

ABLAKOK HŐSZIGETELÉSI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

Kriston József Balázs

BSc géptervező szakirányos hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: kbalazs95@gmail.com

Absztrakt

Jelen tanulmány az ablakok hőszigetelési tulajdonságainak vizsgálatával foglalkozik. A dolgozat bemutatja a hőterjedés elméleti hátterét és az ablakok teljesítményjellemzőit. Továbbá, a dolgozat kísérletet tesz az üveg gyártástechnológiájának bemutatására. A tanulmány célja a hőterjedés matematikai modelljének és az ehhez kapcsolódó Fourier differenciál-egyenlet egy lehetséges analitikai megoldásának bemutatása. Egy ablak modell hőmérséklet eloszlása egy tervező program segítségével numerikus szimuláció útján lett meghatározva. A munka során a numerikus szimuláció néhány problémája is kiemelésre került.

Kulcsszavak: *hőszigetelés, hőszigetelési tulajdonságok, ablak, hőterjedés, Fourier, differenciál egyenlet, numerikus szimuláció*

Abstract

The present study is concerned with investigation of thermal insulation properties of windows. This paper gives theoretical introduction about heat transfer and presents the thermal insulation properties of the windows. In addition, it makes attempt to introduce the production technology of the glass. The aim is to present the mathematical model of the heat transfer phenomenon and an analytical solution of the Fourier-differential equation. The temperature distribution of a window model was determined by numerical simulation with the help of a design program using a finite element method. During this work the problems of numerical solutions were partially revealed as well.

Keywords: *thermal insulation, thermal properties, windows, heat, heat transfer, Fourier, differential equation, numerical simulation*

1. Bevezető, a téma aktualitása

Az utóbbi néhány évtizedben az épületek létesítéséhez való hozzáállás az európai energetikai előírásoknak, direktíváknak köszönhetően megváltozott. A korábbiakkal ellentétben egyre nagyobb hangsúlyt kap a gazdaságosság kérdése. A NEGAJoule 2020 „A magyar lakóépületekben rejlő energiahatékonysági potenciál” című kutatás jelentése szerint Magyarország teljes primer energia felhasználásának egyharmadát (34%-át) lakóépületekben használjuk fel a fűtés és melegvíz előállítására. A magyar lakásokban elfogyasztott energia több, mint 40%-a (152PJ) azonban az épületek energiahatékonyabbá tételével megtakarítható lenne [1].

A szakmabeliek egyet értenek abban, hogy az épületszektor energiahatékonyságának javítása a klímavédelem egyik legfontosabb eszköze. Mindemellett jelentős költségmegtakarítás érhető el a fűtésszámlákon keresztül, valamint középületeknél a közpénzek hasznosulására is pozitív hatással van. Ezen felül a munkahelyteremtés és az energiatudatosság növelése, mint járulékos haszon is megjelenik.

Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározására vonatkozóan jelenleg a 40/2012 BM rendelet [2] a meghatározó.

Az energiagazdaságosság egyik lehetséges módja – a megújuló energiaforrások és természetes anyagok alkalmazása mellett – az épületek és azok fontos épületszerkezeti részeként, az ablakok hőszigetelésének javítása.

A házak fűtésére használt energia 35-40%-a nyílászárókon, azon belül is főleg az ablakokon keresztül vész el. Ez az érték rámutat, hogy milyen lényeges, még a fal szigetelésénél is fontosabb a jó hőszigetelésre figyelmet fordítani az ablakoknál.

A legkorszerűbb nyílászárók is jóval alul maradnak az épülethatároló falazat hőátbocsátásának értékével szemben, ezért indokolt ezen terület célirányos fejlesztése az energiaveszteség csökkentése érdekében. Egy épületben a legnagyobb hőveszteséget nagy hőátbocsátásuk miatt a homlokzati nyílászárók jelentik, annak ellenére, hogy a teljes homlokzati felülethez képest jóval kisebb terület foglalnak el. A fejlesztések arra irányulnak, hogy az ablakok hőszigetelését tovább fokozva minimalizálni lehessen a különbséget a falazathoz képest, és lehetőség szerint elérhető legyen egy ideális állapot, amikor a homlokzati nyílászárók hőszigetelő képessége a falazattal azonos értékű.

Általánosságban megállapítható, hogy az előírások az egyre kevesebb energiát fogyasztó épületek tervezésére ösztönöznek, ezáltal a fűtési időszakokban jelentős mértékben csökkenthetők a lakhatási költségek.

2. Az üveg gyártástechnológiája

Az ablakgyártáshoz alkalmazott szigetelő üvegeket az üveggyártók síküvegekből gyártják. A régebben alkalmazott húzott síküveg helyett manapság már úsztatott, úgynevezett „float” eljárással készülnek az üvegtáblák. Ezeknél már nem vehető észre a vastagságtérésből származó fénytörések, illetve kitekintésnél a környezet hullámzása.

