

Pásztory Zoltán

Hőszigetelés fejlesztési lehetőségek könnyűszerkezetes faházak számára

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:
Dr. Winkler András
intézetigazgató egyetemi tanár

Nyugat-Magyarországi Egyetem

2007

Hőszigetelés fejlesztési lehetőségek könnyűszerkezetes faházak számára

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

Pásztory Zoltán

Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem
Cziráki József Doktori Iskola Fa és Fastechnológia
Tudományok program keretében

Témavezető:

Dr. Winkler András

Elfogadásra javaslom (igen/nem)

.....

(aláírás)

A jelölt doktori szigorlaton%-ot ért el.

Sopron

.....
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Első bíráló (Dr.) (igen/nem)

.....
(aláírás)

Második bíráló (Dr.) (igen/nem)

.....
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el.

Sopron

.....
a Bíráló bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése:

.....

.....
Az EDT elnöke

Tartalomjegyzék:

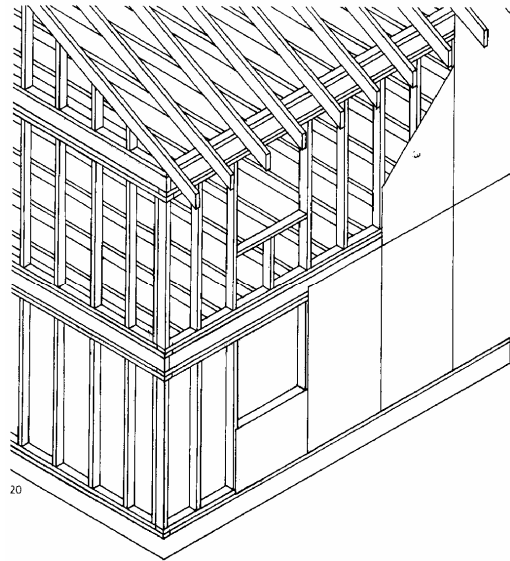
1. Bevezetés, a tudományos munka célja	4
1.1 Könnyűszerkezetes faház.....	4
1.2 Energetikai szabályozások	5
1.3 Szigetelés hatékonysága és jelentősége	6
2. Tudományos alapok: Mi a hő?	9
2.1 A „hőmozgás”	9
2.2 A hő terjedés formái	10
2.2.1 Hővezetés	10
2.2.2 Konvekció	11
2.2.3 Hősugárzás	12
2.3 Hőátadási tényező	14
2.4 A hőszigetelés javítási lehetőségeinek tudományos elemzése	15
2.4.1 A konvekció csökkentése	15
2.4.2 A sugárzás csökkentése	17
2.4.3 A hővezetés csökkentése	18
2.5 Vákuumtér	19
2.5.1 A vákuum és a hővezető képesség közti összefüggés feltárása	20
2.6 A levegőnél gyengébb hővezetési tényezővel rendelkező gázok	25
2.7 A vizsgált téma helyzete	27
3. Hővezetési tényező mérése.....	28
3.1 Anyagok és módszer	28
3.2 Hővezetési tényező mérése Holometrix típusú hőárammérő berendezéssel.....	29
3.3 Hővezetési tényező mérése Holzbau Holten hővezetési tényező mérő berendezéssel	31
4. Tükörpanel.....	32
1. fázis	34
2. fázis	35
3. fázis	36
4. fázis	39
5. fázis	40
6. fázis	41
4.1 A kísérletsorozat értékelése	43
5. Vákuumpanel.....	46
5.1 Szilárdsági méretezés.....	49
5.1.1 Lemez-fólia tapadási szilárdság	49
5.1.2 Alátámasztási közők méretezése	51
5.1.3 Alátámasztó elem méretezése	54
5.1.4 Keret teherbírása	56
5.2 Légzárási feladatok	57
5.3 A vákuumpanel hővezetési tényezőjének mérése.....	58
6. Összefoglalás.....	62
6.1 Tükörpanel	63
6.2 Vákuumpanel	65
7. Tézisek	67
Irodalomjegyzék:	68
A dolgozat története, köszönetnyilvánítás	72
1. melléklet.....	76
2. melléklet.....	77
3. melléklet.....	78
4. melléklet.....	79

1. Bevezetés, a tudományos munka célja

1.1 Könnyűszerkezetes faház

Mindenek előtt szeretném megmagyarázni a címet és kifejtetni, hogy a dolgozat milyen területen és szinten kívánja azt kitölteni.

A könnyűszerkezetes házakon értem azokat az épületeket, amelyek adott osztásközzel bíró favázszerkezettel rendelkeznek. Ez a vázszerkezet mindkét oldalról burkolt –függetlenül a burkoló anyagtól– és a vázköz szigetelő anyaggal van kitöltve. (1.ábra) Ha ezen túlmenően bármilyen pótlólagos szigetelés vagy más kiegészítés van a szerkezeten az nem rekeszti ki az épületet az általam vizsgálni kívántak köréből. A piacon számos változata fordul elő az ilyen fa vázra épített szerkezet típusoknak. A vizsgálataim szempontjából mindegy hogy nagypanelos, kispanelos, helyszínen szerelt "platform-" vagy "ballon-frame" szerkezetű, mindegy hogy a vázszerkezet OSB lappal, cementkötésű forgácslappal, gipszrost lemezzel vagy valami más fajta lemezzel burkolt. Számomra a lényeges részt a lemezelt vázköz jelenti, amit az elsődleges vizsgálati területnek jelöltem ki.



1.ábra

Az ilyen típusú házak tömegesen a 18-19. században terjedtek el Észak-Amerikában, annak ellenére, hogy Európában már korábban is építettek ilyen szerkezeteket. Talán érthető is, hiszen az említett időszakban rendkívül nagy lakásigény támadt a sok bevándorló és a felfutó gazdaság miatt. Faanyag nagy mennyiségben állt rendelkezésre, nagyon gyorsan és a többi szerkezethez képpes olcsón volt felépíthető. Hozzá kell tenni, hogy az akkoriban épített könnyűszerkezetes házak sem élettartamban, sem stabilitásban nem érték el a kőházak vagy a gerendaházak színvonalát. Gazdasági szempontból viszont verhetetlenek voltak. Nyilvánvalóan azóta is ez a szempont tartja életben a tengerentúlon, sőt Nyugat-Európai és hazai terjedését is segíti. Ezért találok én is érdemesnek foglalkozni a könnyűszerkezetes házakkal, és fejleszteni ezt a bevált típust. Természetesen vannak hátrányai a szerkezetnek, melyek kiküszöbölése nagyobb odafigyelést kíván, de sokszor nem ezek a kérdések, hanem az emberi előítélet, a berögződött szokások állítanak gátat a szerkezet számára.

Leggyakoribb felvetés a csekély hőtároló képesség: valóban a szerkezet nem tartalmaz akkora anyagtömeget mint a korábbi téglá vagy vályog házak. Ma az általánosan használt folyamatos fűtési rendszerekhez a felületképzést biztosító cementkötésű forgácslap vagy OSB lemez esetleg gipszkartonnal kiegészítve biztosítani tudják a hőtárolási igényt. A kemény előítélet miatt sajnos keveseket győz meg Szabó Péter disszertációjában [Szabó P. 2001.] levezetett számítás, ami a jelenlegi könnyű téglákkal (Porotherm) és falazóblokkokkal (Ytong) állítja szembe ezt a szerkezetípust. Bizonyítva, hogy a napi periódusú hőtárolási funkciókat a könnyűszerkezetes házak esetenként (rétegtől függően) jobban kielégítik a

könnyű falazó elemeknél. Talán a jövőben a gazdasági szempont és a szerkezet fejlődése tovább gyengíti a sztereotípiákat.

1.2 Energetikai szabályozások

A házépítések kapcsán sem tudjuk függetleníteni magunkat a gazdasági környezettől. Az elmúlt néhány tíz év jelentős változásokat hozott a házépítések terén az elmúlt évszázadokhoz képest. A korábbiakkal szemben előtérbe került a gazdaságosság kérdése úgy az építés mint az üzemeltetés terén. A világ energiafogyasztásának 45%-át teszi ki az épületek üzemeltetése, míg a felépítésük csak 5%-ot [Zöld A. 1999.] [P. Marsh 1984.]. Ennek a ténynek az energiaárak kapcsán való figyelembe vétele nyilvánul számos Nyugat- és Észak-Európai országban, illetve az Európai Unióban hozott, épületek hőtechnikai jellemzőire vonatkozó előírásban. Ilyen előírások:

1975-ben Svédországban a fűtésre fordított energia megtakarítására vonatkozó rendelet az SBN 75, ami a szerkezetek hőátbocsátási tényezőit maximálta: $k_{\text{Fal}}=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_{\text{Födém}}=0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_{\text{Padló}}=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, $k_{\text{Ablak}}=2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ [Informationsdiens Holz 2000.].

A folyamat más Nyugat-Európai országban is lendületet vett és ma is erőteljesen tart [O. Humm 2000.]. Németországban az egyre szigorúbb előírásokat tartalmazó rendeletek eredményeként az 1979-es 260 kWh/m^2 -es éves átlag energiaszükségletről 1984-re már az ország lakóépületeinek az átlaga 190 kWh/m^2 -re, 1995-re pedig 180 kWh/m^2 -re csökkent. Az 1995-ben bevezetett Wärmeschutzverordnung (WSVO) rendeletben szereplő előírások 165 kWh/m^2 -nek felelnek meg [Informationsdiens Holz 2000.]. A svéd SBN 75 előírás már akkor $60\text{-}80 \text{ kWh/m}^2$ -es értéket adott. A Németországban életbe lépő Energieeinsparverordnung (EnEV) még az eddigi WSVO-nál 30%-al alacsonyabb értékeket tartalmazott [DIN 4108].

A hazai előírásokban az Unióba való integrálódást mutatja az Európai Parlament által 2002/91 EK irányelvek bevezetése. Az új háromszintű energetikai szabályozás Magyarországon is szigorúbb feltételeket állít az épületek számára, mint a korábbi szabályozások [Zöld A. 2005].

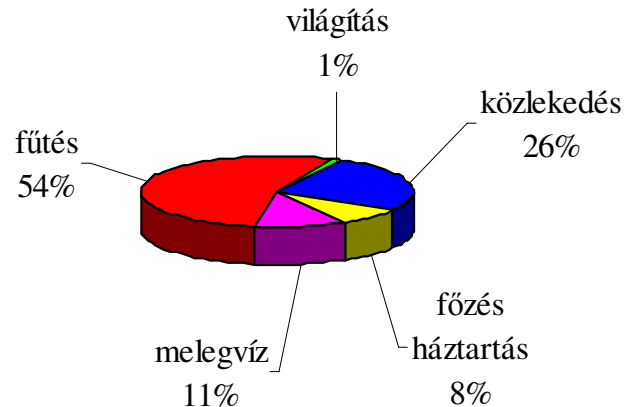
Az előírások kényszerítenek az egyre kevesebb energiát fogyasztó épületek építésére, de az előírásokon túl az sem közömbös, hogy egy-egy tél milyen mélyen nyúl bele az üzemeltető zsebébe. A pillanatnyi helyzeten felül célszerűnek látom annak a figyelembe vételét, hogy a jövőben sem lehet energiaár csökkenésre számítani. Az előrejelzések szerint a mai energiaigény kb. 80%-át kitevő fosszilis energiahordozók ebben a században (vagy a következőben) elfognak. Ezért aki(k) nem készülnek fel ennek a várható eseménynek a bekövetkezésére akár kollektív (állami) akár egyéni szinten azokat váratlanul érheti az energiaárak meredek emelkedése, és többet kényszerülnek költeni rá mint amennyit terveztek. Ennek a trendnek a megértéséhez jó példa a 2006-2007-ben bekövetkezett haza gázár emelés, ami csak a világpiaci árakhoz való közeledést jelentette. Az esetleges világkrízisek az olajtermelő országok részvételével szintén kellemetlen irányban mozdíthatják az energiahordozók árát.

Nem szabad elfelejtkezni arról sem, hogy mit fogunk energiaforrásként használni akkor, ha a szén és kőolaj források kimerülnek, de ehhez a kérdéshez a felvetésen túl nem szeretnék többet hozzátenni.

1.3 Szigetelés hatékonysága és jelentősége

Az említett okokból csökkenteni kell az épületek üzemeltetésére fordított energiafelhasználást, úgy hogy a kényelmi szint megmaradjon, vagy inkább emelkedjen. A diagram a lakosság energiafogyasztását mutatja a felhasználási területek megoszlásában Magyarországon (2.ábra). Az éves energiafelhasználás több mint felét fűtésre használjuk [Zöld. A. 1999.]. Azonos részarányú megtakarítás itt jelentkezne a legnagyobb abszolút értékű energiamennyiséggel.

2.ábra A lakosság energiafelhasználása Mo.-on. (Forrás: Zöld András Energiatudatos építész)



Az épületek "hosszú" élettartama miatt a cserélődésük igen lassú, vagyis ha egy épületet 100, de legalább 50

évre terveznek vagy terveztek, akkor az 50 évvel ezelőtti tervek a mai energia helyzetet még nem vehették figyelembe. Nekünk viszont a lehetőségeinkhez képest figyelembe kellene venni az 50 vagy 100 év múlva jelentkező igényeket, mert utólagosan megváltoztatni az épület hőtechnikai tulajdonságait nagyon körülményes és drága. Vannak olyan számítások amelyek a reális építési költséget optimalizálják az épület élettartamának és üzemeltetési költségének figyelembe vételével. Az ilyen számításokban tudnunk kellene a jövőbeni energia költségeket, melyeket ma csak becsülni tudunk. Ha gondolatban előre megyünk 50 évet és ott elképzeljük a ma épített épületet, vajon mennyire fogja az, az akkori igényeket kielégíteni? Ugyanakkor mennyibe kerülne ma olyan épületet építeni, ami 50 év múlva is gazdaságosan üzemeltethető vagy az 50 év múlva érvényes előírásoknak is megfelel. Véleményem szerint a várható energiaár emelkedést az egyéb kellemetlen hatásokkal járó, de fűtési szempontból mintha kedvezőnek tűnő globális felmelegedés sem fogja számottevő módon mérsékelni. A tervezés során ilyen kérdéseket is célszerű figyelembe venni.

Többek között a VTT (VTT Technical Research Centre of Finland) intézetben is folynak ilyen irányú kutatások, a vizsgálatok során még a globális felmelegedés várható mértékének hatásait is igyekeznek figyelembe venni.

Szerencsémre a dolgozatomban nem ezt és hasonló kérdéseket szeretném megválaszolni, mert még ha meg is próbálnám, a világgazdaság menetének ingatagsága miatt, valószínűleg a számításaim néhány év múlva elveszítenék a realitásukat.

A disszertációmban azt a kérdéskört vizsgálom meg, hogy a könnyűszerkezetes faházak falszerkezetében (nem zárom ki hogy más szerkezet esetén is alkalmazhatóan) milyen lehetőségeim vannak a jelenlegi általánosan alkalmazott szigetelési rendszerek fejlesztésére. Itt a falszerkezet hőszigetelő képességének javítási lehetőségeire gondolok. Nem kívánok gazdasági számításokba belemenni, pusztán a mérnöki, műszaki lehetőségeim keretein belül, arra kísérletet tenni, hogy a jelenleg általánosan használt szigetelési rendszerrel hatékonyabbat készítsék.

A jelenleg könnyűszerkezetes házak esetén általánosan alkalmazott szigetelési értéknél (0,23-0,35 W/m²K) jobb a jelenleg alkalmazott szigetelő anyagokkal csak olyan magas többlet költséggel lenne megvalósítható, hogy az pillanatnyilag esetleg "nem éri meg". Ennek magyarázata abban a fizikai jelenségben van, hogy egy rosszabb hőszigetelő képességű falszerkezet (1,2-1,5 W/m²K) esetén további akár csak 1-2 cm vastagságú szigetelés beépítése rendkívül nagy, akár 100%-os szigetelő képesség javulást is eredményezhet. Egy viszonylagosan jó szigetelő képességű fal esetén (0,2-0,3 W/m²K) ugyanez a 1-2 cm jelentéktelen hő megtakarítást eredményez, pedig a beruházási költségei ugyanazok. A falak hőátbocsátási tényezőjének számítási képlete egy hiperbola függvényt mutat:

$$U = \frac{1}{\alpha_i + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \alpha_e}$$

α_i belső felületi hőátadási tényező, (dimenzió nélküli szám);

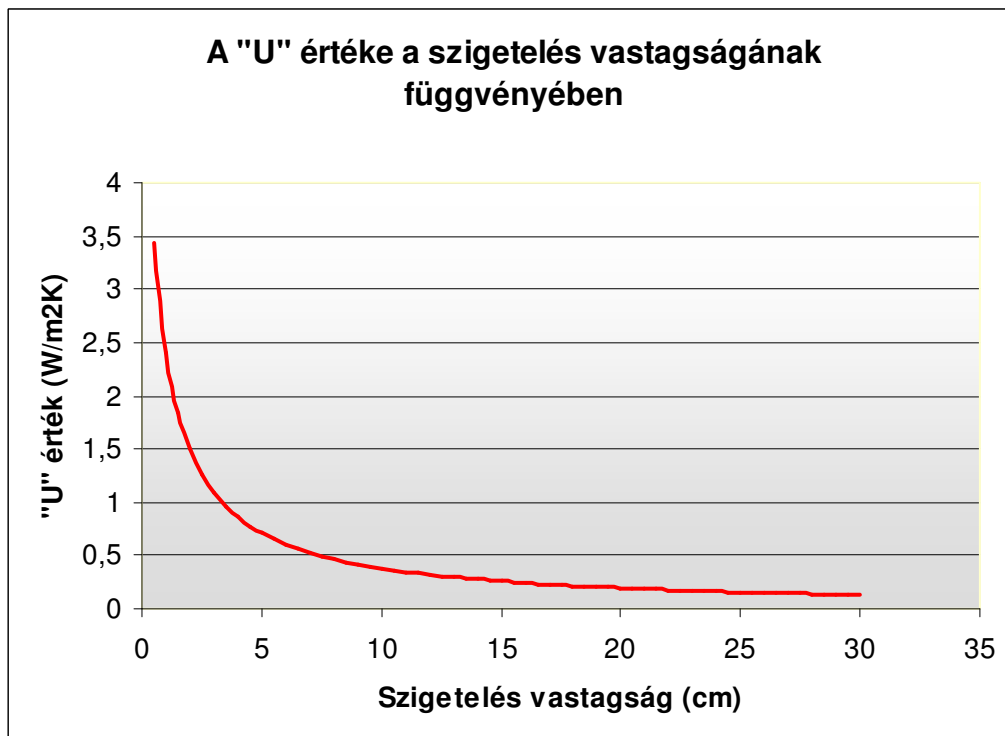
α_e külső felületi hőátadási tényező, (dimenzió nélküli szám);

λ az anyag hővezető képessége (W/mK);

δ az adott réteg vastagsága (m);

k hőátbocsátási tényező (W/m²K);

Függetlenül attól hogy a nevezőben konstansok is szerepelnek a változó a δ is itt van, ezért az egységnyi δ változásra jutó hőátbocsátási tényező változás nem lineárisan, hanem hiperbola mentén változik. Ezért nem mindegy hogy a függvény mely pontján építem be a már említett 1-2 cm további szigetelést. Minél alacsonyabb az U tényezőm annál "kevésbé" mutatkozik meg a további szigetelés hatása, tehát hogy jobban érvényesüljön nagyobb vastagságot kell beépítenem, ez viszont nagyobb költséget is von maga után, ami viszont a megtérülést teszi hosszabb időigényűvé vagy akár kétségesé.



3.ábra

A 3. ábrán látható hogy 5-7 cm-es szigetelő anyag vastagságig minden egyes centiméter igen jelentős U tényező csökkenést eredményez. 10-15 cm felett ennek az ellenkezője mondható el, szinte alig észrevehető a változás a U tényezőben. A jelenlegi szigetelő anyag és energiaárak mellett általában nem érdemes 15 cm-nél nagyobb vastagságú szigetelést alkalmazni. Ha azonban tudnánk olyan szigetelést készíteni, ami jóval kisebb hővezetési tényezővel (λ) bírna és az ára sem szökne az égbe, akkor elképzelhetőnek tartom, hogy a jelenlegi szokványos értékeknél jobb, akár $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ alatti hőátbocsátási tényező is elérhető, jelentősebb falvastagság növekedés nélkül.

Ezen okból adódóan szeretnék kísérletet tenni olyan szigetelési rendszer készítésére, amely nagyobb hőellenállással bír (azonos vastagság mellett), mint a jelenleg használt hab és szálal anyagok. Ha ez sikerül, akkor számos további kérdés vetődik fel – melyekre ez a disszertáció csak részben kíván választ adni – amelyek ahhoz szükségesek, hogy valóban működő rendszeré válhasson.

A 2. fejezetben a hő, mint fizikai fogalom jellemzőit szeretném áttekinteni, hogy a terjedési formáit feltárva keressem annak a lehetőségét, milyen módon tudom korlátozni a mozgását. Elméleti levezetésekkel igyekszem megkeresni azokat a lehetőségeket, amelyekkel fékezni lehet a terjedését.

A 3. fejezet a mérési módszereket és berendezéseket mutatják be. Az elméletekkel összhangban lévő, és azokat alkalmazó szerkezeteket terveztem és azokat vizsgáltam a 4-5. fejezetekben.

A legvégén 6. fejezetben megpróbálok néhány megállapítást tenni a végzett munka eredményeivel kapcsolatban.

A szigetelési hatékonyság növelés mellett természetesen jelentős fejlesztési lehetőséget tartalmaznak az aktív és passzív szolár építészeti megoldások, ahol elsősorban a napsugárzás energiájának a befogása a cél az épület fűtés céljára. Ezen szakterületen kiemelkedő szakemberek dolgoznak a Budapesti Műszaki Egyetem Épületfizikai Laboratóriumában. Mindkét irányt fontosnak tartom.

A könnyűszerkezetes házak esetében felvetődik a kérdés „mi van a hőhidakkal”. Ezen területet is kiemelkedően fontosnak tartom, de a dolgozat keretein belül nem foglalkozom velük.

2. Tudományos alapok: Mi a hő?

A XIX. század közepéig tartotta magát az a régi elmélet, hogy a hő egy különleges súlytalan és láthatatlan tapintható folyadék un. hőanyag (flogiszton), amely a jobban felmelegített testről a kevésbé felmelegített testre folyik. E nézet mellett már a XVI. századtól párhuzamosan létezett egy néhány tudós által képviselt gondolat a hőről. Ez a látás egészen közel volt a valósághoz, talán csak az volt a probléma, hogy csak a kisebbség képviselte.

Francis Bacon a *Novum Organum* című könyvében [F. Bacon 1620.] [J. Spedding 1863.] azt állította: „A hő lényegét tekintve nem más mint maga a mozgás... A hő a legkisebb részecskék változó mozgásából áll.”

Robert Hook a *Mikrografia* című könyvében [R. Hook 1665.] azt írja „A hő a test részeinek szakadatlan mozgása... Nincs olyan test, melynek részei nyugalomban lennének.”

A flogiszton elméletet a nagy orosz tudós Lomonoszov 1745-ben megjelent „Gondolatok a meleg és hideg okairól” című művében [M. Lomonozov 1745.] végleg elveti, azt mondja, hogy „a hő az anyag részecskéinek belső mozgásából ered”.

Rumford a XVIII. század végén azt is hozzáteszi: „a test annál melegebb minél intenzívebben mozognak a részecskék, melyből az felépül, ahhoz hasonlóan, ahogy a harang annál hangosabban kong minél erősebb a rezgése”.

Ezzel a megállapítással meg is érkeztünk a hő tömör lényegének megfogalmazásához.

Az 1800-as évek közepén Brown angol botanikus meg is figyelte mikroszkóp alatt azt a mozgást, amiről a fenti tudósok is gondolkodtak. Akármeddig várt, hogy a részecskék megálljanak vagy „leülepedjenek” azok mégsem álltak meg.

A későbbiekben meghatározták a hőegyenértéket, vagyis a hőnek, mint energiaformának az átszámíthatóságát mechanikai munkává, ebben jelentős szerepet játszott Rumford, aki ágyúcsövek fűrásánál keletkezett hőmennyiséget viszonyította különböző mennyiségű víz bizonyos hőmérséklettel való felmelegítéséhez. Valamint Joule, akinek a kísérlete ismert a termodinamika első főtételének bizonyításából. Vagyis az energia nem veszhet el csak átalakulhat, mondjuk hővé.

2.1 A „hőmozgás”

A molekulák kölcsönhatásban állnak egymással. A kölcsönhatás jellege jelentősen eltérő lehet attól függően, hogy a három halmazállapotú forma – gáz, folyékony, szilárd – közül éppen melyikben zajlik le.

A szilárd testekben a molekulák nagyon szigorú korlátok közé vannak szorítva, mert a molekulák helye kötött. A szomszédai ugyanazok, ha ki akarjuk őket ebből mozdítani akkor számottevő ellenálló erővel találkozunk. A molekulák hőmozgása abban mutatkozik meg, hogy állandó rezgő mozgást végeznek az egyensúlyi állapotuk körül.

A folyadék molekulái a szilárd testhez hasonlóan, igen közel vannak egymáshoz, lényeges különbség azonban hogy nincsenek összekötve. A szomszédait a mozgásuknak megfelelően cserélhetik, vagyis a hőmozgásuk nem merül ki az egyensúlyi állapot körül való rezgésben, hanem egymás között „lökődösödve” mozognak is. A kevés hely miatt nem tudnak olyan szabadon mozogni mint a gáz molekulái. *Olyan mintha a tömött buszról valaki le akarna szállni.* A víz molekulái szobahőmérsékleten 3 Å távolságra jutnak el ugyanannyi idő alatt, amíg a normál állapotú levegő molekulái 700 Å távolságra [L.D. Landau 1975.].

A gázmolekulák nagy szabadsági foka és az előzőekhez képest nagyobb egymástól való távolsága új tényezőkkel gazdagítja a hőmozgásuk leírását. A gáz molekulái teljes rendezetlenségben mozognak „össze-vissza”, hiszen elegendő helyük van hozzá.

A levegő egy köbcéntiméterében normál körülmények között $2,69 \cdot 10^{19}$ molekula van jelen. Vagyis 1 molekulára $3,71 \cdot 10^{-20}$ cm³ térfogat, azaz $3,337 \cdot 10^{-7}$ cm \approx 33 Å oldalhosszúságú kocka jut. A nitrogén és az oxigénmolekulák közel 4 Å nagyságúak [Budó Á. 1986.]. Tehát a molekulák közötti távolság majdnem 8-10-szerese a molekulák méretének és a rá eső térfogat közel 1000-szerese a molekula saját térfogatának.

A gáz molekulái állandó mozgást végeznek, – egyenes vonalú egyenletes mozgást – amíg valaminek nekiütköznek, lehet hogy egy másik gáz molekulának vagy egy szilárd testnek. Az ütközés teljesen rugalmas, különben a sűrűlódás felemésztené az energiát és a molekulamozgás egyre lassulna. Az ütközés során a molekulák mozgási energiát adnak át egymásnak és utána újra a Newton féle első axiómát töltik be a következő ütközésig.

A „hő” szállításában a molekulák is szerepet játszanak ezért nem közömbös, hogy mekkora utat tesz meg a molekula két ütközés között. A közepes szabad úthossz elsősorban a gáz nyomásától és a molekula méretétől függ. Normál állapotú levegőben egy nitrogén molekula átlagosan 590 Å távolságot [Budó Á. 1986.] tesz meg ütközés nélkül. A molekula méretéhez képest rendkívül nagy távolság!

2.2 A hő terjedés formái

Hőszigetelési szempontból célszerű megvizsgálni a „hő” terjedésére (egyik helyről egy másikra) vonatkozó formákat és jellemzőket.

A hőmérséklet egy intenzív állapotjellemző, a hő pedig az adott rendszer belső energiája, amit egyszerűen a rendszer összes „rezgési és mozgási” energiájának mondhatunk. Ha ezt a gondolatmenetet követjük, akkor hőterjedésen ennek a „belső energiának” az egyik helyről a másik helyre való eljutását értjük. A hajtóerő pedig az állapotjellemző inhomogenitása.

2.2.1 Hővezetés

A hőmozgás nem a hő terjedését jelenti, hanem részben okozza. Ha egy képzeletbeli térrészben a molekulák mozgási energiája a környező térrészekhez képest nagyobb vagy kisebb, akkor a térrész határfelületén – ahol a két térrész molekulái találkoznak, ütköznek – a nagyobb mozgási energiájú molekulák nekiütköznek az alacsonyabb energiájú molekuláknak és azoknak az ő „többlet” energiájukból átadnak. Így az alacsonyabb energiaszintű térrész határréteg menti molekulái a belső molekulákhoz képest nagyobb energia szintre kerülnek. Ezek a molekulák szintén találkoznak a térrész belső részein lévő alacsonyabb energiaszintű molekulákkal, amiknek energiát adnak át és így halad a magasabb „energia szint” mindig az alacsonyabb felé.

Keveredő gázok vagy folyadékok esetén, mivel nincs elválasztó határréteg a hőmozgás következtében az egyik térrész molekulái „bepöccölnek” a másik térrészbe és viszont. Tehát a magasabb energiaszint nem csak a rétegfelületi ütközések során adódik át, hanem a molekulák mozgása során is. Ez a molekuláris mozgás (normál állapotban) az érzékelésünkhöz képest viszonylag kis „bepöccölési” távolságok miatt nem jelentősen gyorsítja a hő ilyen jellegű terjedését.

A szilárd anyagok és folyadékok lényegesen nagyobb „molekulasűrűsége” és ennek megfelelően nagyobb ütközési száma lényegesen gyorsabb hőterjedést tesz lehetővé, mint a nyugvó gázok esetében.

Ha a molekuláris szintről felmegyünk arra a szintre, ahonnan a molekulák már elképzelhetetlenül kicsinynek tűnek, vagyis számunkra érzékelhető méretek szintjére, akkor ez előbbi „hőterjedési” módot hővezetésnek nevezzük. A hővezetés mindhárom halmazállapotú formában megindul, amint a legcsekélyebb hőmérsékleti különbség fellép. A hőmérsékleti eltérés mértékének megfelelő a kiegyenlítési sebesség. A szilárd testekben a hő csak ezen az egy módon terjedhet, ezért itt a hővezetés vizsgálata és számítása egyszerűen csak ennek az egy mechanizmusnak figyelembevételével végezhető.

Stacioner egydimenziós hőáramot feltételezve a folyamat leírható a következő hővezetési alapegyenlettel:

$$\dot{Q} = -\lambda A \text{grad}T$$

ami egydimenziós hőáram esetén:

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

egymástól (x) távolságra lévő sík és párhuzamos rétegek között, melyeknek hőmérséklet különbsége (ΔT), adott időegység (Δt) alatt, adott keresztmetszeten (A) átáramlott hőmennyiség (Q) egyenesen arányos az anyagi minőségre jellemző hővezetési tényezővel (λ fajlagos hővezető képesség). Ez a λ tényező rendkívül fontos szerepet játszik a hővezetési számításokban, mert a különböző anyagok, ezen tulajdonsága nagyon széles skálán mozog.

A negatív előjel azt jelenti, hogy a hőáramlás a kisebb hőmérsékletű hely felé történik.

Állandósult állapotban \dot{Q} értéke állandó.

A gyakorlati életben az instacioner, azaz nem állandósult hőállapot fordul elő gyakrabban. A nappalok és éjszakák változása, az időjárás változása mondhatni, hogy folyamatos változás alatt tartják az épületszerkezeteket. A változások milyensége, sebessége nagyon sok variációt rejt, a mérések eredményeinek az értékelése is sokkal nehezebb és bizonytalanabb lenne, ha instacioner állapotban mérnénk.

2.2.2 Konvekció

A gázok és folyadékok esetén, mivel molekuláik nincsenek helyhez kötve, elmozdulhatnak egymás mellől vagy akár együttesen is. Ha valamilyen hajtóerő hatására (sűrűségkülönbség, ventilátor, szivattyú, stb.) a folyadék vagy gáz molekulái kollektív elmozdulást végeznek akkor az energiájuk is velük együtt áramlik. Az áramlás esetenként magának a hőmérséklet különbségnek a hatására jön létre. Ilyen elven működik a gravitációs központi fűtés.

A nagyobb mozgási energiára szert tevő molekulák „intenzívebb” gyorsabb mozgást végeznek, talán mondhatjuk, hogy „messzebb” lökdösik egymást. Makroszkopikus szinten úgy mondjuk kisebb lesz a sűrűsége. A kisebb sűrűség eredményeképpen lesznek olyan gáz vagy folyadék (nagyobb sűrűségű) részek, melyekre a föld tömegvonzása térfogati anyagsűrűségükhöz képest nagyobb erőt fejt ki, mint az említett kisebb sűrűségű részekre. Ezért a kisebb sűrűségű részek az alsóbb (földhöz közelebbi) területekről kiszorulnak a nagyobb sűrűségű részek javára. Ha az odakerült kisebb energiájú molekulák ott valamilyen forrásból szintén nagyobb energiára tesznek szert, mint a fölötte lévők akkor az előbbieken írt folyamat újra lejátszódik, mindaddig, amíg a sűrűségkülönbség fennáll. Ennek

eredményeképpen kialakulhat egy cirkuláció, ahol a nagyobb energiájú molekulák felfelé a „leült” alacsonyabb energiájú molekulák lefelé áramlanak.

