



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

Gőzfázisú forrasztás kondenzátumának hőátadási vizsgálata különböző anyagú hordozókon

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat
2016

Szerző: Fazekas László, MSc. villamosmérnök hallgató

Témavezető: Dr. Géczy Attila, adjunktus

Elektronikai Technológia Tanszék

Budapest, 2016.

Tartalomjegyzék

1 Bevezető	3
2 Irodalmi áttekintés.....	4
2.1 A felületszerelési technológia.....	4
2.2 A gőzfázisú forrasztás folyamata.....	5
2.2.1 Történeti összefoglaló.....	5
2.1.2 A folyamat bemutatása	5
2.1.3 A Galden-folyadék.....	6
2.3 Hőátadás vizsgálata.....	8
2.3.1 Newton-féle hőátadási együttható	8
2.3.2 A Nusselt-szám értelmezése a hőáramlásban	8
2.3.3 Halmazállapot változás nélküli folyamatok hőátadása	9
2.3.4 Hőátadás halmazállapot változás közben	10
2.3.5 A hőátadási együttható meghatározása.....	13
3 Munka előzményei	16
3.1 Korábbi tanszéki kutatások	16
3.2 Szimulációs eredmények	18
4 Hőmérsékletmérési eszközök	19
4.1 Hőelemtípusok	19
4.2 Adatgyűjtési módszerek.....	23
5 Munkaterv, kísérletterv.....	25
5.1 Hőkapacitások kiszámítása a hordozók méretéből	25
5.2 Mérési eszközök és elrendezések	26
5.3 Kalibrációs mérések.....	29
6 Mérési eredmények.....	31
6.1 Mérési eredmények kiértékelése.....	31
6.2 Termikus diffuzivitás vizsgálata	40
6.3 További megjegyzések, jövőbe tekintés	40
7 Összefoglalás.....	42
8 Köszönetnyilvánítás	43
Ábrajegyzék.....	44
Irodalomjegyzék.....	46

1 Bevezető

Napjainkban az elektronikus eszközök egyre nagyobb teret nyernek mindennapi életünkben, amelynek egyre fontosabb kérdése a méretcsökkentés és a funkciósűrűség növelés megvalósíthatósága. A fizikai korlátok és a méretek csökkenésének következtében az elektronikai technológiában egyre hangsúlyosabbá vált a felületi szereléstechológia. Ezen folyamat egyik fő lépése az újraömllesztéses forrasztás, amelynek során a forrasztanyagot magas hőmérsékleten megömllesztjük, amely nedvesíti a kontaktusfelületeket, majd lehűlés következtében az megszilárdul, és kialakul a forrasztott kötés. Az újraömllesztés megvalósításának egyik lehetősége a gőzfázisú forrasztás, amely napjainkban még nem számít a legelterjedtebb módszerek, viszont az ólommentes forrasztás térnyerése következtében alkalmazása egyre gyakoribb.

Dolgozatom célja a hőátadási folyamat vizsgálata volt különböző hordozókon a gőzfázisú forrasztási eljárás során. Vizsgálatom motivációja az volt, hogy míg elterjedtebb forrasztási technológiák esetén, mint az infrafűtéses vagy kényszerkonvekciós technológia, részletes leírásokat találhatunk a hőátadásról és az különböző anyagi paraméterek hatásáról, addig gőzfázisú forrasztás során a szakirodalom nem tárgyalja részletességgel a különböző anyagú hordozókon végzett hőtranszportot, így az időszerű munkámmal ebben az irányban végeztem kutatásokat.

Munkám során bemutatom a gőzfázisú forrasztás folyamatát, illetve módszereit, valamint összefoglalom a hőátadás vizsgálatának elméletét. Ennek során kitérek a különböző orientációjú esetekre, illetve munkám előzményeként ismertetem az eddigi tanszéki kutatások eredményeit. Ezt követően mérésekkel demonstrálok a filmkondenzáció hőátadását vízszintes helyzetben két konstrukcióban, azonos felületű, illetve azonos hőkapacitású, de különböző hordozókra. Ehhez FR4-es, Rubalit kerámia, poliimid fólia, illetve FR4 és alumínium kompozit hordozókat használok. Ezen eredményeket kiértékelem a mérések végeztével, összevetem az elméleti kalkulációkkal és levonom ezekből a releváns következtetéseket.

2 Irodalmi áttekintés

2.1 A felületszerelési technológia

Felületi szereléstechológia (Surface Mount Technology) lényege, hogy az alkatrészeket a nyomtatott huzalozású lemez felületén rögzítjük a panelen kialakított kontaktusfelületek segítségével, úgynevezett pad-ekkel. A technológia során a speciálisan e célra kialakított alkatrészek elektromos kivezetései közvetlen kapcsolatba kerülnek ezekkel a kontaktusfelületekkel, és a rögzítés a lemez ugyanazon oldalán történik, tehát nem különböztetünk meg alkatrész- illetve forrasztási oldalt, mint furatszerelési technológiánál [1].

Az eljárásnak két fő megvalósítási technológiája létezik: a hullámforrasztás és az újraömlésztéses forrasztás (reflow). Utóbbi technológiának a lépéseit pontokba szedve röviden ismertetem:

1. Forraszpasztta felvitel a kontaktusok felületére
2. Felvitt paszta ellenőrzése automatikus optikai inspekciós (AOI) berendezéssel
3. Alkatrészbeültetés
4. Beültetett alkatrész ellenőrzése (pontosság, polaritás)
5. Forrasztás
6. Forrasztás ellenőrzése

A forraszpasztta megömlésztésének eljárása minden esetben hőközléssel történik, viszont annak módja különböző lehet. Alkalmazhatunk úgynevezett infrakemencés eljárást erre a célra, viszont ennek hátránya, hogy nem biztosított az egyenletes hőmérsékleteloszlás a sugárzás eltérő abszorpciója/reflexiója miatt. Kényszerkonvekciós megoldás során a hőátadás folyamata az áramlási paraméterektől és a közegtől függ, amely segítségével az áramköri panel felmelegíthető a megömlésztési hőmérséklet fölé. Hátrányként ebben az esetben a rossz hővezetés és az egyenetlen hordozó fűtés említhető meg, amely pl. árnyékhatások végett alakulhat ki.

2.2 A gőzfázisú forrasztás folyamata

2.2.1 Történeti összefoglaló

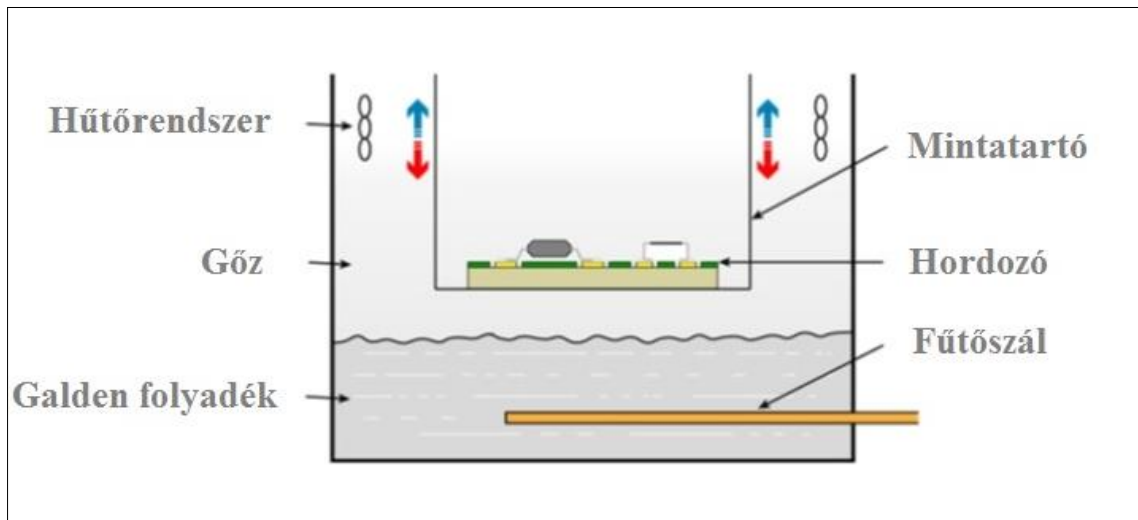
A gőzfázisú forrasztás a felületszerelési technológiában alkalmazott újraömlésztéses forrasztás (reflow) egyik legelterjedtebb módszere a már említett kényszerkonvekciós és az infráűtéses megoldás mellett. A folyamatot a Western Electric vállalat fejlesztette ki az egyesült államokbeli Princetonban, még az 1970-es évek elején, de az iparban csak a 80-as években terjedt el. A gőzfázisú forrasztási eljárást az egyik legszimplább forrasztási eljárásaként említi a szakirodalom alkalmazás szempontjából az SMD technológiában, ugyanakkor a hőátadási folyamat komplex. Hátrányként meg kell említenünk a gőzfázisú forrasztó berendezések karbantartásának összetettségét, illetve azt, hogy olyan hőátadó folyadékokat alkalmaztak a korai időszakban hőátadó közegként, amelyek káros környezeti hatásokat mutattak. Kezdetben csak nagyon kevés mérnök látott jelentősebb lehetőséget a folyamatban, ezért új vezérlést, felszereléseket és folyadékokat fejlesztettek ki. A Galden-folyadék megjelenésével újfent előtérbe került az újraömlésztéses forrasztás ezen formája [2].

2.1.2 A folyamat bemutatása

A gőzfázisú forrasztás alapelve a kondenzációs hőátadás effektusán alapszik. A folyamat során egy speciális folyadékot melegítünk (amely manapság leggyakrabban Galden-folyadék) a tartály alján egy kontakt melegítő segítségével (2-1. ábra). Amikor a folyadék eléri a forráspontját, a folyadék felszíne felett gőztakaró jelenik meg, amely gőzfelhő tartalmazza a folyadék látens hőjét is, melyet fázisátalakuláskor vett fel a gőz. A forralást folytatva egy egységes gőztakaró kezd kialakulni a folyadék fölött egészen addig, ameddig el nem érjük a harmatpontot. Ezen a hőmérsékleten a gőz telítettsége eléri a 100%-ot, tehát ekkor a közeg teljesen oxigénmentes.

Amint egy alacsonyabb hőmérsékletű testet helyezünk a gőztérbe, megindul egy lecsapódási folyamat, amely során a bemeztett test felszínén kondenzátum jelenik meg. A másodperc törtrésze alatt vékony folyadékréteg képződik a testen, ezt filmszerű kondenzációnak nevezik. A folyamat egészen addig tart, ameddig a kicsapódott folyadékkal borított test hőmérséklete eléri a gőzfelhő hőmérsékletét. Ez az állapot úgy is bekövetkezhet, hogy test hőmérséklete megegyezik a folyadék forrásponti

hőmérsékletével, amennyiben a gőzképződés folyamatos. A folyamat végén a lecsapódott folyadék réteg ismét gőzzé alakul, hiszen a test ekkor már elérte a forráspontot, így az szárazon távozik a tartályból.



2-1. ábra: Gőzfázisú forrasztó berendezés keresztmetszeti ábrája [3]

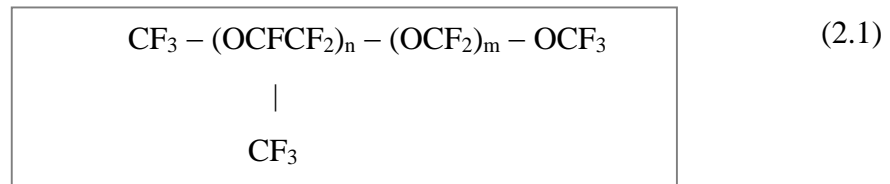
A bemejtendő test esetünkben forraszpasztával felnyomatott, alkatrészekkel beültetett hordozó (Nyomatott Huzalozású Lemez, NYHL) lesz. Bemejtéskor a paszta olvadáspontjának elérésekor megömlik, és kialakul a forrasztott kötés, miközben a felszínre lecsapódik a folyadék.

Az alapelv tehát, hogy amikor a hordozót a gőztérbe merítjük, az lecsapódik rá, és látens hője segítségével melegíti a lemezt a forrásponti hőmérsékletig. Így előnyként megemlíthetjük, hogy a gőztérbe merített hordozó, illetve a beültetett alkatrészek is biztosítva vannak a túlmelegedés ellen, ugyanis a rendszer maximális hőmérséklete a fentebb tárgyaltak alapján nem lépheti túl a folyadék forráspontjának értékét. További előnye, hogy lehető legjobb forrasztás-nedvesítés érhető el ezzel a módszerrel a költséghatékonyság függvényében. A forrasztáshoz használt állományok kisebb alapterületűek, illetve hatékonyabb energiafelhasználásúak, mint a kényszerkonvekciós berendezések, ezáltal helyet és energiát takaríthatunk meg a termelési folyamatban [4] [5].

2.1.3 A Galden-folyadék

A Galden-folyadék egy inert perfluor-poliéter típusú folyadék, amely oxigén, fluor, illetve szén alkotóelemekből épül fel. Ez egy kiváló nedvesítési tulajdonságokkal

rendelkező, alacsony viszkozitású átlátszó folyadék, amelynek forráspontját a benne található molekulaláncok méretbeli eloszlása, illetve hossza határozza meg.



2-2. ábra: A Galden-folyadék kémiai összetétele

A folyadék néhány fontosabb tulajdonságai:

- nagy termikus stabilitás,
- széles üzemi hőmérséklet tartomány,
- jó dielektomos tulajdonságok,
- kiváló kémiai semlegesség,
- jó kompatibilitású fémekkel, műanyagokkal és elasztomerekkel,
- nincs automatikus gyújtópont,
- egészségre és környezetre ártalmatlan.

A különböző, elterjedt forrasztóvezetekhez különböző forráspontú Galden típusok kaphatók, például ólommentes forrasztás esetén 230 °C-osat használnak, de létezik 270 °C forrásponttal rendelkező folyadék is. Hátrányként megemlíthetjük magas árát, amely kilogrammonként 100 \$-os nagyságrendbe esik [6]. Alacsony olvadáspontú ólommentes forrasztóanyagokhoz használnak 170 °C forráspontú folyadékot is. A Galden további felhasználása a félvezetőiparban (tisztításhoz) és a gépészetben (kenőanyag) történik.

A közelmúlt témakutatásai alapján Krammer Olivér és Garami Tamás [7] vizsgálta a mikroszerkezeti jellemzőket a VPS kötésekben, amely erősen függött a gőzréteg beállításaitól. Nemcsak a struktúrát lehet befolyásolni a különböző fűtési módszerek segítségével, hanem az intermetallikus réteg szerkezetét is. A legújabb kutatások rámutatnak a technológia gyakorlati alkalmazásaira is. A teljesítményelektronikai gyártás forrasztási folyamatlérése során a gőzfázisú forrasztás egy erősen fókuszált terület, ahogyan azt Syed vizsgálta [8]. A technológia vizsgálatát

energiahatékonysági szempontból pedig Chou és Chang [9], Hromadka [10], és Esfandyari [11] vizsgálta.

2.3 Hőátadás vizsgálata

2.3.1 Newton-féle hőátadási együttható

A hőterjedésnek három típusát különböztetjük meg; úgy, mint hőáramlást (konvekció), hővezetést és hősugárzást. Hőáramlás csak folyadékokban, illetve gázokban alakulhat ki, melynek során az anyag a melegebb tartományból a hidegebb terület felé mozdul el. Vezetés során az anyagi részecskék nem mozdulnak el makroszkopikus mértékben egyensúlyi helyzetükből. Sugárzás esetén pedig az energia, mint elektromágneses hullám terjed, amelyhez nincs szükség külső közegre [12].

A szilárd testekben lejátszódó hővezetési folyamatokat leggyakrabban az okozza, hogy a testek olyan hőmérsékletű folyadékkal vagy gázzal érintkeznek, amelyek hőmérséklete eltér a test felszíni hőmérsékletétől. A hőátadást ezek alapján úgy definiálhatjuk, mint a szilárd felszín és folyadék határán történő hőterjedés. Az áramló közeg és azt határoló felület közötti hőáram nagyságát a Newton-féle hőátadási törvény segítségével jellemezhetjük:

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_k) \quad (2.2)$$

ahol Q az átadott hőenergia [J], α a hőátadási együttható [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], A a felület nagysága [m^2], T_w a környezeti hőmérséklet, ami jelen esetben megegyezik a gőz szaturációs hőmérsékletével [$^{\circ}\text{C}$], T_k pedig a bemelegített test hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$].

