



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Elektronikai Technológia Tanszék

Straubinger Dániel

**GŐZFÁZISÚ FORRASZTÁS
HŐÁTADÁSÁNAK EXPLICIT
MODELLEZÉSE**

Tudományos Diákköri Konferencia

KONZULENS

Dr. Géczy Attila

BUDAPEST, 2018

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
1 Bevezetés	5
2 Újraömllesztéses forrasztás	6
2.1 Gőzfázisú forrasztás	6
2.2 Hőátadás – az elméleti alapok	8
2.2.1 A hőátadásról általánosan	8
2.2.2 Nusselt szám	8
2.2.3 Kondenzációs hőátadás különböző felületeken	9
3 A probléma modellezése	12
3.1 Felhasználási terület	12
3.2 Konkrét problémakör megfontolásai	12
3.3 Konkrét modellezési probléma megoldására tett előzetes tervezet	16
4 Szimuláció és mérések előkészítése (anyag és módszer)	17
4.1 Alkatrészek és anyagparaméterek	17
4.2 Hőmérsékletmérési alapok a validációhoz	20
4.3 Mérési környezet	21
4.4 Mintapreparáció	22
4.4.1 Alkatrész mérési konstrukció	22
4.4.2 Légmentesen zárt doboz a hőátadási együttható szétválasztásának vizsgálatához	24
4.4.3 FR4 lemez	26
5 Jellemző folyamatparaméterek vizsgálata	28
5.1 Hőátadási együttható szétválasztásának vizsgálata	28
5.2 Biot szám vizsgálata FR4 lemezre	31
6 A szimuláció első lépései	35
6.1 Szimulációs egyenletek	35
6.2 Időosztás vizsgálata kezdeti számítással	36
6.3 Illesztett átlagos hőátadási együttható	38
6.4 Biot szám vizsgálata alkatrészekre	40
7 Alkatrészek skálázhatóságának vizsgálata	42
7.1 Mért hőmérsékleti görbék	42

7.2 Fóliakondenzátorok	43
7.3 Kerámia kondenzátorok	46
7.4 Hibák analízise	48
7.5 Továbbfejlesztési tervek, kitekintés	50
8 Összegzés.....	52
Irodalomjegyzék.....	54
Függelék.....	57
Nómenklatúra.....	57

Összefoglaló

Dolgozatomban bemutatom az elektronikai szereléstechológiában speciális feladatokra kiemelten használt gőzfázisú forrasztás technológiáját, valamint a folyamat során zajló hőátadás elméleti hátterét. Az irodalomkutatás alapján ismertetem azokat az elveket, amelyekkel egy test felszínének különböző határfeltételei esetében kiszámíthatók a test melegítését leíró paraméterek, amelyek az ipari alkalmazást tekintve profilpredikciós eljárásaként épülhetnek be a modern kemencevezérlési megoldások közé.

Munkám során egy olyan egyszerű szimuláció implementálása volt a céloomatLAB környezetben, aminek futásideje lehetővé teszi akár a gyártósor mellett történő azonnali alkalmazást. A paraméterek kiszámítása és az elméleti peremfeltételek ismeretében, a Newton-féle hőátadási egyenletet megoldva megkapható egy felületszerelt alkatrész melegedését modellező kompozit cella hőmérsékletének válaszfüggvénye adott hőátadási együttható hatására.

A szimuláció finomhangolása közben egy újszerű mérési konfigurációval lehetővé tettem egy FR4 lemez pusztán egyik oldalán létrejövő kondenzációból származó hőátadást, ezzel elválasztva és arányosítva az alsó és felső melegedést. Az így mért adatok alapján meghatároztam a szeparált hőátadási együtthatókat, azok irodalmi modellekkel való összevetését, a vizsgált alkatrészek Biot-számát valamint a felületi hőátadás és a testben történő hővezetés arányát. A hőátadási együttható számítását többféle módon is elvégeztem. Az így kapott eredményeket összehasonlítottam egy valós körülmények között gőzfázisú forrasztókemencébe helyezett alkatrészről készült mérési eredményekkel.

A kapott eredmények alapján indoklom a szimuláció és a verifikációs mérés eltéréseit, illetve továbbfejlesztési lehetőségeket vetek fel növekedő méretű alkatrészek melegedésének vizsgálatára és azok modellezési megközelítésének skála szerinti elválasztására. Az általam bemutatott eredmények a tématerület szakirodalmát tekintve teljesen újszerű megközelítésnek számítanak, valamint a nemzetközi trendeket figyelembe véve az Ipar 4.0 szellemében történő fejlesztéseikhez is idomulnak.

1 Bevezetés

Napjainkban az óriási példányszámban gyártásra kerülő elektronikai termékek minősége és megbízhatósága kritikus. A gyártás általában automatizált szerelősorokon történik, felületszerelési eljárással, amelyben az újraömllesztéses forrasztás fontos szerepet játszik. A gőzfázisú újraömllesztéses forrasztás egy feltörekvő technológia, köszönhetően kis energiaigényének és kitűnő forrasztási minőségének.

Ahhoz, hogy a lehető legjobb minőségű forraszkötéseket hozzuk létre, szükségünk van az alkatrészek és szerelvény hőmérsékletének melegedésének ismeretére is. A megfelelő forrasztási paraméterek beállításához szükség lehet a szerelvény konstrukciójából fakadó melegedési görbék ismeretére. Ezt vagy idő és berendezésigényes mérésekkel, vagy megfelelő szimulációs elven lehet megkapni.

Munkám során bemutatom a testek melegítésének fizikai hátterét, és egy gyors, explicit elven működő szimulációhoz szükséges, adott peremfeltételek esetén alkalmazható különböző számítási módszereket.

Munkám során előkészítettem és megoldottam egy olyan újszerű modellezési feladatot, amivel közel valós időben szimulálható az alkatrész hőmérsékletének változása az újraömllesztéses gőzfázisú forrasztás során, így a szimuláció akár gyártósor melletti valós környezetben is elvégezhető. A modellezéshez több lépésben finomításokat is alkalmaztam.

A modellen végzett szimulációs eredményeket összehasonlítom a szimulációban használt különböző méretkódú, SMD típusú valós alkatrészek mérési, validációs eredményeivel. A dolgozat végére kitűzött céloom, hogy az alkatrész méreteinek változásával a szimuláció skálázhatóságára irányuló következtetéseket vonhassak le, esetleges javaslatokkal a különböző modellezési megközelítések alkalmazhatóságával kapcsolatban.

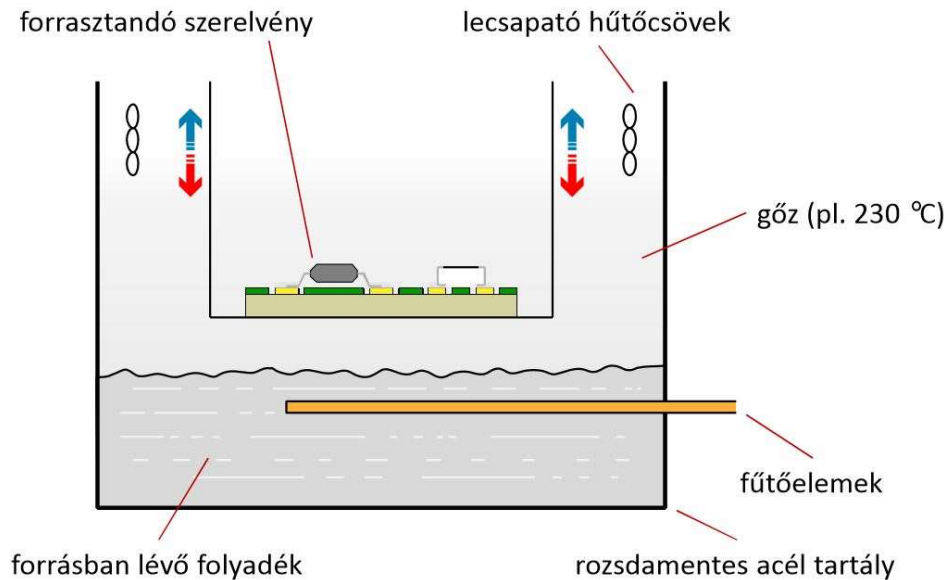
2 Újraömllesztéses forrasztás

Az elektronikai szereléstechnikában jellemző technológia a felületszerelés, ahol egy szerelőlemez (Printed Circuit Board - PCB, Nyomatott Huzalozású Lemez - NYHL) felületén forrasztják fel a síkba szerelhető alkatrészeket. A forrasztott kötés felületszerelési tömeggyártásban való létrehozásának legelterjedtebb módja az újraömllesztéses (reflow) forrasztás, aminek lényege, hogy a forraszanyagot (ólommentes forraszötövet) általában stencilnyomatással, paszta formában viszik fel a PCB-n található kontaktusfelületekre. A paszta tartalmazza a felület nedvesítéséhez szükséges folyasztószert, illetve a forrasz szemcséket, amik körülbelül a térfogat felét, másik szemszögből vizsgálva a tömeg 90%-át teszik ki. Stencilek közül a legelterjedtebben használt a rozsdamentes acélból készülő 75-250 µm vastag, kifeszített fémfólia, amelyre lézer segítségével apertúrákat (ablakokat) vágnak a nyomtatandó áramkörnek megfelelően. A nyomtatás után a beültető gép automata módon képes az alkatrészek beültetésére. A gép fiduciális (pozícionálást segítő) ábrák alapján egy optimalizált algoritmus alapján helyezi fel a hordozóra az alkatrészeket, amiket vákuumos fejjel vesz fel az előkészített tárákból. A beültetés után következik az újraömllesztés, ahol a hőközlést infrasugaras, konvekciós, vagy lecsapódásos (kondenzációs), másnéven gőzfázisú forrasztási módszerrel viszik végbe.

2.1 Gőzfázisú forrasztás

Dolgozatom során az újraömllesztéses forrasztási technológiákon belül is a gőzfázisú forrasztás (Vapour Phase Soldering – VPS) hőátadásával foglalkoztam. A technológia nem újkeletű, már az 1970-es években létezett a prototípusa, azonban az akkori technológiában az alkatrészek elmozdulása, az alkalmazott CFC-tartalmú vegyszerek, illetve sírkő effektus hibamechanizmusok gyakori előfordulása csökkentette a népszerűségét. Azóta a technológia számos újításon ment keresztül. Napjainkban használt perfluoropolyether (PFPE) alapú folyadékok nem károsak a környezetre, tulajdonságaik pedig hozzájárulnak, hogy a gőzfázisú forrasztás alacsony energiaigényének, és kitűnő forrasztási minőségének köszönhetően feltörekvő technológia legyen az elektronikai gyártás során [1][2]. A gőzfázisú forrasztás elve, hogy egy adott forráspontú folyadékot fűtőcsövek segítségével forralunk, így gőz képződik a forrasztásra előkészített tartályban. A tartály tetején lecsapató hűtőcsövek vannak. A

forrasztandó szerelvényt leengedjük a telített gőzbe, aminek a hőmérséklete fizikailag meghatározott: egészen addig, amíg a forrasztanyag folyadék és gőz halmazállapotban is jelen van, a gőz maximális hőmérséklete a folyadék forráspontja. A különböző halmazállapotokat és a folyamat menetét a 2-1. ábra szemlélteti.



2-1. ábra – A mérésekhez használt kísérleti elrendezés [3]

A folyamat legfőbb előnye a többi módszerhez viszonyítva kiemelkedően egyenletes hőátadás, ami annak köszönhető, hogy a forrasztáshoz használt gőz arra törekszik, hogy egyenletesen töltsen ki a számára rendelkezésre álló térfogatot, ami a forrasztási minőség szempontjából fontos tényező. A forrasztáshoz szükséges energiaátadás a gőz filmszerű kondenzációjával történik meg, aminek hőátadási hatékonysága jóval egyenletesebb és magasabb, mint a konvekciós illetve sugárzásos hőátadás esetében. Az egyenletes hőátadás és az inert gőz megelőzheti a sírkőképződési effektust, valamint a gázzárvány-képződést, azonban a hirtelen melegedés ezeket problémákat katalizálhatja is nem megfelelő beállítás esetén. A VPS energiaigénye sokkal kisebb az újraömlésztés- és hullámforrasztáshoz képest [4][5], ezért kifejezetten fontos technológia lehet a jövő gyártásában.

A VPS módszerei közül három fő változatot különböztetünk meg [3]. Az első módszer esetében telített gőzbe helyezük a szerelvényt, a második (egy fokkal fejlettebb) vezérlésnél a gőzt megadott fűtési teljesítménnyel fejlesztjük rá a szerelvényre (Heat-level), a harmadik módszer során a szerelvényt mozgatják a telítetlen gőztérben (SoftVP).

Dolgozatom alap kutatás jellege miatt az alapvető módszerrel foglalkozom.

2.2 Hőátadás – az elméleti alapok

2.2.1 A hőátadásról általánosan

A gőzfázisú forrasztás esetében a hőátadás jelentősen eltér a konvekciós és radiációs elven működő kemencékhez képest. VPS hőátadás során adott hőátadási együtthatót feltételezve egy test hőmérsékletének megváltozását Newton törvénye írja le:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A \cdot (T_{amb} - T(t)) = h \cdot A \cdot \Delta T(t) \quad (1)$$

ahol Q a termikus energia [J], h hőátadási együttható [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$], A hőátadási felület [m^2], T a test hőmérséklete [K], T_{amb} környezeti hőmérséklet [K], $\Delta T(t)$ időfüggő hőmérséklet gradiens a test és a környezet között.

Gőzfázisú forrasztás során a környezeti hőmérséklet telített gőz esetében állandónak tekinthető és megegyezik a gőz hőmérsékletével, ami pedig a folyadék forráspontja alapján definiált hőmérsékleti érték. A test melegítése az alábbi módon írható fel áramköri hordozókra, szerelvényekre: [6]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{c_p \cdot m} \quad (2)$$

ahol c_p a test (szerelvény) fajlagos hőkapacitása [$\frac{J}{K \cdot kg}$], m a test tömege [kg].

A kondenzációs hőátadás során a gőzfázisból folyadék fázissá alakul, aminek látens hője az alábbi módon határozható meg:

$$Q_l = m \cdot i \quad (3)$$

ahol Q_l fázisátalakulás során felszabaduló energia [J], i a látens hő [$\frac{J}{kg}$], m a test tömege. Ez a látens hő az, amely gyakorlatilag a szerelvény melegedéséért felelős.

2.2.2 Nusselt szám

A h hőátadási együttható meghatározása lesz a melegedés modellezésének kulcsa. Ebben a paraméterben kell kifejtetni a lemezen zajló filmszerű kondenzáció elvének a leírását. A paraméter felírását nagyban segíti a Nusselt szám megismerése és alkalmazása.

Egy folyadékban a hőátadás konvektív, amikor a folyadék mozgásban van, és konduktív, amikor a folyadék mozdulatlan. A Nusselt szám egy dimenzió nélküli mennyiség, ami a konvektív és konduktív hőátadás arányát fejezi ki. [7]

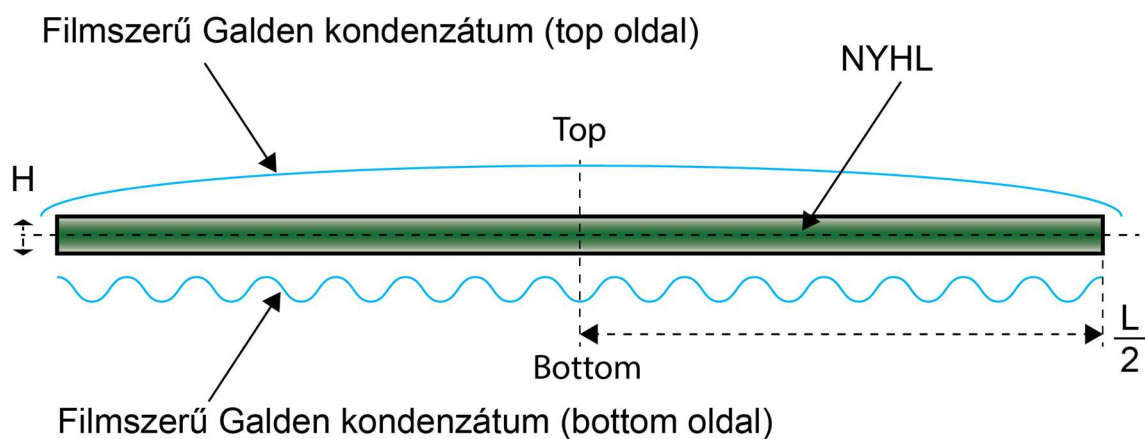
$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (4)$$

ahol L jellemző geometriai hossz [m], k folyadék hővezetési tényezője [$\frac{W}{m \cdot K}$].

2.2.3 Kondenzációs hőátadás különböző felületeken

A kondenzáció során lejátszódó folyamatokat külön kell kezelnünk attól függően, hogy az milyen jellegű felületen történik: más a folyamat egy horizontális téglalap, illetve kör alapterületű lemezen, egy oldalfalon, vagy éppen az áramkör hátoldalán. A. Bejan 1991-es cikkében [8] vizsgálta különböző 2D-ből általánosított geometriák esetén a filmkondenzációt. Ebben a fejezetben ismertetem a munkám során felhasznált egyenleteket, a levezetés teljes igénye nélkül. A levezetések megtalálhatóak a hivatkozott irodalmakban.

A következő 2-2. ábra egy tipikus esetet mutat be a filmszerű kondenzációra, amely a szerelőlemez felületén, VPS feldolgozás során zajlik le. Ez a kiindulási alap a következő leírásokra.



