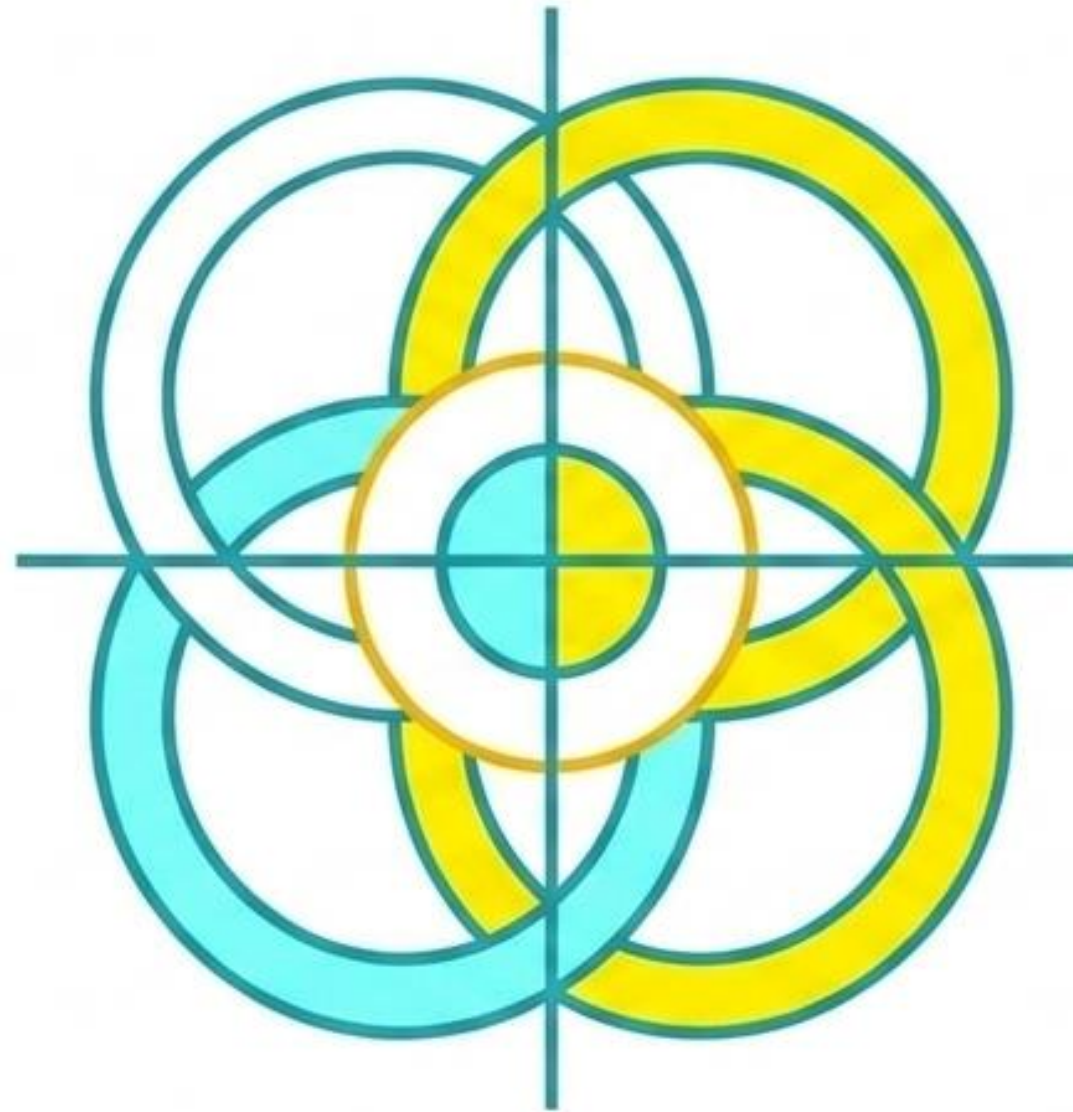
## Kutatási célkitűzések

### Nanostruktúra

Nyitott, anizotróp makropórusok és falba zárt nanopórusok szintézise.

### Szigetelés

0,04 – 0,045 W/mK hővezetési tényező elérése.



### Termikus stabilitás

A 1000 °C-os korlát áttörése, 1500 °C feletti hőtűrés.

### Mechanika

Szeperált liofilizált kriogél és cellulózsál (10-25  $\mu\text{m}$ ) integrálása egy flexibilis, vékonyréteggént felhordható kompozitba.

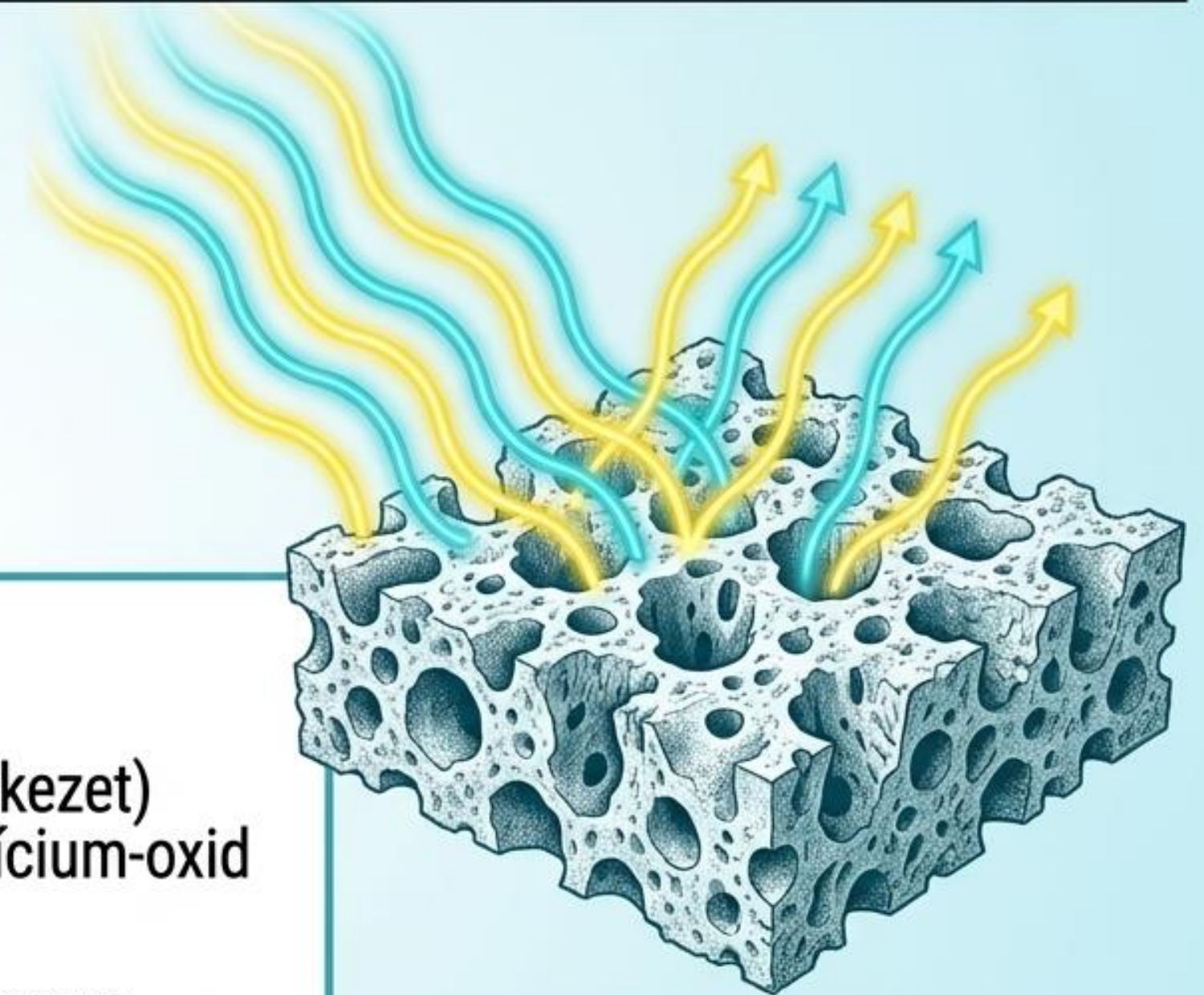
**A szeparált granulátumok helyett egyenesen a 3D-os térszerkezetű géleket liofilizáljuk.**

## Szol-gél alapú anyagfejlesztési stratégia



A hőszugárzási tényezők kontrollálásának alapja a részecskegeometria szabályozása szilika rendszerekben.

## TEOS alapú szilika rendszerek



- Kiindulási elemzések a szilárd fázisú emittancia csökkentésére.
- A porozitás, az érdesség és a textúra (felületszerkezet) szerepének irodalmi és kísérleti vizsgálata a szilícium-oxid hőszugárzásában.
- A közeli infravörös tartomány ( $0,7-2,5 \mu\text{m}$ ) és a magas hőmérsékletű ( $1300 \text{ K}+$ ) sugárzási mechanizmusok megértése a kompozit fázisok optimális megválasztásához.

A vízüveg rendszerek költséghatékony alternatívát nyújtanak, de hőstabilitási limitjeik indokolják a tisztább oxidok felé való elmozdulást.

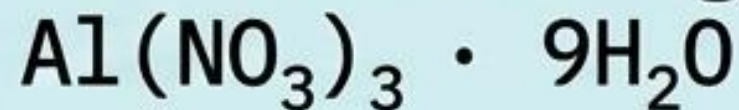
## Vízüveg alapú rendszerek

Célkitűzés & Előnyök		Kritikus Korlátok	
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Na/K-szilikát alapú (vízüveg) prekursorok tesztelése a hálózatképzés során.</li><li>• Cél: a szol-gél folyamatok költség-optimalizálása ipari méretekre.</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Tapasztalatok: A maradék alkálifém-ionok ronthatják a magas hőmérsékleti integritást és a kapott pórusrendszer termikus ellenállását, megerősítve a tiszta Al-sók szükségességét a fő kutatási vonalban.</li></ul>

Az alumínium-nitrát prekursor vizes fázisú hidrolízise és kondenzációja stabil, háromdimenziós hidrogél térhálót hoz létre.

## Gélesedési mechanizmusok

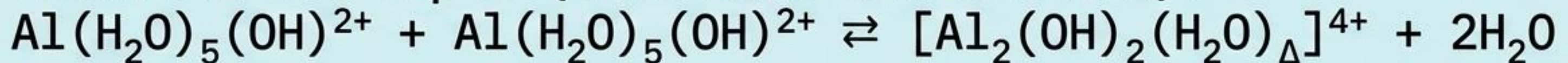
Kiváló minőségű kiindulási anyag:



Hidrolízis lépése:



Kondenzációs lépés (a térháló kialakulása):



Eredmény: Optikailag tiszta Al-oxid-hidroxid gél, aktív felületi hidroxilcsoportokkal.

A hidroxietilcellulóz (HEC) biztosítja a kriogél szemcsék és a cellulózsálak közötti elengedhetetlen másodrendű kötéseket.

## pH és összetétel hatása



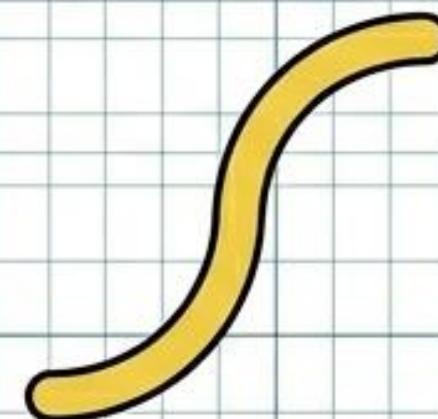
**Kötőanyag (HEC):**  
Minimum 10 m/m% szükséges a homogen-homogenitáshoz és a porlékony állapot elkerüléséhez.



**pH beállítás:**  
Sósav (HCl) lassú csepegtetése és NaOH-alkalmazása a vizes kolloid oldat gélesedési idejének finomhangolásához.



**Adalék kísérletek:** Az alumínium-acetát (kétfogú ligandumként) hozzáadása nem váltotta be a reményeket (növelte a reményeket (növelte a porlékonytságot)). A glicerin a réteg rugalmasságát növeli.

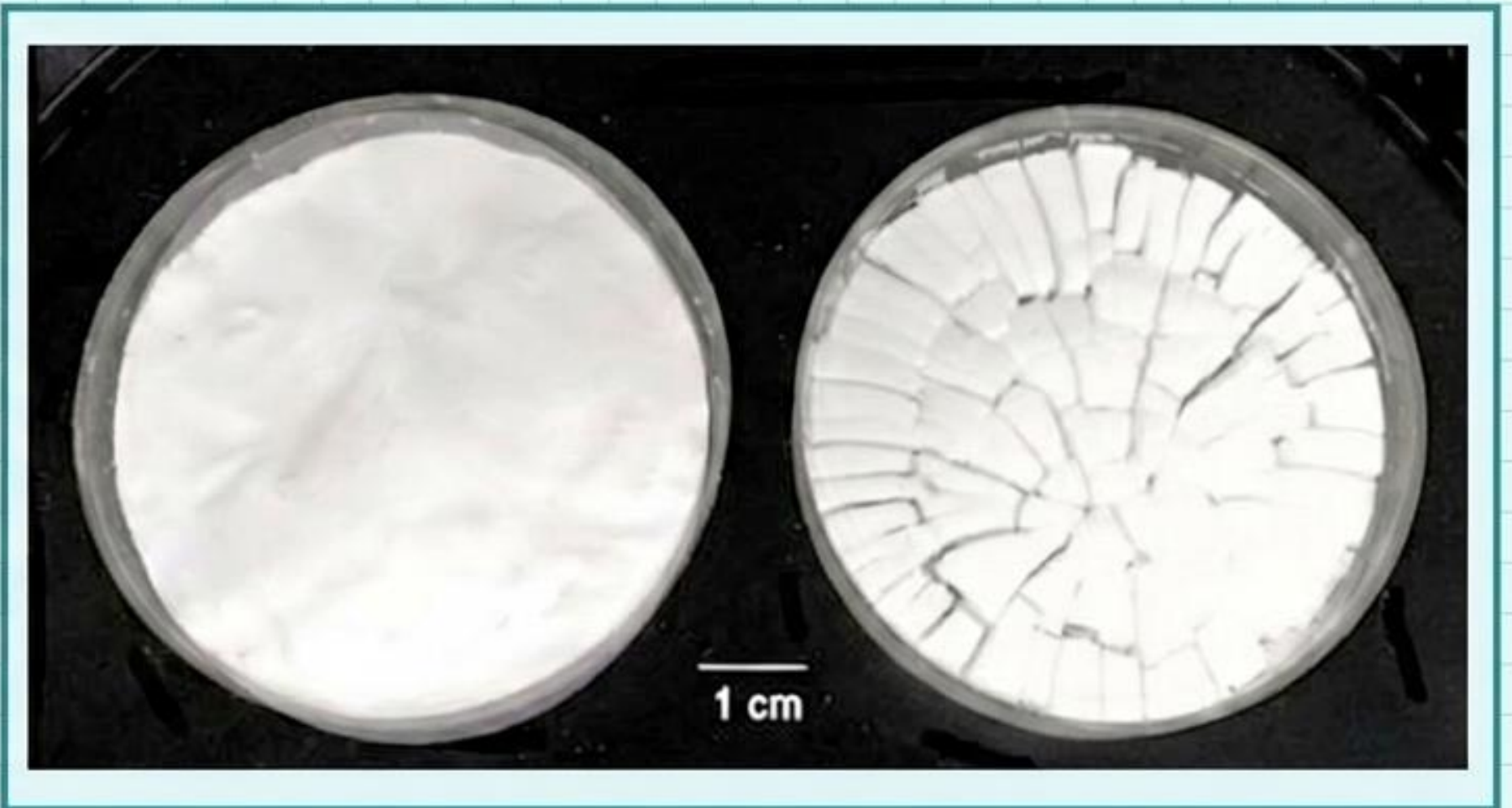


## Takeaway

A fagyasztás sebessége (100 °C/s vs. 2000 °C/s) közvetlenül determinálja a kapott makropórusok méretét és a térfogatot (3-4 cm<sup>3</sup>/g).