2.3.2 A Nusselt-szám értelmezése a hőáramlásban

A konvekciós hőátadás értelemszerűen csak a folyadékoknál és a gázoknál lehetséges. Ennek nagysága nehezebben számítható ki, mint a hővezetésnél, a több változó miatt. A hőátadási tényező meghatározása bonyolult feladat; értékét több tényező is befolyásolja, többek között a hőátadó felület vagy az áramló közeg jellemzői. A Nusselt-függvények értelmezésébe részletesen nem térünk ki, viszont megemlíthető, hogy más-más összefüggések használatosak szabadkonvekciós és kényszerkonvekciós hőátadás esetében, illetve gőzök kondenzációja során.

Hőátadásban az áramló közeg és a fal határfelületén jellemző mennyiség a Nusselt-szám, amely dimenzió nélküli arányszám megadja a konvektív és konduktív hőátadás egymáshoz viszonyított értékét. Ezen érték többnyire 1-hez közeli, amennyiben lamináris áramlásról beszélünk, viszont aktívabb konvekció esetén (főként turbulens áramlásoknál) ez a szám elérheti a 100-as, vagy szélsőséges esetben akár az 1000-es nagyságrendet. A konduktív és konvektív hőáramlás vektorai egyszerű esetben egymással párhuzamosak, irányuk merőleges mind a felületi normálisra, mind pedig a folyadékáramlás irányára.

$$Nu_L = \frac{h \cdot L}{k} \quad (2.3)$$

ahol h a konvektív hőátadási együttható [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], L a jellemző karakterisztikus hossz [m], k a folyadék hővezetési tényezője [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]

2.3.3 Halmazállapot változás nélküli folyamatok hőátadása

Közegáramlás létrejöhet egyrészt valamilyen külső, kényszererő hatására, vagy pedig spontán a hőmérsékletkülönbség által indukált koncentrációkülönbség hatására. Az első esetet kényszerkonvekciónak, a másodikat pedig szabadkonvekciónak nevezzük.

2.3.3.1 Szabadkonvekciós hőátadás

Szabadkonvekciós áramlás történik például, ha egy tartályban vizet melegítünk, vagy ha egy felfűtött berendezés, mondjuk egy radiátor felmelegíti a szoba levegőjét. Fontos kiemelnünk, hogy ezekben az esetekben nincs semmilyen berendezés (szivattyú vagy ventilátor), amely áramoltatná a közeget, ugyanis akkor már kényszerkonvekcióval kellene számolnunk. Ebben az esetben tehát az áramlást nem külső erő hozza létre, hanem a hőmérsékleti, illetve a sűrűség gradiens biztosítja az áramlás hajtóerejét.

2.3.3.2 Kényszerkonvekciós hőátadás

Áramlásos hőátadási műveletek során az α hőátadási tényező meghatározása a fentebb tárgyalt Nusselt (Nu) szám segítségével történhet. A kényszerkonvekciós Nusselt függvények esetében alapvető az Reynolds (Re) és a Prandtl (Pr) dimenzió nélküli kifejezések meghatározása, illetve a Grashof (Gr) szám, amely a gravitációs gyorsulás áramlásra kifejtett hatását adja meg. Ez utóbbi csak lamináris tartományokban

számottevő. Kényszerkonvekció során az áramlás külön tárgyalandó csövek belsejében, csövek külső oldala mellett, illetve vízszintes síklapok mentén.

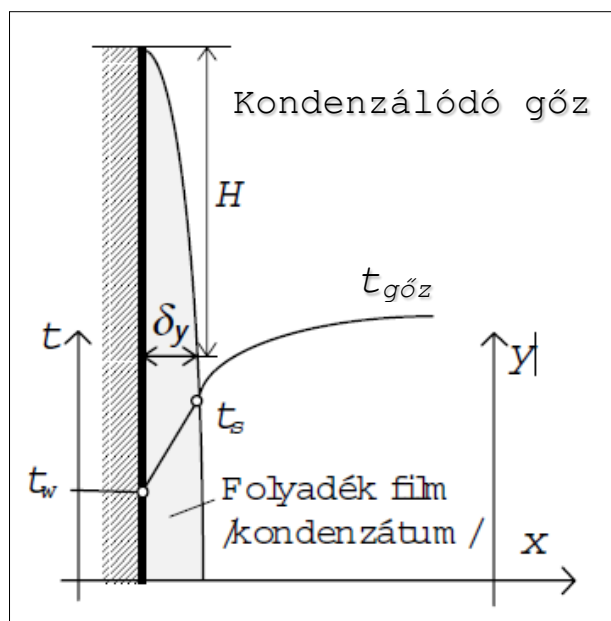
2.3.4 Hőátadás halmazállapot változás közben

2.3.4.1 Hőátadási tényező forralás során

Definíció szerint a forrás olyan párolgás, amikor az nemcsak a felületre, hanem a folyadék teljes terjedelmére kiterjed. Minden folyadék párolog, ez gőzteniót (gőznyomást) eredményez. Az anyagot akkor tekintjük forrásban lévőnek, amikor a folyadék gőznyomása eléri a környezeti nyomás értékét. A gőz hőmérsékletét, azaz a telítettségi hőmérsékletet (t_s) a külső környezeti nyomás határozza meg. A folyadék a fűtött falnál mindig túlhevül, ezért forráspont mérése során nem a forrásban lévő folyadék, hanem a folyadékkal egyensúlyban lévő gőztér hőmérsékletét határozzuk meg. Forralásnál telített gőzt alkalmaznak hőközlés céljából, amely a berendezés fűtőterében kondenzálódik le. Ekkor a felszabaduló hő az úgynevezett kondenzációs hő, amely a forrás állandóságát biztosítja. A forrás kezdetét gőzbuborékok megjelenése jelzi. Ezek minden esetben a fűtött falnál, a gőzképződés középpontjában keletkeznek. Méretüket a gravitáció, a hidrosztatikai nyomás, a felületi feszültség, a környezeti nyomás és az áramlási viszonyok határozzák meg [13].

2.3.4.2 Gőzök kondenzációja

Abban az esetben, amikor egy szilárd felület hőmérséklete alacsonyabb, mint a vele érintkező gőz telítési hőmérséklete, kondenzáció történik. A keletkező folyadék (annak függvényében, hogy a kondenzátum nedvesíti-e a felületet) cseppek vagy összefüggő hártya formájában, a nehézségi erő hatására a felületen csorog végig. A gyakorlati esetek döntő többségében az utóbbi formájú ún. filmkondenzáció történik.



2-3. ábra: Filmkondenzáció függőleges síkfalon [14]

A 2.3. ábra függőleges síkfalon kialakuló kondenzációs viszonyokat ábrázolja. Eszerint a folyadék film vastagságát (δ_y), illetve a film áramlási viszonyait egy adott (y) magasságban az adott (H) szakaszon kondenzálódott folyadék mennyisége, a nehézségi erő és a folyadékrétegben fellépő viszkozus erők aránya határozzák meg [14].

A filmben áramló kondenzátum mennyiségét a $\Delta t = t_s - t_w$ hőmérséklet különbség és a (H) magasság együttesen határozzák meg. Amennyiben a gőz-folyadék határfelületen a súrlódást elhanyagolhatónak tekintjük, és a folyadékfilm lamináris, úgy alkalmazható a hőátadási tényező meghatározására levezetett Nusselt-féle összefüggés:

$$h_m = 0,943 \cdot \left(\frac{k_l^3 \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot i_{lg}}{\mu_l \cdot (T_s - T_b \cdot L)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.4)$$

ahol h_m az átlagos hőátadási együttható [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], L a fal magassága [m], i_{lg} pedig a látens hő [J/kg]

A Nusselt-modell az évek során pontosítások segítségével vízszintes lemez vizsgálatához is alkalmazható. A kondenzáció külön tárgyalandó a lemez alsó és felső oldalának esetén a kialakuló filmréteg következtében.

Az első megfelelő modellt a vízszintes lemez felső oldalán elsőként Nimmo és Leppert vezették be [15]. Azt feltételezték, hogy a kondenzáció áramlása a vízszintes lemez tetején nagymértékben függ a hidrosztatikai nyomás gradiensétől, amely a

filmréteg vastagságának függvénye. Ez alapján a Nimmo-Leppert modell az alábbi összefüggést adja a hőátadási tényező meghatározására a vízszintes lemez felső oldalán:

$$\overline{h_{L_NL}} = \frac{k_l}{L} \cdot \left(\frac{h_{lv}^3 \cdot \rho_l^2 \cdot g \cdot L^3}{\mu_l \cdot (T_{sat} - T_b) \cdot k_l} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.5)$$

A második modell megalkotása Adrian Bejan nevéhez fűződik, aki a vízszintes lemez felső oldalán végbemenő lamináris filmkondenzációt, illetve ennek geometriai konfigurációit vizsgálta [16]. Bejan vizsgálataihoz ugyancsak a Nusselt analízist vette alapul, amely segítségével a hőátadási tényezőt két speciális esetre, szögletes lemezre, illetve körlemezre számította ki.

Szögletes lemezre az összefüggés az alábbi formulával írható le:

$$\overline{h_{L_B}} = 1,079 \cdot \frac{k_l}{L} \cdot \left(\frac{i'_{lg} \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot L^3}{\mu_l \cdot (T_{sat} - T_b) \cdot k_l} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.6)$$

Körlemez esetén pedig a következőképpen írta le a hőátadási együttható meghatározására szolgáló összefüggést:

$$\overline{h_{D_B}} = 1,368 \cdot \frac{k_l}{D} \cdot \left(\frac{i'_{lg} \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot D^3}{\mu_l \cdot (T_{sat} - T_b) \cdot k_l} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.7)$$

ahol L a négyzetes lemez egy oldalának átlagos hosszúsága [m], D pedig a körlemez átmérője méterben [m]. Látható, hogy a szögletes lemezre és a körlemezre felírt formula nagyon hasonlít egymáshoz. Abban viszont különböznek, hogy az egyenleteik jobb oldalán található explicit numerikus tényezőjük nem ugyanolyan. Ez azzal magyarázható, hogy körlemez esetén a filmréteg vastagsága vékonyabb, mint az ugyanolyan széles szögletes lemeznél.

A vízszintes lemez alsó oldalán kialakuló filmréteg problémáját elsőként Joseph Gerstmann és Peter Griffith tanulmányozták [17]. Vízszintes felületekre az alábbi formulával határozták meg a Nusselt-számot:

$$Nu = \frac{h}{k_l} \cdot \left(\frac{\sigma}{g \cdot (\rho - \rho_v) \cdot \cos \theta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

A fentebbi formulából h értékét kifejezve közvetlenül adódik az átlagos hőátadási együttható:

$$h = Nu \cdot k_l \cdot \left(\frac{g \cdot (\rho - \rho_v) \cdot \cos \theta}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Ez az összefüggés kis dőlésszögű felületekre is érvényes ($\theta < 7.5^\circ$ -ig), vízszintes felületeknél természetesen $\theta = 0$, $\cos \theta = 1$.

A Nusselt számot azonban külön értelmezik vízszintes és kis dőlésszögű esetén. Ezek tanulmányozásához be kell vezetnünk a Rayleigh szám értelmezését, amely az alábbi formulából adódik:

$$Ra = \frac{g \cdot \cos \theta \cdot \rho \cdot (\rho - \rho_v) \cdot h_{fg}}{\mu_l \cdot k_l \cdot \Delta T} \cdot \left(\frac{\sigma}{g \cdot (\rho - \rho_v) \cdot \cos \theta} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Ennek értelmében vízszintes fal esetén a Nusselt szám:

$$\bullet \quad Nu = 0,81 \cdot (Ra)^{0,393}, \text{ ha } 10^{10} > Ra > 10^8 \quad (2.11)$$

$$\bullet \quad Nu = 0,69 \cdot (Ra)^{0,20}, \text{ ha } 10^8 > Ra > 10^6 \quad (2.12)$$

Kis dőlésszögű falnál pedig:

$$Nu = \frac{0,90 \cdot (Ra)^{\frac{1}{6}}}{1 + 1,1 \cdot (Ra)^{-\frac{1}{6}}} \quad (2.13)$$

amennyiben a Rayleigh szám nagyobb, mint 10^6 .

2.3.5 A hőátadási együttható meghatározása

Az előző alfejezetben tárgyalt modellekben közös, hogy ezen modellek mindegyike a Nusselt-féle elméletből indul ki, és jó közelítésű formulát adnak a hőátadási együttható kiszámítására különböző méretű és orientációjú lemezek esetén. A hőátadási tényezőt lokális pontokon vizsgáljuk, hiszen a melegedés profilja nem egyenletes

gőzfázisú forrasztási eljárás során a képződött kondenzátumréteg áramlási iránya miatt. A Newton-féle hőátadási törvény általános formulája:

$$Q_c = \int_{t_0}^{t_r} h \cdot A \cdot (T_k - T(t)) dt \quad (2.14)$$

ahol t a melegedési idő [s]

$$Q_a = c_p \cdot m \cdot (T(t_r) - T(t_0)) \quad (2.15)$$

ahol c_p : a mérőpont fajlagos hőkapacitása, vagy fajhője [J/kg·K], m pedig a tömeg [kg].

A hővezetés számítható a melegponti és referenciaponti hőmérsékletkülönbségből az alábbi módon:

$$Q_p = \int_{t_0}^{t_r} q_k dt = \int_{t_0}^{t_r} \frac{T(t) - T_{RP}}{R_1} + \frac{T(t) - T_{RP}}{R_2} dt \quad (2.16)$$

ahol: q_k : hőáram [W], $T(t)$ a mérőpont hőmérséklete [K], T_{RP} : a referenciaponti hőmérséklet [K], R_1, R_2 pedig a termoelem vezetékének hőellenállása [K/W].

Innen a hőátadási együttható az alábbi módon számítható, amely fizikai mennyiség egy lokális érték lesz egy adott mérési pontra vonatkozóan [18] [19]:

$$h = \frac{Q_a + Q_p}{\int_{t_0}^{t_r} A \cdot (T_k - T(t)) dt} \quad (2.17)$$

A termikus diffuzivitás a kondenzátum vastagságát és a hőmérsékleteloszlást nagymértékben befolyásolja, és a hőáram-sűrűség értékére is hatással van. Ez a fizikai mennyiség a hővezetési tényezővel együtt alkalmas a hőáram, mint transzportjelenség leírására [20]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.18)$$

ahol a termikus diffuzivitást α -val jelöljük, mértékegysége [m²/s]. A formulában szereplő további fizikai mennyiségek jelentései: k a hővezetési tényező [W/m·K], ρ a sűrűség [kg/m³], c_p pedig az állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitás vagy fajhő [J/kg·K].

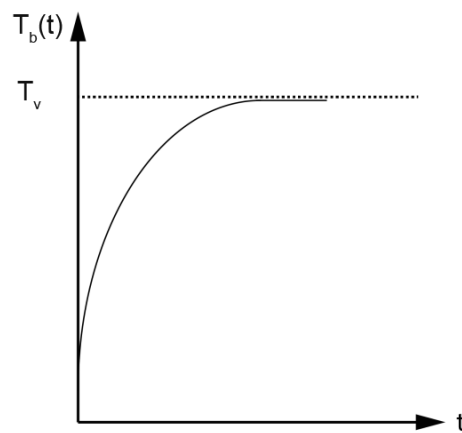
A Newton-féle hőátadási törvény alapján (2.14) Leider a testek fűtését az alábbi formulával írta le [21]:

$$\ln \left(\frac{T_v - T_b(t)}{T_v - T_b(0)} \right) = - \frac{h \cdot A}{m_b \cdot C_b} \cdot t \quad (2.19)$$

ahol T_v a gőz hőmérséklete [K], $T_b(t)$ a test hőmérséklete a t időpillanatban [K], $T_b(0)$ a test kezdeti hőmérséklete [K], m_b a fűtött test tömege [kg], C_b a test fajlagos hőkapacitása vagy fajhője [J/(kg·K)], h a hőátadási együttható [W/(m²·K)], A a test felületének nagysága [m²], t az eltelt idő [s]. A fenti formula alapján (2.19) lehetséges egy kvantitatív leírás (2.20) a test hőmérsékletére az eltelt idő függvényében $T_b(t)$:

$$T_b(t) = (T_v - T_b(0)) \cdot \left(\frac{T_v}{(T_v - T_b(0))} - e^{-\left(\frac{h \cdot A}{m_b \cdot C_b}\right)} \right) \quad (2.20)$$

Az általános explicit fűtési görbét a 2.4. ábra mutatja.



