



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Tudományos Diákköri Konferencia 2015

Mikrocsonatornás hűtőrendszerek vizsgálata

Szerző:

Marák Károly

Konzulensek:

Takács Gábor, Bognár György

Budapest, Elektronikus Eszközök Tanszéke
2015.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
1. Irodalmi összefoglalás	3
1.1. Mikrocsatornás hűtőeszközök	3
2. A hőterjedés egyenlete, Fourier törvénye, hőellenállás	5
2.1. Egydimenziós hőterjedés esete	5
2.2. Egyszerű hőátadási jelenségek illusztrálása egy példán	7
2.3. Kettő- és háromdimenziós hőterjedés esete	9
3. Egyetlen csatornával hűtött alkatrész ANSYS modellje	11
3.1. Geometry modul	11
3.2. Mesh modul	12
3.3. CFX-pre modul	13
4. Az egycsatornás szimulációk eredményei	15
5. A megvalósított eszköz szimulációja ANSYS CFX segítségével	18
5.1. A háló finomságának hatása a szimulációs eredményekre	22
6. Összehasonlítás egy alternatív csatornageometriával és egyéb hűtési módokkal	25
6.1. Párhuzamos mikrocsatornás hűtőeszköz	25
6.2. Összehasonlítás egy konvencionális hűtőeszközzel	27
7. A megvalósított hűtőeszköz mérése termikus tranziens tesztelés segítségével	28
7.1. A mérési elrendezés	29
7.2. A mérés problémái	30
7.3. Mérési eredmények	31
Összegzés, további tervek	33

Bevezetés

Az integrált áramkörök feltalálása óta egy adott felületre integrálható komponensek száma exponenciálisan nő. Az ezek működtetéséhez szükséges energia csökken, de kisebb mértékben, mint a tranzisztorok méretének csökkenése. Így az integrált áramkörökben növekszik a felületegységre eső disszipáció, így problémát jelenthet ezek túlmelegedése.

Már a hagyományos, planár technológiával készült integrált áramkörökben is komoly hűtést igényelnek a processzorok, de még komolyabb kihívást jelent a modern 3D tokozású áramkörök hőmérsékletének szinten tartása - itt különösen fontos a stabilan tartott hőmérséklet, hogy megakadályozzuk a hatékonyság csökkenését és az esetleges üzemzavarokat.

Egy másik felmerülő probléma a napelemek területén merült fel, ismert tény, hogy a hőmérséklet növekedésével csökken a hatásfokuk, így itt is fontos kérdés a hűtés megoldása.

A ma használatos konvencionális léghűtéses módszer már lassan eléri hatékonyságának határait [1], így felmerült az ötlet, hogy apró, mikrométeres keresztmetszetű hűtőcsatornákat használjunk, hogy a hűtőfolyadékot vagy gázt minél közelebb juttassuk a hűtendő elemhez. Ennek egyik módja az, hogy, mivel a szilícium chip 95%-a úgyszólván kihasználatlanul marad, ebbe vájjuk bele a hűtőalagutainkat. Mivel azonban nehéz nagy mennyiségű hűtőgázt vagy folyadékot keresztul-áramoltatni ilyen kis csatornákon (ennek akadályai a csatornák keresztmetszete és a nyomásesés korlátai), ezen rendszerek hűtési hatékonyságának növelésénél a hangsúly a csatornamintázatra, az áramlási és anyagi paraméterekre helyeződött.

Mivel több végelem-szoftver is tud kezelni áramlási és hőátadási jelenségeket, felmerült az ötlet, próbáljuk meg a fent említett paramétereket hatását az alkatrész hőmérsékletére számítógéppel is vizsgálni; esetlegesen kidolgozni egy optimalizációs eljárást, mellyel javítható hűtőberendezésünk hatásfoka.

Ezen út választásának egyik haszna az, hogy egy kész modellel egyszerűbb és gyorsabban megismételhető a kísérlet különböző paraméterekre, míg a laboratóriumban elvégzett kísérletről ez nem mondható el. Léteznek analitikus módszerek is a problémakörben, de ezek megbízhatósága itt, mint minden áramlási jelenség esetében, megkérdőjelezhető.

A számítógépes szimuláció hátrányai közé tartozik az, hogy egy végelem-szoftverben a modell elkészítése nagyfokú hozzáértést igényel, továbbá szükséges a kapott eredmények kritikus vizsgálata és a fizikai valósággal való összevetése is. További probléma, hogy a növekvő számítási pontossággal együtt növekszik a számítási idő is; ennek korlátaiba a szimulációk folyamán többször is beleütköztem.

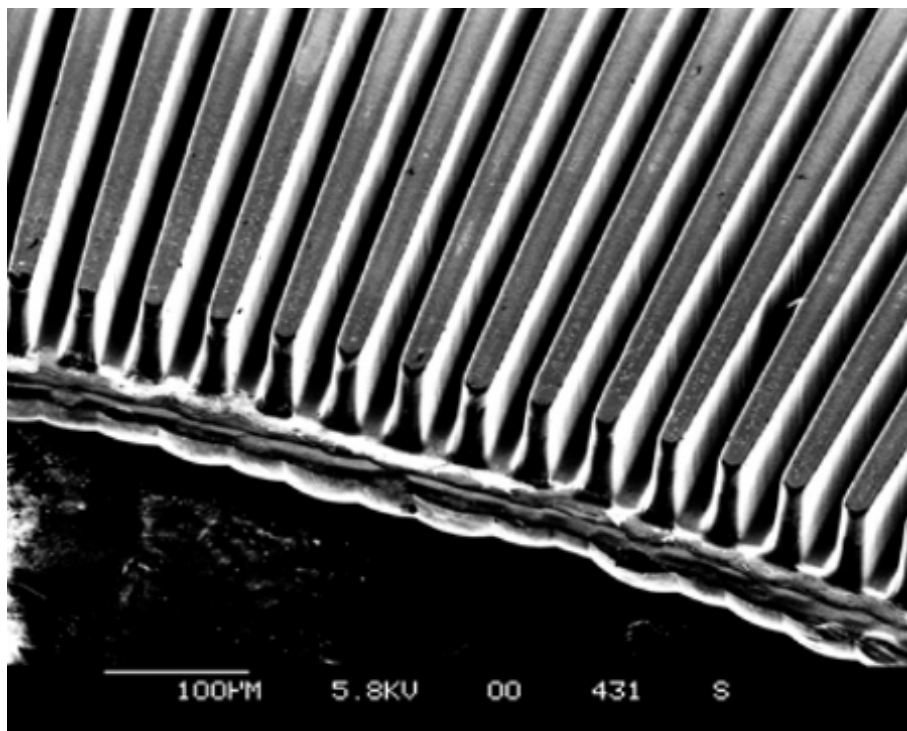
Ebben a munkában a célunk a hűtőeszközben lejátszódó termikus jelenségek mélyebb megértése, megismerkedés egy végelem szoftverrel (ANSYS), egypár egyszerűbb hűtőeszköz modelljének elkészítése és egy ilyen mikrocsatornás hűtőeszköz karakterizációja a termikus transziens módszer segítségével.

1. fejezet

Irodalmi összefoglalás

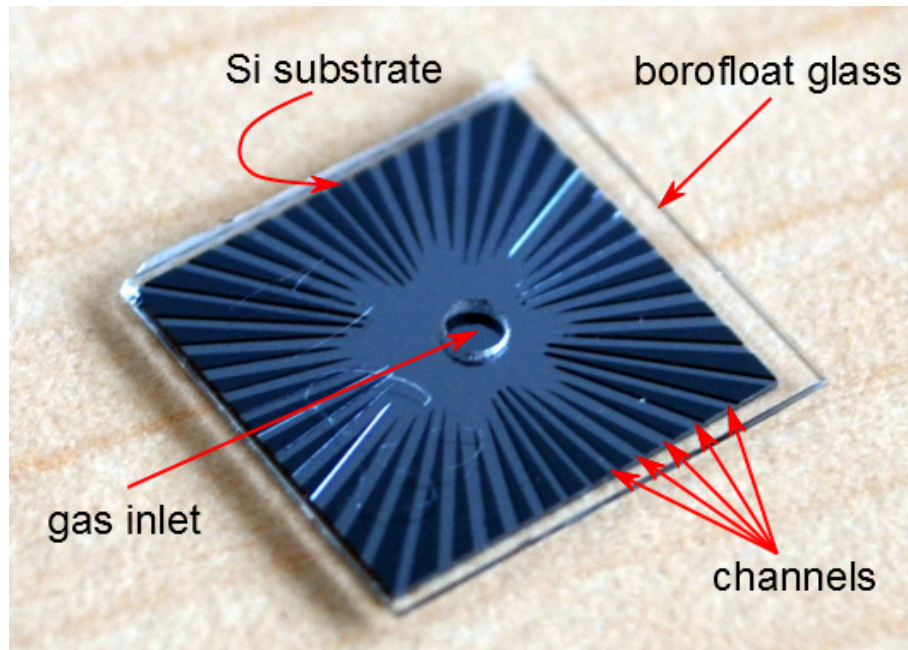
1.1. Mikrocsatornás hűtőeszközök

A mikrocsatornás hűtőeszközök több mint 20 évvel ezelőtti említése óta [2] világszerte számtalan kutatóhely kezdte el alaposan tanulmányozni az ilyen eszközök tervezési és gyártási kérdéseit. A nagyobb vállalatok, mint például az IBM, saját megoldással álltak elő [3]. A Budapesti Műszaki Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszékén aktív kutatási téma a mikrocsatornás hűtőeszközök gyártástechnológiája [4], valamint a termikus karakterizációs eljárások kidolgozása [5]. Az 1.1. ábrán látható egy LIGA technológiával készített, radiális csatornamintázatú mikrocsatornás hűtőeszköz.