Az eljárást 1959-ben Alastair Pilkington dolgozta ki. Az eljárásnak köszönhetően rendkívül sima, torzmentes felszín és egyenletes vastagság jön létre az üveggyártás során. Az úsztatott üveg magas fényáteresztő képességgel és kiváló optikai tulajdonságokkal rendelkezik. Különböző vastagságban, méretben és több színben is előállítható. Az összekevert, szilárd alapanyagok (kvarchomok, dolomit, szulfát, szóda, stb.) az ún. kereszttüzelésű regeneratív kemencében 1400-1500 °C hőmérsékleten folyékony üvegmasszává alakulnak. Ez az olvadék a folyékony halmazállapotú ón felületén szétterülve úszik. A sekély ónfürdőben alakítható ki az üvegszalag vastagsága. Technikai beavatkozás nélkül az olvadt üveg 4 mm vastagon terül szét az ón-ágyon. A vastagságot a szilárduló üvegszalag húzásának sebességével lehet változtatni. Az ónfürdőből kilépő szalagot feszültség mentesíteni kell, ami szabályozott léghűtéssel valósítható meg. Minőség-ellenőrzés és méretre vágás után kerül le a gyártósorról a végtermék [3].

3. Elméleti áttekintés

Az alábbi fejezetben a hő terjedésével kapcsolatos néhány fizikai fogalmat és matematikai leírását, illetve ezek összefüggéseit tekintjük át.

3.1. A hő terjedése

A nyílászárókon áthaladó kifelé tartó hőáram a hőfokkülönbség okozta transzmissziós hőátbocsátásból és a légáteresztésből adódó filtrációs hőveszteségből adódik össze.

Filtrációs hőveszteség kialakulásának oka, hogy az épületen belül és a környezetben uralkodó légnyomás és hőmérséklet különbözik [9].

A termodinamika második főtétele alapján a hőmérséklet két térrész között mindig kiegyenlítődik. Lényegében arról van szó, hogy a magasabb hőmérsékletű helyen lévő levegő molekulák nagyobb kinetikus energiával rendelkeznek és érintkezés folytán energiát adnak át a kisebb hőmérsékletű, alacsonyabb energia szinttel rendelkező levegő molekuláknak. Ezt nevezzük **hővezetésnek** (kondukciónak). Minél szorosabb a kapcsolat a molekulák között, annál gyorsabb az energiaátadás. Ezért jó hővezetők általában a szilárd testek (pl. fémek), és rossz hővezetők a gázok (pl. levegő, argon, kripton). Ennek nyomán a legjobb szigetelő a vákuum. Azonban ablakoknál, ha a szerkezetben légréteget alakítunk ki, azon át nemcsak vezetéssel jut át hőáram. A légmozgást a közeg hőmérséklet-különbségéből adódó sűrűség változás és az ebből származó felhajtóerő is elősegíti, ekkor szabad **hőáramlás** (konvekció) játszódik le. Hővezetéskor a test nyugalomban van, és csak a hőenergia áramlik, konvekció esetén az anyag is áramlásban van, és az áramló részecskék viszik magukkal az energiát.

Ezen felül a légréteget határoló felületek között **sugárzásos hőcsere** is kialakul. A hőszugárzás egy olyan folyamat, ahol a hő elektromágneses sugárzás formájában terjed és a terjedéshez nincs szükség közegre. Tulajdonképpen ez az anyag hőmozgása során kibocsátott elektromágneses sugárzás, más néven hőmérsékleti sugárzás [4,5]. A valóságban általában ezek egyszerre valósulnak meg. A hőterjedés ezen összetett módját hőátbocsátásnak/hőátadásnak nevezzük.

A hőterjedés összetett jelenségének elemi folyamatokra bontása csupán módszertani fogás, hiszen a valóságban hőátadás során a hő terjedésének fentebb említett formáinak kombinációi egyszerre játszódnak le, tisztán önmagukban csak nagyon ritkán lépnek fel. A műszaki gyakorlatban valamely hőterjedési forma dominanciája mellett elegendő lehet csak az adott (pl. csak konvektív) jelenség leírása.

3.2. A hővezetés differenciál egyenletének matematikai modellje

A fejezet célja a hőátadási jelenség matematikai modelljének, továbbá a Fourier-differenciálegyenlet analitikus megoldási lehetőségeinek bemutatása. A termikus peremfeltételek ismeretében a hővezetést leíró Fourier-differenciálegyenlet megoldásával számítható a hőátadási folyamatban résztvevő objektumokban kialakuló hőmérséklet-eloszlás.

A hővezetéssel történő hőátadásnak elengedhetetlen feltétele a hőmérsékletnek egy adott test különböző pontjaiban fennálló különbsége. A hővezetés következtében keletkező hőáram nagysága a testben a hőmérséklet-eloszlástól függ.