2-2. ábra - Kondenzáció a szerelőlemez felületén[3]

2.2.3.1 Horizontális lemez, felső oldal [8]

Horizontális lemez esetén a Nusselt szám (5), valamint ebből átrendezve megkapott átlagos hőátadási együttható (6):

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_L \cdot L}{k} = 1,079 \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l^2 \cdot g \cdot L^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l} \right]^{1/5} \quad (5)$$

$$\overline{h}_L = \frac{k_l}{L} 1,079 \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l^2 \cdot g \cdot L^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l} \right]^{1/5} \quad (6)$$

ahol L az oldalra jellemző hosszúság, T_s a szaturált gőz hőmérséklete, T_b a test hőmérséklete, ρ_l a folyadék (Galden) sűrűsége $[\frac{kg}{m^3}]$, μ_l a folyadék viszkozitása $[\frac{kg}{m \cdot s}]$.

2.2.3.2 Függőleges fal [8]

Adott test (pl. egy téglatest alakú felületszerelt alkatrész) függőleges falának esetében a legegyszerűbb klasszikus eset az, amikor a kondenzáció során a kondenzált folyadék vastagságát H magasságban a test legtetején nullának feltételezzük. Akkor az alábbi (7) számú egyenlet adódik:

$$\overline{Nu}_H = \frac{\overline{h}_H \cdot H}{k} = 0,943 \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot H^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l} \right]^{1/4} \quad (7)$$

$$\overline{h}_H = \frac{k}{H} 0,943 \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot H^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l} \right]^{1/4} \quad (8)$$

ahol H a fal magassága [m], ρ_g pedig a gőz halmazállapotú Galden sűrűsége.

Azonban a valóságban ez a kezdeti feltétel nem valósul meg, ugyanis a kezdeti vastagság egy véges mennyiség. Ha a kondenzátum vastagságának változását a $\lambda(z)$ függvény írja le, akkor a kezdeti érték, ami a felső oldalról lefolyik: $\lambda(0) = \lambda_0$. Ezzel az értékkel is számolva az egyenlet a következőképpen módosul:

$$\lambda(z) = \left[\lambda_0^4 + \frac{k_l \cdot (T_s - T_b) \cdot \mu_l}{i_{lg} \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_g) g} 4z \right]^{1/4} \quad (9)$$

$$\overline{Nu}_H = \frac{\overline{h}_H \cdot H}{k} = 0,943 \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot H^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l} \right]^{1/4} \cdot [(1 + B)^{3/4} - B^{3/4}] \quad (10)$$

$$\overline{h}_H = \frac{k}{H} 0,943 \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot H^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l} \right]^{1/4} \cdot [(1 + B)^{3/4} - B^{3/4}] \quad (11)$$

ahol B segéd paraméter a következőképp számítható:

$$B = 0,475 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^{4/5} \cdot \left[\frac{i_{lg} \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot H^3}{(T_s - T_b) \cdot k_l \cdot \mu_l}\right]^{-1/15} \quad (12)$$

2.2.3.3 Horizontális lemez, alsó oldal (bottom)

Egy horizontális lemez alsó oldalán a film kondenzátum felülete nem egyenletes, hanem hullámos, a kondenzátum innen apró cseppek formájában távozik.

Gertsmann és Griffith [9] az alábbi egyenleteket határozta meg erre az esetre kis dőlésszögű (<7,5°) illetve vízszintes felületre:

$$Nu_{GG} = \frac{\bar{h}_{LGG}}{k_l} \left(\frac{\gamma}{g(\rho_l - \rho_g)}\right)^{1/2} \quad (13)$$

$$\bar{h}_{LGG} = Nu_{GG} \cdot k_l \left(\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\gamma}\right)^{1/2} \quad (14)$$

ahol γ a felületi feszültség [$\frac{J}{m^2}$].

Az különböző esetek (vízszintes vagy kis dőlésszögű) esetében a Nusselt számot a Rayleigh (Ra) szám függvényében, ami az alábbi módon számolható:

$$Ra = \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_g) \cdot i_{lg}}{\mu_l \cdot \Delta T \cdot k_l} \left(\frac{\gamma}{g(\rho_l - \rho_g)}\right)^{1/2} \quad (15)$$

Kis dőlésszög esetében a Nusselt szám:

$$\overline{Nu}_{GG} = \frac{0,9 \cdot Ra^{1/6}}{1 + 1,1 \cdot Ra^{-1/6}} \quad \text{ha } Ra > 10^6 \quad (16)$$

Vízszintes esetben pedig az alábbi értékek adódtak:

$$\overline{Nu}_{GG} = 0,81 \cdot (Ra)^{0,193} \quad \text{ha } 10^{10} > Ra > 10^8 \quad (17)$$

$$\overline{Nu}_{GG} = 0,69 \cdot (Ra)^{0,2} \quad \text{ha } 10^8 > Ra > 10^6 \quad (18)$$

3 A probléma modellezése

3.1 Felhasználási terület

Az elektronikai gyártástechnológia során elengedhetetlen a megbízható minőségű forraszkötések létrehozása. A nagy volumenű gyártás során használt újraömllesztéses forrasztási technológiai esetében kritikus hatással van a forraszkötés minőségére az alkalmazott technológia hőprofilja, azaz, hogy milyen hőmérsékleteken mennyi időt tölt az áramkör. Az ólommentes forrasztási anyagok bevezetése a forrasztástechnológiában új kihívásokat jelentett. A megnövekedett olvadási pont nagyobb csúcshőmérsékletek használatához, és új megbízhatósági kérdésekhez is vezetett egyben. A kötések zárványosságának csökkentése érdekében megnövekedett az igény az oxigénmentes forrasztási környezet kialakítására [1][10][11]. Ez a gőzfázisú forrasztás esetében a telített gőz révén biztosított, ez hozzájárul a technológia népszerűségének növekedéséhez.

Az elektronikai gyártástechnológiában, épp úgy, mint egyéb gyártástechnológiában korunk legnagyobb kihívása az automatizáció, a felhasznált gépek lehető legjobb kihasználtsága, azok együttműködése. Az Ipar 4.0 szellemiségével, a mesterséges intelligencia, a gép-gép közötti kommunikáció révén lehetőség nyílik a folyamatok optimalizálására. A forrasztástechnológiába az adott forrasztási profil meghatározása az áramköri gyártás megbízhatóságának, ezáltal értékének is kulcskérdése. Az ideális profil különböző termékek esetében más és más, meghatározásához számítógépes szimulációhoz folyamodhatunk. Az így kapott eredmények közvetlenül is felhasználhatók egy szabályozástechnikai probléma [12] bemeneteként, amivel a lehető legjobb forrasztási minőség elérhető.

A továbbiakban azt mutatom be, hogy miként lehet modellezési megközelítéssel vizsgálni a melegedési profilokat a pontosabb és prediktív gyártási folyamatok érdekében.

3.2 Konkrét problémakör megfontolásai

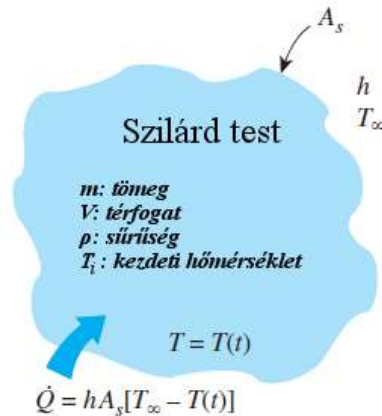
Mint minden modellezési feladat esetében, a dolgozatomban vizsgált probléma megoldása során is célszerű határfeltételekkel és megkötésekkel élni. Ez egyszerűbben és gyorsabban elvégezhető számításokat, valamint könnyebben általánosítható eredményeket von maga után. Egy test melegítése során a hűtődés, valamint a test

hőmérsékletének megváltozása legegyszerűbben az előző fejezetben is bemutatott Newton-féle hőátadási törvénnyel írható le, azonban ennek érvényességi körét mindenképpen vizsgálni kell. Korábban vizsgálták a szerelőlemez melegedését általánosan [13] panelszerű modellezési megközelítéssel, ahol az alkatrészek hatása, és azok melegedése elhanyagolásra került. Szükséges tehát a problémakört az alkatrészek hatásával is vizsgálni.

Dolgozatomban különböző méretű ellenállások gőzfázisú forrasztás során létrejövő melegedését vizsgálom, ami egy skálázási probléma bemutatása, közelítőleg azonos alkatrésztípusokat használva, standard felületszerelt, passzív ellenállásméreteken, és a skála nagyságából fakadóan többféle alkatrésztípus (alapanyag) esetében. Ahhoz, hogy azonos modell alapján számolható legyen az alkatrészek melegedése, ismernünk kell a rendszer egyes alkotóinak pontos jellemzőit.

A Newton-féle törvény alkalmazása esetén a kapott eredmény pontossága nagyban függ attól, hogy az adott test mennyire tekinthető izotermikusnak. Törvényszerű, hogy azok a testek, amelyek nagyon jó hővezetők, például egy tömör rézgolyó, sokkal inkább megfelel ennek a feltételnek, mint akár egy, az élet egészen más területéről vett példa: ha sütőben melegítjük újra előző nap készült ételünket, megtörténhet, hogy a külseje már egészen meleg, azonban a belseje még hideg, ez az anyag hővezetési tulajdonságaitól függ. Felmerül tehát a kérdés, hogy mikor tekinthető egy test izotermikusnak?

Vegyük az 3-1. ábrán illusztrált testet. Amorfnak formájú, A_s felület, m tömeg, V térfogat, ρ sűrűség, valamint T_i kezdeti hőmérséklet jellemzik.



3-1. ábra – A csatolt kapacitások módszeréhez felhasznált geometria és paraméterek [14]

A melegítés során a termikus energia megváltozását a Newton-féle hőmérsékleti törvény, valamint a hőátadásra jellemző h hőátadási együttható, illetve T_∞ az állandósult állapotbeli hőmérséklet. A termikus-villamos megfeleltetés végezhető el az egyes anyagok hőellenállása és hőkapacitása alapján, amik a villamos megfeleltetésben egyaránt ellenállás, illetve kapacitás áramkörti elemekkel írhatók le. Ebben a modellben egy komplex, több izotermával rendelkező test esetében a modellezés a különböző anyagparaméterekkel leírható anyagi rétegek, anyag típusnak vonal mentén haladva-egy R-C tag felel meg, így különböző típusú anyagok melegezése leírható, az egyes tagokat külön jellemezve, majd azokat hálózatba összekapcsolva [15].

Egy test akkor tekinthető izotermikusnak, ha annak hőmérséklete csak a folyamat során csak az időtől függ, a testen belüli relatív pozíciótól nem (azaz a testen belül nincsen hőmérsékleti gradiens). Ekkor a folyamatot egy egytárolós R-C taggal modellezhetjük. Ebben az esetben a dinamikus viselkedés egyszerűen kezelhető és számolható a Newton-féle hőátadási törvénnyel. Ezt a problémát már Leider is felvetette könyvében, a VPS módszerére vonatkoztatva [6].

Amikor egy testet melegítünk, valamekkora hőmérsékleti gradiens mindig keletkezik. A szakirodalomban elfogadott megfelelő közelítéshez az alábbi mennyiségeket szükséges még bevezetnünk [14]:

$$L_c = \frac{V}{A_s} [m] \quad (19)$$

ahol L_c a karakterisztikus hossz. Valamint a mértékegység nélküli Biot számot (Bi):

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (20)$$

A Biot szám egy dimenzió nélküli szám, aminek szemléletes jelentése a felületen levő konvekciós, valamint a testen belüli konduktív hőátadás hányadosának aránya.

$$Bi = \frac{\text{konvekciós hőátadás a test felszínén}}{\text{konduktív hőátadás a test belsejében}} \quad (21)$$

Könnyedén belátható, hogy minél kisebb a Biot szám, annál inkább leírható a test egy egytárolós tagként. Az alábbi 3-1. táblázatban látható, hogy a Biot szám értékének függvényében milyen esetek különböztethetők meg a hőátadás során az irodalom alapján.

3-1. táblázat - Biot szám egyes értéktartományainak jelentései

Biot szám nagysága	Jelentése
$Bi = 0$	az egzakt (ideális) eset, ekkor a testen belül nincs termikus gradiens
$0 < Bi \leq 0,1$	ebben a tartományban alkalmazható a közelítés, az egyes izotermák közötti eltérés legfeljebb 5%
$Bi > 0,1$	a hiba már nagyobb mértékű, kis pontosságú alkalmazások, vagy szignifikánsabb hibát elfogadó esetekben használható

Azaz látható, hogy valós körülmények között a $0 < Bi \leq 0,1$ sávba eső Biot szám értékek esetében használható megbízható pontossággal az egytárolós tagként történő közelítés [16]. Egyes modellek ezen tovább mennek, vannak esetek, ahol ennél magasabb értékeket is elfogadják elfogadható közelítésnek, de ahogy fentebb is megállapítottam, itt már a hiba léptékével kalkulálni szükséges. A paraméter leírásának pontosítása érdekében érdemes megjegyezni, hogy a Biot szám nem 0-1 közötti számérték, a szám jelentősen túlnőhet az 1-es értéken. A Biot szám gyakorlati meghatározása az 5. és 6. fejezetekben kerül tárgyalásra.

3.3 Konkrét modellezési probléma megoldására tett előzetes tervezet

Összefoglalva cél a fentebb is ismertetett modellezési kérdéskör körüljárása. Avagy, lehetséges-e gyors, explicit, „egycellás” elven felírni a panel melegedése mellett az adott alkatrészek melegedését, figyelembe véve a Newton-elven alapuló melegedés kérdéseit. Ehhez a következő feladatsort tervezem megvalósítani.

- Az anyagi paraméterek alkalmazásával a Biot szám előzetes vizsgálata panelre és alkatrészekre;
- A modellezés közben felmerült kérdések végett a hőátadási együttható szétválasztása alsó és felső oldalra mérések alapján;
- Modellezés, szimulációs görbék és mért görbék összehasonlítása;
- Az alkatrészek skálázhatóságának vizsgálata a mérési és szimulációs eredmények tükrében.

4 Szimuláció és mérések előkészítése (anyag és módszer)

Ebben a fejezetben bemutatásra kerül a kísérleteimhez és szimulációmhoz használt módszertan, és a munka során alkalmazott anyagok, megfontolások leírása.

4.1 Alkatrészek és anyagparaméterek

A vizsgálataimhoz egy felületszerelési technológiában gyakran előforduló alkatrész típust választottam, amely méretezésében az egészen apró, emberi kéz által szinte kezelhetetlen mérettől nagyságrendi változással skálázódik fölfelé. Ez az alkatrésztípus a diszkrét felületszerelt kondenzátorok (chip-scale capacitor) családja. A konstrukciós pontosság, és az alkatrész belsejében történő később elhelyezésre kerülő, validációs hőelem szonda rögzítésének és az emberi kezelhetőségnek praktikus mivolta alapján a 1206-os alkatrészmérettel kezdtem az alkatrészsor gyakorlati felépítését felfelé, mivel a skála alacsonyabb rendű alkatrészei (01005, 0201, 0402, 0805) a kísérletek és vizsgálatok ezen fázisában nehezen és pontatlanul lettek volna csak preparálhatóak. A gyakorlatban felhasznált alkatrészek méreteit az alábbi 4-1. táblázat tartalmazza. Jól látható, hogy a 1206-os alkatrész mérete összemérhető az általános szerelőlemez vastagsággal (1.55 mm), a sorban egy kóddal alacsonyabb méretű tipikus felületszerelt passzív alkatrészek akár 0.5 mm vastagságúak is lehetnek, így látszik, hogy a szerelőlemez felületéről ezek a szerelőlemez vastagságához képest csak kismértékben emelkednek ki. A kondenzátum vastagsága 0.1-0.2 mm körül adódik VPS során [17], így az ezzel összemérhető magasságú alkatrészek vizsgálata esetében a preparáció nehézségén felül más modellezési megközelítést is szükséges majd a jövőben alkalmazni.

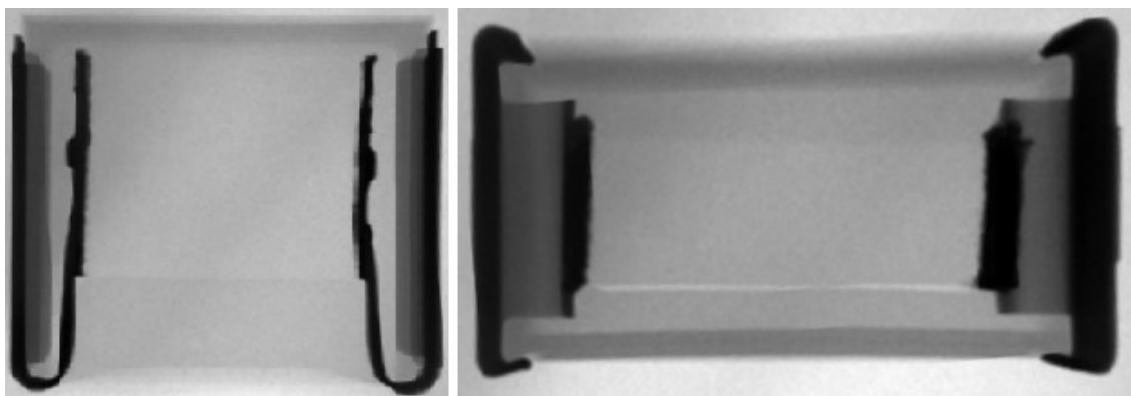
Az alkatrészek kiválasztásánál törekedtem az azonos alkatrészcsaládra, a nagyságrendi méretkülönbség miatt azonban szükség volt kétféle anyagú használatára. Jellemzően a legkisebb méretű alkatrészek kerámia kondenzátorok, a nagyobb méretűek pedig PET/PEN (polyethylene terephthalate/polyethylene naphthalate) alapúak. A bemutatott alkatrésztípusok gyakorlati okai voltak a beszerezhetőség és elérhetőség szempontjából. A jövőben a lista kibővül az anyagi paraméterek és méretek szélesebb skálájával.