1.1. ábra. LIGA technológiával készített mikrocsatornás hűtőeszköz nagyított képe [4]

A következő generációs hűtőeszköz csatornáit a MEMS technológiából ismert TMAH (Tetrametil-ammónium-hidroxid) anizotróp marószel segítségével magában a szilíciumban állították elő. A csatornák lezárását egy borofloat üveglemez látja el, melyet anódos szeletkötéssel rögzítettek a hűtőeszközre az 1.2. ábrán látható módon.



1.2. ábra. Szilícium hordozóba integrált mikrocsatornákkal ellátott hűtőeszköz

2. fejezet

A hőterjedés egyenlete, Fourier törvénye, hőellenállás

A mikrocatornás hűtőeszközök hűtési mechanizmusának megértéséhez szükség van a hőterjedés fizikájának alapos ismeretére. A hőterjedést leíró általános összefüggés egy másodrendű differenciálegyenlet, melynek változói a tér koordinátái és az idő:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \Delta T = 0 \quad (2.1)$$

ahol T a hőmérséklet, Δ a Laplace-operátor, α pedig a hőmérséklet-vezetési tényező.

A hőáram és a hőmérséklet között az alábbi összefüggés áll fenn (Fourier törvénye):

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (2.2)$$

ahol \mathbf{q} a hőáram, k az adott pontra jellemző hővezetési állandó. Általánosan elmondható, hogy egy homogén anyag belsejében k állandó lesz, de tárgyalunk majd olyan inhomogén eseteket is, ahol nem ez a helyzet.

Az elektronikában állandósult állapotokat vizsgálunk; ezekre érvényes, hogy $\frac{\partial}{\partial t} = 0$. Ez (2.1) egyenletet a Laplace-egyenletre redukálja, mely a matematika jobban vizsgált egyenletei közé esik és numerikusan könnyen megoldható. Látható, hogy a hőmérséklet az időben nem változik. (2.2) egyenlet az időben szintén állandó; így a hőáram is állandó lesz.

2.1. Egydimenziós hőterjedés esete

Homogén közegben az időben állandó Laplace- és Fourier-egyenletek egy dimenzióban az alábbi skaláris alakra redukálódnak:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0. \quad (2.3)$$

(2.3) egyenletet integrálva kapjuk a mikroszkopikus Fourier-törvényt:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{1}{k} q. \quad (2.4)$$

Állandó k esetén ez két egyenlet egyértelműen megadja a hőmérséklet-eloszlást, mely kielégíti a Laplace-egyenletet; adott $T(x)$ függvényből pedig könnyen megkaphatjuk q -t. Helyfüggő k esetén az egyenlet az alábbi formára módosul:

$$\frac{dT(x)}{dx} = -\frac{1}{k(x)}q = -r(x)q. \quad (2.5)$$

Állandósult állapot esetén a hőáramnak a térben állandónak kell lennie - amennyi hő 'befolyik' egy bizonyos x pontba, ugyanannyinak ki is kell 'folynia', és ez minden pontban igaz. Ezért ennek az egyenletnek az integrálásánál q -t kiemelhetjük az integráljel elől:

$$T(x) = -q \int \frac{1}{k(x)} + T_0 = -q \int_0^x r(y)dy + T_0, \quad (2.6)$$

Ahol T_0 a hőmérséklet az $x = 0$ pontban. Ebben az összefüggésben az integrált $R'(x)$ -szel jelölve és az egyenletet átrendezve:

$$\frac{T(x) - T_0}{R'(x)} = -q. \quad (2.7)$$

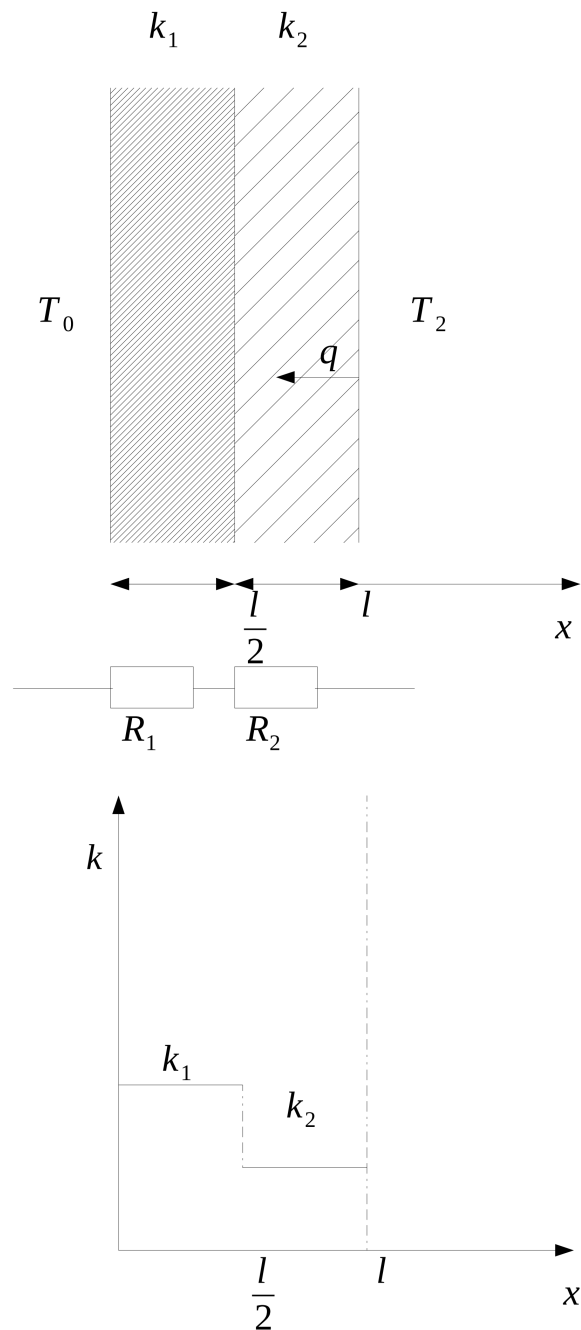
Ez az egyenlet hasonló alakú az Ohm-törvényhez : $T(x) - T_0$ játssza a feszültség szerepét, $-q$ az áram szerepét, $R'(x)$ pedig az (egységnyi felületre eső) ellenállását. Látható, hogy $R'(x)$, a hőellenállás, egy kellemes tulajdonságokkal rendelkező függvény: additív az integrálás szerint. Tetszőleges $0 < x_1 < x$ -re ugyanis:

$$\int_0^x r(y)dy = R'(x) = \int_0^{x_1} r(y)dy + \int_{x_1}^x r(y)dy = R'_1 + R'_2 \quad (2.8)$$

Innen adódik az, hogy akárcsak az elektromos ellenállásokat, a hőellenállásokat is lehet soros kapcsolással jellemezni.

2.2. Egyszerű hőátadási jelenségek illusztrálása egy példán

Tekintsünk egy falat a 2.1. ábra szerint:



2.1. ábra. Egy fal hővezetési modellje. Az egyik felében a hővezetési állandó k_1 , a másikban k_2

A fal bal oldalán a kinti T_0 hőmérséklet állandónak tekintjük (Heat sink), A jobb oldalán pedig legyen a hőmérséklet T_2 . Ez a hőmérséklet egyenesen arányos q hőárammal. Ebben az egyszerű

rendszerben elmondható, hogy eme q hőáram (melynek előjele negatív, mert balra mutat) pedig arányos a szobát fűtő berendezéseink teljesítményével - időben állandósult esetben a falakon át elvesző hőenergia egyenlő a szobába egyéb úton (pl. radiátor) érkező hőenergiával. A hővezetés helytől való függése szintén látható a 2.1. ábrán.

