

# Kísérletek a pókselyem mesterséges előállítására és ipari hasznosítására

Lázár Károly

**Kulcsszavak/Keywords:** Pókselyem, Mesterséges pókselyem, Biosteel, Monster Silk, Dragon Silk, Qmonos, Seevix Spider silk, Artificial spider silk, Biosteel, Monster Silk, Dragon Silk, Qmonos, Seevix

A pókselyem textilipari hasznosítása már régóta foglalkoztatja a textilipar kutatóit. Ez a téma azonban az utóbbi évtizedekben újra és hangsúlyosan előkerült, mert a pókselyem kiváló fizikai és mechanikai tulajdonságai az egyre fontosabbá váló és egyre szélesebb körben alkalmazott műszaki és egészségügyi textiliákban nagyon jól hasznosíthatók lehetnének.

Az első ismert próbálkozás a pókselyem textilipari feldolgozására egy francia tudós, *Francois-Xavier Bon de Saint Hilaire* nevéhez fűződik, aki 1710-ben pókszálakból kesztyűt és harisnyát készített XIV. Lajos számára. A 19. század elején *Raimondo de Termeyer* Napóleon számára készített harisnyát és felesége, Josephine számára sálát, ugyancsak pókselyemből [1].

A pókok tenyésztése igen nagy akadályokba ütközik, mivel a pókok kannibalisztikus állatok, így a pókselyem termelése nagy kolóniákban nem lehetséges. Azt is megállapították, hogy 450 pók egész évi szálhozama volna szükséges 1 méter selyemszövet előállítására. 1900-ban a párizsi világkiállításon bemutattak egy kis vég ilyen szövetet, amihez 25 000 pók száltermelését használták fel [1].

Az Amerikai Természettudományi Múzeumban 2009-ben, a londoni Victoria & Albert Múzeumban 2012-ben mutatták be a világon eddig készült két legnagyobb, kéziszövéssel előállított pókselyem terméket, egy kb. 2 méter hosszú és 1,2 m széles, hosszú rojtokkal készült sálát és egy gazdag mintázatú, 1,5 kg tömegű püspöki palástot (1. ábra). Mindkettő 2004-ben készült el. Anyagukat több mint egymillió mada-



1. ábra. Pókselyemből készült palást [29]



2. ábra. Madagaszkári óriás keresztespók [30]

gaszkári óriás keresztespók (*Nephila madagascariensis*, 2. ábra) száltermeléséből nyerték, amely eleve arany színű selymet bocsát ki magából. A szükséges mennyiséget nyolc ember öt év alatt gyűjtötte össze, a szövés maga négy év munkája volt [2].

A módszer előzménye *Jacob Paul Camboué* francia misszionárius kísérlete volt, aki az 1880–1890-es

években Madagaszkáron működött és egy kis, kézzel hajtott szerkezetet („pókfejű gépet”) készített (3. ábra) a pók selymének motollára teker-cselésére, anélkül, hogy a pók megsérült volna. Ehhez hasonló elven működő, de 24 pókot befogadó gépet szerkesztett *Simon Peers* madagaszkári kutató, aki azután *Nicholas Godley*-val közösen fejlesztette ki a 2000-es évek elején a végső eljárást (aminek egyik eredménye az 1. ábrán bemutatott palást). Így a szövet fonalai 24 pókselyem-szálból állnak [3].

Ehhez hasonló

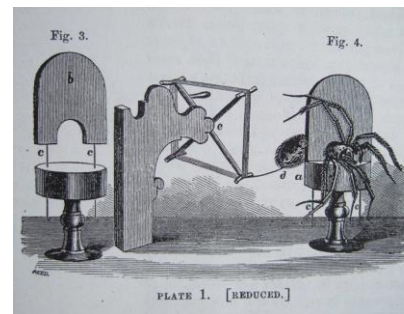
elven működő, de 24 pókot befogadó gépet szerkesztett *Simon Peers* madagaszkári kutató, aki azután *Nicholas Godley*-val közösen fejlesztette ki a 2000-es évek elején a végső eljárást (aminek egyik eredménye az 1. ábrán bemutatott palást). Így a szövet fonalai 24 pókselyem-szálból állnak [3].

Mint érdekességet említjük meg, hogy *Shigeyoshi Osaki* japán kutató 2012-ben hegedűhúrokat készített pókselyemből. Muzsikások az ilyen húrokkal felszerelt hangszer „lágy és mély hangszínét” dicsérték [4].