A jelenség természetesen nem csak függőleges irányúban működhet, hanem a hajtóerő függvényében bármilyen irányban. Konvekciós hőáramnak mondhatók a szelek, tenger áramlatok, mint a Golf áramlat, ami jelentős befolyást gyakorol Nagy Britannia és Norvégia partvidékének éghajlatára [Révai 1991].

Épületek esetében ismert a filtrációs (légszivárgás) probléma. A belső és külső légnyomás különbség hatására légáramlat indulhat meg a két tér között abban az esetben, ha talál magának utat. Például hiányos tömítésű vagy tömítetlen ajtó- ablakréseken, de akár a tömörnek gondolt téglafalon vagy gerendák repedésein, épületgépészeti berendezések számára készített csatornákon, áttöréseken keresztül is kialakulhat. A filtráció folyamatát a szél nagymértékben elősegíti [P. Marsh 1984.].

Ez a hőszállítási forma csak folyadékokban és gázokban fordulhat elő. Hőszigetelési szempontból természetesen a gázokban (levegő) előforduló konvekciónak van nagy jelentősége az épületek esetében. Azért mert a levegő hővezetési tényezője (λ) viszonylag alacsony érték, így a hő vezetés által csak nagyon lassan terjedne, a konvekció segítségével (az áramlási sebességtől függően) a hővezetés akár több ezerszeresére is nőhet.

A legelterjedtebb hőszigetelő anyagok az ásvány vagy üvegyapot paplanok lemezek és a polisztirol hab igen kis térfogatsűrűséggel rendelkeznek ($15-80 \text{ kg/m}^3$). Az alacsony térfogatsűrűség miatt mondjuk, hogy „sok” bennük a levegő. Mindkét anyag kicsi légbuborékokat határol el szálaival és gömbjeivel. A légbuborékokon belül a hő vezetéssel és sugárzással terjedhet, mert a kis méretek miatt konvekció nem vagy csak igen csekély mértékben jöhet létre, ami jelentősen felgyorsítaná a hő áramlását.

2.2.3 Hősugárzás

A harmadik hőterjedési forma a hősugárzás. Ilyen esetben az energiát nem anyag közvetíti, hanem elektromágneses sugárzás. Evidens példája ennek a napsugárzás, a föld és a nap között nincs közvetlen átadó anyag, ami továbbítaná a hőt, hanem elektromágneses hullám formájában adódik át. Minden test folyamatosan bocsát ki elektromágneses sugárzást. A kibocsátott sugárzás nem egy adott hullámhosszon történik, hanem egy tartományban, amit az un. spektrális intenzitással jellemeznek. A spektrális intenzitás a test hőmérsékletétől és felületi tulajdonságaitól függ. A test hőmérsékletének emelkedésével az energiatartalom növekszik, ezalatt a kibocsátott elektromágneses sugárzás energiatartalma is nő és a domináns hullámhossz pedig csökken, az infravörös tartományból a látható fény és az ibolyántúli tartomány felé tolódik el. Ez a Wien-féle eltolódási törvény [Albert J. 1962.].

A sugárzáson keresztül a hő minden más terjedési formánál több nagyságrenddel gyorsabban terjed: $2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ [M.A. Mihaljev 1990.].

Az elektromágneses sugárzás hullámhossz szerinti felosztásában a hősugárzás a 0,5-100 μm -es tartományban foglal helyet, (a dolgozat további részében a sugárzás alatt ezt a tartományt értem). Épületfizikai szempontból a legfontosabbak azok, amelyeknek energiatartalma nagyobb. Minden test bocsát ki sugárzást a hőmérsékleti állapotának és a felületi tulajdonságainak függvényében, és Kirchhoff törvénye értelmében nyel is el. Ha egy test a rá eső teljes energiaáramot elnyeli, azt abszolút fekete testnek nevezik, ennek megfelelően bocsát is ki magából sugárzást. Ha pedig a test semmit nem nyel el a rá esett sugárzásból akkor tükröző. A harmadik szélsőséges esetben a test a rá eső sugárzást teljes egészében átengedi, akkor átlátszó testnek nevezzük. A szilárd testek és a folyadékok

hősugárzási szempontból általában átlátszatlanok. A levegő a hősugárzásra átlátszó, azonban ha vízgőz vagy széndioxid is van a levegőben, akkor az arányoknak megfelelően szelektíven engedi át az elektromágneses sugárzást. Részben ez a jelenség magyarázza az üvegházhatást, vagy megfigyelhető az is hogy felhős, párás időben a hőmérséklet nem csökken olyan alacsonyra, mint felhőtlen tiszta időben.

Ahogy nappal a nap sugárzása melegíti fel az utjában lévő testeket, ugyanakkor éjjel a csillagos égbolt „nyeli” el a kisugárzott hőenergiát, ez magyarázza a sivatagi nagy hőmérsékletingadozásokat. A következtetést hőszigetelési szempontból levonva megállapítható, hogy az épületek égboltra rálátással bíró felületei a rálátási szögtől függően fokozottan ki vannak téve az éjjeli égbolt hűtő hatásának. Ezt a tényt célszerű tetőterek vagy lapostetők tervezésénél figyelembe venni, Az előírásokban általában ezért a tetőkre jobb hőszigetelést írnak elő, mint a normál falakra.

Az égboltra nagyobb rálátási szöggel bíró autóüvegek –mint az első és hátsó szélvédők– télen jobban lejegesednek, mint a kisebb szögben lévőek.

Ha megvizsgáljuk a sugárzási energiaáramot leíró kifejezést:

$$Q = \varepsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

C_0 az abszolút fekete test emissziós tényezője ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

T_1 az egyik, T_2 a másik sugárzó test hőmérséklete (K);

ε_n egy viszonyszám, amely megmutatja, hogy az adott test emisszió tényezője hányad része az abszolút fekete testének (relatív emissziós tényező).

Láthatjuk, hogy a testeknek csupán két tulajdonsága befolyásolja a sugárzásos hőáramot:

- A hőmérséklet: mivel a negyedik hatványon szerepel, ennek megfelelően kisebb hőmérséklet eltérések hatását kiemeli. Illetve azt is mutatja, hogy a magasabb hőmérsékletű testek sugárzási intenzitása kiemelten magasabb, mint az alacsonyabb hőmérsékletűeké.
- Az anyag felületi emissziós jellemzője. Az emissziós tulajdonságot az ε emissziós viszonyszámmal határozzák meg. Az ε értéke minél kisebb, a felület annál nagyobb részarányban veri vissza a sugarakat. Néhány anyag ε tényezőjét mutatja az 1.táblázat alacsony (0-20 °C) hőmérsékleti tartományban [Imrik Z. 1981.]. Az anyagjellemzőn túl kisebb mértékű befolyása van a felület simaságának. Az érdes felületek hatékonyabban nyelik el a hősugarakat, mint a sima fényes felületek.

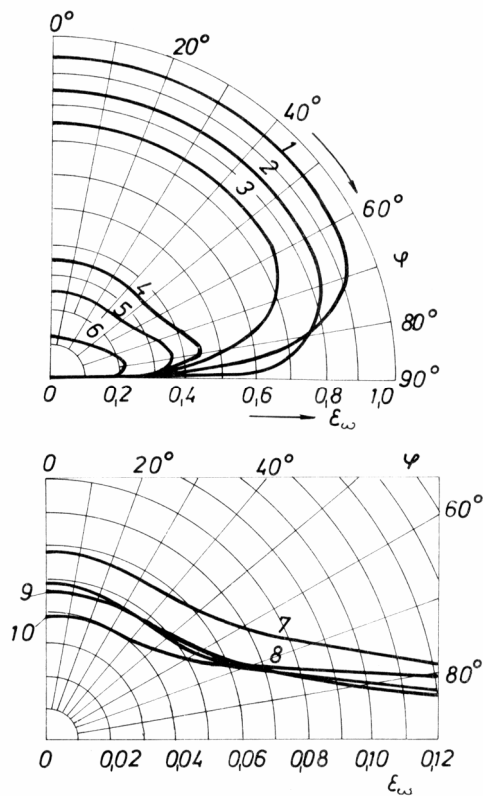
1.táblázat

Anyagnév	<i>Emissziós tényező ε</i>
Alumínium (fényes)	0,055
Őn fényes	0,043-0,064
Víz	0,95-0,96
Tölgyfa gyalult	0,895
Lakk fekete matt	0,96-0,98
Lakk fehér	0,80-0,95

Megfigyelhető a jelentős eltérés a diffúz és a fényes felületek között. Az egyenletben szorzó tényezőként szereplő ϵ jelentősen befolyásolja az eredményt. Egy alumínium felület a hosszú hullámú infra sugárzásból (földi felületek sugárzása) több mint 90%-al kevesebb sugárzott energiát nyel el, mint egy tölgyfa felület ugyanolyan körülmények mellett ugyanattól a sugárzó felülettől.

Összegezve ha ki tudok alakítani olyan felületet, amely az építőanyagoknál – beleértve a fát – kisebb részarányban nyel el hőt, vagyis nagyobb hányadot ver vissza, a sugárzási hőáramot jelentős mértékben tudom fékezni.

Gyártanak olyan üveg- és kőzetgyapot lemezeket, amelyeknek egyik oldalára fényes fóliát kasíroznak, illetve az üvegre fémgőzt visznek fel. Ennek eredményeként az adott felület akár 90%-al kevesebb energiát sugároz ki, mint a fa vagy a kőzetgyapot felülete. Vagyis egy vékony alumínium fólia is jelentősen hozzájárulhat egy energiatakarékos szerkezet kialakításához.



4.ábra Különböző anyagok emisszióképességének irányfüggése 1. fa, 2. korund, 3. rézoxid, 4. bizmut, 5. alumíniumbronz, 6. sárgaréz, 7. króm, 8. mangán, 9. nikkel, 10. alumínium, (Forrás M.A.Mihajev A hőátadás gyakorlati számításának alapjai [M.A. Mihajev 1990.])

2.3 Hőátadási tényező

Említeni kell még egy fizikai jelenséget is, amelynek szerepe van a hőterjedésben. Ez a tényező a gáz fázishatáron lép fel, amikor a hő a gáz halmazállapotú formából „átlép” egy másik halmazállapotú formába. Épületfizikai szempontból elsősorban szilárd test és levegő érintkezési felületén végbemenő hő átlépésnek van szerepe.

A szilárd test fázishatárán a molekulák vagy kristályok "szorosán" egymást érve helyezkednek el, vagyis az ott felhalmozódott energiátöbblet vagy hiány a nagyobb anyagsűrűség miatt nagyobb. A levegő oldalon a molekulák jóval "ritkábban" és csak időlegesen fordulnak elő. A falnak ütköző légmolekulák az energiaszint különbséggel arányos mennyiségű hőt (energiát) vesznek fel. Azonban a szilárd testhez viszonyítva lényegesen alacsonyabb számú levegő molekula határretegen való megjelenése miatt az elhordott vagy odaszállított energia is alacsonyabb, mint amit a szilárd test átadni vagy átvenni lenne képes. Ezért, fellép egy energia átadási késleltetés vagy nevezhetjük energia gátnak, ami a hőterjedési folyamatot is lassítja. Ezért van az, hogy a fal határretegén van egy hőfoklépcső. Számítások során önálló tényezőként szerepeltetjük.

Az U tényező kiszámításánál a nevezőben α indexelt változatban szokásos használni.

2.4 A hőszigetelés javítási lehetőségeinek tudományos elemzése

A hőszigetelés célja, hogy a hőáram útjában jelentős ellenállást fejtsen ki annak terjedésével szemben. Vagyis ha hatékony hőszigetelést akarok kialakítani akkor minimálisra kell csökkentenem a sugárzásos hőáramot a hővezetést, illetve konvekcióval megvalósuló hőterjedést is.

Milyen lehetőségek vannak erre?

2.4.1 A konvekció csökkentése

Épületek határoló szerkezetiben előfordulnak párhuzamos síkokkal határolt légrétegek. Azon esetekben, ha a légrétegnek hőszigetelési szerepe is van, akkor fontos megvizsgálni, hogy milyen körülmények, feltételek befolyásolják a légrétegben a hőáramlást. Mivel ezek nagy többsége függőleges elhelyezkedésű csak ez ilyen elrendezésű eseteket vizsgálom. Természetesen csak akkor van hőáramlás, ha a két sík felület között fennáll hőmérséklet különbség mint hajtóerő. A két fal közötti nagyobb hőfokkülönbség erősíti a konvekció kialakulási esélyét.

A szabad áramlással együtt járó hőcsere mechanizmusára és törvényszerűségére vonatkozó ismeretek kísérleteken alapulnak. Az ilyen megfigyelések és mérések alapján alakítottak ki összefüggéseket, amelyek arra az adott kísérleti összeállításra érvényesek. Érvényesek akkor is, ha egy ugyanolyan feltételekkel, körülményekkel jellemzett kísérletet végzünk. Ezen azonosság alapján fel lehet állítani olyan kritériumokat, amelyek teljesülése esetén mondhatjuk, hogy ebben az esetben is érvényesek az említett megfigyelések és mérések. Az ilyen hasonlósági kritériumok alapján számíthatóvá vagy inkább hasonlíthatóvá váltak a gyakorlatban előforduló esetek is.

A két sík fal által határolt légrétegben is a hasonlóság segítségével tudunk meghatározni jellemzőket.

Fizikailag rendkívül bonyolult feladat lenne a légréteg számítása abban az esetben, ha mindkét fal hőátadási tényezőit is figyelembe vennénk. A számítás egyszerűsítése érdekében bevezették az λ_e egyenértékű hővezetési tényezőt (W/mK), ezen tényező jellemzi a két felület közötti hőáramot. Ha ezt az egyenértékű hővezetési tényezőt elosztjuk a közeg valóságos hővezetési tényezőjével, akkor egy olyan viszonyszámot kapunk, amely megmutatja, hogy a légáramlás hatására bekövetkező hőáram hányszorosa a nyugvó levegőnek:

$$\frac{\lambda_e}{\lambda} = e$$

Az e az áramlás tényezőjének nevezik (dimenzió nélküli szám). Nagyszámú kísérlet eredményének az összevetése alapján kirajzolódott hogy e meghatározható a Prandtl és a Grashof kritériumok függvényeként:

$$e = f(Gr * Pr)^n$$

Ennek a függvénynek a számomra azért van jelentősége, mert a Grashof szám meghatározásában szerepel a légréteg vastagsága. Azt szeretném meghatározni hogy mi az a rétegvastagság, ameddig az e értéke 1 vagyis nem lép fel konvekció. A tapasztalati értékek szerint amennyiben a $(Gr * Pr)$ szorzat értéke 1000 alatt van akkor az e 1-nek vehető.

A határérték meghatározásához a $(Gr * Pr)$ értékét 1000-nek választom:

$$(Gr * Pr) = 1000$$

A Prandtl szám a levegő hővezetési tényezője (λ) a dinamikai viszkozitása (μ) és fajhője (c_p) alapján meghatározható. Az értékeket 25 °C-on és légköri nyomáson táblázatok alapján [M.A. Mihajjev 1990.] vettem fel:

$$Pr = \frac{\mu * c_p}{\lambda}$$

$$c_p = 1,007 \text{ KJ}/(\text{kg} * \text{K});$$

$$\lambda = 0,02639 \text{ W}/(\text{m} * \text{K});$$

$$\mu = 18,20 * 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m} * \text{s});$$

A behelyettesítések alapján a Prandtl szám 0,6944.

Ebből következően a Grashof szám:

$$Gr = \frac{1000}{0,6944} = 1440$$

$$Gr = \frac{\beta * g * \delta^3 \Delta t}{\nu^2}$$

A rétegvastagságra átrendezve:

$$\beta = 3,362 * 10^{-3} \text{ (1/K)}; \text{ [M.A. Mihajjev 1990.]}$$

$$\nu = 1,558 * 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}; \text{ [M.A. Mihajjev 1990.]}$$

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{Gr * \nu^2}{\beta * g * \Delta t}} = \sqrt[3]{\frac{1400 * 2,4273 * 10^{-10} \text{ (m}^4 / \text{s}^2)}{3,362 * 10^{-3} \text{ (1/K)} * 9,81 \text{ (m/s}^2)} * \Delta t \text{ (K)}}$$

A rétegvastagság értékét több hőfokkülönbség esetére határoztam meg: 3 °C, 5 °C; 10 °C; 15 °C; 20 °C 2. táblázat.

2. táblázat

Hőfokkülönbség °C	Rétegvastagság mm
3	15,08
5	12,96
10	10,19
15	8,90
20	8,09

Minél alacsonyabb a hőfokkülönbség annál vastagabb réteg alkalmazható konvekció kialakulása nélkül.

A konvekció kialakulási határát jelentő rétegvastagságok egészen jól közelítik azt az értéktartományt, amelyet különösebb technikai probléma felmerülése nélkül meg lehet valósítani. Az ennél nagyobb légrétegek esetén a konvekció kialakulására és hatékonyságára a vastagság növekedésével arányosan nagyobb kilátás van. Célszerű ezért a beépített légréteg vastagságokat a táblázatban feltüntet értékeknél kisebbre választani. A vastagság csökkentésével a hővezetés útján több hő jut át, viszont a konvekció kisebb valószínűséggel alakul ki, ha mégis kialakul akkor a kisebb rétegvastagság esetén kisebb mértékű. Általában az épületeknél a felületi hőmérsékletek rövidebb-hosszabb időszakonként változnak. Minden egyes állapotra meg lehetne határozni egy optimális légréteg vastagságot, de a gyakorlatban beépített rétegvastagság fix marad.

2.4.2 A sugárzás csökkentése

A sugárzással átadott hőmennyiség nagymértékben csökkenthető a már említett felületi tulajdonság megfelelő kialakításával. A fényes alumínium fólia csak 5-6%-ot nyel el a ráeső sugárzásból és ugyanennyit sugároz ki a hőmérsékleti állapotának megfelelően. Ha két felület közé egy a felületekkel megegyező emissziós tényezőjű ernyőt helyezünk, akkor a sugárzásos hőátvitelt bizonyíthatóan felére lehet csökkenteni. n db ernyő alkalmazásával pedig $1/(n+1)$ -ed részére [Imrik Z. 1981.].

Tételezzük fel, hogy a két sík párhuzamos felület között nincs ernyő, akkor a sugárzással átvitt energiaáram sűrűsége:

$$q_{ab} = \sigma \varepsilon_{ab} (T_a^4 - T_b^4) \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Itt az ε_{ab} a két felület sugárzási cseretényezője, a σ pedig a Stefan-Boltzmann állandó ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

A felületekkel azonos emissziós tényezőjű ernyők elhelyezése után az első két felületre felírható:

$$T_a^4 - T_1^4 = \frac{q_e}{\sigma \cdot \varepsilon_{a1}}$$

q_e a szerkezeten áthaladó hőáramsűrűség. Időben állandósult állapotban az energiamegmaradási elv miatt ugyanez a hőáram fog a többi felületen is áthaladni:

$$T_1^4 - T_2^4 = \frac{q_e}{\sigma \cdot \varepsilon_{12}}$$

$$T_2^4 - T_3^4 = \frac{q_e}{\sigma \cdot \varepsilon_{23}}$$

Így tovább egészen az n -edik ernyőig:

$$T_n^4 - T_b^4 = \frac{q_e}{\sigma * \epsilon_{nb}}$$

A hőáram sűrűséget az egyenletek összegzése után kapjuk meg:

$$q_e = \frac{\sigma * (T_a^4 - T_b^4)}{\frac{1}{\epsilon_{a1}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\epsilon_{i,i+1}} + \frac{1}{\epsilon_{nb}}}$$

Ha az egész szerkezetre bevezetem az ϵ sugárzási tényezőt:

$$q_e = \sigma * \epsilon_e (T_a^4 - T_b^4)$$

Ennek az egyenletnek és a kiindulási egyenletnek a hányadosa mutatja meg az ernyőzés hatékonyságát a sugárzásos hőáramra vonatkozóan:

$$\frac{q_e}{q_{ab}} = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{ab}}$$

És mivel az ernyők emissziós tényezője azonos

$$\frac{q_e}{q_{ab}} = \frac{1}{n+1}$$

A levezetés eredményéből látszik, hogy n darab ernyő használata esetén a hőáram $1/(n+1)$ -ed részére csökken.

Ezt az elvet alkalmazva párhuzamosan kifeszített ernyőkkel hőmérsékleti lépcsőket tudok kialakítani. Ha az ernyők felületi emissziós tényezőjét alacsonyra választom meg (Pl. alumínium fóliát alkalmazok), akkor még hatékonyabbá tudom tenni a légréteg hőszigetelését. A párhuzamosan elhelyezett légmozgást korlátozó rétegek még a konvekciós hatást is csökkentik, azzal hogy a légréteget több kisebb vastagságú légrétegre osztják.

A vizsgálataim egyik iránya olyan panel kialakítása ahol az itt említett réteges ernyőzést alkalmazom. A sugárzásos hőáramot redukáló panel (tükörpanel) kialakításának technikai műszaki kérdéseivel a 4. fejezetben foglalkozom.

2.4.3 A hővezetés csökkentése

A hővezetés közvetlenül az anyaghoz kötődik, legyen az a levegő molekulája vagy a szilárd test atomja. Ha az anyag által szállított hő mennyiségét akarom csökkenteni, akkor ennek egyik kézenfekvő útja, ha az adott térrészben csökkentem az anyag mennyiségét. *Tulajdonképpen a hőszigetelés alkalmazását is felfoghatom így, mert tételezzük fel, hogy valami tömörebb anyag (kő, föld, stb.) helyett valamilyen „könnyebb” anyagot teszünk oda.*

Történetesen ez a „könnyebb” anyag több levegőt tartalmaz, mert a levegő „könnyebb” mint a szilárd testek vagy folyadékok és ezzel a hőszigetelést is javítottam.

Ha feltételezünk egy olyan térrészt, ahol a konvekció nem indul meg a geometriai méretek miatt, és ezt a teret levegő tölti ki, akkor az anyag mennyiségének csökkentésével eljutottunk arra az értékre, ahonnan a hőszigetelő képesség javítás a levegő elvételével vagy kicserélésvel lehetséges. Durva általánosságban azt is mondhatom, hogy csökkentjük a tömeget a rétegben és javul a hőszigetelés. Természetesen van példa az ellenkezőjére is.

Kísérleteimben azt vizsgálom, hogy hogyan lehetne túlmenni ezen a ponton olyan alkalmazás irányába, mely a könnyűszerkezetes ház vázközeiben is alkalmazható lenne.

2.5 Vákuumtér

Mind a hővezetés, mind pedig a konvekció egyaránt a levegő részecskéihez kötődik, mivel a részecskék maguk szállítják azt az energiát, aminek makró méretekben való érzékelését hőnek mondjuk. Ebből következik, hogy olyan teret kellene alkalmazni, ahol nincsenek energiát szállító részecskék, vagyis a légtérben lévő levegőn túl is csökkentjük a jelenlévő „anyag” mennyiségét és hozzunk létre vákuumot.

A „vacuum” latin eredetű szó, jelentése légritkított tér, technikailag olyan térrész, ahol a nyomás kisebb 1 atmoszféránál illetve a hagyományos nyomásegységben 760 higanymilliméternél (torr) [Polinszky K. 1974.]. A légtérben fölfelé a nyomás folyamatosan csökken, egészen a csillagközi térig, a Mount Everesten például a légnyomás már csak harmada a tengeszinti légnyomásnak.

Véleményem szerint a vákuumot az emberiség már több ezer éve használja, legalábbis azóta, amióta a bort hordóban tartják. Habár a mai definíció szerint nem mindig sorolják a külső légnyomás által végzett munkát a vákuumtechnikába, mint ahogy a lopótök is működik.

A modern sokrétű felhasználás miatt megkülönböztetünk durva vagy elő-vákuumot (1000-1 mbar), finom vákuumot ($1\cdot 10^{-3}$ mbar), nagy vákuumot (10^{-3} - 10^{-7} mbar), és igen nagy vagy ultravákuumot ($<10^{-7}$ mbar).

Tökéletesen légüres tér fogalma csak elmélet marad, még a jelenlegi csúcstechnológiát képviselő diffúziós vagy turbómolekuláris szivattyúkkal is csak messziről tudjuk megközelíteni. Még a 10^{-10} mbar nyomáson is 1cm^3 térben körülbelül 24.720 molekula marad. A csillagközi térben is 0,8 atom van köbcentiméterenként vagyis 800.000 darab m^3 -enként [J. Herrmann 1992.]. (Ez azért már elég jó vákuumnak mondható $3,23\cdot 10^{-15}$ mbar.)

A vákuum előállítására többféle elven működő sokféle típusú szivattyút készítenek. A szivattyúk három legfontosabb paramétere: 1 Az igényelt elővákuum mértéke, ahonnan az adott szivattyú dolgozik. 2 A végvákuum, amit maximálisan létre tud hozni, és a 3. a légszállítás, vagyis időegység alatt mennyi levegőt tud elszívni. A szivattyúk ára a létesíteni kívánt vákuum nagyságával erőteljesen növekszik. Részben ezért is alkalmaznak ún. vákuumjavító anyagokat.

Vannak olyan anyagok, mint a faszén vagy a szilikagél, amik alacsony hőmérsékleten gázokat abszorbeálnak, ezáltal kivonják őket a légtérből, így javítva a recipiensben kialakított vákuumot.

A vákuum javításának egy másik módja a technikai berendezésekben, az ún. gettereket (gázmegkötő) elhelyezése, legtöbbször bárium vagy kálium, melyek melegítés hatására gázokat kötnek meg. Ezért volt az elektroncsöveken látható egy fényes tükröző felület.

Az egyik legnagyobb problémát a sztatikus vákuumok esetén a megtartás jelenti, különösen a durva vákuumnál nagyobb vákuum tartományokban. Ugyanis olyan anyagok,

amelyek a légköri nyomás környezetében kifogástalanul zártak, a nyomáskülönbség hatására áteresztővé válnak. Ezért csak bizonyos illetve speciális anyagok képesek a vákuumot megtartani.

A vákuumtartó edényen túl a zárás sem oldható meg a hétköznapi szelepekkel (melyek adott esetben folyadékokra akár több 10 atmoszféra túlnyomásra is hibátlanul működnek), alacsony nyomásértékeken szivárognak.

Ha a vákuummérés technikailag nem is okoz különösebben nagy problémát, a költségei kétségtelenül, kiváltképpen a finom és annál nagyobb vákuum nyomástartományban. Itt már nem alkalmazható a felületegységre eső terhelés módszere, hanem a gáz különböző tulajdonságait kell mérni, melyek szoros összefüggésben vannak a nyomással.

Vákuum kialakításánál azzal is számolni kell, hogy az edényben nem lesz meg a külső légnyomással egyensúlyt fenntartó nyomás, vagyis kívülről nagy erő szorítja össze az edényt, így annak szilárdságát is biztosítani kell. Tehát az edényeknek, ahol a vákuumot akarom létrehozni ki kell bírni egy atmoszféra nyomást ez közel 10^5 Pa szemléletesebben 10 m vízoszlop.

2.5.1 A vákuum és a hővezető képesség közti összefüggés feltárása

Jelen esetben a cél a hőszigetelő képesség növelése a levegő hővezető képességének csökkentésével, nem pedig a vákuum. A vákuum csak az a tényező, amely a levegő egyenértékű hővezetési tényezőjét befolyásolja. Innentől az a kérdés hogy milyen mértékben. Vagyis mekkora vákuumot hozzak létre adott térben, ahhoz hogy a levegő hővezetési tényezője annyira lecsökkenjen, hogy a szerkezetem a szálal és habosított hőszigetelő anyagok hőellenállásához képest jelentős mértékben javuljon.

A hővezetési hőterjedés szempontjából minél vastagabb a légréteg annál nagyobb a vezetési hőellenállás (feltételezve, hogy konvekciós hatás nem lép fel). A légréteg vastagság szerepe a légritkítás mértékének növelésével csökken, mert az úgymond hőszállító molekulák útjában kevesebb akadályozó molekula kerül, ezért hosszabb ütközésmentes utat tudnak megtenni. A vákuum méretének, azaz a légrés növelésének a szerkezet szilárdságának szempontjából nehezítő következményei vannak.

A légréteg vastagságának növekedésével erősen nő a légkörzés beindulásának veszélye. A légkörzés a hőszigetelés mértékére rendkívül kellemetlen hatást gyakorol, mert a 2.2.2 fejezetben leírtak szerint megtöbbszörözi a hőáram sűrűségét. A konvekció kockázatának csökkentése érdekében a hőszigetelő üvegek gyártásánál csak speciális igények vagy okok miatt alkalmaznak 20 mm-es légrésnél nagyobbat, leggyakoribb a 16-12 mm. A konvekció miatt a kialakítandó légrésemet (vákuumrés) minél kisebbre kell választanom.

E két tényezőnél még jelentősebb szerepet játszik a nyomás és a levegő hővezető képességének összefüggése.

Ha veszek két A felületű lemezt P_1 (hőmérséklete T_1) és P_2 (hőmérséklete $T_2 > T_1$) akkor a melegebb P_2 lemez felől a P_1 lemez felé egy Q (W) hőáram folyik. Ez a hőáram nyilvánvalóan egyenesen arányos a lemezek felületével A (m^2) és a hőmérséklet különbséggel $T_2 - T_1$ (K) illetve fordítottan arányos a lemezek távolságával d (m). Az összefüggésben szerepel a lemezek között lévő gázra vonatkozó hővezetési tényező λ (W/mK).

$$Q = \lambda * A * \frac{T_2 - T_1}{d} = -\lambda * A * \frac{\partial T}{\partial z}$$

A hőáram sűrűség pedig:

$$q = -\lambda * \text{grad}_z T = -\lambda * \frac{\partial T}{\partial z}$$

Az összefüggések természetesen csak abban az esetben érvényesek ha nem lép fel a két lemez között konvekció.

A nyomásfüggő hővezető képesség meghatározására a következő összefüggést használom [M. Wutz 1986.]:

$$\lambda = \frac{n * \bar{v}}{2} * \frac{c_v}{L} * \frac{d * \bar{l}}{d + 2 * \frac{2-a}{a} * \bar{l}}$$

A λ a gáz hővezető képessége.

Az n az adott nyomáson 1 köbméterben lévő molekulák számát adja meg.

A \bar{v} a molekulák átlagos közepes sebességét. A c_v az állandó térfogaton vett fajhő. L a Loschmidt szám. A d a két fal közötti légrés, és az a pedig a kiegyenlítődési tényező. A molekulák közepes szabad úthosszát az \bar{l} mutatja.

A képletben nem szerepel a nyomás, az n viszont szoros összefüggésben áll a nyomással. Nyilvánvalóan minél kisebb a nyomás annál kevesebb molekula van az adott térfogategységben. Ez az összefüggés minden tartományban lineáris.

A közepes sebességet 20 °C-fokon a következő képlettel határoztam meg:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8 * R * T}{\pi * M}}$$

A molekulák közepes sebessége a hőmérséklettől és az adott molekula tömegétől függ.

A gázkeverék molekuláinak közepes sebességének kiszámításához 78% N₂ 21% O₂ és 1% Argon jelenlétét vettem figyelembe. Az 1. mellékletekben megadtam a száraz levegő átlagos összetételét. Az egyes gázokra vonatkozó közepes sebességek:

$$v_{\text{Nitrogén}} = 470,59 \text{ (m/s);}$$

$$v_{\text{Oxigén}} = 440,30 \text{ (m/s);}$$

$$v_{\text{Argon}} = 394,07 \text{ (m/s);}$$

$$\bar{v}_{\text{levegő}} = \frac{78 * 470,59 + 21 * 440,3 + 394,07}{100} = 463,46 \text{ m/s}$$

Ez az eredmény nem azt jelenti, hogy minden gázban lévő molekulának ekkora sebessége van, hanem egy statisztikai átlagérték. Minden egyes komponensnek megvan a maga sebességmegoszlása, a fenti értékek a megoszlások középértékeit adják. A végeredmény pedig a résztvevő gázok sebesség megoszlási középértékeinek mennyisége alapján súlyozott átlag.

Mivel a levegőben a nitrogén és oxigénmolekulák döntő túlsúlyban (99%) vannak ezért a levegőt a kétatomos gázként kezelem. A kétatomos gázok 3 translációs szabadsági foka mellett van két rotációs szabadsági foka, így a szabadsági fokok száma 5.

Hőegyensúlyban lévő gázoknál minden szabadsági fokra térbeli és időbeli átlagban ugyanakkora termikus energia jut:

$$E = \frac{1}{2} * k * T$$

A k a Boltzmann állandó értéke $1,38 * 10^{-23}$

Ennek megfelelően a gáz fajhője állandó térfogaton:

$$c_v = \frac{f}{2} * R$$

Ennek az értéknek a meghatározása még átlagszámítást sem igényel, mert a gáz 99%-ára megfelel:

$$c_v = \frac{5}{2} * 8,3144 = 20,7860 \text{ J / mol * K}$$

A közepes szabad úthossz meghatározása a molekulakoncentráción keresztül szintén függ a nyomástól. A kiszámításánál némi közelítéssel élek a molekulásugarak tekintetében. Mivel a N_2 78%-os részarányú, illetve az O_2 molekula sugara csekély mértékben tér el (2,6%) a nitrogénétől, a bevitt hiba is elhanyagolható szinten marad, ha a nitrogén sugarát r használom.