Látjuk, a fal bal oldali felében a hővezetés magasabb (kisebb az 'elektromos ellenállás'), mint a jobb oldaliban, így várhatóan a hőmérséklet ('feszültség') esése is alacsonyabb lesz.

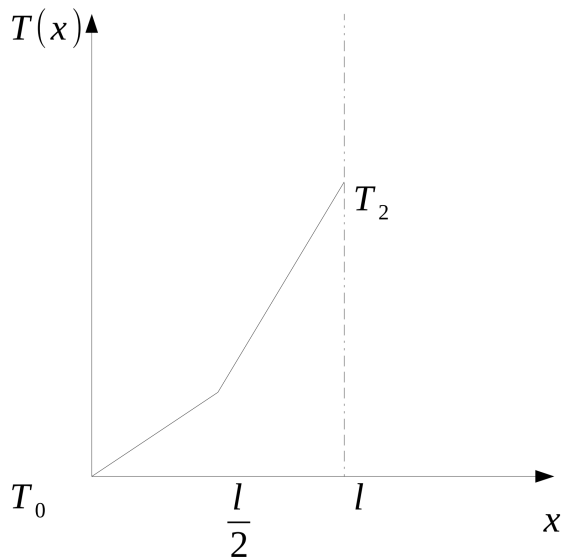
A (2.8) egyenlet szerint a fal hőellenállása:

$$R' = R'_1 + R'_2 = \int_0^l r(y)dy = \int_0^l \frac{1}{k(y)} dy = \frac{l}{2k_1} + \frac{l}{2k_2}. \quad (2.9)$$

A (2.7) egyenletbe behelyettesítve:

$$T_2 = -\left(\frac{l}{2k_1} + \frac{l}{2k_2}\right)q + T_0. \quad (2.10)$$

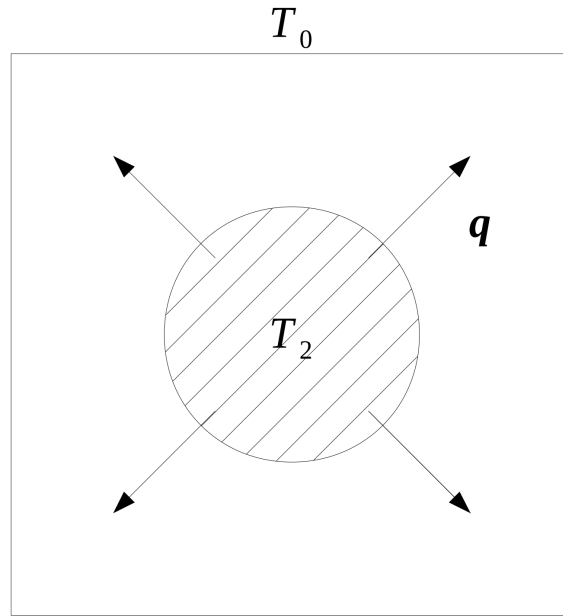
Kíváncsiak lehetünk a hőmérséklet eloszlására a fal keresztmetszetén. Ezt a (2.6) egyenletből kaphatjuk meg; grafikusan a 2.2. ábrán látható.



2.2. ábra. A hőmérséklet helyfüggése a falon belül

2.3. Kettő- és háromdimenziós hőterjedés esete

Több dimenzióban a Laplace- és Fourier-egyenletek megoldása nem lesz ilyen egyszerű, de azért numerikusan még mindig kezelhetőek. Vegyünk egy elrendeződést a 2.3. ábrán látottak szerint.



2.3. ábra. Hűtendő alkatrész modellje

A vizsgált alkatrészünkön hő keletkezik, mely T_2 hőmérsékleten tartja, majd ez a hő egy elvezető alkatrészen keresztül a T_0 hőmérsékletű környezetbe távozik. Ismét állandósult állapotot tekintve fölírhatjuk a Laplace-egyenletet:

$$\Delta T = 0, \quad (2.11)$$

azzal, hogy a hőmérsékletnek az elvezető alkatrész peremén az adott T_0 és T_2 értékeket kell felvennie. Ezt megoldva megkapjuk a hőmérséklet-eloszlást ($T(\mathbf{r})$) a hűtőbordán. Érvényes lesz a Fourier-törvény is:

$$\mathbf{q} = -k\nabla T, \quad (2.12)$$

ahol k -t állandónak vesszük. Eme mikroszkopikus alak sokat nem árul el, viszont ha integráljuk egy tetszőleges zárt felületen, mely körbeveszi a hőforrást, a makroszkopikus Fourier-törvényt kapjuk:

$$\oint_S -k\nabla T = \oint_S \mathbf{q} = P. \quad (2.13)$$

Itt P a hőforrásunk teljesítménye lesz. Az utolsó egyenlőség azért áll fenn, mert a hőforrás által a környezetbe adott teljesítmény egyenlő a hőforrást állandó hőmérsékleten tartó teljesítménnyel. Itt is definiálhatunk egyfajta hőellenállást, amely ugyan nem rendelkezik az additivitás tulajdonságával, de valamilyen módon mégis karakterizálja az alkatrészünket:

$$R = \frac{T_2 - T_0}{P}. \quad (2.14)$$

Elektromos alkatrészek hűtésénél a célunk, hogy a hűtőborda hőellenállása minél kisebb legyen; így adott teljesítmény kisebb hőmérséklet-különbséget (és így felmelegedést) fog okozni.

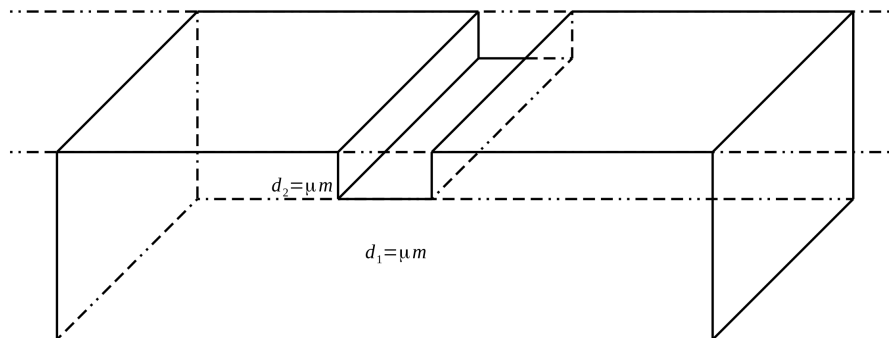
Belátható, hogy ha van egy megoldás, mely kielégíti pl. a $T_0 = 300K$ és $T_2 = 400K$ peremfeltételekre a megoldásunkat, akkor ez szétbontható egy $T_a = 300K$ homogén és egy T_b inhomogén hőeloszlásra; ez utóbbira igaz lesz, hogy $T_{0b} = 0K$ és $T_{2b} = 100K$. Így hát ha egy T_0, T_2 párosra meghatározzuk a hőeloszlást, már tetszőleges T_0, T_2 értékekre megkaphatjuk a megoldást a homogén és inhomogén megoldás egy megfelelő konstanssal való szorzásával. Az is érthető, hogy a hőáram ((2.12) egyenlet) és a teljesítmény ((2.13) egyenlet) egyenesen arányos marad a T_0 és T_2 hőmérsékletek különbségével. Így (2.14) egyenletből láthatjuk, hogy a hőellenállás független a teljesítménytől.

Ez az eredmény csak hőmérséklettől független k -ra igaz.