Nem állandósult, instacioner hővezetést leíró **Fourier-differenciálegyenlet**:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v . \quad (1)$$

Ha $\lambda = \text{állandó}$, akkor az előző egyenletből kiemelve az alábbi egyenletet kapjuk:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v . \quad (2)$$

3.3. A hővezetési egyenlet analitikus megoldása egy helykoordináta esetén

3.3.1. A lineáris hővezetési probléma analitikus megoldása

A kiindulási feltételek:

- A hő csak x-irányban terjed, az energiaátadás a tér többi irányában elhanyagolhatóan kicsi (nyílászáró peremszigetelés).
- $q_v = 0$, azaz a vizsgált térfogaton belül hőforrás nincs.

Ezen feltételek mellett a (22) egyenlet homogén anyag esetén így írható fel:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (3)$$

Az egyenlet jobb oldalát osztva ρC -vel, majd $m = \frac{\lambda}{\rho C}$ helyettesítéssel az egyenlet alakja a következőre módosul:

$$T' = m T''_{xx}. \quad (4)$$

Keressük a megoldást $T(x, t) = e^{\alpha x} e^{\beta t}$ alakban, ahol $t \in [0, t_1]$ és α, β konstansok.

Elvégezve a deriválásokat és az Euler-képlet $e^{i\omega x} = \cos \omega x + i \sin \omega x$ felhasználásával:

$$T(x, t) = (\cos \omega x + i \sin \omega x) e^{\beta t}. \quad (5)$$

Mivel $\beta = m\alpha^2 = mi^2\omega^2 = -m\omega^2$, ezért a megoldások lineáris kombinációjának alkalmazásával a (25) másodrendű lineáris differenciálegyenlet egy megoldása:

$$T(x, t) = (A \cos \omega x + \sin \omega x) e^{-m\omega^2 t}. \quad (6)$$

A Fourier-elv szerint a megoldások összegzéséből az általános megoldás:

$$\sum_{j=0}^n \left[(A_j \cos \omega_j x + B_j \sin \omega_j x) e^{-m\omega_j^2 t} \right], \quad (7)$$

ahol

A_j, B_j a Fourier-együtthatók, melyek a kezdeti és peremfeltételekből meghatározhatók.

Az alkalmazott **peremfeltételek**:

- $T_1 = T(0, 0)$ a benti hőmérséklet $t = 0$ időpontban. $T_1 > T_2$
- $T_2 = T(\delta, 0)$ a kinti hőmérséklet $t = 0$ időpontban.
- $T_3 = T(\delta, t_1)$ a kinti hőmérséklet $t = t_1$ -ben.

ekkor:

$$T(x, 0) = \sum_{j=0}^n (A_j \cos \frac{\pi}{\delta} jx + B_j \sin \frac{\pi}{\delta} jx). \quad (8)$$

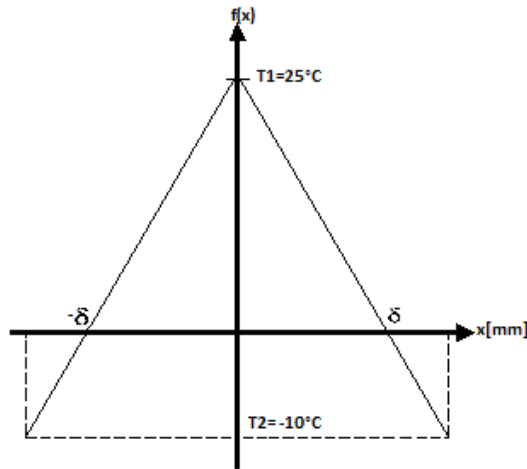
A Fourier-sor együtthatóinak meghatározása, lineáris hőmérsékletváltozást feltételezve a hőmérsékletet páros függvénnyel vesszük fel a $[-\delta, \delta]$ intervallumban (lásd 1. ábra).

$$A_0 = \frac{1}{\delta} \int_{-\delta}^{\delta} f(x) dx. \quad (9)$$

$$f(x) = \begin{cases} T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x, & \text{ha } x \geq 0 \\ T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\delta} x, & \text{ha } x < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$A_0 = \frac{1}{\delta} \left[\int_{-\delta}^0 \left(T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\delta} x \right) dx + \int_0^{\delta} \left(T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x \right) dx \right] \quad (11)$$

$$A_0 = T_1 + T_2 \quad (12)$$



1 ábra. A hőáramlás kezdeti hőmérséklet-hely $f(x)$ függvénye az alkalmazott peremfeltételek mellett