4-1. táblázat – A mintákhoz használt alkatrészek méretei

Alkatrész méretkód	Hosszúság [mm] x szélesség [mm] x magasság [mm]	Alkatrész típusa
1206	3,3 x 1,7 x 1,2	fóliakondenzátor
1812	4,5 x 3,2 x 1,4	kerámia kondenzátor
2824	7,3 x 6,1 x 4,1	fóliakondenzátor
3025	7,5 x 6,3 x 4	kerámia kondenzátor
4030	10,5 x 7,9 x 4,5	fóliakondenzátor
4036	10,4 x 8,8 x 5,8	fóliakondenzátor
5040	13 x 10,4 x 5,7	fóliakondenzátor

A méréshez kialakított minták nem fedik le a méretskála minden elemét, illetve lehetséges anyagösszetételek teljes skáláját sem, azonban várhatóan megfelelő mennyiségű mérést tesznek lehetővé az első szimulációs eredmények és az így kapott trendek értékeléséhez.

Az alkatrészek anyagösszetételének vizsgálatát az adatlapi értékeken felül röntgenképek segítségével határoztam meg. Az alábbi, 4-1. ábrán látható képen a vizsgált alkatrészeiről, egy 4036-os méretkódú SMD kondenzátorról készült röntgenfelvételek láthatóak.



4-1. ábra –A 4036-os SMD alkatrészeiről készült röntgenfelvételek

Az egyes anyagok közelítő térfogatát illetve tömegét a képeken végzett mérések alapján határoztam meg. A szimuláció során az alkatrészt egy összetett, kompozit cellaként modelleztem. Ennek a cellának a hőkapacitását az egyes anyagok tömegszázaléka alapján, míg a sűrűségét azok térfogatszázalékos arányában számoltam

ki. A kondenzátoron belül a fegyverzetek 100 angström vastagságú alumínium vékonyrétegből állnak.[18] A teljes modellben az alkatrészen felül egy 1,5 mm-es FR4 lemez paramétereivel is számoltam, valamint az alkatrész rögzítéséhez használt epoxi SMD ragasztót (ld. később) is figyelembe vettem (100 µm vastagság). A modellezés során felhasznált különböző anyagok tulajdonságait a 4-2. táblázat foglalja össze.

4-2. táblázat - A modellezésben felhasznált anyagok tulajdonságai [19] [20][21][22]

Anyag	Hőkapacitás [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	Hővezetés [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Sűrűség [$\frac{kg}{m^3}$]
FR4	600	0,36	2100
Epoxi kitöltőanyag	1100	0,36	2000
Epoxi ragasztó	300	0,36	1160
Alumínium	900	215	2000
Nikkel	460	90	8880
Ón	2173	67	5767
PET	1200	0,3	1400
PEN	1200	0,22	1400
BaTiO ₃	460	4	6020

Példaként bemutatom, hogy a röntgenfelvételeket hogyan használtam további paraméter pontosításra. A 4-1. ábrán szereplő képen méréseket végeztem a KLONK Image Measurement Tool segítségével, ahol a röntgen kép mellé automatikusan kirajzolt méretvonalat alkalmaztam viszonyítási alapnak.

A fenti 4036-os példa alkatrésze kapott eredményeket az egyes anyagok térfogatára illetve tömegére vonatkozóan az alábbi, 4-3. táblázatban foglaltam össze. A többi alkatrészen is tehát röntgen- és paramétervizsgálatok alapján kapott értékekhez hasonlóan közelítettem a végleges felírást, alkatrész típusonként három-három fő anyagösszetevővel.

4-3. táblázat – Egyes anyagok tömege és térfogata az alkatrészben (4036 alkatrész)

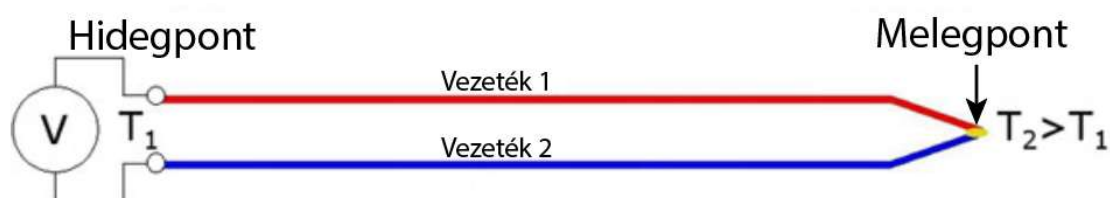
Anyag	Térfogat [m ³]	Tömeg [kg]
FR4	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,84 \cdot 10^{-4}$
Epoxi kitöltőanyag	$3,65 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$
Epoxi ragasztó	$9,2 \cdot 10^{-9}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$
Alumínium	$6,65 \cdot 10^{-8}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$
PET	$9,94 \cdot 10^{-8}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$

Ezekből az értékekből kiszámoltam a kompozit cellák anyagösszetételét a szimulációhoz.

A megvalósítás során a Galden folyadék adatlapjait használtam fel [23] a folyadék paramétereinek beállítására. Ezen paraméterek közül irodalmi források alapján, a viszkozitást és a látens hő hőmérsékletfüggő anyagparaméterként kezeltem.

4.2 Hőmérsékletmérési alapok a validációhoz

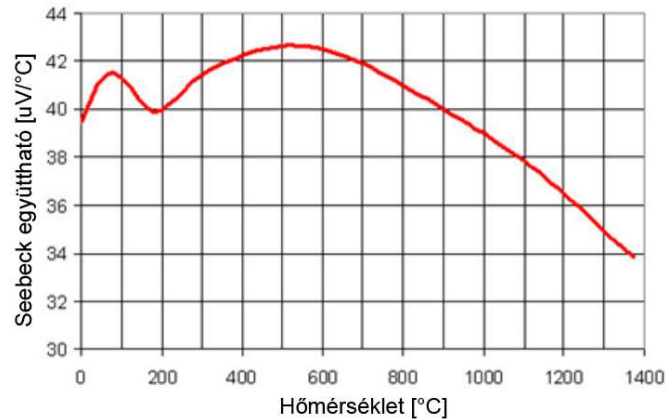
A szimulációs eredmények verifikálásához minta áramkörön elvégzett gőzfázisú forrasztási ciklust alkalmaztam mintánként. A mérésekhez egy V-Mole adatgyűjtőt használtam, K típusú hőelemekkel, amelyek sematikus felépítése az 4-2. ábrán látható. A hőmérsékletértékek egy másodperces mintavételi idővel kerültek rögzítésre. Minden panel esetében legalább három mérést végeztem, a mérések között az egyes paneleket az alkatrészekkel szobahőmérsékletűre hűtöttem vissza kézi levegőpisztolyos megoldással, és hőmérsékletmérési visszaellenőrzéssel.



4-2. ábra - Hőelem sematikus felépítése [24]

A K típusú hőelem egy jó pontosságú ($\pm 1,5$ °C), olcsó, forrasztási technikában gyakran használt megoldás, amely széles hőmérsékletmérési tartományban alkalmazható (-200 °C és 1350 °C). A hőmérsékletmérés elve a két kivezetés kontakt-potenciál

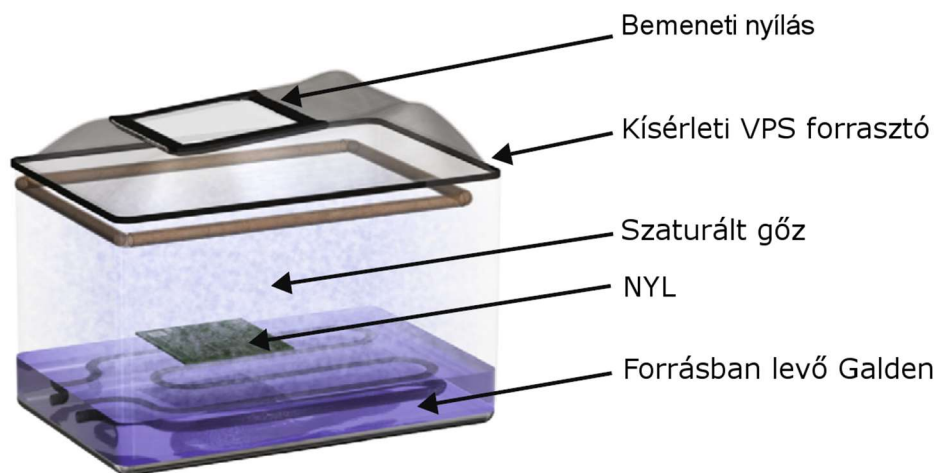
különbsége, amit a hőmérséklet változása idézi elő. A hőmérséklet a Seebeck feszültség alapján számítható, ami hőmérsékletfüggő, és különböző hőmérsékleten levő értékeit az 4-3. ábra mutatja.



4-3. ábra - Seebeck együttható K típusú hőelem esetén [24]

4.3 Mérési környezet

Munkám során validációs méréseket készítettem a tanszéken megtalálható kísérleti gőzfázisú forrasztóval. A 4-4. ábrán látható a méréshez használt gőzfázisú forrasztóállomás ábrája és felépítése. A felhasznált folyadék Galden HT170 típusú, 170°C körüli forrásponttal, amely a folyamat szempontjából egyenértékű az ólommentes technológiákhoz használt LS230 típusú folyadékkal, de az alacsonyabb hőmérséklet gyorsabb vizsgálati ciklusokat tesz lehetővé, felgyorsítva és optimalizálva a labormunkát.

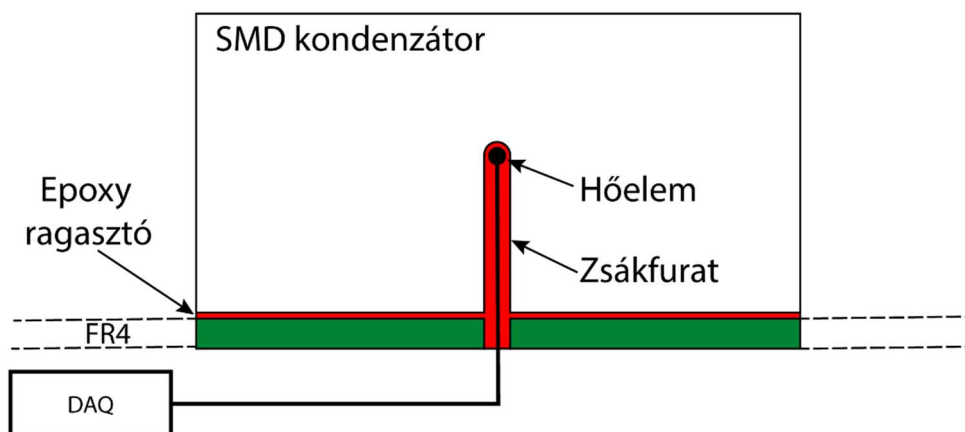


4-4. ábra - Kísérleti gőzfázisú forrasztó [13]

4.4 Mintapreparáció

4.4.1 Alkatrész mérési konstrukció

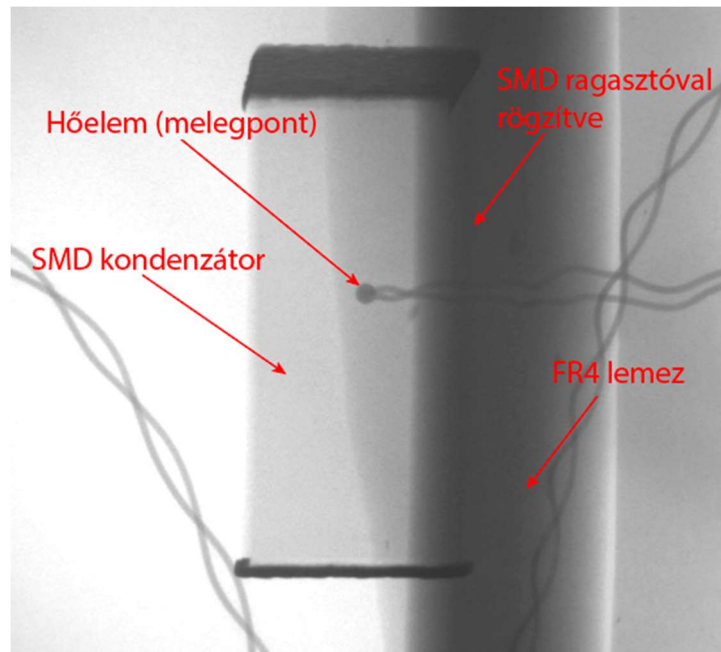
A méréskor a PCB-re helyezett minta alkatrész vízszintes helyzetben került elhelyezésre a forrasztási térben. A hőmérsékletméréshez használt hőelem egy, PCB oldal felőli furaton keresztül, az alkatrész közepében került elhelyezésre, ennek sematikus rajza látható a 4-5-ös ábrán. Mind a hőelem, mind pedig az alkatrész Loctite 3621 SMD ragasztó segítségével került rögzítésre. Ennek a kikeményítése 150 °C-on történt hőlégfúvóval, adatlapi ajánlások alapján.



4-5. ábra - Hőelem elhelyezkedése a struktúrában

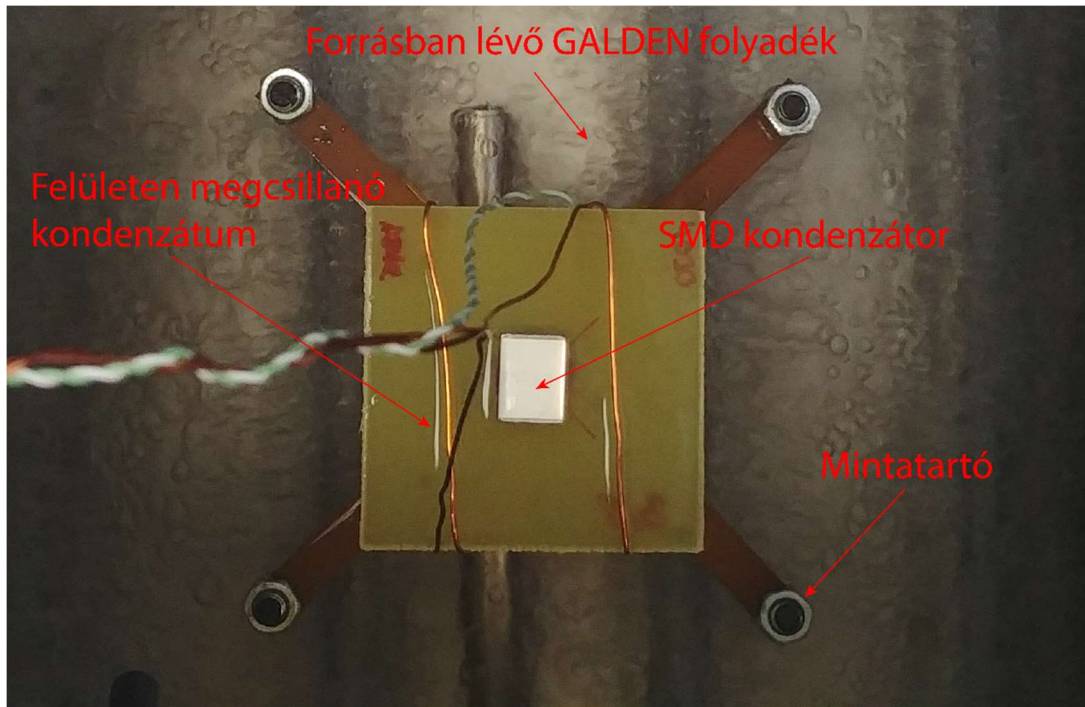
A hőelemek pozícióját a fentebb taglalt röntgen mikroszkópos módszerrel ellenőriztem. Az alkatrészben belüli tökéletes geometriai középpontig történő fúrás nem tekinthető teljes mértékben pontosnak a manuális előkészítés miatt, de a hőelem minden

esetben az alkatrész belsejében és annak közepe közelében foglalt helyet. Egy konkrét, 5040-es méretű alkatrészből készült röntgenfelvétel látható a 4-6. ábrán.



4-6. ábra Vizsgált 5040 méretű SMD alkatrészben elhelyezett hőelem (röntgen felvétel)

A következő 4-7. ábrán a fenti konstrukció látható felülnézetből a mérési környezetben. A 4.4-es ábrán látható eszköz tartályában egy négy ponton szintezhető, ICT tűkkel preparált mintatartó található, amelyet 0° -os dőlésszögre állítottam. A mintatartó szögét kalibrált XY asztalhoz igazított klinométer applikációval ellenőriztem.

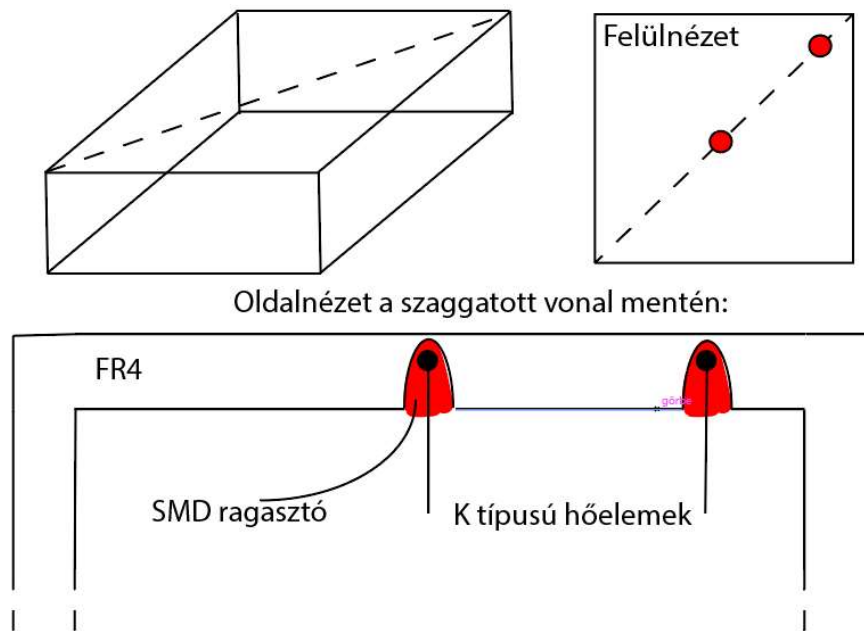


4-7. ábra - Nagyméretű SMD kondenzátor melegedésének mérése kísérleti gőzfázisú forrasztókemencében

4.4.2 Légmentesen zárt doboz a hőátadási együttható szétválasztásának vizsgálatához

A szimulációhoz használt modell alkalmazhatóságának és pontosságának meghatározásához további méréseket végeztem a vizsgálat pilot kísérletei során felmerült kérdések tisztázására.

