



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

# **Integrált mikrocsonnás hűtőeszközök modellezése és karakterizációja**

**Doktori (Ph. D.) értekezés téziszfüzete**

Szerző: Takács Gábor  
okleveles villamosmérnök

Témavezető: Dr. Bognár György  
egyetemi docens  
villamosmérnöki tudományok doktora

Elektronikus Eszközök Tanszéke  
Budapest, 2017.

# 1 Bevezetés

Az elektronikus eszközök további integrációjának legfőbb akadályozó tényezője a félvezető eszközök túlmelegedése, amelyet az egyre növekvő disszipációsűrűség okoz [1]. A teljesítményfelvétel csökkentése érdekében történt CMOS technológiai fejlesztéseknek (FinFET, Tri-Gate, SOI, low-K, stb.) köszönhetően a modern integrált áramkörökben évről évre sikerül a Moore-jóslatnak megfelelően az egységnyi felületre integrált alkatrészek (kapuk, tranzisztorok) számát folyamatosan növelni a disszipáció jelentős növekedése nélkül. Azonban a More-than-Moore (Moore jóslaton túlmutató) integráció (3D tokozás, System-in-Package, System-on-Package rendszerek, stb.) esetén az egységnyi felületre vett disszipáció akár többszöröse is lehet az egyetlen chipen lévő hőtermelésnek.

A 3D integráció következtében az egyes chippek és a környezet közötti hővezetési utak jelentősen hosszabbak lehetnek, így az integrált áramkörök hőmérséklete jelentősen megnövekedhet. Ennek magyarázata az, hogy a megnövekedett félvezető-tok, valamint félvezető-környezet között lévő hőellenállások miatt a chippek felületén kialakuló hőmérsékletértékek még ugyanakkora felületi disszipáció esetén is jelentősen emelkedhetnek. A megemelkedett működési hőmérséklettel járó hatások figyelembevétele rendkívül fontos már a tervezés korai szakaszában, ezért kiemelkedően sürgetővé vált a System-on-Package konstrukciók felépítését és az integrált hűtőeszközök hatását is figyelembe vevő kompakt modell kidolgozása.

Az előzőekben bemutatott okok is jelzik, hogy 3D integráció esetén különös figyelmet kell fordítani a termikus-menedzsment kérdésekre, így növelve tovább a modern eszközök teljesítményét, megbízhatóságát és robusztusságát.

System-on-Package eszközök esetén a köztes hordozónak (interposer) már nem csak az integrált áramkör és a nyomtatott huzalozású hordozó közötti elektromos összeköttetés megteremtése a feladata, hanem egyéb diszkrét eszközök (nagy értékű ellenállások és kapacitások, valamint eltemetett induktivitások) is kialakíthatók a belsejében. Folyamatos kutatások zajlanak további funkcióit megvalósító eszközök köztes hordozóban történő integrációjára: akkumulátor, érzékelő és beavatkozó eszközök, hűtőrendszerek, stb. Egyes kutatások mikroméretű csatornákat tartalmazó hűtőeszközök integrációját vizsgálják.

Ezekben a mikroméretű csatornában hűtőközeget keringtetve a félvezető-átmenet és a tok közötti hőellenállást (az áramoltatott közegtől és az áramlás jellegétől függően) jelentősen lecsökkenthetjük.

A hőút hosszának, és így a hőellenállás csökkentésének a legjobb módja az, ha mikroméretű csatornákat közvetlenül a chippek hátoldalának teljes felületén alakítunk ki [2]. A csatornákat különböző rajzolattal, geometriával és különböző technológiával (pl.: reaktív ion marással, nedves-kémiai marással, stb.) lehet készíteni. Ahhoz, hogy adott mérethatárokon belül a lehető legtöbb hő

elszállítására képes eszközt tudjunk tervezni – azaz a hűtési hatékonyságot maximalizálni tudjuk – a hőátadási jelenségek alapos megismerésére van szükség.

## 2 A kutatás célkitűzései

A bevezetőben ismertetett termikus problémák, valamint a mikroméretű csatornákat tartalmazó hűtőeszközök kapcsán felmerülő kérdések megválaszolása jelentette számomra azt a kihívást és motivációt, ami a doktori kutatásom során végigkísért. Témavezetőm, Dr. Bognár György 2009-ben sikeresen megvédett doktori disszertációjának [3] harmadik tézisében foglalkozott a mikrocsatornás hűtőeszközök termikus transziens tesztelésen alapuló karakterizációjával. Megállapította, hogy a mérési módszer alkalmazható a mikroméretű csatornákat tartalmazó hűtőeszközök félvezető átmenet és a tok ( $R_{thjc}$  – junction-to-case) hőellenállásának meghatározására. A különböző áramlási sebességek mellett elvégzett mérések alapján modellt alkotott, amelyben az eszköz hővezetése a hűtőközeg áramlási sebességétől függő másodfokú közelítő egyenlet eredményeként számolható.

Kutatási munkám egyik célja az, hogy egy olyan analitikus modellt dolgozzak ki, amely a hőátadási jelenségek leírásának szempontjából releváns fizikai paraméterek (áramlási sebesség, anyagjellemzők) ismeretében adja meg a csatornában lejátszódó hőtranszport mértékét. A hőtranszport pontos ismerete ugyan fontos paraméter (amelyet a hőátadási együttható fejez ki), ám a mérnöki gyakorlatban nem széleskörűen használt paraméter. Ehelyett az eszköz hőellenállása az, ami meghatározza, hogy adott maximális megengedhető hőmérséklet mellett mekkora teljesítményt képes az eszköz eldisszipálni, azaz mennyi lehet az áramkör maximális teljesítménye.