3. fejezet

Egyetlen csatornával hűtött alkatrész ANSYS modellje

A szoftverrel való megismerkedés céljából elsőként egy egyszerűbb geometriai elrendezésű hűtőelemet vizsgáltunk. Eme elem sémája a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra. Az általunk vizsgált alkatrész elrendezése

A felső falon nem történhet hőátvitel, mivel tökéletesen szigetelő falról van szó. Az oldalsó és az alsó falak és a levegő között hőátadást feltételezünk. A különböző anyagokkal kitöltött térelemek között hasonló a helyzet. Ezen anyagok anyagjellemzőiből a program önállóan meghatározza a határfelületeiken történő hőátadást

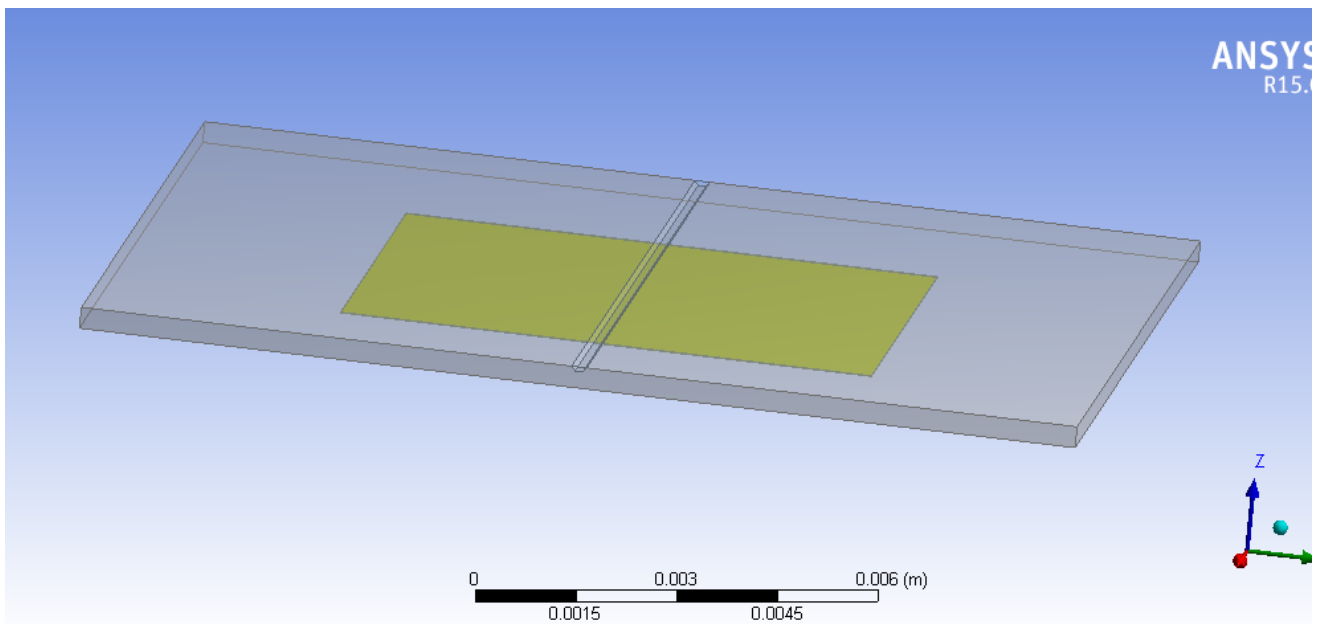
A csatornában levegő áramlik, melyet v normális bemeneti áramlási sebességgel definiálunk. Tekintettel az alacsony Reynolds számra lamináris áramlást feltételezünk, ami megegyezik a kísérletileg tapasztalt helyzettel.

3.1. Geometry modul

Először szükséges a helyzet geometria elrendezését lefektetni; ez a 3.2. ábrán látható. A Geometry modulban ki kell jelölnünk azokat a tartományokat is, amelyekkel számolni szeretnénk, ezt a 'fill' opcióval tudjuk megoldani. Ki kell jelölnünk a csatornát körülvevő 3 falat, a negyedik falat

a program automatikusan meghatározza, hogy a szilícium alkatrész falával egy vonalban legyen. A csatorna tartományunk ötödik és hatodik fala a folyadék ki- és beáramlásának a helye lesz, ezeket szintén megkapjuk automatikusan.

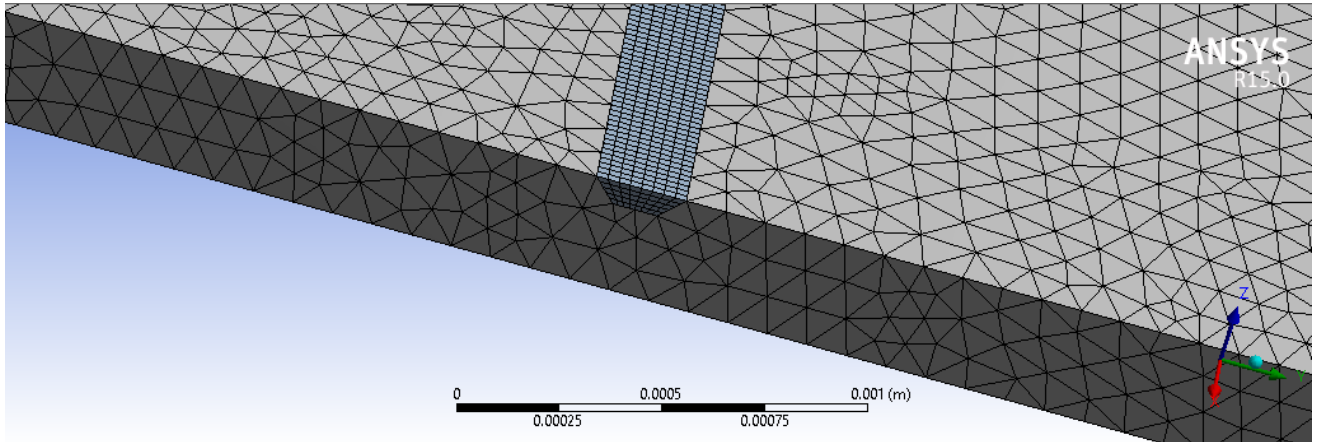
Szükség van továbbá a 'named selection' opció használatára. Ebben az esetben kijelöljük a különböző oldalon található falakat, hogy ezekre különböző hőátadási feltételeket adhassunk meg. Szükséges a csatorna falát négy részre osztani - a szilíciummal közös fal, a felső fal, amit adiabatikusnak (tökéletesen hőszigetelőnek) feltételezünk, továbbá a ki- és befolyás helyei. A szilícium alkatrészen pedig szükség van a felső rész külön kijelölésére, ahol adiabatikus hőátadást feltételezünk. A többi részen a levegő és a szilícium között vezetési hőátadással számolunk. A hőforráson nincs szükség külön falak kijelölésére, mert a program automatikusan megadja a két szükséges határfelületet - a szabadot és a szilíciummal érintkezőt.



3.2. ábra. A hűtőcsatorna a Geometry modulban. Látható a képen a csatorna elhelyezkedése, a hőforrás pedig sárgával van kijelölve.

3.2. Mesh modul

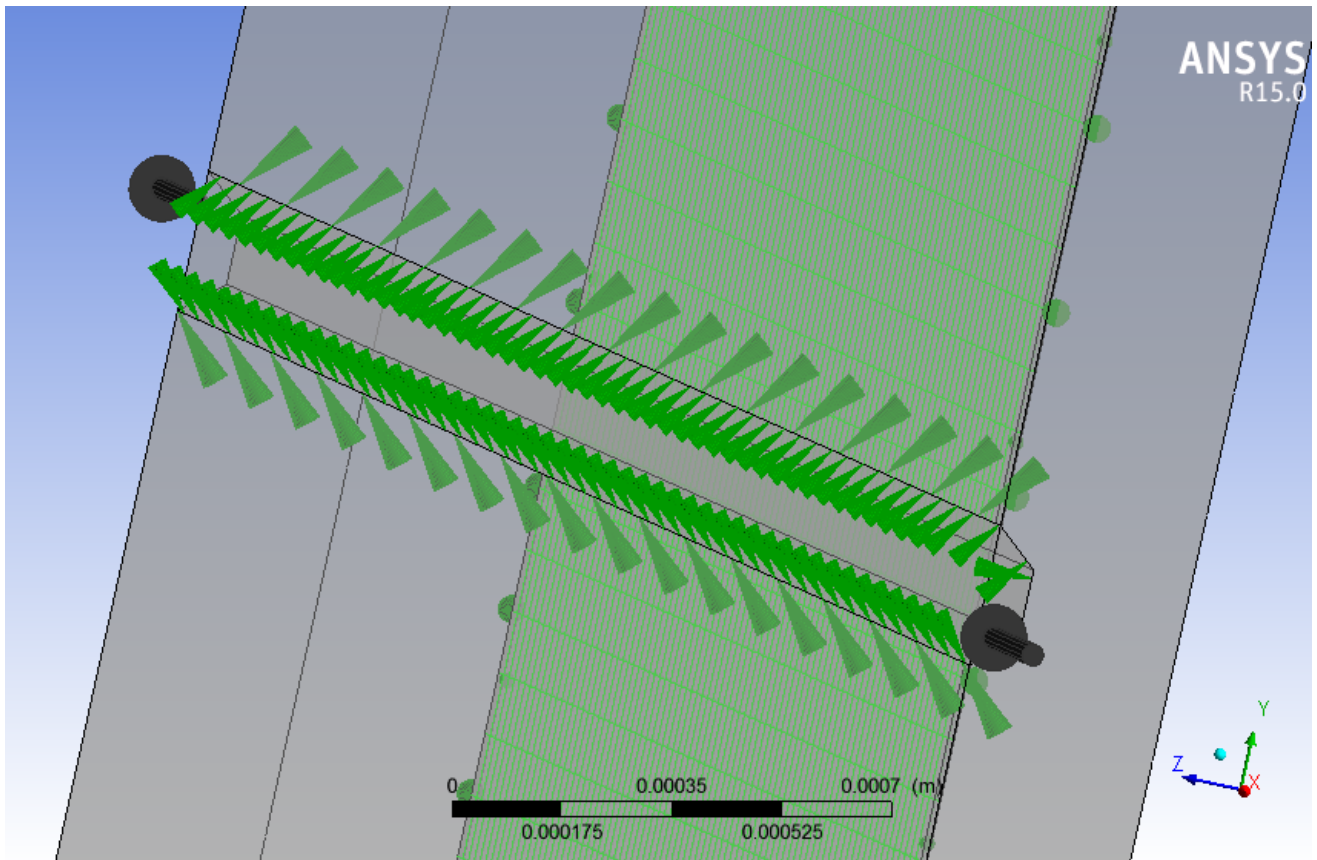
A következő lépés a háló (mesh) készítése. Ennek készítése egy sokkal bonyolultabb feladat; az mellett, hogy bizonyos konfigurációkra a CFX-pre nem is hajlandó lefutni (pl. a csatorna tartományában hibaüzenetet az olyan elrendezésre, amelyben volt olyan elem ami a csatorna két szemben álló falát is érintette). A már említettek szerint akarjuk, hogy a folyadékban a háló finomabb legyen, mivel itt áramlás és hőátadás is történik, míg a szilárd részekben csak hőátadás, így itt egy durvább háló is elég lesz. Egy használható háló pl. a 3.3. ábrán látható.