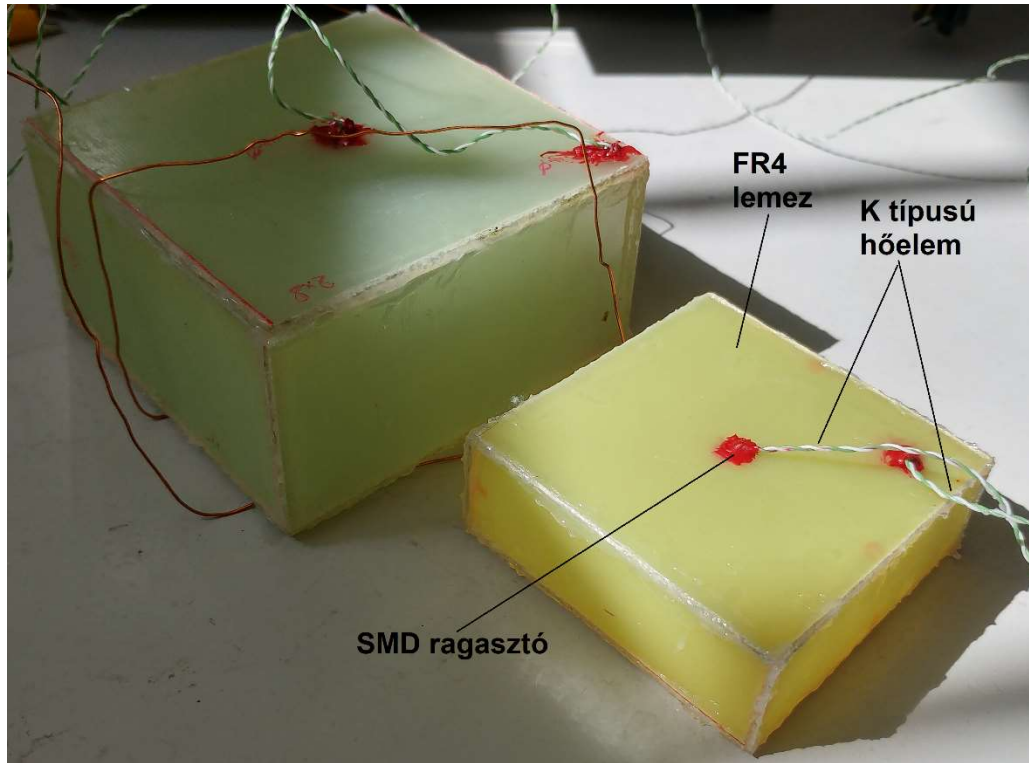
Ahhoz, hogy külön a felső (top), illetve külön az alsó (bottom) felületre meg tudjam határozni a h hőátadási együtthatót, illetve azok egymáshoz viszonyított arányát, egy olyan légmentesen zárt dobozt készítettem el, ahol a lemez hátoldalán nem tud létrejönni kondenzáció, ezáltal az arról az oldalról érkező hőátadás a mérés során elhanyagolható. Ehhez a levegővel történő szigetelés tűnt kézenfekvőnek, hogy a lehető legkevesebb hőt csatoljuk az adott „egyoldalas” mérés rendszeréhez. A mindkét oldalról zárt mérődoboz sematikus rajza látható az alábbi 4-8. ábrán.



4-8. ábra - A mérődoboz sematikus rajza, amelyen felső (TOP) orientációban helyezkednek el a hőelemek

A dobozt méretre vágott FR4 lemezekből készítettem el, FBS szilikonkaucsuk ragasztó felhasználásával, melynek a hőállósága megfelelő a folyamatom eddigi paramétereit tekintve: 200 °C. A doboz felső oldalának közepére, illetve az egyik sarkától 1-1 cm-re helyeztem el egy-egy K típusú hőelemet. A hőelemeket előre kialakított zsákfuratban rögzítettem, Loctite 3621 SMD ragasztó segítségével. Ezzel a megoldással a felülethez nagyon közeli hőmérséklet mérésére válik lehetőség. A hőelemek kivezetése a doboz másik lapján történt meg, szintén SMD ragasztó segítségével.

A doboz zárt mivoltát vízfürdős kísérlettel végeztem el, alámerítéskor és körbe mozgatáskor buborék nem volt látható a doboz körül. A dobozt kiemelve a vízből beszívargott folyadékot sem tapasztaltam a doboz körül. A fentebb ismertetett mérési konfigurációból két példány is készült. Az előzetes kísérletek alapján az első túl nagynak bizonyult a tanszéken levő kísérleti forrasztókemence gőzteréhez képest, ezért a második már vékonyabb, 1 mm vastag FR4 lemezekből készült, 6x6x4 cm-es méretben került megvalósításra. Ezek láthatóak a 4-9. ábrán.

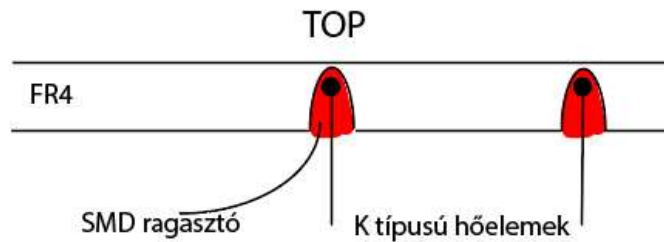


4-9. ábra - A mérődobozok kialakítása

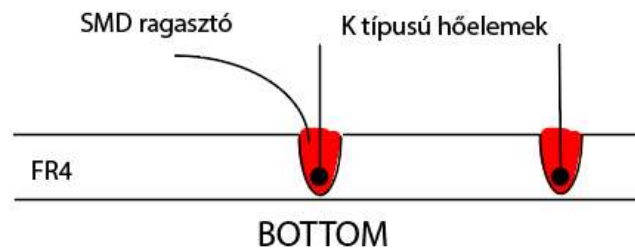
4.4.3 FR4 lemez

Méréseket végeztem a doboz felső lemezével is a doboztest nélkül, tehát a hőelemek elhelyezése megegyezett a két konfiguráció esetében. Ebben az esetben a kondenzáció a lemez mindkét oldalán megtörténik, ezáltal a visszszámolt hőátadási együttható is nagyobb mértékű lesz, mint az előző esetben. A mérés során arra kérdésre kerestem a választ, hogy szigetetlen esetben tapasztalható-e különbség a top illetve bottom oldali orientáció között, illetve összevethető-e a korábbi mérésekkel az eredményem.

A mérések során itt is különválasztva igyekeztem vizsgálni felső illetve alsó oldali hőátadást. A lemezt ennek megfelelő orientációval helyeztem a gőztérbe a mérésekhez. Az egyes elrendezések a 4-10. illetve 4-11. ábrán láthatóak.



4-10. ábra - A felső oldal mérése



4-11. ábra – Az FR4 lemezekbe helyezett hőelemek orientációja felső-alsó (TOP-BOT) elrendezésben

A dobozzal végzett mérések ugyanezt az orientáció rendszert követték. Érdeemes megjegyezni, hogy a szerelvényen a felület hőmérsékletét szeretném mérni, így a felülethez közel lett a hőelem melegpontja elhelyezve minden esetben. A furatokat kitöltő SMD ragasztó anyaga nagyon hasonlít paramétereiben az FR4-ben található epoxy paramétereire, így elhanyagolható lesz a ragasztó rendszert megzavaró hatása.

A dobozokat és a lemezt is úgy helyeztem el a gőztérben, hogy a vizsgált felület magassága következetesen 5 cm távolságra legyen a Galden forrási felületétől. Ez a távolság a kamra ~16 cm magas telített gőz zónájának az alsó, feltételezetten mindig gőzzel telített felén helyezkedik el, garantálva, hogy a modellek elvi kritériumrendszere alapján telített gőzzel találkozzon a melegítési felület.

Később az így mért hőmérsékleti görbékből számolom majd vissza a hőátadási együtthatók értékét.

5 Jellemző folyamatparaméterek vizsgálata

Ebben a fejezetben bemutatom az egyes jellemző paraméterek vizsgálatának elvi kérdéseit, és a konklúziókat, amelyek az eredményes modellezéshez szükségesek.

5.1 Hőátadási együttható szétválásának vizsgálata

A hőátadási együttható szétválásának vizsgálata az alkalmazott modellek (Bejan, Gerstmann-Griffith) ellenére szükséges előkészület volt. Egyes pilot vizsgálatok ugyanis azt a sejtést igazolták, hogy bár a fenti modell kombináció (felső oldalra Bejan, alsó oldalra G-G) viszonylag kis hibával működött a szerelőlemezek esetén, az alkatrészeknél pontatlan eredményhez vezetett. Sejtés alapján a fenti kombinációval szemben már a kezdeti vizsgálatok esetében is pontosabb eredményeket kaptam a panelhez képest vastagnak számító alkatrészekben, ha a fenti oldalon található modellt alkalmazom az alsó oldalra is.

A hőátadási együttható meghatározásához orientációban legalább két-két mérést végeztem a dobozzal és a lemezzel. A h értékeket természetesen hőmérsékleti görbékből számoltam, amely számítás igen érzékeny az adatgyűjtés precizitására. Számos mérést végeztem különböző mintavételezési idővel (30 ms-700 ms) és különböző AD átalakítási bitszámmal (11-12-13-14-15 bit), hogy a hőmérsékleti értékekből nagy érzékenységgel számolható h értékekben megjelenő zajjellegű kilengéseket próbáljam kiküszöbölni. Azonban az eredmények jellege azonosan zajos volt, ezért egy-egy konkrét eseten ismertetem a tapasztalatokat.

A pontonkénti hőátadási együtthatókat a 22. egyenlet alapján számítottam ki, ami a 2. fejezetben ismertetett egyenletekből egy egyszerű átrendezéssel adódik:

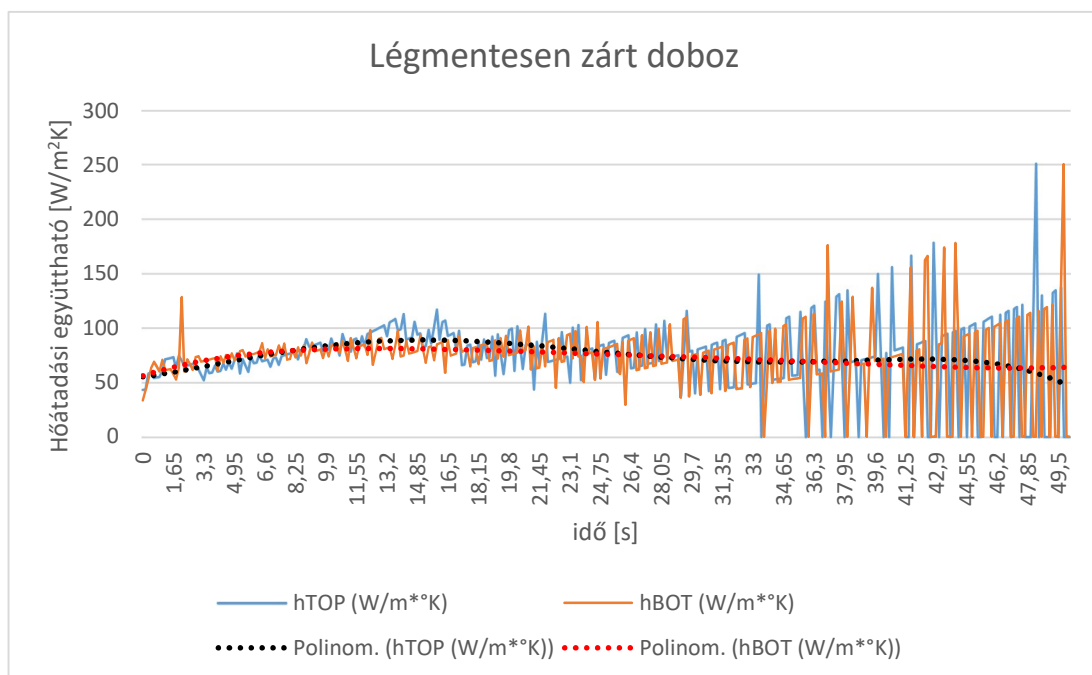
$$h = \frac{\Delta T}{\Delta t} c \rho w \frac{1}{T_{\infty} - T} \quad (22)$$

ahol T_{∞} az állandósul állapotbeli hőmérséklet, T az aktuális hőmérséklet, c az FR4 lemez hőkapacitása, ρ a sűrűsége, w pedig a jellemző karakterisztikus hossz.

A kapott eredményeket a légmentesen zárt doboz esetében a 5-1. ábra illusztrálja. Korábbi kísérleti eredmények [25] alapján a grafikonokon a panel közepén elhelyezett hőelem által mért értékeket jelenítettem meg. A kísérletek során megállapítottam, hogy a sarkokban a speciális geometria miatt az eredmény kevésbé összehasonlítható a doboz és

a lemez esetében, hiszen a doboznál az oldalfalak csatolják a hőt a sarokban található hőelemhez, ezáltal torzítva kicsit az eredményen.

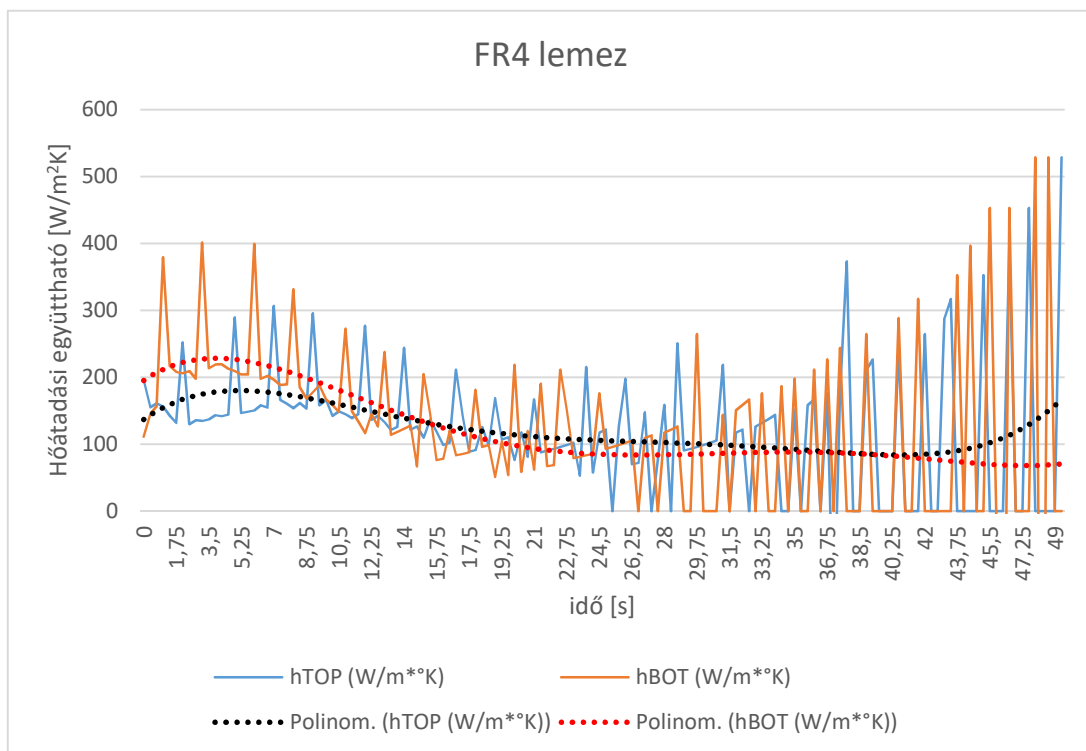
A mérés előtt, az elméleti értéket figyelembe véve, a lemez esetében a dobozhoz képest a kétoldali kondenzáció miatt körülbelül kétszer akkora hőátadási együtthatókra számítottam. A doboz esetében a gőztérbe helyezéskor a geometria nagysága miatt a gőzből nagyobb mennyiség kondenzálódik, így rövid, de nem teljes mértékben elhanyagolható idő kell, mire a gőz újrafejlődik, ez a jelenség kicsit csökkenti a hőátadást. A későbbi 5-1. táblázatban levő értékekből látható, hogy mindkét esetben számolt hőátadási együtthatók körülbelül 93%-kal magasabbak a lemez esetében, ami a várakozásaimmal megegyezik. A lenti 5-1. ábrán a légmentesen zárt doboz melegedéséből visszszámolt hőátadási együttható értékeket vetem össze felső-alsó (TOP/BOT) elrendezésben.



5-1. ábra - A légmentesen zárt doboz esetében számolt hőátadási együtthatók összehasonlítása (TOP/BOT oldal)

A diagramon látható periodikusan növekvő eredmények (bizonyos kiugró pontok miatt) mindegyik mérés során tapasztalhatók voltak, amely az adatgyűjtő pontatlanságát és a rendszer (hőmérséklet \rightarrow hőátadási együttható) kiszámításánál vett érzékenységet mutatja. A diagramokon levő fekete pontokat az adatot feldolgozó Excel szoftver beépített mozgó átlag funkciója segítségével rajzoltam ki, amit öt pont alapján kalkuláltam. Ezeken jól látható, hogy az egész melegítési folyamat során a hőátadási

együttható egy jól meghatározható sávon belül marad, az állandósult állapothoz közeledve a numerikus hibákból azonban a varianciája nő. Az egyes mérési pontpárok alapján számított eredmények a folyamat időállandója szempontjából túlmintavételezettek, a kiugró nulla értékek esetében például két egymás utáni mérési pont között nem volt hőmérsékletkülönbség, így az adott pontra kapott numerikus eredmény értelemszerűen nulla lesz. Ugyanakkor az állandósult állapothoz közeledve a h hőátadási együttható értékének hirtelen nagymértékű növekedése ($T_\infty - T$) tag nullához való konvergenciájából adódik. Az a kilengések ellenére is látszik az így kapott adatok alapján, hogy számottevő különbség nem volt tapasztalható a mért hőátadási együtthatókan ebben az esetben. Az 5-2. ábrán látható az FR4 lemez esetében kapott mérési eredmény.