Fontos, hogy a kidolgozott analitikus modell ellenőrizve legyen az érvényességi tartományán belül. A validálás egyik módja az, hogy szimulációkkal ellenőrzöm a kapott adatok helyességét. Ehhez véges térfogat módszeren alapuló áramlástan szimulációkat végeztem az eszköz 3D modelljén. A modellvalidáción túl a szimulációknak egy másik fontos célja is volt: segítette a mikroméretű csatornában lejátszódó hőtranszport folyamatok kvalitatív megértését, a különböző vizualizációk, mint a hőtérkép, fluxussűrűség-térkép a modell egyszerűsítésében nyújtott támogatást.

Munkám ezt követő részében mérés-technikai kérdésekkel foglalkozok. Egy olyan mérőrendszer kidolgozása a célom, amely alkalmas a mikrocsatornás hűtőeszköz termikus karakterizációjára, tehát adott hűtőközegáramlási ráták mellett az eszköz hőellenállásának meghatározására. Azonban témavezetőm munkájától eltérően olyan mérési eljárás kidolgozása a cél, aminek segítségével kizárólag a csatornák falain keresztül történő hőtranszport mértéke határozható meg 10%-nál kisebb eltéréssel a szimulációkkal validált analitikus összefüggés felhasználásával kapott eredményekhez képest.

A vizsgálandó mintán 48 darab különböző keresztmetszetű és hosszúságú csatornát tartalmazott, valamint egy ezekre ortogonális beömlőnyílást. A mikrocsatornák négy fala két különböző anyagból (szilícium és borofloat üveg) készült, amelynek analitikus kezelése problémás volt a jelentősen eltérő anyagjellemzők miatt. A csatornáknak csak az egyik vége volt közösítve, a másik végük nyitott volt. Ez azt jelentette, hogy csak a belépő gáz hőmérsékletét lehetett közvetlenül megmérni, a hűtőközeg hőmérséklet a kimeneteken ismeretlen volt. A szakirodalomban áttekintése alapján elmondható, hogy nem létezik ehhez hasonló mérési elrendezésre kidolgozott mérési eljárás. A legtöbb kutatócsoport inkább olyan mintát alkalmazott a méréseiben, ahol a kilépő hőmérséklet mérhető volt, így viszonylag könnyen meghatározható az átadott hő mennyisége. Az általam vizsgált hűtőeszköz amiatt, hogy csak egy csatornaközösítéssel rendelkezett, kisebb hidrodinamikai ellenállást jelent az áramló közeg számára, így adott nyomásesés mellett nagyobb áramlási rátát lehet elérni, és ezzel együtt a hűtési hatékonyság is nagyobb.

A hosszú távú cél olyan integrált, CMOS-kompatibilis hűtőeszközök kifejlesztése és hatékonysági vizsgálata, melyek megoldást jelentenek napjaink nagyteljesítményű, 3D tokozású áramkörök hűtési problémáira.

### 3 Felhasznált eszközök és vizsgálati módszerek

– **Áramlásmérő és szabályozó:** A mérések során Alicat gyártmányú MC-10SLPM-D/10V, 10IN, GAS:Air típusú tömegáramlás mérőt és szabályozót használtam, melyet a gyártó légtömegáramra kalibrált be. Az adatlap szerint 0,8% leolvasási hibával, valamint 0,2% méréshatárra vonatkoztatott (full scale) relatív hibával mér és szabályoz. Az átfogási tartomány 200:1-hez, a legnagyobb áramlási ráta 600 liter/óra (10 liter/perc), ebből pedig kiszámítható a legkisebb áramlási ráta, ami 3 liter/óra. Beállási ideje egy másodpercnél kisebb. A gyártó a kalibrálási jegyzőkönyvet csatolta az eszköz mellé.

– **Keringtető hűtő-fűtő termosztát:** A hideglemez (cold plate) termosztálásához egy Julabo F25 keringtető hűtő-fűtő termosztát berendezést használtam. Az adatlap szerint 0,01 °C hőmérsékleti stabilitást tud biztosítani. A hűtési kapacitása 20 °C-on 350W.

– **Digitális hőmérő:** A hőmérsékletek pontos méréséhez Omega gyártmányú HH806AU digitális kétsatornás kézi hőmérőt alkalmaztam. A mérési tartománya -200 °C-tól 1372 °C-ig terjed. A mérési hibája  $\pm 0,05\%$  leolvasási hiba + 0,3 °C.

– **Optikai mikroszkóp:** A mikrocsatornás hűtőeszköz fizikai méreteinek meghatározásához Olympus BX51 típusú optikai mikroszkópot használtam.

– **Háromdimenziós gépészeti tervező szoftver:** A szimulációkhoz szükséges háromdimenziós terveket a Catia V5R20 verziójú gépészeti terverőrendszert használtam. A programban lehetőség volt mikrométer alapú

méretskálát használni, amelyet kifejezetten MEMS (mikro mikro-elektromechanikus rendszerek) tervezéséhez fejlesztettek.

