

Miskolci Egyetem

Anyag-, és Vegyészmérnöki Kar

Energia-, Kerámia- és Polimertechnológiai Intézet



TDK dolgozat

A birkagyapjú, mint természetes polimer szigetelőanyagként való alkalmazhatóságának vizsgálata

Készítette: Hegedűs Mariann Éva (NN6ACA)

Konzulens: Szabóné Dr. Kollár Mariann

Miskolc, 2024.

Tartalom

Absztrakt	2
I. Bevezetés	3
1. A gyapjú	4
2. Fizikai tulajdonságai	5
2.1. Szálhossz és átmérő:.....	5
2.2. Szálak szakítószilárdsága:	5
2.3. Rugalmasság:.....	5
2.4. Higroszkópos tulajdonságok:	6
2.5. Hővezető képesség:	6
2.6. Nemezelhetőség:	6
3. Kémiai tulajdonságai	7
3.1. Nedvesség hatása:.....	7
3.2. Nedvességfelvétel:.....	7
3.3. A hő hatása:	7
3.4. A napfény hatása:	7
4. A gyapjú feldolgozása	8
4.1. Nyírás:	8
4.2. Mosás:	8
4.3. Farkasolás:	8
4.4. Kártolás:	9
4.5. Nemezelés folyamata:	9
II. Kísérleti rész	10
1. Mintaelőkészítés	10
2. Elvégzett mérések, vizsgálatok	13
2.1. FT-IR (Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia):.....	13
2.2. Nedvességtartalom mérése:	16
2.3. Hővezetőképesség mérése:	18
2.4. Maradó alakváltozás:	20
2.5. Éghetőség:	22
Konklúzió	25
Irodalomjegyzék:	27
Mellékletek:	29

Absztrakt

Napjainkban két téma terület van, ami egyre inkább középpontba kerül. Ez nem más, mint a különböző iparágakban keletkező hulladék csökkentése, esetleges újrahasznosítása más iparágakban, valamint a vásárlók környezettudatos szemléletének előtérbe kerülése és kielégítése. Erre kitűnő példa a hús-, és textil iparban melléktermékként keletkező gyapjú, amely legtöbbször méltatlanul a trágyában végzi komposztként. A gyapjú építőipari hasznosítása környezetvédelmi szempontból pozitív hatású lenne, mivel egy megújuló energiaforrásról van szó, ami egyben biológiailag lebomló is. Ezáltal csökkenteni lehetne a hulladékként végző, ipari szempontból nem hasznosítható gyapjút a hús-, és textiliparban. Valamint a környezeti terhelést redukálni lehetne és hozzájárulna a körkörös gazdasághoz is.

Mivel manapság a gyapjú, mint természetes polimer, egyre nagyobb figyelmet kap a környezetbarát szigetelőanyagként való alkalmazása miatt, a dolgozatom is ebben a témakörben készült. Célom a birkagyapjú, mint természetes polimer szigetelőanyagként való alkalmazhatóságának vizsgálata. Kutatómunkám során húsbirkaként tartott állat gyapját (Merino, Homrogd községből) használtam, melyet 4 különböző formátumban alkalmaztam, mint natúr vágott gyapjút, natúr farkasolt gyapjút, natúr kártolt gyapjút, és mosott nemezelt gyapjút. A fő kérdés az az, hogy a gyapjún elvégzett vizsgálatok eredményei alapján használható-e a gyapjú hőszigetelő anyagként vagy sem. Az elvégzett vizsgálatok során FTIR, hővezetőképesség, nedvességtartalom, maradó alakváltozás és éghetőség mérésre került sor. Melyek közül a hővezetőképesség esetén megmérésre került két napjainkban is használt szigetelőanyag, nevezetesen az expandált polisztirol (EPS) és a kőzetgyapot, melyek adatait összevettem az általam felhasznált gyapjúéval.

I. Bevezetés

Az építőiparban használt szigetelőanyagok, fontos szerepet játszanak az épületek energiafogyasztásában, mivel a megfelelő anyag kiválasztása, vastagsága és elhelyezkedése lehetővé teszi a jó beltéri hőkomfort és a megfelelő energiamegtakarítás elérését. [1] Az épület szigetelések esetén megkülönböztetünk: [2]

- a.) Homlokzati (külső) szigetelést → Képes javítani az adott épület hőveszteségét és benne a hőkomfortot. A külső falszigetelés elsősorban a hőveszteséget akadályozza meg az épületek esetében, továbbá szerepet játszik az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésében, pl.: polisztirol, kőzetgyapot. [1] [3]
- b.) Födémszigetelés (felső) → Minimalizálja az épület tetején távozó meleg levegőt, ezáltal a hőveszteséget, pl. üveggyapot, kőzetgyapot vagy polisztirol.
- c.) Pince- és alapozási szigetelés → Ezek esetében vízzáró szigetelést használnak a talajvíz ellen való védekezés érdekében, pl. bitumen lemezek.
- d.) Padlószigetelés (alsó) → A talaj irányába szorítja le a hőveszteséget, pl. hungarocell vagy polisztirolhab.
- e.) Hangszigetelés → Célja a különféle hangok és zajok csökkentése pl. hangszigetelő tapéta. [2]

A szigeteléseket tekintve a termikus tulajdonságok rendkívül fontosak, de nem csak ezeket kell figyelembe venni az épületek tervezésénél, hanem a tűzállóságot, a vízgőzáteresztő képességet, valamint a környezetre és az emberi egészségre gyakorolt hatását is. [1] Ma már ezeken túlmenően egy szigetelésnek környezettudatosnak és fenntarthatónak is kell lennie, ezért a mesterséges szigetelőanyagok mellett megjelentek a természetes szigetelőanyagok is. [3]

A természetes szigetelőanyagok számos környezeti, társadalmi és gazdasági előnyt jelenthetnek, melynek köszönhetően sok fejlett országban újra előtrébe került, hogy az épített környezetben fellendítsék használatukat. Ilyen természetes szálas anyag például a juhgyapjú is, amelyet évszázadok óta használnak szigetelőanyagként, környezetbarát tulajdonságainak köszönhetően. Ennek következtében nagy népszerűségnek örvend a befektetők és tudósok körében, akik azon tulajdonságait kutatják, amellyel a juhgyapjú a hagyományos textilipari alkalmazásai mellett, a leghatékonyabb és leghatékonyabb anyag legyen a szigetelőiparban. [3] Európában az ISOLENA az, ami 100 % gyapjú szigeteléseket állít elő. A terméket ugyan Magyarországon forgalmazzák, de a gyapjú alapvetően Ausztriából, Németországból, Svájcból származik hozzá. [4] A gyapjú szigetelést tekintve, hatékonyan használható a falak belső

szigeteléseként, vagy a padlásokhoz fűdémszigetelésként, pl.: táblákban és tekercsekben, de még laza töltőanyagként is alkalmazható nehezen hozzáférhető helyeken. Mindemellett még hangelnyelő tulajdonságai miatt akusztikai megoldásokra is kiváló. [3]

Az építőiparban jelenleg használt hagyományos, mesterséges szigetelőanyagok közé sorolható a riasztóan nagy mennyiségű előállítási energiát igénylő üveggyapot és kőzetgyapot, valamint a különféle szintetikus habok mint a polisztirol (EPS, XPS) és poliuretán. [3] [5] A hagyományos szigetelőanyagok jelentős szerepet játszanak a környezetszennyezésben, míg a természetes szigetelőanyagok hasznosíthatóak, és komposztálhatóak lennének, ezáltal környezetkímélőbbek is. [3]

1. A gyapjú

A gyapjú előállítás vezető országai közé tartozik Ausztrália, Kína, az Egyesült Államok és Új-Zéland. Több mint 200 különböző juh fajta létezik, melyek közül a legnépszerűbbek: a Merino, a Romney és a kékcápú Leicester. [6] A juhgyapjú természetes állati rost, amely nyírás után 60 % állati fehérjerostból, 13-15 % nedvességből, 10 % zsírból, 10 % birka verejtékéből és 5 % szennyeződésből áll. A gyapjúk között hosszuk, íveltségük, finomságuk (durvaságuk), fényük és színük, kinyerési módjuk, tisztaságuk és nemezelhetőségük alapján szoktak különbséget tenni. [7]