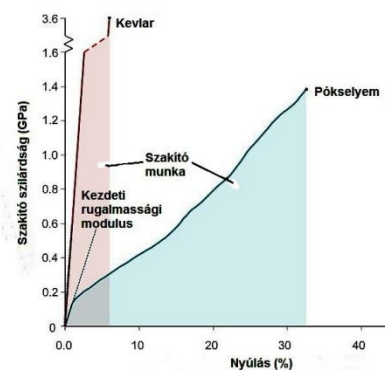
## A pókselyem fő tulajdonságai

A pókok által kibocsátott szálak szakítóereje a fajtától függ, de emellett a legerősebb az a szál, amelyen maga a pók függeszkedik. Ehhez jelentős mértékű nyújthatóság járul, így a szakadásig nagy energia elnyelésére képes (nagy a szakítómunkája). A legerősebb pókselymek fajlagos tömege 1,3 g/cm<sup>3</sup>, szakítószilárdsága (egységnyi keresztmetszetére jutó szakítóereje) rendkívül nagy, 1,4 GPa körül van, szakadási nyúlása 33%. A para-aramidok csoportjába tartozó Kevlar szál erősebb ugyan (szakítószilárdsága 3 GPa), de egyrészt nyúlása sokkal kisebb (4. ábra), másrészt nagyobb a fajlagos tömege (1,44 g/cm<sup>3</sup>). Az acélhuzal szakítószilárdsága is valamivel nagyobb a pókselyménél (kb. 1,65 GPa), de fajlagos tömege jóval nagyobb, 7,84 g/cm<sup>3</sup>. Ezért azt mondhatjuk, hogy a pókselyem *tömegéhez viszonyítva* erősebb ezeknél az anyagoknál [1, 34].

A pókselyem –40 és +220 °C között hőálló. Hővezető képessége felülmúlja a rézét [5]. A környezeti hőmérséklet változásai tulajdon-



3. ábra. „Pókfejű gép” [28]



4. ábra. A pókselyem és a Kevlar húzóerő-nyúlás diagramjának összehasonlítása [31]

ságait nem befolyásolják. Víz hatására mintegy 50%-ig zsugorodik, de nagy rugalmas nyúlását megtartja. A pókselyem szerves és vizes oldószerekben általában nem oldódik, gyenge savaknak és lúgoknak ellenáll. [1, 34].

A pókselyemnek emellett más, pl. a gyógyászat szempontjából előnyös tulajdonságai is vannak. Elősegíti a sebek gyógyulását, ha közvetlenül ráterítik (ezt már az ősidőkben is felfedezték az emberek: pókhálóval borították be a sebet) [32], K-vitamin tartalmánál fogva vérzéscsillapító hatású [6, 7]. A pókselyem e kiváló tulajdonságai késztetik a kutatókat újabb és újabb eljárások kidolgozására a pókselyem gazdaságos előállítására [8, 9].

### Pókselyem kecsketejből

A kanadai Nexia Biotechnologies Inc. által az 1990-es évek végén kifejlesztett biotechnológiai eljárásnál kivonták és házikécskébe (*Capra aegagrus hircus*) klónozták a keresztespókok közé tartozó *Nephila clavipes* pókselyem génjét [10]. Ennek az eljárásnak az eredményeként a kecsketejből viszonylag jelentős mennyiségű, 1–2 g/liter pókselyem-proteint tudtak kinyerni, amelyből nedves szálhúzási eljárással *BioSteel* néven szálakat lehetett előállítani. A kísérlet valószínűleg nem járt sikerrel, mert újabb eredményekről 2002 óta nem olvashatunk a szakirodalomban és a Nexia cég 2006-ban tönkrement [11].

### Pókselyem előállítása baktériumok segítségével

A *Biosteel* márkanév azonban (ezzel az apró írásbeli különbséggel) tovább él. A német *AMSilk GmbH* cég szintetikus selyempolimereket kínál [12]. A cégnek sikerült baktériumok segítségével előállítani a szpidrint, a pókselyem fő proteinjét, és ezt pókselyemmé átalakítani. A kísérletek 2011-ben kezdődtek, 2013-ban sikerült az első ilyen anyagú, a selyemhez hasonlóan folytonos szálát előállítani, 2014-ben megkezdődött a próbagyártás és 2015-ben megkezdhetők a tömeggyártást.

A *Biosteel* szintetikus pókselyem teljes mértékben rekombináns selyemproteinből áll. Szakítószilárdsága, rugalmassága, szívóssága a természetes pókselyeméhez hasonló. A szál puha és sima, biológiailag lebontható. A hernyóselyemhez hasonló fényű, fényes fehér, és a szokásos textilszínező eljárásokkal színezhető. Lehetséges alkalmazási területei: nagy teherbírási



5. ábra. *Biosteel* anyagú Adidas cipő [13]

műszaki textíliák, sportcikk, gyógyászati textíliák és sebészeti textíliák.