– **Termikus tranziens teszter:** A termikus tranziens teszteléshez a T3Ster Termikus Tranziens Teszter berendezést [4], és a hozzá tartozó vezérlő szoftvert használtam. A berendezés pontossága közvetlenül nem adható meg a mérési módszer miatt. Maga a berendezés a bemenő feszültség jelet 1 millió minta/másodperc sebességgel fogadja, a felbontás 12 bit, ebből az elérhető legkisebb mérhető feszültségkülönbség  $12 \mu\text{V}$ . Ez  $2\text{mV/K}$  hőmérsékleti együttható mellett  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$  felbontást jelent. A mérési eredmények kiértékeléséhez a T3Ster Master v2.1 szoftvert használtam.

– **Matematikai szoftverek:** Bonyolultabb számítások kiértékeléséhez a Maple 9 matematikai szoftvert használtam fel. A hőáramsűrűség térkép előállításához MATLAB 2015b-t használtam, amelyet később MATLAB 2017b-re frissítettem.

– **Szimulációs szoftverek:** A numerikus szimulációkhoz két szoftvert használtam: a Mentor Graphics (ma már a Siemens része) FloTHERM szoftverét [5] és az ANSYS cégóriás azonos néven futó programcsomagjában szereplő CFX szimulátort [6]. A FloTHERM inkább elektronikai berendezések (chipek és tokozásuk, NyHL panelek és szervertermek) vizsgálatára használatos, míg az ANSYS CFX szimulátora inkább egy általános célú CFD program. Mindkét szoftverből a 2012 utáni verziókat használtam (FloTHERM 10 és ANSYS 14), melyeket évente frissítettem, hogy a legújabb és legpontosabb numerikus megoldó algoritmusok álljanak rendelkezésemre.

### 3.1 A vizsgált mikrocsatornás hűtőeszköz

Az analitikus összefüggések helyességének igazolására, valamint a hőátadási jelenségek megfigyelésére egy korábban készült mikroméretű csatornát tartalmazó hűtőeszközt használtam fel. A mikrocsatornák nedveskémiai anizotróp marási eljárással készültek  $\langle 100 \rangle$  orientáltságú, n-típusú szeleteken. Az alkalmazott marószert tetrametil-ammónium-hidroxid (TMAH) 25%-os oldata volt, amely  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra melegítve  $0,3$  mikrométer/másodperc sebességgel képes marni a szilíciumot. Ultrahangos fürdőt alkalmazva a csatornák felületi érdessége kisebb, mint  $1 \mu\text{m}$ , ami kedvező hatással van a hidrodinamikai ellenállásra. A kísérleti példányokat  $2''$ -os szilíciumszeleten lettek megvalósítva, melyen a  $15 \times 15 \text{ mm}$ -es mintákból négy darab fért el.

A csatornák radiális elrendezése a skóciai Heriot-Watt egyetemmel közösen végzett korábbi kutatómunkák [7]–[9], valamint az FP6 PATENT DfMM EU 507255 „Mikro- és nanoelektronikai eszközök kutatása és gyárthatóságra való tervezése” kutatás eredményeire támaszkodva lett kiválasztva.

A polírozott oldalon kialakított mikrocsatornák felső lezárásáról egy speciális üveglap gondoskodik (borofloat 33), amely anódikus szelet-szelet

kötéssel lett a szilíciumhordozóhoz rögzítve. A beömlőnyílás ugyanezen az üveglapon lézerablációval készített, körülbelül 2 mm átmérőjű furat.

Az anizotróp, tehát irányonként eltérő sebességű marási eljárás miatt a különböző irányítottágú csatornák eltérő méretűek lettek (összesen 48 csatorna található radiális elrendezésben). Az alkalmazott egykristályos szilícium hordozó atomrácsának szimmetriája miatt 12 eltérő méretű csatorna alakul ki, melyek körkörösen ismétlődnek.

## 4 Új tudományos eredmények

### 4.1 A mikrocsatornás hűtőeszköz kompakt modellje

Célom az volt, hogy olyan összefüggést dolgozzak ki, amely lamináris, átmeneti és turbulens áramlási típus esetén alkalmazható megfelelően megválasztott Nusselt-függvény esetén. Az analitikus összefüggés megalkotásánál azt az esetet tételezem fel, hogy egyetlen hosszú csatornában történik meg a hőátadás. A mikrocsatornás hűtőeszközben a konvektív hőtranszfert leíró hőellenállás nagysága az

$$R_{Th} = \frac{1}{\frac{dm}{dt} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A}{\frac{dm}{dt} \cdot c_p}}\right)}$$

szerint számolható, ahol  $\frac{dm}{dt}$  a tömegáramlási ráta,  $c_p$  az áramló közeg fajhője és  $A$  a hőátadási felület nagysága. Ebben az egyenletben az egyetlen fluidikai jellemzőktől függő paraméter a  $h$  hőátadási együttható. Számítása

$$h = \frac{k_f \cdot Nu}{D_H}$$

Nusselt-szám lamináris áramlásra, állandó fal hőmérsékletre és téglalap keresztmetszetű csatornára érvényes értékét [10] a

$$Nu = Nu_\infty + \frac{0,065 \cdot (D_H/L) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0,04 \cdot [(D_H/L) \cdot Re \cdot Pr]^{\frac{2}{3}}}$$

egyenlet segítségével lehet meghatározni, ahol  $Nu_\infty$  a végtelen hosszú csatornára vonatkozó Nusselt-szám,  $Re$  a Reynolds-szám,  $Pr$  a Prandtl-szám,  $D_H$  a hidrodinamikai átmérő és  $L$  a teljes csatornahossz. Végtelen hosszú csatornára a

$$Nu_\infty = -0,0274 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,631 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) + 2,3224$$

egyenlettel határozható meg a Nusselt-szám, ahol  $\frac{a}{b}$  a csatorna oldaláránya. Az állandó csatornageometriájú, trapéz keresztmetszetű csatornákat olyan ekvivalens téglalap keresztmetszetű csatornával helyettesítettem, amelyek hidrodinamikai átmérője azonos volt.