2-4. ábra: Exponenciális fűtési görbe kondenzáció során [21]

3 Munka előzményei

3.1 Korábbi tanszéki kutatások

A gőzfázisú forrasztás modellezésével kapcsolatban több megközelítésben folytak kutatások az ETT-n. Az első, a fentebb bemutatott négyzetes lemez alsó és felső oldalát leíró modellek kombinációja, amelyeket egy táblázat formájában foglaltam össze:

1. táblázat: Négyzetes lemez alsó és felső oldalát leíró modellek

	Lemez felső oldala	Lemez alsó oldala
1. modell	Nimmo-Leppert	Gertsmann-Griffith
2. modell	Bejan (szögletes lemezre)	Gertsmann-Griffith
3. modell	Leider	Leider

Az egyes modellek mérésekkel lettek alátámasztva, amelyek szerint a 2. modell által kaptuk a legjobb közelítést, 1,89%-os relatív hibával [22].

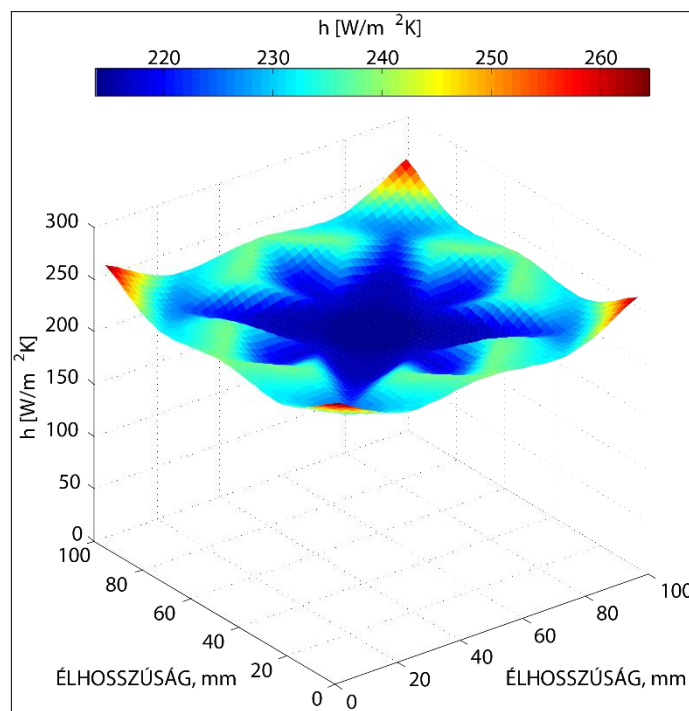
Körlemez esetén szintén több modellt hasonlítottak össze egymással, amelyet az alábbi táblázat tartalmazza. Az összehasonlítás azt mutatta ki, hogy a lemez méretétől függően (növekvő átmérő mellett) az első modell egyre pontosabb közelítést adott [23].

2. táblázat: Körlemez alsó és felső oldalát leíró modellek

	Lemez felső oldala	Lemez alsó oldala
1. modell	Chiou-Chang	Gertsmann-Griffith
2. modell	Bejan (szögletes lemezre)	Gertsmann-Griffith
3. modell	Bejan (körlemezre)	Gertsmann-Griffith

A kutatások kiegészítéseként sikerült véges differencia módszerrel MATLAB programban modellezni a lemezen kialakuló filmréteget is. A modell figyelembe veszi a hidrosztatikus nyomásváltozás miatt a filmrétegben kialakuló áramlást. Az áramlás vizsgálatával kimutatható, hogy a lemezek szélén és a sarokpontokban a legvékonyabb a filmréteg, valamint a hőmérséklet (tehát a hőátadás mértéke is) ezeken a területeken a legmagasabb [24].

A harmadik megközelítés során Darnai Tamás villamosmérnök hallgató diplomatervében vizsgálta a hőátadási paramétereket gőzfázisú forrasztás során képződő kondenzátumban. Ennek során kalkulációkat végzett a hőátadási együttható meghatározásához a mért hőmérsékletből olyan formában, hogy az ismert legyen a tesztlemez teljes felületén. A vizsgálatokat FR4-es tesztlemezekon végezte, a hőmérséklet méréséhez termoelemet használt, amelyet hővezető ragasztóval rögzített furatokhoz. A perturbáció minimalizálásához figyelembe vette a különböző mérési pontokat, illetve a mérés összeállítását után többször is lemérte a lemezek hőprofilját, az egyes eredményeket pedig átlagolta. Az adatokat MATLAB szoftverben dolgozta fel, ezeket 3 dimenziós ábrákon jelenítette meg, amely után ábrázolta a hőátadási együtthatót négyzetes, illetve körlemez esetén. Az eredmények alapján a hőátadási együttható magasabb értékűnek mutatkozott a lemezek szélein és a sarkán, ahogyan az a véges differencia modell alapján várható volt.

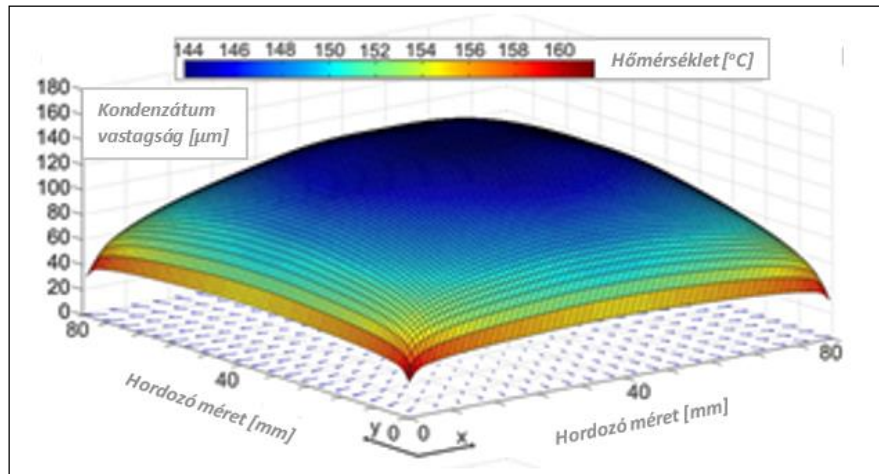


3-1. ábra: Hőátadási együttható négyzetes lemez felületén 2s után

További tanszéki kutatások során Géczy Attila és Illés Balázs a gőzfázisú forrasztóállomás multi-fizikai modellezésével, a gőzkoncentráció dinamikus viselkedésének vizsgálatával, illetve a hőátadási együttható mérésével és modellezésével foglalkoztak. Krammer Olivér és Garami Tamás a forrasztott kötések mechanikai szilárdságát és az intermetallikus réteget vizsgálták a gőzfázisú forrasztási folyamatban.

3.2 Szimulációs eredmények

Korábbi tanszéki kutatások során különböző véges differencia elven működő szimulációs eredmények is születtek a témában [24]. Ennek során FR4-es, 80·80 mm felületű, illetve 1,5 mm vastagságú szerelőlemez használtak hordozóként, amelyen 2s elteltével láthatjuk a képződött kondenzátum vastagságát a hőmérsékleti eloszlás függvényében a tesztlemez felületén.



3-2. ábra: Filmkondenzáció vízszintes helyzetű FR4-es hordozóra

Az ábrából látszik, hogy a kondenzátum réteg szimmetrikus eloszlású, vastagságában pedig 100 μm-es differencia mutatkozik a lemez közepe és sarkai között. Látható, hogy a kondenzátum szigetelőréteggént funkcionál a gőz és a lemez közötti interakciót tekintve, hiszen a kondenzátum vastagságból adódó különbség a hőmérsékleteloszlásnál is fennáll; minél vastagabb a képződött filmréteg, annál alacsonyabb a lokális hőmérséklete a hordozónak egy adott ponton.

4 Hőmérsékletmérési eszközök

Napjaink legelterjedtebb hőmérsékletérzékelőinek a termoelemek számítanak. Ezen eszközök működésének alapja a Seebeck-effektus, amely szerint, ha két különböző fémeket vagy fémötvözetet összekapcsolunk egy ponton (ezt melegpontnak hívjuk), és ezt hevíteni kezdjük, akkor a vezetékek szabad végéhez képest hőmérsékletkülönbséget fogunk tapasztalni. A hőmérsékletkülönbség hatására feszültség, azaz potenciálkülönbség alakul ki a szabad végek és a melegpont között azért, mert a vezetékekben megváltoznak a mozgó elektronok sűrűségarányai. Az, hogy milyen mértékben változik a feszültség, függ a hideg- és melegpontok hőmérsékletkülönbségeiből, illetve a vezetők anyagától.

A termoelemek melegpontjának hőmérsékletét meghatározhatjuk a referenciapont hőmérsékletéből és a vezetékek vége között fellépő potenciálkülönbséget mért értékéből az alábbi összefüggés segítségével, amennyiben a hőelem egy típusú fémből készült:

$$\Delta U = S \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

ahol ΔU : a feszültségváltozás [μV], ΔT : hőmérsékletváltozás [$^{\circ}\text{C}$], S a termoelemek érzékenységet jelző Seebeck-együttható [$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$].

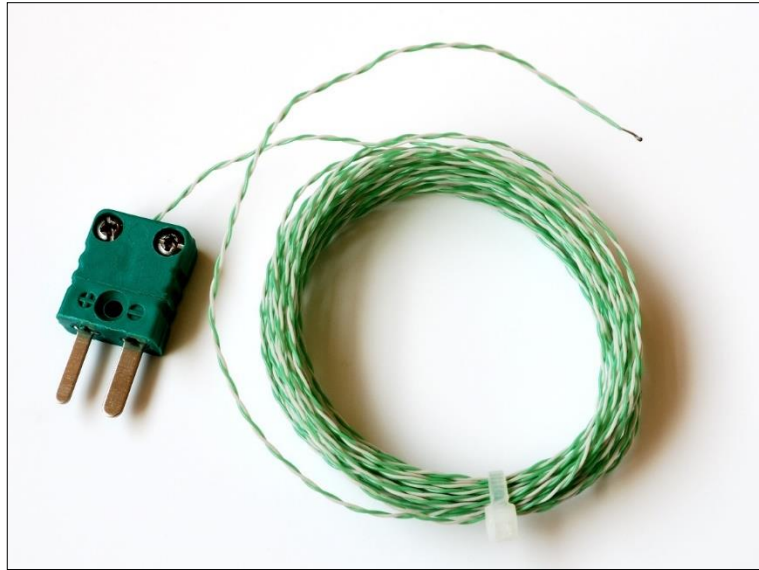
Két különböző típusú fém esetén a fenti összefüggés a következőképpen módosul:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} S_A(T) - S_B(T) dT \quad (4.2)$$

ahol „A” és „B” a két fémtípust jelöli, T_2 a melegponti, T_1 pedig a hidegponti hőmérsékletet.

4.1 Hőelemtípusok

Ipari alkalmazásokban legelterjedtebb az úgynevezett K típusú hőelem, amely 90-10%-os arányú nikkell-króm ötvözetből készül. A termoelemek közül ez a legolcsóbb, amely az egyik legnagyobb előnye ennek a típusnak, alacsony ára ellenére nagyfokú pontosság, jó megbízhatóság jellemzi. A gyártási adatlapon specifikált méréstartomány, amely tartományon jól reprodukálhatóan működik az eszköz -200°C -tól $+1350^{\circ}\text{C}$ -ig terjed.



4-1. ábra: K típusú hőelem, csatlakozóval

T típusú hőelem réz és konstantán vezetékek összehegesztésével jön létre. A termoelem előnyei a K típusnál is említett reprodukálhatóság, továbbá a mérések ismételhetsége, kiváló stabilitása alacsony hőmérsékleten, illetve megbízható működése nedves közegben is. Ipari alkalmazásokban ez is gyakran elterjedt hőelem típus, méréseimhez én is ezt választottam.

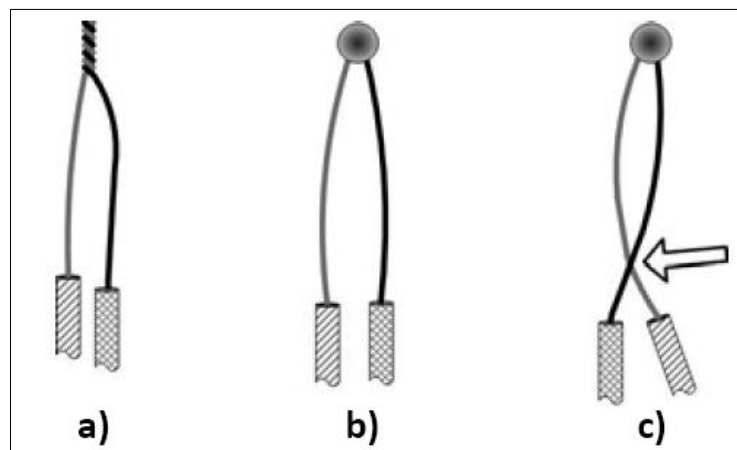


4-2. ábra: T típusú hőelem, szabad vezetékvéggel

A szélesnek mondható mérési hőmérséklettartomány -amely mindegyik hőelemtípust jellemzi- mondható az egyik legfontosabb tulajdonságnak. Kis hőkapacitásuk következtében néhány tizedmásodperc alatt képesek triggerelni a hőmérsékleváltozást, illetve önmaguktól nem melegsznek, ugyanis működésükhöz nincs szükség külső gerjesztésre.

Hátrányként megjegyzendő, hogy jelentőssé válhat az elektromos és mágneses terek zavaró hatása mérés közben, hiszen a feszültség szintek a μV -os tartományba esnek [25].

A melegpontok egymáshoz rögzítése kétféle módon történhet: vezetékek összecsavarásával vagy ponthegeztéssel. A stabilitás növelése érdekében érdekesebb a ponthegeztéses megoldás alkalmazása, amellyel elkerülhető, hogy a hőelemek vezetékerei részlegesen érintkezzenek egymással. Ennek következtében nem alakulhat ki kontaktálási hiba a fémvezetékek között.

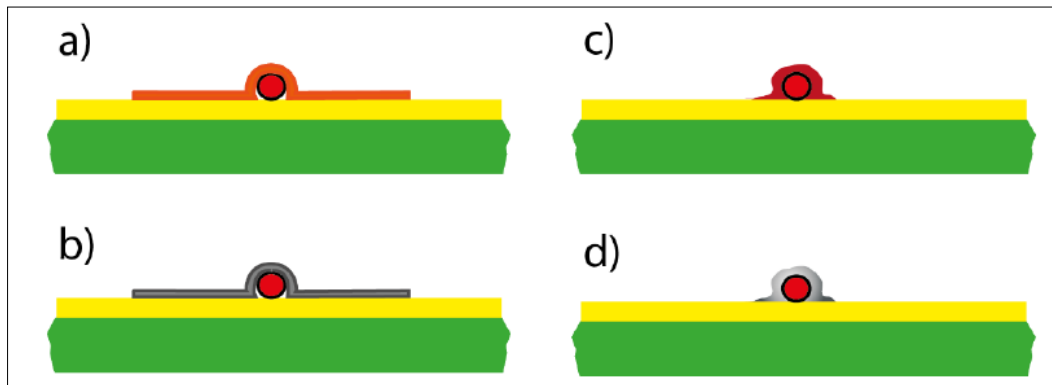


4-3. ábra: Melegpont létrehozása vezetékcsavarással (a) és ponthegeztéssel (b) (hibalehetőség a (c) pontnál – melegponttól messzebb összeérő vezetékek)

A hőelemek teflon bevonattal rendelkeznek, amely bevonat roncsolódás nélkül $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti stabil hőmérsékletmérést biztosít, ami az újraömlésztéses forrasztás esetében kiválóan. Ennek a szigetelésnek rendkívül fontos szerepe van, ugyanis amennyiben valamely ponton megsérül ez a borítás, úgy a mérésünk hibás eredményeket szolgáltat. A termoelem melegpontja a hegesztett ponttól eltolódik ahhoz a ponthoz, ahol a szigetelés megsérült, így a gyakorlatban nem a próbapanel hőmérsékletét mérjük a referenciaértékhez képest, hanem a környezeti hőmérsékletet.