3.3. ábra. A hűtőcsatorna a Mesh modulban. A képen látható a folyadék és környéke közti kontraszt

3.3. CFX-pre modul

Amint elkészült egy háló, a következő lépés az anyagtényezők, tartományok, felületeik pontosabb leírása, és a számítási beállítások hangolása. Ezt a CFX-pre modulban tudjuk megcsinálni (3.4. ábra). Első közelítésben azt feltételezzük, hogy az alkatrészünk hőforrás felőli és oldalsó felületén a környezet (levegő) és a szilárd tartományok között szabad hőátadást feltételezünk, ugyanez a helyzet a modell különböző tartományai között is (hőforrás, szilícium és a csatornában áramló levegő). Az alkatrészünk csatorna felőli oldalán pedig tökéletes hőszigetelést írtunk elő. A hőszigetelési jelenségektől első nekifutásra eltekintünk. A vizsgált alkatrészünk teljesítménye $10W$, míg a csatornába beáramló levegő sebessége $0m/s$ és $100m/s$ között változik.



3.4. ábra. A CFX-pre modul. A képen nyilakkal kijelölve láthatóak azok a határfelületek, ahol a különböző anyagú komponensek érintkeznek egymással, a háttérben levő zöld színű háló pedig a hőforrás.

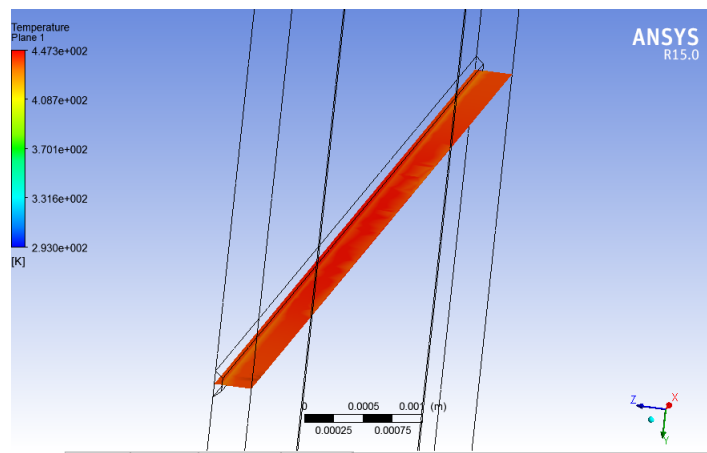
4. fejezet

Az egycsatornás szimulációk eredményei

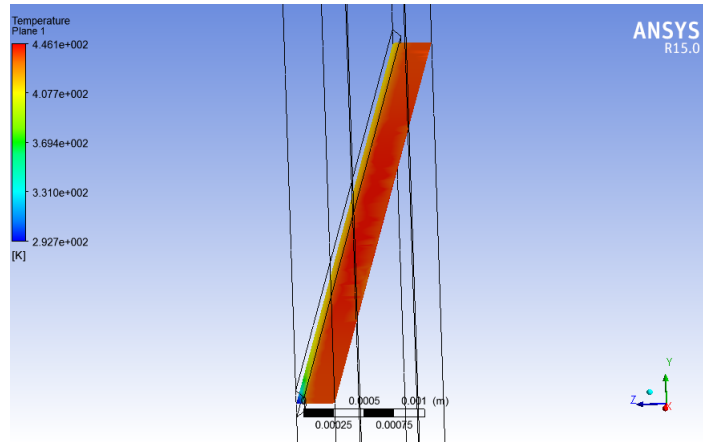
A Results modulban megtekinthetők a szimulációnk eredményei lásd 4.2., 4.3., 4.4., 4.5. ábrák). Eredményeink kimutatják a hőellenállás áramlási sebességtől való függését (lásd 4.1. táblázat).

$v[m/s]$	0	10	25	50	100
$R[K/W]$	15.4	15.3	15.1	15.0	14.9

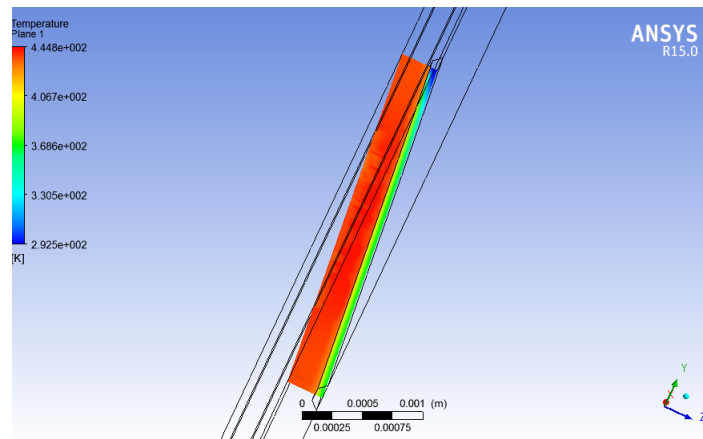
4.1. táblázat. A hőellenállás áramlási sebességtől való függése.



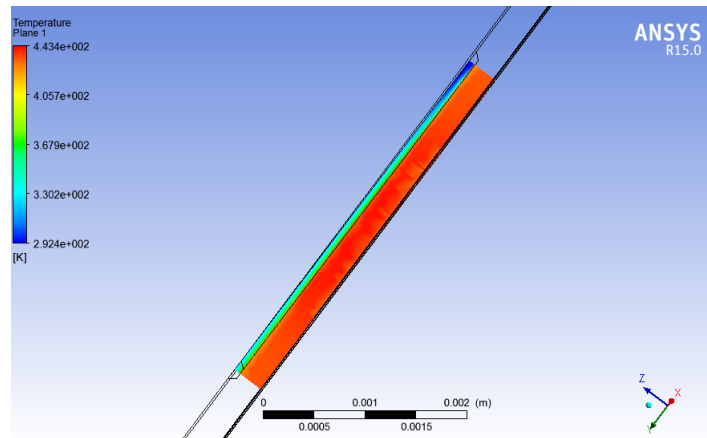
4.1. ábra. A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A csatornában nincs áramlás, $v = 0m/s$. Látható, hogy a levegő a szilárd alkatrészek hőmérsékletét átveszi, és nem lát el hűtő funkciót.