#### 4.1.1 A modell érvényességi tartománya

Egy új modell kidolgozásánál fontos meghatározni annak érvényességi tartományát. Ugyan az általam javasolt összefüggés függetlennek tekinthető az áramlás típusától. A javasolt Nusselt-függvény és az  $L$  hosszúságú csatornára meghatározható átlagos Nusselt-szám kizárólag lamináris áramlásra érvényes. Azonban átmeneti és turbulens áramlás esetén elegendő másik Nusselt-függvényt választani.

Azt azonban érdemes figyelembe venni, hogy ahhoz, hogy az áramlás turbulens legyen, nagy áramlási sebességet kell elérni, ami nagy nyomáseséssel biztosítható. A nagy nyomáseséshez nagy pumpálási teljesítmény szükséges, valamint az alkalmazott hűtőközegetől függően annak fizikai paraméterei nem tekinthetők állandónak a csatorna mentén, amivel számolni kell.

Az általam méréssel és szimulációval vizsgált tartomány a szakirodalom által javasolt sebességhatárig, azaz  $1/3$  Mach sebességig tart. E fölött a modell még a megfelelően megválasztott Nusselt-függvény ellenére is hibás értéket fog adni.

A lamináris áramlás esetén az általam javasolt Nusselt-függvény csak akkor érvényes, ha a csatorna teljes hossza nagyobb, mint a hidrodinamikai belépési hossz.

Az összefüggéseknek egy további korlátozása van: a Knudsen-számnak kisebbnek kell lennie, mint  $0,1$ . Ez azért szükséges, hogy a folytonossági és energiamegmaradási törvény ne sérüljön. Szobahőmérsékleten a levegő molekuláinak szabad úthossza  $0,07 \mu\text{m}$ , így a hidrodinamikai átmérőnek nagyobbak kell lennie, mint  $0,7 \mu\text{m}$ .

#### 4.1.2 Hőátadás numerikus vizsgálata

Az előzőekben bemutatott mikrocsatornás hűtőeszköze alkalmazva a kidolgozott eljárást meghatároztam az áramlásirata-függő parciális hőellenállást. A számolt eredmények ellenőrzésére CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációkat végeztem. E szimulációk további célja az ellenőrzés mellett, hogy magyarázatot találjak az esetleges eltérésekre a mért és a számolt adatok között, valamint, hogy képes legyek vizualizálni a kialakuló áramlási képeket és hőeloszlásokat.

Áramlási ráta [l/h]	Számolt hőellenállás [K/W]	Szimulált hőellenállás [K/W]	Eltérés
30	<b>99,1</b>	<b>103</b>	<b>3,8%</b>
60	<b>49,6</b>	<b>51,1</b>	<b>3,5%</b>
90	<b>33,4</b>	<b>34,4</b>	<b>2,9%</b>
120	<b>25,6</b>	<b>26</b>	<b>1,5%</b>

**4.1. táblázat. A számolt és a szimulációk eredményeként kapott hőellenállás értékek különböző áramlási ráták mellett**

A mikrocsatornás hűtőeszköz számolt és szimulációkkal ellenőrzött parciális hőellenállása nagyon jó egyezést mutatott (4.1. táblázat), a legnagyobb elérés mindösszesen 3,8% lett 30 liter/óra áramlási rátánál.

Az eredményeimet az I. tézisben fogalmaztam meg.

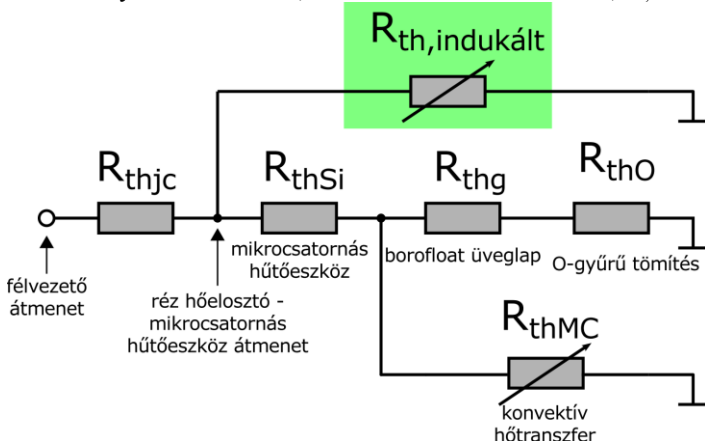
**I. tézis.** *Zárt, analitikus összefüggést dolgoztam ki az integrált mikroméretű csatornákat tartalmazó hűtőeszközök parciális hőellenállásának meghatározására, mely figyelembe veszi a csatorna geometriáját, valamint a hűtőközeg anyagi- és áramlási tulajdonságait. A modell abban az esetben érvényes, ha a mikrocsatorna fala konstans hőmérsékletű, az áramlás lamináris típusú, az áramlási sebesség nem haladja meg az 1/3 Mach sebességet, valamint a csatorna hosszabb, mint a hidrodinamikai belépési hossz. A kidolgozott, zárt alakú analitikus összefüggés alkalmazásával meghatároztam egy komplex geometriájú, mikrocsatornákat tartalmazó hűtőeszköz parciális hőellenállását. Az eredményeket véges térfogat szimulációkkal igazoltam. [J4, J6, C1, C3, C4, C7]*