# Liofilizálás és kriogélképzés

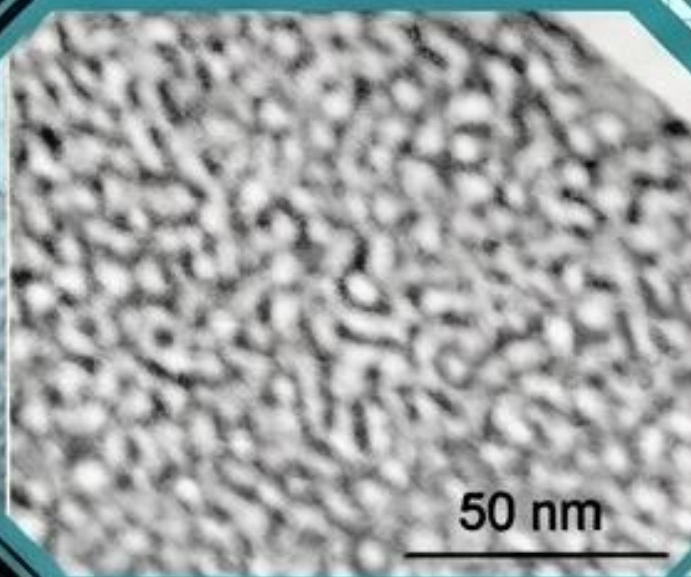
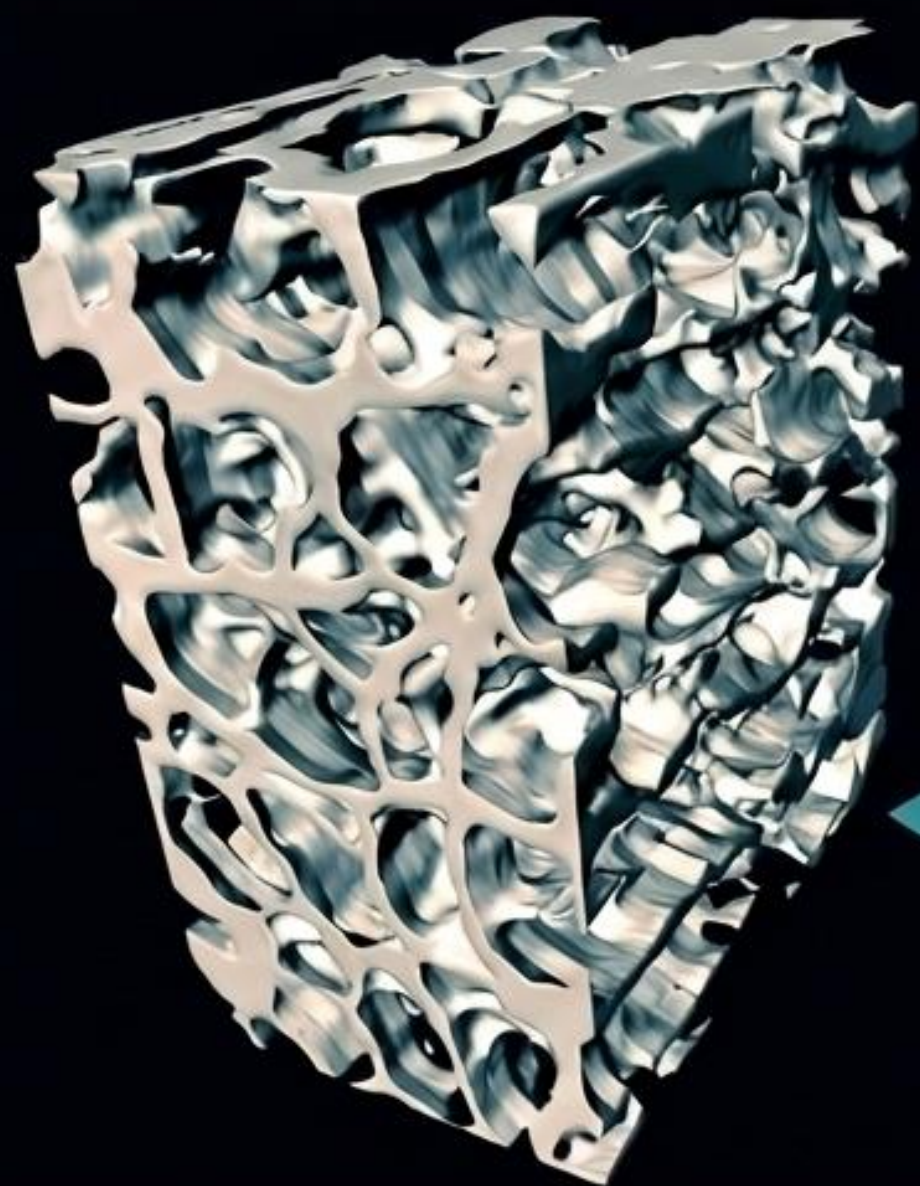
- A 3D hidrogél fagyasztása során kialakuló oldószerkristályok szublimációja adja a porozitást.
- Probléma: A gél térhálója a jégkristályok növekedése miatt széttöredezhet (granulátumok képződnek).
- Megoldás: Cellulózszálas mátrixba ágyazás a liofilizálás után a réteg folytonossága érdekében.



Töredezettségi különbség szál-erősítés hatására

A rendszer kettős, hierarchikus pórusszerkezete biztosítja a 70% körüli extrém porozitást.

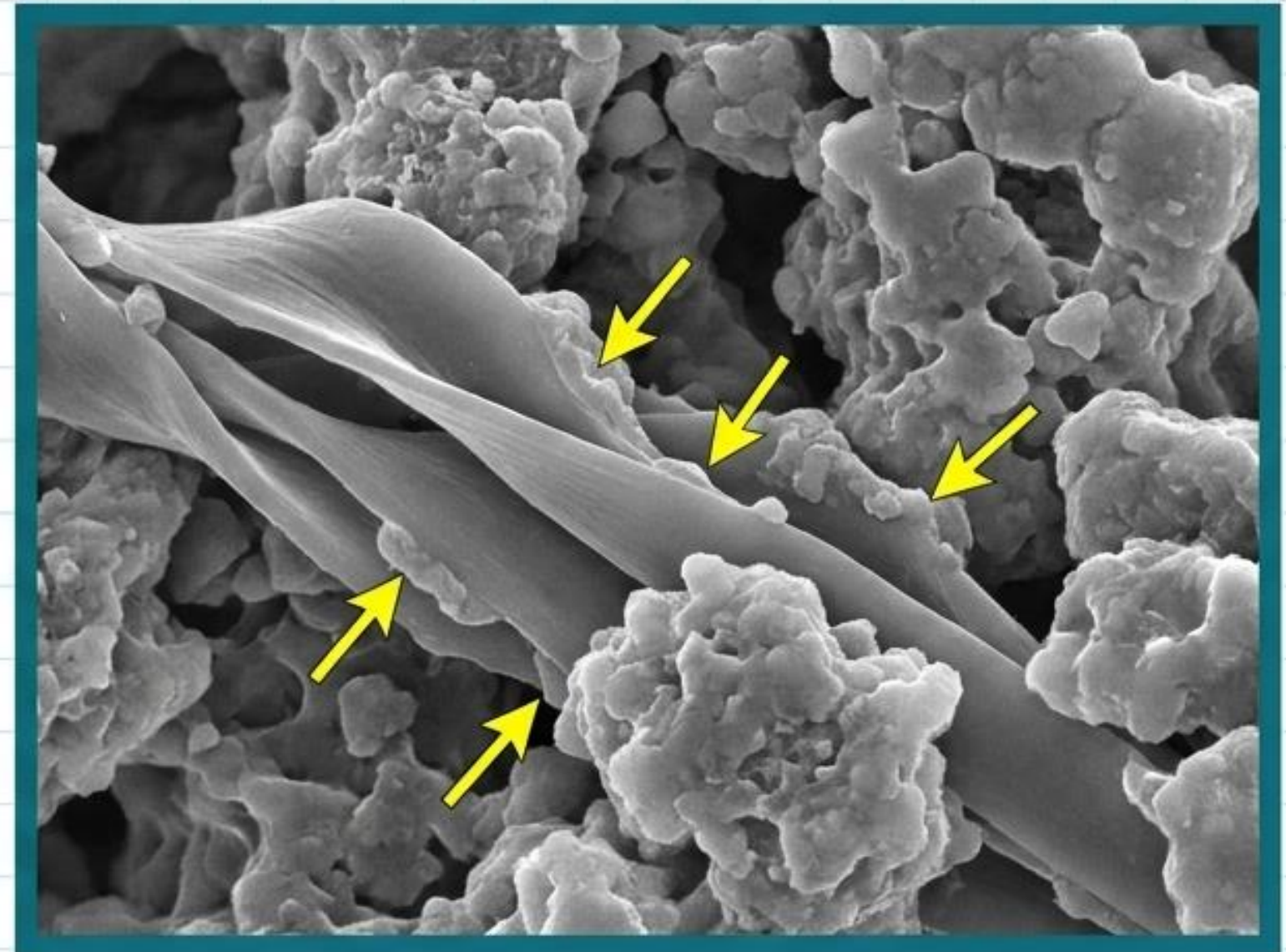
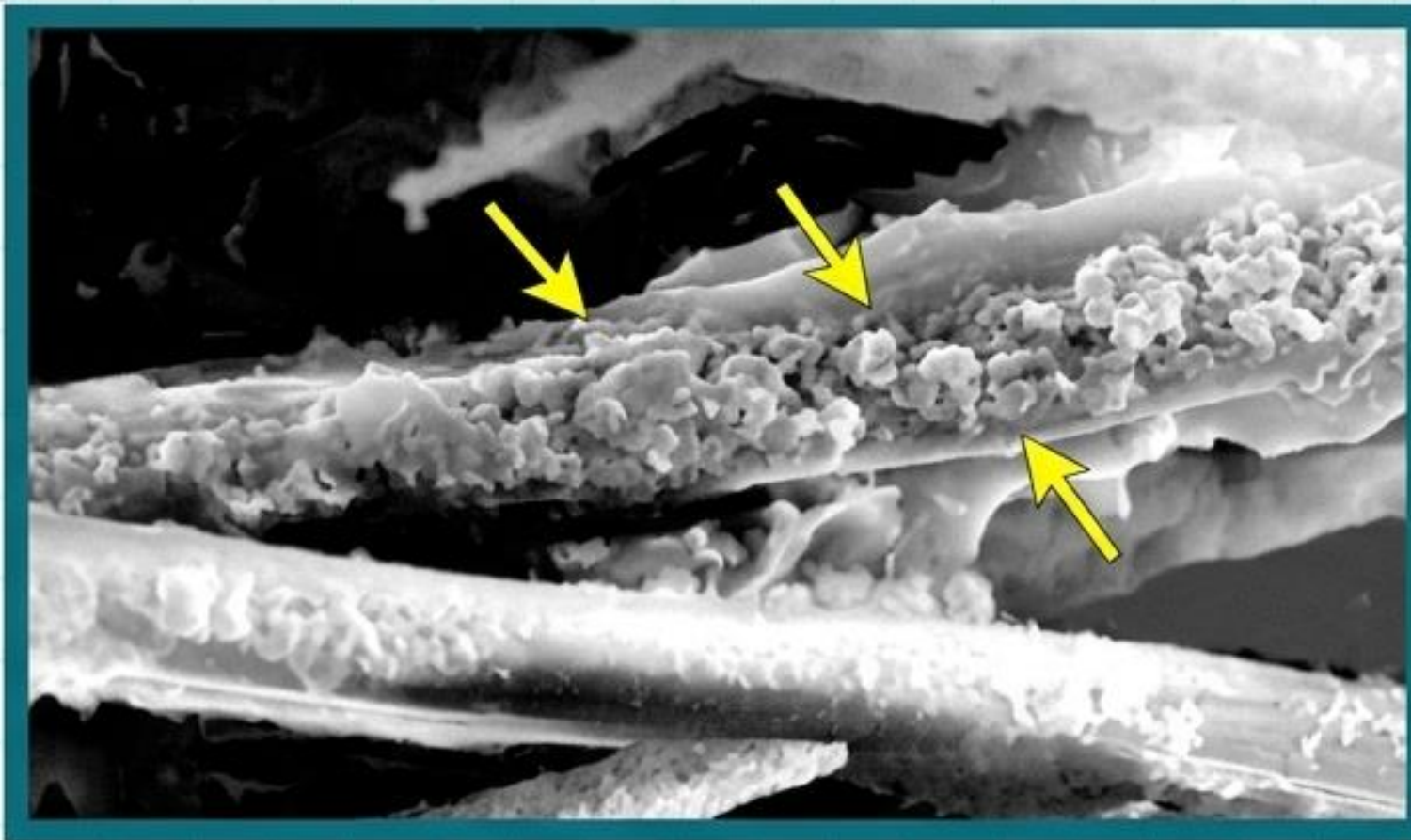
## Hierarchikus pórusrendszerek



- **Makropórusok:** 2-20  $\mu\text{m}$  átmérőjű, nyitott, anizotróp, kollonnás elrendezésű csatornák (3D SEM).
- **Nanopórusok:** 7-9 nm átmérőjű, a makropórusok falaiba zárt üregek (TEM).
- A kollonnás szerkezet váltja fel a szervesetlen oxidokra jellemző hagyományos lamelláris szerkezetet.