5-2. ábra – Az FR4 esetében számolt hőátadási együtthatók összehasonlítása (TOP/BOT) oldal)

Az 5-2. ábrán látható grafikon jellegében hasonló a 5-1. ábrához. Ebben az esetben kapott hőátadási együtthatók magasabbak, a várakozásunk is ez volt, ugyanis ebben az esetben nincs a doboz által biztosított levegő-szigetelőréteg, ami meggátolná a kondenzációt a másik oldalon. A kapott eredményeken látható, hogy az alsó oldal esetében a kezdeti körülbelül 7 másodperces szakaszon magasabb a számított hőátadási együttható, ez a különbség fakadhat abból, hogy a hőelem az 1 mm-es FR4 lapon belül magasságot tekintve valamennyire aszimmetrikusan helyezkedik el, de a behelyezésnél

adódó szögprobléma (nem teljesen merőleges behelyezés) is adhat ilyen kismértékű eltérést. A különböző mérések során az ismételhetség sem tökéletes (például a minta góztérben levő magasságának és szögének elhelyezése – ebben is lehetnek minimális eltérések a pontos mintapozícionáló állvány ellenére).

Ezt a szakaszt elhagyva a számított mozgó átlag a két különböző esetben jó közelítéssel együtt halad, így ebben az esetben sem volt dominánsan meghatározható különbség az egyes oldalak esetében.

Az így kapott pontonkénti eredményeket átlagoltam, a kapott számokat az 5-1. táblázat foglalja össze. Ez alapján elmondható, hogy bár jellemzően a felső oldalon néhány százalékkal magasabb a hőátadás intenzitása, ez szinte hibahatáron belül mozgó különbség, így ez alapján javasolt, és indokolt lehet azonos számmal kalkulálni az alsó és felső oldali hőátadást tekintve. Erre a későbbiekben lesz még szükség a modell hangolásánál.

5-1. táblázat - A mért, átlagos hőátadási együttható felső- illetve alsó oldalra

Mért oldal:	Felső (top) $[\frac{W}{m^2K}]$	Alsó (bottom) $[\frac{W}{m^2K}]$	Felső/Alsó [%]
Légmentesen zárt doboz	88,9	87,2	101,8%
FR4 lemez	171,7	167,9	102,2%
FR4 lemez/ Légmentesen zárt doboz [%]	193,4%	192,5%	-

5.2 Biot szám vizsgálata FR4 lemezre

A 3. fejezetben ismertetett Biot számot a fizikai paraméterek, és a hőátadási együttható alapján kiszámolhatjuk. Ezek bemutatására azért van most szükség, hogy látszódjon, a modellezéshez az elfogadható érték közelében marad a vizsgálat.

Első körben a lemezekre számítom ki a Biot számot, ezzel is validálom a korábbi eredmények [13] elfogadható mivoltát, majd az alkatrészezt szélesítem ki a vizsgálatot.

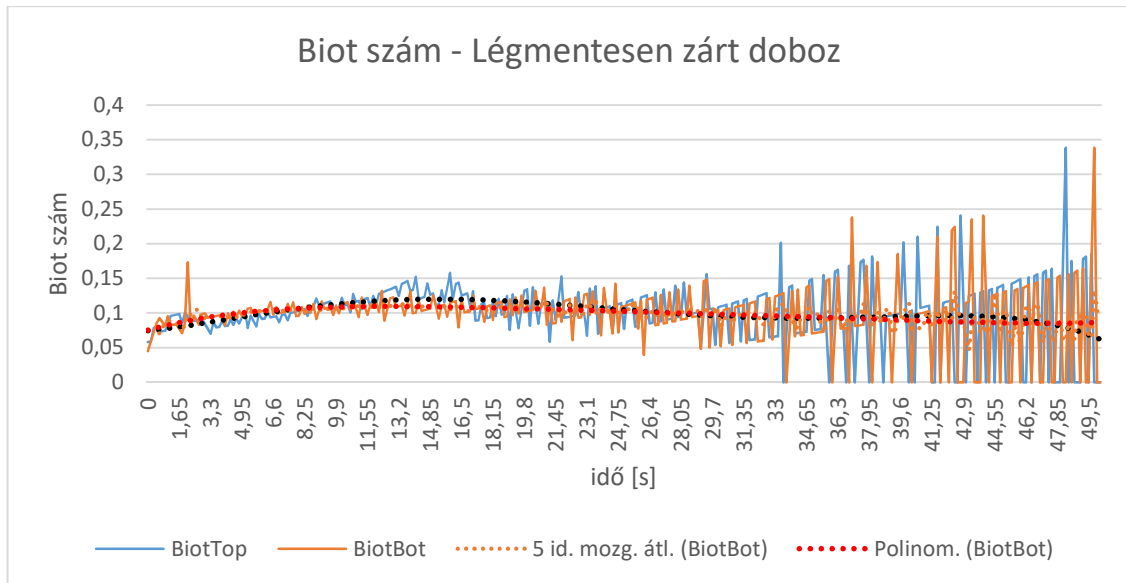
A kísérletben az ehhez szükséges paramétereket és értékeit az alábbi 5-2. táblázat foglalja össze.

5-2. táblázat – Biot számhoz használt paraméterek [26]

Jellemző	Jelentés	Érték
k_{FR4}	FR4 lemez hővezetése	$0,36 \frac{W}{mK}$
$L_{c doboz}$	Karakterisztikus hossz: FR4 lemez vastagságának $\frac{1}{2}$ -e	0,0005 m
$L_{c lemez}$	Karakterisztikus hossz: FR4 lemez vastagságának $\frac{1}{4}$ -e	0,00025 m
h	Hőátadási együttható, pontonként számolva a 6.2 pont szerint,	(pontonként eltérő) $[\frac{W}{m^2K}]$

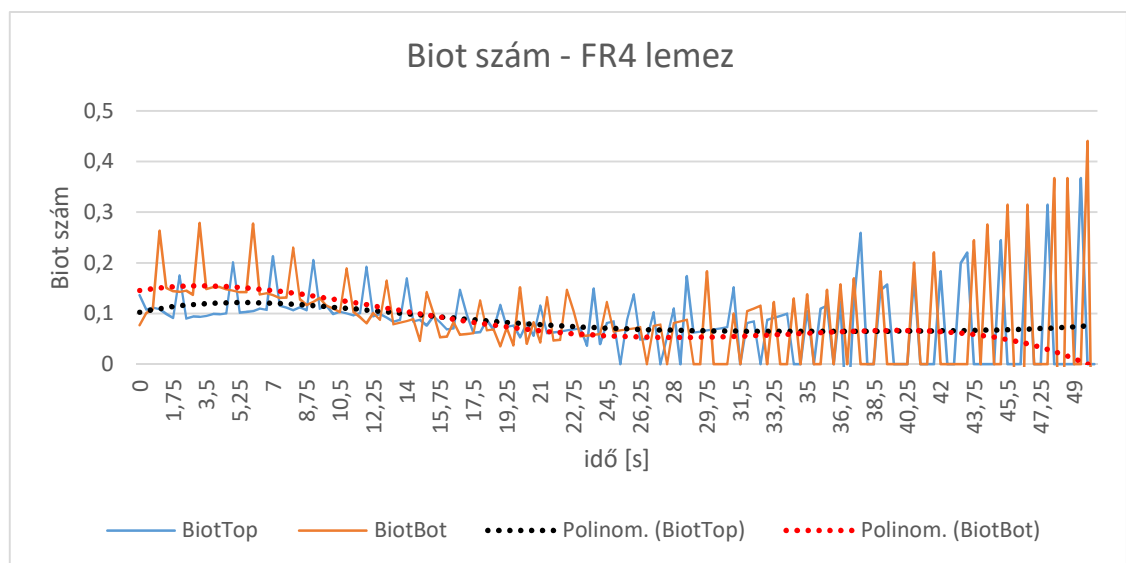
A karakterisztikus hossz a lemez esetében a vastagság felének tekinthető. Ez a második, kisebb méretű doboz esetében 0,5 mm (1 mm vastagságú FR4 lemezből készült). Ekkora a Biot számot pontonként kiszámíthatjuk a már korábban ismertetett, $Bi = \frac{hL_c}{k_{FR4}}$ képlet segítségével.

Ezek alapján az összes pontra kapott eredményeket (top illetve bottom oldal esetében) a légmentesen zárt doboz esetében az 5-3. ábra, míg a lemez esetére az 5-4. ábra tartalmazza.



5-3. ábra - Biot szám pontonkénti számítása a légmentesen zárt doboz esetében

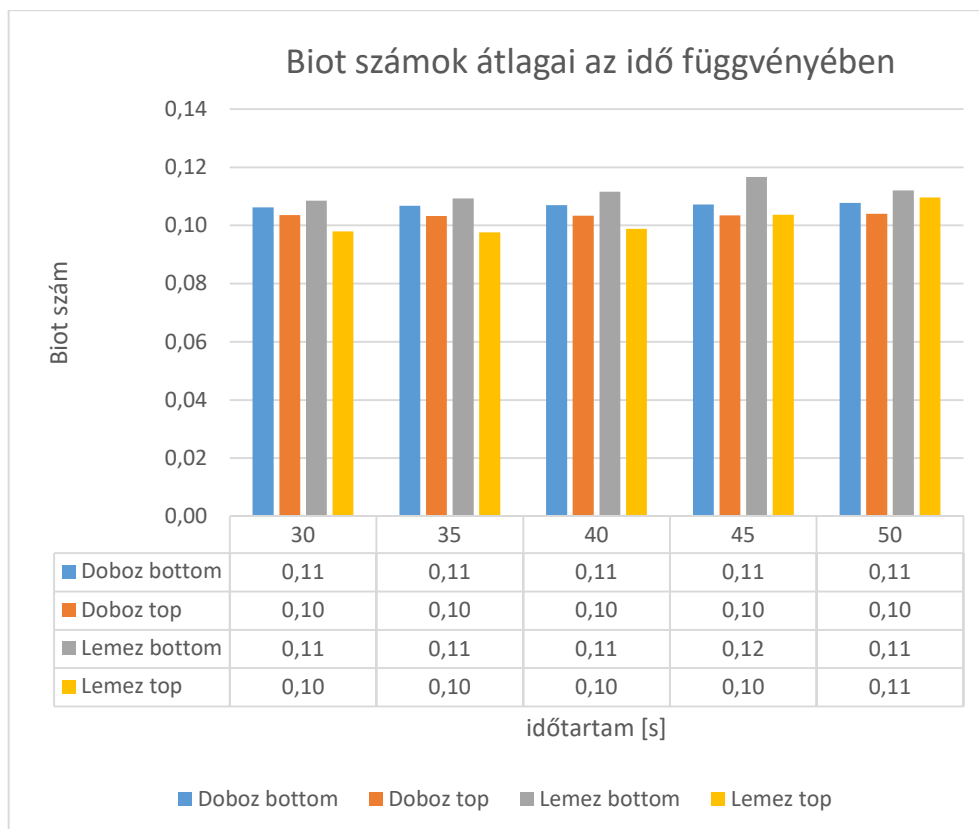
Látható, hogy mielőtt a mozgóátlag szórása a folyamat végén elkezdene növekedni, nagyjából a 0,1 körüli értéket veszi fel.



5-4. ábra Biot szám pontonkénti számítása az FR4 lemez esetében

Az FR4 lemez esetében a folyamat elején a felső oldal esetében számított Biot számok n picit nagyobbak, de a teljes mérési intervallumot figyelembe véve jó egyezőség mutatkozik. Körülbelül 10 másodperc után az értékek hasonló numerikus értéket vesznek már fel.

Az 5-5. ábrán láthatóak a Biot számok átlagai, mind a doboz, mind a lemez esetében a különböző intervallumok alapján számolva (minden esetben a nulla időponttól, a melegítés kezdetétől).



5-5. ábra - Biot számok átlagai a folyamat lefolyása során, különböző intervallumokra számolva

Látható, hogy a folyamat során a Biot számok körülbelül 10% eltérésen belül maradnak. Mind a doboz, mind a lemez esetében az alsó (bottom) oldalon számolt érték kevéssel nagyobbak adódtak, mint a felső (top) oldal esetében – ez lehet mérési pontatlanság, illetve a hőelem (direkt) rögzítési aszimmetriájának a hatása. Az értékek a 3. fejezetben ismertetett 0,1-es határt az értékek körülbelül legfeljebb 10%-kal lépik át, ami elfogadható eredmény.

A módszer alkalmazása a későbbiekben az alkatrészekre is kiszélesedik.

6 A szimuláció első lépései

6.1 Szimulációs egyenletek

A kompozit cella határfelületeire felírt Newton féle hőátadási törvényben (1)-es egyenlet) szereplő felületet felbontottam, és külön esetként kezeltem a felső, az oldalsó, valamint az alsó oldalakat.

A dinamikus hőátadási együtthatók számításához a 2.2.3-as fejezetben szereplő egyenleteket és paramétereket használtam fel, kezdetekben a következők szerint: a felső oldalhoz a (6)-os egyenletben szereplő Bejan-féle hőátadási együtthatót használtam. Az alsó oldal esetében a (18) egyenletben szereplő, Gerstmann-Griffith féle Nusselt számból számoltam ki a hőátadási együtthatót. Az oldalfalak esetében két különböző esetet különböztettem meg. Feltételeztem, hogy a felületről lefolyó kondenzátum a kisebbik dimenzió (rövidebb oldal) mentén folyik le, ezért a nagyobbik oldalhoz tartozó felületek esetében, a már kezdeti vastagságot is modellező B korrekciós tagot tartalmazó (11)-es egyenlet alapján számítottam ki. A rövidebb oldalhoz tartozó felületek esetében pedig a (8)-as egyenletet használtam fel.

Az ötödik fejezetben ismertetett mérések azt támasztották alá, hogy a felső és az alsó oldali hőátadás között nem volt mérhető szignifikáns különbség (5-1. táblázat). Emiatt a modellben a kezdeti eredmények során azzal az egyszerűsítéssel éltem, hogy az alsó oldali hőátadás esetében a Gerstmann-Griffith modell helyett a felső oldalon is alkalmazott Bejan modellt alkalmaztam.

Kisméretű alkatrészek esetében a függőleges falra alkalmazott feltevések érvényességi köre kérdéses. Már a 1206 méretkódú alkatrészekre jellemző 1-1,5 mm alkatrészmagasság esetében sem tekinthetők az oldalsó felületek végtelen féltérből levezetett felületnek, így feltételezésem szerint bizonyos megszorításokkal az oldalsó felületeken jellemző hőátadás akár el is hanyagolható lehet. Ilyen mérettartomány esetében az alkatrész körül kialakuló kondenzátum is nagyban befolyásolja az adott felületen történő hőátadást.

Összefoglalva tehát a szimuláció során a következő módon vizsgálom az egyes alkatrészek melegedését:

- Minden oldalon (ideértve az oldalfalakat is)
- Felső és alsó oldalon (oldalfalak elhanyagolásával)
- Illesztett hőátadási együtthatóval (követve a validációs mérésekből fakadó eredményeket)

Az utóbbi módszert a hőátadási együtthatók modellezett, illetve a validációs mérésekből vett visszazámolt eredményének összevetésére alkalmazom.

A szimulációt és az (1)-es és (2)-es egyenlet megoldását MATLAB környezetben végeztem.

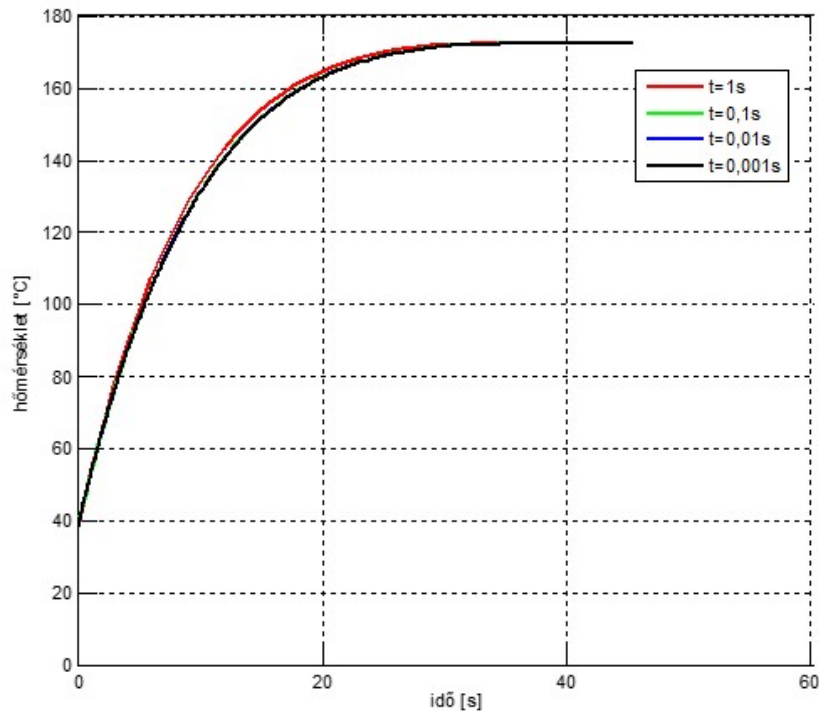
6.2 Időosztás vizsgálata kezdeti számítással

Pilot szimulációk során a számítás időosztásának a vizsgálatát el kellett végeznem, immár konkrét alkatrészek esetében. Ehhez felállítottam a modellezési környezetet.

Arra voltam kíváncsi, hogy az időosztás mennyiben befolyásolhatja a kapott eredményeket és a számítási időt. A vizsgálatot a 4-1. fejezetben ismertetett, legelső 4036-os alkatrész paramétereivel végeztem.