Az A_j együttható meghatározása:

$$A_j = \frac{2}{2\delta} \int_{-\delta}^{\delta} f(x) \cos j \frac{\pi}{\delta} x dx \quad (13)$$

$$A_j = \frac{1}{\delta} \left[\int_{-\delta}^0 \left(T_1 + \frac{T_1 - T_2}{\delta} x \right) \cos j \frac{\pi}{\delta} x dx + \int_0^{\delta} \left(T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x \right) \cos j \frac{\pi}{\delta} x dx \right] \quad (14)$$

$$A_j = 2 \frac{T_1 - T_2}{(j\pi)^2} (1 - (-1)^j) \quad (15)$$

$$A_j = \begin{cases} 4 \frac{T_1 - T_2}{(j\pi)^2}, & \text{ha } j \text{ páratlan szám} \\ 0, & \text{ha } j \text{ páros szám} \end{cases} \quad (16)$$

A B_j együttható meghatározása:

$$B_j = \frac{2}{2\delta} \int_{-\delta}^{\delta} f(x) \sin \frac{j\pi}{\delta} x dx = 0, \text{ mivel } f(x) \text{ páros függvény.} \quad (17)$$

A Fourier-sor az együtthatók alkalmazásával:

$$T(x, 0) = \sum_{j=0}^n \left(A_j \cos \frac{\pi}{\delta} jx + B_j \sin \frac{\pi}{\delta} jx \right) \quad (18)$$

$$T(x, 0) = \frac{T_1 + T_2}{2} + 4 \frac{T_1 - T_2}{(\pi^2)} \left[\cos \frac{\pi}{\delta} x + \frac{1}{3^2} \cos \frac{\pi}{\delta} 3x + \frac{1}{5^2} \cos \frac{\pi}{\delta} 5x + \dots \right] \quad (19)$$

Tehát a hővezetés egyenletének megoldása a kezdeti feltételek alkalmazásával:

$$T(x, t) = \sum_{j=0}^n \left(A_j \cos \omega_j x + B_j \sin \omega_j x \right) e^{-m\omega_j^2 t} \quad (20)$$

$$T(x, t) = \frac{T_1 + T_2}{2} + 4 \frac{T_1 - T_2}{\pi^2} \left(\cos \frac{\pi}{\delta} x e^{-m t \left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2} + \frac{1}{3^2} \cos \frac{\pi}{\delta} 3x e^{-m 3^2 t \left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2} + \dots \right) \quad (21)$$

4. Az ablakok teljesítményjellemzői

A hatályos MSZ EN 14351:1-2006-os (Ablakok és ajtók. Termékszabvány, teljesítőképességi jellemzők. 1.rész: Tűzálló és/vagy füstgátló tulajdonság nélküli ablakok és külső bejárati ajtók) hazai és nemzetközi termékszabvány a homlokzati szerkezeteket érő hatások alapján 23 teljesítőképességi jellemzőt sorol fel, amelyek közül az alábbi hat jellemző, adott ablaknál elért szintjét CE tanúsítvánnyal közölni is kell:

1. Légzárás
2. Vízárás
3. Szélállóság
4. Hőátbocsátás
5. Akusztikai teljesítőképesség
6. Biztonsági eszközök teherviselő képessége

A szabvány vonatkozik:

- Kézi vagy gépi működtetésű, függőleges nyílásba beépített, tűzálló és/vagy füstgátló tulajdonság nélküli ablakokra, erkélyajtókra és üvegfalakra.
- Ferde tetősíkba beépített tetőablakokra
- Kézi vagy gépi működtetésű, üveges/paneles külső bejárati ajtókra

4.1. Az ablakok teljesítményjellemzői: hőátbocsátás

A magyar termékszabvány szerint nincs definíció a hőszigetelés fogalmára, mivel egy fizikai mennyiségről van szó, így csupán az érték nagysága alapján van fokozatokba sorolva. Alapjában véve azt mondhatjuk, hogy a hőszigetelés két térrész közötti hőátadás gátlása. A hőátbocsátási tényező (jele: U) egy adott épületszerkezetre jellemző érték, mértékegysége: $[W/m^2K^{-1}]$. Megmutatja, hogy egy adott szerkezet egységnyi felületén időegység alatt mekkora hőmennyiség áramlik át adott hőmérséklet-különbség hatására.

Ha megvizsgálunk egy kiválasztott terméket, akkor ablakok esetében három féle „ U ” érték van feltüntetve:

- U_w (w =window) - ablak össz.-hőátadási együttható
- U_g (g =glazing) - üvegezés hőátadási együttható
- U_f (f =frame) - a tok/keret hőátadási együttható

Az ablak össz-hőátadási együtthatója a teljes ablakszerkezetre vonatkozik, amelyet az üvegezés és tok hőátadási együtthatója befolyásol. Erre hatással van még a ψ_g vonalmenti hőátbocsátási tényező és az ablak mérete is. A vonalmenti hőátbocsátási tényező azt fejezi ki, hogy egységnyi hőmérsékletkülönbség mellett mekkora hőáram alakul ki egy folyóméternyi él mentén, mértékegysége: $[W/m^1K^{-1}]$. Ez a mennyiség az üveg beépítésével (üvegezés), illetve a távtartó okozta hőhíd-hatás kialakulásával, mint fizikai jelenséggel van kapcsolatban. Lényegében a beépítés megfelelőségét veszi figyelembe. Az üvegezés hőátadási együttható az üvegtáblák számától, azok egymástól való távolságától és a táblák közti teret kitöltő gáz típusától függ. A keret hőátadási együtthatója mérésrel határozható meg.