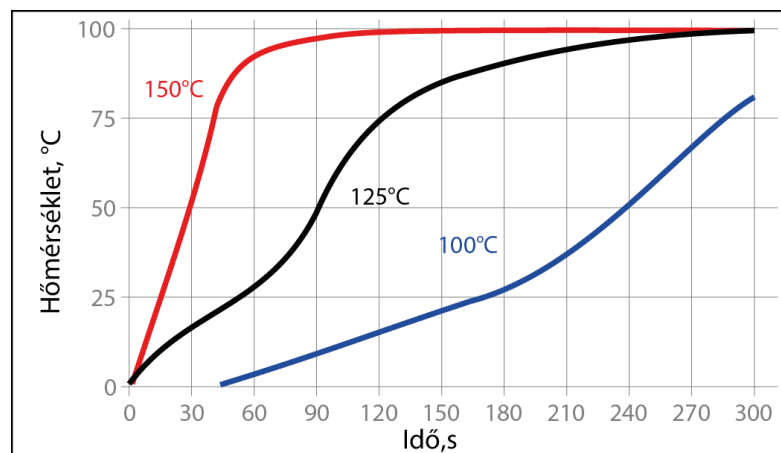
A hőelemek rögzítésének is többféle módja létezik:

- a.) hőálló ragasztóval történő rögzítés (poliimid Kapton szalag)
- b.) hőálló, de jó hővezetésű alumínium ragasztószalagos rögzítés
- c.) SMD ragasztóval történő rögzítés
- d.) magas olvadáspontú forrasztanyaggal történő rögzítés



4-4. ábra: Különböző hőelemrögzítési módszerek a próbapanel felületéhez [26]

A rögzítési eljárások közül a legkevésbé megbízhatónak a Kapton szalagos megoldás bizonyul, ugyanis a ragasztószalag geometriai méretei magas hőmérséklet hatására megnőhetnek, a ragasztóréteg pedig veszíthet tapadóképességéből. Ennek hatására a hőelem könnyedén kijöhet az eredetileg rögzített helyéről, különösen, ha a hőátadó Galden-folyadék is gyengíti a tapadást. A tapasztalatok szerint az SMD ragasztós rögzítés stabil módszer. Itt követelmény a ragasztó jó hővezetési képessége, amely befolyásolja a mérést, illetve a ragasztó robusztussága abban a tekintetben, hogy több mérési ciklust is el kell tudnia viselni. Az egyik legelterjedtebb ragasztótípus a Loctite 3621-es bonder. A ragasztót a hőelemre történő felvitele után magas hőmérsékleten térhálósítani kell, erre a tanszéki gyakorlatban a lokális kikeményítési eljárás terjedt el, amelyet hőlégfúvó segítségével lehet elvégezni. A ragasztó kikeményítési idejéről a termék gyártási adatlapjában található hőmérséklet-ideő grafikon ad tájékoztatást.



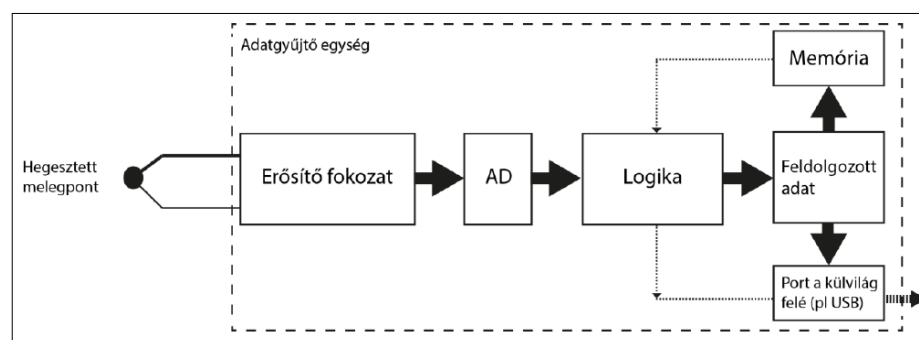
4-5. ábra: Loctite 3621-es ragasztó hőmérséklet-ideő grafikonja [27]

4.2 Adatgyűjtési módszerek

Hőmérsékletérzékelők estében különféle adatgyűjtési megoldások léteznek az ipari alkalmazásokban. Vannak olyan speciális mérőműszerek (hőmérő módú multiméterek, transzducerek), amelyek egyből kijelzik, vagy továbbküldik a mért adatokat egy feldolgozó egység felé. Vannak viszont adatgyűjtő berendezések, amelyek on-the-fly módon működnek, és egy külső buszt használva továbbítja az adatot a PC felé.

Az előző fejezetben említett termoelemvégek hőmérsékletkülönbségből adódó potenciálkülönbségek meghatározása azonban nem egyértelmű feladat, ugyanis a mérendő μV -os tartományban a hőmérséklet-feszültség karakterisztika nemlineáris, így ennek kompenzációjára szükség van. Erre a gyakorlatban három eljárás terjedt el. Az első a legegyszerűbb, amely során az érzékelő karakterisztikáját közelítjük egy lineáris szakasszal. Ez a módszer nem alkalmazható effektíven, ugyanis nagyfokú pontatlanság jellemzi. A második, elterjedtebb kompenzációs megoldás során a hőelemek egyes hőmérsékletértékeihez tartozó feszültségeket egy digitális kiolvasóáramkör belső memóriájában tárolják. Ennek előnye, hogy a termoelem teljes mérési tartományában használható. A harmadik eljárás során a nemlineáris hőmérséklet-feszültség karakterisztikát magasabb fokú polinomiális egyenletekkel modellezik. A felsorolt megoldások közül ez a legpontosabb, viszont a feldolgozási idő itt a leghosszabb a nagy számításigény miatt.

A termoelemek gyakorlati alkalmazásának egy sarkalatos pontja a hidegpont hőmérsékletének egy referenciaponton történő tartása. Ehhez biztosítani kell azt, hogy a szabad végek azonos hőmérsékleti értéken legyenek. Az iparban ennek biztosítására olyan univerzális adatgyűjtő kártyákat használnak, amelyek rendelkeznek beépített, automatikus hidegponti kompenzáció funkcióval. Ilyen adatgyűjtő a tanszéken is használatos myPCLab készülék, amelynek blokkvázlata a 4-6-os ábrán látható.



4-6. ábra: MyPCLab adatgyűjtő készülék blokkvázlata

A hőelemek feszültsége az ábrán látható módon egy erősítő fokozaton keresztül mérhető, amely erősítő fokozat nagy bemeneti impedanciával rendelkezik. Ezután a jel egy analóg-digitál átalakítón keresztül jut a feldolgozást végző logikai egységbe. Innen a feldolgozott adat vagy a belső memóriában tárolódik, vagy a már említett on-the-fly módszert alkalmazva USB-vel lesz az adat továbbítva.

5 Munkaterv, kísérletterv

Dolgozatom középpontjában a gőzfázisú forrasztás hőmérsékleti profilmérése áll, amelyet különböző hordozókon, illetve különböző lokális pozíciókban vizsgálok. Méréseim során a célom az volt, hogy verifikáljam a hőmérsékleteloszlást azonos méretű, 50x50 mm felületű, különböző hordozókra („A” tesztet), majd azonos hőkapacitású lemezekre („B” tesztet) – közben pedig rávilágítok a VPS eljárás következtében a lemezen létrejött hőmérsékletkülönbségekre. A vizsgálatokat 4 hordozón: FR4-es tesztlemezen, alumínium+FR4 kompoziton, rubalit kerámián (96%-os Al_2O_3 kerámia) és poliimid flexibilis áramköri fólián végeztem. Az egységnyi felületű hordozók eltérő hőkapacitással rendelkeznek, így azt várom a mérésektől, hogy az alacsonyabb hőkapacitású hordozók meredekebb hőmérsékleti gradiens értékeket mutatnak, míg a magasabb hőkapacitású lemezeknél nagyobb mértékű tranziens jelenségeket fogunk tapasztalni. Ezt követően a méréseimet olyan irányban folytatom tovább, hogy az eltérő hőkapacitások következtében létrejövő gradiens-különbségeket még jobban lecsökkentem azáltal, hogy egy konstans hőkapacitás értékből kiindulva számítom ki a hordozók felületét. Ezekből a mérésekből a korábbi nemlinearitások csökkenését várom [28]. A mérések rávilágíthatnak az egyes hordozótípusok profilra gyakorolt hatásaira, és a lemez adott pontjai között fellépő hőmérsékletkülönbségekre, amely a melegedési szakaszban forrasztási hibákat (pl. tombstone effektus) okozhat.

5.1 Hőkapacitások kiszámítása a hordozók méretéből

Feladatomban első részében négy különböző anyagú, ám de azonos méretű (felületű) lemezen vizsgáltam a hőprofil, amelyek előzményeként elméleti számításokat végeztem. Elsőként a négy hordozó - FR4, kerámia, poliimid, illetve egy FR4+aluminium lemez hőkapacitásait számítottam ki az alábbi képlet segítségével:

$$C_p = c_p \cdot m = c_p \cdot \rho \cdot V = c_p \cdot \rho \cdot A \cdot d \quad (5.1)$$

ahol: C_p a hőkapacitás [J/K], c_p a fajhő [J/kg·K], ρ a sűrűség [kg/mm³], A a hordozó felülete [mm²], d a lemezvastagság [mm].

A számításaimhoz és kísérleteimhez a fix méretű rubalit kerámia hordozó 2x2 inches méreteit vettem alapul. Az elérhető legnagyobb méretű kerámia lemezhez kellett igazítani a feladatot. Ennek eredményeit egy összefoglaló táblázatban szemléltetem.

3. táblázat: Hőkapacitás értékek számítása azonos felülettel rendelkező hordozókra – (A) teszteset

Hordozó	Méret (A) [mmxmm]	Vastagság(d) [mm]	Sűrűség (ρ) [kg/mm ³]	Fajhő (cp) [J/kg·K]	Hőkapacitás (Cp) [J/K]
FR4	50,8 x 50,8	1,465	$2100 \cdot 10^{-9}$	570	4,5254
Poliimid	50,8 x 50,8	$90 \cdot 10^{-3}$	$1420 \cdot 10^{-9}$	1090	0,3595
Rubalit kerámia	50,8 x 50,8	0,6	$3780 \cdot 10^{-9}$	800	4,6823
FR4 + alumínium kompozit	50,8 x 50,8	1,65	$2700 \cdot 10^{-9}$	880	5,3285

A táblázat alapján látható, hogy az FR4-es lemez és az alumínium kompozit hordozó hőkapacitás értéke adódott a legmagasabbra, míg a poliimid fóliáé körülbelül egy nagyságrenddel kisebb, mint a többi hordozó esetében.

Ezt követően a poliimid fólia (a legalacsonyabb hőkapacitással rendelkező anyag) azon maximális felületét alapul véve, amely felület még vízszintes helyzetben betehető a gőztérbe, kiszámoltam a hőkapacitás értékét. Ezt az értéket tekintetem állandónak, amelyből átszámoltam, hogy a többi hordozó esetén milyen hosszparaméterek szükségesek.

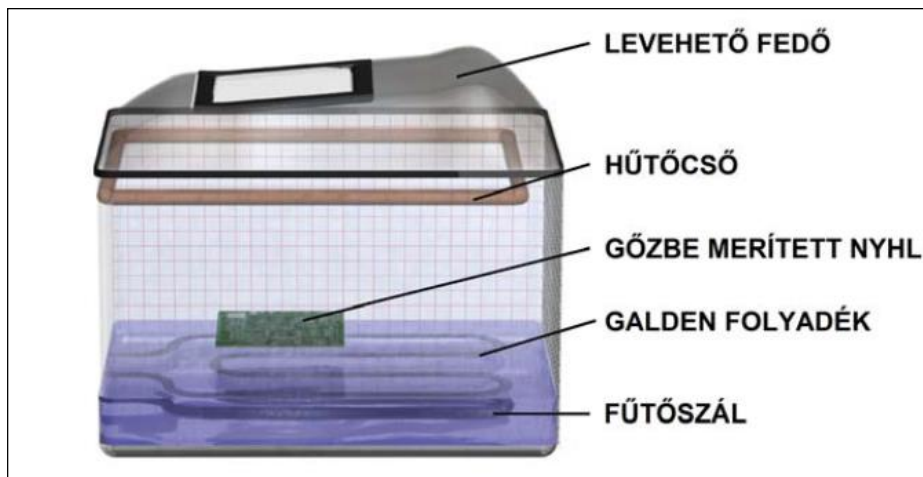
4. táblázat: Felületi értékek számítása a hőkapacitásból – (B) teszteset

Hordozó	Hőkapacitás (Cp) [J/K]	Méret (A) [mm-mm]
FR4	1,3930	28,18 x 28,18
Poliimid	1,3930	100 x 100
Rubalit kerámia	1,3930	27,71 x 27,71
FR4 + alumínium kompozit	1,3930	24,21 x 24,21

5.2 Mérési eszközök és elrendezések

Méréseimet a Budapesti Műszaki Egyetem Elektronikai Technológia Tanszékének laboratóriumában végeztem egy kísérleti gőzfázisú berendezés segítségével (5-1. ábra). A berendezésbe Galden HT170 típusú folyadékot öntöttem, amely folyadék forráspontja elméletileg 170 °C, viszont ez a pont a gyakorlatban néhány fokkal eltérhet. Ez attól függ, hogy a gyártása során hogyan állítják be a hőmérsékletét; hogy mennyire „használt, elöregedett” a folyadék; valamint hogy a folyadék mennyire válik

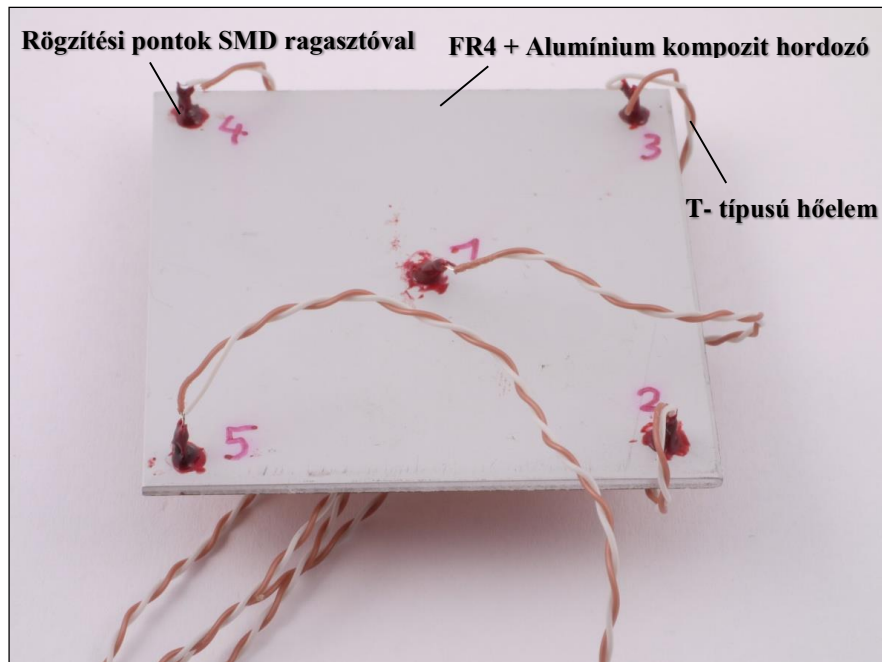
szennyezetté a mintamerítések során . A HT170 forrásponti hőmérséklete alacsonyabb a standard LS230 (230 °C-os) Galdenhez képest, viszont a hűtadási folyamat fizikai leírása szempontjából teljesen kompatibilis azzal. Az alacsonyabb forráspont gyorsabb mérési ciklusokat tesz lehetővé, és releváns az alacsony olvadáspontú ólommentes forrasanyagok szempontjából is (pl. SnBi paszták). Az alacsonyabb hőmérséklet a kísérleti kemence kezelését is leegyszerűsíti.