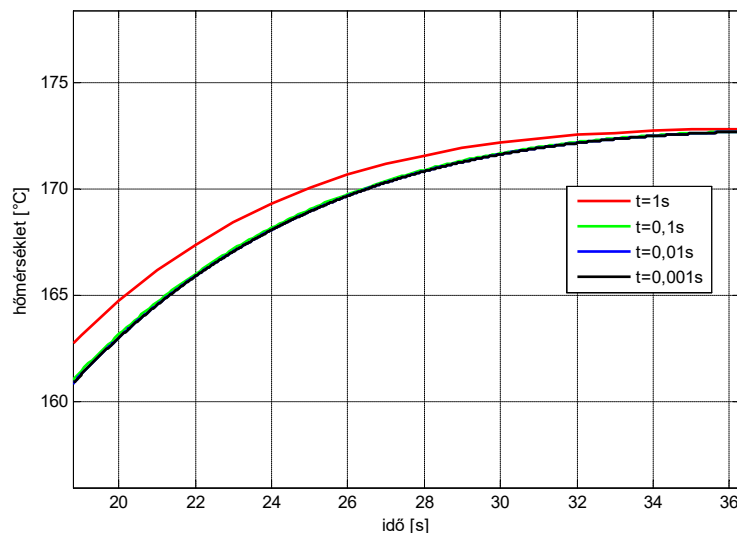
A szimulációt 38 °C-ról kezdtem, mérési eredmények alapján körülbelül ettől a hőmérsékleti ponttól kezdve indul el az alkatrész exponenciális melegedése. A hőátadási együtthatóknak egyaránt $100 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ kezdeti értéket adtam, ezek elméleti szempontból nagyságrendileg helyes eredmények, a szimuláció első pár lépésében dinamikusan megváltoznak és már a második lépéstől számított értéket vesznek fel. Az abszolút hőmérsékleti értékek a jelenlegi vizsgálat során nem kritikusak, csak az időosztás függését szeretném bemutatni a jelenlegi vizsgálatokkal.

A következőkben időosztás szerint, illetve azok függvényében vizsgáltam a szimulációs eredményeket. Az 6-1. ábrán látható a szimuláció eredménye, különböző lépésközök esetén (1; 0,1; 0,01; 0,001 [s]). A kapott eredmény jellegre helyes, exponenciális felfutású, állandósult állapotában a várt hőmérsékletet veszi fel.



6-1. ábra - A szimulált hőmérséklet emelkedése, különböző lépésköz választással

Az egyes eredmények között általában kicsi a különbség. 1-0,1 másodperces lépésköz között 1-2 °C a különbség, 01,-0,01 lépésköz között néhány tized °C adódik és 0,01-0,001 esetében alig tapasztalható különbség. A 6-1. ábrán látható grafikon egy kinagyított részlete található az 6-2. ábrán, ami jobban szemlélteti az egyes esetek közötti eltérést.



6-2. ábra – Szimulációs eredmények közötti különbség, különböző lépésközök esetén

A szimulációt Intel i5-4300U processzort és AMD 8750M videokártyát tartalmazó számítógépen futtattam, a RAM mérete 8 GB volt. Ezzel a konfigurációval

megmértem a program futásidejét, különböző lépésközök esetében. A 6-1-es táblázat tartalmazza az egyes esetek ötvenszeri futtatása után kapott átlagos futási időt másodpercben, amihez a MATLAB 2017b tic és toc függvényeit használtam fel, és a program kezdetétől a kirajzolás előtti időpontig mértem.

6-1. táblázat – Különböző lépésközhöz tartozó futási idők

lépésköz	0,001	0,01	0,1	1
átlagos futási idő [s]	230,6	1,130	0,027	0,0021

Látható, hogy az 0,1 és 1-es lépésközök esetében ez nagyságrend, 0,01-es érték esetében már körülbelül 42-szeres a futási idő, míg ezres lépésközzel a 0,1-eshez képest már négy nagyságrendnyi a futási idő különbsége. A különböző lépésközökhöz tartozó eredmények minimális különbség volt csak látható, így a szimuláció szempontjából 0,1 másodpercnél rövidebb lépésköz használata nem indokolt.

6.3 Illesztett átlagos hőátadási együttható

A melegedési folyamathoz a pontonként hőátadáson felül meghatározható egy átlagos hőátadási együttható egy-egy mérési görbéhez (azaz egy olyan konstans érték, amit ha minden másodpercben alkalmazunk az alkatrész melegedésének számításához, visszakapjuk a mért görbét). Ezzel a korábbiakban szemléltetett puszta átlagolásnál és polinomillesztésnél pontosabb eredményt lehet elérni. Ezt az értéket a 6.1 fejezetben bemutatott elv szerint felhasználom a lehető legpontosabb h érték előállításra a modellezett eredmények elemzéséhez.

A probléma tehát, hogy keresek egy olyan h konstans értéket, amivel iteratív módon kiszámolhatom a test melegedését, annak paraméterei ismeretében. Az összehasonlítást tényleges mérési eredményekből kell kiszámolni. A hőmérséklet változását az alábbi módon lehet felírni:

$$T' = T_i + (T_{amb} - T_i) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (23)$$

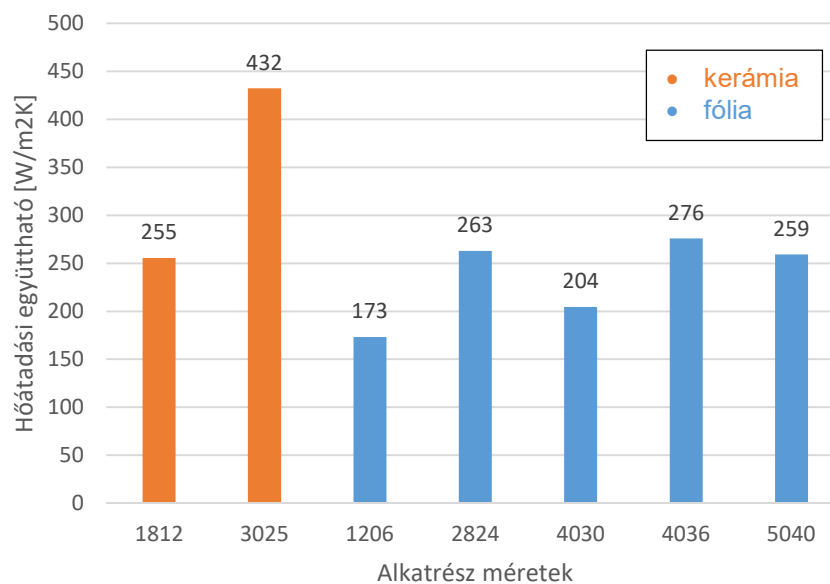
ahol:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{h \cdot A}{c \cdot m} \quad (24)$$

A (23) és (24) egyenletekben egy ismeretlen van, a keresett h konstans hőátadási együttható. Ennek meghatározásához a Microsoft Excel Solver bővítményét használtam fel [27]. A Solver bővítmény képet többféle algoritmus alapján nemlineáris problémák megoldására, jelen problémához a „Nemlineáris ARG” (angolul: nonlinear Generalized Reduced Gradient) funkciót használtam, ami egy gradiens alapú szélsőérték keresés. A bővítmény bemeneként egy olyan célértéket kell megadnunk, amit minimalizálni szeretnénk (célérték), illetve egy változót, aminek függvényében keressük. A feladat megoldásához kiszámítottam pontonként a négyzetes hibát a mért és számított hőmérsékletértékek különbségeként, (egy tetszőlegesen választott h értékkel), az alábbi módon:

$$\text{Négyzetes hiba} = (T_{\text{mért}} - T')^2 \quad (25)$$

A Solver számára használt célérték tehát a négyzetes hibák összege, a minimalizálandó változó pedig a korábban tetszőlegesen választott h érték, aminek optimumát az algoritmus automatikusan meghatározza a futtatás során. Az egyes mérésekből alapján számolt hőátadási együtthatót az alábbi 6-3. ábra tartalmazza.



6-3. ábra – Az átlagos számított hőátadási együtthatók (h) az egyes alkatrészek esetében

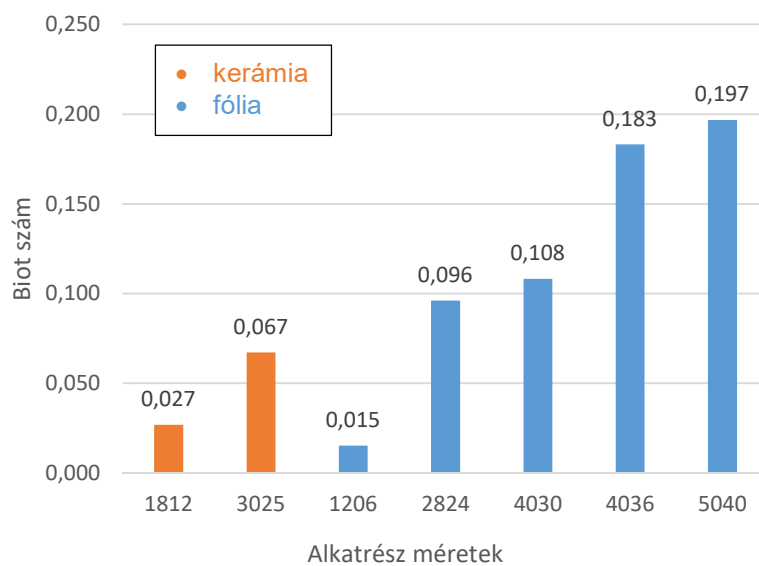
A narancssárga színű oszlopok a kerámia kondenzátorok értékei, míg a kék színűek a fóliakondenzátoroké. A kerámia anyagok hővezetése a polimer alapú fóliakondenzátorokhoz képest nagyobb, ebből fakad az egyes átlagos hőátadási együtthatók különbsége. A hőátadási együtthatók a mérettel (fő felületek növekedésével

és a geometria változásával) együtt változnak, de érdemes megfigyelni, hogy mivel az oldalarányok sem egyenletesen változnak (ld. 4-1. táblázat), ezért a számsorok növekedésével sem feltétlenül egyenletes a h értékek változása.

6.4 Biot szám vizsgálata alkatrészekre

Az 6-3. fejezetben ismertetett hőátadási együtthatók, valamint az egyes anyagokra jellemző hővezetési tényező és karakterisztikus hossz ismeretében lehet meghatározni a Biot számot 3. fejezetben ismertetett (19) és (20) egyenletek alapján.

A hővezetés tekintetében, hasonlóan az anyagösszetételhez nem áll rendelkezésre adatlapi érték, így ennek meghatározásához közelítésekkel éltem. Mivel az egyes anyagok elhelyezkedése az alkatrész középpontjához képest nem homogén, ezért különböző súlyokat alkalmaztam az egyes összetevőkre. Az alkatrész fémezését jellemzően nagy hővezetésű fémek alkotják. Meghatároztam az egyes oldalak az alkatrész középpontjától való távolságát, majd a teljes hővezetési hosszal arányosan súlyoztam az összetevőket, úgy, hogy a hosszabbik oldal mentén figyelembe vettem az alkatrész fémezést, míg a többi oldal szempontjából a tömbi anyaggal számoltam. A közelítést egy alkatrész esetében ellenőriztem az 5.2 fejezetben használt számítási módszerrel, és elhanyagolható mértékű eltérést kaptam. A komplexebb geometriára könnyebb kalkulációt nyújtó lehetőség kedvéért a további alkatrészekre is ezt a formulát használtam. Az így kapott Biot számok az alábbi 6-4. ábrán láthatók.



6-4. ábra - Biot számok alkatrész méretenként

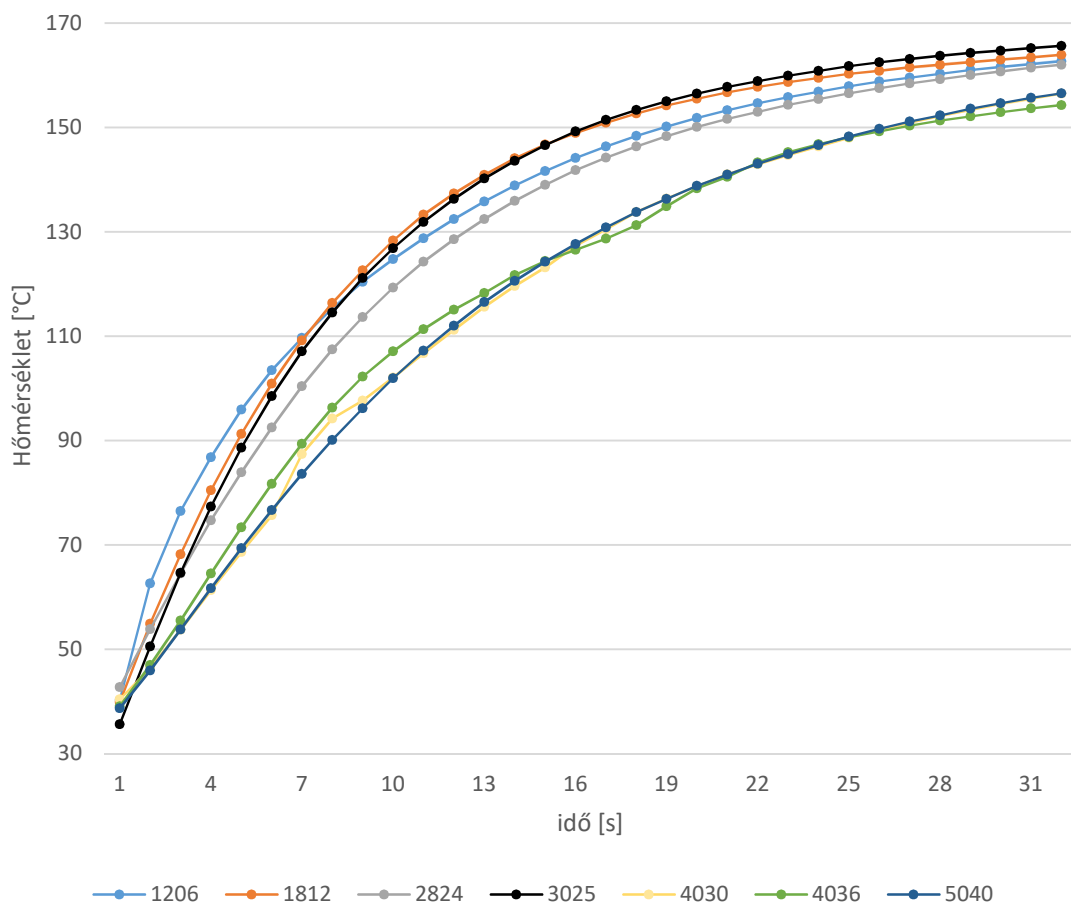
Az narancs-kék színábrázolás az 6-3. ábra konvenciójával megegyező. A kiszámított Biot számokból, még ha a számítás módja során közelítésekkel is éltem, látható, hogy a nagyobb méretű alkatrészekhez nagyobb Biot szám tartozik, ami megfelel a várakozásaimnak. A kapott eredmények alapján a 4036-os és 5040-es kondenzátorok esetében a Biot szám értéke átlépi a korábbiakban ismertetett 0,1-es értékű határt, ezért jelentős tranziens hibát hozhat a rendszerbe, hogy a Biot szám megnő. Bizonyos modellezési feladatokhoz még a 0,2-es értéket is elfogadják egyes irodalmak (pl. [28][29]), így feltehetőleg a modellezési eredmény elfogadhatósága nem ezen az értéken fog múlni.

7 Alkatrészek skálázhatóságának vizsgálata

Ebben a fejezetben ismertetem az egyes alkatrészek mérési eredményeit, összehasonlítom a mért görbét a modellezett görbékkel a 6.1-ben bemutatott elvek alapján. Az eredmények alapján továbbfejlesztési lehetőségeket javasolok.

7.1 Mért hőmérsékleti görbék

Az egyes alkatrészek mért melegedési görbék részletét tartalmazza a 7-1. ábra tartalmazza.



7-1. ábra – Az egyes alkatrészekon mért melegedési görbék

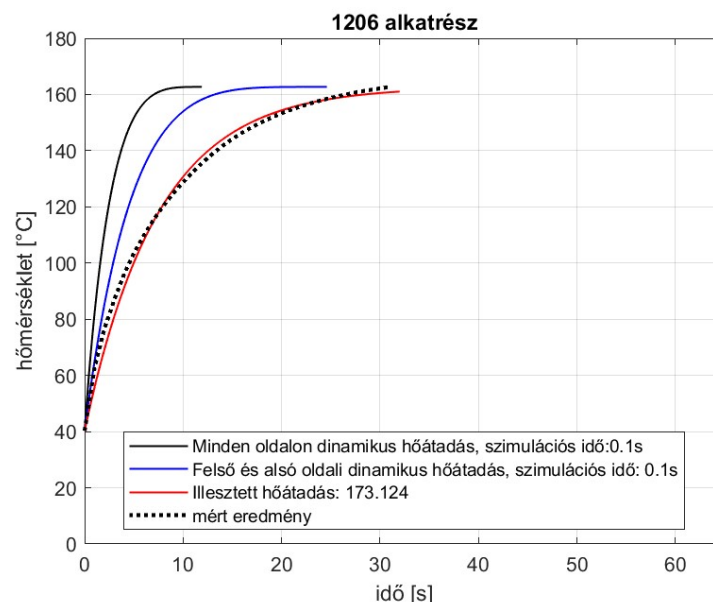
Az eredményeken elkülönül a 1812-es és 3025 kerámia kondenzátorok melegedése, a jobb hővezetésükből fakadóan ezek melegedése gyorsabb, mint a hasonló méretkódú fólia kondenzátorok esetében. A 1206-os, 2824-es görbék közötti eltérés szignifikáns. A 4030, 4036 és 5040-es kondenzátorok görbéi közötti különbség jóval

kisebb, ahogy az alkatrészek relatív méretkülönbsége is, azonban nagy mértékben különböznek ezek már pl. a 2824-es esetében mért értékektől.