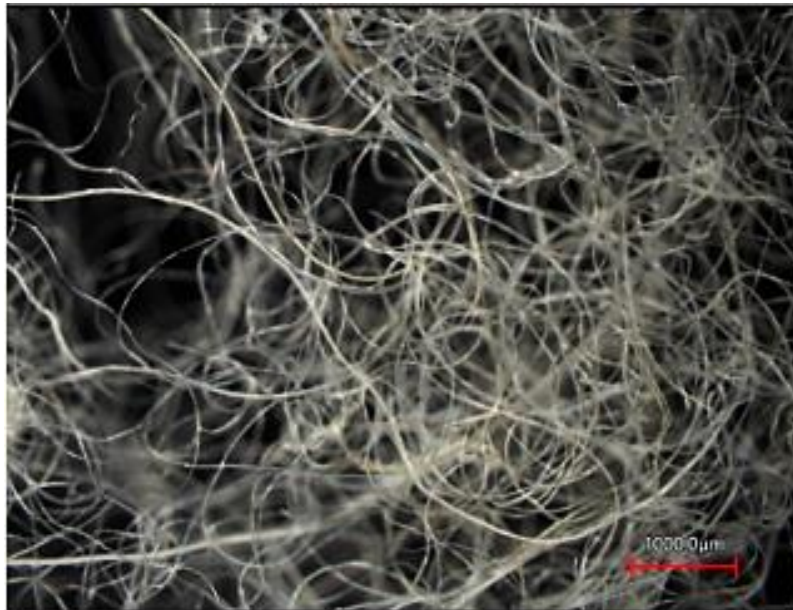
Jellemzőjük a nedvességfelvétel és -deszorpció, a légáteresztő képesség, a jó hő-, rezgéscsillapító és hangszigetelő tulajdonságok, valamint a tűzállóság és statikus elektromosság. E tulajdonságainak köszönhetően a juhgyapjú számos területen széles körben használható. Például a finomabb gyapjút a textiliparban, általános gyapjútermékek: szőnyegek, ruhák, lakástextilek előállítására, míg a durva gyapjút matracok és párnák töltőanyagaként használják. A gyapjú a textiliparon kívül ma már a gazdaság más ágaiban is fellelhető, mint az építőiparban, a kozmetikában, a gyógyászatban, valamint az ökológiai gazdálkodásban. A juhokat azonban főként a húsaért, kisebb részben a tejeért nevelik és korántsem a gyapjáért. [6]

Ezért a gyapjú jelenleg a juhtenyésztés mellékterméke, alacsony minősége és ára miatt. Becslések szerint az Európai Unióban évente legalább 200 000 tonna gyenge minőségű gyapjút állítanak elő, amit gyakran elégetnek, trágyába raknak vagy hulladéklerakóba küldenek. A gyapjút alulértékelt és alulhasznosított megújuló erőforrásnak tekintik, amely hatékonyabb kiaknázást érdemelne. [6]

2. Fizikai tulajdonságai

2.1. Szálhossz és átmérő:

A **szál hossza** fontos tényező a gyapjú minőségénél, ugyanis befolyásolja a száltörést, a fonal szakítószilárdsági jellemzőit, a belőle készülő textil tulajdonságait és a textiliát viselő kényelmét. Általában a hosszabb szálhossz jobb, mint a rövidebb. A **szál átmérőjének** nagy szerepe van a szál, majd a szövet merevségében. Ugyanis a szálak merevsége azt is befolyásolja, hogy az adott szövet mennyire érződik puhának vagy szúrósnak. Szál átmérő alapján a gyapjúsálakat finom, közepesen durva és durva csoportokba sorolják. [8]



1. ábra Juhgyapjú szálak mikrostruktúrája [6]

2.2. Szálak szakítószilárdsága:

A szálak szakító tulajdonságaitól és a szövetszerkezetben lévő összetett szálelrendezéstől függenek a belőlük készült fonalak és szövetek szakítótulajdonságai. A gyapjú szakítószilárdsága meglehetősen változó. Ha a gyapjúsál nedvesebb, akkor a szakítószilárdsága csökken, de 20°C -on jellemzően 65 %-os relatív páratartalom mellett az egyes szálak szakítószilárdsága 140-180 MPa, nyúlása 30-40%, ill. Young-Modulusa 2,7-3,9 GPa. [8]

2.3. Rugalmasság:

A gyapjú meglehetősen rugalmas sajátságokkal rendelkezik. A rugalmasság, a gyapjúsál azon tulajdonságára utal, hogy a rá gyakorolt erő kifejtését követően visszamegy eredeti helyzetébe. Nyúlás hatására a szál amorf részeiben lévő diszulfid kötések megnyúlhatnak, majd

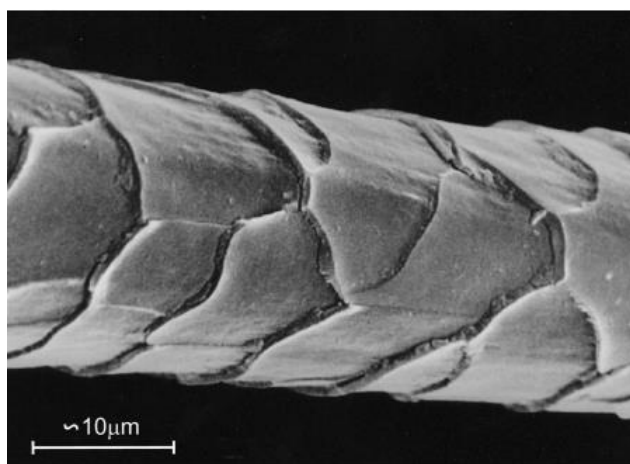
amikor a rost kiszabadul a nyújtott helyzetéből, a diszulfid kötések visszahúzzák a fehérjemolekulákat eredeti helyzetükbe. Ez a tulajdonság fontos a pl.: szőnyegminőségű gyapjúk esetében. [8]

2.4. Higroszkópos tulajdonságok:

A természetes szálak közül a gyapjú a leghigroszkóposabb anyag. Nedvességfelvétele száraz tömegére számítva eléri a 33%-ot. A gyapjú fehérjeszerkezetének köszönhetően nagy mennyiségű nedvességet képes felszívni, amely hidrogénkötéssel kapcsolódik a gyapjút felépítő keratin aminosavaihoz. [8]

2.5. Hővezető képesség:

A gyapjú gyenge hővezető képességgel, de jó hőszigetelő képességgel rendelkezik, ezért ideális hideg időben. A gyapjú rugalmassága fontos az anyag melegítő tulajdonságai szempontjából. A szálak hullámos formája és pikkelyes felülete miatt egy teltebb szerkezetet adnak, amivel nem illeszkednek jól a fonalba, ezáltal sok levegőt tartalmaznak, ami az egyik legjobb hőszigetelő anyag. [8]



2. ábra Merino gyapjúsál SEM felvétele [9]

2.6. Nemezelhetőség:

A nemezelés a gyapjúsálak visszafordíthatatlan zsugorodása, mely szálvándorláson alapul, ami nem más mint a szálak mechanikai mozgása, egymáshoz préselése. A vándorlás a szálak felületének pikkelyszerű struktúráján alapul. Ezen pikkelyek összefonódása zsugorodást okoz a gyapjúban. A gyapjú más szálakkal keverve is nemezelhető. A nemezelhetőséget felületkezeléssel pl. klórozással is lehet javítani.[7] [8]

3. Kémiai tulajdonságai

A gyapjú fehérjeszerű polimer, az a-keratinoknak nevezett fehérjék családjának része, amely olyan anyagokat is tartalmaz, amik felépítik a tülkös szarvakat, karmokat, patákat, csőröket.[9] Fő fehérjekomponense a keratin, amely közel 18 aminosavból áll, beleértve pl.: a glicint, alanint, szerint, prolint, cisztint, treonint, metionint, stb. [10]

3.1. Nedvesség hatása:

A gyapjú egy hidrofil fehérjeszál. A benne lévő fehérje -CO.NH- csoportot tartalmaz, amely képes magához vonzani a környező levegőből a nedvességet, elnyeli és deszorbeálja azt. Tulajdonságai nagyon érzékenyek a páratartalom változására. A szakítószilárdság, modulus, üvegesedési hőmérséklet (T_g) csökkenését eredményezi. Normál légköri körülmények között, 65 %-os relatív páratartalom és 20°C-on a gyapjú nedvességtartalma 12-18 % körüli. Ezeken túl a gyapjú nedvesség hatására képes megduzzadni, sugárirányban 16 %-kal. [7] [8]