Az ablakszerkezet hőszigetelési képessége, a hőátbocsátási tényező értéke számos tényezőtől függ:

1. Beépítés
2. Üvegezés
3. Keretszerkezet
4. Tömítések

5. A vizsgálati modell

A vizsgálat tárgyát képező hőszigetelt fa ablak modellje a Siemens PLM Software által fejlesztett gépészeti tervező programmal, a Solid Edge ST9 verziójában készült el.

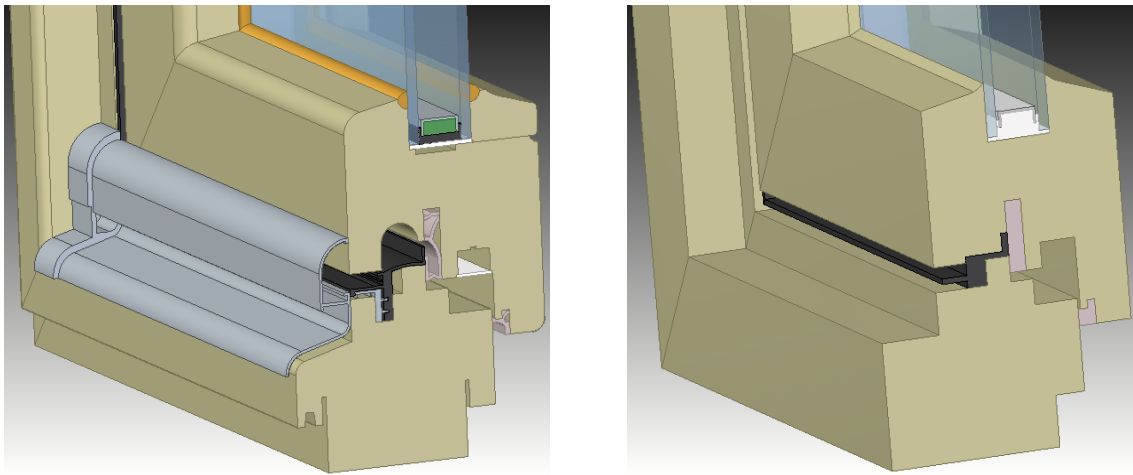
A fa ablak szerkezetének hőmérsékletmezői a Fourier-féle hővezetési differenciálegyenlet segítségével analitikusan is meghatározható lenne, de ennél elegánsabb megoldásnak találtam, ha a hőszigetelt fa ablak modelljét az ANSYS 18.2 végeelem szoftver szimulációjának vetem alá. A teszt célja, hogy az ablakszerkezetben kialakuló hőmérsékleteloszlás meghatározható legyen.

5.1. A modell kezdeti problémái

A modell vizsgálhatóságának kezdeti nehézségeit a szerkezet bonyolult geometriája eredményezte. Az ablakszerkezet minden részét a lehető legnagyobb gondossággal igyekeztem elkészíteni annak érdekében, hogy az eredmények minél közelebb legyenek a valósághoz.

Első körben a vizsgálati testen nem volt létrehozható a testet körülvevő háló. Ennek oka az volt, hogy a tömítések bonyolult profilja és helyenként kacifántos alkatrészkapcsolatai nem tették lehetővé a hálózás (meshing) megfelelő létrejöttét, ami azt jelenti, hogy a háló a kisebb méretű alkatrészeken nem képes önmagával metszéspontot (nodes) létrehozni, melynek eredményeképpen a szoftver nem tud azon a helyen eredményt megjeleníteni. A megoldást az alkatrészek teljes körű egyszerűsítése jelentette. Az egyszerűsített modellen térbeli tetraéderes háló alkalmazása már megoldotta ezt a problémát.

A következő lépés az anyagok megadása az alkatrészeken. Az eddigi futásokat az Ansys 13 teljes körű licenz verziójával készítettem, amelyben viszont nem volt lehetőségem az anyagok módosítására. Emiatt kénytelen voltam az Ansys Student 18.2-es verzióját használni, melynek hátránya, hogy a licenz szerződés miatt a háló által a test geometriáján képzett csomópontok (nodes) száma nem haladhatja meg a 30 ezret, különben a solver nem fut le, tehát nem ad eredményt. Így a vizsgálandó modellt még tovább kellett egyszerűsíteniem (2. ábra).