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2} * n * 4 * \pi * r^2}$$

A nyomásfüggő hővezető képesség meghatározására használt képletben az a tényező az úgynevezett kiegyenlítődési tényező vagy kiegyenlítődési valószínűség. A molekulák a falnak ütközve nem a teljes energiájukat adják le, hanem csak az energia kiegyenlítődési mértékéig. Az a tényező határozza meg a molekula részarányt ahol ez pontosan végbemegy. A nehezebb molekulák kiegyenlítődési tényezői gyakran egy vagy ahhoz közeli értékek. A hőmérséklet növekedésével a kiegyenlítődési tényező is nő. Ezen felül a kiegyenlítődési tényező függ a felület milyenségétől is. Például oxidréteg vagy abszorbeált gázzréteg nem jelentéktelen mértékben növeli az értéket. A tényező értékeit a 2. mellékletben több gázra megadom irodalmi adatok alapján. A levegőt alkotó három fő alkotóra az értékek a következők:

$a_{\text{nitrogén}}=0,77$ (dimenzió nélküli szám);

$a_{\text{oxigén}}=0,79$ (dimenzió nélküli szám);

$a_{\text{argon}}=0,86$ (dimenzió nélküli szám);

A sebességekhez hasonlóan számítom a használt értéket a mennyiségi súlyozás alapján:

$$a = \frac{78 * 0,77 + 21 * 0,79 + 1 * 0,86}{100} = 0,7751$$

A számítás elsődleges célja a minimális hővezetési értékhez tartozó paraméterek meghatározása, vagyis a λ függvény minimumhelyének meghatározása.

A képletben szereplő tényezők közül két érték: a molekulakonzentráció és a rétegvastagság változtatható, illetve a közepes szabad úthossz pedig a molekulakonzentráció függvénye:

$$\lambda = \frac{n \cdot \bar{v}}{2} * \frac{c_v}{L} * \frac{d \cdot \bar{l}(n)}{d + 2 * \frac{2-a}{a} * \bar{l}(n)}$$

Tehát ennek a kétváltozós függvénynek keresem a minimumát. Ez ott lehet, ahol az elsőrendű parciális deriváltjai zérust adnak.

Az egyszerűbb írásmód kedvéért a következő jelölést vezetem be:

$$C = \frac{v \cdot c_v}{2 \cdot L}$$

$$D = 2 * \frac{2-a}{a}$$

A fentieket beírva kapom a következő egyenletet:

$$\lambda = n \cdot C * \frac{d \cdot l(n)}{d + D \cdot l(n)}$$

Ennek deriváltja d illetve n szerint:

$$\lambda'_d = \frac{n \cdot C \cdot l(n)^2 \cdot D}{(d + D \cdot l(n))^2}$$

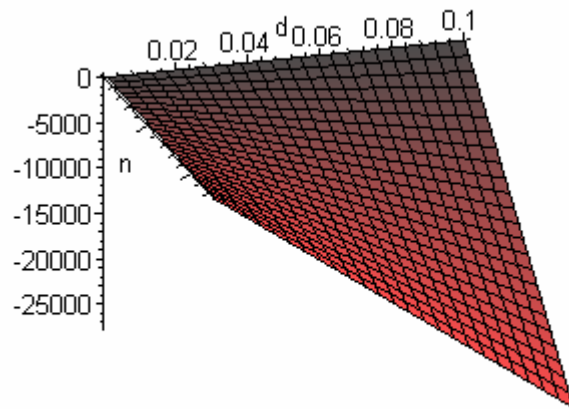
$$\lambda'_n = \frac{C \cdot d \cdot [l(n) \cdot d + D \cdot l^2(n) + n \cdot l'(n) \cdot d]}{(d + D \cdot l(n))^2}$$

Mindkét derivált tört alakú, ebből következik hogy a parciális deriváltjaik nulla helyeinek keresése ekvivalens a számlálók nulla helyeinek keresésével. A d szerinti derivált esetében, mivel a konstansok nem nullák és a közepes szabad úthossz sem nulla (feltéve hogy a hőmérséklet magasabb mint -273,15 K), így az n-nek kell nullának lenni ahhoz hogy a derivált értéke zérus legyen. Ez fizikailag azt jelenti hogy a vizsgált térben a molekula koncentráció zérus, vagyis nincs bent egy molekula sem ami „hőt” tudna szállítani. Sajnos ez technikailag megoldhatatlan, pedig igen előnyös megoldás lenne.

Az n szerinti derivált esetén a számláló akkor lehet nulla ha a d nulla, mivel a C nem lehet az vagy pedig a zárójelen belüli rész nulla. Az előző n-re vonatkozó megállapítás alapján azonban a zárójelen belüli rész sem lehet nulla. Tehát matematikailag csak a d marad, ennek fizikai jelentése az hogy ne legyen „légrés” a két lemezfelületem között. Ez az eredmény ugyan megvalósítható, de így nem várható hőszigetelő hatás a vákuumrétegtől.

A függvényt modelleztem „Maple V Release 5” matematikai program segítségével 5.ábra:

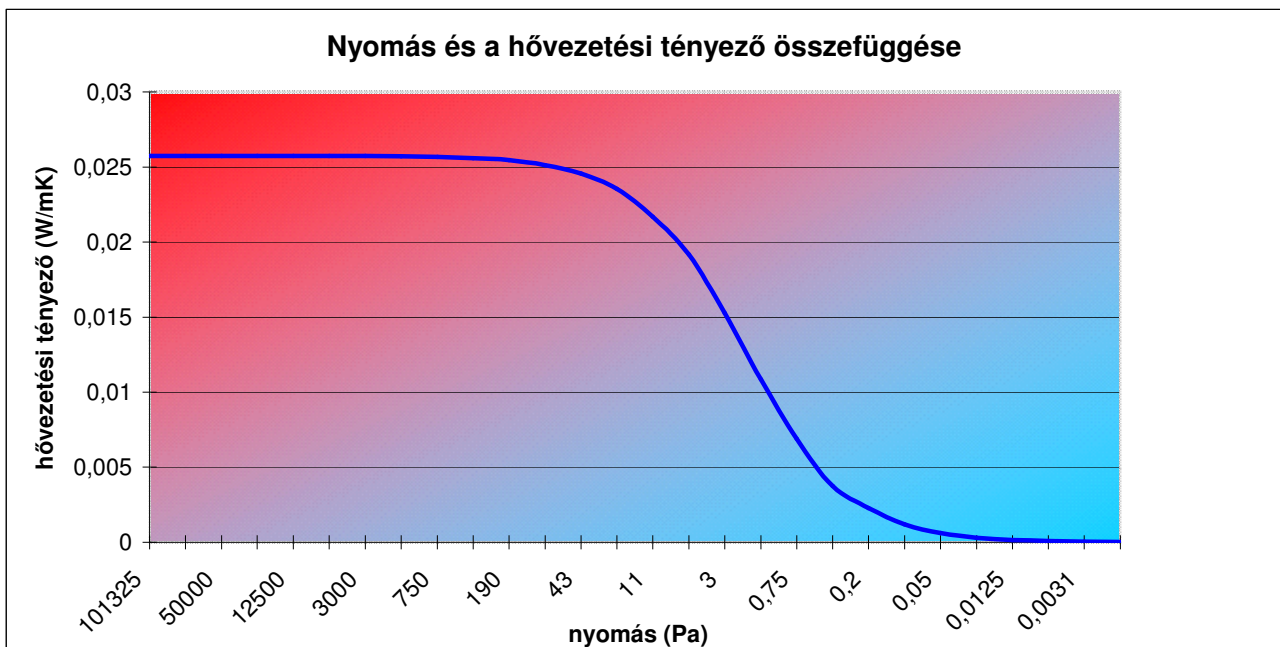
5.ábra kétváltozós függvény
ábrázolása Maple V Release 5
programban



A függvény egy nyereg felület.

A kérdésre hogy milyen molekula koncentrációt, mekkora „légréssel” alkalmazzak az előbbi eredmények alapján nem a matematika adja meg, hanem az adott anyagi kereteknek megfelelő technikai megvalósíthatóság.

Annak megismerésére, hogy mi az adott résmérethez tartozó hővezető képesség a molekulakonzentráció (nyomás) függvényében, veszem a kétváltozós függvény egy adott résvastagsági helyen vett metszetét. A függvényt ezen a helyen számolom ki, ez a kiválasztott vastagság 10 mm vagyis 0,01 m. Az eredményt a 6.ábra szemlélteti.



6.ábra

A lépték az x tengelyen nem lineáris, hanem logaritmikus. A légköri nyomásról indulva nyomás csökkentésével jelentős nyomásesés sem hoz változást a hővezetési tényezőben. Szinte 50 mbar-ig nem történik mérhető változás a hővezető képességben pedig a nyomás már 1/20-ára csökkent. 10mbar környékén kezd a λ csökkenni eleinte csak lassan, 2-3 mbar környékén erőteljes változás következik be a hővezetési tényezőben. A gyors függvényesés 0,1-0,05 mbar-ig tart és utána szintén jelentéktelen mértékben változik.

A molekulák mozgását légköri nyomáson az útjukba kerülő más molekulák korlátozzák legnagyobb mértékben, 1atm nyomáson a közepes szabad úthossz 10^{-5} cm, vagyis tized mikrométer nagyságrendű. Ha egy adott molekula környezetében lecsökken a molekula koncentráció, akkor nyilvánvalóan az ütközési valószínűsége is lecsökken, tehát messzebbre jut a szállított energiátartalmával. És mivel messzebbre jut intenzívebb energiaforgalmat tud lebonyolítani két pont között. Igaz hogy a molekulák száma a nyomáscsökkentés következtében jelentős mértékben akár 1/10 vagy 1/20-ára csökkent, de mivel a bennmaradt molekulák sokkal "zavartalanabban" közlekedhetnek így a hőszállításuk is sokkal intenzívebb akár 10 vagy 20 szorosa a légköri nyomáson végzettnek.

A molekula koncentráció folyamatos csökkentése a közepes szabad úthossz folyamatos növekedését eredményezi, hiszen szélsőséges esetben, ha csak egy molekula maradna akkor annak már a falon kívül nincs kivel ütköznie. A nyomás csökkentésével (a közepes szabad úthossz növelésével) elérünk egy olyan szintet, amikor a közepes szabad úthossz az edény méretével azonos nagyságrendű lesz. Az aránynak megfelelően egyre több olyan molekula lesz, amely a két fal közötti szakaszon nem ütközik másik molekulával csak a fallal. Egy molekula hőszállítása, ilyen esetben a leghatékonyabb. Ezen a nyomáson elértük a hőszállítási hatékonyság maximumát (természetesen egy adott hőmérséklet különbség mellett). Amennyiben ezek után is csökkentjük a molekulák számát akkor már olyan molekulákat veszünk el a térből, akik teljes kapacitással "dolgoztak" és ezért ebben az esetben kezd el csökkenni jelentős mértékben a gáz hővezető képessége. Ezen a nyomáson minden elvett molekula energiaátvitel kiesést jelent, tehát a célomhoz visz közelebb. A fenti elméleti levezetéssel feltártam a vákuum hatását a hővezetésre és igazoltam, hogy ha számottevő hőszigetelő hatás javulást szeretnénk elérni, akkor a nyomást 0,1 mbar alá kell csökkentenem.

2.6 A levegőnél gyengébb hővezetési tényezővel rendelkező gázok

Hőszigetelési szempontból, elméletileg az a leghatékonyabb megoldás, ha a "lég" részben nincsen olyan részecske, amely energiát tudna átszállítani az egyik falról a másikra. Ilyen esetben viszont fellép a nyomáskülönbségből adódó probléma, vagyis hogy a belső térben 0 vagy inkább csak ahhoz közelít az abszolút nyomás, amíg a külső térben 1 atmoszféra nyomás van. Ha ezt a nyomáskülönbséget el szeretnénk kerülni akkor egy másik megoldási lehetőség, hogy a „lég” részbe a levegőt, olyan gázra cseréljük, amelynek hővezetési tényezője jelentősen rosszabb mint a levegőé. Így a nyomáskülönbségből fakadó erővel nem kell megbirkózni. Ehhez viszont olyan szerkezetet kell készíteni, amely tökéletesen légzáró.

A gázok hővezető képessége a következő összefüggés alapján határozható meg:

$$\lambda = \frac{1}{6} N f k \bar{v} l$$

ahol N a molekula koncentráció (molekulák száma és a térfogat hányadosa), f a molekulák szabadságfoka, k a Boltzmann féle állandó, \bar{v} a közepes sebesség, \bar{l} pedig a közepes szabad úthossz.

A molekulakoncentráció, mely szoros összefüggésben van a nyomással és a Boltzmann állandó függetlenek a gáz milyenségétől. A többi tényező gázfüggő:

A molekula minden szabadsági fokára $(1/2)kT$ energia jut, tehát minél nagyobb egy molekula szabadsági foka annyszor $(1/2)kT$ energiája van. Ha csak ezt a tényezőt vizsgáljuk úgy, hogy a többi állandó értéken tarthatnánk, akkor ez alapján az egyatomos gázokat lenne célszerű alkalmazni, mivel 3 szabadsági fokuk van, ellentétben a két vagy többatomos gázokkal, melyek szabadsági foka 5, illetve 6 [Budó Á. 1986].

A gázmolekulák sebessége általában annál nagyobb minél kisebb a molekulasúlyuk ($v \approx M^{-1/2}$) ezért a λ is annál nagyobb minél kisebb a molekulasúly. A hidrogénmolekula normál állapotban kb. 1750 m/s-os sebességgel száguldozik, a jóval nagyobb súlyú argon és kripton atomok 390 m/s és 270 m/s (kb. 1000 km/ó) körüli sebességgel „cammognak”.

A közepes szabad úthosszt a molekula sugár befolyásolja jelentősen, természetesen a nyomáson és a hőmérsékleten túl, de ezeket normál állapotban értem. A kisebb molekulák ütközési valószínűsége is kisebb, a hidrogén és a hélium $1,1 \cdot 10^{-5}$ cm és $1,75 \cdot 10^{-5}$ cm úthosszához képest az oxigén és nitrogén "csak" $0,59 \cdot 10^{-5}$ cm és $0,63 \cdot 10^{-5}$ cm távolságot tesz meg ütközés nélkül.

Ezen okfejtésből azt szeretném magyarázni, hogy ha a szigetelő térben a levegőt (nitrogén, oxigén) lecserélem valamilyen más gázra, a fentiek figyelembe vételével, akkor a gáztól függően a levegőénél jobb vagy rosszabb szigetelő hatást tudok elérni. A 3.táblázat néhány gáz hővezetési tényezőjét mutatja 0 és 100 °C fokon.

3.táblázat

Megnevezés	Hővezetési tényező (W/mK)	
	0 °C-on	100 °C-on
Nitrogén	0,02431	0,03152
Oxigén	0,02466	0,03291
Argon	0,01651	0,02117
Kripton	0,00883	–
Xenon	0,00569	–
Hidrogén	0,1651	0,2128
Hélium	0,1430	0,1791
Széndioxid	0,0140	0,01953
Metán	0,0307	–

A 3. táblázat adatai alapján kitűnik hogy nem elenyésző a gázok hővezetési tulajdonságai közötti különbség. Ezeknek a különbségeknek a kihasználásával is tudom javítani a hőszigetelést ha a levegőnél gyengébb hővezető képességű gázt használok. Ma már tömegesen alkalmazzák a hőszigetelő üvegek esetén az argon gáztöltést. Néhány nyugat-európai országban alkalmazzák kripton gáz töltést is. A kriptonnal töltött üvegek ára a gáz beszerzési ára miatt igen magas. *A xenont pedig az iszonyatos ára miatt, jobb ha nem említem.* Tehát célszerűnk látszik a gázok hővezető képessége közötti különbségeket a falszerkezetben is kihasználni.

2.7 A vizsgált téma helyzete

A hőszigetelés története feltehetően az emberiséggel egyidős, habár jelentősebb kutatások csak a XX. század elején kezdődtek. Az ipari termelés egyre szélesebb körűvé válása és az elvárt hatásfok folyamatos növekedése a téma kutatását és fejlesztését is ösztönözte. Az 1920-30-as években vált általánossá a szálás anyagok használata, először a vulkanizált és szálásított ásványi rostok gyártásával. E mellett számos anyagot használtak szigetelési célra, mint a kovaföldet vagy kohósalakot. Az 1960-as években megjelentek a cellulóz rostok a papírhulladékokból előállítva, ezek azonban nem terjedtek el. A 60-as évek vége felé jelent meg a piacon az üvegyapot, aminek nagy előnye az ásványgyapottal szemben, hogy a szállítás és tárolás idejére kisebb térfogatra volt összenyomható, és amikor a csomagolást levették, visszanyerte eredeti térfogatát. Az 1970-90 közötti időszakban nagyon sokrétűvé vált a szigetelő anyagok alkalmazása, egyre többféle termék jelent meg a piacon.

A vegyipar erőteljes fejlődésével jelentek meg a habos szigetelő anyagok, mint a polisztirol hab sokféle márkanéven (Hungarocell, Nikecell, stb.). Jelentős lépés volt a poliuretánok habosított változatának kifejlesztése, ami ugyan lényegesen drágább, mint a sztirol alapú habok, de a szigetelő képessége is jobb. Felhasználási területük inkább az ipari technológiák szigetelésében található (szárító kamrák, hűtőtartályok).

Mindkét területen a fejlesztéseket napjainkig is elsősorban piacorientált cégek végzik, főként gazdasági céllal, a tudomány mint eszköz szolgál ezen cégek laboratóriumaiban. Az új eredmények szinte csak akkor kerülnek napvilágra, ha már kész terméket tudnak bemutatni.

Az egyik fő fejlesztő cég a DOW Chemie, amely cég a vákuumszigetelések fejlesztésében is nagy szerepet vállalt az INSTILL Core elnevezésű vákuumpanelban használt betét kifejlesztésével [NAHAB RES. CENT. 2002].

A reflexív bevonatok és fóliák kísérleti fejlesztései szintén elég korán a múlt század 20-as éveiben kezdődtek, a kutatások nem hoztak jelentős sikert. Az ötvenes évek közepén az űrkutatással kapcsolatban került elő ismét a téma, amikor Clark E. Beck a Wright-Patterson légi bázison foglalkozott az alacsony emissziós tényezőjű felületek szigetelésként való alkalmazásával a NASA számára. Ez könnyen érthető, hiszen az űrben nincs levegő és a szálás és habos szigetelő anyagok nem működnek, ugyanakkor óriási hőmérsékleti szélsőségek lépnek fel, a -273 °C -tól a $230\text{-}240\text{ °C}$ -ig. Ez ellen a hőmérséklet ellen csak nagyon nagy vastagságú hagyományos szigetelőanyaggal lehetett volna védekezni.

Később történtek kísérletek járművek és vasúti kocsik szigetelésére gyűrt alufóliával, a gyűrésre a fólia rögzítése és pozícionálása miatt volt szükség, de az összeéréseknél az alumínium magas hővezetési tényezője miatt nagy hőhíd hatások jelentkeztek. A megfelelő szilárdság elérésével „vastagabb” fóliákat kellett alkalmazni, mert a műanyag fóliákkal való társítási technológia csak később fejlődött ki.

Az energiaárak drágulásával terjedt el a szálás anyagok fólia kasírozása, ahol a szálás anyag egyik felére alufóliát ragasztanak fel. Ezzel az eljárással tudják növelni a szigetelő lemez vagy paplan szigetelő képességét. Ismert a légbuborékos fólia egyik oldalának alufóliával való társítása. Mindezek a termékek csak egyszer használják ki az alumínium felületek előnyös emissziós tulajdonságait.

A szakirodalomban épületek szigetelésére nem találtam utalást alacsony emissziós tényezőjű felületek több rétegben való alkalmazására.

3. Hővezetési tényező mérése

A kutatás során elkészített próbatestek célja, hogy a hő terjedését a lehető leghatékonyabban akadályozzák. Tehát minél kisebb legyen a szerkezeten áthaladó energia mennyiség. Ezt az energia mennyiséget meg lehet mérni megfelelően kialakított berendezésekben a fizika törvényszerűségei szerint. A mérés pontossága érdekében arra törekszünk, hogy a mérés során a hőáram a felületekre merőlegesen alakuljon ki, vagyis egydimenziós legyen.

Elméletileg egydimenziós hőáram csak végtelen kiterjedésű és tökéletesen párhuzamos, sík felületek között jön létre. Ezek a feltételek nehezen biztosíthatóak (különösen az első) ezért a mérési gyakorlatban közelítéssel élünk, úgy hogy a próbatest vastagsági méreteihez képest nagy szélességi méreteket választunk és ezen felül az oldalirányú hőáramokat az oldal mentén elhelyezett szigeteléssel csökkentjük.

A próbatestek mérését az Építésügyi Minőségellenőrző Intézet (ÉMI) Épületszerkezeti Tudományos Osztályának Épületszerkezeti és Épületfizikai Szakági laboratóriumában Súlyomi Péter és Molnárné Maga Ágota jóvoltából és aktív segítségükkel végeztem.

Az említett intézmény a magyarországi építőipar és az ahhoz kapcsolódó termékek meghatározó minőségvizsgáló Intézete. Az Épületfizikai laboratórium rendelkezik a hővezetési tényező meghatározásához szükséges korszerű (EU normáknak megfelelő) berendezésekkel, az elengedhetetlen szakmai felkészültséggel és tapasztalatokkal.

A méréseimet két berendezésben végeztem melyeket az alábbiakban mutatok be.

3.1 Anyagok és módszer

A próbatesteket saját magam készítettem alkalmanként kisebb segítséggel. A próbatestek fedőlapja 4 és 6 mm vastag bükk rétegelt lemezből, a keretelemek lúccs lécekből, vákuumpanelnél alumínium profilból készültek. A tükröpanel esetében az alacsony felületi emissziós tényezőjű anyag 9 μm vastagságú fényes alumínium társított polietilén fóliából készültek. A vákuumpanel esetében a légzáró réteget 200 μm vastagságú fényes alumínium fólia biztosította. A vákuumpanel esetében a ragasztásokat butil kaucsuk ragasztó anyaggal végeztem, mert ennek az anyagnak viszonylag alacsony a légáteresztése. A tükröpanel esetében mind a kasírozáshoz mind a keretelemek és fóliák rögzítéséhez a Henkel cég Sichello típusú kontakt ragasztóját használtam.

A hővezetés mérése során egy mérési ciklusban berendezéstől függően egyszerre egy vagy két próbatest mérése történik. A Holometrix berendezésben egyszerre egy próbatestet lehet mérni lásd. 3.2 fejezet. A Holzbau Holten berendezésben pedig két egyforma próbatestet lásd. 3.3 fejezet.

A hővezetési mérések során a mérés jellegéből adódóan a mérési eltérések főként nem a mért próbatest tulajdonságainak eltéréseiből adódnak, hanem magának a mérés körülményeiből. Egy-egy panel típusból két, néhány esetben 3 próbatestet készítettem. Az alacsony próbatest szám miatt a mérések ismétlésével és ellenőrző mérések végzésével növeltem meg az eredmények megbízhatóságát. Az eredmények megbízhatóságának növelése érdekében a két berendezést is összemértem. Ugyanazt a típusú próbatestet elkészítettem mindkét berendezés számára és az eredményeket összevettem.

3.2 Hővezetési tényező mérése Holometrix típusú hőárammérő berendezéssel

A berendezés típus megnevezése: Holometrix Rk80 Rapid-k hőárammérős hővezetési tényező mérő berendezés.

A mérés elve:

A berendezés laboratóriumi mérésekre készített, szigetelő és egyéb, épületben alkalmazott anyagok hővezetési tényezőjének meghatározására alkalmas készülék. A mérés állandósult hőáram mellett vízszintesen elhelyezett próbatestekkel történik az ISO 8301 (ASTM C 518) szabványnak megfelelően.

A mintadarabban keresztül folyó hőáramot hőmérséklet különbség hozza létre, adott hőmérsékletkülönbség hatására fellépő hőáram függ az anyag hővezetési tényezőjétől (λ) és az anyag vastagságától. A mennyiségek közötti összefüggést a következő egyenlet adja meg:

$$Q = \frac{\lambda * A * \Delta T}{d}$$

- Q hőáram (W);
 λ Hővezetési tényező (W/mK);
 A Próbatest felülete (m²);
 ΔT Hőmérséklet különbség a próbatest két oldalán (K);
 d Próbatest vastagsága (m);

A Rapid-k berendezés a hőáramot hőárammérő lappal méri, amely egy sorba kapcsolt hőelem sor. A hőelemek feszültségei a sorba kapcsolás következtében integrálódnak és a kapcsokon mérhető feszültség arányos a hőárammérő keresztmetszetén átfolyó hőárammal. Mivel a berendezésben a felület (A) adott érték az egyenlet a következőképpen átírható:

$$\frac{\lambda}{d} = N * \frac{U}{\Delta T}$$

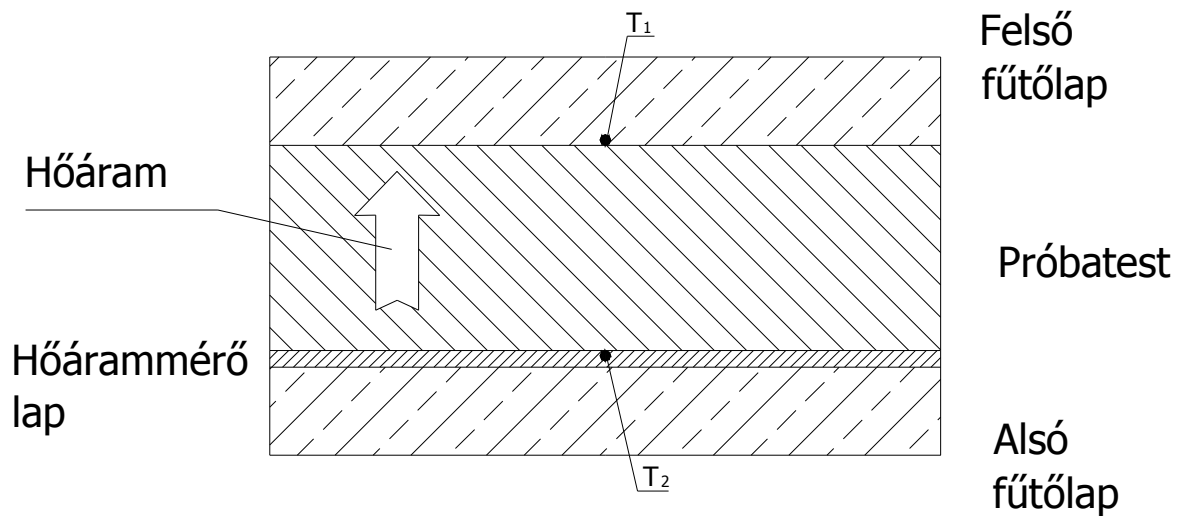
ahol:

- U A hőárammérő kimenetein a feszültség
 N A kalibrációs tényező a hőárammérő feszültsége és a próbatesten átáramló valós hőáram között.

Az N kalibrációs faktor egy ismert hővezetési tényezőjű próbatest mérésével határozható meg az U és a ΔT hőmérsékletkülönbség állandósult állapotban történő mérése alapján. Ha a $U/\Delta T$ és a λ/d hányados között valódi arányosság áll fenn, akkor egy ismeretlen próbatest mérése esetén (természetesen állandósult állapotban) a mért U és ΔT értékekből az eredmény meghatározható, mert a vastagság is megmérhető.

Az N kalibrációs faktor hőmérsékletfüggő. Ha ugyanazt a kalibrációs mintát ugyanazon a ΔT mellett mérjük, de más hőmérsékleten, akkor más N értéket kapunk. Ezért fontos hogy a mérések során a kalibrációnál alkalmazott hőmérsékleteket használjuk.

Az ÉMI-ben természetesen ezt a kérdést nagy odafigyeléssel kezelik, ezért az én méréseim is az előírásoknak és a szabványnak (EN12667) megfelelően történtek. A folyamatos pontosság biztosítása érdekében a kalibrációs mérést az Épületfizikai laboratórium berendezésén rendszeres időközönként elvégzik.



7.ábra A Holometrix hőárammérő berendezés mérési vázlatja

A mérés során az alsó fűtőlap hőmérséklete magasabb. A légréssel rendelkező próbatestek esetén ennek a kialakuló hőáram irányára szempontjából kiemelt jelentősége van és azt az értékelés során figyelembe kell venni. A szilárd anyagok hővezető képességének mérése során az irány kevésbé számít, mint a gázok esetében. A szilárd anyagok részecskéi nem mozdulnak el ha a sűrűségük alacsonyabb lesz mint a környező részeké. A levegő részecskéi ellenben elmozdulnak. A mérések során én olyan próbatesteket vizsgálok, amelyekben a levegő szigetelő képességének kiemelt jelentősége van, ezért a konvekcióval is fokozottabban kell számolni.

A mérési eredmények pontossága

A véletlen hibák meghatározhatók ugyanannak a próbatestnek az ismételt mérésével, ez megmutatja, hogy az eredmény az ismételt mérés során milyen mértékben tér el a korábbi mérési eredménytől. Ez az érték a használt berendezés gépkönyve szerint $\pm 1\%$ -on belül tartható. A kísérletsorozatban ezt mi is ellenőriztük egy próbatest mérésének ismétlésével.

A véletlen hiba jelentős része a fűtő és hűtőlap felületeinek a próbatest felületével való kontakt érintkezés milyenségéből adódik. Kisebb hányada a vezérlés beállításából és a mechanikus próbatest vastagság meghatározásából adódik (melyet a gép a mérés során a beépített mérőegység segítségével végez el).

A szisztematikus hiba abból adódik, hogy az egyenlet: $\frac{\lambda}{d} = N * \frac{U}{\Delta T}$ nem teljesen pontosan reprezentálja a valós összefüggést a $U/\Delta T$ és a λ/d között. Ennek oka lehet a próbatestben a nem lineáris hőáram, illetve az érintkező felületek között fellépő ellenállás. Ezek a hibák legfőképpen a berendezés mérési tartományának a szélsőbb területein lépnek fel észrevehetően.

A mérés menete:

A Rapid-k berendezébe behelyezhető minta mérete 300x300 mm, a vastagság 1-100 mm-es tartományban változhat. A próbatestek felületének síknak kell lenni, a lehető legjobb érintkezés érdekében. A mérés két beállítható hőmérsékletű, fűtő (hűtő) lap között történik. A két lap egy hőszigetelt dobozban helyezkedik el, a doboz oldalirányban erősen szigetelt, hogy az oldalirányban esetleg fellépő hőáramot minimálisra csökkentse. Ezt az oldalszigetelést maszkolásnak nevezik. A maszkolás egyik oldala kinyitható a próbatest berakásának biztosítása érdekében. Az alsó fűtőlap mozgatható, a mozgatót a gép oldalán elhelyezett kar teszi lehetővé. Az egyenletes és állandó felület összeszorítást a fűtőlapok és a próbatest felületei között 4 állandó rugóerejű rugó biztosítja a fűtőlap négy sarkán. Az alsó fűtőlap mozgatója teszi lehetővé az adott vastagsági tartományon belül bármilyen méretű próbatest elhelyezését és a felületeken az azonos szorító erőt. A berendezésben az emelőszerkezetbe be van építve vastagságmérő, mely közvetlenül szolgáltatja az adatot a berendezés vezérlését ellátó számítógépnek. A méréssel kapcsolatos paramétereket a számítógépen futó vezérlő szoftverben lehet megadni.

A paraméterek beadása után a termosztátok megkezdik a fűtőlapokat a beállított értékre melegíteni (hűteni). A mérés csak az állandósult állapot kialakulása után történik. Ennek az állapotnak az elérése 2-3 órát is igénybe vehet, próbatesttől függően. Akkor fogadja el a fennálló hőmérsékleti állapotot állandósultnak ha két 15 perces időközzel a mérés során a $U/(T_h - T_c)$ hányados változása kisebb mint 1%. A kialakult állandósult állapotban kezdődik a mérés.

3.3 Hővezetési tényező mérése Holzbau Holten hővezetési tényező mérő berendezéssel

A mérőberendezés (Poensgen típusú) szimmetrikus elrendezésű berendezés, a próbatestek mérete 800*800 mm. A mérőlapok 150 mm széles peremsávval vannak ellátva, ezek biztosítják a szegélyfűtést, hogy a hőáram a felületre merőleges legyen. A valóságos mérés a próbatest 500*500 mm-es központi részén történik.

A mérés során a berendezés a próbatest felületére merőleges, állandósult hőáramot hoz létre. A hőáramot villamos úton állítja elő a 800*800 mm négyzetes középső fűtőlapban elhelyezett ellenállás fűtőtestek üzemeltetésével. A fűtőlap mindkét oldalára azonos minőségű és vastagságú próbatestet helyezünk el. A két próbatestet két azonos hűtőlap fogja közre a mérési elrendezést a 8. ábra mutatja. A hűtőlapok folyadékűtésűek, a használt berendezésben az állandó hőmérsékletet Lauda típusú hűtő termosztát biztosította. A mérés során biztosítani kell hogy a fűtőlapból induló hőáram „teljes egészében” a hűtőlapokban nyelődjön el, tehát minimálisra kell csökkenteni a peremveszteséget. Ennek elérésére a mérési összeállítás egy nagy tartályban foglal helyet, ahol a szabadon maradt térrészeket parafadara szigetelő anyag tölti ki.