3.2. Nedvességfelvétel:

A teljesen száraz textilálya súlyára vonatkoztatott anyag nedvességtartalma, ami

$$\text{nedvességfelvétel} = \frac{\text{a nedvesség súlya}}{\text{a teljesen száraz textilálya súlya}} * 100 [\%] \quad [7]$$

A gyapjú esetében a víz kiváló lágyítószer, amely mint már fentebb említettem drámai módon képes megváltoztatni a szál fizikai tulajdonságait. A szál kiszáradása a feszültség csökkenését majd növekedését eredményezi, ahogy a szál nedvesről teljesen szárazra változik. A modulus is körülbelül háromszorosára nő a szál száradása során. [8] [9]

3.3. A hő hatása:

Ugyan a gyapjú nem gyullad könnyen, de érzékeny a hőre. A természetes szálak közül neki van a legmagasabb oxigén index határértéke (LOI → 24-27). Magas hőmérsékleten puhává válik, 130°C-on bomlásnak indul és 300°C-on elszenesedik. [8]

3.4. A napfény hatása:

A napfény hatására a gyapjú képes besárgulni illetve kifakulni. A nedves gyapjúsövetek hajlamosabbak napfény hatására kifakulni, mint a száraz szövetek. A napfényben jelenlévő ultraibolya sugarak a peptid- és diszulfidkötések felbomlását okozzák, ami a szálak felületén polimer bomlásterméket eredményez. A nagyfokú napfénynek való kitettség nagyon meggyengíti a gyapjúsálakat. [8]

4. A gyapjú feldolgozása

A gyapjú feldolgozása során a szálak feszültség alá kerülnek, amikor is fennáll a szilárdság növekedésének lehetősége és/vagy a szál károsodása. Ha a szál körülbelül 30 %-ig feszül, nyúlik nem történik károsodás, ill. a szál szilárdsága nő. Ezen a ponton túlmenően azonban károsodás lép fel, aminek hatására a gyenge szálak eltörnek a folyamat során, és szennyeződésként távoznak a rendszerből. [8]

A nagyüzemi gyapjufeldolgozás lépések sorozatát foglalja magába, mint a nyírást, mosást, farkasolást, kártolást.

4.1. Nyírás:

A gyapjút manuálisan kézi ollóval vagy gép segítségével távolítják el a juhok bőréből. A kézi eljárás ma már háttérbe szorult hibái, hátrányai miatt: túl hosszú nyírási idő, a nyíró bőrsérülést okozhat a juhok, vagy ha nem közelít eléggé a bőrhöz nyírás során, a kapott gyapjúhossz rövidebb lesz. Ezzel szemben a gépi nyírással idő spórolható és kisebb a hibázási lehetőség is. A juhokat fajtánként, fekete/fehér arc szerint kell elválasztani, és a nyírt gyapjút ezek alapján külön tartani. A gyapjufeldolgozás szempontjából minél hosszabb a gyapjú, annál jobb a feldolgozás minősége, ezért az éves egyszeri nyírás javasolt, de legtöbbször kétszer nyírják az állatokat. [8]

4.2. Mosás:

A következő eljárás, a mosáshoz vezet, ahol a gyapjúról súrolás, mosás útján eltávolítják a zsírt, növényi anyagokat és egyéb szennyeződések. A mosás általában egy 3 tartályos rendszerben történik. Minden tartályt megtöltenek vízzel, majd nátrium-karbonátot (3%) és nemionos mosószert (1%) adnak hozzá, aztán 50 °C-ra melegítik. Ezután a gyapjút lúgban 30 percig keverik, majd hengereken keresztül kiperéselik a felesleges vizet belőle. Ez a folyamat megismétlődik a következő két tartályban is. Végül egy extraktorral távolítják a maradék vizet belőle. A mosott gyapjút földre terítve szárítják. [8]

4.3. Farkasolás:

Egyfajta előkészítő folyamata a kártolásnak, amikor is a lenyírt és előmosott, majd megszáritott gyapjút kézzel illetve ritka fogú fésűvel kisebb darabokra tépkedik. Ez lényegében a farkasolás, amikor is a természetesen összetapadt gyapjút fellazítjuk, hogy pihés, szálas legyen. [11]

4.4. Kártolás:

A gépi és kézi kártoló is páros eszköz.[11] A kártolás a szálak átfésülése, mely forgó, fogas, éles csapos hengerek segítségével történik.[8] A hengereken 25–30 sorban 5–600 villás, acéldrótból készült fog található, elasztomer/ rugalmas bőrlapba ágyazva. Az előkészített, farkasolt gyapjút a tépőpadra szerelt (nagyobb) kártolóhenger fogaira vetjük fel, s a másik (kisebb) kártoló hengerrel tépjük. [11] A kártolás végén egy gyapjúaplant kapunk, mely rendezett szálakból áll. [8]

A kártolás fő céljai:

- A farkasolás utáni gyapjúcsomók felnyitása.
- A szálak hosszirányú párhuzamos igazítása.
- A szálak összekeverése és egyenletes eloszlítása a kártolóhengeren
- A megmaradt szennyeződések, pl.: szemét, növényi maradványok, rovarok eltávolítása, melyek kártolás során a hengerek alá esnek. [8]

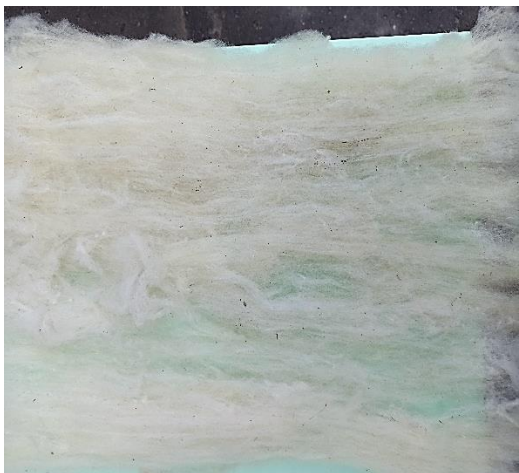
4.5. Nemezelés folyamata:

Az utolsó folyamat a nemezelés, amely a „szálvándorláson” alapszik. A gyapjú nedves környezetben történő nyomása és mechanikai mozgata teszi lehetővé a nemezelődést, melyet a szappanos víz elősegít. Ebben a folyamatban a szálak összegubancolódnak és egy tömörebb szerkezet jön létre. [7]

II. Kísérleti rész

1. Mintaelőkészítés

A mintáim elkészítéséhez húsbirkaként tartott állat gyapját (Merino) használtam, melyet több különböző formátumban alkalmaztam a mérések, vizsgálatok során, mint natúr vágott gyapjút, natúr farkasolt gyapjút, natúr kártolt gyapjút, és mosott nemezelt gyapjút. Ezek jól láthatóak a *3. ábrán* is:

	
1.1. Natúr vágott gyapjú	1.2. Natúr farkasolt gyapjú
	
1.3. Natúr kártolt gyapjú (paplan)	1.3. Mosott nemezelt gyapjú

3. ábra A gyapjúminták különböző formákban [saját felvétel]

Ahhoz, hogy a *3. ábrán* látható natúr vágott gyapjúból eljussunk a különböző általam használt félkész termékekig, több műveleti lépést is végre kell hajtani, mint:

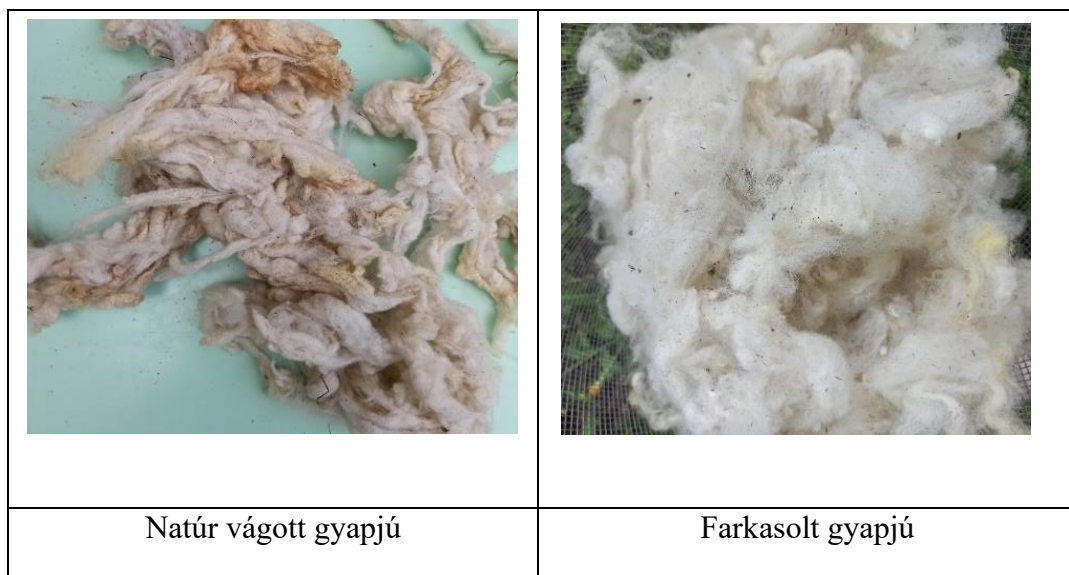
- 1.2. a farkasolást,
- 1.3. a kártolást,

1.4. és a nemezelés folyamatát.