## 4.2 A mikrocsatornában lejátszódó hőtranszfer mérési módszerének kidolgozása

A termikus tranziens tesztelésen alapuló mérési módszerek leírásával a JEDEC JEST 51-es számú szabványcsalád foglalkozik [11]. A JESD 51-1 szabvány tartalmazza a mérési és tesztelési módszer leírását egyetlen félvezető eszközre vonatkozóan. A JESD 51-2 foglalja össze a méréshez szükséges környezeti feltételeket légmozgás nélküli esetben. A kényszerített konvekcióval hűtött félvezető eszköz mérési módszerének leírását a JESD-51-6 szabvány tartalmazza. A leírt mérési módszer nem a félvezető tokozásában kialakított csatornahálózatban áramló közeg kényszerített áramlásának hűtési hatására vonatkozik, hanem egy adott félvezető eszköz körül áramló közeg esetén nyújt megfelelő mérési utasítást. A dolgozat írásakor nem állt rendelkezésre a termikus tranziens tesztelésen alapuló, a félvezetőeszköz belsejében áramló közeg hőtranszport folyamatainak jellemzésére szolgáló szabványos mérési módszer.



A kidolgozott mérés módosított termikus helyettesítő képe a 4.1. ábrán látható, ahol a környezet felé vezető, változó értékű hőellenállás ( $R_{th,indukált}$ ) látható.



**4.1. ábra. A változó nagyságú, külső kényszerített konvekció által létrehozott hűtőtel kiegészített termikus helyettesítő kép**

Véges térfogat szimulációkkal megvizsgáltam a külső, indukált légmozgás hatását, amely a mérés torzítását nagymértékben megnövelte.

A mérési összeállítás termikus helyettesítő képe alapján felírt egyenlet segítségével meghatároztam a mikrocsatornás hűtőeszköz által képviselt hőellenállás értékét, majd összevettem az analitikus modellből, és a szimulációkból kapott eredményekkel. Az eltérést szintén kiszámítottam, az eredményeket a 4.2. táblázat tartalmazza.

Áramlási ráta [l/h]	Számolt hőellenállás [K/W]	Szimulált hőellenállás [K/W]	Mért hőellenállás [K/W]	Eltérés
30	99,1	103	92,2	8%
60	49,6	51,1	49,9	1%
90	33,4	34,4	34,9	2,8%
120	25,6	26	26,9	4,3%

**4.2. táblázat. A számolt, a szimulált és a mért eredmények összevetése**

A mérési eredmények kevesebb, mint 10% hibával adták vissza az analitikus modell felhasználásával, valamint a véges térfogat szimulációkkal kapott eredményeket.

**II. tézis.** Új, termikus tranziens tesztelésen alapuló mérési eljárást dolgoztam ki integrált mikroméretű csatornákat tartalmazó hűtőeszközök csatornáiban zajló hőtranszport mérésére. Diszkrét, nyitott végű mikrocsatornákat tartalmazó hűtőeszköz esetén több mérési torzítást okozó hibaforrást azonosítottam. Igazoltam, hogy a hibaforrások közül a hűtőközeg-hozzávezetésekben történő hőtranszport, valamint a hűtőközeg áramlási sebességétől függő indukált konvektív hőátadás domináns. A javasolt mérési elrendezést e szempontok alapján alakítottam ki, és mérésekkel meghatároztam egy komplex geometriájú, mikrocsatornákat tartalmazó hűtőeszköz parciális hőellenállását. A mérési eredményeket analitikus számításokkal és véges térfogat szimulációkkal vetettem össze. [J1, J3, J5, J7, C2, C5]

### 4.3 Az optimális csatornahossz meghatározása

Az optimális csatornahosszúság számításához azzal a feltételezéssel kell élni, hogy minden csatorna hosszabb, mint a termikus belépési hossz. Az egységnyi idő alatt maximálisan elszállítható hőmennyiség

$$\frac{dQ_{max}}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot c_p \cdot (T_w - T_i) \left( 1 - e^{-\frac{L}{L_{kar}}} \right),$$

ahol  $(T_w - T_i)$  a csatorna falának és a csatornába belépő hűtőközeg hőmérsékletkülönbsége. Az általam bevezetett karakterisztikus csatornahossz az

$$L_{kar} = \frac{\frac{dm}{dt} C_p}{h \cdot p}$$

szerint számolható. Az

$$\left( 1 - e^{-\frac{L}{L_{kar}}} \right)$$

tag azt határozza meg, hogy a hűtőközeg a csatornán való végighaladás során a csatornafal és a belépő közeg hőmérsékletkülönbségének hányad részére melegszik fel. Ha a csatorna hossza adott áramlási ráta mellett megegyezik a karakterisztikus hosszúsággal, akkor a csatornából kilépő közeg hőmérséklete a csatornafal és a belépő közeg hőmérsékletkülönbségének 63%-át éri el. Ennél hosszabb csatornák esetén pedig egyre inkább közelíti a fal hőmérsékletét.