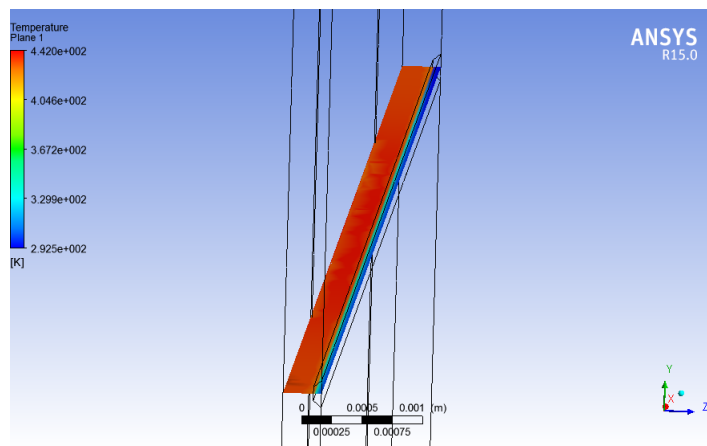
4.2. ábra. A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 10\text{m/s}$. Látható, hogy a levegő a befolyás helyén szobahőmérsékletű, majd a forró szilícium mentén áramolva folyamatosan felmelegszik, míg a jó hővezető szilícium és réz elemek hőmérséklete közel megegyezik.



4.3. ábra. A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 25\text{m/s}$.



4.4. ábra. A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 50\text{m/s}$.



4.5. ábra. A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 100\text{m/s}$.

5. fejezet

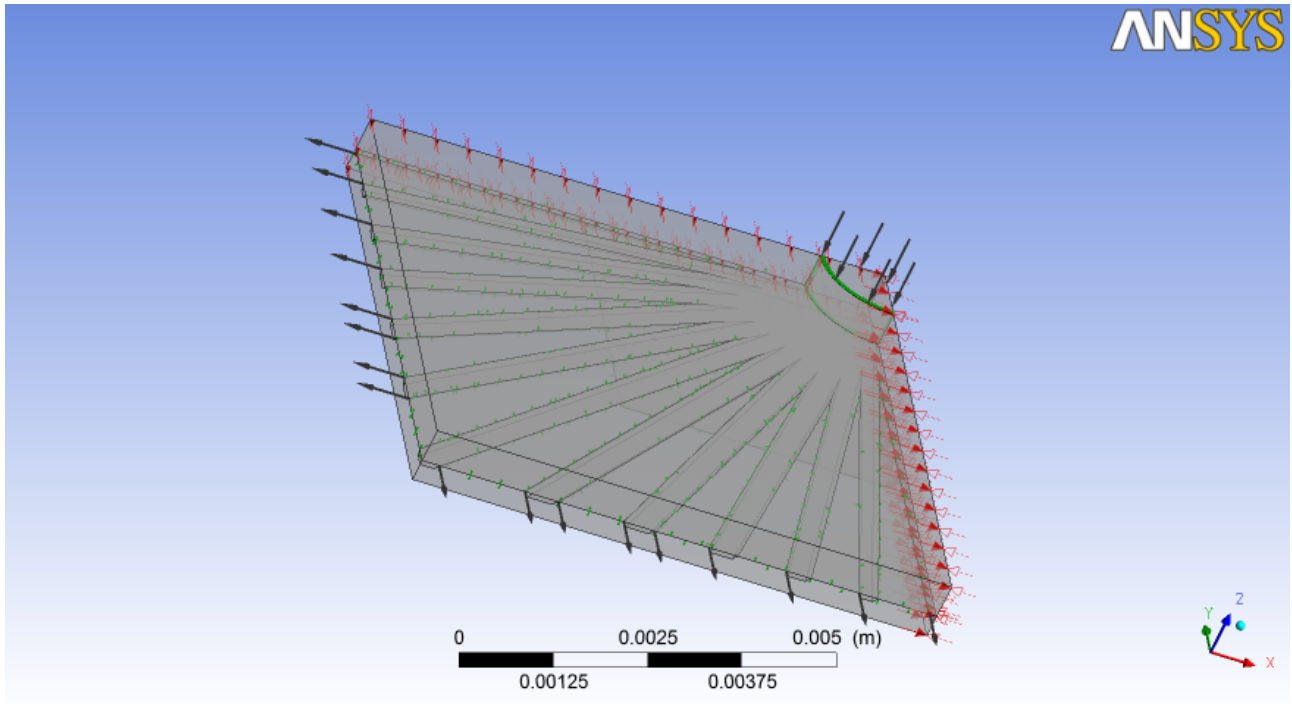
A megvalósított eszköz szimulációja ANSYS CFX segítségével

Az egycsatornás modell esetén részletesen leírt eljárást a megvalósított alkatrészünk bonyolultabb geometriájára alkalmazva olyan eredményeket kaphatunk, amelyeket az analitikus eredmények mellett összevethetünk a megvalósított eszköz termikus tranziens mérésének eredményeivel is. Mivel a hűtőcsatorna átlósan szimmetrikus, ezért elegendő a negyedét vizsgálnunk, a megfelelő peremein pedig szimmetriának megfelelő peremfeltételeket írunk elő. Ezzel jelentősen csökkenthető a számítási idő. Turbulenciával továbbra sem számolunk (az alacsony Reynolds-szám miatt).

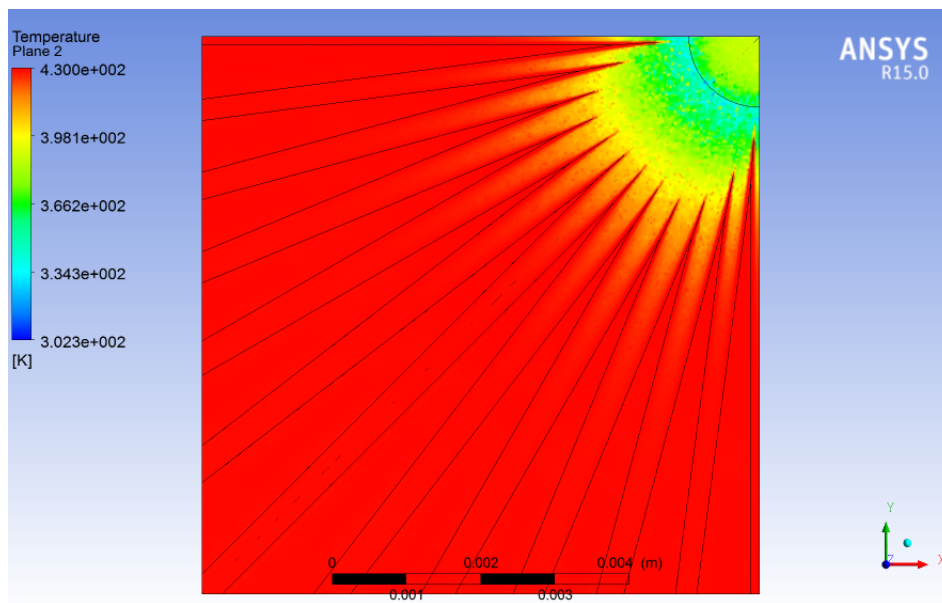
Ennek az elrendezésnek a szimulációja teljesen úgy zajlik, mint az egycsatornás modell esetén, azzal a különbséggel, hogy olyan szimulációt futtattam, hogy a falak és a környezet közti hőátadást nullának vettem. Ez azzal egyenértékű, hogy a polisztirol ágy (amiben a fűtőelem van) hővezetése elhanyagolható a hűtőfolyadék-rendszerünk hővezetéséhez képest.

Azok a felületek tehát, ahol a modell hőt cserél a környezetével, az 'inlet' és 'outlet' - itt folyik be illetve ki a levegő a csatornába/ból. Az inleten tömegáramra vonatkozó peremfeltételt írtam elő, standard liter/óra mértékegységben; ez az atmoszferikus nyomáson mérhető sűrűséggel ekvivalens egy kg/s mértékegységű mennyiséggel. Ilyen feltételt állítottunk a mérés folyamán használt szabályozóműszeren is. Az outleten atmoszferikus nyomást adtam meg - ennek a feltevésnek a megalapozottsága nem nyilvánvaló, és további, mélyebbre ható szimulációk esetén finomításra szorulhat (ennek oka a nagy sebességű kilépő levegő által okozott légmozgás a kísérleti elrendezésünk közelében). Hőt ad le az alkatrész ezen kívül a falakon keresztül konvektív módon is, ennek a hatása azonban nagyobb tömegáramoknál elhanyagolható lesz, továbbá a polisztirol ágy ezt a jelenséget egyébként is jelentősen korlátozza.