A továbbiakban ezeket a műveleti lépéseket részletezném.

1.2. Farkasolás:

A mintaelőkészítéshez használt Merino gyapjóm, már előmosott, szárított gyapjú volt, így ezen lépések elvégzésére már nem került sor. A farkasolás során a natúr vágott gyapjút, a [4. ábrán](#) látható módon kézzel kisebb darabokra tépkedtem, ezzel fellazítva az összetapadt szálakat.



4. ábra Natúr vágott és farkasolt gyapjú [saját felvétel]

1.3. Kártolás folyamata:

Az előkészített, farkasolt gyapjút a kézzel forgatható, felvető (nagyobb) kártolóhenger fogaira vezetem fel. Mindeközben a hengert forgatva, a másik kártoló henger (kisebb) tépte a szálakat. A kártolóhengeren elért kellő vastagságú gyapjút lehúzva a hengerekről, az [5. ábrán](#) látható kártolt gyapjú paplant kaptam. Szennyezettebb gyapjú esetén, többször is megismételtem a folyamatot, hogy kártolás során kihulljanak a szennyeződések.

	
1. felvetés	2. kártolás
	
3. lehúzás	4. kész kártolt paplan

5. ábra A kártolás folyamata [saját felvétel]

1.4. Nemezelés folyamata:

Az utolsó általam alkalmazott gyapjűfeldolgozási módszer a nemezelés volt. Ennek során a kártolt gyapjűt több rétegben szappan és meleg víz segítségével nemezeltem össze, vagyis gyűrtam, tömörítettem, hogy a szálak összekapaszkodjanak és filcszerű anyagot képezzenek. Amikor elértem a kellő vastagságű nemezelt mintát, hideg vízzel kimostam, ezzel fixálva a szálak helyzetét és eltávolítva a szappant, majd levegűn hagyva megszárítottam.



6. ábra Nemezelt gyapjű [saját felvétel]

2. Elvégzett mérések, vizsgálatok

A fő kérdés, mellyel a kutatásom foglalkozott, az az, hogy a gyapjún elvégzett mérések eredményei alapján ez a húsmerino gyapjú használható-e hőszigetelő anyagként vagy sem. Ehhez az alábbi vizsgálatokat, tesztekét végeztem el, melyek a későbbiekben részletesen kifejtésre kerülnek.

2.1. FT-IR (Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia)

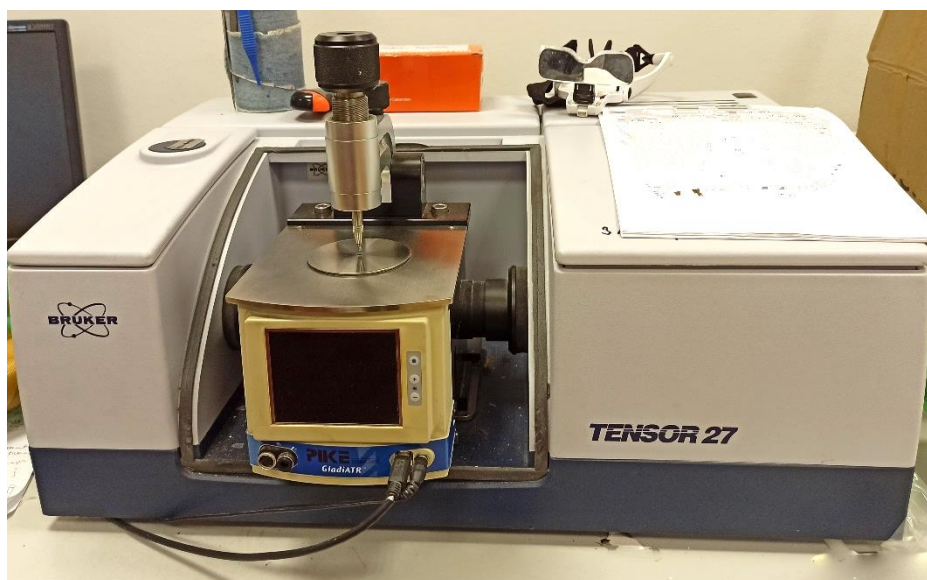
2.2. Nedvességtartalom mérése

2.3. Hővezetőképesség mérése

2.4. Maradó alakváltozás

2.5. Éghetőség

2.1. FT-IR (Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia):



7. ábra Bruker Tensor 27-es FTIR készülék [saját felvétel]

Az analitikai módszerek közül egyszerűsége miatt gyakran alkalmazzák, tisztaság- (szennyeződés jelenléte), szerkezet vizsgálatra és azonosításra vegyületek esetében. Az IR tartomány az analitikában általában $2,5\ \mu\text{m}$ és $25\ \mu\text{m}$ közöttre tehető. Az infra készülék a minta felületét IR-sugárral bombázza, ami következtében a felületen leggyakoribb szennyeződések, vegyület csoportok detektálhatók.[12] A kémiai kötések jellemző frekvencián rezegnek, infravörös sugárzás hatására pedig a rezgésmódjuknak megfelelő frekvencián nyelik el a sugárzást. A sugárzás abszorpciós frekvenciájának mérése olyan spektrumot ad, amely funkciós csoportok és vegyületek azonosítására használható. Egyes szennyeződések saját jellegzetes

karakterisztikus sávokat hoznak létre az IR régióban. A kapott IR-spektrum a minta ujjlenyomatát reprezentálja, az abszorpciós csúcsokkal, amelyek megfelelnek az anyagot alkotó atomok kötése közötti rezgések frekvenciájának. [13] A mérés elvégzéséhez alacsony koncentrációjú, néhány mg minta is elegendő és akár roncsolásmentesen is végezhető, valamint széles tartományban egyidejűleg képes adatokat gyűjteni.[12] [14]

Az IR-spektroszkóppal mért eredmények azonosítása 3 féleképpen történhet:

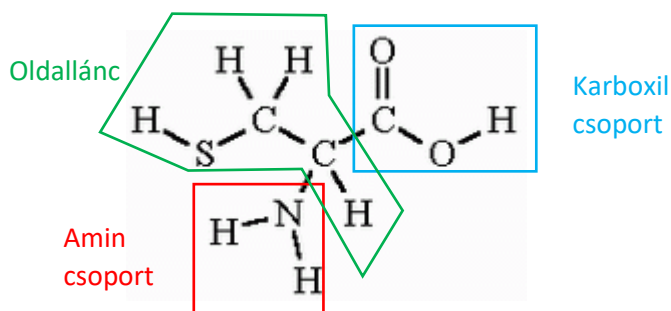
1. Ujjlenyomat módszerrel, amikor egy korábban felvett minta spektrumát vetjük össze a saját mintánk spektrumával. (azonos körülmények között)
2. Ha nincs standard mintánk, de ismerjük a főbb kötéseket, atomcsoportokat, akkor azok karakterisztikus sávjai azonosíthatók, mivel megközelítőleg megegyező helyen lelhetők fel. pl. C=O csoport 1850 – 1600 cm^{-1} ,
3. Ha mintánkról, semmi infónk nincs, akkor a mérés során kapott spektrum esetében először az intenzívebb, majd a kevésbé intenzív sávokat azonosítjuk és azokhoz rendelünk hozzá atomcsoportokat, kötéseket. [12]

A vizsgálat körülményei és kivitelezése:

A vizsgálatokhoz egy Bruker Tensor 27-es típusú berendezést alkalmaztam. Minden egyes mérés megkezdése előtt etil-alkohollal megtisztítottam a GladiATR reflexiós mintatartó tálcáját és optikai elemét. A vizsgálatok 50 % relatív páratartalom mellett, $T=20^{\circ}\text{C}$ -on történtek. A méréstől azt vártam, hogy különbséget találjak natúr és a mosott gyapjú között a felületi összetételben.