5-1. ábra: Tanszéki kísérleti gőzfázisú berendezés

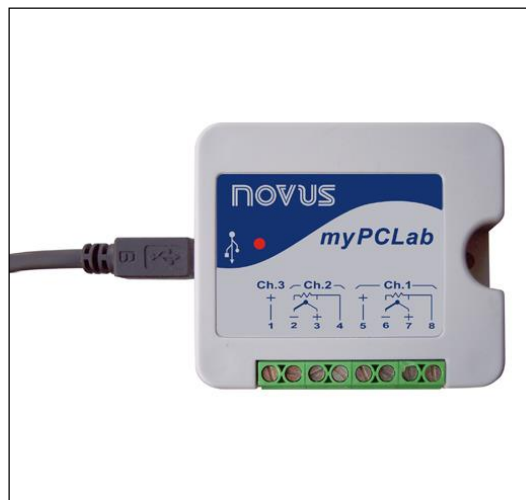
A fűtőszálra feszültséget kapcsoltam egy toroid körtekercs segítségével, amellyel a tartályban lévő folyadék fűtése szabályozható. A 170 °C-os forráspont eléréséhez 550 W-os fűtőteljesítmény optimálisnak tekinthető, ebből (és a fűtőszál 26 Ohmos ellenállásából) meghatározható a 120 V-os feszültség, amelyet rákapcsolok majd a fűtőszálra. Ezen hőmérsékletnél a tartályban már fenntartható telített gőzréteg alakul ki [29].

Mindegyik hordozót a rubalit kerámia méretéhez optimalizáltam, ez alapján 2x2 inches méretre vágtam (ld. 3.táblázat) az FR4-es, a poliimid, illetve az aluminium kompozit szubsztrátokat is. Ezek mindegyikén 5 db mérési pontot alakítottam ki az ábrának megfelelően.



5-2. ábra: Mérési pontok kialakítása a hordozókon

A hordozók egyes pontjaiba nagyjából 0,5 mm-es zsákfuratok kerültek, amelyekbe T típusú hőelemek hegesztett melegpontjait rögzítettünk Loctite 3621 típusú, hőálló SMD ragasztó segítségével. A hőelemek hidegpontjait Novus myPCLab adatgyűjtőbe rögzítettem, amelyek egyenként két csatornával rendelkeznek. Az adatgyűjtő rendelkezik egy beépített hőmérséklet érzékkelővel, amely segítségével képes automatikus hidegponti kompenzációra.



5-3. ábra: Novus myPCLab adatgyűjtő

Az adatgyűjtő mini USB porton keresztül csatlakoztatható számítógéphez. MyPCLab szoftver segítségével történik az eszközök konfigurálása, a kalibráció

elvégzése az offszet hibák kompenzálására, a mérési adatok begyűjtése és ezek alapján a hőprofil kirajzolása.

5.3 Kalibrációs mérések

Méréseim elvégzése előtt mindenképpen szükséges elvégezni az adatgyűjtőkön a kalibrációs méréseket, ugyanis két adatgyűjtő egyrészt fizikailag sem képes tized pontossággal egyforma eredményt szolgáltatni. Ez abból adódik, hogy a készülékek eltérő ambiens körülményeknek vannak kitéve (pl. levegő páratartalma, hőmérséklete, légáramlás a laborban), illetve eltérők lehetnek az automatikus szoftveres offszet-kompenzációk is. A myPCLab modulokba beépített hőelemek, aminek segítségével elvégzi a rendszer a hidegponti kompenzációt, szintén gyártási szórásokkal bírnak. Az eltérő külső körülményekből adódó hibát ténylegesen kiküszöbölni sajnos nem tudjuk, viszont minimalizálhatjuk oly módon, hogyha az adatgyűjtőket nagyon közel helyezzük egymáshoz, így hozzávetőlegesen ugyanazok az ambiens hatások érik majd őket.

Ahhoz, hogy a szoftverben el tudjam végezni az offszet-kompenzációt, szükséges egy referenciahőmérséklet érték, amelyhez kalibrálni lehet a hőelemeket. Ennek a hőmérsékletnek 0°C-ot választottam, amelyet egy jeges fürdő segítségével állítottam elő.

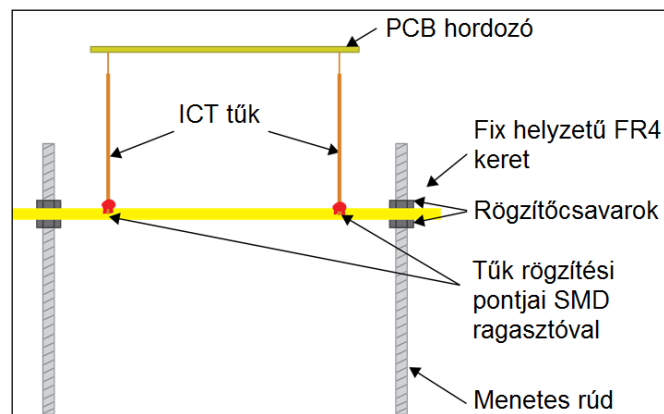


5-4. ábra: 0 °C-os jégfürdő a kalibrációhoz

Az általam használt termoelemeket összekötöttem, majd a referenciapontokat belemerítettem a fürdőbe, és a szoftver segítségével az adatgyűjtők megfelelő csatornáinak offszet értékét módosítottam addig, ameddig már nem mutattak számottevő eltérést egymáshoz képest. A kezdeti mérések során a 0 °C hőmérsékleti referencia

ponthoz tartozó offszet-kompenzáció során azt találtam, hogy a csúcshőmérsékleten a hőmérsékleti görbék a hőelem hibáján túl széttartanak (ez lehetséges például a bekapcsolt kemence adatgyűjtőre gyakorolt hatása miatt, amely a laborhelyiség ambiens körülményeit is megváltoztatta, levegőt felmelegítette), ezért a második offszet kompenzációt 170 °C-ra, azaz a folyadék fix forrásponthoz igazítottam.

Méréseim megkezdése előtt a hordozó mintatartóját is be kellett kalibrálnom vízszintesre, azaz 0°-os kitérésűre, ugyanis a méréseimet mindegyik hordozó esetében ebben a helyzetben kell elvégezni. Mivel a tanszéken nem volt kalibrált klinométer eszköz, ezért a vízszintes pozíció beállításához Windows operációs rendszer alatt futó „Clinometer” applikációt használtam, amely tized fokos felbontással rendelkezik. A klinométer minden egyes mérés előtt kalibrálva lett síklapú laboratóriumi XY asztalon [30]. Fontos megemlíteni, hogy méréseim mindegyikét bekalibrált vízszintes pozícióban végeztem, nagyobb dőlésszög esetében ugyanis már a döntött fal esete állna fenn, amely befolyásolná a hőátadási folyamatot. A mintatartót az ábrán látható módon készítettem el. A 4 lábként funkcionáló csavar segítségével a korrekció a színtezés során meglehetősen egyszerűvé válik. Távtartóként 4 db ICT (In Circuit Tester) mérőtű szolgált, amelyeket SMD ragasztóval rögzítettem az FR4-es lemezből kivágott mintatartóhoz.



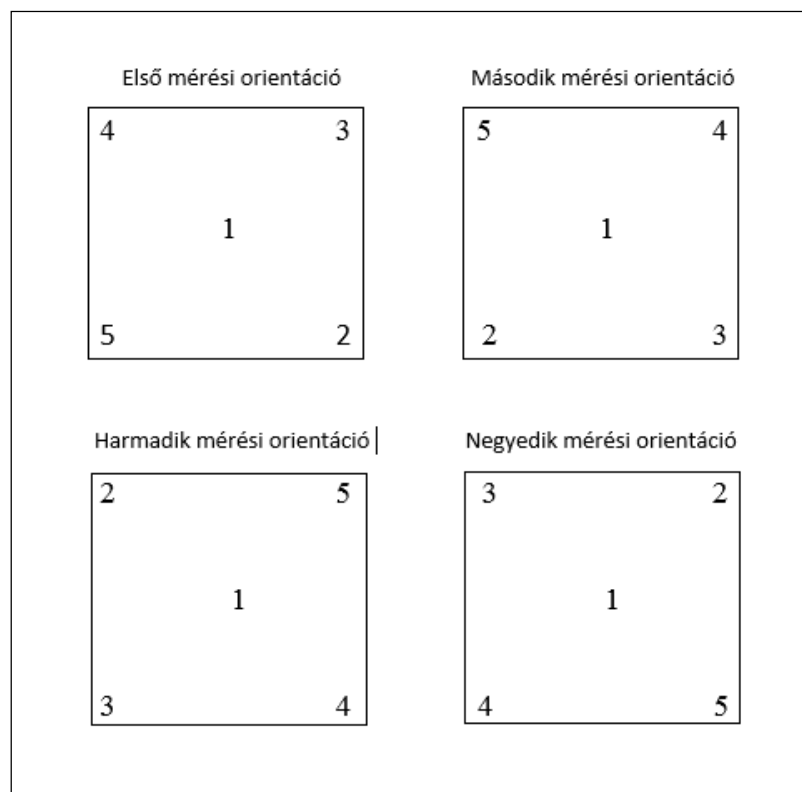
5-5. ábra: A hordozók mintatartója

6 Mérési eredmények

6.1 Mérési eredmények kiértékelése

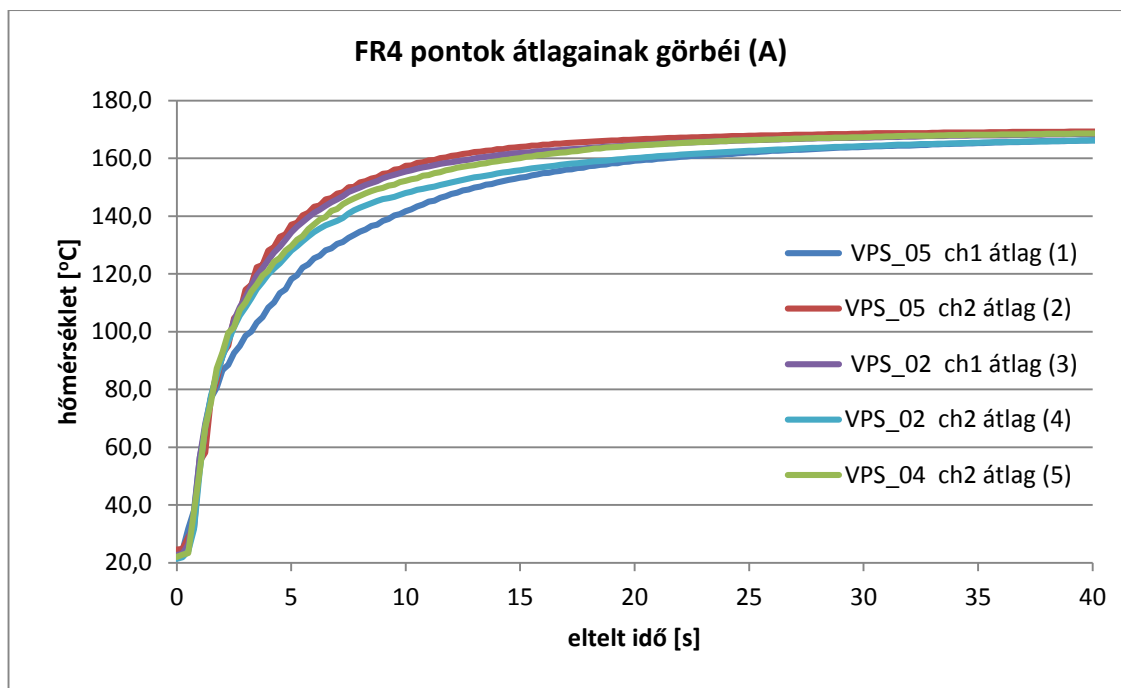
A mérések során az előkészített hordozókat a munkatérben lévő mintatartóra helyeztem. A tartályban a folyadék ekkor már elérte a 170 °C-os forráspontját, a telített gőztakaró elkészült.

Az első méréseket az azonos felületű, különböző hőkapacitású konstrukcióra végeztem el, célom a gőztérben kialakuló kondenzátum hőátadásának vizsgálata volt a hordozó különböző pontjain. Az adatgyűjtőkön 250 ms-os mintavételi időt állítottam be. A mérések egészen addig zajlottak, ameddig a behelyezett minta hőmérséklete el nem érte a gőztérben kialakuló elméleti szaturációs hőmérsékletet, azaz a 170 °C-os értéket. Ez az időtartam megközelítőleg 60 másodperc volt. Az egyes hordozókon elvégzett hőmérsékleteloszlás vizsgálatot összesen négy orientációban végeztem el, 90 fokot forgatva az egyes orientációk között. Célom ezzel az volt, hogy a mérés közben kialakuló kisebb mértékű orientációfüggő hatásokat minimalizáljam egy átlagolási lépéssel.

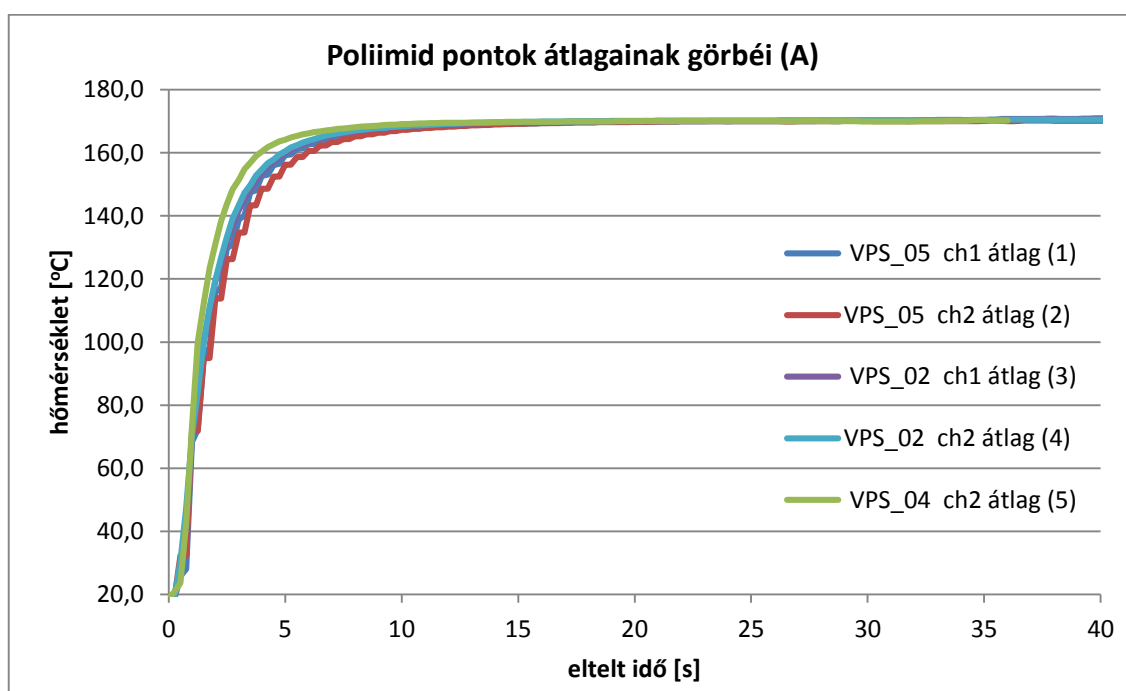


6-1. ábra: A hordozók mérési pontjainak definiálása (későbbiekben zárójelben jelölve az adott mérési pont száma az ábrákon)