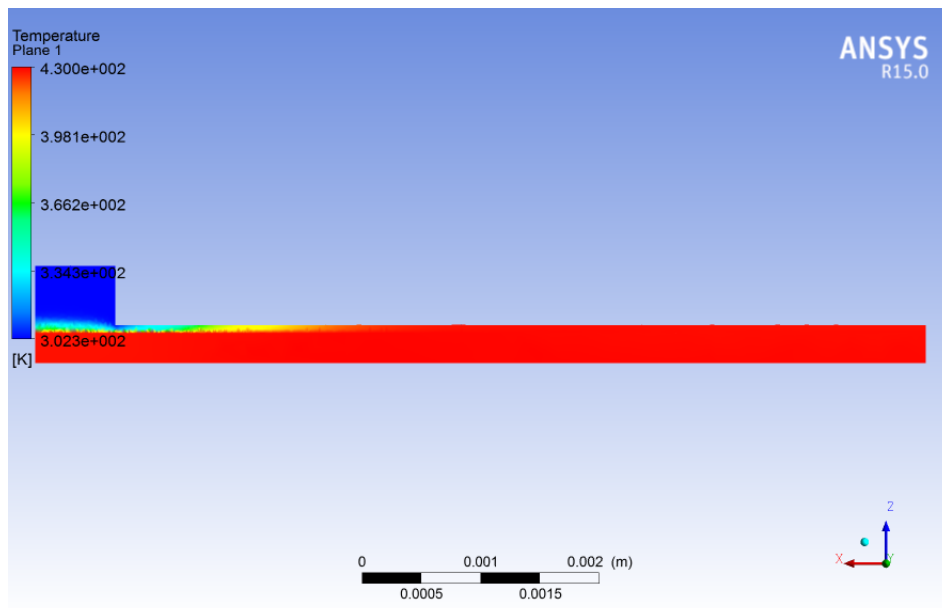
A hűtőborda fizikai elrendezése az 5.1. ábrán látható, a szimulációt grafikus eredményei pedig az 5.2., 5.3., 5.4., 5.5., 5.6., 5.7. ábrákon.



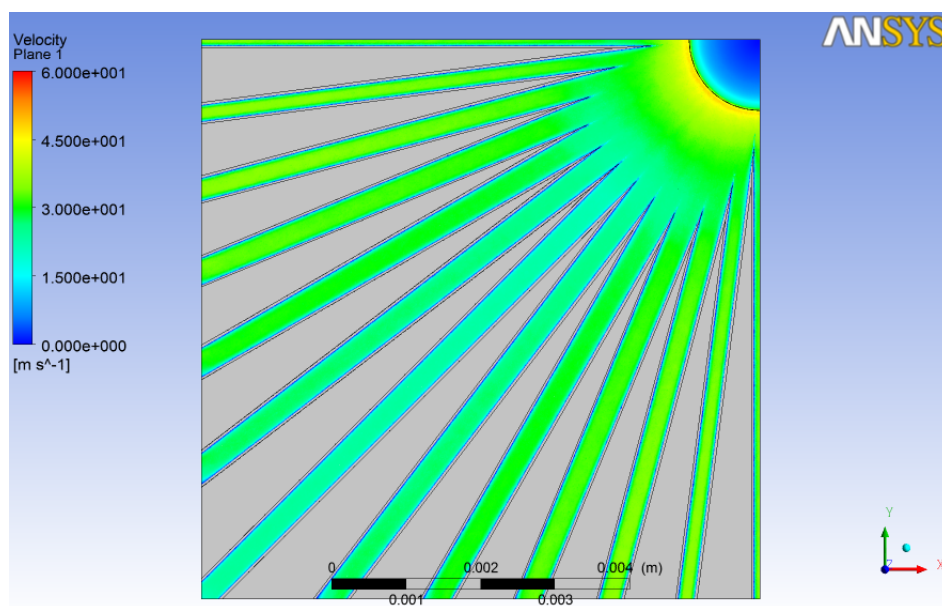
5.1. ábra. A csatorna a peremfeltételekkel bejelölve. A be- és kifelé mutató fekete nyilak az inlet ill. az outletet jelölik, a piros nyilak a szimmetriát jelölik, a zöld nyilak pedig a hőátadást jelzik a szomszédos tartományok között



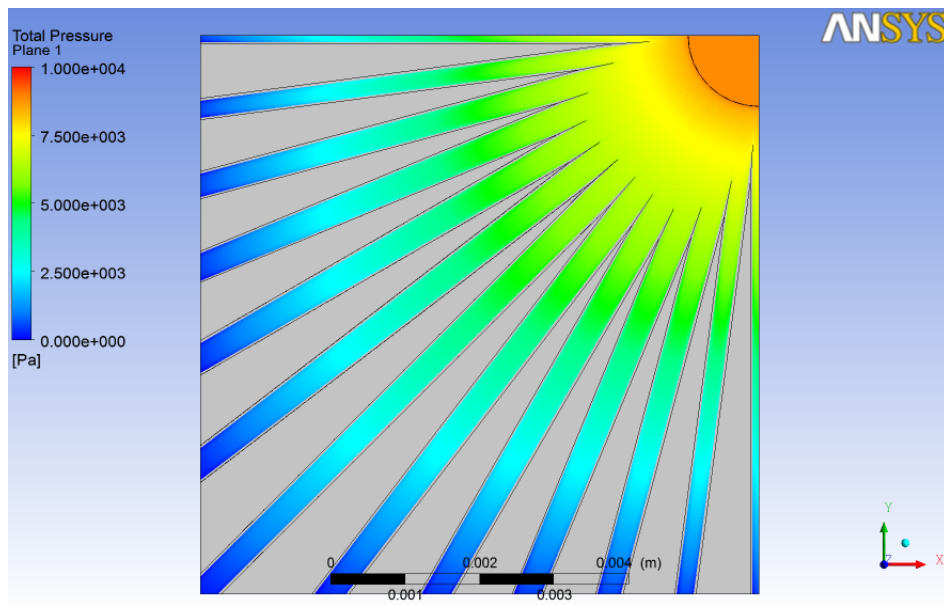
5.2. ábra. A hőmérséklet elosztása a szilíciumban és a folyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 30 \text{ sl/h}$.



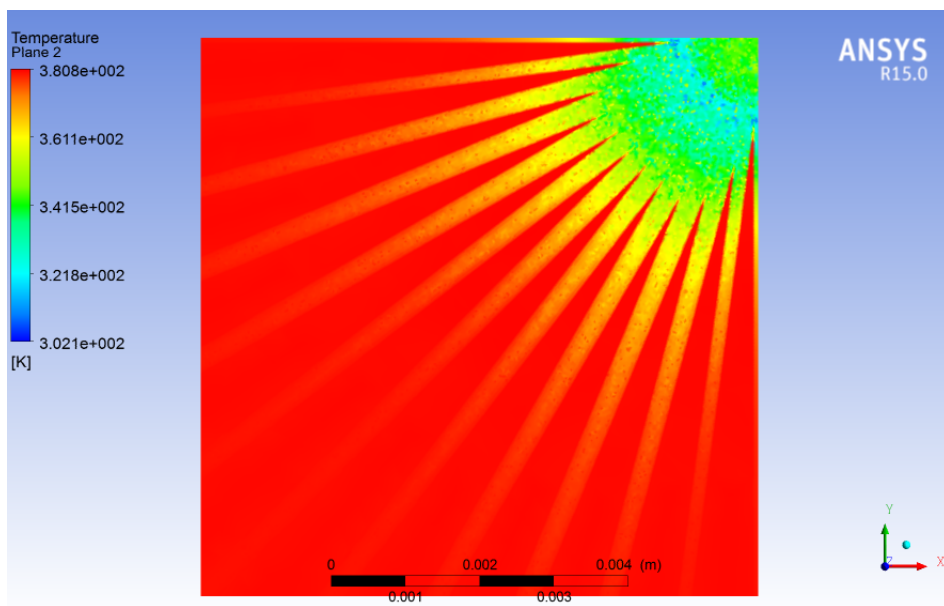
5.3. ábra. A hőmérséklet elosztása a hűtőcsatorna keresztmetszetében. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 30 \text{ sl/h}$.



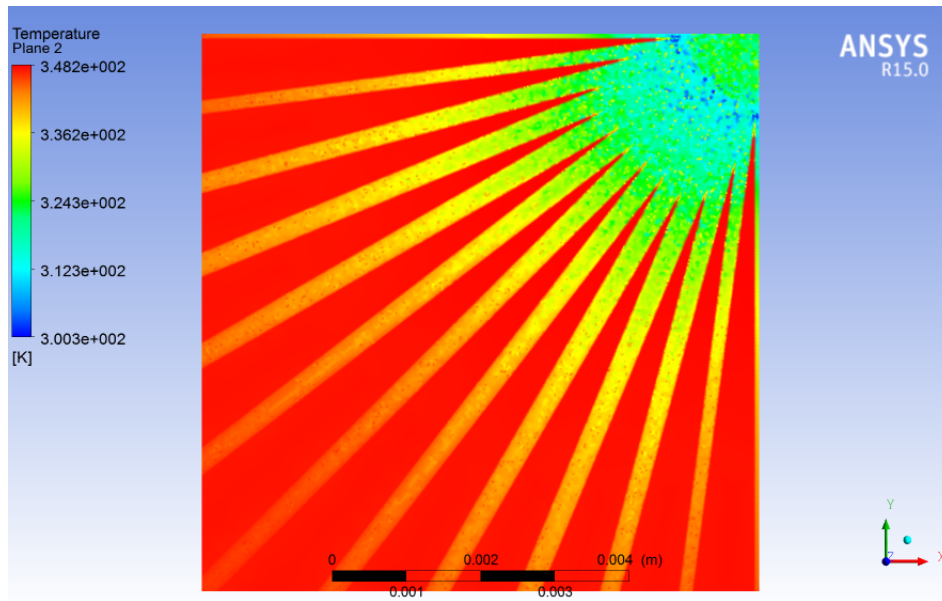
5.4. ábra. A sebesség elosztása a hűtőfolyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 60 \text{ sl/h}$.