Az új textilipari nyersanyag máris felkeltette a nagy sportszergyártó, az *Adidas* érdeklődését, amely – amint azt 2016 végén bejelentették – *Futurecraft Biofabric* néven – egyelőre kísérletképpen – ebből az anyagból készült kötött kelmét alkalmaz cipőfelsőrész gyanánt (5. ábra) [13].

### Pókselyem selyemhernyóból

Az egyik legígéretesebb fejlesztés az amerikai *Kraig Biocraft Laboratories* nevéhez fűződik [14, 15, 16, 17], amely több egyetemmel együttműködve létrehozta a

*Monster Silk*, majd ennek továbbfejlesztéseként a *Dragon Silk* elnevezésű, géntechnológiai úton előállított terméket: pókok selyemfehérjét fuzionáltatták a selyemlepke selyemproteinjével. Ez tehát valójában egy hernyóselyem-szálát eredményezett, amely pókselyem proteinjét is tartalmazza. Ezáltal a végtermék sokkal erősebb és hajlékonyabb, mint a közönséges hernyóselyem. Textilipari feldolgozása lényegében megegyezik a selyemfonal készítésével. A kutatók elsőnek egy kötött kesztyűt állítottak elő ebből az új anyagból, bizonyítva, hogy a fonal alkalmas textilipari feldolgozására.

A pókselyem-fehérjével genetikailag módosított selyem mechanikai tulajdonságai, valamint az a körülmény, hogy – természetes alapanyagú lévén – biológiailag lebontható, arra a reményre jogosítanak fel, hogy számos helyen átveheti a rendkívül nagy szilárdságú, szintetikus úton előállított para-aramid szálanyagok (Kevlar, Twaron stb.) szerepét. Az elképzelések szerint elsősorban polgári és katonai védőruhák (pl. védőkesztyűk, golyóálló mellények stb.) előállítását szolgálja majd. A gyógyászatban varrófonalak [18], mesterséges inak, szalagok előállítására is használható lehet [15, 19, 20].

A cég tehát lényegében génmódosított selyemhernyókat tenyészt saját területein, ahova 2000 eperfát telepített, minthogy az eperfalevél a selyemhernyók tápláléka, valamint Vietnámban is létrehozott egy ilyen selyemtermelő egységet [21]. A selyemgubókból állítják elő – a hernyóselyem készítéséhez hasonló módon – a rekombináns pókselyemszálakat [22]. Az eljárás olyan nyira sikeresnek ígérkezik, hogy az USA hadserege szerződést kötött a céggel a *Dragon Silk* készült golyóálló mellények kipróbálására [23].

### Pókselyemgyártás pókok nélkül

A 2007-ben alapított japán *Spiber Inc.* cég több mint 600 különböző eredeti proteint fejlesztett ki és szintetizált, amelyek tulajdonságait gondosan elemezte és ezzel hatalmas adatmennyiséget gyűjtött [22]. Célja a szintetikus pókselyem és más nagyteljesítményű proteinkészítmények ipari méretben történő piacra vitele. A rekombináns pókselyemproteinből készült bio-szálanyag neve *Qmonos*.

Módszerük a következő: Először is elemzik a pók genomjának selyemtermelő részét. Ezután mesterségesen szintetizálnak egy gént, hogy a termék erejét, rugalmasságát és ipari gyárthatóságát géntechnikai módszerek alkalmazásával maximalizálják. Ebből kiindulva ezt a rekombináns gént egy mikrobába ültetik és kitenyészlik, majd a pókselyemprotein elválasztják a gazdamikrobától. A következőkben az így nyert proteint finomítják és szálakat húznak belőle. Végül ezt a szálakat különböző termékek-



6. ábra. *Moon Parka* [33]



ben kipróbálják és elemzik a tulajdonságokat. Az eredményeket adatbankban rögzítik és tapasztalataikat a következő fejlesztési menetben felhasználják. Ezen a módon az anyag egyre tovább finomodik, amivel minden új generáció továbbfejlődik.

2015. szeptemberében a Spiber bemutatta a világviszonylatban első felsőruházat prototípusát, egy Qmonosból készült, Moon Parka elnevezésű dzsekit, amelyet zord körülmények között, nagy hidegben, a Déli-sarkon viselhetnek [24] (6. ábra). A Qmonosból készült külső borítókélme színe a keresztespókfélék természetes arany színe. A tervek szerint 2017-ben a termék megjelenik a japán piacon.