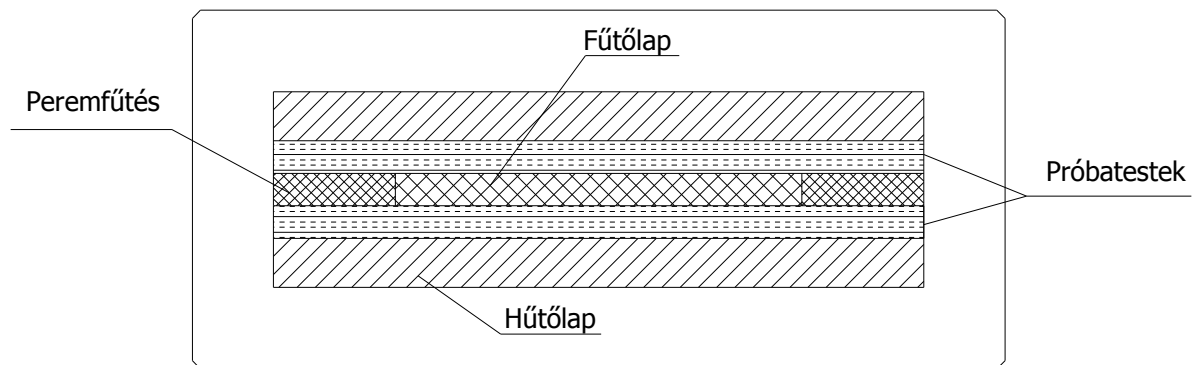
A próbatestek felületi hőmérséklet egyenletességét a berendezés 4-4 ponton (mind meleg mind hideg oldalon) termoelemek segítségével méri. A 4 mérőegység az állandósult hőáram meglétét és a hőmérséklet egyenletes megoszlását figyeli a próbatest felületein. Ezek a mérőpontok a próbatest középpontjától egyenlő távolságra az átlók vonalában helyezkednek el, úgy hogy a peremfűtés és a fő fűtés határán legyenek. Az eredmény meghatározására a próbatest felületi középpontjában elhelyezett hőelem szolgál.

Mivel a próbatesteimben légrétegek is szerepet kapnak, illetve az épületekben a légrés leggyakrabban függőlegesen helyezkedik el, ezért a méréseket is így végeztük. Ha nem

függőleges elrendezésben van a légrés akkor a konvekció kialakulása más és ez megváltoztatná az eredményt is. Ennek a berendezésnek az egyik előnye az előbbieken említettel, hogy a mind vízszintes mind függőleges mérés elrendezésre van lehetőség.

A mérőberendezés elkészítésekor a mérési pontosság érdekében szigorú pontossági előírásokat érvényesített a gyártó. Hosszú időn keresztül (5-10 óra) ellenőrizte az állandósult állapot fennállását és csak többszöri ellenőrzés után kezdte meg a valóságos mérést. Ha azonban jelentősebb eltérést érzékelt a mérési eredmények között a mérési ciklusok között, akkor leállította a mérést és újra az ellenőrző ciklusba lépett vissza. A mérési ciklus során legalább 100 mérést 8-9 percenként végzett a berendezés és akkor fogadta el illetve engedte tovább a mérési ciklust ha a peremmérők eredményei adott hibahatár alatt voltak.

Mérési vázlat:



8.ábra A Holzbau Holten hővezetési tényező mérő berendezés mérési vázlata

4. Tükörpanel

A 2.4.2 és 2.4.1 „A sugárzás csökkentése” és a „A konvekció csökkentése” fejezetekben annak az elméleti lehetőségét vizsgáltam, hogyan hat a légrétegben kifeszített vékony fólia a légrétegen áthaladó hőáramra. A gyakorlati megvalósításhoz terveztem ezt a kísérlet sorozatot. Ebben a mérési sorozatban azt szeretném megvizsgálni, hogy egy panelszerkezeten belül alkalmazott alacsony felületi emissziójú rétegek alkalmazásával milyen mértékben tudom csökkenteni a panelon átáramló hőmennyiséget.

A vizsgálathoz kialakítottam egy panelszerkezetet, amelynek méretei illeszkednek a Holometrix hőárammérő berendezés befogadó képességéhez. A kísérletsorozat minden egyes mérésénél ezt a panelt használok, ezzel biztosítani tudom, hogy a mért különbségek csak a panel belsejében végzett változtatásoknak a hatása és nem magának a panelnek a változása.

Ennek a kísérletsorozatnak az, az elsődleges célja hogy megmutassa milyen hatással van egy szerkezet hőszigetelő képességére a beépített alacsony emissziós tényezőjű rétegek száma és a közöttük lévő légrétegek vastagsága. Meddig érdemes növelnem a beépített fóliák számát és csökkentenem a légrés méretét?

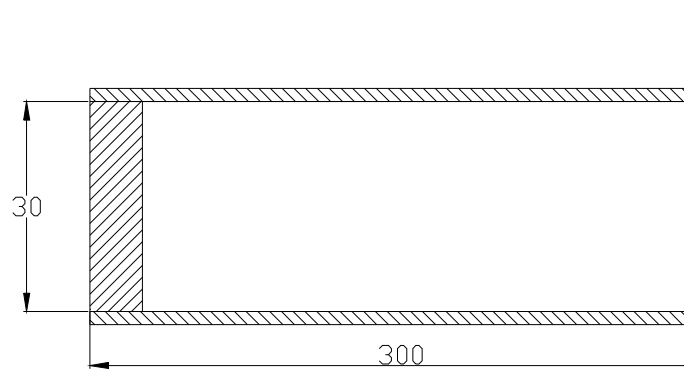
A panel mérete 300*300 mm vastagsága 37,5-38,9 mm között volt a panel belsejében az össz légrés 30 mm. Az egyes mérési lépcsőkhöz kialakított panelek vastagsága esetén törekedtem az azonos méretre. A csekély méretkülönbségek a rétegrendek összeállítási csatlakozásainál fellépő ragasztóréteg és a beépített fóliák vastagságából adódnak. A ragasztóréteg vastagsága ugyan állandónak vehető, a számuk azonban 2 és 20 között változott, a fóliák száma pedig 0 és 11 között.

A panel két részből áll

- keret szerkezet fedlapokból és keretelemekből áll ez biztosítja a panel merevségét szilárdságát és lehetőséget ad a felületképzésre,
- alacsony emissziós ernyők (alumínium-polietilén társított fólia),

a két rész nem választható el szervesen, mert a keret elemek feszítik ki az ernyőket, illetve a lemezelemek a rájuk kasírozott fóliákkal a hőszigetelésben is részt vesznek.

A panel tervezéskor figyelembe vettem az esetleges későbbi alkalmazásban szóba jövő anyagokat. A keretszerkezet lap elemeit 3 rétegű, 4 mm vastagságú bükk rétegelt lemezből készítettem, a lapok között a távolságot a lemezek szélein elhelyezett fenyő (luc) keret elemek biztosították. A keret elemek 15 mm szélességűek és 285 mm hosszúságúak voltak, így csak egyféle léchosszúsággal kellett dolgozni minden egyes vizsgálat során. A próbatest keresztmetszetét a 9. ábra mutatja.



9. ábra Tükörpanel keresztmetszet 1 fázis

A berendezés a behelyezett próbatest hővezetési tényezőjét határozza meg. A próbatestjeim nem homogén szerkezetek, ezért a mérés során a teljes próbatestre egy egyenértékű hővezetési tényezőt fogok kapni. Többretegű szerkezetnél a rétegek vastagságának és hővezetési tényezőjének ismeretében kiszámolhatóak az egyes rétegek hővezetési ellenállásai. A fedőlappok ismert vastagsága és hővezetési tényezői miatt, a keret belső tartalmának egyenértékű hővezetési tényezője is kiszámítható. A mérések során ugyanazt a keretet használok és így a mérések közötti különbségek a panel belső tartalmától függenek.

A vizsgálatban elsősorban a panel belsejében lejátszódó folyamatra vagyok kíváncsi ezért a kapott egyenértékű tényezőt 3 összetevőre bontom az anyagok hővezetési ellenállásai szerint:

$$R_{\text{összes}} = R_1 + R_{\text{lég}} + R_3$$

R_1, R_3 fedő lemezek hőellenállásai ($\text{m}^2\text{K/W}$);

$R_{\text{lég}}$ A légrések együttes hőellenállásai ($\text{m}^2\text{K/W}$);

vagyis

$$\frac{\delta_{\text{összes}}}{\lambda_e} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_{\text{lég}}}{\lambda_{\text{lég}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}$$

δ_1 δ_3 fedőlemezek vastagsága (m);

λ_1 λ_3 fedőlemezek hővezetési tényezője (W/mK);

az egyes és hármas indexel jelzett tényezőket a panel felső és alsó lemezét jelentik, melyek azonos anyagból készültek azonos vastagságúak, tehát a hővezetési ellenállásuk is azonos. A „lég”-jelzett pedig maga a vizsgálati terület. A fenti összefüggésben a $\lambda_{\text{lég}}$ kivételével minden tényező ismert a mérés után. Ezek alapján a $\lambda_{\text{lég}}$ vagyis a légrés(ek) egyenértékű hővezetési tényezője kiszámítható.

$$\lambda_{\text{lég}} = \frac{\delta_{\text{lég}}}{\left(\frac{\delta_{\text{összes}}}{\lambda_e} - 2 * \frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)}$$

A lemez vastagsága 4mm (δ_1) a bükk faanyagra vonatkoztatott hővezetési értéket 0,16 W/mK (λ_1) értékre vettem [Molnár S. 2000.], így az R_1 és R_2 értéke 0,025 m²K/W.

A vizsgálat során lépésenként változtattam a panelszerkezetet. A lépésenkénti felépítés célja az egyes változtatások hatásainak megismerése volt.

A tükörpanel fejlesztése során 6 lépcsőben építettem fel a kísérletsorozatot.

1. fázis

Az első lépésben arra voltam kíváncsi, hogy maga a "csupasz" panelszerkezet milyen hőellenállási tényezővel bír. A későbbi mérésekben is ez a szerkezet ad "otthont" az ernyőknek, így szervesen hozzáteszi a maga részét a későbbi vizsgálati eredményekhez is. A mérési adatokat a 4. táblázat tartalmazza:

4.táblázat

	Megnevezés	mért. egység	érték
1	jelzése	PA 0	
2	szélesség	mm	300
3	hosszúság	mm	300
4	vastagság	mm	37,5
5	tömeg	g	671
6	sűrűség	g/dm ³	198,81
7	T _{up} meleg oldali hőmérséklet	°C	15,00
8	T _{lp} hideg oldali hőmérséklet	°C	5,39
9	T _{mean} közép hőmérséklet	°C	10,19
10	ΔT hőmérséklet különbség	°C	9,61
11	Hőáram sűrűség	W/m ²	33,9171
12	Mért U érték		3903
13	Panel egyenértékű hővezetési tényező	W/mK	0,15
14	Hitelesítési állandó (N tényező)	–	0,00869
15	Légrés egyenértékű hővezetési tényezője	W/mK	0,1475

A 30 mm-es légréssel és a fa dobozzal közelítőleg a faanyagok rostokra merőleges hővezetési tényezőjét értem el.

Ha például fenyő gerendából tömör falat építünk, vagy egy második esetben ugyanolyan falban a kísérleti panelnek megfelelő légrétegeket alakítunk ki, akkor a kísérletben adott hőállapot mellett a légrés a fával azonos mértékben vezeti a hőt. Hővezetési szempontból tehát a légrés helyén lévő fa teljesen fölösleges.

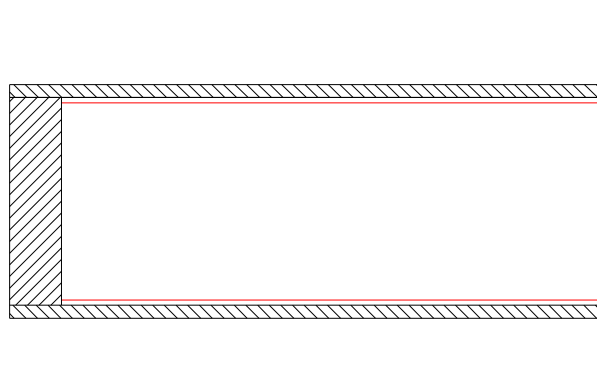
A táblázatban feltüntetett hőáram a mért feszültség (Q) érték és a hitelesítési állandó szorzata. Ez jelen esetben négyzetméterenként 34 Watott jelent az adott és a táblázatban feltüntet hőmérsékleti állapotok mellett.

A légrésre számított egyenértékű hővezetési tényező a faanyagéval közel azonos érték lett. Ha figyelembe vesszük, hogy a nyugvó levegő 0-20 °C fok körül 0,026 W/mK hővezetési tulajdonsággal bír akkor látható, hogy a pusztán hőátadással átáramlott hő nagyon kis töredéke az összes átáramlott hőmennyiségnek. Az átjutó energia nagy része a sugárzásos és a konvekciós utat választotta, hogy milyen arányban azt ezekből az adatokból nem tudjuk megmondani.

A lambdára vonatkozó eredményt mint kiinduló adatot kezelem, vagyis ezt szeretném a további lépésekben javítani, amennyire a lehetőségeim és a fizika törvényei lehetővé teszik.

2. fázis

A második lépcsőben a lemezek közötti légrést változatlanul hagytam, csupán a lemezek belső felületére kasíroztam fel alumínium fóliát. Vagyis a panel belsejében két alumínium felület nézett szembe egymással (10.ábra).



10. ábra Tükörpanel keresztmetszet 2. fázis

A fólia kasírozás nem járt jelentős anyagbevitellel (kb. 25 g ragasztóréteggel együtt, ez alig 3%) a panelben, de nagyon lényeges hogy a fa igen magas felületi emissziós tényezőjét (0,9-0,95) rendkívül nagy mértékben lecsökkentette 0,04-0,06 közötti értékre. A változtatás a kisebb fólia felületi méret miatt a fához képest (a fa pórusai a levegővel érintkező felületet jelentősen megnövelik) nem csak a sugárzásos hőáramot csökkenti, hanem az egyenletesebb és kisebb felület miatt a hőátadásos és konvekciós áramlásra is hatással lehet. Kétségtelen hogy a sugárzási hőátvitelben történő változásnak csak töredéke a molekulákhoz kötődő hőtranszport változása. A fólia felragasztásával ugyan a lemez vastagabb lett (50-100 μm -rel a ragasztóréteggel együtt). Arányaiban ennek a vastagsági növekedésnek szintén nem

tulajdonítok jelentős szerepet, habár a felvitt 9 μm vastagságú alumínium hővezetési tényezője a 200 W/mK érték körüli mégis a 9 ezred mm-es vastagság lehetővé teszi az elhanyagolását. A mérés adatai az 5.táblázatban:

5.táblázat

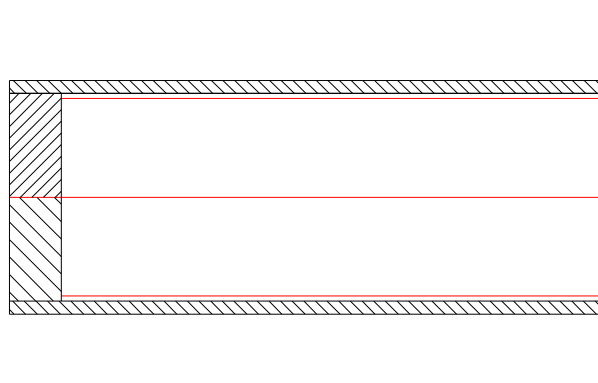
	Megnevezés	mért. egység	érték
1	jelzése	PA 1	
2	szélesség	mm	300
3	hosszúság	mm	300
4	vastagság	mm	37,7
5	tömeg	g	696,3
6	sűrűség	g/dm ³	205,22
7	T _{up} meleg oldali hőmérséklet	°C	14,99
8	T _{lp} hideg oldali hőmérséklet	°C	5,12
9	T _{mean} közép hőmérséklet	°C	10,06
10	ΔT hőmérséklet különbség	°C	9,87
11	Mért U érték	–	2345
12	Hőáram sűrűség	W/m ²	20,3781
13	Panel egyenértékű hővezetési tényező	W/mK	0,07815
14	Hitelesítési állandó	–	0,00869
15	Légréteg egyenértékű hővezetési tényezője	W/mK	0,06868

A két fóliaréteg az előző esethez viszonyítva közel felére csökkentette az egyenértékű hővezetési tényezőt. A légrétegre vetített egyenértékű hővezetési tényező kevesebb mint felére (46,6%-ra) csökkent. Ez a változás erős jelzést ad a sugárzásos hőáram jelentőségére vonatkozóan, mert csak a felület tulajdonságát változtattam meg minden más (légréteg geometriai méretei, hőmérsékleti tartomány, stb.) változatlan maradtak. A légréteg egyenértékű hővezetési tényezőjének 53,4%-os csökkenése szinte teljes egészében a sugárzásos hőáram rovására történt. Biztos tehát, hogy kezdeti állapotban a teljes hőáram több mint fele sugárzással jutott át a másik oldalra. Mivel nem valószínű, hogy a második kísérletben a sugárzásos hőáramot 0-ra csökkentettem volna, – mert a felületet képző fényes alumínium sem tökéletesen tükröző, hanem az említett 0,04-0,06 emissziós értékek között van – feltételezhető, hogy a jelenlegi érték is bír valamennyi sugárzásos részarányal.

Ezen két mérés alapján látható, hogy az anyagmennyiséget alig képviselő fóliák milyen nagy befolyást gyakorolnak a hőszigetelési jellemzőkre. A fóliák a hőáram közel felét megállították.

3. fázis

A kísérletsorozat 3 fázisában a 2. lépcsőben kialakított panel lemezei közötti 30mm-es légrést osztottam ketté egy kifeszített fóliával. A fólia megegyezik azzal, amelyet a lemezek felületére kasíroztam 11.ábra.



11. ábra Tükörpanel keresztmetszet 3. fázis

A kísérletekben használt fólia nem egyszerűen csak vékonyra hengerelt alumínium "lemez", hanem lágy polietilén fóliával társított kompozit fólia. A polietilénre mint hordozó rétegre azért van szükség, mert az alumínium fólia (9 μm -es vastagságban) nagyon sérülékeny. Ha ugyan mégis ezt alkalmaznám, az nagyon megnehezítené a kezelhetőségét, hiszen minden pontszerű vagy élmenti érintkezésnél nagy valószínűséggel állna fenn a szakadás veszélye. A későbbiekre nézve is hátrányt jelenthetne, mert a szigetelésnek legalább az épület tervezett élettartamáig kifogástalanul működnie kellene. Ilyen vékony alumínium fólia esetén ezt nehezen tartom megvalósíthatónak. A társítás eredményeképpen azonban elveszítettem azt a lehetőséget, hogy a fóliám mindkét rétege a már említett alacsony felületi emissziós tényezővel bírjon, mert az egyik oldala már polietilén. A polietilén emissziós együtthatója gyártástól adalékanyagoktól függően 0,8-0,95 közötti érték. Szerencsés tény, hogy az ernyőzés során, az egyik oldalon az alumínium így is kiveszi a részét és ha a melegebb oldal felé néz akkor már nem melegszik fel olyan mértékben a sugárzásból adódóan mint a polietilén tenné, így nem is adja tovább azt a hőt amire "nem melegedett fel", tehát a másik oldalon a polietilén ugyan sokat kibocsát az alacsonyabb hőmérsékleti szintből mégis alacsony érték marad. Ha pedig a hideg oldal felé kerül az alumínium, akkor a polietilén ugyan sok hőt "összeszed" a meleg oldalról, de a hideg oldalon az alumínium ezt, azzal, hogy csak 4-6%-át sugározza ki, jelentős mértékben redukálja. Így hát sugárzási szempontból annak sincs döntő jelentősége, hogy az alumínium a meleg vagy a hideg oldalra kerül-e. A következőben megnézem milyen csökkentő hatása van annak, hogy az ernyőm egyik oldali emissziós tényezője magas érték a másik oldalon lévő alumíniumhoz képest: A két felület közötti sugárzási cseretényezőre vonatkozó alapképlet:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

ezt a képletet használom a két eset közötti különbség meghatározására [M.A. Mihaljev 1990.]: Az első esetben két fényes alumínium felületet fordítok szembe. Az alumínium emissziós tényezőjét 0,05-nek veszem.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,05} - 1} = 0,025641$$

Az $\varepsilon_{1,2}$ érték a két felület közötti úgynevezett sugárzási cseretényező, ennek értéke 2.56% a fekete testhez viszonyítva.

A második esetben a megvalósult állapotot határozom meg, ahol csak az egyik oldal alumínium a másik polietilén. A panelomban a kettéosztott légrétegek közül csak az egyikben áll fen ez az állapot, mert a középen elhelyezett fólia egyik fele alumínium a másik polietilén, a fedőlemezek belső felülete mindkét esetben alumínium. A polietilén esetén 0,9-el számolok.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,9} - 1} = 0,04972$$

Igaz hogy a második esetben az együttes sugárzási csere tényező majdnem kétszerese az első esetben lévőnek, de a 0,04972 is viszonylag alacsony érték. Látható hogy még az alacsonyabb emissziós tényező értékénél is alacsonyabb szám.

Az összehasonlítás kedvéért számítom ki a kezdeti "csupasz" panel esetére érvényes értéket. A felületkezeletlen durván csiszolt fa felület ε tényezőjét 0,95-nek veszem.

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{0,95} + \frac{1}{0,95} - 1} = 0,9047$$

Az eredmény 18 szorosa a fent számolt alumínium-polietilén és 35-szöröse az alumínium-alumínium cseretényező értékeknek. Ez a rendkívül nagy különbség meg is mutatkozik a 4. és 5. táblázat lambda értékeiben, pedig a szerkezet a vékony bevonattól eltekintve ugyanaz volt.

A légrés ketté osztása 15-15 mm az ernyőzési szerepén túl beleszól a konvekciós hőáram hatékonyságába. A 2.2.2 fejezetben megállapítottak alapján, ha a légrés vastagságát csökkentem, akkor a konvekciós hatás is csökken. Így a 15 mm-es légrésben a légkörzés kialakulásának jóval kisebb esélye van, illetve ha fel is lépne, jóval kisebb sebességgel megy végbe mint a 30 mm-es résben.

6.táblázat

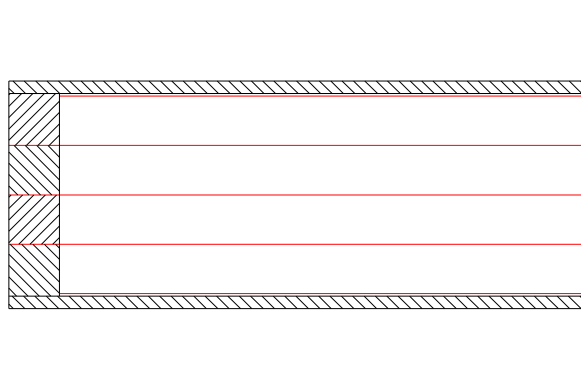
	Megnevezés	mért. egység	érték
1	jelzése	PA 2	
2	szélesség	mm	300
3	hosszúság	mm	300
4	vastagság	mm	37,6
5	tömeg	g	671,6
6	sűrűség	g/dm ³	198,46
7	T _{up} meleg oldali hőmérséklet	°C	15,01
8	T _{lp} hideg oldali hőmérséklet	°C	4,88
9	T _{mean} közép hőmérséklet	°C	9,94
10	ΔT hőmérséklet különbség	°C	10,13
11	Hőáram sűrűség	W/m ²	13,3131
12	Mért U érték	–	1532
13	Panel egyenértékű hővezetési tényező	W/mK	0,05598
14	Hitelesítési állandó	–	0,00869
15	Légrés egyenértékű hővezetési tényezője	W/mK	0,04761

A panelen áthaladó hőáram a közepén elhelyezett fólia hatására $7,065 \text{ W/m}^2$ -el (34,67%-al) csökkent, ez azt jelenti, hogy a közepén kifeszített 40-50 μm -es fólia hatására a panelem hőszigetelő képessége 28,3%-al javult. Ez az eredmény a nagyobb testsűrűségű szálal vagy habos szigetelő anyagokéval közel egyenlő. Feltehetően a konvekció hatása jelentős mértékben csökkent, mert fele akkora lett a rendelkezésre álló cirkulációs tér.

A légrésre vonatkoztatott egyenértékű hővezetési tényező a plusz egy ernyő hatására 30%-al csökkent. Igaz, hogy ennek a fóliának a felkasírozottakkal szemben nem csak a sugárzásra van hatása, hanem a légközítés akadályozására is.

4. fázis

Az előző 3 fázisú panelben a 15-15 mm-es légrést osztottam további két-két részre, így a panelben lévő légrés már 4 részre van osztva és a rétegek közötti résméret 7,5 mm 12. ábra.



12. ábra Tükörpanel keresztmetszet 4. fázis

Az itt beépített fóliák hasonlóan az előző esethez polietilén társított fóliák, ezért minden légrésemben, melyet két kifeszített fólia határol érvényes az előzőekben mutatott sugárzási cseretényező (0,04972). A mérési adatokat és eredményeket a 7. táblázat tartalmazza.

7.táblázat

	Megnevezés	mért. egység	érték
1	jelzése	PA 3	
2	szélesség	mm	300
3	hosszúság	mm	300
4	vastagság	mm	37,7
5	tömeg	g	675,4
6	sűrűség	g/dm ³	199,06
7	T _{up} meleg oldali hőmérséklet	°C	15,01
8	T _{lp} hideg oldali hőmérséklet	°C	4,34
9	T _{mean} közép hőmérséklet	°C	9,68
10	ΔT hőmérséklet különbség	°C	10,67
11	Hőáram sűrűség	W/m ²	10,6539
12	Mért U érték	–	1226
13	Panel egyenértékű hővezetési tényező	W/mK	0,03789
14	Hitelesítési állandó	–	0,00869
15	Légrés egyenértékű hővezetési tényezője	W/mK	0,03142

A hőáram a panelon keresztül továbbra is csökkent de közel sem olyan arányban, mint az előző esetben, pedig most két további fóliát építettem be. A hőáram alig 2,6 Wattal csökkent ellentétben a korábbi 7 wattal. A 7,5 mm-es légrés és a légréseként vélhetően fennálló hőfokkülönbség 2 és 3 °C közötti érték mellett a konvekció is vélhetően alacsony érték. A 2-3 °C fokot abból feltételezem, hogy a panelon a hőfokesésnek közel egyenletesnek kell lennie, ebből adódik hogy a hőfokkülönbség a panelon 10,67 °C, mely 4 részre oszlik és ezen értékből még a fa fedőlemezek hőellenállása is levonódik.

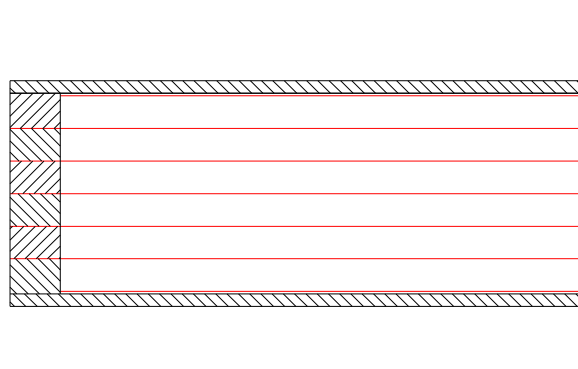
A teljes szerkezetre vonatkoztatott hővezetési tényező a viszonylag alacsony abszolút értékű hőáram csökkenés ellenére 32,3%-al csökkent.

A légrés egyenértékű hővezetési tényezője pedig 34%-al. A 0,03142 W/mK-es érték már egészen jól közelíti a nyugvó levegő 10 °C-on vett hővezetési tényezőjét. Itt már elmondhatjuk, hogy a hőáram jelentős részét maga a hővezetés adja és kisebb hányadot jelent a sugárzásból és konvekcióból adódó hőtranszport.

A további lépésekben megkísérlem a sugárzásból és konvekcióból adódó hőáramot tovább redukálni.

5. fázis

E mérésnél a panelosztásomat úgy alakítottam át, hogy a 4. fázisban lévő 7.5mm légrést 5mm-re a panel négyes felosztását pedig 6-ra változtattam. Így a panelom vastagsági mérete nem változott számottevően csupán a pótlólag beépített fóliák és a ragasztórétegek szerény vastagságai adódnak hozzá alig 2,5%-al növelve a vastagságot. Természetesen a lambda meghatározásnál már a megnövekedett vastagsággal számolok. Az 5. fázisban tehát 6 légrétegem van és 5 ernyő fóliám.



13. ábra Tükörpanel keresztmetszet 5. fázis

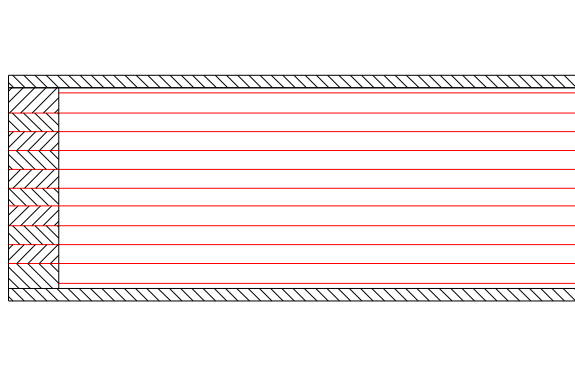
8.táblázat

	Megnevezés	mért. egység	érték
1	jelzése	PA 4	
2	szélesség	mm	300
3	hosszúság	mm	300
4	vastagság	mm	38,7
5	tömeg	g	691,3
6	sűrűség	g/dm ³	198,48
7	T _{up} meleg oldali hőmérséklet	°C	15,02
8	T _{lp} hideg oldali hőmérséklet	°C	4,28
9	T _{mean} közép hőmérséklet	°C	9,65
10	ΔT hőmérséklet különbség	°C	10,74
11	Hőáram sűrűség	W/m ²	9,6719
12	Mért U érték	–	1113
13	Panel egyenértékű hővezetési tényező	W/mK	0,0351
14	Hitelesítési állandó	–	0,00869
15	Légrés egyenértékű hővezetési tényezője	W/mK	0,02916

A lecsökkentett légrés és a további 2 ernyő beépítése nagyon csekély mértékben változtatta az eredményt. Az előzőhöz viszonyítva alig 10%-al csökkentette a hőáramot és 7,3%-al javította a szigetelőképeségét. Viszont még jobban sikerült megközelíteni a nyugvó levegő szigetelő képességét, melyhez képest már csak 16% többlettel rendelkezik a vizsgált szerkezet.

6. fázis

Ebben a fázisban további ernyő fóliákat építettem be, összesen 9 darabot a panel fedőlapjaira kasírozottakon felül. A két bükk rétegelt lemez közötti 30 mm-es légrést 10 egyenlő részre osztottam, így egy-egy légrés vastagsága 3 mm lett 14. ábra.



14. ábra Tükörpanel keresztmetszet 6. fázis

Ebben a vastagságban és a mérésnél alkalmazott 10 °C-os hőmérséklet különbség hatására a hasonlósági számítások alapján a konvekciónak minimális valószínűsége van. Ezt már az előző esetben az 5mm-es légrés esetén is nagyon nagy valószínűséggel feltételezhattük. Mérési eredmények a 9. táblázatban láthatók.

Meg kell említeni, hogy a 300 mm-es felületi méretek esetén még nem jelent problémát a fólia megfelelő kifeszítése és a feszítéssel illetve a kereten való rögzítéssel annak biztosítása, hogy a fóliák ne hajoljanak be túlzott mértékben és ne érjenek össze a panelen belül, 3mm-es légrés esetén. Ugyanez problémát okozhat nagyobb feszítávok mellett. Ennek megoldására készítettem 800*800 mm-es próbatestet, ahol azt vizsgáltam hogyan lehet a fóliák összeérését megakadályozni feltételezve, hogy ugyan a kifeszítéskor ez a feltétel még fennáll, viszont az idő során esetleg fellépő relaxáció vagy megnyúlás következtében jelentősen megnő az összeérés veszélye. Az időben való megnyúlásból fakadó változásokat ugyan nem volt időm kivárni, azt mégis megoldhatónak látom, úgy hogy alacsony hővezetésű anyagból vékony kis felületű távtartókkal az összeérés mentesség biztosítható legyen. Kis térfogat sűrűségű (25 kg/m³) polisztirol habból vágott 3*3 mm keresztmetszetű szalagokat készítettem és ezeket rögzítettem az egyik fólia felületére. A távtartók elhelyezésével véleményem szerint megoldható az összeérések elkerülése. A kiosztás több tényező függvénye ezért csak abban az esetben érdemes vele foglalkozni, ha a szerkezet a kísérleti fázison sikeresen átjut.