2. ábra. A vizsgálati modell egyszerűsítés előtt (bal) és után (jobb)

Az egyszerűsítés a test geometriájának butítását és az azonos anyagú vagy hasonló hőtechnikai paraméterekkel rendelkező testek összevonását jelentette. Ezen felül a teljes ablakszerkezetnek csupán a negyed részét vizsgáltam. E metszet létrehozását büntetlenül elvégezhettem, mivel a modell

geometriailag és ezáltal hő szempontjából is szimmetrikus. Ezzel a valósághoz közeli eredmények eltávolodtak, de a vizsgálathoz elvégzéséhez sikerült megteremteni az előfeltételeket.

A legnagyobb probléma azonban, hogy a feladathoz kézenfekvő Steady-State Thermal modul nem képes kezelni a gáznemű anyagokat (levegő, argon, kripton), csak a szilárd testeket.

Ezen felül a fa és az üveg bipoláris anyag, amelyet az ansys szintén nem tud jól kezelni. Ez azt jelenti, hogy ezek az anyagok húzásra és nyomásra különböző féleképpen viselkednek, mindkét igénybevételhez különböző rugalmassági modulus érték tartozik.

5.2. A megoldáshoz vezető út: az első eredmények

A kellemetlen körülmények ellenére a szerkezetben kialakuló hőmérsékleteloszlás szimulációja elkészült. A hőtani szimulációt tekintve állandósult, időben nem változó hőtani szimulációról beszélhetünk, ehhez a Steady-State Thermal modult vettem igénybe. Ebben az esetben állandó értékű hőterhelés hatására elvileg végtelen idő elteltével kialakuló állandósult állapot szimulálható, tehát a folyamatot nem tudjuk áttekinteni csak az egyensúlyi végállapotot. A vizsgálat során a különböző terhelések közül a Temperature (hőmérséklet terhelés) használtam.

Az első futások elvégzéséhez először a szerkezet elemeinek anyagtulajdonságait kellett megváltoztatnom. Hővezetés szempontjából elengedhetetlen, hogy a következő anyagtulajdonságok definiálásra kerüljenek:

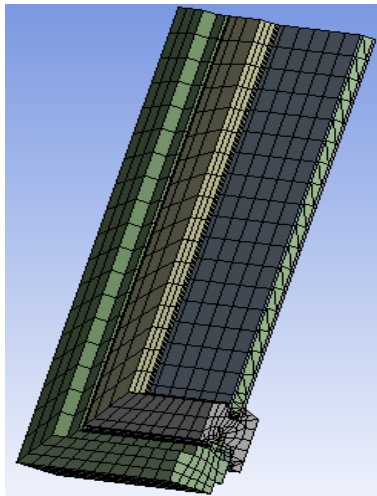
- hővezetési tényező (Thermal Conductivity), [W/mK]
- sűrűség (Density), [kg/m³]
- fajhő (Specific Heat), [J/kg⁻¹K⁻¹]

Azonban ezen tulajdonságok hőmérsékletfüggő viselkedése nemlinearitást okoz, így a pontos eredmény eléréséhez iteratív megoldásra van szükség. A hőtani szimulációk során az alkatrészek közötti kontakt nem változik, tehát a zárt érintkező felületek zártak maradnak, a nyitott felületek nyitottak maradnak. Az egymáshoz zártan illeszkedő felületek között (ha a hővezetési tényező kellően nagy) a hőtani ellenállás minimális, de ha mégsem elég nagy, akkor a hővezetést manuálisan is be lehet állítani két felület között. Termikus analíziseknél általában nem kell semmiféle specifikus hálózási módot használni, ebben az esetben ugyanis kevesebb jelentősége van a háló finomságának, mint például egy jelentősebb alakváltozással járó statikai analízisnél.

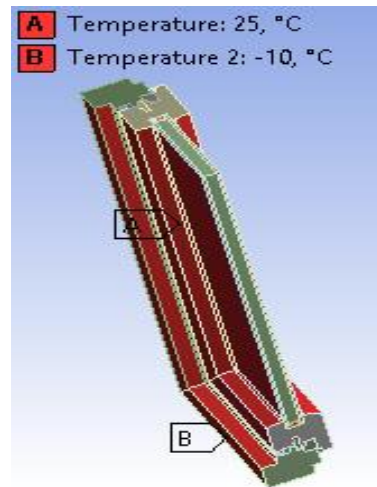
Fontos megjegyezni, hogy ebben a szimulációban a vizsgálandó szerkezetet filtrációs hővesztésegtől mentesnek tekintjük, tehát az ablakszerkezet tömítettsége tökéletes. Másszóval a külső és belső nyomáskülönbség és hőmérsékletkülönbség ellenére a szerkezeten keresztül légmozgás kíséretével hő nem távozik. A szerkezet két oldalán megjelenő hőmérsékletkülönbség csupán hővezetés útján igyekszik kiegyenlítődni. Mindezek után a modell behálózása került elvégzésre (3. ábra), ahol a csomópontok száma 28268, így a solver lefuttatható a peremfeltételek (4. ábra) megadása után.