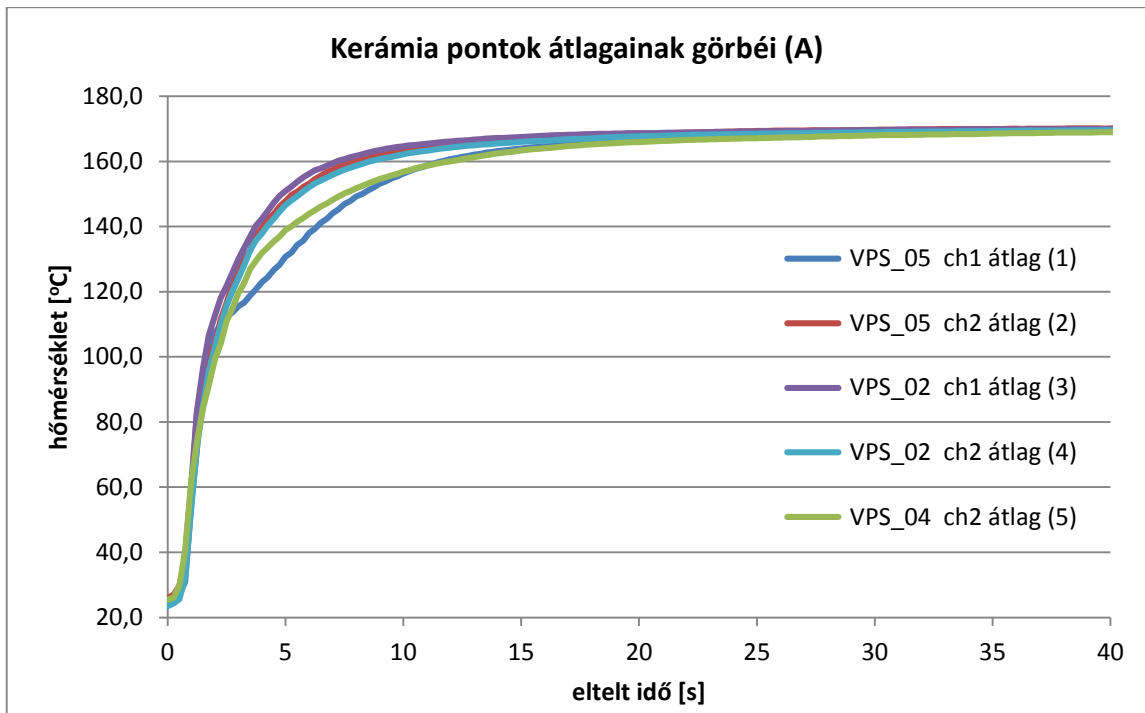
A mérések orientációnként 3-szor lettek elvégezve, majd a kapott eredményeket pontonként átlagoltam, majd ezen átlagolt melegedési görbéket egy közös diagramon ábrázoltam az eltelt idő függvényében. A mérések minden esetben visszaadják a 2-4-es ábrán bemutatott exponenciális jelleget.



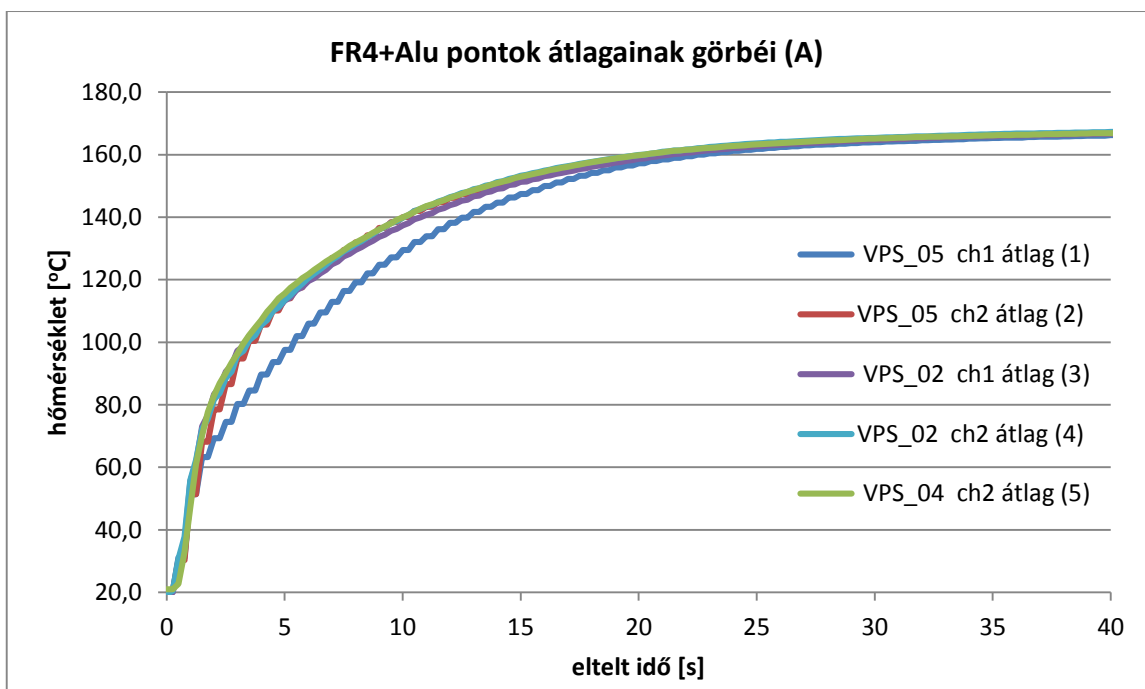
6-2. ábra: Az FR4-en végzett mérések eredményei azonos felület esetén – (A) teszteset



6-3. ábra: Poliimid fólián végzett mérések eredményei azonos felület esetén – (A) teszteset



6-4. ábra: Kerámia hordozón végzett mérések eredményei azonos felület esetén – (A) teszteset



6-5. ábra: FR4 + Aluminium kompozit hordozón végzett mérések eredményei azonos felület esetén – (A) teszteset

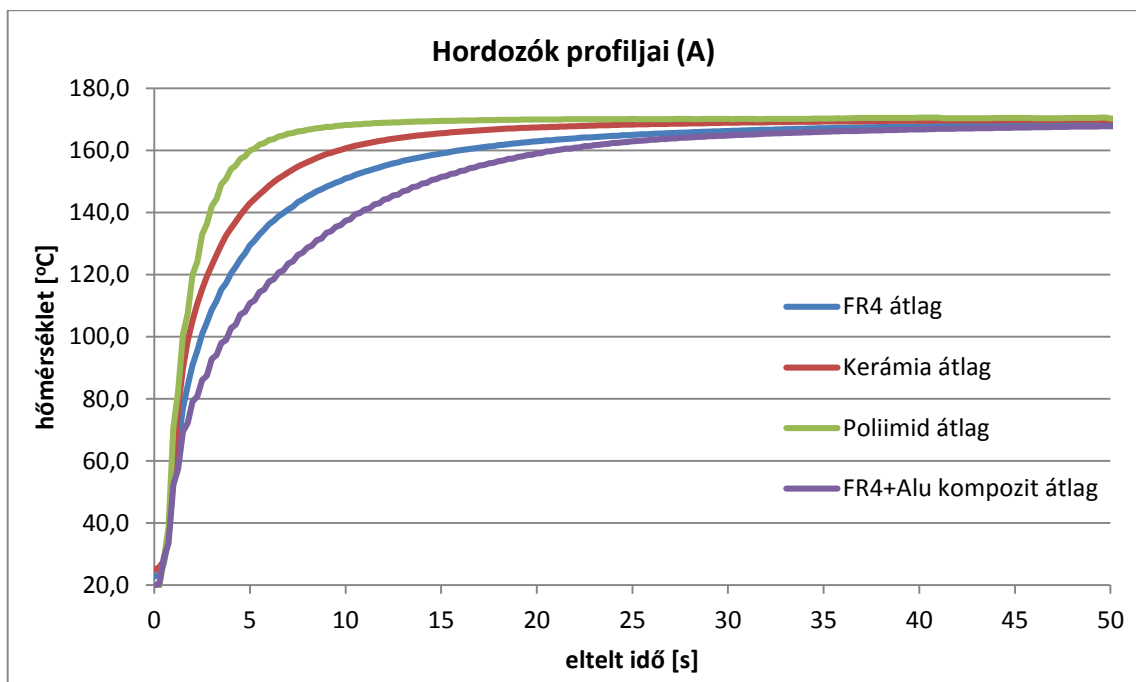
A mérési eredményekről általánosságban elmondható, hogy a kondenzátumréteg áramlásának alapelve igazolódott a mérések során, hiszen a hordozók középső pontjának melegedése minden esetben lassabb volt, mint a sarokpontok hőmérsékleti görbéi.

FR4-es tesztlemez esetén, a 6-2-es ábrán látható, hogy az 1-essel jelölt, VPS_05 ch1-es csatornán mért pontban a hőátadás folyamata a vártnak megfelelően a leghaladósabbnak adódott. Ennek oka, hogy a folyadékfilm áramlása a hordozó szélein maximális, a filmréteg itt a legvékonyabb. Míg a lemez középső részei közel azonos mértékben, egyenletesen melegsznek, a vastagabb, forrásponthi hőmérséklettől alacsonyabb hőmérsékletű filmréteg pedig a további kondenzációt is lassítja, a réteg pedig egyfajta szigetelő funkciót is betölt, mint azt az irodalmazásnál már kifejtettem.

Ezt követően poliimid fólián folytattam a méréseket. Az eredményekből látszik, hogy a pontok átlagaiból számított görbék sokkal szorosabb együttes melegedési jelet mutatnak egymáshoz képest, mint az FR4 esetében. Ez szintén az elvártaknak megfelelő eredmény, ugyanis a hőterjedés a vékony poliimid fólián sokkal gyorsabb és egyenletesebb, a kondenzátumréteg sokkal gyorsabban adja át a hőenergiát az egységnyi felületű vékony hordozónak, mint az egy nagyságrenddel vastagabb mintáknak. A 6-3-as ábrából kiderül, hogy a szaturációs hőmérséklet eléréséhez ebben az esetben már 15 s körüli időtartam elegendő volt, míg az FR4-es hordozó esetében ugyanez az érték a teljes felületen csak 50 s után állt be.

A rubalit kerámia mérése során a kapott görbék értelmezése már kevésbé egyértelmű feladat, mint az előző esetekben. Ugyan a lemez közepén elhelyezett 1-es számú pont hőmérséklete változik leghaladósabban, viszont a lemez egyik sarkán elhelyezett, 5-ös számmal jelölt pont melegedése szignifikánsan alacsonyabb, mint a többi sarokponté. Előbbi eredmény a vártnak megfelel a fentebb tárgyalt filmkondenzáció hőátadásának következtében, utóbbi görbe lassabb melegedése valószínűsíthetően a termoelemek rögzítési pontatlanságából adódhat. Ennek okai lehetnek a hordozóba fűrt furatok manuális kialakítása, illetve a hőelem kontaktálásának pontatlansága.

A konstrukció utolsó mérési sorozatában az FR4-ből és alumíniumból álló kompozit lemezen vizsgáltam a hőátadási folyamatot. A 6-5-ös ábrán látható eredmények alapján elmondható, ugyanúgy, mint az előző esetekben, itt is a középső pont bizonyult a leghaladósabban melegedőnek. A sarokpontok hőprofiljai szinte teljesen együtt futnak, a mérési pontatlanságok, illetve a külső hatásokból származó hibák mértéke ezen mérés során bizonyult a legkisebbnek.

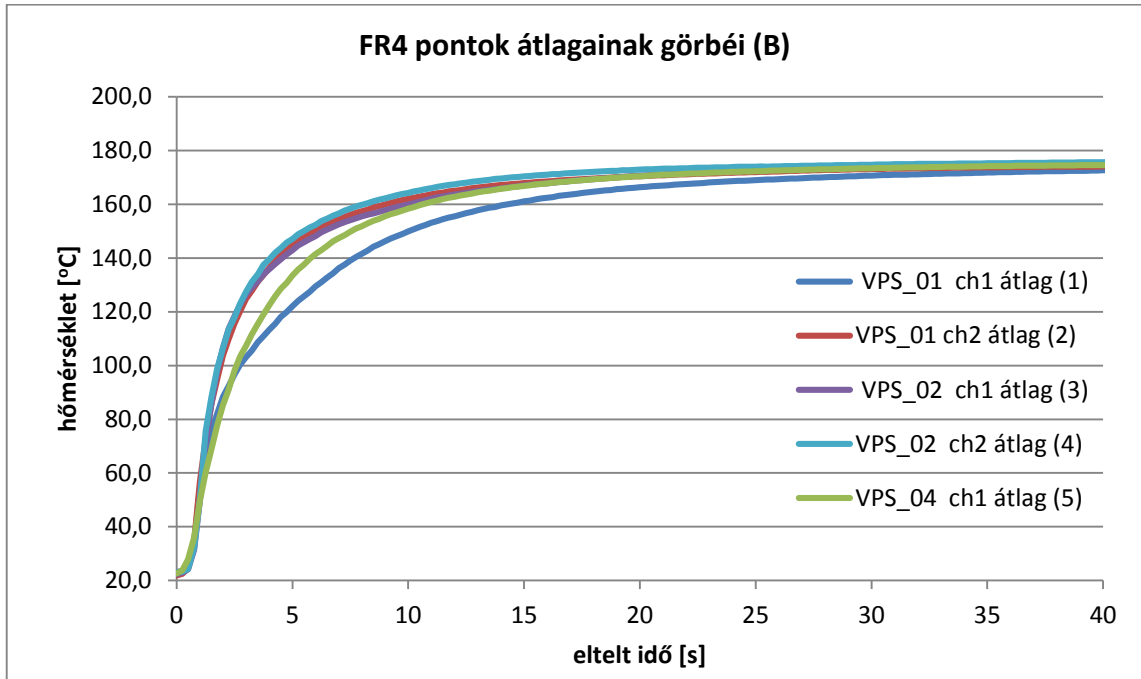


6-6. ábra: Az egyes hordozók pontjainak átlagából számított eredmények azonos felület esetén – (A) teszteset

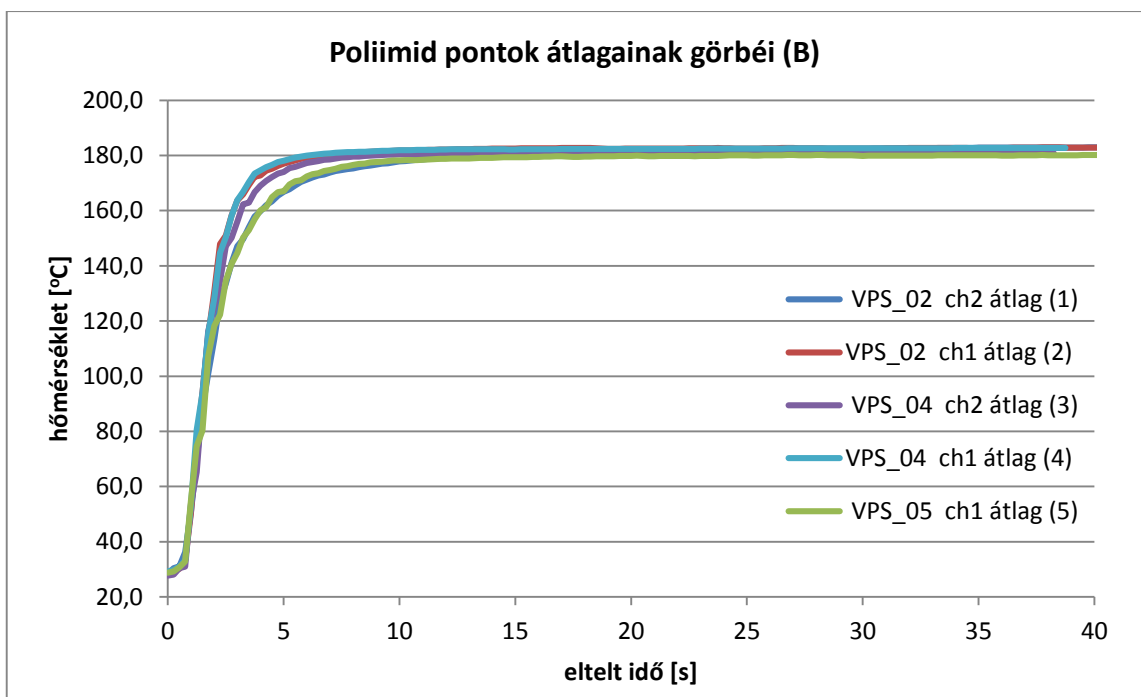
A mérések befejeztével egy összehasonlító diagram segítségével ábrázoltam az egyes hordozók pontonként átlagából számított hőmérsékleti eloszlásait. Eredményeim megfeleltek az előzetesen elvártaknak, poliimid fólia hőátadása bizonyult a leggyorsabbnak, majd a kerámia, aztán pedig az FR4-es lemez következett, leglassabbnak a kompozit hordozó termikus gradiens görbéje bizonyult. Ha összevetjük a kapott eredményeket az előzetes numerikus kalkulációkkal az egységnyi felületű, eltérő hőkapacitású esetre, megállapítható, hogy az eredmények igazolják a számításokat, ugyanis valóban a leggyorsabb hőátadású poliimid hőkapacitása volt a legkisebb, míg a leglassabb melegedési görbéhez a legnagyobb hőkapacitással rendelkező alumínium PCB kompozit tartozott. Az érdekesség a másik két hordozó melegedési görbéjének értelmezésében rejlik, ugyanis a kalkulációk alapján egy közel hasonló gradienst kellene kapni a kerámiára és az FR4-es tesztlemezre. Azonban a kerámia hordozó anyagi paramétereiből kifolyólag a hőterjedés sokkal gyorsabban és homogénebb módon zajlik le a kerámián, így a melegedési profil is gyorsabb lesz, mint az FR4-es hordozó esetén.