A liofilizált  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kriogél szemcsék ( $< 250 \mu\text{m}$ ) és a viszkózsálak folytonos, flexibilis réteget képeznek.

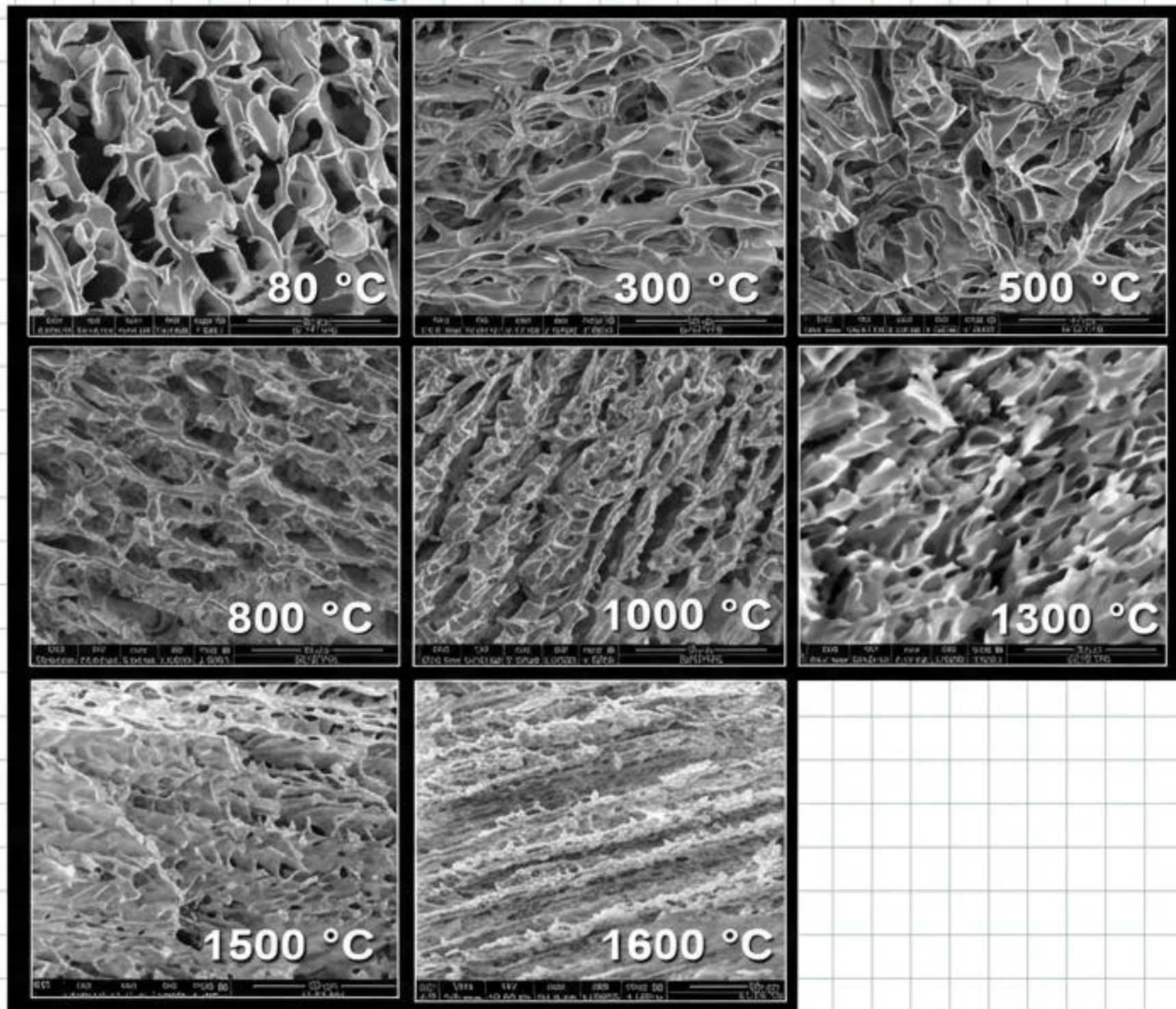
## $\text{Al}_2\text{O}_3$ kriogélek szerkezete és kompozitálás



- A **cellulózsálak** (10-25  $\mu\text{m}$ ) a térhálóba ágyazódnak, megakadályozva a kerámiaszemcsék szétesését.
- **Infravörös spektroszkópia** bizonyítja a **másodrendű kötések** (hidrogénkötések, van der Waals) jelenlétét.
- **Eredmény:** Csökkent összenyomási ellenállás, de drasztikusan javult rugalmasság és réteggépző képesség.

**Világújdonság: Az általunk kifejlesztett szol-gél eljárással a makropórusos szerkezet 1600 °C-on sem omlik össze.**

## Extrém magas hőmérsékleti stabilitás

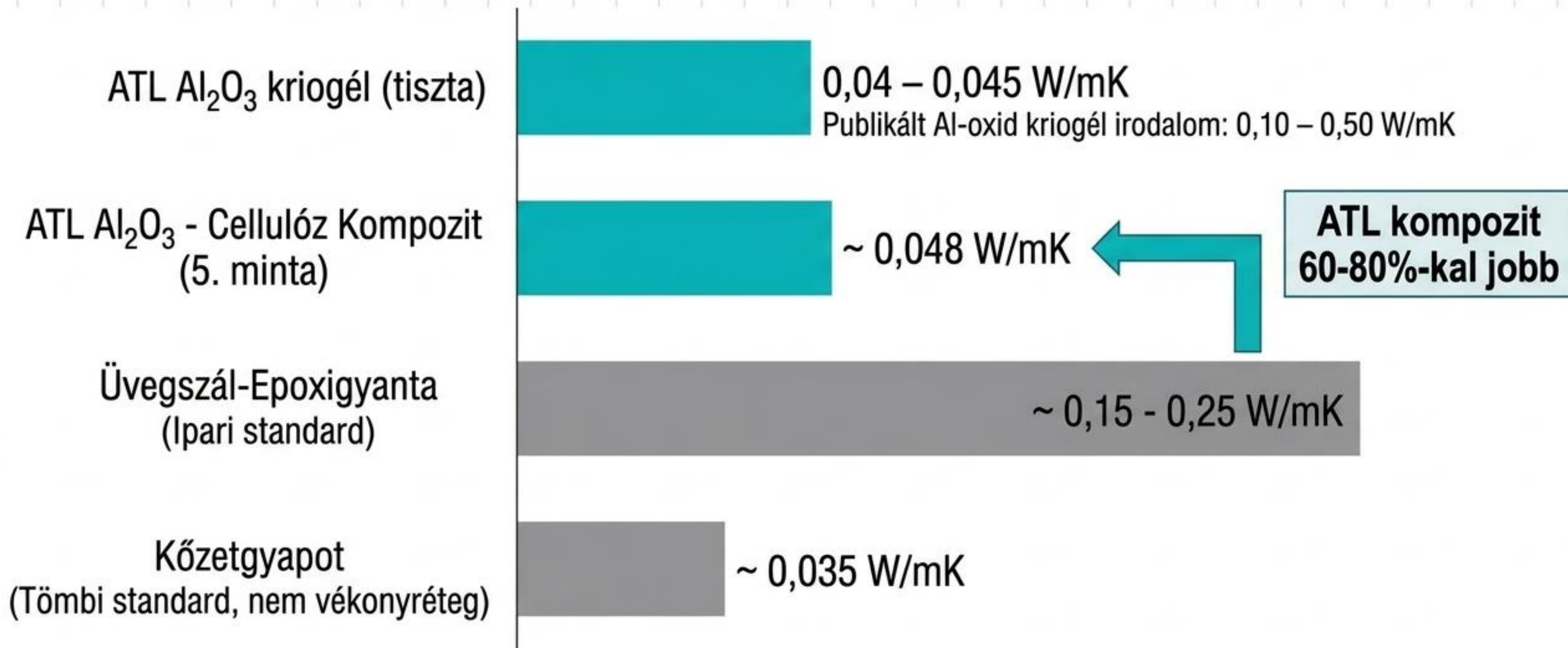


### Megfigyelések:

- Célirányos hőkezelési kísérletsorozat 80 °C-tól 1600 °C-ig.
- Látható, hogy az  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  kristályosodás ellenére a pórusfalak **átrendeződnek**, de a **hierarchikus hálózat folytonos** marad.
- A kollonnás szerkezet ellenáll a termikus zsugorodás feszültségeinek.

Kompozitunk 0,04 W/mK hővezetési tényezővel rendelkezik, ami nagyságrendekkel felülmúlja a hagyományos üvegszál-epoxi rendszereket.

## Hővezetési tulajdonságok és eredmények



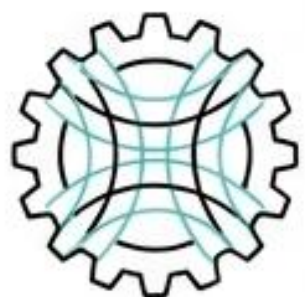
## Ipari követelmények



Kritikus hőmérsékleti tartomány:  
250–350 °C stabil üzem

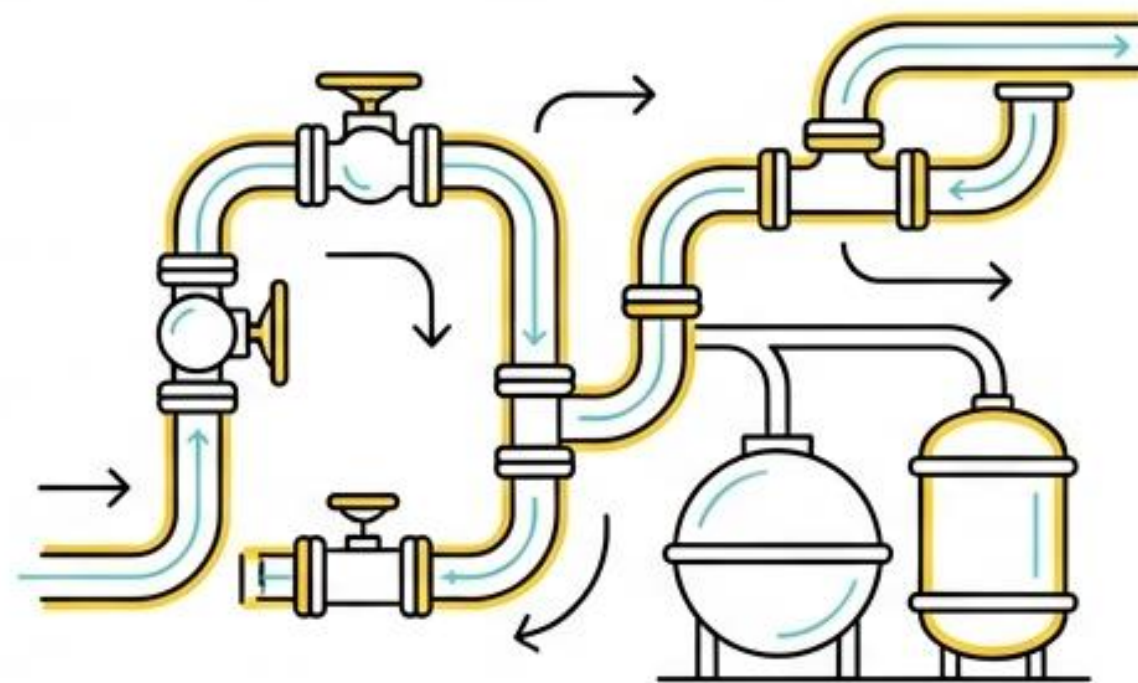


Kiváló hővezető-képességi ellenállás



Rugalmasság és mechanikai stabilitás

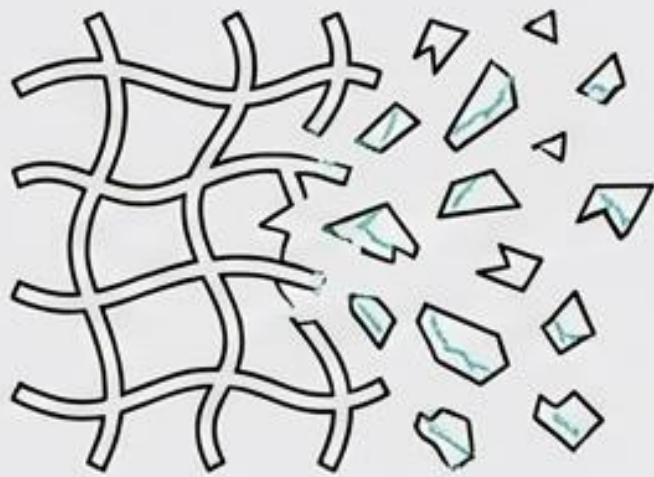
## Alkalmazási spektrum



Geometriafüggetlen bevonhatóság:  
Komplex, nem sík felületek egybefüggő,  
törésmentes szigetelése vékonyréteggént.

**A cél egy olyan rendszer, amely egyesíti a kerámiák hőállóságát a polimerek flexibilitásával.**

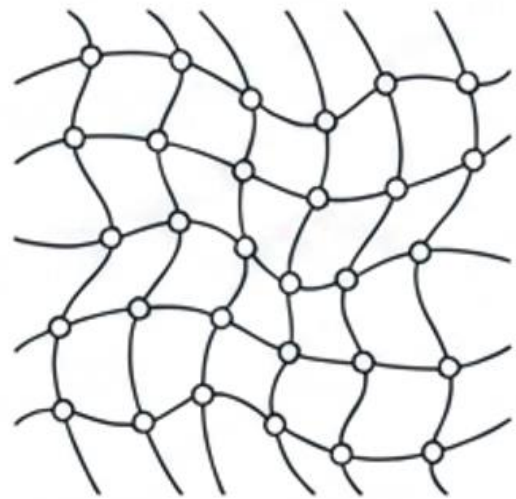
Fagyasztva szárítás  
(liofilizálás)  
következménye:  
A gél térhálója az  
oldószerkristályok miatt  
széttöredezik.



1–2 mm-től 1–2 cm-ig  
terjedő granulátumok és  
pelyhek keletkeznek.

Egybefüggő, rugalmas  
vékonyréteg kialakítására  
önmagukban  
alkalmatlanok.