A mérés során tapasztaltak:

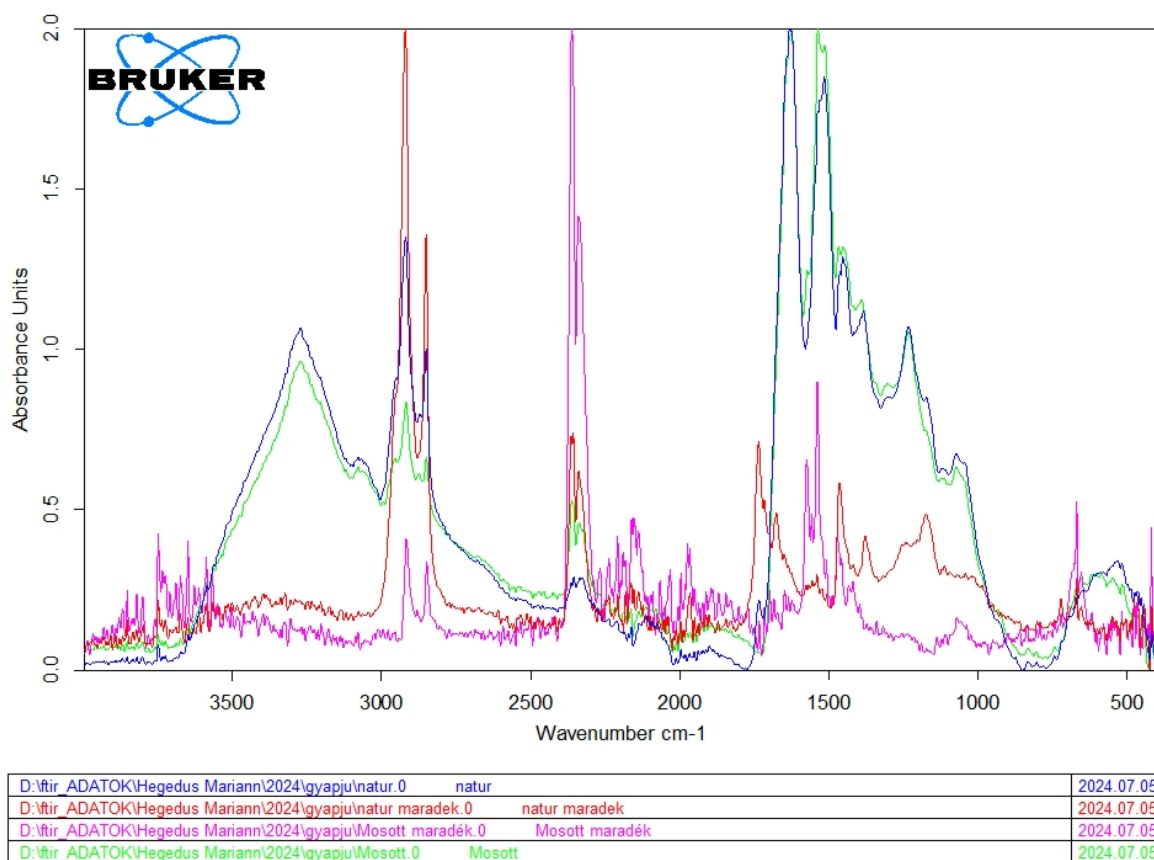
A kapott spektrumok a 9. ábrán találhatóak, melyek esetén a „zöld” és „kék” spektrum a „mosott nemezelt -” és a „natúr gyapjút” reprezentálják. Ezek esetében a görbék rajzolatjai szinte teljesen megegyeznek. A rajzolatból jól



8. ábra Keratin aminosav szerkezete [23]

kivehető a gyapjút felépítő, aminosavakból álló keratin. Ezen spektrum 3500-3400 cm^{-1} hullámszáma között primer amin, NH-csoport található. 3300-3000 cm^{-1} között CH-kötések, 2400-2300 cm^{-1} -nál pedig a légköri CO_2 mutatható ki. 1600-1750 cm^{-1} környékén C=O

(karbonil csoport), 1500 cm^{-1} esetében ismét NH-amin csoport figyelhető meg. $1300\text{-}1040\text{ cm}^{-1}$ között pedig a C-O egyszeres kötések karakterisztikus sávja helyezkedik el.



9. ábra Natúr és mosott gyapjú FTIR spektruma

A „lila” (mosott maradék) és „piros” (natur maradék) spektrumokat a minta megmérése után közvetlenül vettem fel, még mielőtt etil-alkohollal megtakarítottam volna a vizsgálófejet. Ennek célja az volt, hogy a vizsgáló fejre tapadt maradványokat, mint pl.: a szappant, lanolint detektáljam. A „lila” (mosott maradék) spektrum visszamaradt karbonsavésztert mutat, ami a nemezeléskor használt szappanra utalhat. Míg a „piros” (natur maradék) spektrum a natúr gyapjún található nagymennyiségű természetes lanolin összetételét rajzolja ki.

2.2. Nedvességtartalom mérése:

Mint azt a 3. fejezet (*Kémiai tulajdonságok*), 3.3. alfejezetében kifejtettem, a gyapjú egy hidrofil fehérjészál, ami képes magához vonzani a vizet a környezetéből, ami hatással van a fizikai és mechanikai tulajdonságaira: mint a nyúlás, szakítószilárdság, modulus, üvegesedési hőmérséklet (T_g), stb.

A nedvességtartalom meghatározása történhet szárítószekrényben tömegkülönbség kiszámítása alapján → a nedvesség összsúlyra vonatkoztatott aránya százalékosan megadva. [7]

$$\text{nedvességtartalom} = \frac{\text{nedvesség mennyisége}}{\text{gyapjú nedves súlya}} * 100 [\%] \quad [7]$$

vagy ettől sokkal pontosabb kalcium-hidrides nedvességmérő műszerrel, amit én is használtam.

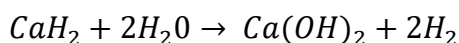
A vizsgálat körülményei és kivitelezése:

A nedvességtartalom méréséhez egy HydroTracer berendezést használtam, melyen az első mérés előtt a „dry run” programmal megtörtént a gép kiszárítása.



10. ábra HydroTracer nedvességtartalom mérő [saját felvétel]

A mérés során a gép felmelegíti a vizsgálat anyagot a kezelő által választott hőmérsékletre (150°C). A mintatartóban elpárologtatja a mintában lévő vizet, ami gőz formájában felszáll és reakcióba lép a kimért (0,1 g kalcium-hidriddel) reagenssel.



A vízgőz hidrogénné, a kalcium-hidrid pedig kalcium-hidroxiddá alakul. A hidrogén végső koncentrációja a reaktorban arányos a minta mérés előtti víztartalmával. A beépített érzékelők mérik a környezeti levegő páratartalmát, hőmérsékletét és légnyomását, amit a végén levon a rendszer a kapott eredményből. [15]

A mérés célja a különféle általam használt gyapjúk (natúr kártolt és mosott nemezelt) nedvességtartalmának összehasonlítása volt normál legköri körülmények között (20°C), és 60°C-on szárítószekrényben végzett szárítást követően. Utóbbival imitálva pl. nyáron egy padláson előforduló hőmérsékletet, ha már szigetelő anyagként szeretnénk alkalmazni a gyapjút.

A mérés során tapasztaltak:

Alapadatok: - gyapjú sűrűsége: 1,32 g/cm³

-felfűtési hőmérséklet: 150°C

1. táblázat Nedvességtartalom mérési eredményei

Minta	Bemért minta tömege [g]	Víztartalom		
		[%]	[ppm]	[mg]
kártolt	0,25	9,8652	98652	24,66
nemezelt	0,16	11,9846	119846	19,18
kártolt (szárított 60°C)	0,31	5,7761	57761	18,17
nemezelt (szárított 60°C)	0,77	2,6082	26082	20,08

A mérési eredményekből látszik, hogy a gyapjú normál körülmények között (20°C) mért nedvességtartalma 9-12 % között helyezkedik el, ez az irodalomban említett értékekhez képest minimálisan alacsonyabb. A mosott nemezelt gyapjú esetében ez az érték magasabb, mert sűrűbb szerkezetű, ami több nedvesség elraktározására képes, mint a lazább szerkezetű kártolt gyapjú.