A bemutatott kísérleti minta geometriai adatait, és a csatorna hosszára vonatkozó új módszert felhasználtam arra, hogy meghatározzam a kísérleti minta szükséges csatornahosszúságait.

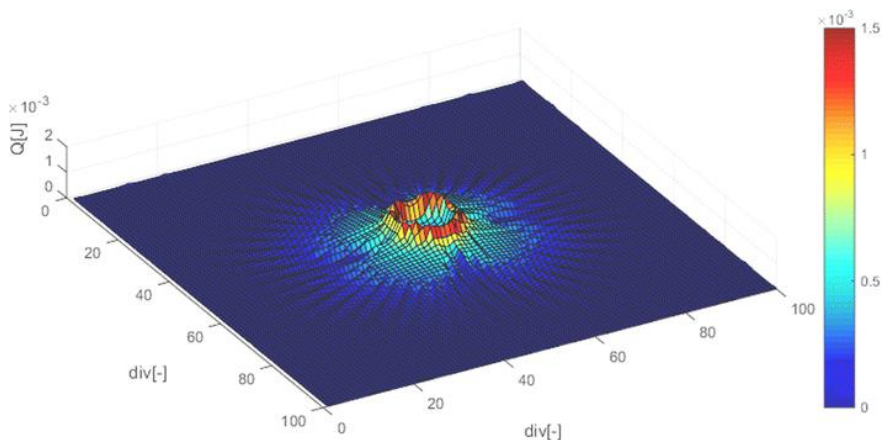
Az ismertetett módszer felhasználásával kiszámítottam a karakterisztikus hosszúságot ezen áramlási ráták mellett. Az így kapott eredményeket a 4.3. táblázat tartalmazza.

Kumulatív áramlási ráta [l/h]	Csatornánkénti áramlási ráta [l/h]	Számolt karakterisztikus hossz [mm]
30	0,625	0,189
60	1,500	0,371
90	1,875	0,560
120	2,500	0,747
240	5,000	1,494

**4.3. táblázat. Számolt karakterisztikus hosszok**

Látszik, hogy kis áramlási rátáknál (30-60 l/h) meglehetősen kicsi a karakterisztikus csatornahossz. Még 120 l/óra áramlási ráta mellett is kevesebb, mint egy milliméter, 240 l/óránál ennek duplája.

Az analitikus modell validálása érdekében futtatott véges térfogat szimulációkat futtattam. Készítettem egy algoritmust, amely meghatározta adott felbontás mellett a hőáramsűrűségeket. Ezt azután grafikusán ábrázoltam, amelyből előállt a mikrocatornás eszköz hőáramsűrűség térképe. Az eloszlást a 4.2. ábra mutatja, mely azt a tényt is alátámasztja, hogy közvetlenül a beömlő nyílásnál viszonylag kevés hő adódik át a feltorlódott hűtőközegnek. Az is jól látható, hogy a hő jelentős része a csatornák bemeneti szakaszán adódik át az áramló közegeknek, ami jó egyezést mutat az analitikus modell által előre jelzett viselkedéssel.



**4.2. ábra. Hőáramsűrűség-térkép**

Az általam javasolt, karakterisztikus hosszt meghatározó összefüggések validálásához további véges térfogat szimulációkat futtattam. Az ellenőrzés gyorsítása érdekében elegendő volt egyetlen csatornán belül történő tömeg- és hőáramot vizsgálni.

A szimulációkból kapott eredményeket összevettem az analitikus számítás eredményeivel, és a 4.4. táblázatban összefoglaltam.

<b>Szumma áramlási ráta [l/h]</b>	<b>Számolt karakterisztikus hossz [mm]</b>	<b>Szimulált karakterisztikus hossz [mm]</b>	<b>Eltérés [mm]</b>	<b>Eltérés [%]</b>
30	0,189	0,18	0,009	5
60	0,371	0,35	0,021	6
90	0,560	0,56	0	0
120	0,747	0,75	-0,003	-0,4
240	1,494	1,50	-0,006	-0,4

#### **4.4. táblázat. A számolt és a szimulált karakterisztikus hosszok összevetése**

Az eltérés végig 10%-on belül maradt, így a módszert véges térfogat szimulációkkal alátámasztottam. A módszer kiterjeszhető átmeneti és turbulens áramlási típusokra is, de akkor nem az általam javasolt Nusselt-függvényt kell alkalmazni.

**III. tézis.** *Eljárást dolgoztam ki a hűtőközeg fizikai tulajdonságaitól, az áramlási paramétereiktől és a mikrocsatornás hűtőeszköz csatornageometriától függő optimális csatornahosszúság meghatározására. Bevezettem a karakterisztikus csatornahossz ( $L_{kar}$ ) fogalmát, amely megadja, hogy a csatornán belül a hűtőközeg a maximális elszállítható hőmennyiség  $1 - 1/e$  -ad részét milyen hosszú csatornaszakaszon veszi fel. A módszert egy komplex geometriájú, mikrocsatornákat tartalmazó hűtőeszköze alkalmaztam, és megállapítottam, hogy még a vizsgált maximális térfogatáram esetén is csak az eszköz alapterületének 31,3%-ára van szükség, feltételezve, hogy a hűtőközeg által maximálisan elszállítható hőmennyiség 95%-át használjuk ki ( $3 \cdot L_{kar}$ ). A módszer helyességét véges térfogat szimulációkkal igazoltam. [J2, C6]*

## 5 Az eredmények gyakorlati alkalmazása

A kutatómunkámat a K 109232 számú, „Integrált termikus menedzsment System-on-Package eszközökben” című, az Országos Tudományos Kutatási Alap által támogatott projektben végeztem. Az első négy év eredményei alapján a tudományos ellenőrző bizottság sikeresnek minősítette a kutatócsoport munkáját.