9.táblázat

	Megnevezés	mért. egység	érték
1	jelzése	PA 5	
2	szélesség	mm	300
3	hosszúság	mm	300
4	vastagság	mm	38,9
5	tömeg	g	731,1
6	sűrűség	g/dm ³	208,83
7	T _{up} meleg oldali hőmérséklet	°C	15,02
8	T _{ip} hideg oldali hőmérséklet	°C	4,22
9	T _{mean} közép hőmérséklet	°C	9,62
10	ΔT hőmérséklet különbség	°C	10,79
11	Hőáram sűrűség	W/m ²	9,2114
12	Mért U érték	–	1060
13	Panel egyenértékű hővezetési tényező	W/mK	0,03347
14	Hitelesítési állandó	–	0,00869
15	Légrés egyenértékű hővezetési tényezője	W/mK	0,02778

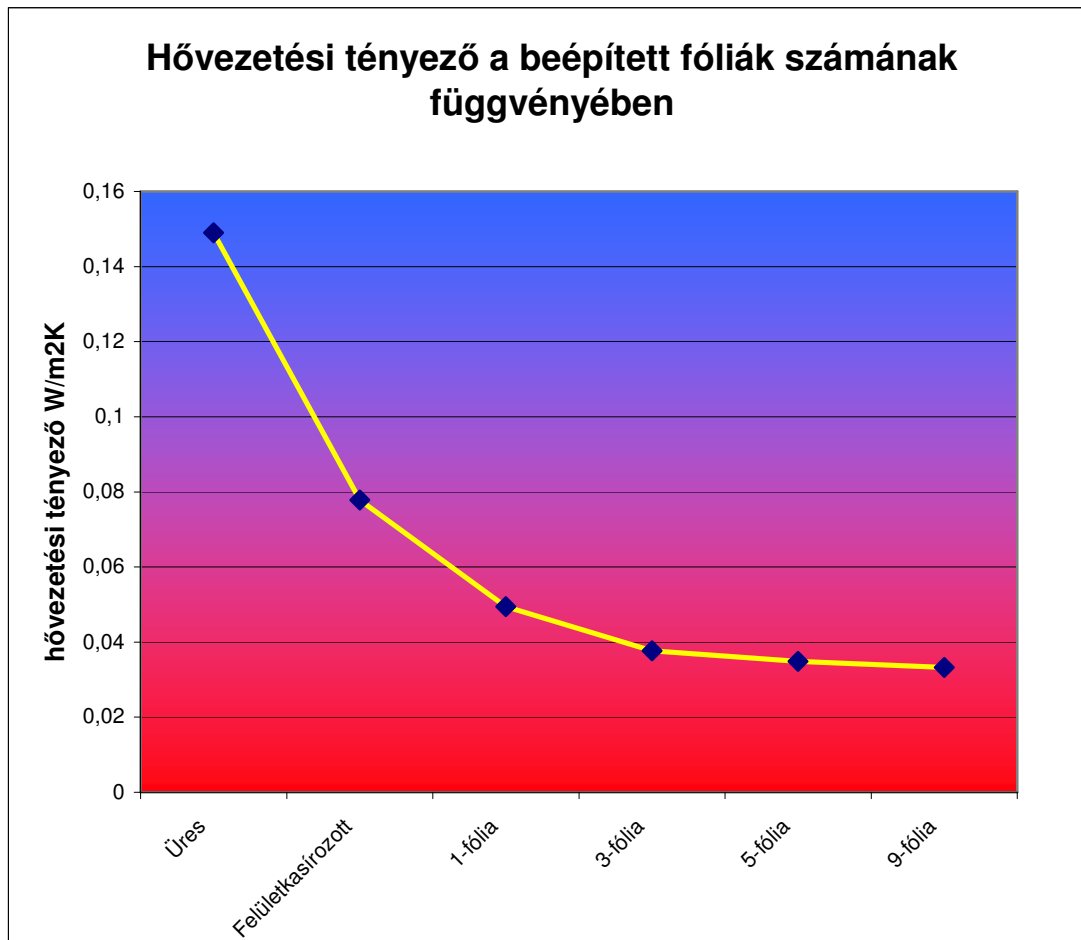
A hőáram a panelon keresztül továbbra is csökkent de nagyon kis mértékben 4,7%-al. Ennek a lambda értéknek a jelentős részét a 3.táblázat alapján a levegő hővezetése teszi ki csupán 11%-a adódik más hővezetési formából.

Vagyis megállapítható hogy a szerkezettel sikerült erősen megközelíteni a levegő 10 °C-on vett hővezetési tényezőjét (0,02502 W/mK a 3. táblázatból lineáris interpolációval van kiszámolva).

Az említett 9 kifeszített fólia 3 mm-es légrést eredményez. Ennél sűrűbb osztást a 30 mm-es vizsgálati térrészben csak jóval magasabb technikai felkészültséggel lehet megvalósítani, mely a szerkezet előállítási árát is növeli.

4.1 A kísérletsorozat értékelése

Ahogy néhány oldallal korábban megfogalmaztam a cél az volt, hogy megismerjem a szigetelő panelban elhelyezett alacsony emissziójú rétegek száma és a közöttük lévő légrétegek hatását az egyenértékű hővezetési tényezőre. A fenti kísérletsorozatban is együttesen volt jelen mindhárom hővezetési forma. A mérés során csak együttes hatásuknak a vizsgálata történt. Az egyes következtetések az elméleti meggondolások alapján tehetők. A 15.ábrán a fent vizsgált próbatestek eredményeit összegeztem a szemléltetés és tanulság kedvéért.



15. ábra

A kísérletsorozat első elemei látványosan szemléltetik a sugárzásos hőáram jelenlétét és jelentőségét. Ezt a hatást hasonlóan erőteljesen mutatják a thermopan üvegek belső felületére felhordott fémgőz bevonatok. A bevonat hatására ugyanaz a szerkezet 2,8 W/mK körüli egyenértékű hővezetési tényezőről (a légréteg és az üvegtáblák vastagságától függően) akár 1,3 W/mK értékre is csökken. Ez egy egyszerű számítás és annak elfogadása, hogy jelentős konvekciót vagy hővezetést befolyásoló anyagbevitel nem történt, rávilágít arra, hogy egy légrétegen keresztül a sugárzással közvetített hő akár 60%-nál is nagyobb részarányt sajátít ki a teljes hőtranszport folyamatból. A későbbi fázisok illetve a 15. ábra azt mutatják, hogy ha a hőszugárzás jelentős részét "visszavertem" onnantól fogva a további ernyőknek elhanyagolható szerepük van.

A konvekcióra levezetett hasonlósági összefüggések és a próbatestek mérése során alkalmazott "alacsony" hőmérséklet különbségek alapján, illetve a vízszintes elrendezés és a hőáram irány alapján erősen feltehető hogy már az 1 fóliás esetben a légközrészről származó hőátvezetés is csökkent. A további fóliák beépítése még tovább csökkenti ezt a hatást. Ezekből nem nagy hibával azt feltételezhetem, hogy a konvekcióból származó hővezetés a 3, 5, 9, fóliás esetekben zérus körüli értékre csökkent.

A hővezetéssel nem áll fent ez a kedvező eset, mert amíg a tér két szemben lévő felülete között hőmérséklet különbség van és a térben, levegő molekulái jelen vannak, addig a hőmozgás következtében a levegő adott hőmérsékleti tartományhoz tartozó hővezető hatása is érvényesül. A levegő hővezetési értéke szobahőmérsékleten az irodalmi adatok alapján 0,026 W/mK. Kisarkítva és leegyszerűsítve, akárhányszor megfelezem a sugárzásos hőáramot

beépített alacsony felületi emissziós fóliával és akármilyen kis légréteget alkalmazok a légkörzés és a sugárzás elkerülése érdekében, a levegő hővezetési tényezője ugyan az marad.

A valóságban ez a helyzet bonyolultabb, mert a fóliák korlátozzák a levegő molekulák mozgását a hőáram irányában a legnagyobb mértékben, hőátadás következik be a fóliák mindkét felületén. Ezt a hatást a gyakorlati mérések során természetesen "belemértem" az eredményekbe, a néhány fólia mellett csekély jelentősége miatt elméletileg nem vizsgáltam.

A levegő hővezetési tényezőjéből adódóan, azok a szigetelő anyagok, amelyek levegővel telítettek, hővezetési képességben nem mehetnek a levegő hővezetési képessége alá. Ez a megállapítás a habos és szálas hőszigetelő anyagok esetében is felismerhető. Ezen szigetelő anyagoknak (ásvány- üveggyapot, polisztirol hab) a hővezető képességi tartománya (a szélsőséges esetektől eltekintve) általában 0,03 és 0,05 W/mK érték közé esik. Vagyis ezek a szigetelő anyagok a kis légbuborékokkal meg tudják akadályozni a konvekciót és a sok felületi elem révén a sugárzás útjába is sok ernyőt képeznek. A sok ernyőnek még abban az esetben is igen jelentős hatása van, ha a felületi emissziós értéke magas, hiszen az azonos felületi tulajdonságú ernyő is már felezi a hőáramot [M. A. Mihajjev 1990] [Imrik Z. 1981.].

Ezekkel a megállapításokkal a bevezetőben bemutatott 3.ábra csapdájába kerültem, ugyanis ha a szigetelő rendszer, anyag nem tud "többet" a levegő hőszigetelő képességénél, akkor a hővesztés csökkentésére csak a költséges és helyigényes rétegvastagság növelés marad megoldásként. A kitűzött céloom, pedig az, hogy a "hagyományos" szigetelésnél hatékonyabbat készítsék, illetve kísérletet tegyek a cél megvalósítására.

Tehát a levegő szigetelő képességénél is jobbat kellene létrehozni, ez levegővel nyilvánvalóan nem lehetséges.

Olyan teret kell akkor kialakítanom, amelyben nem repkednek az energiaszállításra annyira alkalmas molekulák mint az oxigén és a nitrogén.

Két megoldás lehetséges a probléma megoldására:

1, olyan gázt kell alkalmazni, amely a levegőnél kisebb hajlandóságot mutat az energiaszállításra. Mondhatni ez a megoldás bizonyos épületelemekben, ahol más elektromágneses hullámokat is át szeretnénk engedni, már bevett gyakorlat.

2, a szigetelő térből ki kell venni minél több energiaszállítást végző molekulát, vákuumot kell létrehozni.

A dolgozatban csak a második megoldási lehetőséggel foglalkozom!

5. Vákuumpanel

Az előző fejezet következtetése alapján kísérletet teszek olyan szerkezet kialakítására, amely lehetővé teszi az „energiaszállító” molekulák számának lecsökkentését az adott szigetelési térben.

Volt és máig van olyan véleményezőm, aki az egyik legnagyobb melléfogásnak tartja, azt hogy a vákuum valaha hőszigetelésre fog szolgálni. Kétkedései semmiképpen nem riasztottak el a kísérlettől, már csak azért sem, mert nem vagyok egyedül a világon, aki vákuumos hőszigetelést szeretne létrehozni.

Mielőtt a konkrét megvalósításhoz hozzákezdttem volna, az eszközök beszerzése során akadtam össze egy „igazi” vákuumtechnikai szakemberrel előbb telefonon, majd személyesen. Arról, hogy „igazi”, a beszédje, tapasztalatai, tanácsai és megoldási javaslatai tettek bizonyosságot.

Az ő véleménye szerint nagyon nehéz a műszaki feladat, amire vállalkoztam, mert a vákuum nagyon makacs „anyag” és nagyon illékony. Ellenvetésként a TV képcsövet hoztam fel, válaszában nem is csak a megvalósíthatóság felől kétkedett, hanem a megtérülése felől, mivel az üvegtechnika képes erre, de nem olcsó berendezéseket és technikát használ hozzá.

Ezen kétkedése ellenére sokat segített a megoldások keresésében.

A levegő eltávolítása és a helyének "üresen" hagyása az előzőeken túl felvet még egy problémát, amely az eddigiek során nem jelentkezett. A gázok mint apró golyócskák a fallal való ütközésükkor kicsiny ütések mérnek a falra, ennek a jelenségnek az összesített hatása a felületre a nyomás. Minél több és minél nagyobb sebességűek a molekulák annál nagyobb nyomást fejtenek ki a falra. A felületek egyensúlyban maradásához valamilyen erővel viszonzunk kell a gázmolekulák záporzó ütéseiből származó erőt. Az esetek nagy többségében ez abból adódik, hogy a felület másik oldalán is ugyanolyan nyomású gáz van és azon az oldalon ellenkező irányú ütések érik a falat. Ha viszont az egyik oldalon lecsökkentem a „golyócskák” számát akkor az általuk létrehozott nyomás is csökken és így ez az erő már nem tart ellent a másik oldalról jövőnek. Ha tehát vákuumteret alakítok ki, és azt fenn akarom tartani akkor valamilyen más módon kell a falakat a helyükön tartani. Ez az új probléma a vákuumpanel szinte minden elemére és részletére kihat. A vákuumpanel szilárdsági méretezésével egy önálló részben vagyok kénytelen foglalkozni.

A hőszigetelési céllal létrehozott vákuum esetén célszerű figyelembe venni 2.4.3 fejezetben a 6.ábrán bemutatott nyomás hővezetési tényező összefüggést. Az ott megmutatkozó célszerűen elérendő nyomás 0,1 mbar alatti vagy a körüli érték. Ez a vákuumtechnikában még a finomvákuum kategóriába esik, viszont elég alacsony nyomásérték ahhoz, hogy a légzárás nagy gondot okozzon.

Azon kedvező feltevés esetén, hogy sikerül olyan panelt készítenem, amely megtartja a vákuumot és annak hővezetési tényezőjét megmértem, mindenképpen tudni kell hogy milyen vákuumérték mellett mértem a lambdát. Ehhez olyan vákuummérő berendezésre is szükség van, amely az említett nyomástartományban megfelelő pontossággal mér. A fent említett vákuumszakember nem csak tanácsokkal segített, hanem meg is ajándékozott két piráni csővel és egy MŰ-72-es részben saját fejlesztésű mérőegységgel. A piráni cső és a mérőegység megfelelő összekötése esetén alkalmas kb. 100 mbar nyomástól 10^{-3} mbar nyomásig nagy pontossággal a nyomásérték meghatározására.

A berendezés pontosságát sikerült ellenőriznem, mivel volt 2 piráni csövem és kaptam kölcsön még egy mérőegységet. A próbavákuumozáskor mindenféle párosításban összeraktam a 2 csövet és az egységeket ugyanarra a recipiensre. A mutató mindkét műszeren majdnem hajszal pontosan ugyanazt mérte. Az ellenőrzésben a használt rotációs szivattyú saját mérőműszere is alig eltérő értéket adott.

Az ajándékok miatt abban a szerencsében részesültem, hogy a nyomásmérést saját műszerrel mérhettem.

Az utóbbi években megszorodott a vákuumszigeteléssel kapcsolatban fellelhető anyagok száma. Főként az internet biztosít gyors és széleskörű hozzáférést a célirányos keresések során. Hamar megtalálható az általános elnevezés, *bizonyára a dolog fontosságát mutatva* „VIP” (Vacuum Insulation Panel), azaz vákuum szigetelő panel néven.

A doktori dolgozatom tervezése során ez még nem így volt. A hőszigetelés javításának fejlesztésének igénye feltehetően az energiaárakkal és a környezetvédelemmel is összefüggésbe hozhatók. Az általam fellelt összes anyag a vákuum panellal kapcsolatban egy zsákba húzott szigetelő habból áll. Kellő szilárdságú műanyag hab (poliuretán, polisztirol, stb.) biztosítja a rá nehezedő légköri nyomás ellensúlyozását. Az erőt magának a habnak a vázszerkezete hordozza 100%-ban hiszen a benne lévő levegő nyomása elhanyagolható. Ezt a szigetelő magot veszik körül vékony többrétegű fóliával. A fólia a légáteresztés csökkentése érdekében mindig tartalmaz alumínium réteget vagy felgőzölt bevonatot. A fólia szélét széles sávban összeragasztják. Ez a ragasztási vonal jelenti a rendszer legkritikusabb pontját, mert itt a ragasztórétegen keresztül behatoló molekulák a vákuum értékét lerontják. A magas vákuumérték minél hosszabb ideig való megtartása érdekében némelyik kísérletnél „getter” anyagot is helyeztek el a panel belsejében, hogy az időközben bejutó molekulákat (főként vízgőzt, oxigént és nitrogént) megkössék.

Véleményem szerint az itt vázolt szerkezeti konstrukciónak 2 nagyon nagy hátránya van:

- a vákuumot egy viszonylag vékony réteg mondhatni hártya őrzi, amely a mechanikai igénybevételekre nagyon sérülékeny, ugyanakkor igen drága anyag. Bármilyen ütődés karcolóadás az egész panelt tönkre teszi. E magas sérülékenység miatt a munka során jobban kell rá vigyázni mint a faragott hímes tojásra. Építkezési körülmények között az ilyen finom bánásmód nem csak a panelnak, hanem a beépítésének a költségeit is megnöveli. A beépítési helynek is biztosítania kell a sérülésmentes környezetet, kis túlzással párnák közé kell behelyezni és ott úgy rögzíteni, hogy nehogy hozzádörzsölődjön valami, mert akkor vége a mutatványnak.

- másik lényeges hátránya véleményem szerint a rendszernek a leszívás feltehetően magas költsége. A magot képező hab anyag lehet nyílt és zártpórusú. Leegyszerűsítve ez azt jelenti, hogy zártpórusúnál sok kis légtér van elválasztva egymástól, a nyíltnál pedig kisebb nagyobb üregek rendszere, ahol a gáz átjárása kis járatokon keresztül történik az egyik helyről a másikba. Ez utóbbit választva egy bonyolult üregrendszerrel van szó, amely kis csövecskékkel vagy szűkületekkel vannak összekötve. A leszívás során a leszívás ideje nagy mértékben függ a recipiens geometriai alakjától. Amíg egy konvex tér (minden pontjából látható az összes határoló pont) leszívása megfelelő teljesítményű szivattyúval néhány perc alatt vákuumozható 0,1 mbar alatti nyomás értékre, addig egy „zegzugos” rendszer esetén a leszívási idő a térben található üregek számának növekedésével exponenciálisan nő meg. Ha egy üregnek csak egy szűk kijárata van, akkor az összes molekulának ezen a nyíláson át kell távoznia a térből. A leszívás kezdetén, amikor nagy nyomáskülönbségek adódnak a külső és belső részek között (akár több 10 mbar) a tér kiürülése viszonylag gyorsan megy, amikor 1mbar alá érkezünk ott már csak igen kis nyomáskülönbségek biztosítanak hajtóerőt. Minél alacsonyabb nyomásértéken vagyunk annál kisebb lesz a nyomás különbség. A térben „röpködő” molekulák alig fognak némi készletet érezni, hogy a kijárat felé vegyék

az irányt, a helyzet inkább ahhoz hasonló, hogy a molekula röpi a saját pályáján és ha véletlenül pont a kijárat felé tart akkor kirepi, de ha a folyamatos „röpködés” során csak néhány 10 perc vagy néhány óra után adódik ez az eset, akkor addig „ő” nem hagyja el a teret. A nyomáskülönbséget viszont ha kicsi is fenn kell tartanunk. Ennek a molekulának pedig lehet, hogy 10 vagy akár több százszor meg kell találnia a kijáratot az összefüggő labirintus rendszerben, hogy az útja végül a szivattyún keresztül vezessen. A leszívási idő növekedéséhez az is hozzájárul, hogy a térben lévő hab anyag önmagában egy porózus anyag, mely mennyiségéhez képest óriási felülettel rendelkezik. A nagy felület pedig sok molekula számára biztosít a felületen való abszorbeálódás (megtapadás) lehetőséget, amit a tapasztalat szerint a molekulák ki is használnak az egyensúly mértékéig. A tér vákuumozása során a molekulák a légtérből távoznak, az így lecsökkent nyomás egy új abszorpciós egyensúlyt vonz, de ez csak idővel áll be. Lehet hogy csak több óra elmúltával.

Mіндеzen idő alatt, vélhetően nem alacsony üzemóra díjú a szivattyúnak folyamatosan menni kell. Igaz, hogy a hőmérséklet megemelésével a molekulák sebessége fokozható, így hamarabb találhatják meg a kijáratot, illetve a falakról is hamarabb lejönnek az „odatapadt golyók”. A hőmérséklet emelésnek korlátot szabnak az anyagok lágyulási, bomlási pontjai, ez 50-60 °C fokban maximalizálja a hevítési hőmérsékletet. Valamelyest lerövidül a leszívási idő, de a labirintusok és az abszorbeálódott molekulák miatt még így is nagyon hosszú idővel kell számolni.

Másik megoldás az lehetne, hogy ha hevíteni nem lehet, akkor hűtsük le -200 °C környékére, ahol a bent lévő gázok többsége folyadékká válik és egyszerűen csak öntsük ki a panelből a „gázlét”.

A felhasznált anyagok tekintetében sem érhetik be a gyártók a kommersz szigetelő habokkal és az egyszerű (általam is használt) társított alufóliával. A habnak ki kell bírnia a rá nehezedő 10 méternyi víznyomást, ugyanakkor minimális hővezető képességgel kell rendelkeznie. A zsák szerepet betöltő fólia is mint említettem meglehetősen drága, a sok réteg felépítés és a magas igényeknek való megfelelés miatt. Maga a leragasztás is csúcstechnológiát igényel.

Ebből arra lehet következtetni, hogy az ilyen rendszerű panelek igen drágák. Az alábbi linken elérhető honlap lehetőséget ad bárki számára, hogy az igényeinek megfelelő méretű panel árát kikalkulálja:

<http://www.rparts.com/pgscripts/panel.asp?simple=yes>

A vákuumpanel kísérletemben arra is törekszem, hogy az említett hátrányok (sérülékenység, hosszú leszívási idő) mérséklődjenek a konstrukciónak köszönhetően. Olyan panelt terveztem és viteleztem ki, amely a külső hatásoknak jól ellenáll, nem igényel drága fóliát és reményem szerint a hosszú leszívási időt sem. A szerkezetet kívül fa vázra építettem, a vákuumzárást pedig egyszerű technikával felkasírozható alumínium fóliával a belső tér felületén.

A panel méretei

A fedő lemezek felülete 800*800 mm (a Holzbau Holten műszerhez), vastagsága 6 mm, 5 rétegű bükk rétegelt lemez. A két lemez egymástól való távolságát a keret magassága illetve a kitémasztó elemek magassága adja meg, ezt az értéket 15 mm-re választottam. A 15 mm-t azért választottam gyakorlati szempontból, mert a 2.4.3 fejezetben a matematika nem adott használható választ. Ezért a csatlakozó csonk biztonságos kialakítását tartottam szem előtt.

5.1 Szilárdsági méretezés

A levegő légköri nyomása $1,01325 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, amennyiben a Torricelli csőben a higanyoszlop 76cm. Mivel a légnyomás a helyvel és az idővel egyébként is változik a számítás egyszerűsítése érdekében 10^5 N/m^2 -el számolok. Tétélezzük fel, hogy a vákuumpanelban sikerülne abszolút 0 nyomást vagy ahhoz nagyon közelít létrehozni. Ebben az esetben 1 négyzetméter felületre 10^5 Newton erő hatna, ez kb. 10.000 kg. A víz alatt kb. 10 m mélyen van ilyen nyomás. *Szilárdsági próbaként elég, ha a panelt 10 m-re a víz alá viszem és ha nem roppanik össze akkor ki fogja bírni a teljes vákuumot is.*

A panel felépítése hasonlít a tükörpaneléra: egy keretszerkezetet lemezeltem be mindkét oldalán és a „nagy” fesztáv miatt közbenső kitámasztó elemek segítségével közvetítem az erőt az egyik lemezről a másikra.

A szilárdsági méretezés során nem minden esetben a klasszikus méretezési lépéseket tartottam, mert bizonyos esetben egyszerűbbnek tűnt gyakorlati mérésrel meghatározni szilárdsági értékeket. Egyes esetekben az anyagmegválasztás során is inkább praktikus szempontok vezettek, mint például a könnyű beszerezhetőség, vagy az egyszerű alkatrész kialakítás. A határfeszültséget sem vezettem le elméleti alapon, hanem egy szilárdsági modellező szoftver segítségével használtam a meghatározáshoz.

5.1.1 Lemez-fólia tapadási szilárdság

A lemezek alapanyaga 5 rétegű 6 mm vastag bükk rétegelt lemez. A felület légzárását 200 μm vastagságú alumínium fóliával biztosítottam. A lemezen semmilyen megmunkálás nincs, a lapfelületének szélein ül fel a keretszerkezetre. Az alumínium a számomra nagyon kedvező anyag az adott funkciók betöltésére, ugyanis amellett, hogy kellő vastagság esetén nagyon jó légtömörséget biztosít, egyúttal megold egy korábban már részletezett problémát is, nevezetesen a sugárzásból származó hőtranszport csökkentését. Az előző kísérletek igazolják (az elmélettel összhangban), hogy a sugárzásos hőátadást milyen mértékben tudom csökkenteni egy alacsony emissziós felület beépítésével, melyet itt maga a légzáró rétegem felülete lát el. Mindössze arra kell figyelni, hogy a felület fémtiszta és lehetőleg fényes legyen. Van különbség a matt és a fényes alumínium felület emissziós tulajdonságai között természetesen a fényes felület javára, az általam alkalmazott fólia a fényes kategóriába tartozik.

Jelen esetben az alumínium egyetlen hátrányos tulajdonsága a jó hővezető képessége $\sim 200 \text{ W/mK}$, a keret ugyan alumíniumból készült és a felületeken csak 200 μm vastagságú alumínium fólia található (valójában a csiszolás miatt még ennél is vékonyabb, lásd később). A panel geometriából következik, hogy a középponton történő méréskor a hőnek legalább 565 mm-es utat kell kerülnie a többségét a 200 mikronos fólián, ahhoz, hogy az alumínium hőhidat képezzen. A peremfűtés pontosan azt a célt szolgálja, hogy még kisebb legyen a valószínűsége a sönt kialakulásának. A vákuumzárás alapeleme és feltétele a lemez felületére kasírozott alumínium fólia. Az alumínium sem tartozik a könnyen ragasztható anyagok közé, köszönhetően a felületén kialakuló oxid rétegnek, ez az oxidréteg ugyan a korrózió szempontjából rendkívül hasznos, a ragasztásnál ez nem így van. A ragasztás során kellően nagy szilárdságot kell biztosítanom a fólia felületen maradásához. Több kísérletet végeztem a végeleges ragasztó anyag, illetve felület előkészítés meghatározásához:

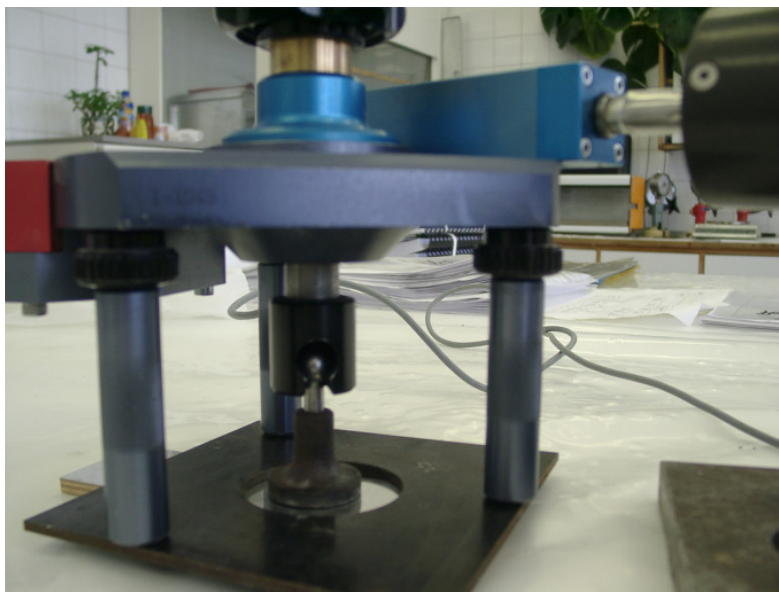
A kísérleti ragasztók között szerepelt a Henkel nagy rugalmasságú Sichello J8510 kontakt ragasztó és többféle műgyanta. A végleges megoldás a Sto cég StoPox 452EP márkajelű kétkomponenses epoxigyantája lett, ami az érdekesség kedvéért nem is ragasztó, hanem nagy

igénybevételű padlók kiegyenlítő burkoló anyaga. Ezzel nem arra szeretnék utalni, mintha a fa és alumínium ragasztása olyan rendkívüli probléma lenne, amit a ragasztóipar ne tudott volna megoldani, hanem valaki ajánlotta, hogy próbáljam meg, mert a szilárdsági értékei igen jók és adott is kellő mennyiséget az anyagból. Mivel az addig kipróbált ragasztók közül a legjobbnak ez bizonyult ezért döntöttem az alkalmazása mellett, a további keresgélés helyett.

Az alumínium ragasztása az általam próbált bármely ragasztó esetén teljesen meddőnek bizonyult az alumínium felület előkészítése nélkül. Bizonyos ragasztóknál a fólia könnyedén lehúzható volt, mint az új LCD kijelzőkön a lehúzható védő fólia. A felület előkészítésre két módszert próbáltam ki: Az egyik a nátriumhidroxid oldattal való maratás. Az ofszet nyomdatechnikában bevált módszert körülményesnek és nagy elővigyázatot igénylőnek találtam a második módszerrel szemben. Ez pedig közvetlen a ragasztás előtti finom csiszolás. Ez a módszer nem igényelt vegyszert, lemosást, szárítást, nagy odafigyelést az oldatra, ami egyébként mérgező, hanem hétköznapi eszközökkel megvalósítható. Pusztán arra kellett figyelemmel lenni, hogy az éppen csiszolt fólia teljesen sík felületen legyen, és nehogy valami pont vagy élszerű feltámaszkodás legyen alatta, mert a csiszolás során ott a fólia elvékonyodhatott vagy akár ki is lyukadhatott (*volna*).

A ragasztással szembeni követelmény az, hogy a ragasztás két oldalán fennálló nyomáskülönbségből eredő erővel szemben a fólia a fa felületén maradjon. A panel belsejében a feltételezett 0 mbar, a fa ragasztási oldalán ~1000 mbar, a kettő között fellépő négyzetcentiméterenkénti 10 N-os erőt kell kibírnia a ragasztó rétegnek elválás nélkül. Lehet, hogy a valóságban ez az erő nem lép fel teljes kontrasztjával, a ragasztó behatolása miatt a fa pórusaiba, de a panel biztonságos működését szem előtt tartva elvárásnak tekintetem a ragasztóval szemben a 0,1 N/mm²-es feltépo szilárdságot. A feltépo vagy lapleemelő szilárdságot az ÉMI Vegyészeti osztályán mértem.

A mérési vizsgálatot és eredményeket nem részletezem, csak a végkövetkeztetést. A StoPox 452EP gyanta alumínium feltépo szilárdsága (16. ábra) bükkfa felületre vonatkozóan, minden mérésnél meghaladta az 1 N/mm²-t. Tehát minden mért esetben legalább tízszer akkora szilárdsággal rendelkezett a ragasztó, mint a működés közbeni igénybevétel.



16. ábra A fólia feltépo szilárdságának mérése

5.1.2 Alátámasztási közök méretezése

A panel fedő lemezei tartószerkezeti szempontból több ponton alátámasztott sík lemez esetének felelnek meg. A méretezéshez meg kellett vizsgálni a lemez hajlító szilárdsági értékeit. Azért kell a többes számra felhívni a figyelmet, mert a faanyag anizotróp anyag ebből következően a szilárdsági tulajdonságai iránnyként eltérőek. A lemez 5 rétegű 90°-ban elforgatott szálirányú furnérokból készült, úgy hogy minden lemez elforgatott szálirányúval érintkezik következőképpen a felületi lemezek azonos szálirányban állnak a középlemezzel (hosszanti irány) a páros lemezek a fedőlemezek alatt szintén egy irányban (keresztirány). A geometriai elhelyezkedésből és az azonos szálirányú lemezek számának eltéréséből adódóan a két irányban eltérő hajlítószilárdsági tulajdonságokkal rendelkezik a lemez. A probléma elméleti bonyolultságának megmutatása miatt jegyzem meg, hogy a faanyag hajlítása esetén a semleges szál nem középen helyezkedik el, a húzó és nyomószilárdsági értékek eltéréséből adódóan. A kérdéskör részletezésében nagy segítséget jelentett Dr. Németh József professzor személyes támogatása és kandidátusi dolgozatának eredményei.

Mivel szerettem volna elkerülni az imént említett probléma elméletébe való belegabalyodást, kísérleti úton kerestem választ a hajlítószilárdság értékeire. 30 keresztirányú próbatestet készítettem a MSZ EN 310 / 1999 [MSZ EN 310/1999] szabvány előírásainak megfelelően, és megmértem a hajlítószilárdságukat. (az eredmények a 3. mellékletben megtalálhatóak). A tartó méretezésekor a biztonság növelésének érdekében a keresztiszálú adatokat vettem figyelembe mind hossz mind keresztirányban. Igaz így a tartóm nem a leggazdaságosabb példája a szilárdságtannak, de mivel az eredmény csak az alátámasztások sűrűségét határozza meg, a bevitt hiba az egyébként alkalmazott biztonsági tényezőn felüli biztonságnövelő hatást eredményez.

Az általam kereskedelemben vásárolt bükk rétegelt lemez mért szilárdsági értékei sajnos csak a közepes szilárdságú lemezek alsó értéke fölött van valamivel [Németh J. 1986.]. Számomra annyiban kedvező tanulságot ad, hogy később nem feltétlenül kell ragaszkodnom a nagyobb szilárdságú (80-100 N/mm²) és drágább bükk lemezekhez, hanem alkalmazhatok olcsóbb nyár vagy nyír lemezeket is.