**Hogyan integráljuk  
a kiválóan szigetelő  
kerámiaszemcséket  
egy folytonos,  
teherhordó fázisba  
hővesztés nélkül?**



**ELSŐDLEGES FÁZIS:**  
Cellulóz mátrix

Rugalmasság, folytonosság,  
alacsony hővezetés)

**SZEKUNDER FÁZIS:**  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kriogél

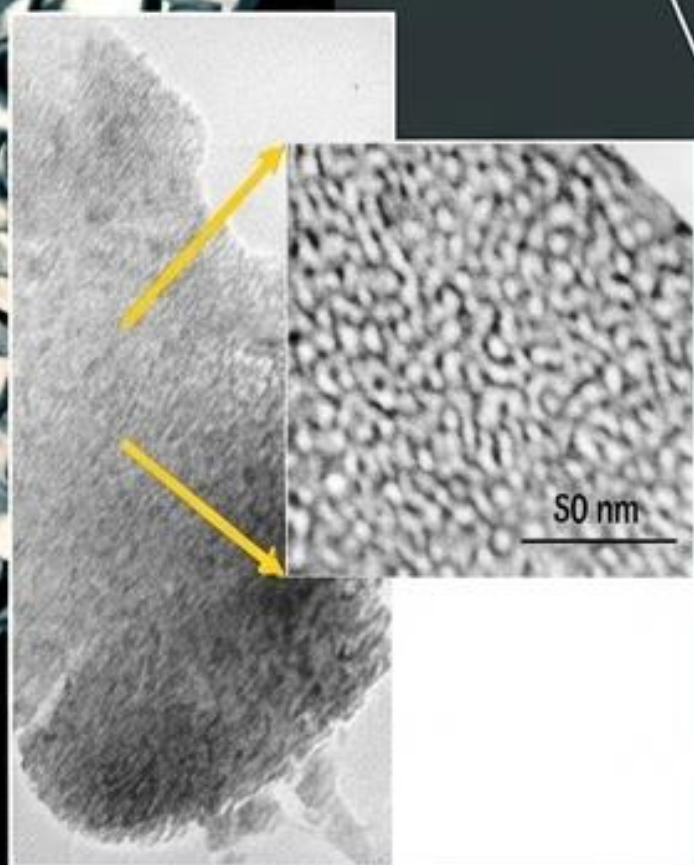
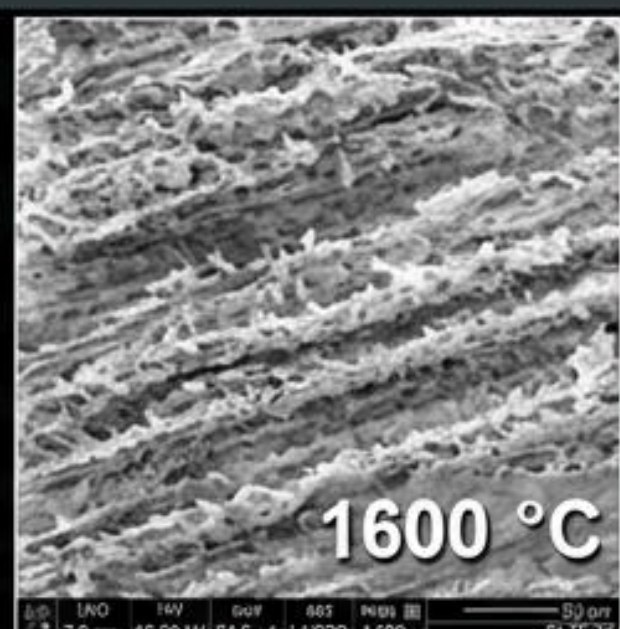
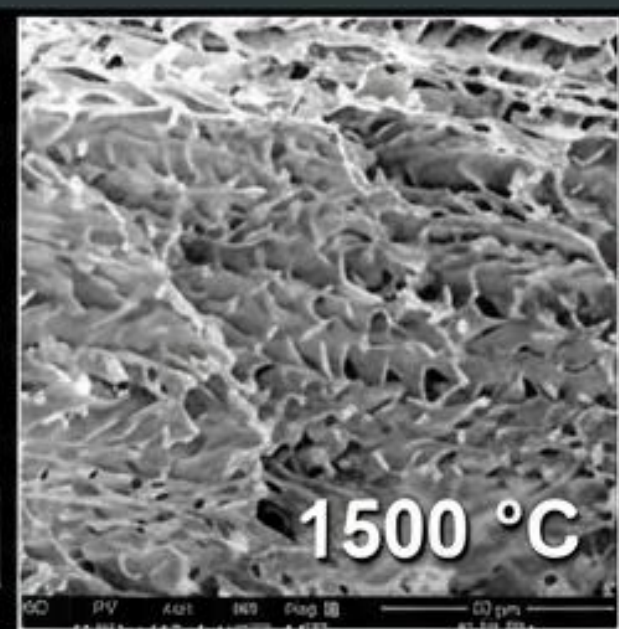
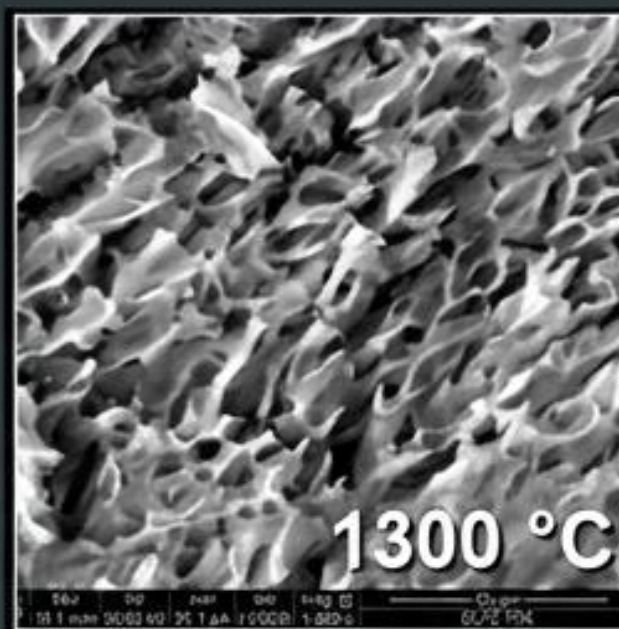
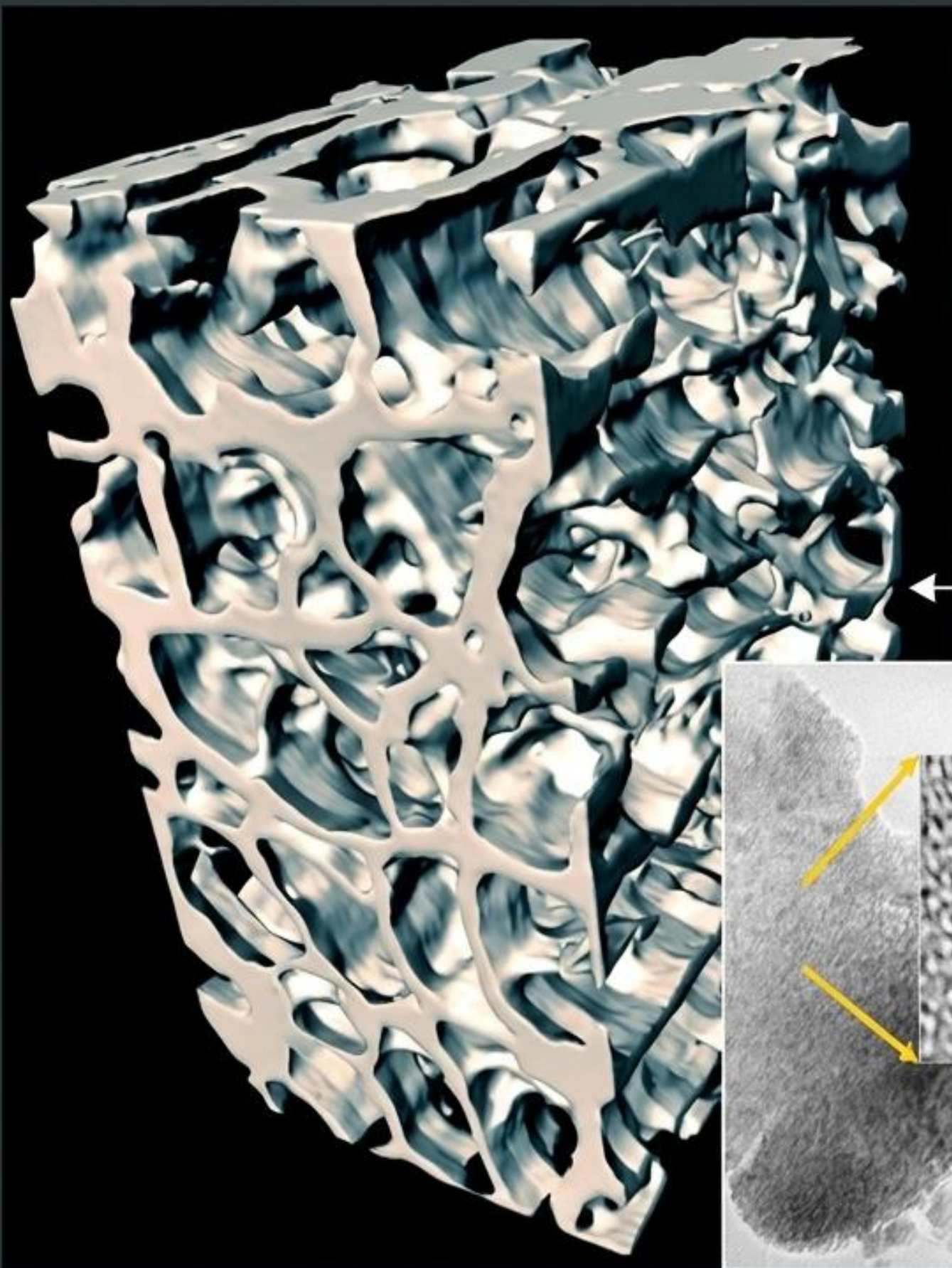
(Extrém hőállóság,  
nanoméretű porozitás)

**KÖTŐANYAG:**  
Hidroxi-etil-cellulóz / HEC

(Fázisok közötti  
szinergikus tapadás)

**EREDMÉNY:**  
Hőszigetelő,  
rugalmas kompozit  
vékonyréteg.

Szol-gél kémia fúziója természetes makromolekuláris rendszerekkel  
a ridegség kiküszöbölésére.



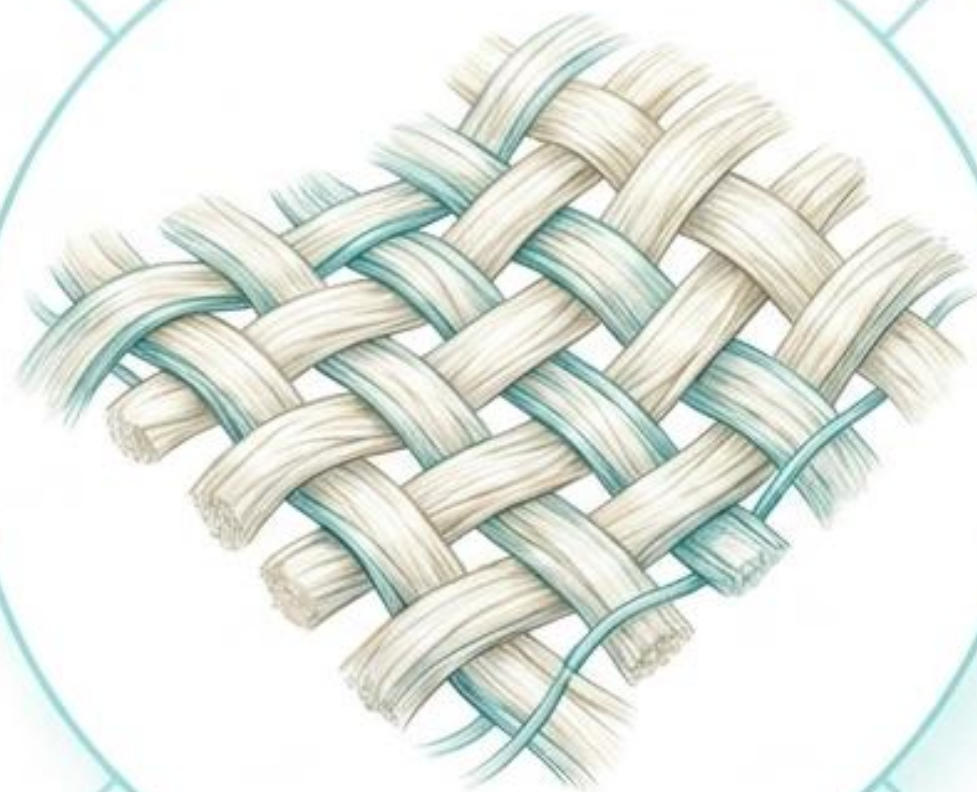
- 1 Hierarchikus pórusrendszer: 2–20  $\mu\text{m}$  anizotróp makropórusok, 7–9 nm zárt nanopórusok.
- 2 Kiemelkedő hőszigetelés: 0,04 – 0,045 W/(m·K) (kedvezőbb a publikált 0,10–0,50 értéknél).
- 3 Termikus stabilitás: A folytonos 3D hálónak köszönhetően a pórusszerkezet 1500 °C felett is megmarad (kiküszöbölve az 1000 °C feletti  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  összeomlást).

## Kiváló szigetelő

A biopolimerek között az egyik legjobb természetes hőszigetelő.

## Hőállóság

Polimerekhez képest kiemelkedő termikus stabilitás.



## Kémiai reaktivitás

Szabad hidroxilcsoportok (-OH) jelenléte, amelyek elősegítik a kötőanyaggal való másodrendű kötések kialakulását.

## Mechanikai szerep

Viszkózuszálak (10-25  $\mu\text{m}$  átmérő) funkciója a kerámiaporok összefogása és a rugalmas deformáció biztosítása.

Fenntartható, olcsó lignocellulóz bázis, amely deformálható, teherhordó hálót képez az oxid-szemcsék körül.

## A kerámia fázis (szemcsés)



- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kriogél örlemény.
- Optimalizált méret: < 250 µm szemcseméret.
- Tulajdonság: Szeparáltan liofilizált és 500°C-on hőkezelt (vízoldhatóság megszüntetése).



## A polimer fázis (szálas)



- Viskózsálak.
- Optimalizált méret: 10-25 µm átmérő, rövid szálhossz.
- Felismerés: Bár a hosszú szálak növelik a szakítószilárdságot, a rövid szálak biztosítják a hőszigetelő vékonyréteghez szükséges homogenitást és sima felhordhatóságot.

A geometriafüggetlen rétegeképzés kritériuma a fázisok geometriai arányainak szigorú kontrollja.