7.2 Fóliakondenzátorok

Az eredmények taglalása előtt ismét hivatkozom a 6.1-es fejezetben felállított modellezési elvekre. A piros színű görbe az 6.3 fejezetben ismertetett illesztett fix, átlagos hőátadási együtthatóval számolt melegedés – ez általában minden esetben jól adja vissza a mért eredményt. Fontos megjegyezni, hogy telítés után a görbék nem számolódnak tovább, illetve közös időskálán ábrázoltam az eredményeket a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében.

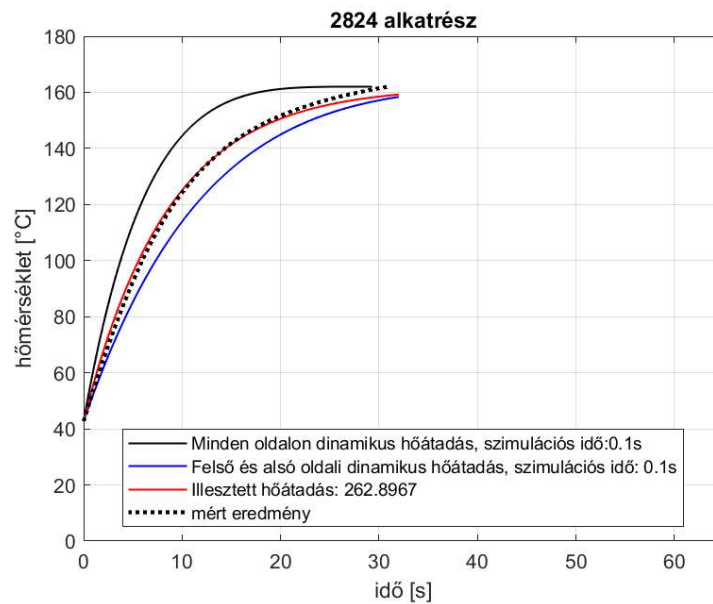
A 7-2. ábrán láthatóak a 1206-os alkatrész esetében kapott eredmények.



7-2. ábra - 1206-os alkatrész szimulált és mért melegedése

Látható, hogy a teljes felületre számított hőátadással kapott eredmény jóval gyorsabb melegedést eredményezett a mért görbéhez képest. Az oldalsó felületeket elhanyagolva közelebbi eredményt kaptam, ez adódhat az alkatrész kis méretei és az ehhez kapcsolódó korábbi feltételezésem (6.1 fejezet) miatt. Érdekes módon még így is túlló mindkét modell alaposan a kapott eredményekhez képest.

A 7-3. ábrán a 2824-es alkatrész eredményei láthatóak.



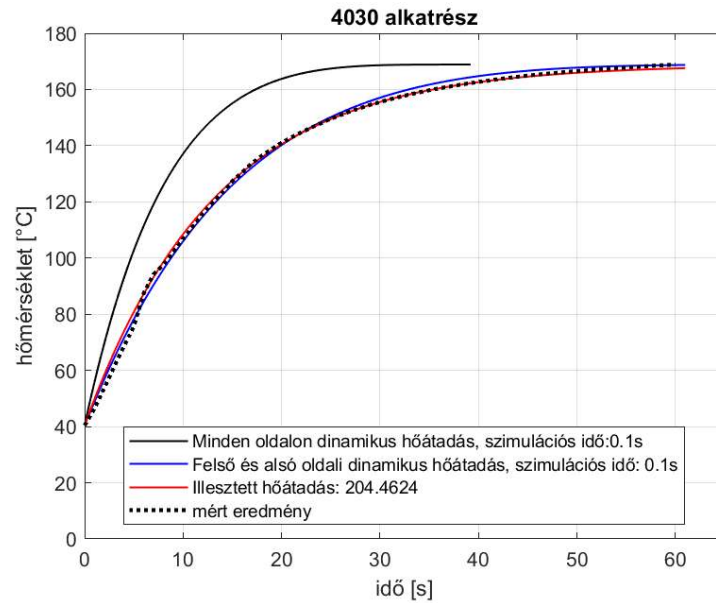
7-3. ábra - 2824-os alkatrész szimulált és mért melegedése

Ebben az esetben az oldalfelületeken történő hőátadást elhanyagolva a mérthez képest már lassabb melegedési tapasztalható. Minden oldalon figyelembe véve azonban a 1206-os alkatrészhez képest kisebb különbséggel követik a modellek a tényleges alkatrész melegedést. Ennél az alkatrésznél a legpontosabb illeszkedést a felső és alsó oldali melegedés adja.

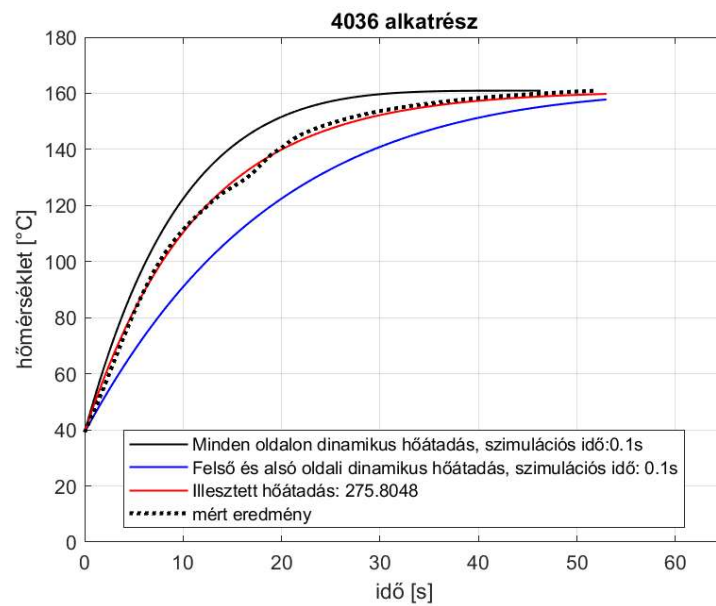
A 4030-as alkatrész eredményei láthatóak a 7-4. ábrán. A fekete és kék görbék egymáshoz képesti különbsége hasonló a 1206 és 2824-es alkatrészek esetében látottakhoz. Az oldalsó hőátadást elhanyagolva a szimuláció eredménye ráillik a mért görbére. Azonban ez az eredmény önmagában nem jelenti azt, hogy az oldalsó hőátadás elhanyagolható lenne, csak azt, hogy a modellezés szempontból ez a felírás adott jól közelítő eredményt. A méretskála eddigi trendjeihez képest ez az eredmény esetleg további vizsgálatokat igényelhet.

A 7-5. ábrán a 4036-os, a 7-6. ábrán az 5040-es alkatrészek görbéi láthatóak. Ilyen méretek esetében az alkatrészek közötti relatív méretkülönbség jóval kisebb, mint például a 1206 és a 2824-es méretek esetében (ld. 4-1. táblázat). Ezen alkatrészek esetében a Biot szám átlépi a korábban tárgyalt 0,1-es határt, közelített értéke az alkatrészekre rendre 0,183 és 0,197 (ld. 6-4. ábra). Ebből adódóan az egycellás közelítésből fakadó hiba nagyobb mértékű. Az oldalfalakon való hőátadás behozása viszont a modellezés szempontjából egyre pontosabb modellezési eredményeket produkált.

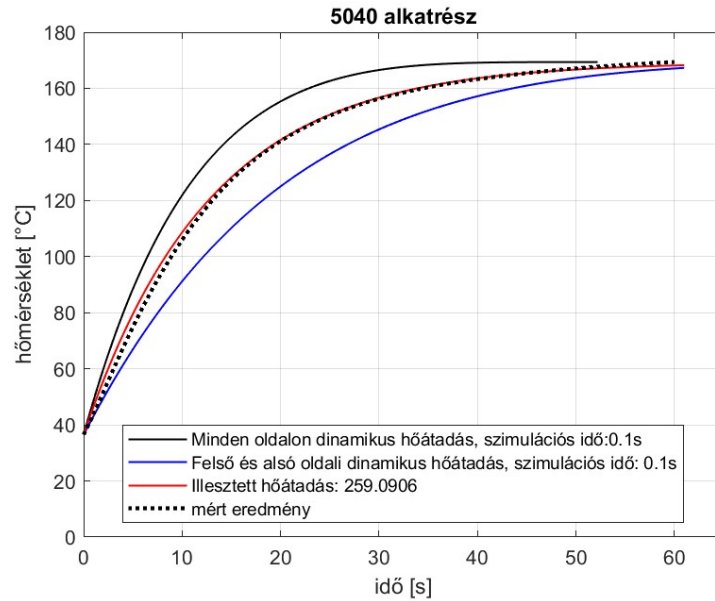
Az eredmények jellegre hasonlóak, az egyre nagyobb alkatrészek esetében a minden oldalon való melegedés szimulációja kisebb hibával közelíti a mért görbét, mintha az oldalfalakat elhanyagolnám.



7-4. ábra –4030-as alkatrész szimulált és mért melegedése



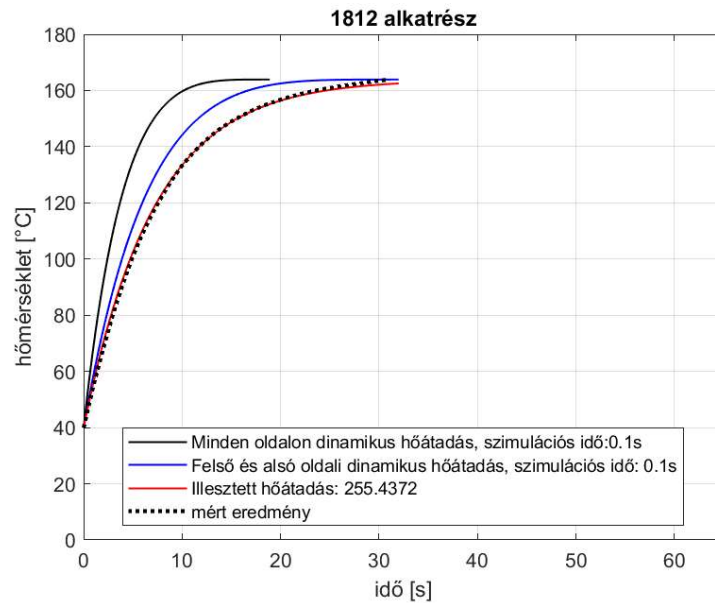
7-5. ábra - 4036-as alkatrész szimulált és mért melegedése



7-6. ábra - 5040-as alkatrész szimulált és mért melegedése

7.3 Kerámia kondenzátorok

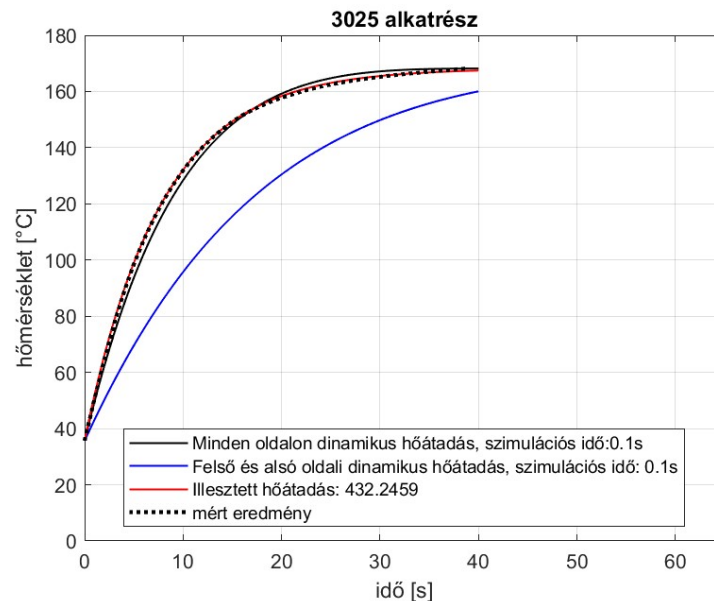
A 7-7. ábrán látható a 1812-es kondenzátor esetében kapott eredmény. Ennek az alkatrésznek a magassága a 1206-oshoz képest csak 0,2 mm-rel nagyobb, mindössze 1,4 mm-es.



7-7. ábra - 1812-es alkatrész szimulált és mért melegedése

Az oldalsó felületeken levő hőátadást elhanyagolva a kapott görbe hasonló hibával rendelkezik, mint a nagyobb alkatrészek eredményei esetén a minden oldallal

számolt. A 1206-oshoz hasonlóan a minden oldallal történő számolás jóval gyorsabb felfutást eredményez. A következő 7-8. ábrán a 3025-ös alkatrész eredményei láthatók.



7-8. ábra - 3025-ös alkatrész szimulált és mért melegedése

Ebben az esetben a minden oldallal számolt melegedés és a mért eredmény egybe esik, az oldalfelületeket elhanyagolva a kapott görbe a mérthez képest jóval lassabb melegedést ír le.

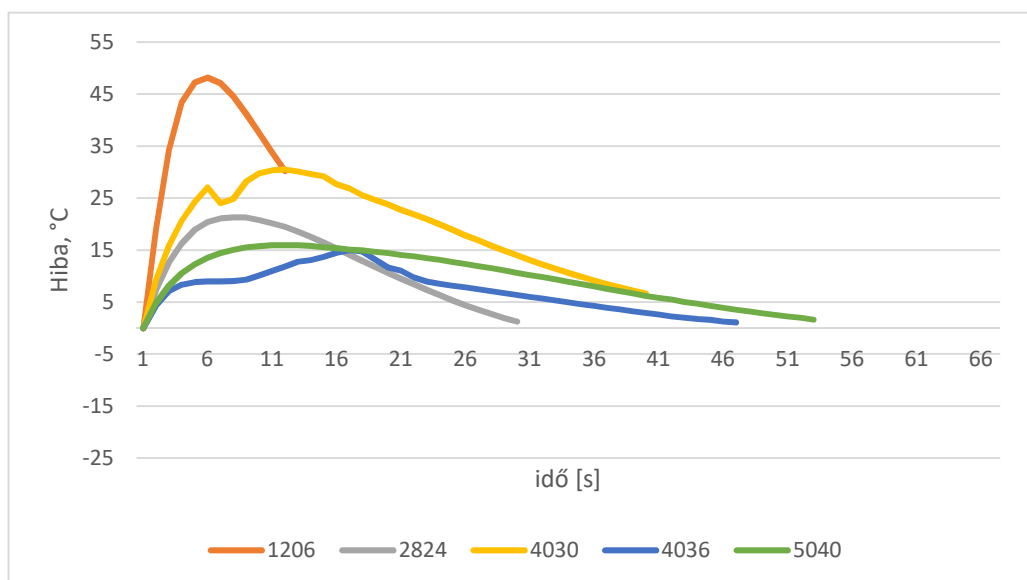
Összehasonlítva a kerámia és a fóliakondenzátorokat látható, hogy a kerámia kondenzátorok jobb hővezetési tulajdonságaiból fakadóan (és a kisebb Biot számokból következően) gyorsabban melegsznek, így a közvetlen összehasonlítás (azonos méretekkel) a skálázhatóság szempontjából nem lehetséges. Az látszik azonban, hogy a mostani eredmények alapján nagyjából a 2824-es alkatrészig bezárólag alkatrész alapanyagtól függően azok a modellek közelítik jobban a melegedést, amelyek a szerelőlemezhez hasonlóan alsó-felső melegedési modellekkel vannak közelítve. Efelett a méret felett az oldalfalak szerepe már nem elhanyagolható. A 1206-os alkatrész és a 1812-es alkatrész vastagsága összemérhető a szerelőlemez vastagságával.

Fontos megállapítása a fejezetnek, hogy 1206-os méret alkatrészek alatt nagy valószínűséggel a fenti modellek jócskán túllőnek az alkatrész melegedésén, így ilyen kis méretre a Bejan-féle modellek valószínű már nem alkalmazhatóak kellő pontossággal.

7.4 Hibák analízise

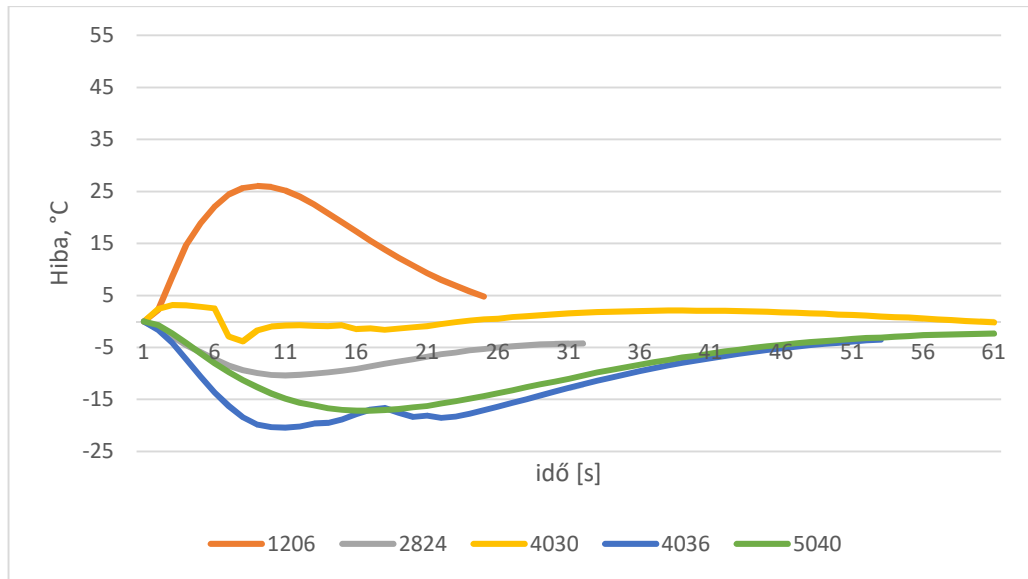
A 7.2-es és 7.3-as fejezetben bemutatott eredmények hibáját (azaz a mért és a számolt görbék közötti különbséget) ábrázolják a 7-9., 7-10., 7-11. valamint 7-12-es ábrák. A hiba előjele azokban a pontokban pozitív, ahol a szimulációs eredmény meghaladta a valós mért melegedés értékét.