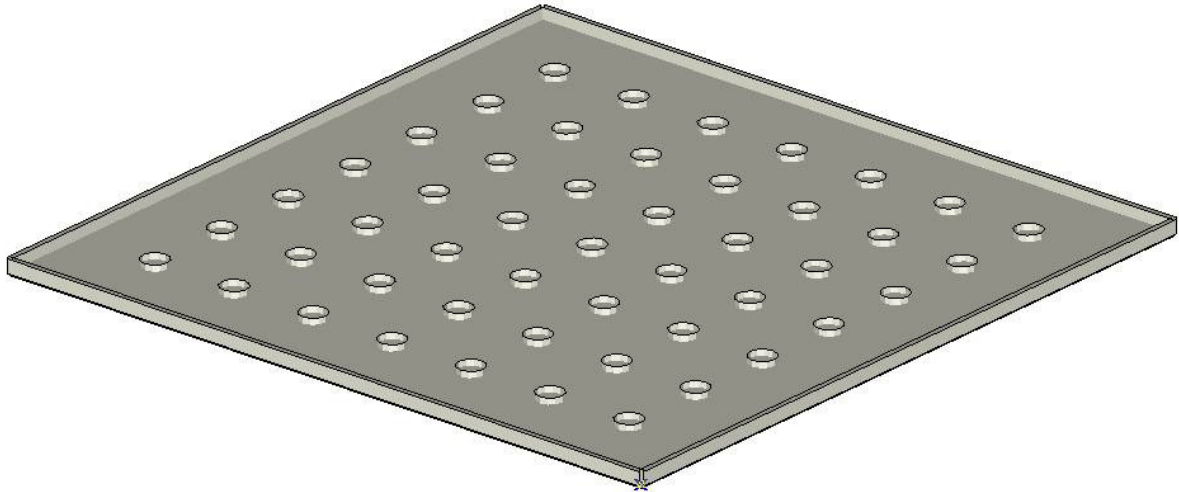
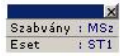
A hajlítószilárdsági vizsgálatok során 64,6 N/mm² átlag érték adódott (3. melléklet), ez a lemez hajlító szilárdsági várható értéke. A méretezési érték kiszámításához egységes biztonsági tényező méretezési módszert alkalmaztam [Szalai J. 1993.]. E döntésem indoklása, hogy a szerkezetre ható igénybevételek nagyon nagy biztonsággal meghatározhatók. Tönkremenetel esetén semmilyen emberi élet vagy sérülés veszély nem áll fenn. *Ha csak nem a megfázás, krónikus esetben fagyhalál a szigetelőképeség drasztikus leromlása esetén.* A méretezés során csak a külső légnyomást, mint egyenletesen megoszló terhelést kell figyelembe vennem. E szerkezetnél nem terveztem, hogy az önsúlyán felül a falszerkezettől bármilyen terhelést átvegyen.

Az egységes biztonsági tényezőt 1,3-ra választottam. Így a méretezési értékem:

$$S \leq \frac{R_n}{\gamma_e} = \frac{64,6}{1,3} = 49,69 \text{ N/mm}^2$$

- S méretezési érték (N/mm²);
 R_n szilárdsági várható érték (N/mm²);
 γ_e biztonsági tényező (dimenzió nélküli szám);

A számítástechnika, a végelem módszer, illetve ezeket alkalmazó AXIS nevű szoftver lehetőséget adott bizonyos távolságokra alátámasztott lemez feszültségi viszonyainak meghatározására. A szoftver segítségével elkészítettem a panel virtuális modelljét:

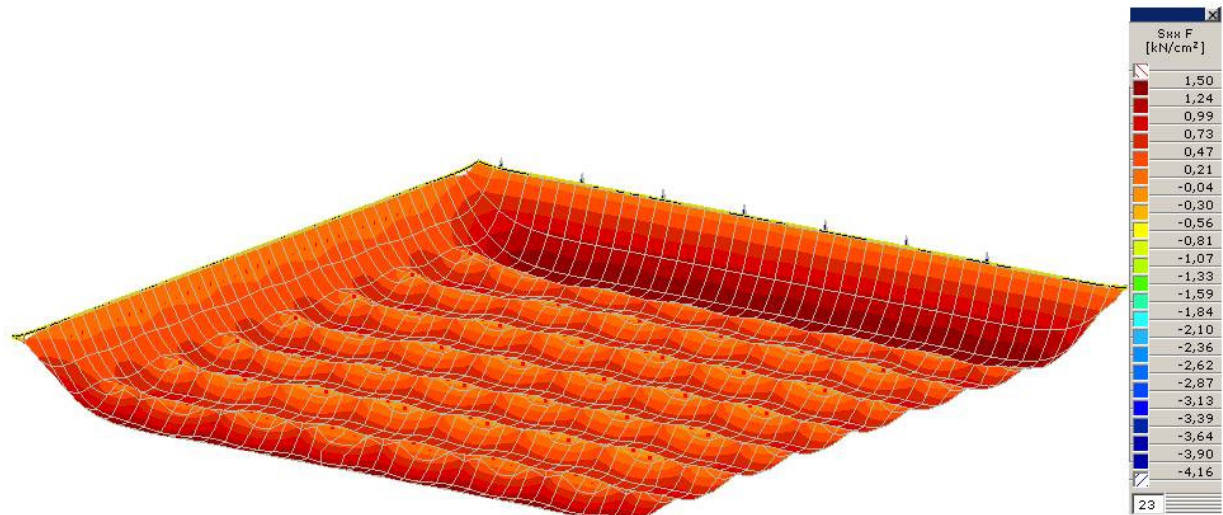


17. ábra Vákuumpanel virtuális modell

Az alátámasztások távolságának meghatározására kezdeti lépésben felvettem egy általam választott osztás értéket. Ezzel az értékkel elkészítettem az említett szoftver segítségével a statikai szerkezet modelljét, ráhelyeztem a virtuális megoszló terhelést ($0,1 \text{ N/mm}^2$) és a szoftver segítségével elkészítettem a lemez és az alátámasztások feszültségi ábráját. Az ábrán részletesen leolvashatóak az adott helyekhez tartozó feszültségi értékek. Amennyiben feszültségi érték a lemez bármely pontján meghaladja az általam meghatározott értéket, akkor az alátámasztásokat sűríteni kell. A már említett egyszerűsítési okból az anizotróp hajlítószilárdsági értékek ellenére négyzetesre terveztem az alátámasztások kiosztását. Ebből következően a panelban mindkét irányban azonos számú alátámasztás lesz. Praktikus okból nem az alátámasztási távolságot számolom ki, mert esetleg nem egész számú alátámasztás jönne ki a teljes feszítávra, hanem mondjuk valamilyen tört szám. A gyakorlatban viszont csak egész számú alátámasztást tudok elkészíteni. A szilárdsági értékek ismeretében megbecsültem, hogy az alátámasztások várható száma 6, 7 és 8 körül lesz. Ezekre az alátámasztási kiosztásokra készítettem el a virtuális modellt.

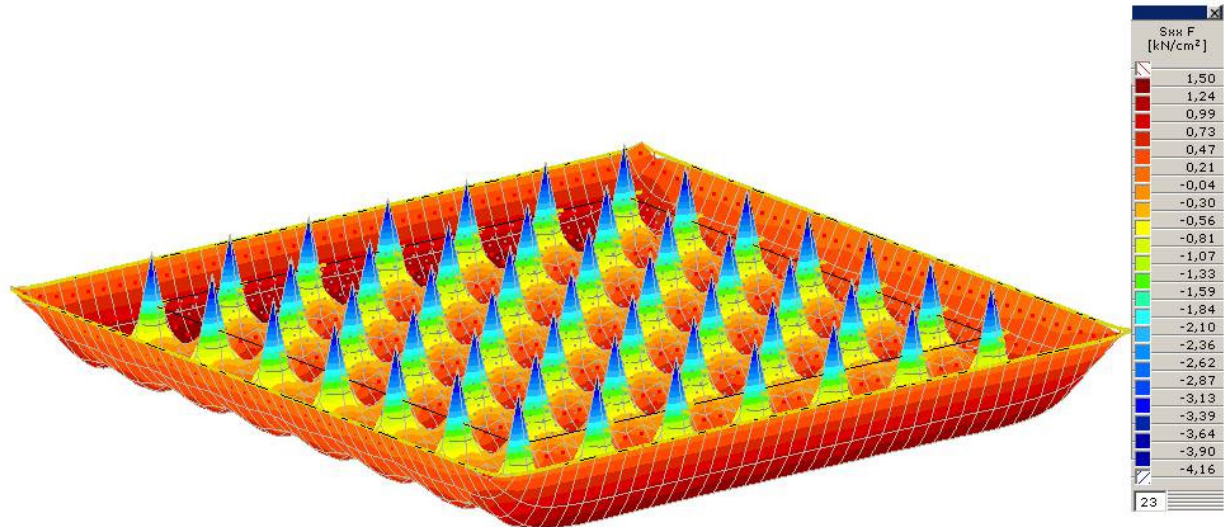
Például 6-os kiosztás esetén $6 \cdot 6 = 36$ darab alátámasztás, 7-esnél 49, 8-asnál 64 darab egyenletesen elosztva a felületen. A 800 mm-es panelszélességből lejönnek a keret méretei ($800 - 2 \cdot 15 = 770$), a 6 alátámasztási pont ezt a távolságot 7 részre osztja, a 7 alátámasztási pont 8-ra és így tovább. Az alátámasztások távolsága az előbbi értékek szerint rendre: 110 mm, 96,25 mm, 85,55 mm.

Itt csak a megfelelő szilárdsági modellt a 7 alátámasztás esetére vonatkozó ábrákat mutatom meg.



18. ábra Vákuumpanel igénybevételi ábrája (húzott oldal)

Az ábrán a terhelési igénybevételnek megfelelő panel feszültségi ábrája látható húzott oldalról. Az értékeléshez segítséget nyújt a jobb oldalon található szín érték skála. A modellező szoftver az itt bemutatott ábráknál sokkal részletesebb értékelést tett lehetővé. Az itteni ábrák inkább szemléltető jellegűek. Az AXIS szoftver által számolt értékek alapján a 6-es osztású, 110 mm-es fesztáv esetén az igénybevétel meghaladta az általam számolt határ értéket ($49,69 \text{ N/mm}^2$).



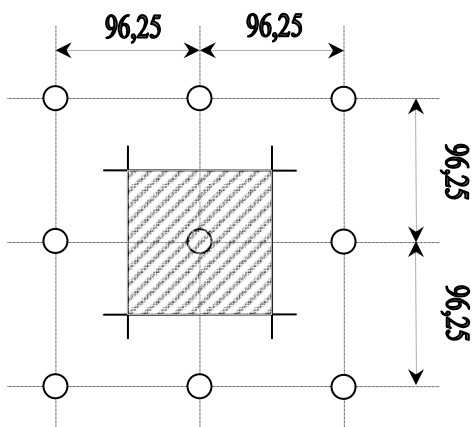
19. ábra Vákuumpanel igénybevételi ábrája (nyomott oldal)

A 7-es osztás esetében, a 18. és 19. ábrák mellett lévő léptékről is leolvasható, hogy a szerkezet számított terhelhetősége meghaladja az igénybevétel mértékét, tehát megfelel.

A panelben a feltámasztás egy gyűrű karimáján történik, és ugyan a szoftver kellően felkészült az algoritmusok lefuttatására, az értelmezést a használóra bízta. A gyűrű belsejében fellépő maximális értékek a 7-es osztás esetén elmaradnak a bükk szilárdsági értékeitől. Tehát a szerkezet megfelel.

5.1.3 Alátámasztó elem méretezése

Az osztásköz és az így adódó fesztáv a következő méretezési feladat kiinduló értéke. Ha tudom az alátámasztások közötti távolságot, akkor meg tudom határozni az egyes alátámasztásokat terhelő felület méretét.



A rajzon vonalkázott terület terheli az alátámasztást. A keret melletti alátámasztásokra is érvényesek az értékek, annyi megjegyzéssel, hogy ott a szomszédos alátámasztások helyett a keret található.

20. ábra Vákuumpanel kitámasztó elem terhelési területe

Látható hogy az pontosan az osztásköz négyzete: $9264,0625 \text{ mm}^2$, besorozva a terheléssel ($0,1 \text{ N/mm}^2$)= $926,406$ Newton. Ez majdnem 100 kg. Az egyes alátámasztásoknak tehát 926,4 N terhelést kell elbírnia. Megoldandó kérdés hogy milyen anyagból és milyen geometriával válasszak kitámasztó elemet, amely elbírja a fenti terhelést plusz a biztonsági tényező általi növekményt. Ennek a kitámasztó elemnek az a feladata hogy a leszívott panel két lemezére eső $0,1 \text{ N/mm}^2$ nyomást felvegye, ezáltal biztosítja azt, hogy a panel belső méretei a leszívás előttihez közel maradjanak, illetve hogy egyáltalán létrejöhessen a vákuumtér.

Mivel a panel fő rendeltetése a hőszigetelés, olyan anyagot kell választanom, amely a nyomószilárdságához képest gyenge hővezető képességgel rendelkezik. Viszont elegendően szilárd ahhoz, hogy a terhelést is felvegye.

Nyomószilárdsági próbákat végeztem 32 mm külső átmérőjű 2 mm falvastagságú kemény PVC csőből levágott 15 mm magas gyűrűkön. A kemény PVC hővezetési tényezője a műanyagok között a gyengébb hővezetők között foglal helyet, értéke $3,48 \text{ W/m}^*\text{K}$ [Kovács L. 1979.], mégis számomra sajnos ez magas érték.

A nyomás próbák során az eredmények azt mutatták, hogy egy-egy gyűrű a fenti méretekkel 450-500 kg hatására kezd megrogyni. Ha 300 kg-mal terheltem meg akkor valamennyi sérülésmentesen kibírta a terhelést. A méretezés során tehát 300 kg-ig igénybe vehetem a gyűrűket. Ezek az értékek természetesen csak a kísérleti panel esetében érvényesek, de ez esetben nagyobb, mint 3-as biztonsági tényezőt jelent.



21. ábra A kitámasztó gyűrű (kifúrva)

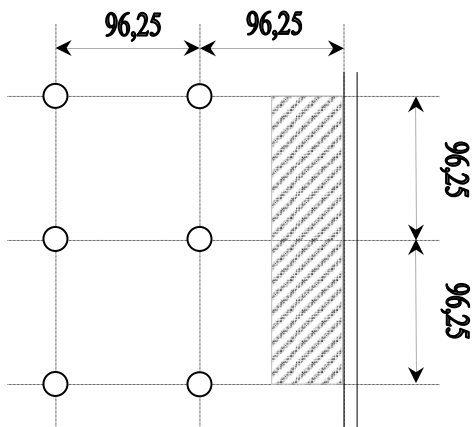
A gyűrűvel és a lemezzel szemben támasztott másik szigorú követelmény, hogy az érintkezési felület a terhelés hatására semmilyen mértékben ne sérüljön. A gyűrű talpai ne sértsék, szakítsák be az alufóliát, amely a lemez belső felületére van kasírozva. A vákuumzárás alapvető feltétele a fólia sértetlensége. Ennek érdekében a gyűrűk talpait finoman lekerekítettem, hogy az érintkezés ne él mentén, hanem egy ív mentén jöjjön létre, illetve azért hogy a vágás során keletkezett sorja ne okozzon kárt a fóliában a pontszerű érintkezés miatt. Ennél is ellenőrző próbát végeztem, számos korongot és lemezt összerakva terheltem 300 kg-mal. A próbák után megvizsgáltam hogy a gyűrű milyen nyomot hagyott a fólia felületén. Az eredmény megnyugtató volt, mert az enyhe fénytörésen kívül semmilyen nyom nem maradt a fólián. A panelek összerakása során a nagyobb biztonság érdekében és a korongok helyének rögzítése miatt a gyűrűk talpait finom sziloplaszt réteggel kentem be. Ez a vékony réteg tovább „puhítja” a gyűrű és a fólia erőátvitelét. Természetesen a gyűrű mindkét felét sziloplaszt réteggel láttam el, hiszen mindkét vége fóliával érintkezik.

5.1.4 Keret teherbírása

A keret feladata a lemezek távolságát biztosítani, illetve azokat összetartani. Ezen felül el kell viselnie a nyomáskülönbségből fakadó rá eső erőt és a tökéletes légzárást is biztosítani kell. A leszívó csonk is a keretben van elhelyezve.

A távolságtartás és az elhelyezkedés egyszerűen következik a keret elemek geometriájából.

A rá eső nyomás attól függ mekkora az a lemezfelület, amelyen megjelenő terhet a keretnek kell átvennie, ez pedig attól hogy milyen távol vannak a kerettől az első kitámasztó elemek.



22. ábra Vákuumpanel keret terhelési területe

Az 16. ábrán vonalkázott rész mutatja azt a területet, melyre eső nyomást a keretnek kell felvennie. Összehasonlítva az előző ábrával nyilvánvaló, hogy a keretnek csak az egyik oldalán van terhelési felület, mert a panel szélein helyezkedik el. Ebből adódóan egy osztásnyi keretelem hossza (96,25 mm) jutó felület $96,25 \cdot 96,25 / 2 = 4632,03 \text{ mm}^2$. A terhelési értékkel besorozva 463,203 N-t kapunk. Ez alig 50 kg. A

96,25 mm hosszú és 18 mm széles keretelem teherviselő felülete $1732,5 \text{ mm}^2$. Az erőből és keresztmetszetből származó nyomásérték $463,203 / 1732,5 = 0,2673 \text{ N/mm}^2$, olyan alacsony érték hogy ezt a terhelést lényegesen kisebb keresztmetszet is elbírná. A keretelemek találkozásánál még ennél is kedvezőbb a helyzet, a sarokban lévő fél osztásnyi felületterhelést mindkét találkozó keretelem tartja.

A keretelemek esetében is több próbát végeztem. Az első kísérletben 18 mm vastagságú nyír rétegelt lemezt fóliáztam le. Az így kapott lemezekből vágtam ki 15 mm vastag és 785 mm hosszú elemeket. Az így kapott elemeket ragasztottam fel a lemezekre és szorosan illesztettem őket egymáshoz. A leszívó csonk egy keretbe fúrt lyukba volt beragasztva.

Ezen elmondottak alapján elkészítettem az első panelt, ahol a keret és a lemezek összeragasztásánál sziloplasztot alkalmaztam.

Az első kísérlet során 2 fontos dolog derült ki: A leszívó csonk a leszívás előkészítése során megmozdult. A meglepő azonban mégis az hogy ennek ellenére sikerült a kísérlet során a panelban elérni a használt szivattyú végvákuumát (15 mbar) és ezt az értéket a panel tartotta is rövid távon. Hosszú távon viszont nem. A vizsgálat során a házilagos kivitelezésű keretelemek egymáshoz rögzítése is kérdésesnek látszott:

A keret esetén két kiemelt területen volt szükség változtatásra:

- 1, A leszívó csonknak szilárdan kell rögzítve lenni a keretelemben, bizonyos mértékű csavaró nyomaték felvételére alkalmasnak kell lenni.
- 2, A kísérletek során célszerű lenne olyan keret alkalmazása, amely a lehető legnagyobb biztonsággal betölti a légzárési funkcióit, még azon megállapítás mellett is, hogy a szerkezet, ezáltal feltehetően drágább lesz.

A két tényező figyelembe vételével készítettem 15 mm-es 2 mm falvastagságú alumínium profilból hegesztett keretet, úgy hogy a leszívó csonk is alumínium és a keretbe be van hegesztve. Ez a keret a panel összerakását is nagymértékben leegyszerűsítette, hiszen a keret elemek összeillesztésére már nem kellett figyelni és a hibalehetőség is minimálisra csökkent.

Megjegyzem, hogy az alumínium az egyik legjobb hővezető fém, azért alkalmaztam mégis keretelemként egy hőszigetelési kísérletben, mert a mérési területtől a panel vastagságához képest igen távol helyezkedik el és az említett peremfűtés is semlegesíti a „peremsönt” kialakulását.

5.2 Légzárási feladatok

Az első kísérlet során a ragasztást sziloplaszt tömítő ragasztóval végeztem. Az egy hetes kísérlet során a kezdetben 15 mbar-ra leszívott panel a hét elteltével légköri nyomásra került. Mivel a leszíváskor a fél és egy óras ellenőrzéskor a vákuumérték nem romlott a mutatón észrevehető mértékben, azt állapítottam meg, hogy a panelon nincs olyan méretű lyuk, amely lehetetlené tette volna az alacsonyabb nyomásérték elérését. A kísérletben használt szivattyúnak a 15 mbar a végvákuuma volt, annak megállapítására, hogy a panel eleve lyukas-e, ez a vákuumérték is elegendő volt. Molekula beáramlás csak azokon a helyeken léphet fel, ahol nem folyamatos alumínium réteg biztosította a zárást. Ilyen helyek a lemez és a keret elemek találkozása és a leszívó csomópont peremfelülete, amely sajnos kimozdult az eredeti helyéből.



23. ábra A „vákuumpanel” belseje

A tapasztaltakból arra következtettem, hogy maga a panel a 15 mbar-os értéken légzárónak bizonyult, mert a rövid idejű visszatöltődés nem jelentkezett. A ragasztóanyag permeabilitása viszont az egy hét során megmutatkozott. Feltételezésem szerint a leszívó csomópont mellett is problémák voltak, ugyanis a leszívás lehetővé tételére egy roppantó gyűrűs csatlakozót kellett felszerelni és ez erős csavaró igénybevételnek tette ki magát a csomópont, ami a ragasztásra is átadódott. Feltételezem, hogy a csavaró igénybevétel hatására a ragasztóréteg gyengén károsodhatott és ez a hely is hozzájárult a hosszabb távú visszatöltődéshez.

A problémák kiküszöbölésére más ragasztóanyagokkal is próbálkoztam.

Kipróbáltam ugyanazt a ragasztót, amivel a fóliát kasíroztam a fa felületére. A szilárdságtanban csekély mértékben jártasak is tudják hogy egy tartó alátámasztásainál a terhelés hatására (jelen esetben megoszló terhelés) általában csekély mértékű elfordulás is fellép. Ezt az elfordulást az epoxi gyanta nem vette fel és hatalmas csattanásokkal eltört, így képtelenné téve a leszívást 100 mbar alá. Tehát merev ragasztó nem jöhet számításba csak rugalmas.

Következő lépésként a Forbo cég Helmipur SH 100 jelű rugalmas ragasztót használtam.

A légzáráson igyekeztem javítani úgy, hogy a keretet oldalanként 10 mm-el kisebbre csináltam, ezáltal a panelon körbe a lemezek 10 mm-el túlnyúltak a kereten. Ezt a hézagot a thermopan üvegyártásban alkalmazott zárési technikával töltöttem ki. A résbe ipari berendezés segítségével két komponensű butil kaucsuk ragasztóanyagot nyomtak. A gáztöltésű üvegek esetén ezzel a technikával 5-10 éves garanciát vállalnak a gáz benmaradására vonatkozóan.

5.3 A vákuumpanel hővezetési tényezőjének mérése

A korábbiak szerint összeállított panelon végeztem a hővezetési kísérletet. A két panelt behelyeztem a Holzbau Holten berendezésbe szimmetrikusan a középső fűtőlap két oldalára. Mindkét panel csonkját alacsony légáteresztésű butil-kaucsuk vákuumtömlővel kivezettem a berendezésen kívülre. A kivezetett tömlőt csatlakoztattam a szivattyúhoz. A stacioner állapot eléréséhez ebben a berendezésben 5-6 órára van szükség, ezért a kísérletet előző nap el kellett indítani, hogy a stacionárius állapot beálljon. Másnap az állandósult állapot kialakulásakor kezdtem el a kísérletet.

A kialakult állandósult állapotban a berendezés által mért eredmény 0,082 W/mK hővezetési érték volt. Ebből az állapotból kiindulva a kivezetett tömlő és a szivattyú segítségével csökkentettem a nyomást a panelek belsejében és figyeltem a lambda érték változását.

A megfigyelés során rögzítettem az időt, a nyomást és a hővezetési értéket.

Az alábbi táblázat mutatja az eredményeket.

10. táblázat

Idő (perc)	Nyomás (mbar)	Hővezetési tényező (teljes panel) W/mK	Hővezetési tényező (fedőlapok nélkül) W/mK
0	1000	0,082	0,059
2	1	0,082	0,059
6	0,5	0,082	0,059
9	0,4	0,082	0,059
13	0,35	0,08	0,057
24	0,29	0,074	0,052
29	0,27	0,058	0,038
38	0,25	0,054	0,035
47	0,23	0,059	0,039
55	0,23	0,056	0,037
71	0,215	0,06	0,040
90	0,205	0,06	0,040
105	0,19	0,062	0,042
142	0,185	0,06	0,040

A leszíváskor Welch W Series típusú kétkörös rotációs szivattyút használtam, melynek gyárilag megadott végvákuuma 0,1 mbar.

A leszívás sebességét időben nem szabályoztam, hagytam, hogy a szivattyú teljesítményének megfelelő ütemben történjen. A nyomásérték és az idő megmutatja, hogy az első ~999 mbar nyomásesés néhány percen belül megtörtént. A legnagyobb gondot az utolsó mbar jelentette. Mivel negatív nyomást nem tudok létrehozni csak a kialakult nyomáskülönbség jelent hajtóerőt a molekulák mozgása számára. Minél kisebb a szivattyúban és a térben a nyomáskülönbség annál lassabb a folyamat. A nyomás valódi értéke és a mért érték között elhanyagolható időbeli eltérés van, mert a mérőműszer a másodperc tört része alatt felveszi az új értékeket. A hővezetés mérése esetén hosszabb a reakció idő. Jelen berendezésben a mérés stationer állapotban történt, így a valós értékek megmutatkozásához az egyensúlyi állapot beállítására van szükség. Viszonylag alacsonyak a hőmérséklet különbségek és a panel vastagságából adódóan a távolságok. Ezen okokból az „új” hőáram vonalak kialakulásához feltételezhetően csak néhány percre van szükség. A berendezés automatikája úgy van beállítva, hogy ha a 4 peremhőmérő és a közepén elhelyezett hőelem között a különbség átlép egy gyárilag megadott értéket, akkor a mérési folyamatot a berendezés megszakítja és csak 10-15 perc elteltével (az állandósult állapot beálltával) folytatja a méréseket. Mivel a kísérlet során a berendezés nem szakította meg a folyamatot, arra következtetek, hogy a változtatással nem avatkoztam be olyan mértékben, ami ezt a várakozási időt szükségessé tette volna. Azért szerencsés ez a tény, mert így követni tudtam az egyenértékű hővezetési tényező változását a nyomás összefüggésében, igaz hogy csak késleltetett adatokkal. Egy korábbi fejezetben határoztam meg a nyomás és a hővezetési tényező közötti elméleti összefüggést. Az ottani meghatározás csak tisztán a levegőre vonatkozott és nem kalkulált az általam használt kerettel. Az elméletben levezetett és a gyakorlati mérések ugyan azt a tendenciát mutatják, igazolva egymást. Ugyan a keret miatt nem tudtam pontosan azokat a hővezetési értékeket kihozni, mint amit az elméleti levezetés a levegőre mutat, mégis látszik, hogy a hővezetés változás csak nagyon jelentős nyomásváltozásra lép fel.

Itt szeretném cáfolni, mindazokat a feltevéseket, amelyek a hővezetési érték csökkenését már 50-100 mbar nyomás esetén is feltételezik, azt állítva, hogy nem is kell a nyomásértékkel olyan alacsonyra menni.

20-30 perces vákuumozás hatására (0,2-0,3 mbar mellett) a hővezetési tényező jelentős csökkenést mutat 0,082-ről egészen 0,054 W/mK-ig. Sajnos a várakozásaimmal ellentétben nem csökkent tovább, hanem elindult visszafelé és 0,06 W/mK értéken stabilizálódott.

A csökkenés magyarázata egyértelműen a nyomás csökkenése és az ahhoz tartozó alacsonyabb hővezetési érték. A hővezetési tényező csökkenésének megállása pedig feltételezésem szerint a szerkezetben lévő hőhidak hatása lehet. A nyomás különbség miatt a szerkezetbe kénytelenségből építettem be kitámasztó elemeket. Ezen elemek – hogy kellő szilárdságot biztosítsanak – a szigetelő anyagoknál nagyobb sűrűséggel rendelkeznek, így a hővezető képességük is magasabb. Mivel nem homogén szerkezetről van szó, a vákuumpanel hőhíd rendszerként viselkedik. Az egész együtt van egyensúlyban, külön-külön az elemei nem állhatnak be egymástól függetlenül egy állapotra, mert egymással kontaktusban vannak. Itt egy rendszer elemként kezelem magát a légteret is, mely szintén részt vesz a hőtani folyamatokban. Ha a rendszer egyik elemének állapotát, tulajdonságát megváltoztatom, akkor az egész rendszer új egyensúlyi állapotot vesz fel, tehát nem csak azt az egy elemet változtattam meg, hanem az egész rendszert és annak minden elemét is. Vélhetően itt is ez az eset következett be.

A kiinduló állapotban a fűtő és hűtő lapok között kialakított hőmérséklet különbségre beállt egy egyensúlyi állapot a panelban. A légtér és a kitámasztó elemek megfelelő arányban vették ki részüket a hőáram átjuttatásából. A nyomás csökkentésekor a légtér által szállított

hőmennyiség csökkent, a csökkenés megmutatkozott a hővezetési tényező csökkenésében. A szerkezetben lévő kitámasztó gyűrűk által szállított hőmennyiség viszont továbbra is fennállt. Sajnos a gyűrűk – mint hőhidak – által biztosított hőáram miatt nem tudtam a hővezetési tényezővel alacsonyabb értéket elérni. Így is elkönnyvelhetek valamennyi hőszigetelő képesség javulást, de a hőhidak jelenléte sokat ront a helyzeten.

Más hőszigeteléssel kapcsolatos kutatások esetében is nagy problémát okoznak a hőhidak. A NAHB Research Center, Inc. által fejlesztett VIP (Vacuum Insulation Panel) esetén a vékony alumínium réteg tartalmú fólia a kisebb panelek esetében 50%-os a nagyobbak esetében 27%-os hőhíd veszteségről számoltak be a jelentésben.

Annak ellenére, hogy a panel hőszigetelő képessége nem javult olyan mértékben, ahogy vártam, nem tartom sikertelennek a kísérletet. Az anyagi és technikai kereteim a fenti kísérletet tették lehetővé. Ezekkel a kísérletekkel igazolva látom a vákuum panel kialakíthatóságát és működő képességét.

A panel kialakítása során és a mérések során szerzett tapasztalatok értékén felül azt gondolom, néhány fontos megállapítás tehető a vizsgálattal kapcsolatban.

Teljes meggyőződésem, hogy a vákuum alkalmazása szigetelésként az egyik komoly esélyekkel rendelkező fizikai megoldás a jövőben, nem csak elméletileg.

Talán szabad azt is bizonyítékként felhozni, hogy ha én e doktori kutatás keretében a néhány tízezer forintos költségvetéssel és a rendelkezésemre álló technológiák segítségével – melyek távolról sem mondhatók csúcs technológiáknak – szerény, de kimutatható eredményt tudtam elérni, akkor mennyivel inkább azok a cégek, akik dollár milliókat képesek kutatásra költeni. Ilyen cég a DOW Chemie, vagy az Amerikai kormány anyagi támogatását élvező NAHB Research Center, Inc. Ezen felül, neves cégek foglalkoznak a témával Németországban (ZAE Bayern, Variotec Sandwichelemente GmbH) és Japánban is (Matsushita Electric Industrial Co).

Mint ahogy korábban említettem, ugyanazt a célt én egy más megoldással próbáltam elérni, mint a fent említett cégek. Az eddigi eredmények alapján néhány lényeges kulcskérdést sikerült a kísérleteimmel igazolni, vagyis lehetséges olyan fa vázszerkezetű szigetelt panelt kialakítani, mely alkalmas a finom vákuumtartományban a nyomást kialakítani és fenntartani. A fa vázszerkezetnek köszönhetően a panel nem érzékeny a felületi ütődésre, karcolásra egyéb mechanikai igénybevételekre. Még ha 3-4 mm mélységig behatoló sérülés érne is, a belső alumínium fólia nagy valószínűséggel sértetlen maradna. Építőipari körülmények között is alkalmazható kivitel jelent a merev panel szerkezet. A leszívás semmilyen járulékos nehézséget nem vonz, sem a leszívás időtartamára, sem az abszorbeált molekulák eltávolítására vonatkozóan.

Az eredmények ellenére a panel további fejlesztésre szorul, melyet e dolgozat keretében nincs módomban megoldani. Ennek két fő oka a költségvetés és az idő.

Az esetleges jövőbeni fejlesztések során a következő funkciók javítását tűzném ki célul:

– A keret kialakítását 2 mm-es alumínium profilból oldottam meg, ez az egyszerűség és a nagy szigetelési megbízhatóság, valamint a leszívó csonk stabil rögzítése miatt indokolt volt. A viszonylag nagy keresztmetszet nagy hőhidat jelent. Ez ugyan az én laboratóriumi méréseimet nem zavarta olyan nagy mértékben, mint a gyakorlatban zavaró, mert én csak a panel közepén mértem, de a gyakorlat a teljes felületet igénybe veszi. Meg kellene oldani kisebb hőhidat jelentő keretelem kialakítást, hasonlóan a thermopan üvegek keretéhez, mely lényegesen kisebb keresztmetszetű és néhány profil esetében nem záródó keret, csupán egy „U” profil. Az én esetemben a terhet is maga az alu profil hordozta, ezt ki lehetne váltani olcsóbb és kisebb hőhidat jelentő anyaggal például fával vagy műanyaggal esetleg nagyobb szilárdságú szigetelő habbal.