## A mátrix és a szekunder fázis közötti erős összetartó erő biztosítása

	<p><b>Glicerín</b></p> <p>Előnytelen hatás. Rugalmatlanabb végtermék (makroszkopikus ridegség, 19,1 MPa összenyomási modulusz).</p>
	<p><b>Alumínium-acetát</b></p> <p>Nem váltotta be a reményeket. Rossz tapadás a hordozóhoz, porlékony, gyenge rugalmasságú rétegek. Nincs elsőrendű kémiai kötés.</p>
	<p><b>Hidroxi-etil-cellulóz (HEC): ÁTTÖRÉS!</b></p> <p>Minimum 10% (ideálisan 16 m/m%) alkalmazásával. Másodrendű kötések (van der Waals, hidrogénkötés) kialakulása. Kiváló szinergia a komponensek között.</p>

A tiszta komponensek szinergiája (kriogél + cellulóz + HEC) egy önálló, funkcionálisan új hőszigetelő anyagot hozott létre.



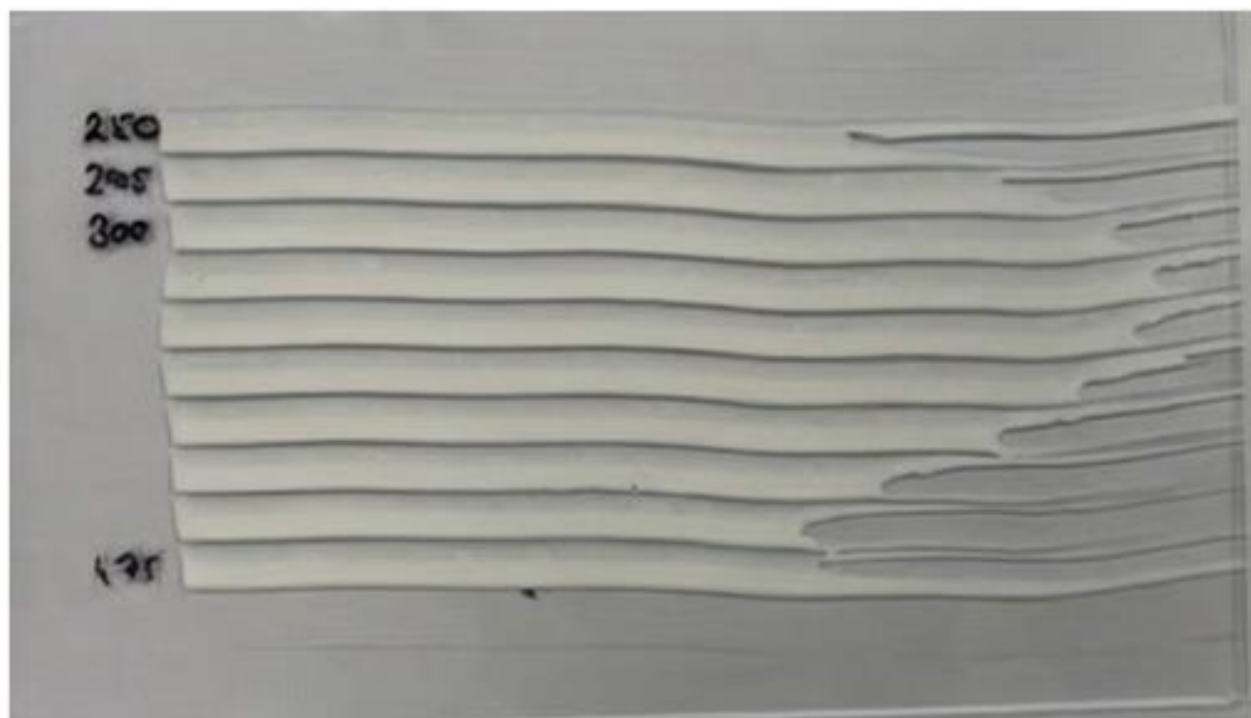


### **Folyadék-dinamikai kihívások:**

Geometriafüggetlen felületeken a nedves fázisú felvitel optimalizálása (kifolyási idő, megfolyás, rogyás tesztelése).

**Kritikus rétegvastagság:** A folyadék-szilárd fázisátmenet kontrollálása a gravitációs megfolyás elkerülése érdekében (pl. 50 μm limit a vékony bevonatoknál).

**Felületkövetés:** Nedves fázisban deformálható, térhálósodás/száradás után repedésmentesen tapadó, stabil filmréteg.



**A bevonat reológiai optimalizálása kulcsfontosságú a csöveken és szelepeken történő ipari alkalmazhatósághoz.**

# A makroszkópos fizikai stabilitást és hővezetést molekuláris és mikrométeres szintű adatokkal hitelesítjük.



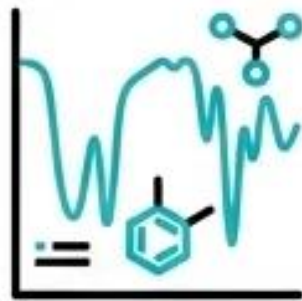
## SEM (Pásztázó Elektronmikroszkópia)

Morfológia, szálak és szemcsék fázishatára, kötőanyag-reakciók feltérképezése.



## DOM (Digitális Optikai Mikroszkópia)

Felületi érdesség, csillogás, gömbszerű töltőanyagok mikroszkopikus eloszlása hordozón.



## FTIR (Infravörös Spektroszkópia)

A kémiai kötések elemzése (Igazolta a primer kémiai kötések hiányát és a másodrendű kötések dominanciáját).



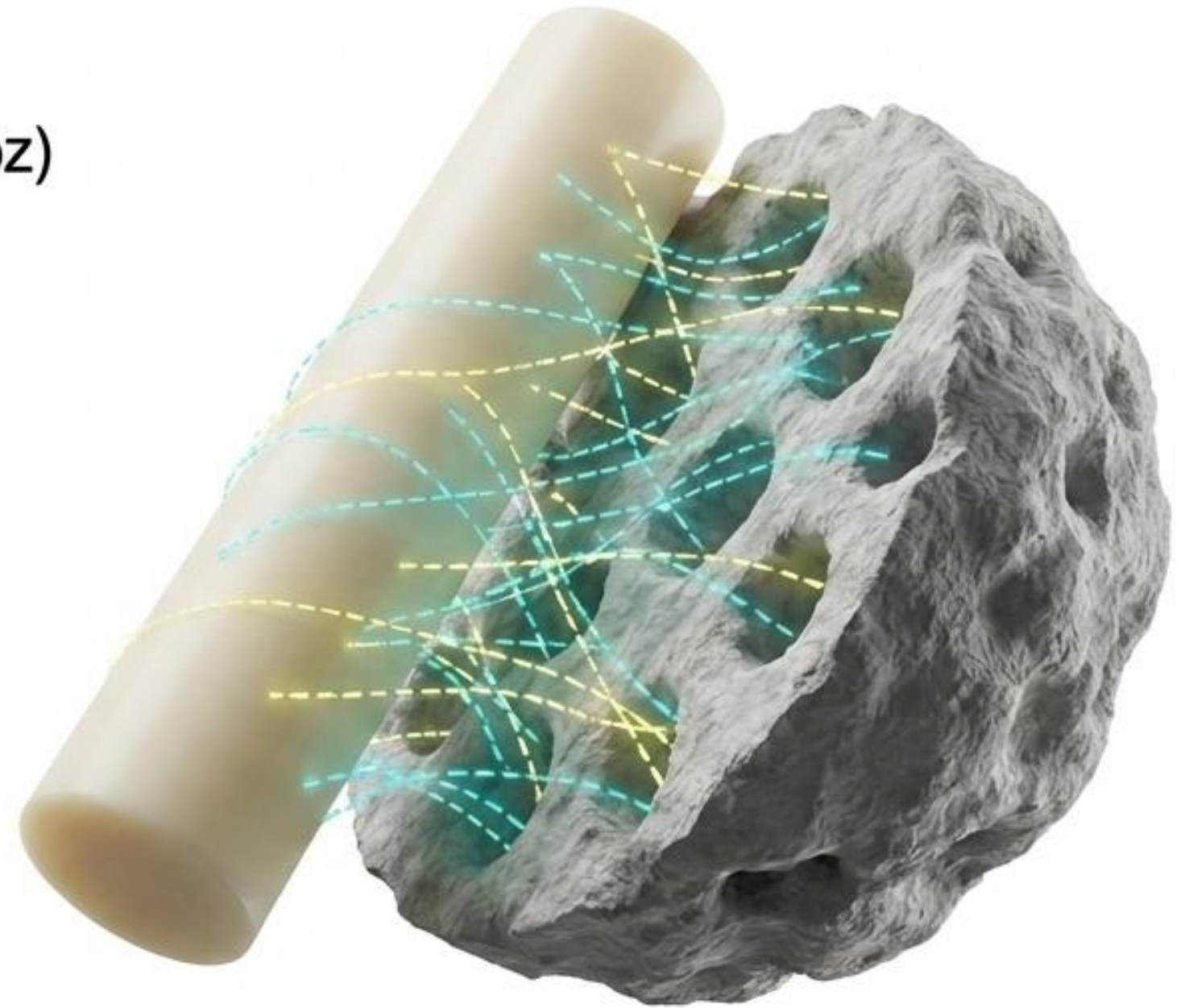
## SAXS (Kiszögű Röntgenszórás)

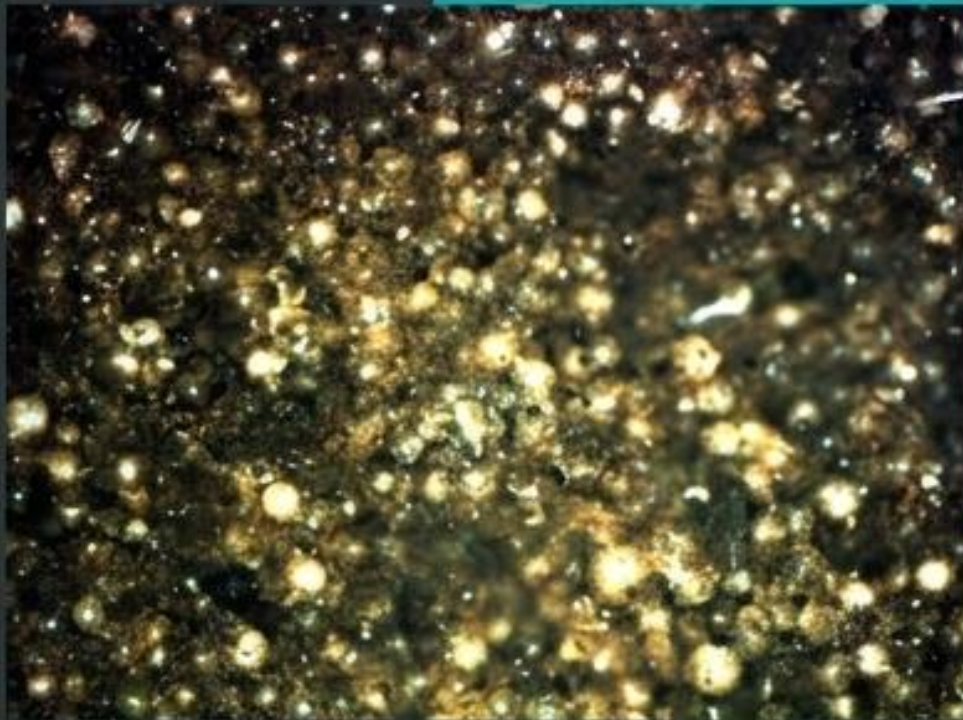
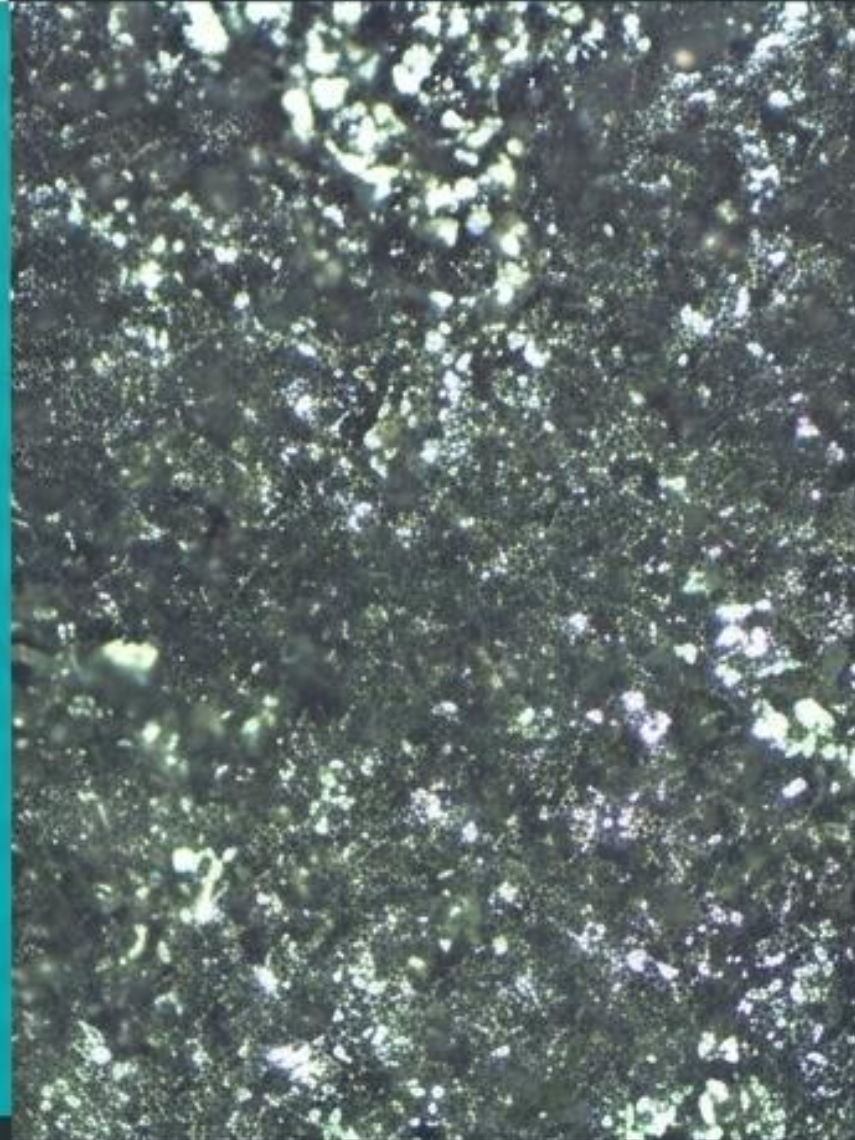
Nanoszerkezet és kötésrendszerek vizsgálata a viszkózus gélfázisokban.