Az általam kidolgozott modell véges térfogati szimulációkkal és mérésekkel is validálva lett, ami alkalmassá teszi hidro-termikus csatolt szimulációs szoftverekben való alkalmazásra. A modell továbbfejlesztett változata egy termikus szimulátor motorba beépítésre is került, az elért eredmények egy konferenciacikk formájában közlésre kerültek [C7].

Bebizonyítottam, hogy a kidolgozott mérési módszer alkalmas a mikrocsatornában lezajló hőtranszport pontos mérésére. Ezzel olyan eszköz került a kezembe, amely segítségével a kritikus és átmeneti áramlási tartományokon is lehetségessé válik méréseket végezni, ezzel esetleges nyitott kérdéseket megválaszolni. Az ilyen típusú mérésekhez egyszerűsített geometriájú kísérleti eszközök szükségesek. Ennek érdekében különböző geometriájú eszközök tervezése és előállítása már megtörtént, az analitikus modell alkalmazása kiterjesztésre került a turbulens áramlási típus esetén is. Az eredmények egy nemzetközi folyóiratcikkben publikálva lettek [J6].

A mikrocsatornás hűtőeszközök tervezésének kidolgozott módszere nem csak áramkörök hűtésére alkalmas, hanem széles körben alkalmazható. Erre egy példa [C6]-ban publikálásra került, ahol koncentrátoros napelem hűtése volt a cél mikrocsatornás hűtőeszköz alkalmazásával. A csatornageometria megtervezése, valamint a szükséges hűtőközeg áramlási ráta meghatározása az általam kidolgozott eljárás (optimális csatorna hossz meghatározása) felhasználásával történt meg.

A mérőrendszert az iránymutatásaim alapján át lett tervezve úgy, hogy folyadék fázisú hűtőközegek esetén is alkalmazható legyen ugyanazokkal az előnyökkel, mint amik a gázfázisú hűtőközegek esetén elérhetőek. A mérési elrendezés összeépítése a dolgozat írása közben folyamatban van

## Megjelent folyóiratcikk

- [J1] G. Takács, P. G. Szabó, B. Plesz, Gy. Bognár. Improved thermal characterization method of integrated microscale heat sinks. **MICROELECTRONICS JOURNAL** **45**:(12) pp. 1740-1745. (2014)
- [J2] G. Takács, P. G. Szabó, Gy. Bognár. Thermal management in System-on-Package structures by applying microscale heat sink. Part I: Consideration of the appropriate channel length of microscale heat sink(s). **MICROELECTRONICS JOURNAL** **46**:(12 A) pp. 1202-1207. (2015)
- [J3] G. Takács, P. G. Szabó, Gy. Bognár. Enhanced thermal characterization method of microscale heatsink structures. **MICROELECTRONICS RELIABILITY** **67**:(-) pp. 21-28. (2016)
- [J4] G. Takács, P. G. Szabó, Gy. Bognár. Modelling of the flow-rate dependent partial thermal resistance of integrated microscale cooling structures. **MICROSYSTEM TECHNOLOGIES** **23**:(9) pp. 4001-4010. (2017)
- [J5] Márton Németh , Gábor Takács, Lázár Jani , András Poppe. Compact modeling approach for microchannel cooling and its validation. **MICROSYSTEM TECHNOLOGIES** **23**: Paper MITE-D-16-00550R3. 13 p. (2017)
- [J6] Gy. Bognár, G. Takács, L. Pohl, P. G. Szabó. Thermal modelling of integrated microscale heatsink structures. **MICROSYSTEM TECHNOLOGIES** **-**:(-) pp. 1-12. (2017)
- [J7] Gábor Takács, György Bognár, Enikő Bándy, Gábor Rózsás, Péter G. Szabó. Fabrication and Characterization of Microscale Heat Sinks. **MICROELECTRONICS RELIABILITY** **-**:(-) pp. 1-8. (2017)

## Konferencia-kiadványban megjelent előadás

- [C1] Takács Gábor, Bognár György, Szabó Péter Gábor. Hőátadási jelenségek vizsgálata mikroméretű csatornákat tartalmazó integrált hűtőeszközökben. In: Keresztes Gábor (szerk.). Tavasz Szél 2015 / Spring Wind 2015 Konferenciakötet: III. kötet. Konferencia helye, ideje: Eger, Magyarország, 2015.04.10-2015.04.12. Eger: Líceum Kiadó, 2015. pp. 435-446.
- [C2] G. Takács, P. G. Szabó, Gy. Bognár. Enhanced Thermal Characterization Method of Microscale Heatsink Structures In: Chris Bailey, Bernhard Wunderle, Sebastian Volz (szerk.). Proceedings of the 21st International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'15). Konferencia helye, ideje: Paris, Franciaország, 2015.09.30-2015.10.02. Paris: pp. 1-4.
- [C3] G. Takács, P. G. Szabó, Gy. Bognár. Modelling of the flow rate dependent partial thermal resistance of integrated microscale cooling structures. In: Charlot B, Mita Y, Nouet P, Pressecq F, Schropfer G, Rencz M, Schneider