A 24 órás szárítást követően a nemezelt minta kisebb százalékban tartalmazott vizet, mint a kártolt gyapjú. Ennek magyarázata valószínűleg az, hogy a kártolt minta a szárítószekrényből való kivétel után gyorsabban magába szívta a levegő páráját, mint a nemezelt, ezért kaphattam magasabb értéket a nedvességtartalomra ebben az esetben.

2.3. Hővezetőképesség mérése:

A **hővezetés** egy transzportfolyamat, amely során hőmérséklet kiegyenlítődés indul meg, egy rendszeren belül, ahol a hőmérsékletek különbözőek. A hő áramlása a magasabb hőmérsékletű hely felől, az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé adódik. [16] A különböző anyagok, egymáshoz képest más-más módon és mértékben képesek vezetni a hőt, melynek jellemzésére használatos fizikai fogalom a **hővezetési tényező**. [16] [17] Ami függ a vizsgált anyag szerkezetétől valamint termodinamikai állapotától. [17] Megadja, hogy egységnyi vastagságú és felületű rétegen mennyi hő halad át, 1 K hőmérséklet különbség hatására időegység alatt. [18] A hővezetőképesség fordítottan arányos a hőszigetelő képességgel, vagyis minél kisebb az értéke, annál jobb a hőszigetelő képessége az adott anyagnak, szigetelésnek. [2]

Általában a nagy sűrűségi értékek magas hővezető képességet jelentenek számos természetes rost esetében, mint például bambusz, jutaszál. Egyes anyagok esetében viszont a sűrűség növekedése alacsony hővezető képességet eredményez. Ezt a jelenséget a juhgyapjú, toll, szintetikus polimer szálakat illetően figyelték meg. [19]

A vizsgálat körülményei és kivitelezése:



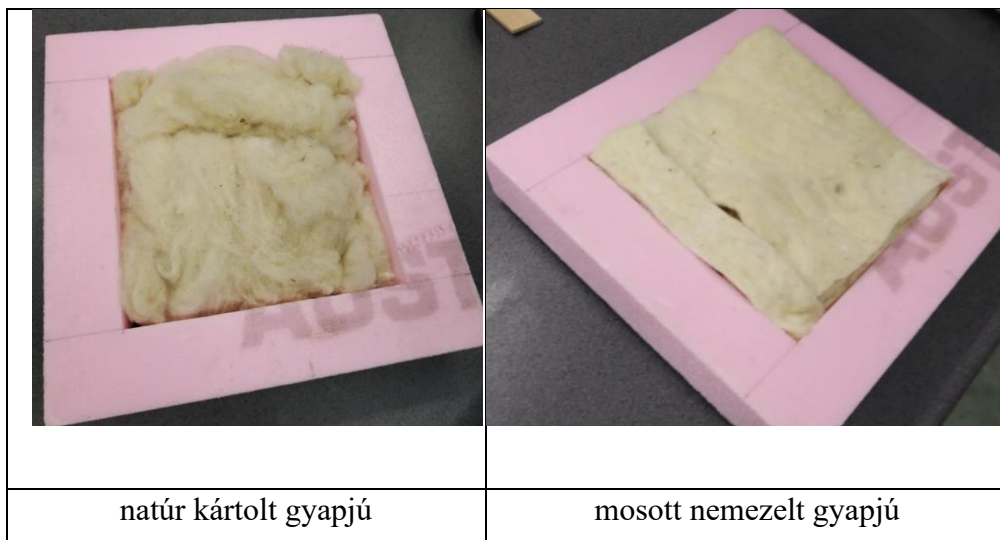
11. ábra Rapid k hővezetőképesség mérőműszer [saját felvétel]

A vizsgálatokhoz Rapid k hővezetőképesség mérőműszert használtam, amelyen minden egyes mérés megkezdése előtt beállításra került az alsó és felső lap hőmérséklete, ami kb 5 és 15°C fok volt, úgy hogy a ΔT értéke 10 körül legyen. Az alkalmazott berendezés működése síklapos módszeren alapul és hőfluxus elvén dolgozik. A mérés során a szigetelés mintákból

kb. 5 cm magas, 30 x 30 cm-es alapterületűek kerültek behelyezésre a két különböző hőmérsékletűre állított lap közé.

A mérés célja a natúr kártolt gyapjú és a mosott nemezelt gyapjú hővezetőképességének megállapítása és összehasonlítása a napjainkban gyakran használt szigetelőanyagok: kőzetgyapot és EPS (expandált polisztirol) hővezetőképességével.

A mérés során tapasztaltak:



12. ábra Hővezetőképességmérés -Natúr kártolt és mosott nemezelt gyapjú [saját felvétel]

2. táblázat Hővezetőképesség - mért adatok

Minta	alsó T [°C]	felső T [°C]	T átlag [°C]	ΔT	Hőfluxus [mV]	magasság [m]	k, korrekciós tényező [-]	R, hőellenállás [K/W]	λ, hővezetési tényező [W/mK]
EPS kalibrációs lap 60mm	3,4	12,8	8,1	9,4	0,13	0,05955	41,5	1,742354	0,0342
Kőzetgyapot 1.minta	3,8	13,8	8,1	10	0,14	0,064	41,5	1,72117	0,0372
Kőzetgyapot 2.minta	3	13	7,75	10	0,14	0,066	41,5	1,72117	0,0383
Gyapjú kártolt	3,3	12,5	7,75	9,2	0,15	0,048	41,5	1,477912	0,0325
Gyapjú nemezelt	3,1	12,5	7,8	9,4	0,15	0,048	41,5	1,51004	0,0318

A mérés során a berendezés elsőként a hőfluxust (j_Q) állapítja meg multiméter segítségével mV-ban, amiből a k -korrelációs tényező és a ΔT együttesével kiszámoltam a hőellenállást (R). A k -korrelációs tényező értéke előre meghatározott, kalibrációs lapokon bemért értékek alapján adódó standard érték.

$$R = \frac{\Delta T}{j_Q * k} [K/W]$$

Ebből és a minták magasságából (**m**) pedig kiszámítottam a hővezetési tényezőt (**λ**).

$$\lambda = \frac{m}{R} [W/mK]$$

Megállapítható, hogy a kártolt és a nemezelt gyapjúra kapott mért hővezetési tényező eredmények között a különbség minimális, egy ezred sincs a két minta között. A nemezelt gyapjú értéke picivel alacsonyabb, ami jobb hőszigetelő képességet jelez, ami a sűrűbb szerkezetének köszönhető. Ha a gyapjúk mért hővezetési tényezőjét vetem össze az építőiparban gyakorta használt EPS és kőzetgyapot értékeivel, akkor arra a megállításra jutunk, hogy a gyapjú minták hővezetési tényezője 2-7 ezreddel alacsonyabb, vagyis kicsivel, de jobb hőszigetelő képességgel rendelkeznek, mint az EPS és kőzetgyapot.

2.4. Maradó alakváltozás:

A maradó alakváltozást a 13. ábrán látható eszközzel mérjük. Ezt sokszor gumiiparban alkalmazzák, hogy az adott elasztomer mennyire képes visszanyerni eredeti alakját, vastagságát a nyomófeszültség megszűnése után. A mintákat 2 sík, egymással párhuzamos rozsdamentes acéllap közé helyezik, amik között adott vastagságú távtartók találhatók és meghatározott ideig bizonyos hőmérsékleten tartják. A kérdés azaz, hogy elveszíti-e az anyag azt a képességét, hogy visszatérjen eredeti alakjába és vastagságához, a feszültség megszűnése után. Ez az adott anyag hosszútávú teljesítőképességét jellemzi. [20]

A vizsgálat körülményei és kivitelezése:



13. ábra Maradó alakváltozást mérő eszköz [saját felvétel]

A vizsgálathoz natúr kártolt és mosott nemezelt gyapjút használtam. Az első mérés során normál körülmények között, szoba hőmérsékleten (20°C) mértem meg a kb. 1 cm vastag, kétféle gyapjú mintát, melyeket a 0,5 cm-es magas távtartókkal ellátott acél lapok közé

helyeztem be 1 hétre. A második mérés során 1 hétre, 60°C-ra szárítószekrénybe helyeztem a mérőeszközt a mintákkal, ezzel imitálva pl. nyáron egy padláson előforduló hőmérsékletet. A mérések célja a két féle gyapjúminták maradó alakváltozásának meghatározása és összehasonlítása két különböző környezeti állapotban.