A peremfeltételek szerint a belső fűtött oldal 25 °C míg a külső oldal -10 °C hőmérsékletet vesz fel. Mindezek után numerikus megoldással a szerkezetben kialakuló hőmérsékleteloszlás az 5. ábrán látható.

A szélsőséges +30 °C és -18°C eredmények a peremfeltételek miatt a valóságban nem jöhetnek létre (6. ábra). Ezt a lokális numerikus számítási hibát a hálózaskor egymás mellé kerülő eltérő méretű háló elemek eredményezik. Ha ennek a mértéke túllép egy határt pontatlan számítások jöhetnek létre bizonyos helyeken. A véges differencia módszer elve szerint ez nem megengedett. Mivel ezek a numerikus göcök nem túl nagy területen jelentkeznek el lehet tőlük tekinteni és mint látható, ezeket a hibapontokat leszámítva a szerkezet két oldala tartja a peremfeltételek által adott hőmérséklet értékeket.

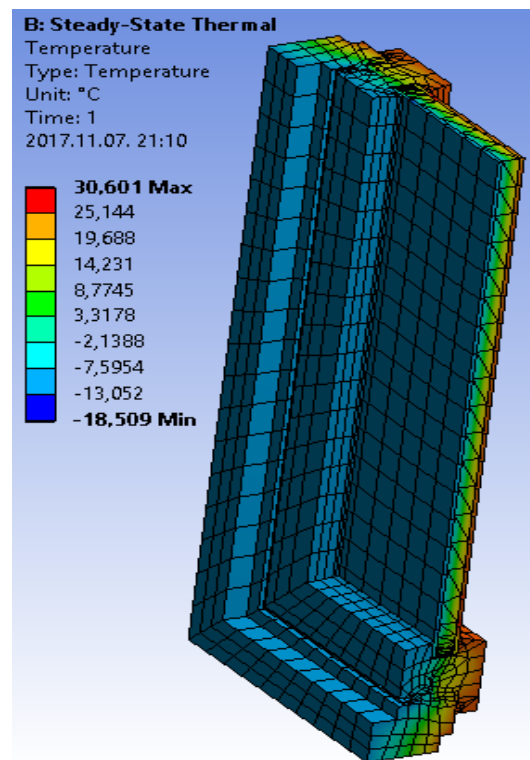
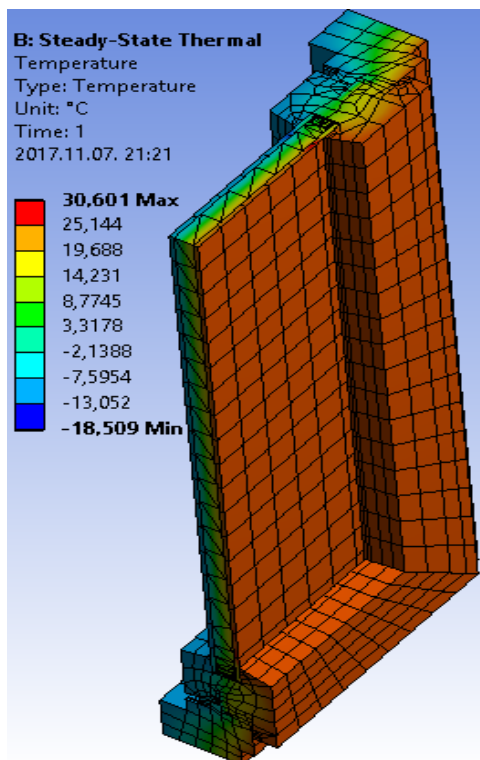


3. ábra. A modell négyzetes teshálója



4. ábra. Peremfeltételek

Ennek a hibának a megjelenése a hálózás sűrűségének növelésével és minőségének javításával (sizing, quality) elkerülhető, azonban a licenz korlátozása miatt ez nem állt módomban. A hibát okozhatja még, hogy ebben a modulban a gázok kezelhetősége kívánni valót hagy maga után, illetve a tény, hogy az üveg bipoláris anyag. Ezért lehet nem véletlen, hogy ezek a szélsőséges eredmények pont ezen a helyen jelentek meg (lásd 6. ábra).