- P (szerk.). Proceedings of the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'15). Konferencia helye, ideje: Montpellier, Franciaország, 2015.04.27-2015.04.30. New York: IEEE, 2015. pp. 252-255.
- [C4] Gy. Bognár, G. Takács, L. Pohl, P. G. Szabó. Thermal modelling of integrated heatsink structures. In: B Charlot, Y Mita, P Nouet, F Presseccq, M Rencz, P Schneider, N Tas (szerk.). Proceedings of the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'16). 347 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.05.30-2016.06.02. New York: IEEE, 2016. pp. 173-177.
- [C5] Gábor Takács, György Bognár, Enikő Bándy, Gábor Rózsás, Péter G. Szabó. Fabrication and Characterization of Microscale Heat Sinks. In: András Poppe (szerk.). Proceedings of the 22nd International Workshop on THERMAL INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'16). 349 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.09.21-2016.09.23. Budapest: BME Elektronikus Eszközök Tanszék, 2016. pp. 264-267.
- [C6] Plesz Balázs, Takács Gábor, Szabó G. Péter, Kohári Zsolt, Németh Márton, Bognár György. Integrated microscale cooling for concentrator solar cells. In: Pascal Nouet. Pascal Nouet (szerk.). Proceedings of the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'17). 282 p. Konferencia helye, ideje: Bordeaux, Franciaország, 2017.05.29-2017.06.01. Montpellier: University of Montpellier, 2017. pp. 158-161.
- [C7] György Bognár, Gábor Takács, László Pohl, Lázár Jani, András Timár, Péter Horváth, Márton Németh, András Poppe, Péter Gábor Szabó. Integrating Chip-level Microfluidics Cooling into System Level Design of Digital Circuits. In: Veerendra Mulay, Jesse Galloway, Adriana Rangel (szerk.). Proceedings of the 33rd IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'17). 302 p. Konferencia helye, ideje: San Jose, Amerikai Egyesült Államok, 2017.03.13-2017.03.17. San Jose: IEEE, 2017. pp. 77-87.

## Tézisekhez szorosan nem kapcsolódó publikációk

- [N1] Gy. Bognár, P.G. Szabó, G. Takács. Generalization of the thermal model of infrared radiation sensors. **MICROELECTRONICS JOURNAL** 46:(6) pp. 543-550. (2015)
- [N2] T Garami, G Takacs, O Krammer, A Szabo. Investigation of the pre-heating process during thermosonic wire bonding by FEM simulation. In: J Nicholics (szerk.). 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Konferencia helye, ideje: Eger, Magyarország, 2015.05.06-2015.05.10. (IEEE). New York: IEEE, 2015. pp. 333-338.

## Hivatkozások

- [1] L. Sauciuc, G. Chrysler, R. Mahajan, and M. Szeleper, "Air-cooling extension-performance limits for processor cooling applications," in *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2003. Nineteenth Annual IEEE*, 2003, pp. 74–81.
- [2] D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease, "High-performance heat sinking for VLSI," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 2, no. 5, pp. 126–129, 1981.
- [3] Dr. Bognár György, "A mikroelektronika egyes termikus problémáinak kezelése," Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2009.
- [4] "T3Ster - Thermal characterization of IC packages, LEDs and systems - Mentor Graphics." [Online]. Available: <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/>. [Accessed: 06-Nov-2017].
- [5] "FloTHERM - Electronics thermal analysis software - Mentor Graphics." [Online]. Available: <https://www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm/>. [Accessed: 08-Nov-2017].
- [6] "ANSYS CFX: Turbomachinery CFD Simulation." [Online]. Available: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-CFX>. [Accessed: 08-Nov-2017].
- [7] Z. Kohári, G. Bognár, G. Horváth, A. Poppe, M. Rencz, and V. Székely, "Cross-verification of thermal characterization of a microcooler," *J. Electron. Packag.*, vol. 129, no. 2, pp. 167–171, 2007.
- [8] M. P. Y. Desmulliez, A. J. Pang, M. Leonard, R. S. Dhariwal, W. Yu, E. Abraham, G. Bognár, A. Poppe, G. Horvath, Z. Kohari, M. Rencz, D. Emerson, R. W. Barber, O. Slattery, F. Waldron, and N. Cordero, "Fabrication and characterization of a low-cost, wafer-scale radial microchannel cooling plate," *IEEE Trans. Components Packag. Technol.*, vol. 32, no. 1, pp. 20–29, 2009.
- [9] W. Yu, M. P. Y. Desmulliez, A. Drufke, M. Leonard, R. S. Dhariwal, D. Flynn, G. Bognár, A. Poppe, G. Horvath, Z. Kohari, and M. Rencz, "High-aspect-ratio metal microchannel plates for microelectronic cooling applications," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 2, p. 25004, 2010.
- [10] A. F. Edwards, D. K., Denny, V. E., Mills, *Transfer Processes*. Hemisphere, 1979.
- [11] "METHODOLOGY FOR THE THERMAL MEASUREMENT OF COMPONENT PACKAGES (SINGLE SEMICONDUCTOR DEVICE) | JEDEC." [Online]. Available: <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-51>. [Accessed: 05-Nov-2017].