# A fázishatárok kémiája (SEM analízis alapján)

- A vizsgálatok igazolták: A HEC (Hidroxi-etil-cellulóz) nem csak fizikailag keveredik, hanem erőteljesen módosítja (megtámadja) a cellulózszál felszínét.
- A felszabaduló szabad hidroxil (-OH) csoportok reaktív felületet képeznek.
- Erős fizikai/másodrendű (H-kötés, van der Waals) hálózat jön létre a cellulózszálak és az  $Al_2O_3$  kerámia pórusai között.

**Mechanikai következmény:** A fázisok közötti szétválás (szeparáció) megszűnik, a szálak átveszik a terhelést a kerámiától.





**Felületi morfológia:** A gömbszerű töltőanyagok egyenletes mikroszkopikus eloszlása a polimer mátrixban.

**Érdesség és csillogás:** A hordozóra felvitt vékonyrétegeknél megfigyelhető fáziskülönbségek és a hőszugárzást befolyásoló felületi mikro-egyenetlenségek.

**Rétegstabilitás:** Bizonyíték az egybefüggő, szakadásmentes bevonatképződésre fém szubsztrátumokon.

## Felső Struktúra (Makroszint)

Optimalizált reológia rövid szálakkal  
-> Geometriafüggetlen, homogén vékonyréteg bevonat.

## Köztes Struktúra (Mikroszint)

HEC által aktivált viszkózuszálak + oxid szemcsék  
-> Szívós, rugalmas mátrix, amely nem törik.

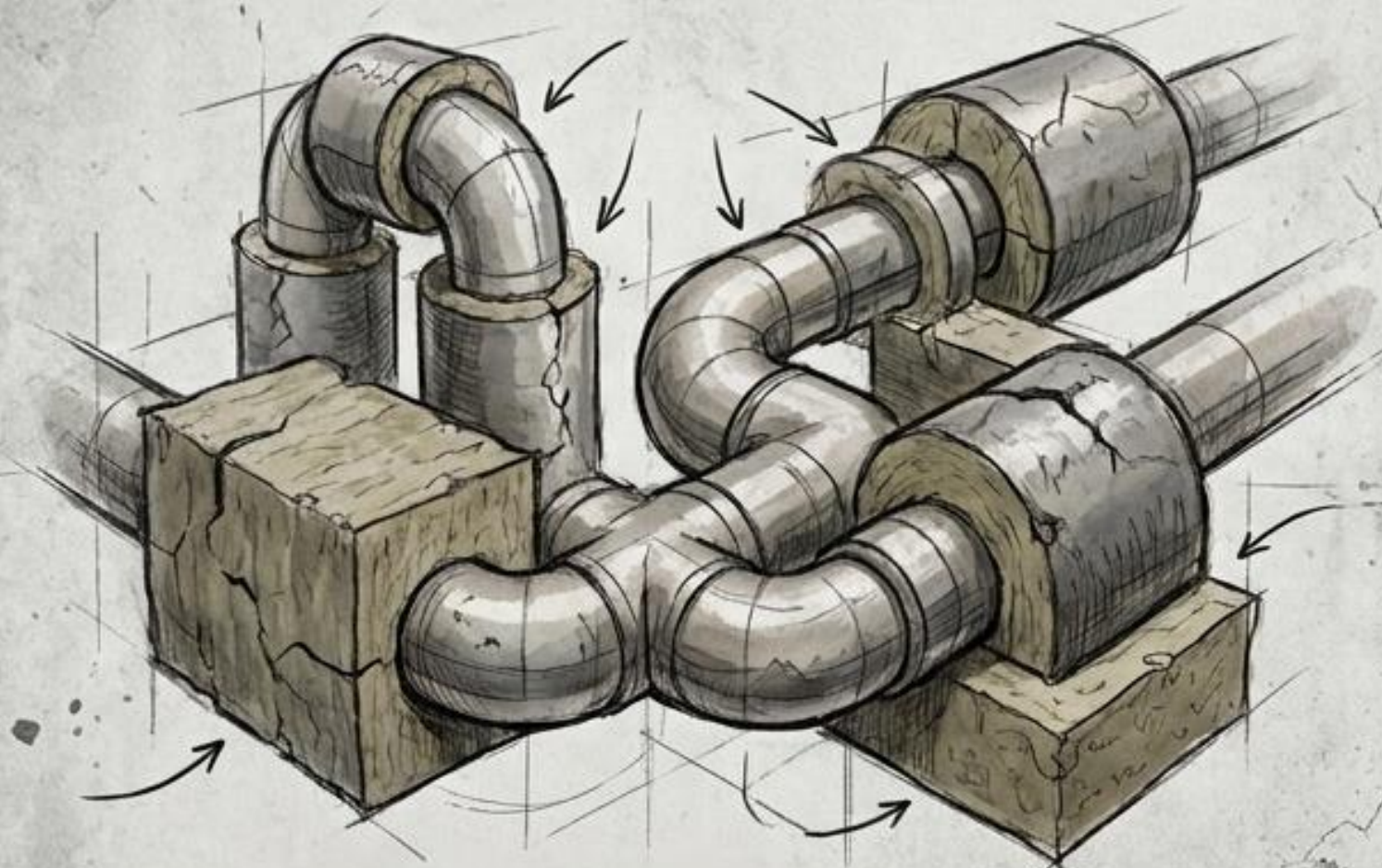
## Mélystruktúra (Nanoszint)

Zárt kollonnás pórusrendszer az Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ban -> Kiváló  
(0,04 W/mK) hőszigetelő tulajdonság.

**A Végső Eredmény:** A kutatás sikeresen feloldotta a kerámiák ridegségének problémáját, megteremtve egy 250–350 °C-ig stabil, ipari szigetelőanyag alapjait.

# A hővezetés problémája: Ipari korlátok és geometriai kihívások

## Hagyományos tömbi szigetelők



- Nagy térfogat és tömeg
- Merev struktúra
- Komplex geometriák bevonása nehézkes

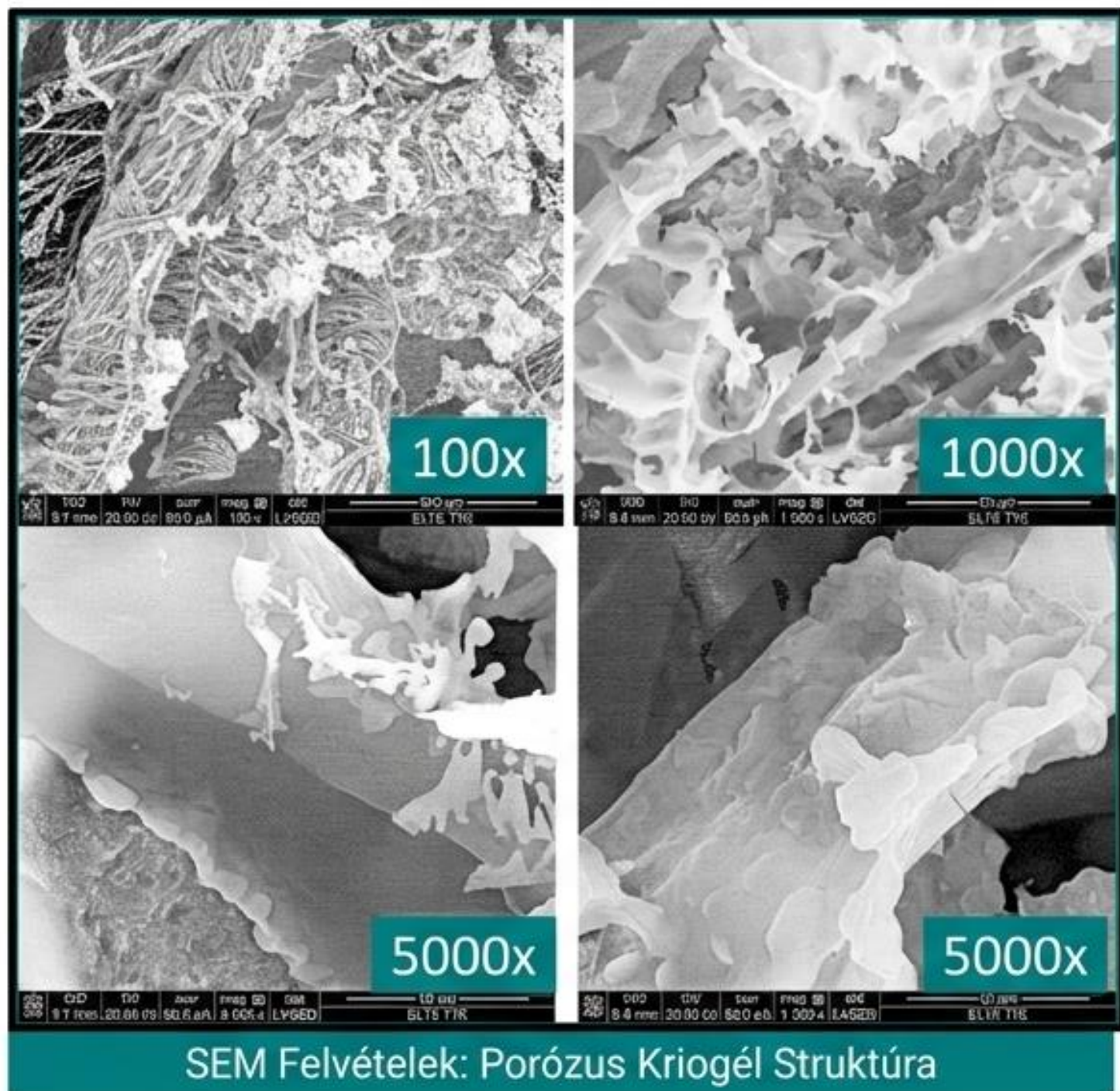
## Új generációs vékonyrétegek



- Vékony (1 mm nagyságrendű) és ultrakönnyű
- Flexibilis, felületkövető profil
- Azonos vagy jobb hőszigetelő képesség ( $\lambda$ )

**Szakmai üzenet:** A modern ipari kihívások vékony, flexibilis és geometriafüggetlen hőszigetelő technológiákat követelnek meg.

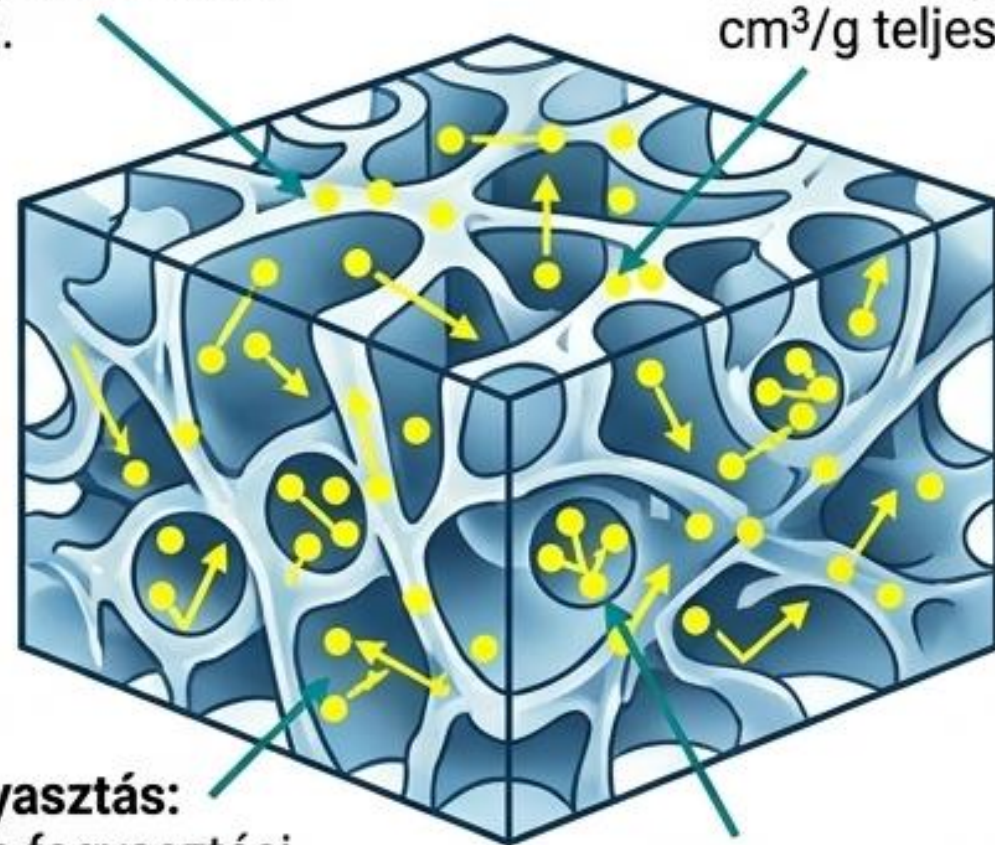
# Hőtranszport porózus rendszerekben: A kriogél struktúra



## A hőtranszport fizikája: Knudsen-effektus és Nanopórusok

1. **3D Hálózat:** Vákuumos fagyasztva szárítással (liofilizálással) létrehozott nanostruktúra.

2. **Gyors Fagyasztás:**  $\sim 2000$   $^{\circ}\text{C}/\text{s}^{\text{ec}}$  sebesség eredménye az 56-73% porozitás és 3-4  $\text{cm}^3/\text{g}$  teljes pórustérfogat.



2. **Gyors Fagyasztás:**  $\sim 2000$   $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  fagyasztási sebesség eredménye az 56-73% narporozitás és 3-4  $\text{cm}^3/\text{g}$  teljes pórustérfogat.

3. **Nanopórusok (40 nm):** A pórusméret kisebb, mint a levegő molekuláinak szabad úthossza. A molekuláris szintű hőátadás (Knudsen-effektus) ezáltal radikálisan csökken.

**Szakmai üzenet:** A fagyasztva szárítással létrehozott 3D-s kriogél nanopórusok alapvetően gátolják a molekuláris szintű hőátadást.

# Vezetés, konvekció és sugárzás a kompozitokban

## 1. Hővezetés (Szilárd fázis)



A nanostrukturált kriogél váz extrém hosszú és vékony hővezetési utakat képez, minimalizálva a szilárd fázisú vezetést.

## 2. Konvekció (Gáz fázis)



A 40 nm-es pórusokban a levegő gázmolekulái csapdába esnek, a makroszkopikus gázáramlás lehetetlenné válik.