A fóliakondenzátorok esetében a 7-9. ábrán minden oldalfelületen számolt hőátadás esetén az látható, hogy a fenti konvenció szerint a hiba szinte végig pozitív, azaz a szimulálta melegedés gyorsabb a valós mért értékekhez képest. 1206-os alkatrész esetében a maximális hiba 48 °C, 4030 esetében max. 30 °C, 5040 alkatrész esetében már csak max. 15 °C volt.



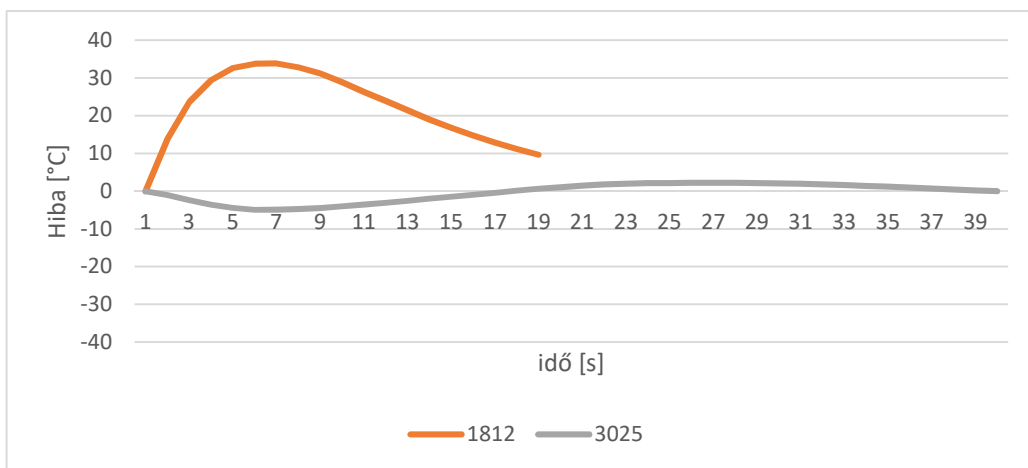
7-9. ábra – Fóliakondenzátorok esetén tapasztalt hiba a minden oldali hőátadással szimulált eredmények és a mérési eredmények között

A 7-10-es ábrán láthatóak az oldalsó hőátadást elhanyagolva kapott értékek. Az ábrán látható, hogy a hibák értékei eltolódnak a negatív tartomány felé, azaz, ahogy az előző fejezetekben is látható volt, a szimuláció növekvő alkatrész méretek esetében az oldalsó hőátadást elhanyagolva lassabb melegedést eredményez a valós mérésekhez képest. Ezzel együtt a szimuláció pontossága bizonyos alkatrészek esetében egészen elfogadható közelítéseket eredményez.

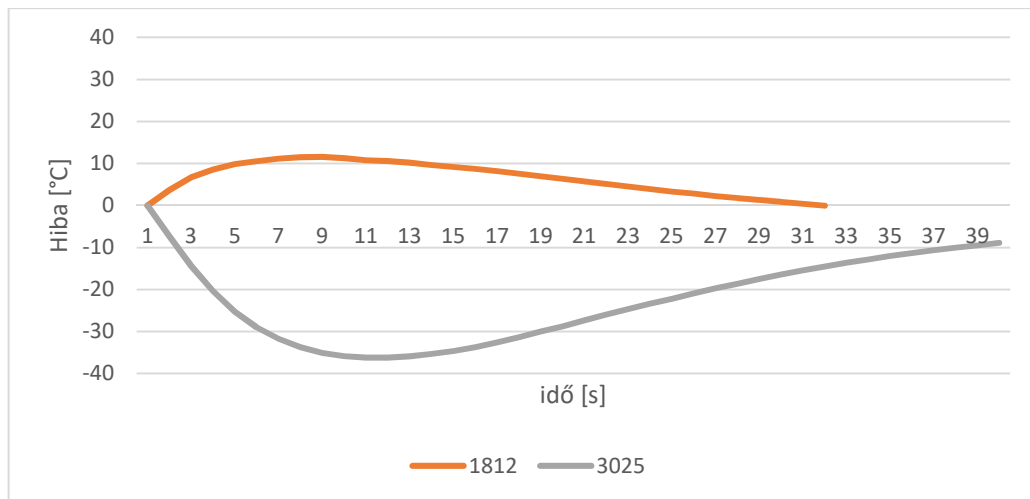


7-10. ábra – Fóliakondenzátorok esetén tapasztalt hiba a csak felső- és alsó oldali hőátadással szimulált eredmények és a mérési eredmények között

A 7-11-es és 7-12-es ábrákon a kerámia kondenzátorok hibái láthatóak. 1812-es alkatrész esetében a hiba jellege nagyon hasonló a 1206-os fóliakondenzátor eredményéhez. 3025-ös alkatrész esetében minden oldallal kalkulált hőátadás esetén a hiba végig alacsony mértékű. A 7-12. ábrán látható, hogy az FR4 lemezzel összemérhető nagyságú 1812-es alkatrész esetében az oldalsó hőátadás elhanyagolása kisebb hibát okoz a szimuláció során, a 3025-ös alkatrész esetében viszont már jelentősen alulbecsüli a melegedést.



7-11. ábra - Kerámia esetén tapasztalt hiba a minden oldali hőátadással szimulált eredmények és a mérési eredmények között



7-12. ábra – Kerámia kondenzátorok esetén tapasztalt hiba a csak felső- és alsó oldali hőátadással szimulált eredmények és a mérési eredmények között

Összefoglalva az alfejezet eredményei hasonló konklúzióra vezetnek, mint egy alfejezettel korábban. Egy bizonyos alkatrész méret alatt az alsó-felső melegedési megközelítéssel kapunk kisebb hibát, míg a nagyobb méretű alkatrészekenél az oldalfalak melegedésével is számolni szükséges.

7.5 Továbbfejlesztési tervek, kitekintés

Az utóbbi alfejezetekben ismertetett szimulációs eredmények körét bővíteni kell majd további alkatrészekben végzett kísérletek és számítások bemutatásával. A teljes skálázhatóságra vetíthető kijelentésekhez szükséges tovább vizsgálni a kiterjedtebb mérettartományokat, alkatrész (azaz alapanyag) típusonként.

Fontos kiemelni, hogy a továbbfejlesztési tervekben a hőátadási együtthatók összehasonlítását is szeretném elvégezni az illesztett és számolt értékek összevetésében.

Az egycellás közelítés egy bizonyos alkatrész méret fölött, a Biot számok növekedésével veszít a pontosságából. Hasonlóan egy bizonyos Biot szám illetve alkatrész méret alatt (a 1206 és 1812-es alkatrészek eredményei alapján) lehetséges, hogy az alkatrészek önálló melegedésének modellezése a saját külső dimenziói mentén elhanyagolhatóvá válik, és a hőátadási kalkulációt magára a teljes PCB lemezre érdemes végezni (természetesen a nagyobb alkatrészeket külön kezelve). Ezzel kvázi a kisméretű alkatrészek „beleolvadnának” a PCB felületére elvégzett számításokba, és csak a 2824 méretkódú alkatrészekről kezdve volna értelme külön-külön számolni a szerelvényen melegedő alkatrészek különálló profiljait.

A további kísérletek és az alkatrészek paramétereinek pontosabb meghatározásával a szimuláció érvényességi köre (mind kicsi, mind pedig a nagyobb alkatrészek szempontjából) és pontossága tovább javítható.

8 Összegzés

Munkám során megismerkedtem a gőzfázisú forrasztás, valamint a hőátadás elméleti hátterével. Az irodalomkutatás során megismertem azokat az elveket, amelyekkel egy test felszínének különböző határfelületei esetében kiszámíthatók a test melegítését leíró paraméterek.

A paraméterek és az elméleti peremfeltételek ismeretében, a Newton-féle hőátadási egyenletet megoldva megkaptam az alkatrészt modellező kompozit cella hőmérsékletének változását az idő függvényében. Meghatároztam egy kísérlettervet, majd elkészítettem mérési összeállításokat különböző méretű alkatrészekkel a probléma skálázhatóságának megfigyelése szempontjából. A kondenzációs hőátadás során vizsgáltam a hőátadási együttható szétválását különböző (alsó és felső) felületek esetében. Ezeket az eredményeket felhasználva egyszerűsítésekkel éltem a modellezés során.

Az egyes alkatrészek anyagösszetételét és Biot számát meghatároztam közelítő módon. Az elkészített fizikai mintákkal validációs méréseket folytattam. A mérési görbék alapján kiszámítottam az alkatrészek melegedését leíró átlagos hőátadási együtthatókat. Összehasonlítottam a mért és szimulált eredményeket a különböző alkatrésztípusok és modellezési megközelítések szerint. Az általam bemutatott kísérletsorozat és modellezési elv teljesen újszerű a téma szakirodalmi és ipari megoldásait figyelembe véve.

A fentiek alapján a következő pontokat tudom a munka jelenlegi állása szerint állítani:

- megállapítottam, hogy a különböző méretkódú felületszerelt kondenzátorok méretének növekedésével a Biot számuk változik, megnő. Paramétereik függvényében, a 4030-as alkatrészmérettől felfelé már az egyre nagyobb hibát jelző 0,1-0,2-es tartományban helyezkednek el a kapott Biot számértékek;
- megállapítottam, hogy a 2824-es alkatrészig bezárólag az alkatrészek melegedését az alsó-felső hőátadás modellezésével pontosabban lehet közelíteni, mintha az oldalfalak melegedését is beleszámítanánk a modellezésbe.

- általános megállapítás, hogy az alkatrészek méretének csökkenésével (1812-es méretek alatt) a Bejan féle modell alaposan túlbecsüli a melegedést, még az egyszerűsített, alsó-felső hőátadás leírás alkalmazásával az oldalfalak hőátadásának bevonása nélkül is. Érdekes lehet majd a jövőben a szerelőlemez melegedésével együtt vizsgálni és modellezni az alkatrész melegedését.

Továbbfejlesztési lehetőségként javasoltam az alkatrészek skálájának további kiterjesztését, az egyes alkatrész alapanyagok szerinti teljes skálavizsgálat és a pontosabb hipotézis igazolás érdekében. A kísérletek bővítésével azt várom, hogy meghatározhatók legyenek anyagi paraméterek függvényében is olyan határvonalak, amelyek alatt:

- az alkatrész melegedése esetlegesen a szerelőlemezzel együtt kezelhető;
- a szimulációval jó pontossággal és gyorsan számítható az alkatrész melegedése;
- az egycellás közelítés már nem, vagy alkatrésztípusonként hangolva alkalmazható (rendre az alkatrészek méretének és Biot számának növekedésének figyelembe vételével).

A végső cél egy olyan egyszerű szimulációs megoldás lehet, amely az Ipar 4.0 elveinek megfelelően felépített, hálózatra kötött szerelősoron a beérkező Gerber fileok alapján feldolgozza a szerelőlemez felületén lévő alkatrészpoblációt és rövid idő alatt (ami a gyártási előkészítés idejében ésszerű időtartamnak tekinthető) predikciót ad a szereléshez előkészített termék profiljáról, ezzel segítve az esetleges beállítást a jobb forrasztási minőség érdekében.

Irodalomjegyzék

- [1] B. Illés, A. Skwarek, A. Géczy, O. Krammer, D. Bušek, Numerical modelling of the heat and mass transport processes in a vacuum vapour phase soldering system, *Int. J. Heat Mass Transf.* 114, 2017, pp. 613–620.
- [2] A. Géczy, Heat transfer coefficient differences on printed circuit board during vapour phase reflow soldering, *Int. J. Heat Mass Transf.* 109, 2017, pp. 167–174.
- [3] A. Géczy, Investigations into the Process of Vapour Phase Soldering, Ph.D. Dissertation, Budapest University of Technology and Economics, 2014
- [4] IBL Technologies, High quality vapor phase reflow soldering, Arizona-Sonora, 2012, (hozzáférés helye: https://www.smta.org/chapters/files/Arizona-Sonora_IBL_SMTA_AZ_Expo_2012Dec4.pdf, hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [5] H. Leicht, A. Thumm, Today's vapour phase soldering – an optimized reflow technology for lead free soldering, in: *Proceed. of Surf. Mount Tech. Assoc. Intern. Conf.*, Orlando, USA, 2008 (hozzáférés helye: <http://www.smtnet.com/library/files/upload/Vapor-Phase-Soldering.pdf>, hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [6] W. Leider, *Dampfphasenlöten: Grundlagen und praktische Anwendung* (first ed.), Eugen G. Leuze Verlag, 2002
- [7] Y. A. Çengel, *Heat Transfer: a Practical Approach* (second ed.), 2003, pp. 336-337
- [8] A. Bejan, Film condensation on an upward facing plate with free edges, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, 1991, pp. 582-587
- [9] J. Gerstmann, P. Griffith, Laminar Film Condensation on the Underside of Horizontal and Inclined Surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1967, pp. 567-580
- [10] Y. Tao., D. Ding, T. Li, Influence of protective atmosphere on the solderability and reliability of OSP-based solder joints, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, pp. 4898–4907
- [11] B. K. Synkiewicz, A. Skwarek, K. Witek, Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering (VPS), *Vol. 26 Issue: 1*, 2014, pp.8-11
- [12] L. Livovsky, A. Pietrikova, Real-time profiling of reflow process in VPS chamber, *Soldering & Surface Mount Technology*, *Vol. 29 Issue: 1*, 2017, pp.42-48,

- [13] A Géczy, B Illés, Zs Illyefalvi-Vitéz Modeling Method of Heat Transfer During Vapour Phase Soldering Based on Filmwise Condensation Theory, Int. J. Heat Mass Transfer, 67, 2013, pp. 1145-1150.
- [14] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, Heat and Mass Transfer, 2015, pp. 238-241
- [15] M. Rencz; A. Poppe; E. Kollar; S. Ress; V. Szekely, Increasing the accuracy of structure function based thermal material parameter measurements, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 28/1, 2005, pp. 51-57
- [16] M.N. Özisik, Heat Conduction, John Wiley & Sons, Inc.,1993
- [17] B Illés, A Géczy Numerical Simulation of Condensate Layer Formation During Vapour Phase Soldering, Applied Thermal Engineering 70, . 2014, pp. 421-429
- [18] I. Bozsóki, A. Géczy, B. Illés, Component level modelling of heat transfer during vapour phase soldering with finite difference ADI approach, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 128, January 2019, Pages 562-569
- [19] Automation Creations, Inc.. (2009), MatWeb, Your Source for Materials Information , (hozzáférés helye: <http://www.matweb.com/>. hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [20] The Engineering ToolBox, Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Applications, (hozzáférés helye: <http://www.engineeringtoolbox.com/> hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [21] S. T. Davitadze, S. N. Kravchun, B. A. Strukov, B. M. Goltzman, V. V. Lemanov, S. G. Shulman, Specific heat and thermal conductivity of BaTiO₃ polycrystalline thin films ,Applied Physics Letters 80(9), 2002, pp. 1631-1633
- [22] V. Vishwakarma, C. Waghela, A. Jain, Measurement of out-of-plane thermal conductivity of substrates for flexible electronics and displays, materialstoday, Volume 17, Issue 4, 2014, pp. 163-174
- [23] Solvay Inc., Properties of Galden HT170, (hozzáférés helye: <https://www.solvay.com/en/markets-and-products/featured-products/Galden.html>, hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [24] Pico Technology, Thermocouple selection and use, (hozzáférés helye: <https://www.picotech.com/library/application-note/thermocouple-application-note>, hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [25] B. Illés, A. Géczy: Investigating the heat transfer on the top side of inclined printed circuit boards during vapour phase soldering, Applied Thermal Engineering 103, 2016, pp. 1398-1407

- [26] Isola Group, DE104 Laminate and Prepreg Data Sheet, (hozzáférés helye: <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/DE104-Laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-0317.pdf>, hozzáférés ideje: 2018. október 25.)
- [27] A. M. Brown, A step-by-step guide to non-linear regression analysis of experimental data using a Microsoft Excel spreadsheet, *Comput Methods Programs Biomed.* 65(3), 2001, pp. 191-200.
- [28] M. S. Rahman, *Food Properties Handbook*, CRC Press, 2009, pp 650.
- [29] Earle RL, Earle MD, *Unit operations in food processing – sec. ed. - (Pergamon Commonwealth and International Library) 1983-2004.* (hozzáférés helye: <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/htrtheory4.htm> hozzáférés ideje: 2018. október 25.)

Függelék

Nómenklatúra

Paraméterek, latin jelöléssel:		Alsó indexek:	
Q	termikus energia [J]	amb	környezet
h	hőátadási együttható [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$],	l	folyadék
A	felület [m^2]	lg	folyadék-gáz
T	hőmérséklet [K]	s	szaturált
c_p	fajlagos hőkapacitás [$\frac{J}{K \cdot kg}$]	b	test
m	tömeg	g	gáz
i	látens hő [$\frac{J}{kg}$]	GG	Gerstmann-Griffith
k	hővezetési tényező [$\frac{W}{m \cdot K}$].	∞	állandósult állapot
L_c	karakterisztikus hossz [m]	i	kezdeti
Nu	Nusselt szám, dimenzió nélküli	TOP	felső felület
Ra	Rayleigh szám, dimenzió	BOT	alsó felület
g	gravitációs állandó [$\frac{m}{s^2}$]		
V	térfogat [m^3]		
Bi	Biot szám, dimenzió nélküli		
Paraméterek, görög jelöléssel:			
γ	felületi feszültség [$\frac{J}{m^2}$].		
τ	időállandó [s]		
ρ	sűrűség [$\frac{kg}{m^3}$]		
μ	viszkozitás [$\frac{kg}{m \cdot s}$]		