A mérés során tapasztaltak:

3. táblázat Maradó alakváltozás mérési eredményei

1. mérés _ T = 20°C, 1 hét				
Minta	Kezdeti vastagsága [mm]	1 hét utáni vastagsága [mm] (közvetlenül)	Maradó alakváltozás [%]	1 hét utáni vastagsága [mm] (1 óra eltelté után)
kártolt	9,83	9,80	0,3 %	9,81
nemezelt	10,1	8,71	15,4 %	9,53
2. mérés _ T = 60°C, 1 hét				
kártolt	9,79	5,0	48,9 %	5,3
nemezelt	10,3	5,4	47,5 %	5,8



14. ábra Maradó alakváltozás mérése kártolt és nemezelt gyapjún

A normál körülmények között, szoba hőmérsékleten (20°C) mért eredmények esetében a natúr kártolt gyapjú tekintetében változás, maradó alakváltozás nem igazán történt, a laza, levegős, rugalmas szerkezetének köszönhető. Ezzel szemben a nemezelt mintát az eszközből kivéve és közvetlenül megmérve vastagsága nagyjából 15 %-ot csökkent. 1 óra elteltével, regenerálódás után viszont majdnem visszaváltozott eredeti méretére ez is.

A 60°C-on tartott minták esetében már nincs ilyen nagymértékű eltérés a laza szerkezetű kártolt és tömörebb nemezelt gyapjú között. Mind a kettőnek közel 50 %-al csökkent a vastagsága, és 1 órás regenerálódás után sem sokkal változott a visszamért vastagsági értéke. Ezen

eredmények szempontjából az anyag tömörödött, ami nem feltétlenül pozitív a gyapjúra nézve, ha szigetelő anyagként szeretnénk alkalmazni, mert esetleg a saját súlya alatt is tömörödhet.

2.5. Éghetőség:

A természetes rostok közül, a keratinból felépülő gyapjú az egyik legtűzállóbb (FR). Ezen tulajdonsága a nedvességtartalmának (12-18 %), magasabb nitrogéntartalmának (15–16%), a szerkezetében jelenlévő kénnek (3–4%) és az alacsony hidrogéntartalmának (6–7%) köszönhető. Mindezek mellett viszonylag magas a gyulladási hőmérséklete és az oxigén indexe (LOI) 25-28. A 21% vagy az alatti LOI-értékű anyagok könnyen meggyulladnak és gyorsan égnek a levegőn, míg a 21-25%-nál nagyobb LOI-értékű szálak égésgátlónak és nem gyúlékonyak minősülnek. Egy szál LOI-ját úgy lehet befolyásolni, ha a szálát égésgátló bevonattal látjuk el. A gyapjúsálak tűzállóságának javítására számos adalékanyagot fejlesztettek ki, mint például a halogénezett vegyületek, funkcionális bevonatok (szerves foszfor- és nitrogéntartalmú monomerek vagy polikondenzátumok). A gyapjú nem gyullad meg olyan könnyen, önkioltó lánggal ég, és lágy disszipáló hamumaradványt képez, a szintetikus szálakkal szemben, amik csepegve égnek és kemény, olvadt polimer gyöngyöt képeznek. [21]

Egy szövet égésgátlását a szövet sűrűsége, a szövés szorossága, szerkezete és a felületkezelése is befolyásolja. A sűrűbb, kevesebb levegőt tartalmazó szövetek a legjobb égésállók, a laza, könnyű szerkezetű szövetekkel szemben. [21]

A vizsgálat körülményei és kivitelezése:

Az éghetőség mérése az **US-FMVSS 302**-es szabvány szerint történt, ami a vízszintes égési sebesség meghatározására használható. A mintát a *15.ábrán* is látható mérőkeretbe kell behelyezni. A keretet elülső szélétől 38 mm és 292 mm távolságra meg kell jelölni mérés előtt. Ezek után a 38 mm hosszú Bunsen-égő lángját a minta alá rakjuk 15 másodpercig. Az égő felső széle és a minta alsó része közötti távolságnak 19 mm-nek kell lennie. Ha a minta az égő eloltása után nem ég tovább, vagy ha a lángok nem érik el az első mérési jelet (38 mm), az égési sebesség 0 mm/perc. [22]

A két jelölés között, a láng égési idejét (az égési távolságot), vagy a láng első jelen (38 mm) való áthaladása és a minta kialvása közötti időt kell megmérni. Ha a minta kialszik, mielőtt a láng elérné a második jelet (292 mm), meg kell határozni az égési távolságot. [22]

Égési sebesség meghatározása:

$$B = \frac{s}{t} \quad [mm/perc]$$

ahol, $s \rightarrow$ „leégett távolság [mm]”

$t \rightarrow$ „égési idő [s]” az adott égési távolságon.

Az égési sebesség nem haladhatja meg a 102 mm/perc értéket. A 60 másodpercnél rövidebb égési idővel és 51 mm vagy annál kisebb égési távolsággal rendelkező minták az égési sebességtől függetlenül is megfelelnek ennek a szabványnak. [22]

A mérés során tapasztaltak:



15. ábra Mosott nemezelt gyapjú éghetősége [saját felvétel]

Az első mérés során a mosott nemezelt gyapjú, ami a *15.ábrán* is látható, 18 mp alatt aludt ki, és épp, hogy áthaladt az első jelölésen (38 mm), ami alapján a minta a szabványnak megfelel és nem számít éghetőnek. Ezzel szemben a *16.ábrán* szereplő, natúr kártolt gyapjú égési távolsága 150 mm volt, égési ideje pedig 2,02 perc, amiből az égési sebesség 1 percre levetítve $B = 74,3$ mm/perc. Mivel nem haladja meg a 102 mm/perc felső határt, így ez a minta is megfelel a szabványnak.

A kártolt gyapjú egyrészt azért éghetett időben tovább és távolabb, mert lazább szerkezetű, ezáltal több levegő tárolására képes. Másrészt mivel csak előmosott volt így nagyobb százalékban tartalmazott lanolint, mint a „többször” mosott nemezelt gyapjú, amit a FTIR felvételek is bizonyítanak. Az irodalmat alátámasztotta a mérés, mivel a sűrűbb szerkezetű nemezelt gyapjú jobban ellenállt a tűznek, mint a laza szerkezetű natúr kártolt gyapjú.



16. ábra Natúr kártolt gyapjú éghetősége [saját felvétel]

Konklúzió

Dolgozatomban a gyapjú, mint természetes polimer szigetelőanyagként való alkalmazhatóságának vizsgálatával foglalkoztam. Kutatómunkám során húsbirkaként tartott állat gyapját (Merino) használtam, melyet több különböző állapotban alkalmaztam, mint natúr vágott gyapjút, natúr farkasolt gyapjút, natúr kártolt gyapjút, és mosott nemezelt gyapjút. A fő kérdés az volt, hogy a gyapjún elvégzett vizsgálatok eredményei alapján használható-e a ez a fajta gyapjú hőszigetelő anyagként vagy sem. Az elvégzett tesztek során: FTIR, nedvességtartalom, hővezetőképesség, maradó alakváltozás és éghetőség mérésére került sor. Melyek közül a hővezetőképesség esetén két napjainkban is használt szigetelőanyag: az expandált polisztirol (EPS) és a kőzetgyapot mért adatait összevettem az általam felhasznált gyapjúéval. A mérési eredmények alapján a gyapjú, legyen az nemezelt (0,0318 mV) vagy kártolt (0,0325 mV), hővezetési tényezője szinte megegyezik az építőiparban használt EPS (0,0342 mV) és kőzetgyapot lapokkal (0,0372 mV és 0,0383 mV), csupán pár ezredes eltérés észlelhető.

Éghetőségét tekintve mindkét gyapjú minta (nemezelt, kártolt) megfelelt a szabványnak, ami szerint a gyapjú nem számít éghetőnek. A mosott nemezelt gyapjú megfelelt, mivel 60 mp-nél rövidebb égési idővel és 51 mm-nél kisebb égési távolsággal rendelkezett, ugyanis 18 mp alatt elaludt és épp, hogy áthaladt az első jelölésen (38 mm). A kártolt gyapjú égési távolsága 150 mm, égési ideje pedig 2,02 perc volt, ebből pedig égési sebessége 74,3 mm/perc. Mivel nem haladta meg a 102 mm/ perces felső határt, így megfelelt a szabványnak. A kártolt gyapjú lazább szerkezete és magasabb lanolin tartalma miatt éghetett tovább. Ezek alapján ajánlatos lenne valamilyen égésgátló adalékot, bevonatot alkalmazni. A kártolt gyapjú felületén található lanolin tartalmat a FTIR-méréssel is alátámasztottam. Ezzel szemben a nemezelt gyapjú felülete lanolin helyett szappan maradványt (kalcium-sztearátot) tartalmazott a FTIR-mérések alapján.