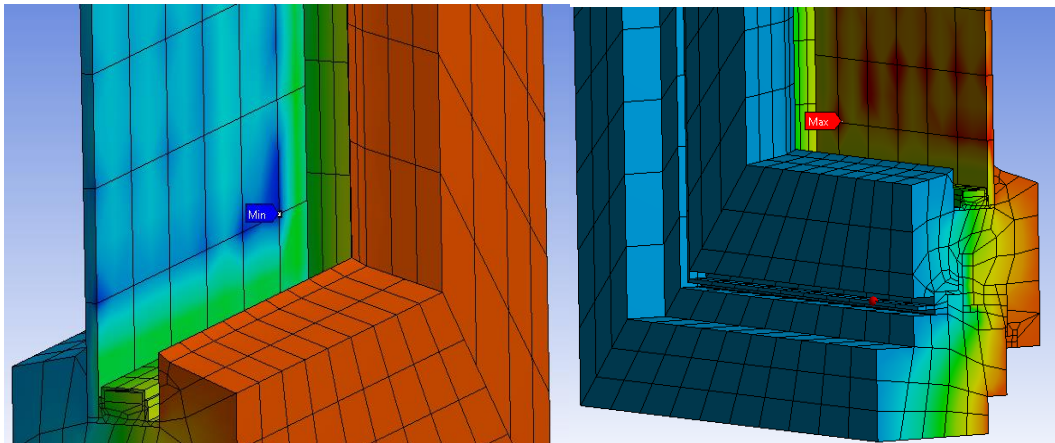
5. ábra. Az első futás eredménye

Ehhez még hozzá kell tenni, hogy a végeselemes szimulációk minden egyes lépése hiba forrása lehet. A matematikai modellezés vagy idealizáció során egy valós fizikai rendszertől egy matematikai modellig lehet eljutni. Ennek a matematikai modellnek az egyszerűsítését nevezzük diszkrétizációnak, amely során egy test folytonos közegét helyettesítjük véges elemszámú összetevőjével. Ezzel létrejön a diszkrét modell, amelynek már nem végtelen számú szabadsági foka van. A diszkrét modell létrehozására azért van szükség, mert nem minden matematikai modell elég egyszerű ahhoz, hogy megoldható legyen. Gyakran térbeli és időbeli változók szerinti csatolt parciális differenciálegyenletekkel állunk szemben, amelyekre bonyolult peremfeltételek is vonatkoznak.

Az analitikus megoldás egyszerű peremfeltételek és szabályos geometria mellett kielégítőbb lehet a valós fizikai rendszerre nézve, azonban ilyen egyszerűsítések ritkán adódnak. A legtöbb feladat, amellyel egy mérnök szembekerül, vagy nem oldható meg analitikusan, vagy aránytalanul nagy erőfeszítést igényelne.

A gyakorlati megoldás a numerikus szimuláció (végeselem). A diszkrét modell megoldása az ún. diszkrét megoldás, amely az eredeti fizikai rendszer viselkedésének egyfajta közelítése.

Egyrészt az első hibaforrás az idealizációból ered, amely során a valós fizikai rendszer egyes tulajdonságait beépítjük a modellbe, más tulajdonságait viszont nem. Ezen felül a fizikai tulajdonságok mérési eredményekből erednek, így ezek is hibával terheltek. Másfelől a fizikai rendszer alakját a diszkrét modellt bizonyos hibákkal közelíti. A harmadik hibaforrás matematikai jellegű, miszerint a diszkrét modellt, mint matematikai feladatot általában nem lehet egzaktul megoldani, hanem annak csak egy közelítése kapható meg [6].



6. ábra. Numerikus hibák az üvegfelületek légrés felé eső oldalán

Tehát a valóságot teljes mértékben reprezentálni nem lehet. Mindezek ellenére, ha az elvégzett szimulációim messze is állnak a valóságtól ugyanazon körülmények között létrehozott tesztek lehetővé teszik több ablakszerkezet egymáshoz való hasonlítását. Természetesen az eredmények számértékei nem használhatóak fel, de a kapott eredményeket tendenciaszerűen elemezni lehet. A tendenciák megfigyeléséből olyan következtetések vonhatók le, mint: egy szerkezeti megoldás vagy anyagválogatás jobb vagy rosszabb hatással van a hőszigetelésre, vagy, hogy némely változtatások a szerkezet hőszigetelése szempontjából javulást vagy romlást okoznak. Ilyen eredmények és vizsgálati körülmények mellett azonban nem mondható el, hogy milyen mértékben történt változás, illetve az efféle szimulációk eredményeit valós vizsgálatokkal alá kell támasztani.

6. Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Irodalom

- [1] Fülöp, O.: *NEGAJoule 2020 A magyar lakóépületekben rejlő energiamegtakarítási lehetőségek*, Energiaklub, Budapest, (2011) p. 2.
- [2] Magyar Közlöny 2012.évi 107.szám V. A Kormány tagjainak rendeletei
- [3] Buda, B., Nagy, V., Barczi, A.: *A bevonatos üvegek és az energiahatékonyság, avagy innováció az épületenergetikában*, 57. évf. 5-6. szám (2016) p. 8
- [4] Kovács, E., Paripás, B.: *Fizika I*, Digitális Egyetem, 2011.
- [5] https://hu.wikipedia.org/wiki/H%C5%91m%C3%A9rs%C3%A9kleti_sug%C3%A1r%C3%A1s
- [6] Dezső, G.: Segédlet a Nyíregyházi Főiskola Műszaki és Mezőgazdasági Karán, gépészmérnök szakos hallgatóknak oktatott, „VEM alapjai” című tantárgyhoz