– A panel fedőlapjait biztosító lemezek helyére nagyobb merevséget biztosító anyagot kellene keresni, amely nem igényli a „túl sűrű” alátámasztásokat. Ezen túl az alátámasztások számát is minimalizálni kellene. Én a kísérletben a biztonságra törekedtem. Pontosabb szilárdsági számításokkal és megfelelő anyagválasztással, sokkal hatékonyabb panel alakítható ki.

– Az általam használt kitámasztó elem sem az ideális megoldás, igaz könnyen beszerezhető és könnyen kialakítható, de többszörösen túlméretezett, ami a hőhidak minimalizálása érdekében nem engedhető meg. Véleményem szerint olyan anyagot kellene keresni, mely a lehető legnagyobb nyomószilárdság mellett a legkisebb hővezető képességgel rendelkezik.

– A leszívó csomópont kialakítását is javítani lehetne, akár olyan kivitelben, hogy a panel újra vákuumozható legyen, mondjuk 15 évenként.

– Getter anyag használata is célszerű lenne, mert az üzemi állapotot és üzembiztonságot erősen javítaná.

Véleményem szerint a vákuumpanel néhány változtatással életképes, sőt valószínűleg piacképes szerkezet lehet.

6. Összefoglalás

A kutatás során az I. fejezetben körbehatároltak szerint két módszerrel tettem kísérletet arra, hogy a jelenleg általánosan használt hőszigetelő szálás és habos anyagok szigetelő képességénél jobb szigetelést állítsak elő. Ezeket a kísérleteket a fenti két fejezet részletezi. Az alábbiakban szeretném összegezni a tapasztalatokat és értékelni az eredményeket.

Az ásvány- és üvegyapot szálás szigetelő anyagok esetében általánosságban számításba vett hővezető képessége $0,04 \text{ W/mK}$. A valóságban természetesen ez nem mindig pontosan ez az érték. A szigetelő gyapotok testsűrűségének változtatásával a hővezető képességük is változik.

Az összefüggés meghatározására nem találtam matematikai modellt, ami nem is meglepő, hiszen az ennél egyszerűbb konvekciós mozgásokra is csak hasonlósági alapon végzünk „számításokat” vagy inkább összehasonlításokat. A szálak között lezajló hőtechnikai jelenségek matematikai leírása rendkívül bonyolult feladat lenne.

A korábbi mérési tapasztalatok, a szakirodalom [Fekete I. 1985.] [Albert J. 1962.], valamint a gyártmányok termékismertetője alapján általában elmondható, hogy a szálás szigetelő anyagok szigetelő képessége a testsűrűség csökkenésével nő. A kereskedelemben kapható szálás szigetelő anyagok testsűrűségének alsó határa $40\text{-}50 \text{ kg/m}^3$ ennél alacsonyabbra esetleg a vékonyabb szálakból álló üvegyapot mehet le. Ehhez a testsűrűséghez tartozó hővezető képesség a $0,04 \text{ W/mK}$ érték szoros környezetében található, ritka esetben megy alá. A térfogatsűrűség növekedésével a lemezek nagyobb szilárdságot kapnak (lépésállóság, öntartás, némelyikre még vakolni is lehet), de ezzel egyidejűleg a lambda értékeik is magasabbak ($0,05\text{-}0,07 \text{ W/mK}$).

A habosított szigetelő lemezek esetében a testsűrűség általános alsó határa közel harmada a szálás anyagokénak és akár 15 kg/m^3 sűrűségű anyagok is kaphatóak. Polisztirol hab esetében ehhez szintén a $0,04 \text{ W/mK}$ -es hővezetés tartozik. Itt is a sűrűség növekedésével nő a hővezető képesség 20 , illetve 30 kg/m^3 esetén $0,042$, illetve $0,045 \text{ W/mK}$ a hővezetés. (Különböző gyártóknál ugyanahhoz a sűrűséghez más értékek is tartozhatnak, ezért az itt megadott számok inkább csak irányszámok.)

Meg kell említeni a poliuretán habokat, amelyeknek az ára magasabb mint a polisztirol haboké, ugyanakkor bizonyos testsűrűség mellett akár $0,035 \text{ W/mK}$ alá is mennek. A gyártás során a habosításhoz CO_2 gázt használnak és a technológia eredményeként a belső zárt cellákban a széndioxid hosszabb időn keresztül is bent maradhat. Ilyen lemezek esetében a széndioxid levegőnél alacsonyabb hővezető képessége miatt még $0,030 \text{ W/mK}$ alatti lambda érték is mérhető. Idővel a gáz folyamatos diffúziójával a széndioxid eltávozik és a hővezető képesség megnő.

Tehát mind a habos mind a szálás anyagoknál a standard összehasonlító érték a $0,04 \text{ W/mK}$, így én ezzel az értékekkel keltem versenyre két módszerrel.

6.1 Tükörpanel

A hőtükörös módszerrel egy kísérletsorozatot végeztem, ahol az egyes lépések hatásaira voltam kíváncsi, így nem csak a végeredmény, hanem az egyes elemek is információval szolgáltak. A lépések során kiemelten megmutatkozott, hogy a hőszállítás a levegőben több mint 50%-ban sugárzással történik. Az is erősen feltételezhető, hogy Imrik Zoltán elméleti levezetése helytálló, mert az újabb és újabb beépített fóliák hatására a hőáram a beépített fóliák számának növekedésével egyre kisebb mértékben csökkent. Ezt a megállapítást a kísérletben zavarja, hogy egyúttal a légréteg vastagság is csökkent, ahol a konvekció kialakulási valószínűség is kisebb lett. A két hatás együttesen látványos javulást mutatott a hőszigetelő hatásban. A lépések során egyre jobban sikerült megközelíteni a nyugvó levegő elméleti hővezető képességét (0,02502 W/mK). A társított alumínium fóliával 3 mm-es légrétegre osztott panel belső egyenértékű hővezetési tényezője pedig 0,02778 W/mK, ez csupán 11%-al több, mint a levegő hővezetése.

Mivel a mérések a Holometrix Rk80 Rapid-k hőárammérős hővezetési tényező mérő berendezés 300x300 mm méretű próbatesten – viszonylag kis felületen – történt, az eredmények megbízhatósága érdekében ellenőrző mérést tartottam szükségesnek egy másik berendezésen. A 30 cm-es oldalirányú kiterjedés esetén a peremhatás jelentős lehet, ami a mérési pontosságot kellemetlenül befolyásolhatja, ezért úgy döntöttem, hogy az ellenőrző mérést a Holzbau Holten típusú berendezés 800x800 mm-es próbatest méretén megismétlem. Elkészítettem a 3 mm-es osztású 6. fázisban vizsgált panelt a 800 mm-es méretben. A 80 cm-es szószerinti feszítáv és a 3 mm-es fóliák közötti távolság, a fólia feszítés esetén az összeérés veszélyét rejtette. A megfelelő szigetelő hatás érdekében a fóliák semmiképpen sem érhetnek össze. Az összeérés elkerülése érdekében a fóliákra 3x3 mm keresztmetszetű hungarocellből vágott csíkokat ragasztottam, úgy hogy a fólia két oldalán a csíkok merőlegesen keresztezzék egymást, minimálisra csökkentve a hungarocell okozta hőhíd hatást.

A Holzbau Holten berendezés más elven működik, mint a kis próbatestes Rapid-k, ahogy azt a 3. fejezetben részleteztem. A mérés így a két berendezés összehasonlítását is lehetővé tette. Ezen túlmenően számomra azért nagyon lényeges a 80 cm-es próbatesten való mérés, mert ez a méret már nagyobb, mint a könnyűszerkezetes faházak vázközei (és a szarufák általános távolságánál alig kisebb), így életnagyságú próbatestet tudok mérni.

A Holzbau Holten berendezés a mérés során nem egy összegzett eredményt ad, eltérően a Rapid-k berendezéstől, hanem egy mérési sorozatot, önálló mérési eredményekkel. Természetesen van lehetőség a mérés folyamatos figyelemmel kísérésére, mint azt a vákuumos próbatest esetében tettem. A méréskor a berendezés 50 másodpercenként rögzíti az adatokat és az eredményeket. A mérési sorozatot a 4. melléklet mutatja, az 5 oszlopban láthatóak a hővezetési tényező értékek.

A sok mérési eredmény átlag értéke 0,03369 W/mK, a Rapid-k hőáram mérőben kapott eredmény pedig 0,03347 W/mK. A két mérés közötti eltérés 0,65%, vagyis kevesebb mint egy százalék. Az eredmény megnyugtatóan igazolja, hogy mindkét mérés jó, vagy ugyan olyan mértékben rossz, aminek a valószínűsége kisebb. Mindkét értékben benne vannak a méréshez szükséges fedő lapok, amelyeket egy könnyűszerkezetes ház vázközeit burkoló (egyébként is beépítésre kerülő) lemezek helyettesíthetik. Ezen okból tartom célszerűbbnek a panel belsejére vetített egyenértékű hővezetési tényezők figyelembe vételét.

Kis próbatest esetén: 0,02778 W/mK
Nagy próbatest esetén: 0,02795 W/mK

A két érték közötti eltérés: 0,63%

A 3 mm osztású tükörpanel olyan szigetelő szerkezetet jelent, amely kihasználva a sugárzásból és konvekcióból származó hőáram redukálását, a lehető legjobban megközelítette a nyugvó levegő hővezetési tényezőjét. A 3 mm-es tükörpanel jelentősen jobb hőszigetelő hatást ért el, mint a kitűzött szokványos hőszigetelő anyagok. A hőszigetelő hatásban mutatott javulás 30,55%, ez azt is jelenti, hogy ilyen rendszer alkalmazása esetén a fal szigetelés vastagsága egy harmaddal vékonyabb is lehet ugyanazon U-érték mellett.

A kísérletek rávilágítanak arra is, hogy ha a vázközöket burkoló lemezek felülete nem fa, gipszkarton vagy cementkötésű forgácslap marad, hanem fényes alufóliával kasírozzuk a felületeket, akkor csupán ezzel a művelettel számottevő szigetelési javulást érhetünk el. Ám azt is szem előtt kell tartani, hogy a kasírozott fólia párazáró réteggé is működik. A páratechnikai méretezésnél, általában a párazáró fólia beépítését a belső oldali burkoló lemez alá írják elő. Így tehát nem tehetek a külső lemez felületére is párazáró réteget, mert hatására páralecsapódás jöhet létre a falszerkezetben.

Ha a falszerkezetbe egyébként is építenek be párafékező fóliát – ez általában sima polietilén fólia – akkor a magas felületi emissziójú PE fólia helyett célszerűbb alacsony emissziós tényezőjű alumíniummal társított PE fóliát alkalmazni, mert ugyanazon falszerkezet szigetelő képessége jobb lesz.

A kísérleteim és eredményeim alapján javaslatot teszek egy olyan szigetelő szerkezet kialakítására és alkalmazására – elsősorban könnyűszerkezetes házak vázközeiben – amely a 3-5 mm-es távolságban párhuzamosan kifeszített alacsony felületi emissziójú fóliákból áll. A könnyűszerkezetes házak vázközei betölthetők a tartószerkezetet, mint az én fa panel szerkezetem. A fóliák egymáshoz való pozíciójának biztosítását kell megoldani egy termékfejlesztési fázisban. Véleményem szerint ez a feladat megoldható egyenletesen elosztott és a felületeket ragasztással összekötő poliészter gyöngyökkel. A poliészter gyöngyöknek azonos átmérőjűnek kell lenni és úgy kell őket elhelyezni, hogy a lehető legkisebb hőhíd hatást eredményezze a jelenlétük. Ezzel a technikával kialakítható egy olyan többrétegű paplan, amely megfelelő szélkiképzéssel a könnyűszerkezetes ház vázához rögzíthető. A termék jellemzőit a tükör vagy reflexiós paplan elnevezés adhatja meg.

Az említett megoldással a jelenleg alkalmazott ásványgyapot szigetelés kiváltható. A tükör paplan szigetelő képessége 25-30%-al jobb mint az ásványgyapoté. A 10 cm-es vázközben ásványgyapottal elérhető hővezetési ellenállás:

$$\frac{\delta}{\lambda} \longrightarrow \frac{0,1}{0,04} = 2,5(m^2 K / W)$$

míg a tükörpaplannal

$$\frac{0,1}{0,02778} = 3,599(m^2 K / W)$$

A tükörpaplannal elérhető javulás 43,9% az ásványgyapot 2,5 m²K/W-os értékéhez képest. Azt is figyelembe kell venni, hogy mindeközben kevesebb anyagmennyiséget építettünk be az épületbe. További előnye a tükörpaplannak az ásványgyapottal szemben, hogy ha megfelelő a keretelemekhez való rögzítés, akkor nem tömörödik össze évek alatt és nem lesz a felső sávban légrés. Feltehetően nem fognak a bogarak rovarok beköltözni, mint az esetenként az ásványgyapottal megtörténik.

Számos további kérdés is felvetődik a használati lehetőségeket illetően, például, hogy mennyire időt álló a szerkezet, milyen problémákat jelent, a párazárasi tulajdonsága. Ezekre a kérdésekre a választ csak további vizsgálatok és kutatások tudják megadni a lehetőséget. Feltételezve, hogy a vázközöket az új szigetelő rendszer tölti ki, a vázszerkezet által jelentett hőhidak változatlanok maradtak. Dolgozatomnak nem célja ezt a kérdést megoldani, csak a vázköz kitöltési lehetőségekre szorítkozom.

6.2 Vákuumpanel

Ahogy korábban utaltam rá a vákuum alkalmazása egyre vonzóbb a nemzetközi hőszigetelési piacon. Véleményem szerint is komoly lehetőségek rejlenek benne, a technológiának és a használt anyagoknak kell arra a szintre felfejlődniük, hogy megbízható termék kerülhessen piacra. A gyártó cégek ugyan 10-15 esetenként 20 évnél is hosszabb időre teszik a termék kifogástalan működési idejét és garanciát vállalnak a fólia burkolatú szigetelő lemezeikre, de tapasztalat híján ez a garanciaállalás rendkívül speciális és a termék számára semmilyen „veszélyes” állapotot nem enged meg, ami pedig a hétköznapi életben könnyen előfordul, például, hogy a panel egyik fele 0 °C fok alá kerül. A beépítési környezetre is nagyon érzékenyek ezek az egyébként igen drága lemezek.

Az én általam készített panel ugyan két jelentős nehézséget kiküszöbölt, cserébe szembe került egy harmadikkal, amely kiküszöbölése további fejlesztéseket igényelne. Az általam készített lemez nem sérülékeny, nagyobb karcolásokat is elbír tönkremenetel nélkül. Azt mondhatom, hogy amit a hungarocell lemezek vagy egy thermopan üvegnek el kell viselni egy építkezésen azt az én lemezem is elviseli. *Kivéve természetesen az átfúrást vagy szögbeverést!* Tehát ipari környezetben való felhasználásra alkalmas, ez feltétlenül előny a „hímes tojás” vákuumlemezekkel szemben. A vákuum kialakítás is sokkal egyszerűbb gyorsabb és költségkímélőbb. Én csak egy szivattyút alkalmaztam, hatékonyabb megoldás lenne két szivattyú alkalmazása úgy, hogy az egyik a levegő nagy részét távolítaná el nagy légszállító kapacitással (erre lenne alkalmas az általam alkalmazott kétkörös szivattyú) és egy másik, amely az 1 mbar alatti munkát végezné el kisebb légszállítással és nagyobb végvákuummal. Ennek a második típusnak diffúziós vagy turbómolekuláris vákuumszivattyúnak kellene lennie.

Fejlesztést igényelne pedig a hőhidak minimalizálása. A kísérletben a hőhidak nagy száma és hatékonysága gátolta meg a szerkezetet, a jobb szigetelési hatás elérésében. A panel belsejére vetített egyenértékű hővezetési tényező 0,04 W/mK lett, ugyanannyi, mint a szokványos szigetelő anyagoké. Ha csak a teljesítmény szempontjából nézzük, azt is mondhatom, hogy itt legalább egy döntetlent kihoztam a hungarocellel vagy az ásványgyapottal szemben. *A különbség az, hogy én ezt az értéket sokkal drágábban értem el.* Ugyanezt az eredményt kitámasztó elemek nélkül és sima levegővel is elértem volna. Ez nem a kísérlet értelmetlenségét vagy akár kudarcát jelenti, hanem kiinduló alapot biztosít a következő későbbi továbbfejlesztéshez, ahol ezek alapján a tapasztalatok alapján lehet a konstrukciót tökéletesíteni.

A mérés menete során feltétlenül igazolás nyert a 2. fejezetben levezetett és a 6. ábrán bemutatott nyomás és hővezetési tényező közötti összefüggés. Amit az elmélet állított azt nagyon jó közelítéssel igazolta a mérés, nevezetesen: ha nyomás csökkenéssel (vákuummal) akarok a levegőnél jobb hőszigetelő hatást elérni akkor, legalább finom vákuum tartományba ($1 \cdot 10^{-3}$ mbar) kell csökkentenem a nyomást.

Igazolódik az a feltevés is, hogy akkor kezd a levegő hővezető képessége csökkenni a térben, ha a molekulák közepes szabad úthossza az edény méretével azonos nagyságrendbe kerülnek.

0,1 mbar esetén 20 °C fokon a molekulák 6,5 mm-t repülhetnek ütközés nélkül, a panel belső szabad tere 15 mm volt.

7. Tézisek

1, Hat lépésből álló kísérletsorozattal kimutattam a hőszigetelő rétegeként beépített alacsony felületi emissziós tényezőjű fóliák számának hatását az egyenértékű hővezetési tényezőre. A fóliákat egy erre a célra kifejlesztett fából készült mérő panel hordozta, a mérések során a panel szerkezete változatlan maradt. A panel belsejében a fóliák száma 0, 2, 3, 5, 7, 11 volt. Azonos rétegvastagság mellett az egyenértékű hővezetési tényező a fóliák számának növekedésével asszimptotikusan tart a levegő hővezetési tényezőjéhez.

2. Kifejlesztettem egy olyan szigetelő panelt, amelynek szigetelési értéke, a hagyományos szálas és habos szigetelő anyagoknál lényegesen jobban megközelíti a nyugvó levegő hőszigetelő képességét ($0,02778 \text{ W/mK}$). A panelban a légteret alacsony felületi emissziós tényezőjű fóliákkal osztottam 3 mm-es légrésekre. A 9 kifestített fólia a sugárzásos hőátvitel jelentős részét kiküszöbölte és a keskeny légrés a konvekció kialakulásának lehetőségét minimalizálta.

3, Javaslatot tettem alacsony felületi emissziós tényezőjű fóliákból és poliészter gyöngyökből kialakított szigetelő szerkezet kialakítására tükörpaplan néven. A társított PE-alumínium fóliákra felragasztott azonos méretű poliészter gyöngyök tudják a megfelelő 3-5 mm-es távolságot tartani a fóliák között. A tükörpaplan 10 cm-es vastagságban alkalmazva ~40%-al nagyobb hővezetési ellenállást biztosít mint a $0,04 \text{ W/mK}$ hővezetési tulajdonságú ásványgyapot.

4. Merev fa-alumínium kompozit szerkezet segítségével olyan vákuumpanelt készítettem, mely alkalmas finom vákuum tartományban tartani a benne lévő nyomást úgy, hogy közben ipari környezetben is felhasználásra alkalmas. A panel belső felülete vákuumzáró alumíniummal kasírozott, míg külső felülete 6 mm vastagságú bükk rétegelt lemez.

Irodalomjegyzék:

- [1] Albert J. (1962): A hőszigetelés kézikönyve. Műszaki könyvkiadó, Budapest.
- [2] Beke J. (2000): Műszaki hőtan mérnököknek. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
- [3] B. Schacht (2002): Zur thermischen Optimierung von Außentürsystemen. Doktori értekezés, Universität Hamburg, Hamburg.
- [4] Budó Á. (1986): Kísérleti fizika. Tankönyvkiadó, Budapest.
- [5] E. Neufert (1999): Építés és tervezéstan. Dialóg Campus Kiadó, Pécs.
- [6] Építéstudományi Intézet (1982): Épületek fokozott hőszigetelésű kialakítása. Budapest.
- [7] Építéstudományi Intézet (1982): Épületek gazdaságos és energiatakarékos üzemeltetésének építészeti és épületszerkezeti feltételei. Budapest.
- [8] Építéstudományi Intézet (1983): Épületek határoló szerkezetinek utólagos hőszigeteléséhez kapcsolódó kísérletek. Budapest.
- [9] Fekete I. (szerk.) (1985): Épületfizika kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [10] F. Bacon (1620): Novum Organum. Basil Montague.
- [11] F. Bacon (1863): (James Spedding, Robert Leslie Ellis fordítók) The new organon or true directions concerning the interpretation of nature. Taggard and Thompson, Boston.
- [12] F. Maßong (1996): Wärme- und Feuchtschutz am Dach. Verlagsgesellschaft, Rudolf Müller, Köln.
- [13] F. Eichler (1975): Épületfizikai tervezés. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [14] Fülöp Z. (1969): Hőtechnikai alapmérések. Tankönyvkiadó, Budapest.
- [15] Gábor L., Zöld A. (1981): Energiagazdálkodás az építészetben. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [16] G. Küttinger, G. Gicklhorn (1992): Holzrahmenbau Teil1, Teil2, Bruderverlag, Karlsruhe.
- [17] Gereben Z. (1981): Épületfizika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [18] G. Hauser, H. Stiegel (1992): Wärmebrückenatlas für den Holzbau. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin.

- [19] Imrik Z. (1981): Transzportfolyamatok. Egyetemi jegyzet, Sopron.
- [20] Informationdienst Holz (1991): Allgemeines Lebensdauer von Holzhäusern. 1991 Okt.
- [21] Informationdienst Holz (1991): Bauphysikalischen Daten, 1991 November.
- [22] Informationdienst Holz (1992): Wärmebrücken 1992 Oktober.
- [23] Informationdienst Holz (1998): Holzrahmenbau 1998 Április.
- [24] Informationdienst Holz (2000): Holzbau und die Energieeinsparverordnung, 2000 December.
- [25] Jászai T. (1987): Műszaki hőtan (hőközlés). Tankönyvkiadó, Budapest.
- [26] J. Herrmann (1992): Csillagászat. SH Atlasz Springer-Verlag, Budapest.
- [27] K. Petzald (1975): Wärmelast. VEB Verlagstechnik.
- [28] K. Moritz (1970): Jó és rossz. Műszaki könyvkiadó, Budapest.
- [29] Kovács L. (szerk) (1979.): Műanyag zsebkönyv. Műszaki könyvkiadó, Budapest.
- [30] L. D. Landau – A. I. Kitajgorodszkij (1975): Fizika mindenkinek. Gondolat Kiadó, Budapest.
- [31] Lomonoszov, M. Vasziljevics (1745): „Gondolatok a meleg és hideg okairól”. Szentpétervár.
- [32] M. Wutz, Adam, Walcher (1986): Theorie und Praxis der Vakuumtechnik. Vieweg Braunschweig.
- [33] M. A. Mihajev (1990): A hőátadás gyakorlati számításának alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest.
- [34] Molnár S. (szerk.) (2000): Faipari kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron.
- [35] Máté K. (szerk.): ÉVOSZ Könnyűszerkezet építők tagozata, Budapest,
- [36] Németh J. (1986): A rétegelt falemezipar fejlesztése hazai alapanyagbázison. Budapest.
- [37] O. Humm (2000): Alacsony energiájú épületek. Dialog Campus Kiadó, Budapest.
- [38] P. Randel (2000): Application of Vacuum Insulations in Buildings. Symposium „Progress in Vacuum Insulation” Vancouver.
- [39] P. Marsh (1984): Hőszigetelés és kondenzáció. Műszaki könyvkiadó, Budapest.

- [40] Polinszky K. szerk. (1974): Műszaki lexikon 3.kötet. Akadémia könyvkiadó, Budapest.
- [41] Pásztory Z. (1996): Faházak hőtechnikai vizsgálata. Diplomadolgozat, Sopron.
- [42] Révai nagy lexikona 8.kötet (Hasonmás kiadás) (1991), Szépirodalmi és Babits könyvkiadó, Budapest.
- [43] R. Hook (1665): Micrography,
- [44] S. Dushman (1950): A vákuumtechnika tudományos alapjai. Akadémia Kiadó, Budapest.
- [45] Szabó P. (1995): Faházépítés Magyarországon, Magyar Asztalos, 1995. évf. 4. szám.
- [46] Szabó P. (1995): Hőtárolás az építészetben, Magyar Asztalos, 1995. évf. 5. szám.
- [47] Szabó P. (2001): Favázás épületek nyári hőkomfortja Magyarországon című doktori értekezés. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron.
- [48] Szalai J. (1993): Műszaki Mechanika II. szilárd testek sztatikája. Nyugat-Magyarországi Egyetem, egyetemi jegyzet, Sopron.
- [49] T. Steemars (1991): Solar Architecture in Europe. Prism Press, Luxemburg.
- [50] Zöld A. (szerk.) (1991): Épületfizika. Az építés fejlődéséért, Budapest.
- [51] Zöld A. (1999): Energiatudatos építészet. Műszaki könyvkiadó, Budapest.
- [52] Zöld A. (2005): Az új épületenergetikai szabályozás. Bausoft Pécsvárad Kft.
- [53] Variotec Sandwichelemente GmbH&Co. (2005) : Energie sparen mit Vakuum in Wand und Decke, Holz-Zentralblatt, (September 2005.).
- [54] Várfalvi J. (1984): Hőhídek hőtechnikai és szerkezeti vizsgálata. ÉTK Világszínvonal vizsgálati tanulmányok, Budapest.
- [55] Várfalvi J. Zöld A. (1986): Határolószerkezetek hőtechnikai méretezése. Budapest.
- [56] Várfalvi J. Zöld A. Reis F. (2002) Az épületfizika alapjai, Műegyetemi kiadó, Budapest
- [57] Robert R. Zarr (2001): A History of Testing Heat Insulators at the National Institute of Standards and Technology. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

Szabványok, honlapok:

- [58] DIN 4108 Teil 2, Teil 4, Teil 5, Szabvány,
- [59] Energieeinsparverordnung (EnEV) Verordnung über energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Szabvány,
- [60] MSZ EN 310/1999. Fa alapanyagú lemezek. A hajlító szilárdság és a hajlító rugalmassági tényező meghatározása, Szabvány,
- [61] MSZ-04-140-2: 1991, Szabvány
- [62] www.enev.de
- [63] <http://www.radiantguard.com/index.asp?PageAction=Custom&ID=12>
- [64] NAHB Research Center, Inc. (2002.), Accelerating the Adoption of Vacuum Insulation Technology in Home Construction. Renovation, and Remodeling, Upper Marlboro, MD.
- [65] <http://www.rparts.com/pgscripts/panel.asp?simple=yes>
- [66] <http://www.southwall.com/southwall/Home/Company/History.html>

A dolgozat története, köszönetnyilvánítás

A faipari mérnöki diploma megszerzése után 1996 májusában még eszem ágában sem volt az, hogy valamikor én doktorálni fogok. Ha akkoriban valaki ezt állította volna rólam, akkor igyekeztem volna minél távolabb kerülni az illetőtől, merthogy elment az esze. Friss diplomámat a gyakorlatban szerettem volna kamatoztatni, ez ügyben előrehaladott tárgyalásokat folytattam a VERGA Rt. egyik vezetőjével, akik egy új gépsor beüzemeléséhez kerestek ambiciózus szakembert. Szerettem a fával foglalkozni már gyerekkoromban a nagyapám műhelyében farigcsáltam, próbáltam őt utánozni. A szakmai pályámon talán ő indított el, mert mikor a gyalupadnál dolgozott, engem felültette a gyalupad mellett lévő ablakba, ahonnan kiválóan tudtam figyelni tevékenységét. Sok napot töltöttem el Vele 2-12 éves korom között, figyelve, hogyan csinálja a szerszám nyeleket a vonókéssel, vagy éppen hogyan hajlítja meg az akácfát tűz és víz segítségével. Igazi mesterember volt. Édesapám segítségével már magasabb szinten művelhettem az ipart, mert egyrészt én lettem koromnál fogva erre alkalmasabb, másrészt ő mindig az újdonságokat kereste, hogyan tudná megoldani az éppen aktuális műszaki feladatot. Olyan "girbe-gurba" térgörbe lépcsőtartókat ragasztottunk, hogy nekem fogalmam sem volt hogy ez jó lesz e valahova egyáltalán. Természetesen mérnöki precizitásának és alaposágának köszönhetően mindig beillett a helyére, úgy ahogy kellett, de én ezt csak ott a helyszínen láttam meg. Édesapám mellett tanulhattam meg, hogy fában sokkal több rejlik, mint egy szerszámnyél vagy egy tragacs (szállító eszköz), a fából tartókat, faházakat, térgörbe lépcsőket is lehet csinálni. Valahogy így a gyakorlaton keresztül kerültem bele a szakmába anélkül, hogy ez tudatosult volna. A diploma után mégis apám vetette fel, mi lenne, ha ott maradnék az egyetemen valamiféle tudományt tanulni. Azt hiszem elég határozottan sikerült elutasítanom, hogy többet nem is hozta elő a témát. Nem ő volt az egyetlen, akinek a fejében ez megfordult, volt egy akkori tanszékvezető ki szintén játszott a gondolattal és máig a "Jimmy" névre hallgat.

Ezen már valahogy elkezdtem gondolkozni és bementem az akkori rektorhoz, hogy tanácsot kérjek. Meglepetésemre úgy jöttem ki a kb. 15-20 perces beszélgetés után, hogy fel voltam véve doktorandusznak és a doktori témám is megvolt, sőt azzal is büszkélkedhettem, hogy a rektor a témavezetőm. Azt gondolom, hogy ennek a rektornak volt valami köze ahhoz is, hogy a diplomadolgozatom szakmai díjat kapott, amit máig sem értek.

Tehát néhány hét leforgása alatt kezdeti „hallani sem akarok róla”, álláspontról beálltam tudós tanoncnak. Közben a VERGA vezérigazgató személyes meghívását utasítottam el, mondván, hogy már van elfoglaltságom.

Ment is szépen a dolog, két szemeszter alatt a szükséges kreditek javát összeszedtem, és a kutatással is jól haladtam.

Időközben ösztöndíj kiegészítésként vállaltam munkákat és néhány év alatt ez olyan biztató szintre jutott, hogy mégiscsak a gyakorlat felé kezdtem kacsingatni és mivel az ösztöndíjam lejárt bementem a témavezetőmhöz, hogy leköszönjek. Számomra teljesen érthetetlen módon nyugodt maradt és "csak" azt a bölcs mondást mondta, hogy jó, de most még ne döntsük ezt el, hanem várjunk egy hetet, gondolkodik rajta meg én is gondolkodjak, hogy biztos jó lesz-e a döntés. Ez a válasz ugyan meglepett, de azzal a magabiztossággal jöttem ki, hogy én már tudom a választ egy hétre előre. De a hét során mégis dolgozott bennem az ügy és az is nehezítette a dolgot, hogy katonának is behívtak. Gondoltam, hogy mindenképpen a polgári szolgálatot választom, legfeljebb nem az egyetemen. Elmentem hát más intézményhez érdeklődni és meggyőződésem, hogy Isteni vezetés hatására a lehető legrosszabb helyre mentem. Az intézményvezető hölgy azonnal lekáderezett, és már azt is bejelentette, hogy mivel náluk sok az egyedülálló hölgy majd ő segít a választásban. Ahogy kijöttem, tudtam,

hogy ide soha többet nem teszem be a lábam. Nem maradt más hátra, visszamentem a témavezetőmhöz alkudozni, de ő volt nyerő pozícióban és a „polgári szolgálat doktorival” című változatot ajánlotta. A meglepő nem ez, hanem az hogy könnyedén elfogadtam és nagy lendülettel álltam neki a folytatásnak.