Egy amerikai vállalat, a Bolt Thread, ugyancsak mesterségesen előállított selyemproteinekből hozott létre pókselymet [22, 25]. Az volt az elgondolásuk, hogy a pókháló szálaiból kivont proteinből állítanak elő szintetikus szálakat. Tanulmányozták a természetből származó selyemproteineket, hogy megállapíthassák, miben rejlenek tulajdonságaik, és ennek a természetes anyagnak az inspirációjára fejlesztettek ki proteineket. A proteinek nagy mennyiségben fermentációval, élesztő, cukor és víz alkalmazásával állították elő. Az élesztő a fermentáció folyamán folyékony állapotban hoz létre proteineket, amelyekből azután egy, a viszkóz- és akrilszálak esetében alkalmazott nedves szálhúzáshoz hasonló módon alakítanak szálakká. Egyelőre csak kis mennyiség gyártására képesek és az így előállított szálak minősége még nem éri el a kívánatos színvonalat, de a Bolt Thread együttműködik az ugyancsak amerikai Patagonia céggel, amely az időjárás viszonyosságainak kitett körülmények között viselhető ruházatok egyik neves gyártója, és fantáziát lát ebben a fejlesztési munkában [22, 25].

Előrehaladott állapotban van a pókselyemproteinek előállításában és a gyakorlatilag is már alkalmazható pókselyem gyártásában a 2014-ben alapított izraeli Seevix Material and Sciences Ltd. cég [26, 27]. Eljárásuk lényege, hogy a pókselyem-DNA visszaalakításán alapuló technológia révén létrehozzák a szálakat alkotó proteinek összeállításának természetes folyamatát és ezzel közvetlenül valódi pókselymet készítenek, így nem kell finomítani vagy mesterségesen fonallá fonni a proteineket. A cég olyan szabadalmaztatott géntechnológiai eljárást alkalmaz a pókselyemszál spontán előállítására, amely nagymértékben hasonlít a biológiai rendszerhez. Az így nyert szálak jellemző tulajdonságai azonosak a természetes pókselyemével vagy még jobbak is annál. A Seevix eljárása egylépcsős folyamat, ami lerövidíti a gyártási időt és csökkenti a költségeket, és lehetővé teszi a mesterséges pókselyem tömeggyártását. Biokompatibilitásánál fogva különösen hangsúlyozzák gyógyászati alkalmazását: lágy szövetek helyreállító se-



7. ábra. Selyem sebvarró cérna [35]

bészeténél, inszalagoknál, orvosi hálók, sebvarró cérnák készítésénél. Erősebb, vékonyabb angio-plasztikai ballonok is készíthetők a pókselyemből. A legtöbb implantátum anyaga (pl. a szilikon és a poliuretán),

amelyeket helyreállító implantátumokhoz, katéterekhez és sztentekhez használnak, hatékonyan burkolható pókselyemmel. A Seevix szála erősítő anyagként használható a szövettényésztésben és sebek zárásához, és elősegítik a valódi sejtnövekedést [26].

## Felhasznált irodalom

- [1] Zilahi Márton: *A textilipar nyersanyagai*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1953
- [2] *Golden spider silk on display at UK's V&A Museum*. [http://www.fibre2fashion.com/news/textile-news/newsdetails.aspx?news\\_id=107463](http://www.fibre2fashion.com/news/textile-news/newsdetails.aspx?news_id=107463)
- [3] *1 Million Spiders Make Golden Silk for Rare Cloth*. <http://www.wired.com/2009/09/spider-silk>
- [4] *Geigensaiten aus Spinnenseide*. <http://www.n24.de/n24/Wissen/d/1479962/geigensaiten-aus-spinnenseide.html/>
- [5] *Tissue regeneration in vivo within recombinant spideroin 1 scaffolds*. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961212001792>
- [6] *Spider web inspires new medical materials*. <http://www.robaid.com/bionics/spider-web-inspires-new-medical-materials.htm>
- [7] *Spider Silk Inspired Functional Microthreads*. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/la203275x>
- [8] *Spider-man spins web to create revolutionary bone and cartilage replacement*. [http://ec.europa.eu/research/sme-techweb/newsletter/issue9/success-story\\_en.html](http://ec.europa.eu/research/sme-techweb/newsletter/issue9/success-story_en.html)
- [9] *Company mass-produces spider silk*. <http://www.paneuropeannetworks.com/science-technology/company-mass-produces-spider-silk/>
- [10] *Biosteel Goat*. <http://postnatural.org/filter/specimen/Biosteel-Goat>
- [11] *Jesse Hirsch: The Silky, Milky, Totally Strange Saga of the Spider Goat*. <http://modernfarmer.com/2013/09/saga-spidergoat/>
- [12] *Biosteel® Fiber*. <https://www.amsilk.com/industries/biosteel-fibers/>
- [13] *Adidas Unveils World's First First Performance Shoe Made from Biosteel® Fiber*. <https://www.adidas-group.com/en/media/news-archive/press-releases/2016/adidas-unveils-worlds-first-performance-shoe-made-biosteel-fiber/>
- [14] *Kraig Biocraft Laboratories' Prepares for First Monster Silk™ Textiles*. <http://www.kraiglabs.com/kraig-biocraft-laboratories-prepares-for-first-monster-silk-textiles/>
- [15] *Spider Silk*. <http://www.kraiglabs.com/spider-silk/>
- [16] *Spider Silk Textile Development Breakthrough*. <http://www.kraiglabs.com/worlds-first-monster-silk-textile/>
- [17] *Kraig Biocraft Laboratories. Spider Silk*. <http://www.kraiglabs.com/spider-silk/#anchor>
- [18] *Surgical sutures*. <http://www.popularmechanics.com/science/health/med-tech/6-spider-silk-superpowers-7#slide-7>
- [19] *Ashley Portero: Spider Silk Used to Create 'Bulletproof' Human Skin*. <http://www.ibtimes.com/spider-silk-used-create-bulletproof-human-skin-302913/>
- [20] *Ana C. MacIntosh, Victoria R. Kearns et al.: Skeletal tissue engineering using silk biomaterials*