Ezen mérési sorozatokat követően előkészítettem a következő 4 mintát, amelyek felületméreteit az előzetesen kalkulált konstans hőkapacitás értékéhez optimalizáltam.

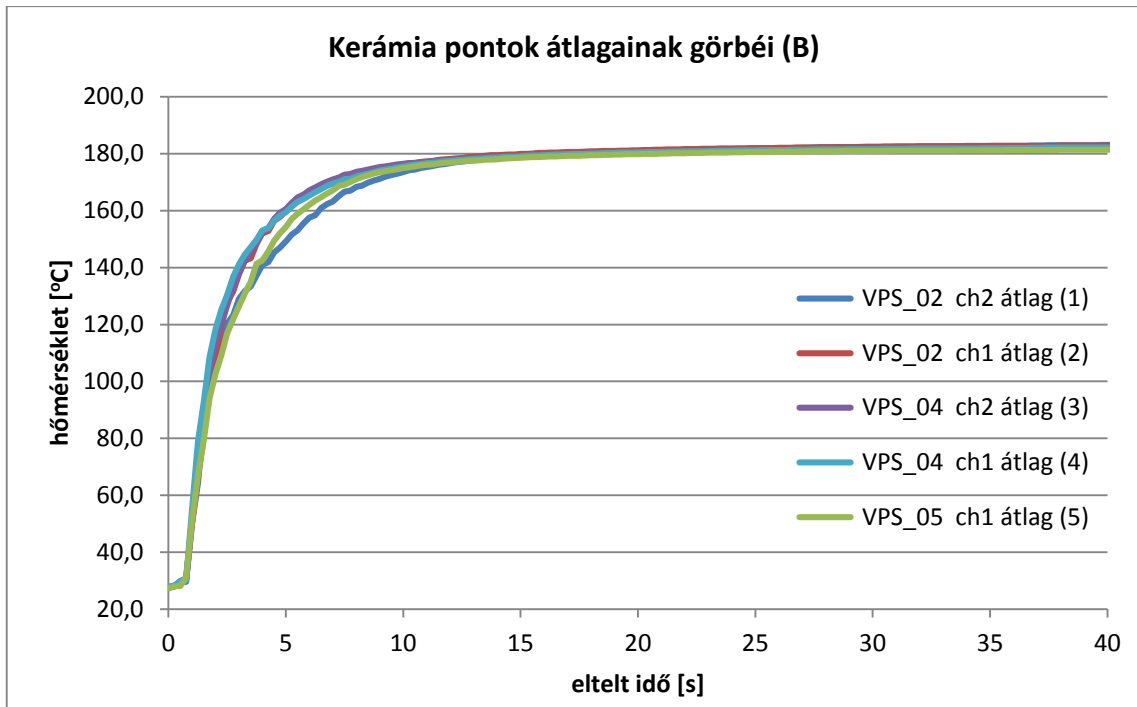
Ezen konstrukció eredményeitől előzetesen azt várjuk, hogy egy szorosabb melegedési jelleg lesz tapasztalható a hordozók középpontját és sarokpontjait tekintve.



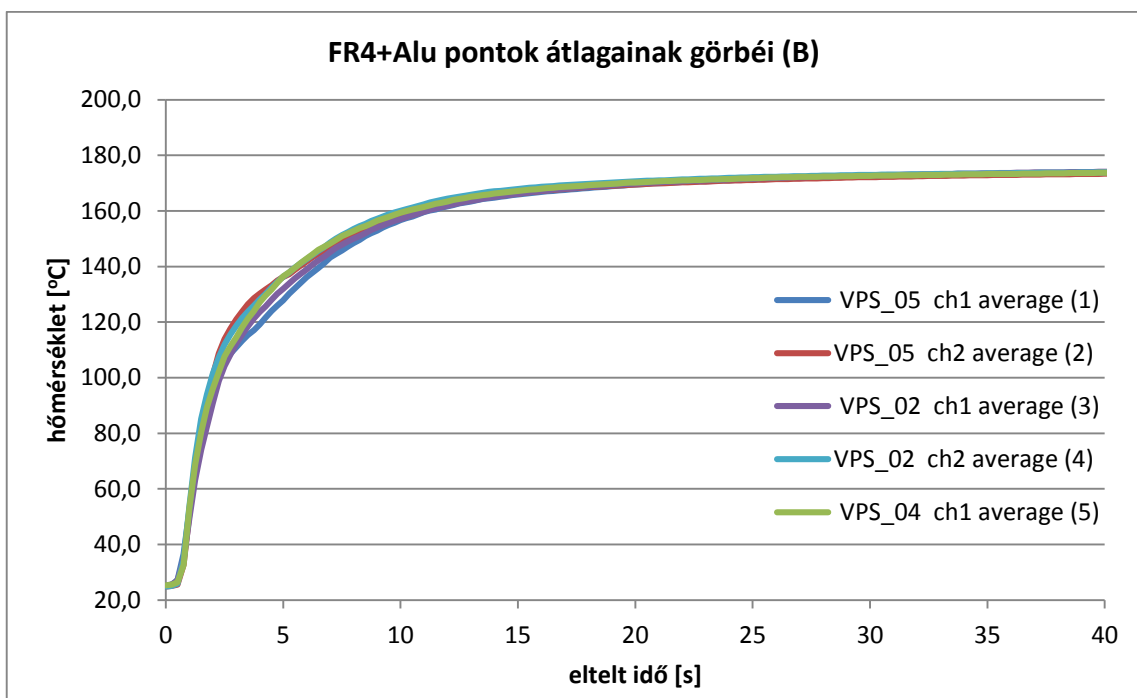
6-7. ábra: Az FR4-en végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén – (B) teszteset



6-8. ábra: Poliimid fólián végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén – (B) teszteset



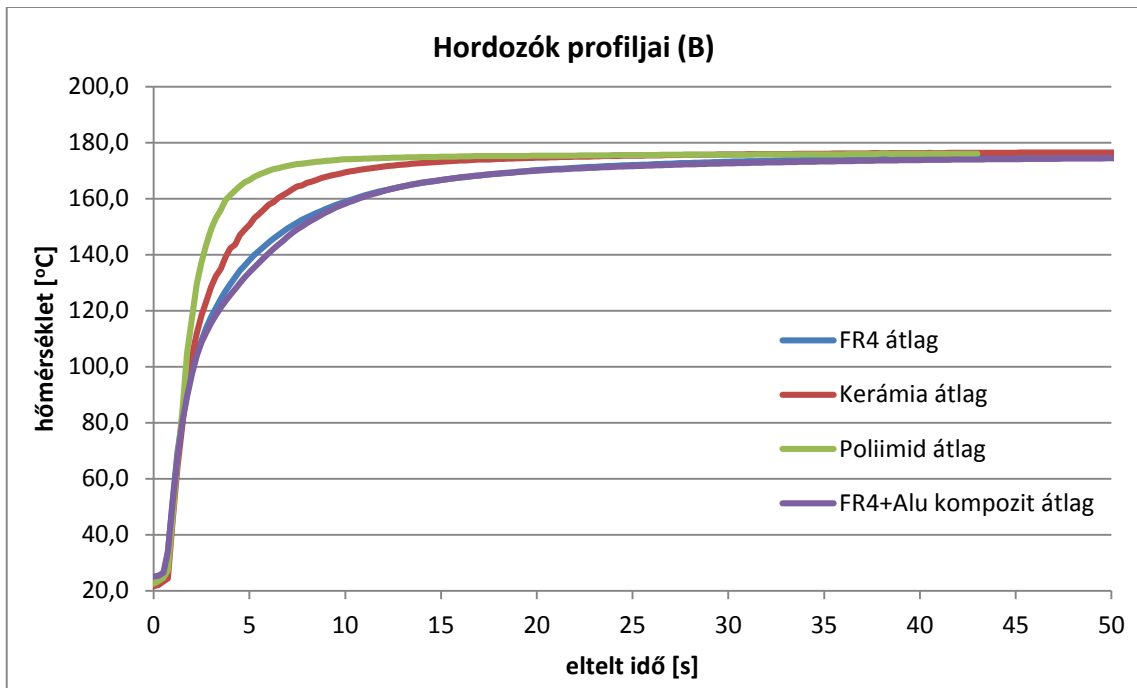
6-9. ábra: Kerámia hordozón végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén – (B) teszteset



6-10. ábra: FR4 + Aluminium kompozit hordozón végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén – (B) teszteset

Az eredmények alapján elmondható, hogy ugyan az egyes hordozók pontjai sokkal szorosabb melegedési jeleget mutatnak, viszont a hordozók átlagainak görbéi nem futnak teljesen együtt (6-11. ábra). Leggyorsabban ebben az esetben is a flexibilis

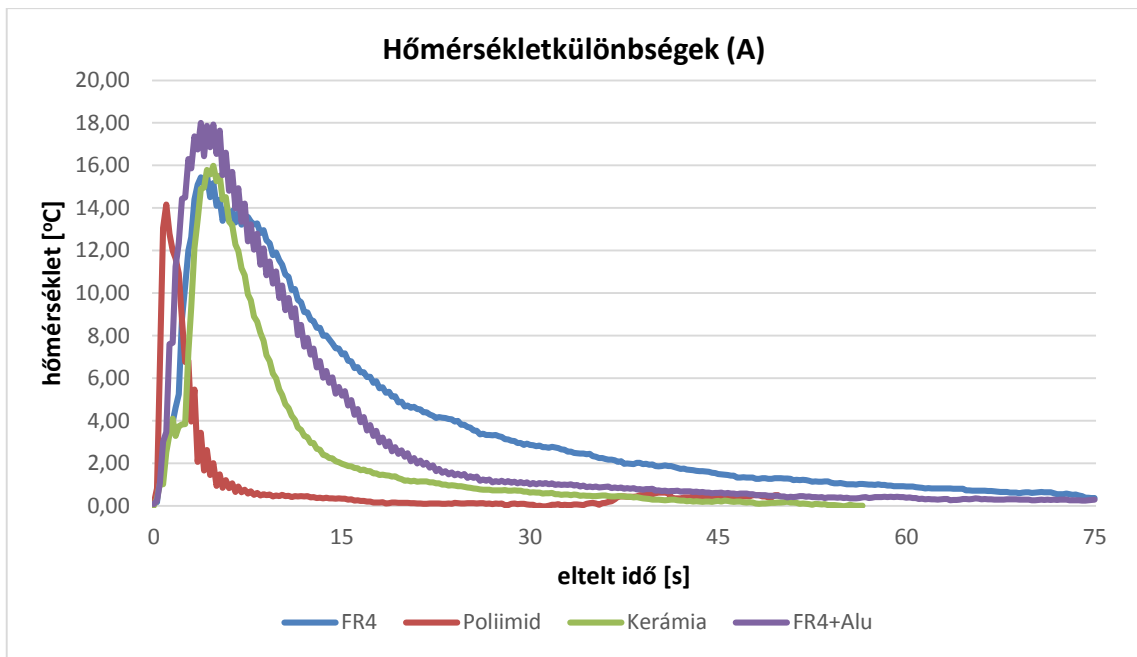
hordozó melegedett, ugyanis a felület-vastagság arány ezen minta esetében volt a legnagyobb. Emiatt a kerámia hordozó görbéje is gyorsabb felfutású, mint a másik két FR4 alapú szubsztráté, azonban ez az arány nem különbözik nagyságrendekkel, mint a poliimid fólia esetén.



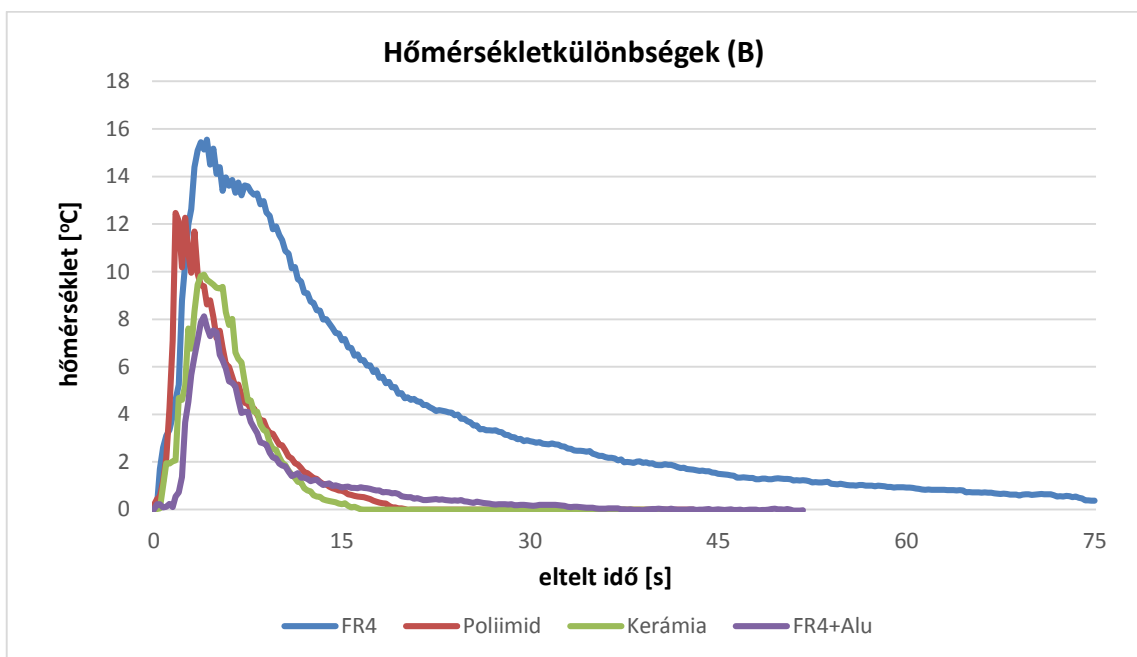
6-11. ábra: Az egyes hordozók pontjainak átlagából számított eredmények azonos hőkapacitás esetén – (B) teszteset

Az 6-11-es ábra alapján megállapítható, hogy önmagában a hőkapacitás változása nem minden esetben magyarázza a kapott eredményeket, ugyanis a termikus hővezetés és a termikus diffuzivitás, mint fizikai mennyiségek is hatással vannak a mérésekre.

Ezt követően az 6.12-es és 6.13-as ábrákon szemléltetem a hőmérsékletkülönbség értékeket a sarokpontok átlagai és a középpont között mindkét konstrukcióban mindegyik hordozóra.