Most mikor ezt írom, úgy tűnik, hogy már látszik a part, amiért az egész ment. De talán ez nem is így igaz, egy doktori kutatásban vajon csak az a cél, hogy megkapja az ember a címet? Teljes meggyőződés, hogy nem. Nagyon nagy elismerésnek és megtiszteltetésnek tartom, ha az ember szert tesz egy doktori címre, de a tapasztalatom szerint az talán még lényegesebb, hogy a munka során megtanultam rengeteg mindent. Azt mondhatni, hogy általában az embernek ez az első önálló nagy volumenű kutató munkája, ahol komoly elvárásoknak kell megfelelni. Itt találkozok sok problémával először, itt esik hasra a nehézségekben, számos esetben kényszerül korrigálásra, kudarcok esetén biztatásra, sikerek esetén egy kis lehűtésre. A mindezekben való átmenetel, sokat tesz hozzá az ember élettapasztalatához és az én esetemben a kutatás jellegzetességének a megismeréséhez. Van ugye az embernek egy elképzelése, hogy mit hogyan fog csinálni, és annak milyen eredményt "kell" adni. Ez az utolsó nem mindig jött nekem össze, vagyis hétköznapi szemszögből a kísérlet kudarcot vallott. Például: ha falemezt akarunk vákuumzáróvá tenni, akkor mondjuk alumíniumot kell rá ragasztani. A lelkes doktorandusz fog valami ragacsot – ami a kezébe akad – és bekeni mind a kettőt és összenyomja gondolva, hogy már meg is van oldva a feladat. Kinyitja a prést és összeomlásig sújtja le, ahogy az alumínium fólia pöndörödjön le a faanyagról érintés nélkül. Néhány napi regenerálódás után hősünk újabb próbát tesz, de már sokkal dörzsöltebb. Felhív egy ragasztásra szakosodott céget és megkérdezi, hogy ezt a két anyagot mivel lehetne összeragasztani, sima ügy még 2kg mintát is adnak. Igen ám, de ez a ragasztó sem az igazi, mert ugyan ott marad a felületen, az első leheletnyi igénybevételre 3-4 ilyen kudarc után már elég lehangolt állapotban fásultan próbálkozik, feltéve ha fel nem adja. Ilyen eseteken keresztül tanulhattam meg, hogy az új dolgok (ez inkább csak nekem volt új) nem olyan egyszerűen mennek, amilyen egyszerű azokat elképzelni. A tapasztalat sokat segít, ha valaki már sok mindent csinált sok anyaggal kísérletezett, akkor sokkal jobb eséllyel látja előre a nehézségeket. Azt is megtanulhattam ezekből az esetekből, hogy egy kutatási feladatot a lehető legnagyobb alapossággal kell előkészíteni és végig csinálni. Nem lehet a kísérlet során rögtönzésekre építeni, hogy majd megoldjuk valahogy. Több vizsgálatot azért kellett ismételnem, mert nem voltam körültekintő az előkészítés során, pedig sikerülhetett volna...

Még a leggondosabb előkészítés és kivitelezés sem jelent garanciát arra, hogy tényleg azt kapom, amit szerettem volna, az eredmény lehet akár kedvezőtlen is. Ez is a doktori kutatásomnak az egyik járulékos haszna, hogy másképpen értékelem a kísérleti eredményeket most, mint tettem azt az elején. Nem biztos, hogy egy kísérlet kudarc akkor, ha nem a várt eredményt adja, lehet hogy az a dolog nem is úgy működik, reagál vagy viselkedik mint azt gondoltuk. A kísérlet eredményeként viszont tudjuk, hogy működik, reagál vagy viselkedik miközben eddig nem tudtuk, na ez már eredmény, mert a következő lépés megtételéhez ez is kellett. Így hát a kudarc is siker, ha tudjuk, hogy miért lett kudarc vagy mit gondoltunk rosszul. Talán Napóleon mondta, hogy a "vesztes sereg gyorsabban tanul" igen el tudom fogadni, mert a kudarcokként megélt kísérletek után sokkal erősebben járt az agyam, hogy oldjam meg. Egy sikeres kísérlet esetén az ember elégedetten hátradől és örül, milyen jól csinálta. Lehet hogy a technológiai fejlődésnek és a gazdaságnak ez egy kiegyensúlyozó mechanizmusa.

Nem szeretnék önmagába záródó ciklusba keveredni, de már az is eredmény, ha az ember ezeket a jelenségeket tudatosan értékeli és nem csak megéli.

Összességében élvezetesnek találom a kutatói munkát mind a nehézségei ellenére.

Egy doktori megírása olyan szintű feladatot jelent, amit egyedül tapasztalatok nélkül képtelenség megcsinálni. Nekem is nagyon sok segítségre volt szükségem és most szeretném megemlíteni azokat, akiktől azt kaptam.

A legnagyobb hálát az Úr Jézus Krisztusnak fejezem ki, több esetben pótolhatatlan segítséget adott elsősorban a döntésekben, de még a megvalósítás lépéseiben is kaptam jó ötleteket Tőle. Köszönetemet szeretném kifejezni szüleimnek, az ő segítségüket nélkülözhetetlennek találok, édesapám szakmai hozzájárulása nélkül is sokkal nehezebb dolgom lett volna. Édesanyám sem maradt ki a szakmai kérdésekből, hiszen a fólia feltépő szilárdságot az ő közreműködésével mértem meg.

Témavezetőm legnagyobb érdemeit már fentebb említettem, de azt is meg kell említenem, hogy különösen a kutatás kezdeti szakaszában nagyon kedvező feltételeket biztosított a munka végzéséhez. Érdemei közé tartozik, hogy a dolgozat befejezése előtti hónapokban minden tőle telhetőt megtett és minden alkalmat megragadott, hogy presszionáljon a dolgozat befejezésére.

Különösen nagy köszönettel tartozom Molnár Sándornak, aki mindent megtett, hogy a dolgozatom összeállhasson. Ő is nagyon nagy mértékben járult hozzá, hogy itt maradhattam az egyetemen és folytathattam a munkát, ezen felül számos kutatási feladatban adott helyet nekem, ami szakmai felkészültségemen sokat segített.

A kutatás kezdeti szakaszában Dívos Ferenc is kedvező nyomokat hagyott a kutatásom sikeres kimenetelében. A dolgozat közvetlen témáját illető legnagyobb szakmai köszönet Kovács Zsoltot illeti, a kutatásban folyamatosan segítségemre volt, a kezdeti szakaszban a téma specifikálásától kezdődően a szigorlatom sikeres cselekményén keresztül a doktori dolgozatom rendkívül alapos átnézésével és javításával bezárólag. Ez utóbbi mérhetetlenül nagy segítséget adott, nemcsak a javításra vonatkozóan, hanem az alapos és segítőkész hozzáállás demonstrálásaként, ami a számomra példa értékű.

Az említetteken felül van még néhány ember, akik önzetlen segítsége nélkül a dolgozat egyáltalán nem vagy csak jelentősebben gyengébb formában jöhetett volna létre. Közéjük tartozik Várfalvi János, akivel ugyan nem volt alkalmam napi kapcsolatot tartani, viszont az a 4-5 beszélgetés a teljes időszak során mégis meghatározó jellegű volt. Elképzelhetőnek tartom, hogy ezt ő nem is tudja vagy nem tulajdonít neki jelentőséget, mert számára bizonyára triviális szakmai gondolatokat osztott meg velem, ami a dolgozatomon és a felkészültségemen is sokat lendített. Ezen felül az ő segítségével találtam meg a szakirodalom legvelősebb elemeit, mindez nem csak a disszertációmra, hanem a szigorlatomra is igaz volt.

Sólyomi Péter és Maga Ágota önfeláldozó segítségük nélkül nem tudtam volna azt a nagy számú mérést ilyen szakmai színvonalon elvégezni, megfizetni pedig végkép nem. Ők adtak lehetőséget és segítettek a mérések elvégzésében az Építésügyi Minőségellenőrző Intézet hitelesített berendezésein. Zsúfolt munkaidejükből szántak rám időt és lelkiismeretesen figyelemmel kísérték a kapott eredményeket, ha azok nem várt értéket adtak, akkor saját energiájuk befektetésével mérték meg újra. A mérések során a velük való beszélgetések is építettek és segítettek felismerni az egyes fizikai jelenségek magyarázatát.

Nagyon nagy segítséget nyújtott vákuumtechnikai problémák megoldásában Nágel Ferenc, a Tungsram nyugdíjas fejlesztő mérnöke. Tanácsai és magyarázatai nélkül nem tudtam volna megoldani számos kérdést. A szakmai segítség mellett még vákuummérésre alkalmas berendezéssel is magajándékozott. Az ő segítségével találkoztam Szendrő Istvánnal, aki szintén professzionális szinten űzi a vákuumtechnikát. Segítségével tudtam tesztelni a kezdeti paneljeimet, ezen felül tudomány művelő és támogató emberként tőlem sem fogadott el fizetséget a munkáért és a berendezésekért, amit nekem ajándékozott.

Amikor az ember megakad egy elméleti problémán nagy segítséget jelent, ha van valaki, akihez odamehet és megkérdezheti, ezt a szerepet az én disszertációmban Tolvaj László

töltötte be. Mindig készséggel segített és néha még azt is éreztem, hogy örül neki, hogy segíthet, igazi tanáremberi vonás.

Szabó Péterrel élvezetes volt a témáról beszélgetni, mert ezeken a beszélgetéseken keresztül boncolgattuk a téma részleteit.

A kísérletekben alkalmazott kulcsszerepet játszó alumínium társított PE fóliát Lévai Andrásról kaptam.

Nehogy kifelejtsem azokat sem, akik a panelek manuális összeállításában segítettek: Horváth Imre sok alkatrészt megcsinált és ezzel gördülékennyé tette a panelek összeállítását. Pásztory Veronika nélkül a fóliák a paneljaimban messze nem lennének olyan feszesek.

Az említetteken felül még sok embert kellene említenem, akik szintén hozzájárultak a dolgozatom megvalósulásához, mint Börcsök Zoltán, Horváth Tibor, Tóth György, Macskási József és még sokan mások.

Mindenkinek nagyon köszönöm a közreműködését.

1. melléklet

A száraz levegő összetétele 1000 mbar nyomáson

Összetevő		Részarány %	Parciális nyomás mbar	Normálsűrűség kg/m ³
nitrogén	N ₂	78,09	780,9	1,2505
oxigén	O ₂	20,95	209,5	1,42895
argon	Ar	9,3*10 ⁻¹	9,3	1,7839
széndioxid	CO ₂	~3*10 ⁻²	~3*10 ⁻¹	1,9768
neon	Ne	1,8*10 ⁻³	1,8*10 ⁻²	0,8999
hidrogén	H ₂	<10 ⁻³	<10 ⁻²	0,08987
hélium	He	5*10 ⁻⁴	5*10 ⁻³	0,1785
metán	CH ₄	2*10 ⁻⁴	2*10 ⁻³	0,7168
kripton	Kr	1,1*10 ⁻⁴	1,1*10 ⁻³	3,74
xenon	Xe	9*10 ⁻⁶	9*10 ⁻⁵	5,89
dinitrogén-oxid	N ₂ O	5*10 ⁻⁶	5*10 ⁻⁵	1,978
ammónia	NH ₃	2,6*10 ⁻⁶	2,6*10 ⁻⁵	0,7714
ózon	O ₃	2*10 ⁻⁶	2*10 ⁻⁵	2,14
hidrogén -peroxid	H ₂ O ₂	4*10 ⁻⁸	4*10 ⁻⁷	1,52
jód	J ₂	3,5*10 ⁻⁹	3,5*10 ⁻⁸	11,35
radon	Rn	7*10 ⁻¹⁸	7*10 ⁻¹⁷	9,92

Ezen felül a levegő tartalmaz változó mennyiségben vízgőzt és szénmonoxidot.

2. melléklet

A kiegyenlítődési tényező értékei különböző gázokra

Gáz		„tiszta” felület	„normál” felület
hélium	He	0,03	0,38
neon	Ne	0,07	0,74
argon	Ar	0,55	0,86
kripton	Kr		0,84
xenon	Xe		0,86
hidrogén	H ₂	0,15	0,29
nitrogén	N ₂		0,77
oxigén	O ₂	0,42	0,79
széndioxid	CO ₂		0,78
szénmonoxid	CO		0,77
higany	Hg	1,00	1,00

3. melléklet

200 µm vastagságú alumíniummal kasírozott rétegelt lemez hajlító szilárdsága kereszt irányban

		DeltaF(N)	I*I (mm ³)	a (mm)	b3 (mm ³)	b2 (mm ²)	Szigma N/mm ²	E
705	0,8	180	1728000	50	216	36	70,5	9000
685	0,8	180	1728000	50	216	36	68,5	9000
635	0,9	180	1728000	50	216	36	63,5	8000
555	0,8	180	1728000	50	216	36	55,5	9000
630	0,82	180	1728000	50	216	36	63	8780,488
620	1,75	180	1728000	50	216	36	62	4114,286
670	0,8	180	1728000	50	216	36	67	9000
590	0,83	180	1728000	50	216	36	59	8674,699
720	0,7	180	1728000	50	216	36	72	10285,71
630	1,7	180	1728000	50	216	36	63	4235,294
600	0,85	180	1728000	50	216	36	60	8470,588
680	0,8	180	1728000	50	216	36	68	9000
630	0,79	180	1728000	50	216	36	63	9113,924
645	0,8	180	1728000	50	216	36	64,5	9000
735	0,74	180	1728000	50	216	36	73,5	9729,73
610	0,8	180	1728000	50	216	36	61	9000
540	0,8	180	1728000	50	216	36	54	9000
625	0,82	180	1728000	50	216	36	62,5	8780,488
670	0,85	180	1728000	50	216	36	67	8470,588
700	0,85	180	1728000	50	216	36	70	8470,588
660	0,8	180	1728000	50	216	36	66	9000
670	0,82	180	1728000	50	216	36	67	8780,488
700	0,8	180	1728000	50	216	36	70	9000
670	0,85	180	1728000	50	216	36	67	8470,588
710	0,8	180	1728000	50	216	36	71	9000
620	0,9	180	1728000	50	216	36	62	8000
635	0,8	180	1728000	50	216	36	63,5	9000
690	0,8	180	1728000	50	216	36	69	9000
680	1,55	180	1728000	50	216	36	68	4645,161
620	0,8	180	1728000	50	216	36	62	9000
615	0,85	180	1728000	50	216	36	61,5	8470,588
530	0,8	180	1728000	50	216	36	53	9000
646,0938							64,60938	8452,913

4. melléklet

3 mm-es osztásközű (6. fázis) tükörpanel mérési eredményei a Holzbau Holten hővezetési tényező mérő berendezésben

07-20-2005	15:44:54	2,5	0,980	0,031	10,40	9,80	5,5	-0,278
07-20-2005	15:45:44	2,5	0,980	0,031	10,20	9,80	5,3	-0,754
07-20-2005	15:46:59	2,5	0,980	0,031	10,30	9,80	5,4	-0,397
07-20-2005	15:47:49	2,5	0,980	0,031	10,00	9,80	5,1	0,238
07-20-2005	15:48:39	2,5	0,980	0,031	10,10	9,80	5,2	0,040
07-20-2005	15:49:29	2,5	0,980	0,031	10,30	9,80	5,4	-0,754
07-20-2005	15:50:19	2,5	0,980	0,031	10,10	9,80	5,2	0,079
07-20-2005	15:51:09	2,5	0,980	0,031	10,20	9,80	5,3	-0,317
07-20-2005	15:51:59	2,5	0,980	0,031	10,40	9,80	5,5	-0,516
07-20-2005	15:52:49	2,5	0,980	0,031	10,20	9,80	5,3	0,198
07-20-2005	15:53:49	2,7	0,907	0,033	10,60	9,80	5,7	0,198
07-20-2005	15:54:44	2,7	0,907	0,033	10,30	9,80	5,4	-0,317
07-20-2005	15:55:39	2,7	0,907	0,033	10,30	9,80	5,4	-0,436
07-20-2005	15:56:29	2,7	0,907	0,033	10,40	9,80	5,5	0,040
07-20-2005	15:57:19	2,7	0,907	0,033	9,90	9,80	5,0	-0,317
07-20-2005	15:58:09	2,7	0,907	0,033	10,20	9,80	5,3	0,079
07-20-2005	15:58:59	2,7	0,907	0,033	10,30	9,80	5,4	-0,555
07-20-2005	15:59:49	2,7	0,907	0,033	10,30	9,80	5,4	0,040
07-20-2005	16:00:39	2,7	0,907	0,033	10,00	9,80	5,1	0,159
07-20-2005	16:01:29	2,7	0,907	0,033	10,30	9,80	5,4	-0,476
07-20-2005	16:02:19	2,7	0,907	0,033	9,80	9,80	4,9	-0,555
07-20-2005	16:03:09	2,7	0,907	0,033	9,90	9,80	5,0	-0,079
07-20-2005	16:03:59	2,7	0,907	0,033	10,20	9,80	5,3	0,040
07-20-2005	16:04:49	2,7	0,907	0,033	10,40	9,80	5,5	0,198
07-20-2005	16:05:39	2,7	0,907	0,033	10,50	9,80	5,6	-0,238
07-20-2005	16:06:29	2,7	0,907	0,033	10,30	9,80	5,4	0,238
07-20-2005	16:07:19	2,7	0,907	0,033	10,00	9,80	5,1	-0,357
07-20-2005	16:08:09	2,7	0,907	0,033	10,20	9,80	5,3	-0,555
07-20-2005	16:08:59	2,7	0,907	0,033	9,90	9,80	5,0	0,119
07-20-2005	16:09:49	2,8	0,875	0,034	10,30	9,80	5,4	-0,079
07-20-2005	16:10:39	2,8	0,875	0,034	10,40	9,80	5,5	0,516
07-20-2005	16:11:29	2,8	0,875	0,034	10,20	9,80	5,3	-0,476
07-20-2005	16:12:19	2,8	0,875	0,034	10,50	9,80	5,6	0,357
07-20-2005	16:13:09	2,8	0,875	0,034	10,10	9,80	5,2	0,000
07-20-2005	16:13:59	2,8	0,875	0,034	10,30	9,80	5,4	-0,040
07-20-2005	16:14:49	2,8	0,875	0,034	10,40	9,80	5,5	0,040
07-20-2005	16:15:39	2,8	0,875	0,034	10,20	9,80	5,3	0,000
07-20-2005	16:16:29	2,8	0,875	0,034	9,90	9,80	5,0	-0,159
07-20-2005	16:17:19	2,8	0,875	0,034	10,00	9,80	5,1	0,079
07-20-2005	16:18:09	3,0	0,817	0,037	10,00	9,80	5,1	0,357
07-20-2005	16:18:59	3,0	0,817	0,037	10,00	9,80	5,1	-0,317
07-20-2005	16:19:49	3,0	0,817	0,037	10,10	9,80	5,2	-0,317
07-20-2005	16:20:39	3,0	0,817	0,037	10,00	9,80	5,1	-0,159
07-20-2005	16:21:29	3,0	0,817	0,037	10,00	9,80	5,1	-0,159
07-20-2005	16:22:19	3,0	0,817	0,037	10,30	9,80	5,4	-0,119
07-20-2005	16:23:09	3,0	0,817	0,037	10,00	9,80	5,1	0,476

07-20-2005	16:23:59	3,0	0,817	0,037	10,10	9,80	5,2	0,317
07-20-2005	16:24:49	3,0	0,817	0,037	10,10	9,80	5,2	-0,159
07-20-2005	16:25:39	Status: Done						
07-20-2005	16:25:39	3,0	0,817	0,037	10,00	9,80	5,1	-0,238
07-20-2005	16:26:29	2,5	0,990	0,030	9,95	9,90	5,0	0,000
07-20-2005	16:27:19	2,5	0,990	0,030	10,35	9,90	5,4	0,000
07-20-2005	16:28:09	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	0,040
07-20-2005	16:28:59	2,5	0,990	0,030	10,35	9,90	5,4	0,079
07-20-2005	16:29:49	2,5	0,990	0,030	10,25	9,90	5,3	-0,317
07-20-2005	16:30:39	2,5	0,990	0,030	9,85	9,90	4,9	-0,317
07-20-2005	16:31:29	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	0,436
07-20-2005	16:32:19	2,5	0,990	0,030	10,25	9,90	5,3	-0,397
07-20-2005	16:33:09	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	-0,397
07-20-2005	16:33:59	2,5	0,990	0,030	9,75	9,90	4,8	0,119
07-20-2005	16:34:49	2,5	0,990	0,030	10,35	9,90	5,4	0,079
07-20-2005	16:35:39	2,5	0,990	0,030	9,95	9,90	5,0	-0,436
07-20-2005	16:36:29	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	-0,317
07-20-2005	16:37:19	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	-0,238
07-20-2005	16:38:09	2,5	0,990	0,030	9,95	9,90	5,0	-0,674
07-20-2005	16:38:59	2,5	0,990	0,030	9,95	9,90	5,0	-0,595
07-20-2005	16:39:49	2,5	0,990	0,030	9,95	9,90	5,0	0,040
07-20-2005	16:40:39	2,5	0,990	0,030	10,05	9,90	5,1	0,238
07-20-2005	16:41:29	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	0,040
07-20-2005	16:42:19	2,5	0,990	0,030	10,35	9,90	5,4	0,040
07-20-2005	16:43:09	2,6	0,952	0,032	10,55	9,90	5,6	-0,040
07-20-2005	16:43:59	2,6	0,942	0,032	10,10	9,80	5,2	-0,397
07-20-2005	16:44:49	2,6	0,942	0,032	10,10	9,80	5,2	-0,159
07-20-2005	16:45:39	2,6	0,942	0,032	10,40	9,80	5,5	-0,476
07-20-2005	16:46:29	2,6	0,952	0,032	9,95	9,90	5,0	-0,119
07-20-2005	16:47:19	2,6	0,952	0,032	10,35	9,90	5,4	-0,198
07-20-2005	16:48:09	2,5	0,990	0,030	10,65	9,90	5,7	-0,119
07-20-2005	16:48:59	2,5	0,990	0,030	10,15	9,90	5,2	-0,159
07-20-2005	16:49:49	2,6	0,952	0,032	10,15	9,90	5,2	-0,476
07-20-2005	16:50:39	2,6	0,952	0,032	9,95	9,90	5,0	-0,555
07-20-2005	16:51:29	2,7	0,917	0,033	9,95	9,90	5,0	0,238
07-20-2005	16:52:19	2,7	0,907	0,033	10,20	9,80	5,3	-0,198
07-20-2005	16:53:09	2,7	0,907	0,033	10,40	9,80	5,5	-0,159
07-20-2005	16:53:59	2,7	0,907	0,033	9,90	9,80	5,0	0,000
07-20-2005	16:54:49	2,7	0,917	0,033	10,25	9,90	5,3	-0,397
07-20-2005	16:55:39	2,7	0,917	0,033	9,95	9,90	5,0	0,040
07-20-2005	16:56:29	2,7	0,917	0,033	10,35	9,90	5,4	-0,357
07-20-2005	16:57:19	2,7	0,917	0,033	10,05	9,90	5,1	0,238
07-20-2005	16:58:09	2,7	0,917	0,033	10,35	9,90	5,4	-0,198
07-20-2005	16:58:59	2,7	0,917	0,033	9,95	9,90	5,0	0,159
07-20-2005	16:59:49	2,7	0,917	0,033	10,35	9,90	5,4	-0,436
07-20-2005	17:00:39	2,7	0,917	0,033	10,05	9,90	5,1	-0,278
07-20-2005	17:01:29	2,7	0,917	0,033	10,25	9,90	5,3	-0,357
07-20-2005	17:02:19	2,7	0,917	0,033	9,95	9,90	5,0	-0,357
07-20-2005	17:03:09	2,7	0,917	0,033	9,75	9,90	4,8	-0,079
07-20-2005	17:03:59	2,7	0,917	0,033	10,05	9,90	5,1	0,000
07-20-2005	17:04:49	2,7	0,917	0,033	10,55	9,90	5,6	0,198
07-20-2005	17:05:39	2,7	0,917	0,033	10,25	9,90	5,3	0,198

07-20-2005	17:06:29	2,7	0,917	0,033	9,85	9,90	4,9	-0,278
07-20-2005	17:07:19	2,7	0,917	0,033	10,15	9,90	5,2	-0,278
07-20-2005	17:08:09	Status: Done						
07-20-2005	17:08:09	2,7	0,917	0,033	10,45	9,90	5,5	-0,119
07-20-2005	17:08:59	2,7	0,917	0,033	10,15	9,90	5,2	-0,674
07-20-2005	17:09:49	2,7	0,917	0,033	10,15	9,90	5,2	0,159
07-20-2005	17:10:39	2,7	0,917	0,033	9,95	9,90	5,0	0,238
07-20-2005	17:11:29	2,7	0,917	0,033	10,25	9,90	5,3	-0,040
07-20-2005	17:12:19	2,7	0,917	0,033	10,05	9,90	5,1	0,119
07-20-2005	17:13:09	2,7	0,917	0,033	9,95	9,90	5,0	-0,159
07-20-2005	17:13:59	2,7	0,917	0,033	10,35	9,90	5,4	0,000
07-20-2005	17:14:49	2,7	0,917	0,033	10,05	9,90	5,1	0,119
07-20-2005	17:15:39	2,7	0,917	0,033	10,25	9,90	5,3	0,476
07-20-2005	17:16:29	2,8	0,884	0,034	10,25	9,90	5,3	-0,397
07-20-2005	17:17:19	2,8	0,884	0,034	9,95	9,90	5,0	-0,278
07-20-2005	17:18:09	2,8	0,884	0,034	10,25	9,90	5,3	-0,238
07-20-2005	17:18:59	2,8	0,875	0,034	10,10	9,80	5,2	0,516
07-20-2005	17:19:49	2,8	0,884	0,034	10,05	9,90	5,1	0,317
07-20-2005	17:20:39	2,8	0,875	0,034	9,90	9,80	5,0	-0,040
07-20-2005	17:21:29	2,8	0,884	0,034	10,05	9,90	5,1	-0,436
07-20-2005	17:22:19	2,8	0,884	0,034	9,85	9,90	4,9	0,436
07-20-2005	17:23:09	2,8	0,884	0,034	10,25	9,90	5,3	0,238
07-20-2005	17:23:59	2,8	0,884	0,034	9,85	9,90	4,9	0,198
07-20-2005	17:24:49	2,8	0,884	0,034	10,15	9,90	5,2	0,000
07-20-2005	17:25:39	2,8	0,884	0,034	10,45	9,90	5,5	0,000
07-20-2005	17:26:29	2,8	0,884	0,034	10,05	9,90	5,1	0,159
07-20-2005	17:27:19	2,8	0,884	0,034	9,85	9,90	4,9	0,040
07-20-2005	17:28:09	2,8	0,884	0,034	10,15	9,90	5,2	0,278
07-20-2005	17:28:59	2,8	0,884	0,034	10,35	9,90	5,4	-0,436
07-20-2005	17:29:49	2,8	0,884	0,034	9,75	9,90	4,8	0,159
07-20-2005	17:30:39	2,8	0,884	0,034	10,05	9,90	5,1	0,159
07-20-2005	17:31:29	2,8	0,884	0,034	10,15	9,90	5,2	0,000
07-20-2005	17:32:19	2,8	0,884	0,034	10,15	9,90	5,2	0,238
07-20-2005	17:33:09	2,9	0,853	0,035	10,15	9,90	5,2	0,476
07-20-2005	17:33:59	2,9	0,853	0,035	10,25	9,90	5,3	-0,357
07-20-2005	17:34:49	2,8	0,884	0,034	9,95	9,90	5,0	0,040
07-20-2005	17:35:39	2,9	0,845	0,036	10,30	9,80	5,4	0,238
07-20-2005	17:36:29	2,9	0,845	0,036	10,10	9,80	5,2	0,595
07-20-2005	17:37:19	2,9	0,853	0,035	10,15	9,90	5,2	0,397
07-20-2005	17:38:09	2,8	0,884	0,034	9,95	9,90	5,0	-0,238
07-20-2005	17:38:59	2,8	0,884	0,034	10,35	9,90	5,4	0,238
07-20-2005	17:39:49	2,8	0,884	0,034	9,95	9,90	5,0	0,000
07-20-2005	17:40:39	2,9	0,853	0,035	10,05	9,90	5,1	0,357
07-20-2005	17:41:29	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	0,436
07-20-2005	17:42:19	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	0,357
07-20-2005	17:43:09	3,0	0,825	0,036	10,55	9,90	5,6	-0,238
07-20-2005	17:43:59	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	0,040
07-20-2005	17:44:49	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	0,159
07-20-2005	17:45:39	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	-0,238
07-20-2005	17:46:29	3,0	0,825	0,036	9,85	9,90	4,9	0,198
07-20-2005	17:47:19	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	-0,079
07-20-2005	17:48:09	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	-0,198

07-20-2005	17:48:59	3,0	0,825	0,036	10,25	9,90	5,3	-0,159
07-20-2005	17:49:49	3,0	0,825	0,036	9,85	9,90	4,9	0,119
07-20-2005	17:50:39	Status: Done						
07-20-2005	17:50:39	3,0	0,825	0,036	9,85	9,90	4,9	0,595
07-20-2005	17:51:29	3,0	0,825	0,036	9,95	9,90	5,0	0,079
07-20-2005	17:52:19	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	-0,119
07-20-2005	17:53:09	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	0,516
07-20-2005	17:53:59	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	-0,198
07-20-2005	17:54:49	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	0,278
07-20-2005	17:55:39	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	-0,238
07-20-2005	17:56:29	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	0,357
07-20-2005	17:57:19	3,0	0,825	0,036	10,25	9,90	5,3	-0,357
07-20-2005	17:58:09	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	0,000
07-20-2005	17:58:59	3,0	0,825	0,036	9,95	9,90	5,0	0,238
07-20-2005	17:59:49	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	-0,397
07-20-2005	18:00:39	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	-0,357
07-20-2005	18:01:29	3,0	0,825	0,036	10,25	9,90	5,3	0,119
07-20-2005	18:02:19	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	-0,317
07-20-2005	18:03:09	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	0,000
07-20-2005	18:03:59	3,0	0,825	0,036	10,15	9,90	5,2	0,238
07-20-2005	18:04:49	3,0	0,825	0,036	10,05	9,90	5,1	-0,159
07-20-2005	18:05:39	3,0	0,825	0,036	10,45	9,90	5,5	-0,079
07-20-2005	18:06:29	3,1	0,798	0,038	10,45	9,90	5,5	0,079
07-20-2005	18:07:19	3,1	0,798	0,038	10,35	9,90	5,4	0,317
07-20-2005	18:08:09	3,1	0,806	0,037	10,30	10,00	5,3	-0,079
07-20-2005	18:08:59	3,1	0,798	0,038	10,25	9,90	5,3	-0,159
07-20-2005	18:09:49	3,1	0,806	0,037	10,20	10,00	5,2	0,040
07-20-2005	18:10:39	3,1	0,806	0,037	9,90	10,00	4,9	-0,278
07-20-2005	18:11:29	3,1	0,806	0,037	10,00	10,00	5,0	-0,079
07-20-2005	18:12:19	3,1	0,806	0,037	10,30	10,00	5,3	0,198
07-20-2005	18:13:09	3,1	0,806	0,037	10,20	10,00	5,2	-0,198
07-20-2005	18:13:59	3,1	0,806	0,037	10,20	10,00	5,2	-0,317
07-20-2005	18:14:49	3,1	0,798	0,038	10,25	9,90	5,3	-0,278
07-20-2005	18:15:39	3,1	0,806	0,037	10,10	10,00	5,1	-0,159
07-20-2005	18:16:29	3,1	0,806	0,037	10,30	10,00	5,3	-0,278
07-20-2005	18:17:19	3,1	0,806	0,037	10,60	10,00	5,6	0,278
07-20-2005	18:18:09	3,1	0,806	0,037	10,40	10,00	5,4	-0,476
07-20-2005	18:18:59	3,1	0,806	0,037	9,90	10,00	4,9	0,040
07-20-2005	18:19:49	3,1	0,798	0,038	10,35	9,90	5,4	-0,040
07-20-2005	18:20:39	3,1	0,806	0,037	10,40	10,00	5,4	0,436
07-20-2005	18:21:29	3,1	0,806	0,037	10,70	10,00	5,7	-0,159
07-20-2005	18:22:19	3,1	0,806	0,037	10,30	10,00	5,3	0,159
07-20-2005	18:23:09	2,7	0,926	0,032	10,50	10,00	5,5	-0,238
07-20-2005	18:23:59	2,7	0,926	0,032	10,30	10,00	5,3	-0,278
07-20-2005	18:24:49	2,7	0,926	0,032	10,20	10,00	5,2	0,238
07-20-2005	18:25:39	2,7	0,926	0,032	10,30	10,00	5,3	0,198
07-20-2005	18:26:29	2,7	0,926	0,032	10,40	10,00	5,4	-0,476
07-20-2005	18:27:19	2,7	0,926	0,032	10,40	10,00	5,4	-0,040
07-20-2005	18:28:09	2,7	0,926	0,032	10,60	10,00	5,6	0,397
07-20-2005	18:28:59	2,7	0,926	0,032	10,20	10,00	5,2	0,476
07-20-2005	18:29:49	2,7	0,926	0,032	10,20	10,00	5,2	-0,198
07-20-2005	18:30:39	2,7	0,926	0,032	10,30	10,00	5,3	0,040

07-20-2005	18:31:29	2,7	0,926	0,032	10,20	10,00	5,2	0,317
07-20-2005	18:32:19	2,7	0,926	0,032	10,10	10,00	5,1	-0,357
07-20-2005	18:33:09	Status: Done						
07-20-2005	18:33:09	2,7	0,926	0,032	10,20	10,00	5,2	0,040
07-20-2005	18:33:59	2,7	0,926	0,032	10,10	10,00	5,1	0,079
07-20-2005	18:34:49	2,7	0,926	0,032	10,50	10,00	5,5	-0,159
07-20-2005	18:35:39	2,7	0,926	0,032	10,30	10,00	5,3	-0,278
07-20-2005	18:36:29	2,7	0,926	0,032	10,10	10,00	5,1	0,555
07-20-2005	18:37:19	2,7	0,926	0,032	10,60	10,00	5,6	-0,159
07-20-2005	18:38:09	2,7	0,926	0,032	10,10	10,00	5,1	0,000
07-20-2005	18:38:59	2,7	0,926	0,032	9,90	10,00	4,9	-0,278
07-20-2005	18:39:49	2,7	0,926	0,032	10,10	10,00	5,1	-0,278
07-20-2005	18:40:39	2,7	0,926	0,032	10,50	10,00	5,5	0,238
07-20-2005	18:41:29	2,7	0,926	0,032	10,10	10,00	5,1	-0,357
				0,03369				