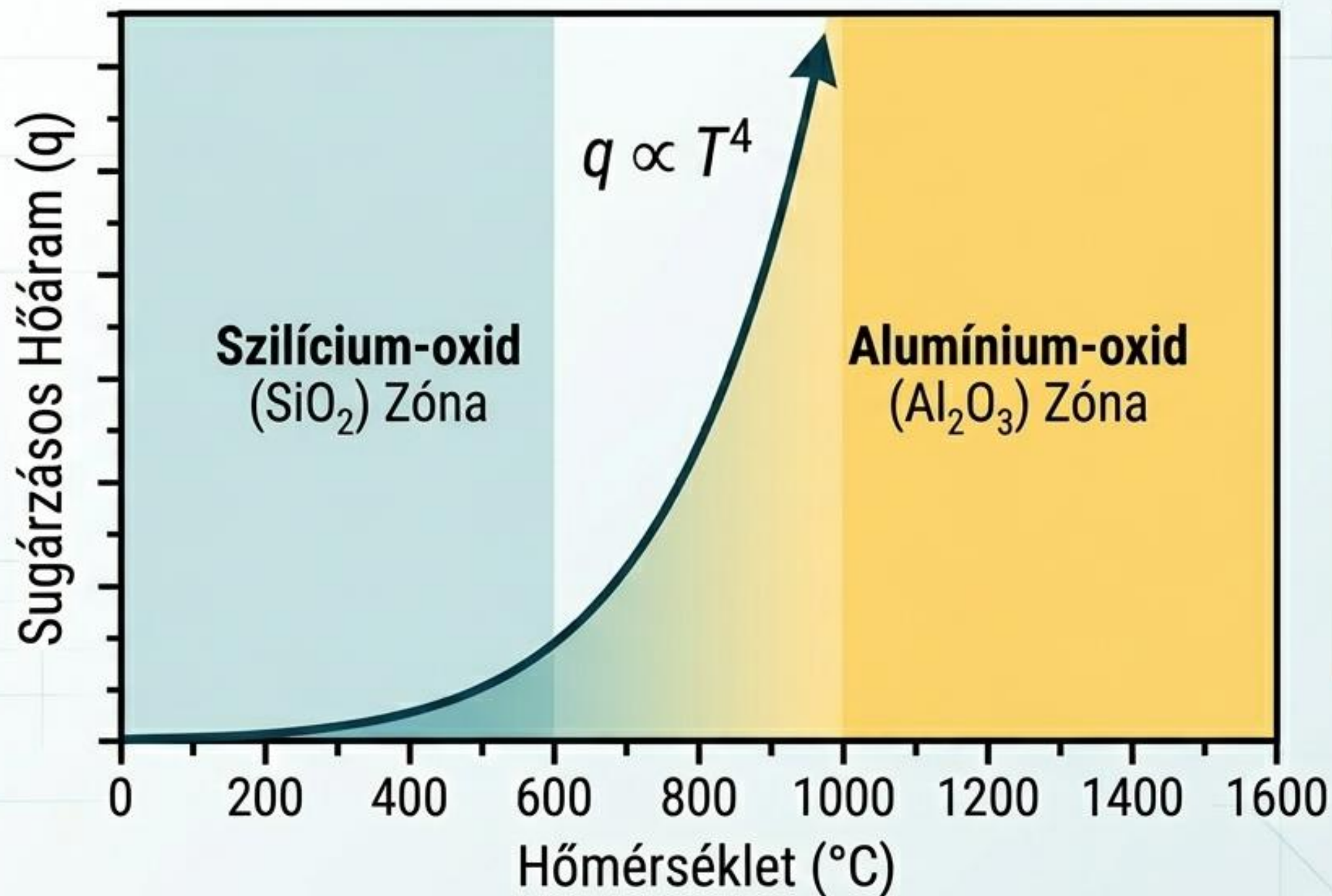
## 3. Hősugárzás (Fotontranszport)



Magas hőmérsékleten a sugárzás áthaladna az anyagon; ezt az oxidok ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) optikai sűrűsége blokkolja.

**Szakmai üzenet: A hatékony vékonyréteg-szigeteléshez mindhárom hőtranszport-mechanizmust egyidejűleg kell minimalizálni a kompozit struktúrában.**

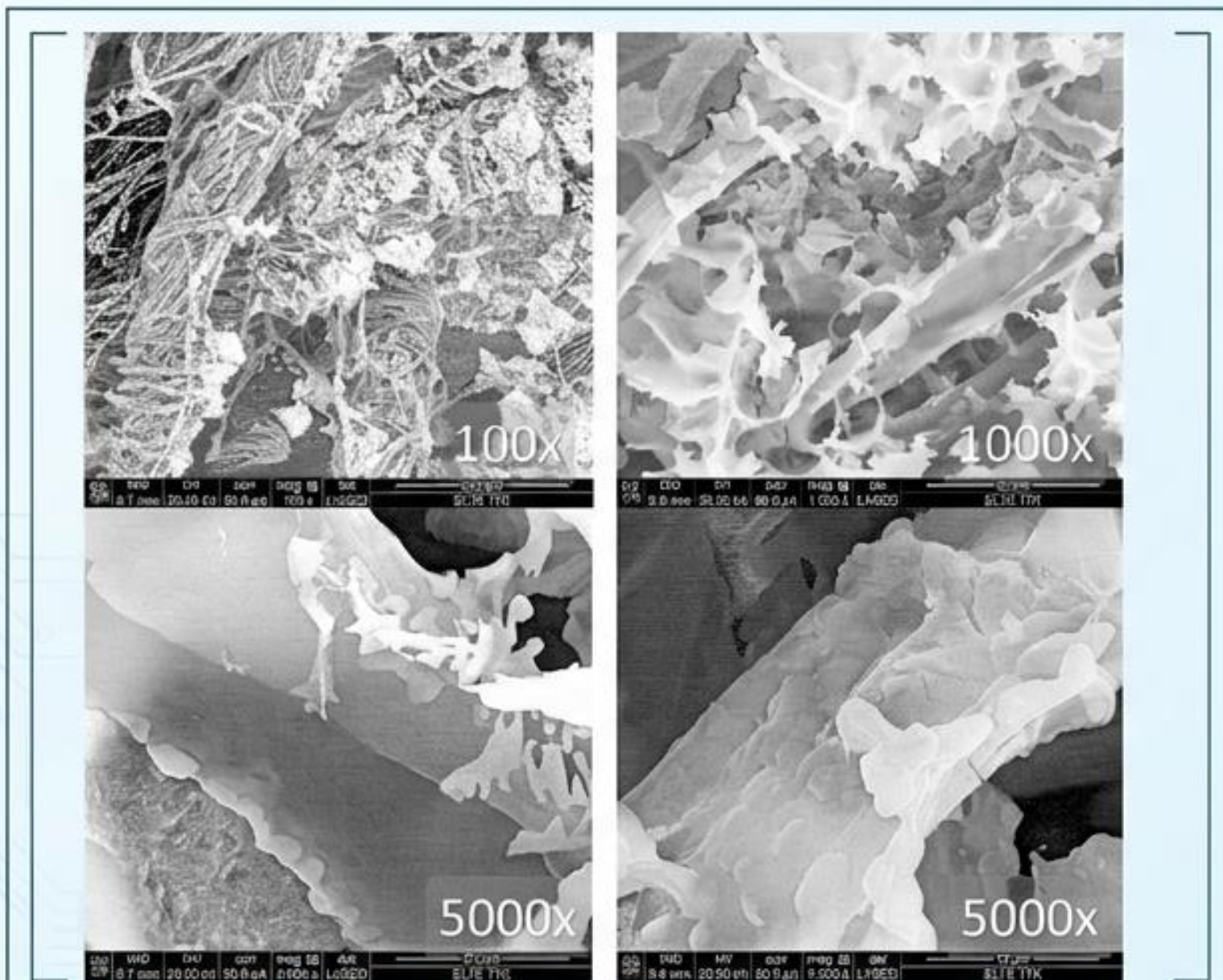
# A sugárzási hőtranszport dominanciája



- Alacsony hőmérsékleten a vezetés és konvekció a primer probléma.
- 500°C felett a hőszugárzás exponenciálisan növekszik.
- Extrém hőmérsékleten (1000°C - 1600°C) kizárólag az  $\text{Al}_2\text{O}_3$  képes az optikai és szerkezeti védelemre.

**Szakmai üzenet:** Magas hőmérsékleten a sugárzásos hőátadás válik dominánssá, ami hőtartomány-specifikus oxidok alkalmazását teszi szükségessé.

# Szilícium-oxid ( $\text{SiO}_2$ ) kompozitok: Optimalizálás $600^\circ\text{C}$ alatt



**Szakmai üzenet:** A szilika kriogél kompozitok kiváló szigetelést biztosítanak alacsonyabb hőtartományokban, vékonyréteggént vetekedve a kereskedelmi kőzetgyapotokkal.

**Szerkezet:**

$\text{SiO}_2$  kriogél beágyazása szövött cellulóz textil mátrixba.

**Hőmérsékleti határ:**

Maximum  $500\text{-}600^\circ\text{C}$ -ig alkalmazható.

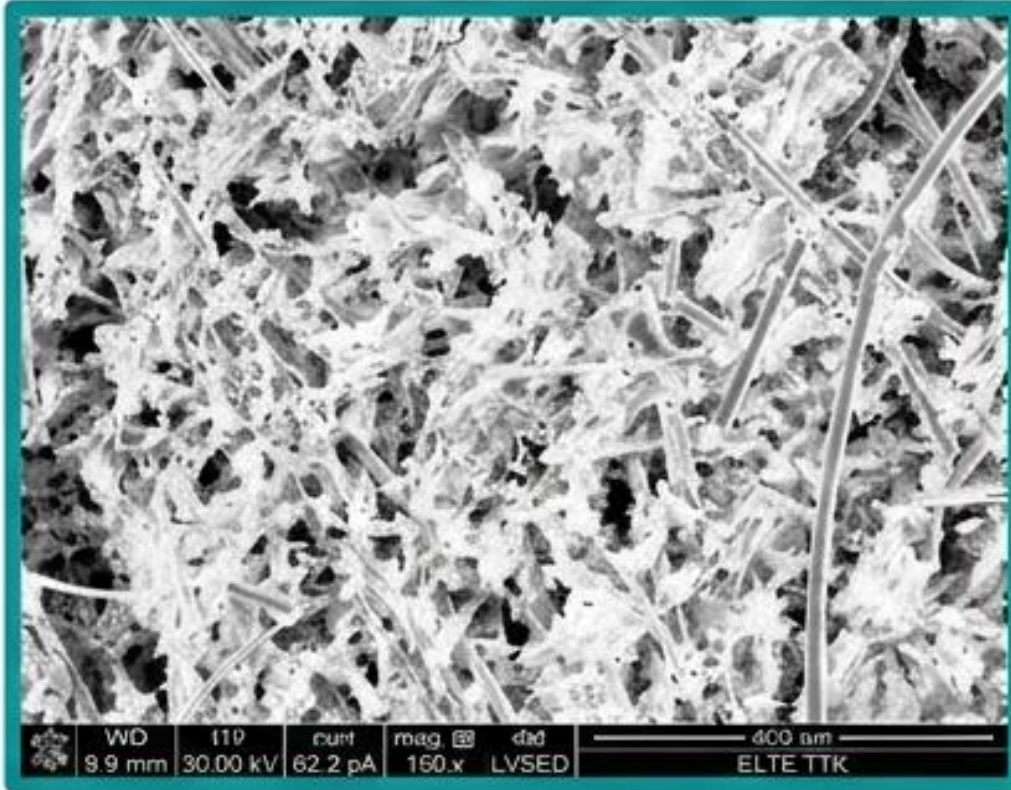
**Kritikus hővezetőképesség ( $\lambda$ ):**

**$0,042 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$**

Ekvivalens a standard  $0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  tömbi Rockwool kőzetgyapottal, de 1 mm-es vékonyréteggént.

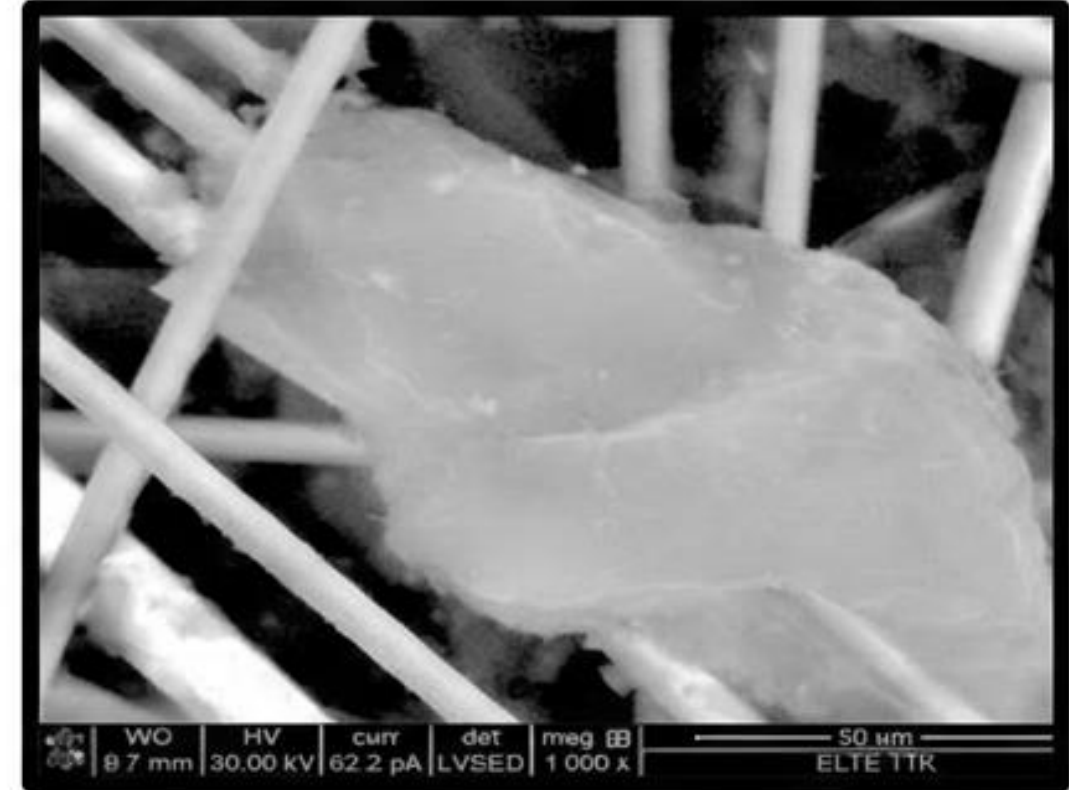
# Alumínium-oxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) rendszerek: Védelem extrém hőtartományban

ATL  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Kompozit (Új fejlesztés)



- **Mátrix:** 10  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  szálak és 20-30  $\mu\text{m}$  pórozus kriogél
- **Hőmérsékleti limit:** 1500 - 1600 °C
- **Hővezetőképesség:** 0,040 W/(m·K)