- <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/term.68/pdf>
- [21] *Kraig-Biocraft Laboratories to open new Vietnam headquarters in Quang Nam province.*  
<http://www.kraiglabs.com/kraig-biocraft-laboratories-to-open-new-vietnam-headquarters-in-quang-nam-province/>
- [22] *Spinnenseide – Hochleistungs-Proteinfaser mit großem Marktpotenzial.*  
Melliand Textilberichte, 2017/1. sz. 26–29. old.
- [23] *U.S. Army exercises contract option with Kraig Biocraft Laboratories awarding additional funding to develop and deliver spider silk technology.*  
<http://www.kraiglabs.com/u-s-army-exercises-contract-option-with-kraig-biocraft-laboratories-awarding-additional-funding-to-develop-and-deliver-spider-silk-technology/>
- [24] *Protein materials: A revolution in manufacturing.*  
<http://www.jrmlassociates.com/blog/2016/3/21/gpn739x9tdeo22om7c4gys19igizaf>
- [25] Nicola Twilley: *In the future, we'll all wear spider silk.*  
<http://www.newyorker.com/tech/elements/in-the-future-we'll-all-wear-spider-silk>
- [26] *Seevix Material Sciences. Products and Technology.*  
<http://seevix.com/products-and-technology/>
- [27] Maddie Stone: *Scientists Are Spinning Spider Silk Without The Spiders.*  
<http://gizmodo.com/scientists-are-spinning-spider-silk-without-any-spiders-1707840479>
- [28] *Spider-silk cape by Simon Peers and Nicholas Godley.*  
<https://www.dezeen.com/2012/01/26/spider-silk-cape-by-simon-peers-and-nicholas-godley/>
- [29] Bonnie Alter: *Silk From 1 Million Spiders Made This Gorgeous Cape*  
<https://www.treehugger.com/sustainable-fashion/silk-million-spiders-made-this-gorgeous-cape.html>
- [30] *Madagascar golden orb spider (Nephila Madagascariensis).*  
[http://travel.mongabay.com/madagascar/images/animations\\_00098.html](http://travel.mongabay.com/madagascar/images/animations_00098.html)
- [31] Wikipedia Commons. *Kevlar, silk comparison.*  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wikipedia\\_Kevlar\\_Silk\\_Comparison.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wikipedia_Kevlar_Silk_Comparison.jpg)
- [32] Robbie Gonzales: *Spider silk could be the secret ingredient in tomorrow's electronics.*  
<http://io9.gizmodo.com/5891331/spider-silk-could-be-the-secret-ingredient-in-tomorrows-electronics>
- [33] *The North Face's Moon Parka is made from synthetic spider silk.*  
<http://newatlas.com/north-face-moon-parka-spider-silk/40298/#p374406>
- [34] Wikipedia. *Spider silk. Properties*  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Spider\\_silk#Properties](https://en.wikipedia.org/wiki/Spider_silk#Properties)
- [35] *Silk Braided Silicon Coated Sutures.*  
<http://www.smbcorp.com/images/silk-braided-silicon-coated.jpg>