6-12. ábra: Hőmérsékletkülönbségek a sarokpontok átlagai és a középpont között a vizsgált hordozókra azonos felület esetén – (A) teszteset



6-13. ábra: Hőmérsékletkülönbségek a sarokpontok átlagai és a középpont között a vizsgált hordozókra azonos hőkapacitás esetén – (B) teszteset

Azonos felületű hordozók esetében (A) a hőmérsékletkülönbségi maximum értékek (és közelítőleg a görbe alatti területek) korrelálnak a hőkapacitás kalkulációja során számtott értékekkel. A flexibilis hordozó hőmérsékletkülönbségi görbéje cseng le leghamarabb, majd ezt a kerámiáé követi. A görbe maximum pedig az elvártaknak

megfelelően a poliimid esetében a legalacsonyabb, hiszen a felület/vastagság arány miatt gyorsabban melegszik fel a lemez teljes felülete, mint a többi hordozó esetében, így a sarokpontok és a középpont között a többi mintához képest nem lesz akkora differencia.

A második tesztesetnél (B) a közös hőkapacitás következtében a kerámia, a flexibilis hordozó és az FR4+Alu görbéje nagyságrendileg megegyező felfutással és lecsengéssel rendelkezik, mg az FR4-es tesztlemez görbájének eltérése azzal magyarázható, hogy relatíve alacsony hővezetési tényezőjéhez a többi hordozóhoz képest egy alacsony felület/vastagság arányból származó érték párosul, így a sarokpontok sokkal gyorsabban tudnak felmelegedni, mint a lemez közepe.

6.2 Termikus diffuzivitás vizsgálata

Kalkulációval meghatároztam a termikus diffuzivitás értékeit, amelyet az 5. táblázat foglal össze.

5. táblázat: Termikus diffuzivitás számított értékei

Hordozó	Termikus hővezetési tényező [W/m·K]	Fajhő [J/kg·K]	Sűrűség [kg/m ³]	Termikus diffuzivitás [W/mm·K]
FR4	0,3	570	2100	0,2506
Poliimid	0,35	1090	1420	0,2261
Rubalit kerámia	24	800	3780	7,9365
FR4+Alumínium	1,55	2700	880	0,6524

A számításokból látható, hogy a második konstrukcióban (állandó hőkapacitás értékek) elvégzett mérések során a felületi értékek FR4, Rubalit kerámia és FR4+Alumínium kompozit hordozó esetén egy nagyságrendbe estek. A kerámia gyorsabb melegedése ezen hordozóktól a termikus diffuzivitás fizikai mennyiségével magyarázható.

6.3 További megjegyzések, jövőbe tekintés

A jövőbeni vizsgálatok során a termikus diffuzivitás paramétert további elemzések alá kell venni, illetve pontos befolyásolását specifikálni az állandó hőkapacitáson elvégzett mérésekhez különböző hordozókon. A kidolgozott mérési folyamaton további finomhangolási javaslatként a későbbiek során érdemes lehet a hőelemek rögzítését javítani akképpen, hogy a furatokat automatizált módszerrel

alakítsuk ki, amelynek következtében minden pontban állandó furatmélységet lehetne elérni. A hőelemrögzítés egyenetlensége is okozhat apró mérési hibákat a hőátadás szempontjából. a jövőben a ragasztó diszpenzálása szintén történhet automatizáltan, hogy a ragasztó térfogata is pontosan, ne csak becsült módon legyen egyenletes az adott rögzítési pontokon.

Meg kell jegyezni, hogy a relatíve rövid, 30 másodperces mérési görbék nem feleltethetőek meg egy az egyben az ipari anyagok (forraszok, ragasztók, stb.) által elvárt valódi hőprofiloknak, mivel rövid exponenciális telítődést reprezentáló görbéket mértünk (lásd 2-4. ábra). A görbék a telített gőzben történő hőátadást reprezentálják. Ezek a közvetlen praktikus alkalmazás aspektusából nem relevánsak, viszont a mérési elv és a gőz szerelőlemezre gyakorolt hatásának alap kutatás-szempontjából kutatási origóként tekinthetők. A későbbiekben a méréseket tovább lehet vinni telítetlen gőzben történő, optimalizált profilok vizsgálatára. A szerelőlemezekon később alkatrészek elhelyezésével tovább folytatható a munka. Ám az alkatrészek, esetleges extra vezető rétegek alkalmazásával a folyamat alapjainak feltárását megzavartam volna a munka ezen fázisában.

7 Összefoglalás

Munkálataim során részletesebben megismerkedtem a gőzfázisú forrasztás folyamatával, illetve a kondenzációs hőátadással, amelyeket a dolgozatom első részében bemutattam. Ennek kapcsán kitértem a különböző explicit modellekre és mérési módszerekre. Ezt követően összefoglaltam a témával kapcsolatos tanszéki kutatások eddigi eredményeit.

Méréseket végeztem 4 különböző (FR4, rubalit kerámia, poliimid, FR4 és alumínium kompozit) hordozón vízszintes pozícióban, melynek célja a kondenzálódott filmréteg hőátadásának vizsgálata ezen hordozókon. Ennek során különböző mérési pontokat alakítottam ki a hordozókon, amelyeket alulról rögzítettem, így minimalizálni tudtam a perturbációt, amelyet a testhez rögzített hőelemek visznek a hőmérsékletmérésbe. Minden hordozót több ízben, különböző vízszintes orientációkban is lemértem myPCLab szoftver segítségével, hogy összehasonlíthassam a rögzítő mintatartó pontosságát, majd a kapott összetartozó eredményeket Excel táblázatba exportáltam, és átlagoltam az egyes mérési pontokra nézve. Az eredmények kiértékeléséhez minden egyes mérési ponthoz külön diagramot készítettem, majd közös diagramon ábrázoltam a mérések átlagából képződött eredményeket.

A mérések segítségével igazoltam azon elméleti állításokat, mely szerint a filmkondenzátum hőátadási karakterisztikái függenek a hőátadástól, illetve a hordozók geometriai paramétereitől. Az első konstrukcióban elvégzett mérések során az eredményekből elmondható, hogy a vártaknak megfelelően a poliimid hordozó hőátadása bizonyult a leggyorsabbnak, illetve legegyszerűsebbnek, míg az alumínium kompozit esetében volt a legtöbb időre szükség ahhoz, hogy a hordozó a teljes felületen elérje a szaturációs hőmérsékletet. A második konstrukcióval zajló mérések alkalmával a kapott görbék melegezési jellege szorosabbnak bizonyult, azonban nem minden mérési görbe magyarázható a nagy felület/vastagság aránnyal, további vizsgálatok elvégzése szükséges a termikus diffuzivitás hatásának elemzéséhez a hőátadási folyamat során.

8 Köszönetnyilvánítás

Dolgozatom végén szeretnék köszönetet mondani David Buseknek, a Prágai Műszaki Egyetem adjunktusának, a közreműködésért és a mérésekben nyújtott segítségért, a myPCLab szoftver bemutatásáért, illetve azért, mert kérdéseimmel mindig bizalommal fordulhattam hozzá, építő jellegű kritikáival nagymértékben hozzájárult munkám sikerességéhez.

Szintén szeretném megköszönni Nagy Dániel MSc-s hallgatónak, akivel egyes méréseket közösen végeztünk el, segítve egymás munkáját.

Köszönet illeti Szalay Zoltán laboráns is, aki elvégezte a hordozóink méretre vágását, illetve a zsákfuratok elkészítését.

Végül, de nem utolsó sorban Bátorfi Réka tanszéki mérnöknek is szeretném megköszönni a segítőkészségét és támogatását a dolgozatom megírásához.

Ábrajegyzék

2-1. ábra: Gőzfázisú forrasztó berendezés keresztmetszeti ábrája [3].....	6
2-2. ábra: A Galden-folyadék kémiai összetétele	7
2-3. ábra: Filmkondenzáció függőleges síkfalon [9]	11
2-4. ábra: Exponenciális fűtési görbe kondenzáció során [16].....	15
3-1. ábra: Hőátadási együttható négyzetes lemez felületén 2s után	17
3-2. ábra: Filmkondenzáció vízszintes helyzetű FR4-es hordozóra	18
4-1. ábra: K típusú hőelem, csatlakozóval	20
4-2. ábra: T típusú hőelem, szabad vezetékvéggel	20
4-3. ábra: Melegpont létrehozása vezetékcsavarással (a) és ponthegeztéssel (b) (hibalehetőség a (c) pontnál – melegponttól messzebb összeérő vezetékek)	21
4-4. ábra: Különböző hőelemrögzítési módszerek a próbapanel felületéhez [21].....	22
4-5. ábra: Loctite 3621-as ragasztó hőmérséklet-idő grafikonja [22].....	22
4-6. ábra: MyPCLab adatgyűjtő készülék blokkvázlata	23
5-1. ábra: Tanszéki kísérleti gőzfázisú berendezés.....	27
5-2. ábra: Mérési pontok kialakítása a hordozókon	28
5-3. ábra: Novus myPCLab adatgyűjtő.....	28
5-4. ábra: 0 °C-os jégfürdő a kalibrációhoz	29
5-5. ábra: A hordozók mintatartója.....	30
6-1. ábra: A hordozók mérési pontjainak definiálása	31
6-2. ábra: Az FR4-en végzett mérések eredményei azonos felület esetén.....	32
6-3. ábra: Poliimid fólián végzett mérések eredményei azonos felület esetén	32
6-4. ábra: Kerámia hordozón végzett mérések eredményei azonos felület esetén	33
6-5. ábra: FR4 + Aluminium kompozit hordozón végzett mérések eredményei azonos felület esetén	33
6-6. ábra: Az egyes hordozók pontjainak átlagából számított eredmények azonos felület esetén	35
6-7. ábra: Az FR4-en végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén.....	36
6-8. ábra: Poliimid fólián végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén	36
6-9. ábra: Kerámia hordozón végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén.	37

6-10. ábra: FR4 + Aluminium kompozit hordozón végzett mérések eredményei azonos hőkapacitás esetén	37
6-11. ábra: Az egyes hordozók pontjainak átlagából számított eredmények azonos hőkapacitás esetén.....	38
6-12. ábra: Hőmérsékletkülönbségek a sarokpontok átlagai és a középpont között a vizsgált hordozókra azonos felület esetén	39
6-13. ábra: Hőmérsékletkülönbségek a sarokpontok átlagai és a középpont között a vizsgált hordozókra azonos hőkapacitás esetén.....	39

Irodalomjegyzék

- [1] Steven J. Beckman, Rick Labbe and Suzette Cowan, „SMT Adhesives Evaluating the Material's Critical Parameters”, Lockheed Martin, white paper, www.uic.com, *elérés: 2016. 09. 09.*
- [2] Claus Zabel: Condensation Reflow Soldering - The Soldering Process with Solutions for future Technological Demands, ASSCON Systemtechnik-Elektronik GmbH, Germany
www.amtest.bg/press/Asscon/Vapour%20Phase%20Process.pdf, *elérés: 2016. 09. 09.*
- [3] Olivér Krammer; Comparing the reliability and intermetallic layer of solder joints prepared with infrared and vapour phase soldering; Soldering and Surface Mount Technolgy; 2014
- [4] Attila Géczy; Investigations into the Process of Vapour Phase Soldering; Ph.D. Dissertation; Budapest, 2014
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/1345/ertekezes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, *elérés: 2016. 09. 15.*
- [5] Helmut Leicht, Andreas Thumm: Today's Vapor Phase Soldering - An Optimized Reflow Technology for Lead Free Soldering, SMTAI Conference, Orlando, August 17-21, 2008.
- [6] Galden HT170 adatlap, *elérés: 2016. 09. 27.*
<http://www.solvay.com/en/markets-and-products/featured-products/Galden.html>
- [7] Olivér Krammer, Tamás Garami, "Investigating the Mechanical Strength of Vapor Phase Soldered Chip Components Joints" IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2010. pp. 103-106.
- [8] Syed Khaja A, Kaestle C, Reinhardt A, Franke J (2013.) Optimized Thin-Film Diffusion Soldering for Power-Electronics Production *36th IEEE ISSE* pp. 11 – 16.
- [9] Chou P-C, Cheng S (2015.) Performance characterization of gallium nitride HEMT cascode switch for power conditioning applications, *Mater Sci Eng B Vol. 198* pp. 43–50.
- [10] Hromadka K., Reboun J, Rendl K, Wirth V, Hamacek A (2015.) Comparison of the surface properties of power electronic substrates, *38th IEEE ISSE* pp. 146 - 150
- [11] Esfandyari A, Syed-Khaja A, Horvath M, Franke J (2015.) Energy Efficiency Analysis of Vapor Phase Soldering Technology through Exergy-Based Metric *Appl Mech Mat Vol. 805* pp. 196-204.
- [12] Dr. Aszódi Attila: A konvektív hőátadás, Atomreaktorok termohidraulikája előadásanyag, BME NTI, Budapest, 2008

- [13] Dr. Gróf Gyula Műszaki hőtán 2. jegyzet BME-GPK 106-107.old.
- [14] P. J. Marto, W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, Young, I. Cho, first ed., Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1998, 14.1-14.27.
- [15] B. G. Nimmo and G. Leppert: Laminar Film Condensation on a Finite Horizontal Surface, Proc.4th Int. Heat Transfer Conf., Paris, 6, Cs 2.2, 1970.
- [16] A. Bejan: Film condensation on an upward facing plate with free edges, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34., pp. 582-587., 1991.
- [17] Gerstmann and P. Griffith: Laminar Film Condensation on the Underside of Horizontal and Inclined Surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer, 10, pp. 567-580, 1967.
- [18] Balázs Illés: Measuring heat transfer coefficient in convection reflow ovens, Measurement 43 (2010) 1134-1141
- [19] Balázs Illés: Distribution of the heat transfer coefficient in convection reflow oven, Applied Thermal Engineering 30 (2010) 1523-1530
- [20] Balázs Illés, Attila Géczy: Investigating the heat transfer on the top side of inclined printed circuit boards during vapour phase soldering
- [21] Leider W (2002) Dampfphasenlöten – Grundlagen und praktische Anwendung, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Germany, pp 31-39.
- [22] Attila Géczy, Balázs Illés, and Zsolt Illyefalvi-Vitéz: Modeling method of heat transfer during Vapour Phase Soldering based on filmwise condensation theory, International Journal of Heat and Mass Transfer 67 (2013) 1145–1150
- [23] Géczy Attila, Illés Balázs, Darnai Tamás: Investigating Condensation Heat Transfer during Vapour Phase Soldering on Round-Shaped PCB Plates International Journal of Heat and Mass Transfer 86 (2015) 639-647.
- [24] Balázs Illés, Attila Géczy: Numerical simulation of condensate layer formation during vapour phase soldering, Applied Thermal Engineering 70 (2014) 421-429
- [25] Matthew Duff, Joseph Towey: Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility, Analog Dialogue 44-10, October (2010)
- [26] A Géczy, B Kvanduk, B Illés, G Harsányi: Comparative Study on Proper Thermocouple Attachment for Vapour Phase Soldering Profiling Soldering & Surface Mount Technology 28:(1) pp. 7-12. (2016)
- [27] Loctite 3621 Technical Datasheet (TDS) , *elérés: 2016. 09. 17.*
http://www.eis-inc.com/suppliers/pdfs/productdetail-tdsLink.asp?prod_nbr=LOC30846

- [28] László Fazekas, Dániel Nagy, Attila Géczy, David Busek: Investigations on Heat Transfer with Different PCB Substrates during Vapour Phase Soldering; 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) Oradea, Romania, 2016
- [29] Géczy Attila, Illyefalvi-Vitéz Zsolt, Szőke Péter: Investigations on Vapour Phase Soldering Process in an Experimental Soldering Station; Micro and Nanosystems 2:3 pp.170-177. (2010)
- [30] Attila Géczy, Dániel Nagy, Balázs Illés, László Fazekas, Olivér Krammer, David Busek: Studying heat transfer on inclined printed circuit boards during vapour phase soldering; 40th International Microelectronics and Packaging (IMAPS) Poland, 2016