Ipari Viszonyítás: NASA Spaceloft Aerogél



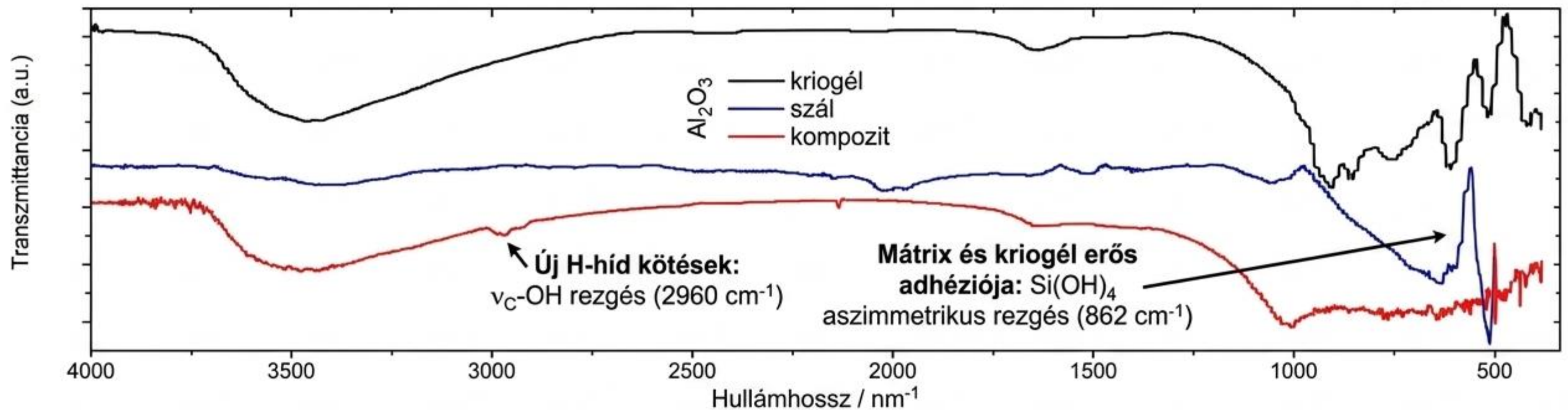
- **Mátrix:** Szilika / szerves polimerszál
- **Hőmérsékleti limit:** Maximum 200 °C
- **Hővezetőképesség:** 0,015 - 0,023 W/(m·K)

**Szakmai üzenet:** Az alumínium-oxid alapú kompozitok extrém hőmérsékleten (1500°C felett) is megőrzik szerkezeti integritásukat és tömbi szintű szigetelőképességüket.

# A cellulóz és a HEC szerepe a szerkezeti integritásban

Összetétel	Porzási veszteség (m/m %)
Szilika + viszkózsál	2,48 %
Szilika + viszkózsál + HEC + 5M NaOH/Karbamid	<b>0,010 %</b>

Drasztikus adhézió növekedés és rugalmasság a tiszta kerámia pelyhekkel szemben.



**Szakmai üzenet:** A cellulózsálak és a HEC adalékanyag másodrendű kémiai kötésekkel biztosítják a hálózat rugalmasságát és a kritikus réteg-adhéziót.



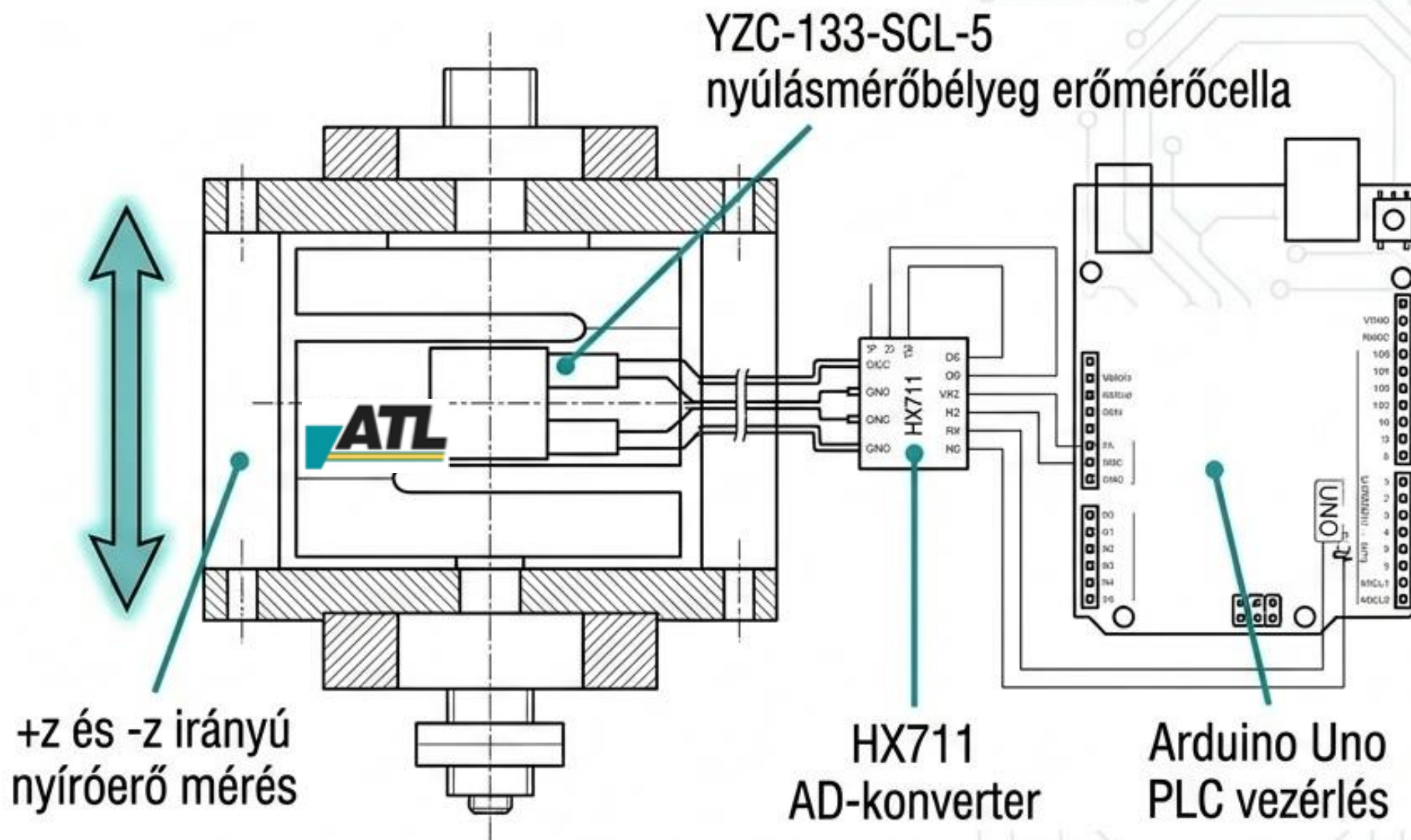
# Saját fejlesztésű precíziós mérőcella és módszertan

## Kompakt és dedikált hardver:

Kifejezetten nanostrukturált vékonyrétegek felülettől független termodinamikai és adhéziós mérésére.

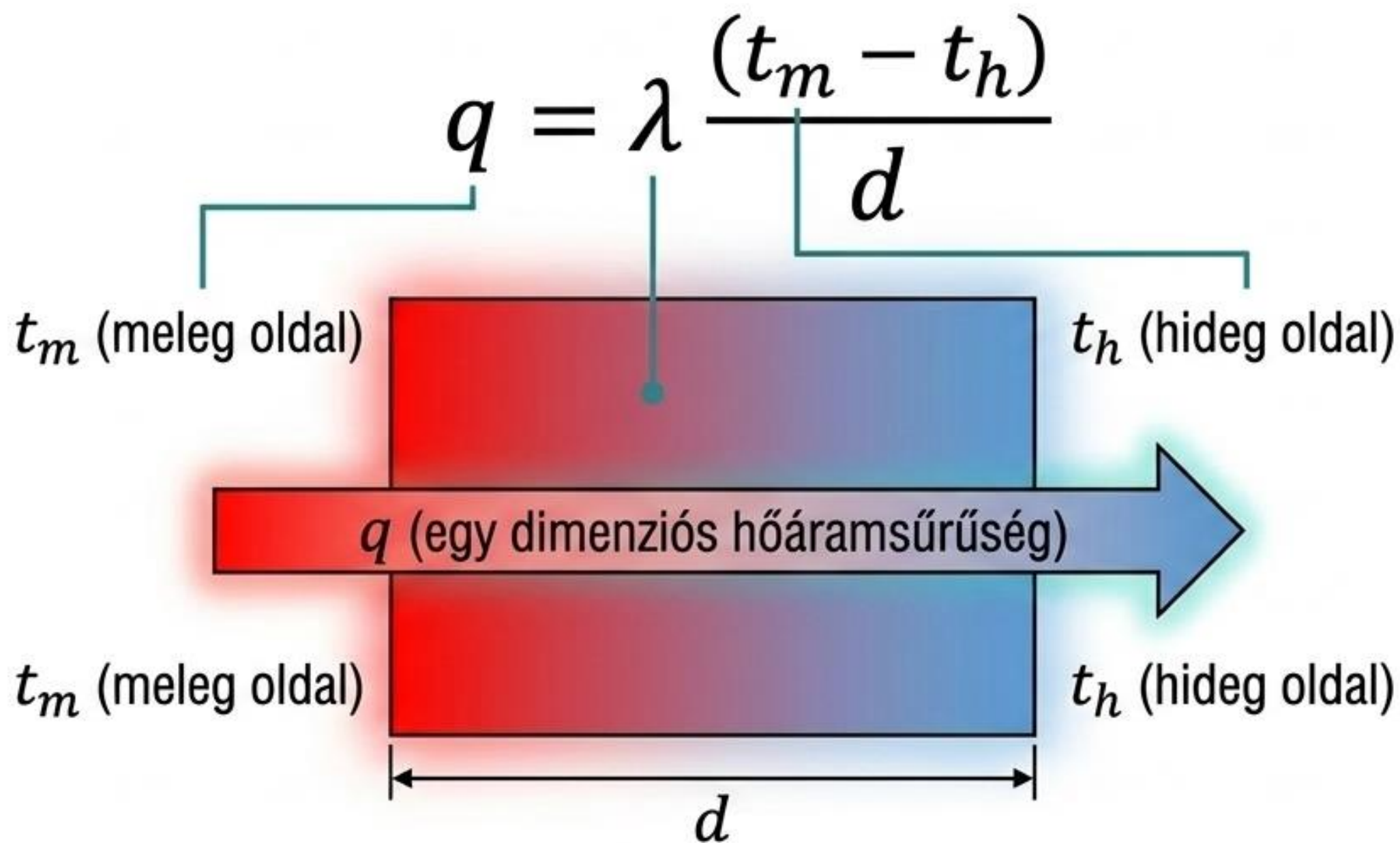
## Képességek:

Folyamatos analóg jelátalakítás (feszültség → Erő), amely nagy pontosságú, valós idejű hőáramlás rögzítést tesz lehetővé.



**Szakmai üzenet:** Egyedi fejlesztésű mérőcellát és PLC-vezérelt módszertant alkottunk a vékonyrétegek valós idejű, nagy pontosságú vizsgálatára.

# Stacioner mérési koncepció: 1D Hőáramlás



## Szigorú mérési feltétel:

A hőáramlásnak szigorúan egydimenziós állapotban kell lennie a mérési zónában. Ez garantálja, hogy a mért  $\lambda$  érték torzításmentesen, kizárólag a vékonyréteg saját hővezetését tükrözze.

**Szakmai üzenet:** Az állandósult hőtechnikai állapotban az egydimenziós hőáramlás biztosítja a hővezetési tényező ( $\lambda$ ) egzakt meghatározását a vastagság függvényében.

# Instacioner és dinamikus környezeti vizsgálatok

Teljesen stabil réteg acél hordozón.

Enyhe barnulás, bomlás és füstölgés kezdete.

Folyamatok erősödnek, adhézió még kitart.

A felület felpattogzása és végső degradáció.

100°C

400°C

500°C

## Dinamikus páratér teszt (75-80% RH)



**Szakmai üzenet:** A dinamikus tesztek bizonyítják a rétegek valós idejű adaptációját az extrém hő- és pára-sokkokkal szemben, megőrizve reverzibilis szerkezetüket.

# Validációs eredmények: Technológiai áttörés a hővezetésben

Anyag / Technológia	Hővezetőképesség [W/(m·K)]	Kivitel
Üvegszál – epoxigyanta (Ipari kompozit)	0,182 - 0,290	Vastag bevonat
Rockwool kőzetgyapot (Standard tömbi)	0,040	Tömbi szigetelés
<b>ATL SiO<sub>2</sub> – szövött cellulóz kompozit</b>	<b>0,042</b>	<b>Flexibilis Vékonyréteg</b>
<b>ATL Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> szál – kriogél kompozit</b>	<b>0,040</b>	<b>Extrém hőtűrő Vékonyréteg</b>

A nanostrukturált vékonyrétegeink 1 milliméteres vastagság mellett érik el a hatalmas térfogatú építőipari szigetelők fizikai maximumát.

**Szakmai üzenet:** A kifejlesztett vékonyréteg kompozitok (0,040 W/mK) hőszigetelő teljesítménye felülmúlja a standard kompozitokat, és megegyezik a legkiválóbb tömbi szigetelőkével.

# Scale-up: Gyártástechnológia és ipari alkalmazhatóság



## Tapadási (Adhéziós) Validáció és Szubsztrátok



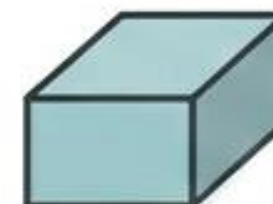
**Normál és Rozsdamentes Acél**  
(Kiváló tapadás)



**Üveg**  
(Erős réteg-hordozó kapcsolat az ISO-2409 teszt alapján)



**Kerámia felületek**



**Polimerek**  
(Gyengébb kötés)

- **Geometriafüggetlenség:** Az 1 mm-es paszta tökéletesen leköveti a legbonyolultabb ipari idomokat és csőrendszereket is félüzemi gyártási szinten.

**Szakmai üzenet:** A technológia méretnövelhető (scale-up), és széleskörűen alkalmazható felületkövető szigetelésként az ipari fémmegmunkálástól az űriparig.

# KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

---

A bemutatott kutatás-fejlesztési eredmények létrejöttét a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatása segítette. Ezúton is köszönjük a projekt megvalósításához nyújtott szakmai és pénzügyi hozzájárulást.



## NKFIH

NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI  
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL  
MAGYARORSZÁG

Köszönöm a figyelmet!