A leginkább javítandó tulajdonsága a gyapjúnak a maradó alakváltozása. Ugyan szobahőmérsékleten (20°C) a kártolt gyapjú maradó alakváltozása elhanyagolható, de nemezelt gyapjúé már 15 % feletti volt. 60°C-os hőmérsékleten pedig mind a két minta közel 50%-ra tömörödött össze nyomás hatására, ami nyári időszakban előfordulhat egy padlástetőn, így ez nem túl pozitív a gyapjú szigetelésként való használatára nézve.

A kapott eredmények láttán, arra a következtetésre jutottam, hogy ahhoz, hogy a gyapjúból belső/ tető szigetelés készüljön még számos más, alátámasztó és összehasonlító mérést kellene

elvégezni. Érdeemes lenne például több különféle birka gyapját is megvizsgálni, azon belül pedig a kártolt és nemezelt gyapjú esetében megmérni a hővezetőképességet különböző tömörítések mellett illetve különböző vívőanyagokkal komplett szigetelések is össze lehetne állítani kártolt/nemezelt gyapjúval. Vívőanyagként akár újrahasznosított csomagolópapírt, csomagoló kartont is lehetne használni. A maradó alakváltozás esetén a javítási célból a gyapjút lehetne keverni pamut textil hulladék rostokkal is akár. Továbbá azt is meglehetne vizsgálni, hogy milyen kezelési eljárásokkal lehetne hosszabb élettartamúvá tenni a gyapjút (pl, rovar rágás, tűzvédelem), úgy, hogy az élettartama végén még komposztálható legyen.

Az elvégzett vizsgálatok tehát további kérdéseket vetnek fel, melyeket a jövőben még meg lehet vizsgálni.

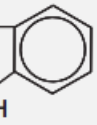
Irodalomjegyzék:

- [1] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, and F. Asdrubali, "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 988–1011, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.05.045.
- [2] Thomas Königstein, "Thomas Königstein - Az Energiatakarékos Építkezés Kézikönyve," 2006.
- [3] S. Hetimy, N. Megahed, O. A. Eleinen, and D. Elgheznawy, "Exploring the potential of sheep wool as an eco-friendly insulation material: A comprehensive review and analytical ranking," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 39, p. e00812, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.SUSMAT.2023.E00812.
- [4] "SOLENA gyapjúszigetelések." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://webaruhaz.valyogvakolat.hu/gyapjuszigeteles>
- [5] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, and S. Schiavoni, "A review of unconventional sustainable building insulation materials," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 4, pp. 1–17, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.SUSMAT.2015.05.002.
- [6] M. Vasina, P. Straznický, P. Hrbáček, S. Rusnakova, O. Bosak, and M. Kubliha, "Investigation of Physical Properties of Polymer Composites Filled with Sheep Wool," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 5, Mar. 2024, doi: 10.3390/POLYM16050690.
- [7] Radnóti Imre, *Szálanyagok és fonalak kézikönyve*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1967.
- [8] A. S. S. P. A. K. Vinod Kadam, *ICAR-CSWRI, Avikanagar & MANAGE, Hyderabad Sheep Wool & Mutton: Production and Value Addition*. 2021.
- [9] M. G. Huson, "Properties of wool," *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*, pp. 59–103, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-101272-7.00003-1.
- [10] S. Rani, S. Jose, N. M. Rose, and S. Yadav, "Chemical and physical properties of wool," *The Wool Handbook*, pp. 239–254, Jan. 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-99598-6.00014-1.
- [11] "Magyar Néprajzi Lexikon /." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <http://mek.niif.hu/02100/02115/html/2-777.html>
- [12] "Infravörös spektroszkópia." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kemia7/www/ch04s02.html>
- [13] A. Dutta, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy," *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*, vol. 2, pp. 73–93, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-46140-5.00004-2.
- [14] "Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia – Wikipédia." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: https://hu.wikipedia.org/wiki/Fourier-transzform%C3%A1ci%C3%B3s_infrav%C3%B6r%C3%B6s_spektroszk%C3%B3pia
- [15] "aboni Mess- und Automatisierungstechnik." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://aboni.de/hu/startseite-magyar/>
- [16] "Hővezetési tényező – Wikipédia." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: https://hu.wikipedia.org/wiki/H%C5%91vezet%C3%A9si_t%C3%A9nyez%C5%91

- [17] Gróf Gyula, "Gróf Gyula - Hőközlés jegyzet." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://doksi.net/hu/get.php?lid=3991>
- [18] M. T. N. E. S. G. Beleznay Ferenc, *Fizikai kislexikon könyv*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1977.
- [19] T. O. Dénes *et al.*, "Analysis of Sheep Wool-Based Composites for Building Insulation," *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 2109, vol. 14, no. 10, p. 2109, May 2022, doi: 10.3390/POLYM14102109.
- [20] "Montech CS 3000 Maradó alakváltozást mérő készlet | INTESZT Méréstechnika Kereskedelmi és Szolgáltató Kft." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.inteszt.hu/adatlap/muanyag-es-gumivizsgalat/gumivizsgalo-eszkozok/kemenyseg-es-suruseg-merok/montech-cs-3000-marado-alakvaltozast-mero-keszlet>
- [21] J. M. Cardamone, "Flame resistant wool and wool blends," *Handbook of Fire Resistant Textiles*, pp. 245–271, Jan. 2013, doi: 10.1533/9780857098931.2.245.
- [22] LANXESS Corporation, "Technical Information Semi-Crystalline Products Assessment of the fire behavior of automotive components Automotive fire classification for LANXESS Thermoplastics," 2011. [Online]. Available: <http://us.durethan.com>
- [23] "keratin." Accessed: Nov. 11, 2024. [Online]. Available: https://www.vilaglex.hu/Kemia/Html/Keratin_.htm

Mellékletek:

Table 3.1 Amino acid composition of Merino wool

Amino acid	Amino acid content ^a	Side group	Nature of side group
Glycine	8.4	—H	Aliphatic hydrocarbon
Alanine	5.4	—CH ₃	Aliphatic hydrocarbon
Valine	5.6	—CH(CH ₃) ₂	Aliphatic hydrocarbon
Leucine	7.7	—CH ₂ •CH(CH ₃) ₂	Aliphatic hydrocarbon
Isoleucine	3.1	—CH(CH ₃)•CH ₂ •CH ₃	Aliphatic hydrocarbon
Phenylalanine	2.9	—CH ₂ •C ₆ H ₅	Aromatic hydrocarbon
Serine	10.4	—CH ₂ •OH	Hydroxyl
Threonine	6.4	—CH ₂ (OH)•CH ₃	Hydroxyl
Tyrosine	3.8	—CH ₂ •C ₆ H ₄ OH	Hydroxyl
Aspartic acid ^b	6.5	—CH ₂ •COOH	Acidic
Glutamic acid ^c	11.9	—CH ₂ •CH ₂ •COOH	Acidic
Lysine	0.9	—CH ₂ •CH ₂ •CH ₂ •CH ₂ •NH ₂	Basic
Arginine	6.9	—(CH ₂) ₃ •NH•C(NH)NH ₂	Basic
Histidine	2.9	$ \begin{array}{c} \text{N=CH} \\ \\ \text{—CH}_2\text{—C=CH—NH} \end{array} $	Basic
Methionine	0.5	—CH ₂ •CH ₂ •S•CH ₃	Sulfur containing
Cystine	10.3 ^d	—CH ₂ •S•S•CH ₂ —	Sulfur containing
Tryptophan ^e	0.5	$ \begin{array}{c} \text{—CH}_2\text{—C} \\ \\ \text{CH} \\ \\ \text{NH} \end{array} $ 	Heterocyclic
Proline	6.6	$ \begin{array}{c} \text{—CH}_2\text{—} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{—CH}_2\text{—} \end{array} $	Heterolytic

17. ábra Merino gyapjú aminosav összetétele [9]