5.5. ábra. Nyomásesés a hűtőfolyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 60\text{sl/h}$.



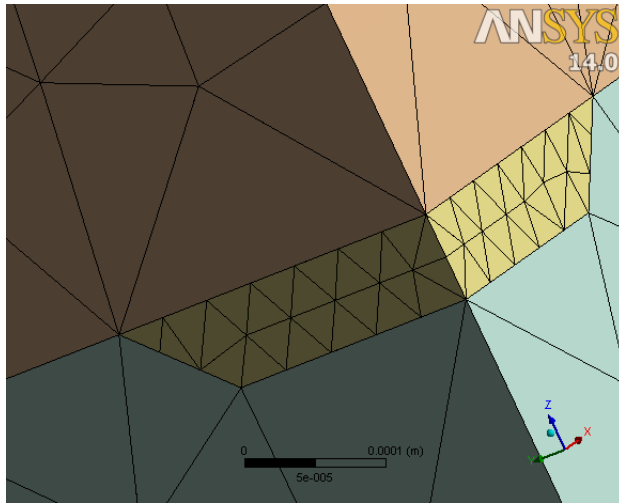
5.6. ábra. A hőmérséklet elosztása a szilíciumban és a folyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 60\text{sl/h}$.



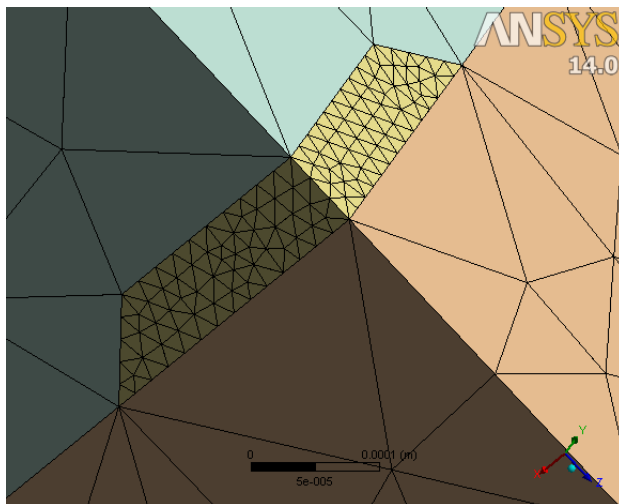
5.7. ábra. A hőmérséklet elosztása a szilíciumban és a folyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 120 \text{ sl/h}$.

5.1. A háló finomságának hatása a szimulációs eredményekre

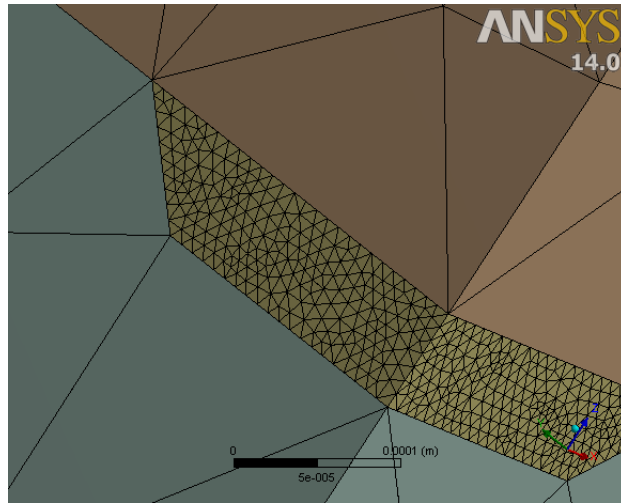
Bár egy viszonylag egyszerű, lamináris áramlást vizsgálunk, felmerül a kérdés, mennyire játszik kritikus szerepet a háló finomsága a szimulációink eredménye szempontjából. Az nagyjából jól ismert, hogy a szilárd részek szimulációjánál nem fontos a precíz felosztásuk, mivel nem kell áramlási jelenségeket vizsgálnunk, egyedül hőátadási jelenségek mennek végbe bennük, az eredmények vizsgálatakor pedig kiderült, hogy a szilíciumlapka hőmérséklete jó pontossággal állandó lesz (a nagy hővezetési állandója miatt). A csatorna geometriája pedig elég összetett ahhoz, hogy szükség lehessen pontosabb számításokra. Ennek megállapítása céljából futtattam szimulációkat 3 különböző méretparaméterű hálóra (element size). A háló finomságát a csatorna egy jellemző pontjában a (5.8., 5.9., 5.10.,) ábrákon illusztráltam. Az eredmények 5.1. táblázatban láthatók.



5.8. ábra. A háló a sarki csatornakijáratnál 4.10^{-5} elemméret mellett.



5.9. ábra. A háló a sarki csatornakijáratnál 2.10^{-5} elemméret mellett.



5.10. ábra. A háló a sarki csatornakijáratnál $1 \cdot 10^{-5}$ elemméret mellett.

$\dot{m} [sl/h]$	60	120	240	480
$R_{badmesh} [K/W]$	28.104	18.612	10.662	6.034
$R_{okmesh} [K/W]$	28.116	18.622	10.668	6.033
$R_{excellentmesh} [K/W]$	N/A	N/A	N/A	6.009

5.1. táblázat. A hőellenállás tömegáramtól való függése. $R_{badmesh}$ a $4 \cdot 10^{-5}$ -es, R_{okmesh} a $2 \cdot 10^{-5}$ -es, $R_{excellentmesh}$ az $1 \cdot 10^{-5}$ -es elemmérethez tartozó ellenállás. A legfinomabb hálóval készült szimulációk a számítási kapacitás korlátozottsága miatt nem készültek el minden tömegáramhoz, de a kiszámolt eredménynél látható az egyezés a különböző finomságú hálókkal.

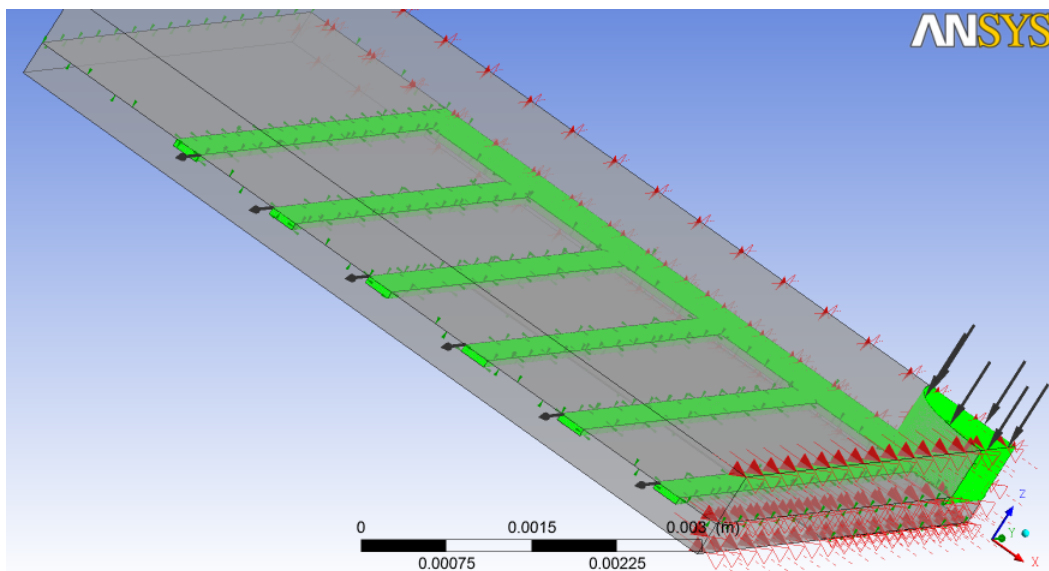
A párhuzamos csatornánál a $2 \cdot 10^{-5}$ -es elemmérettel számoltunk.

6. fejezet

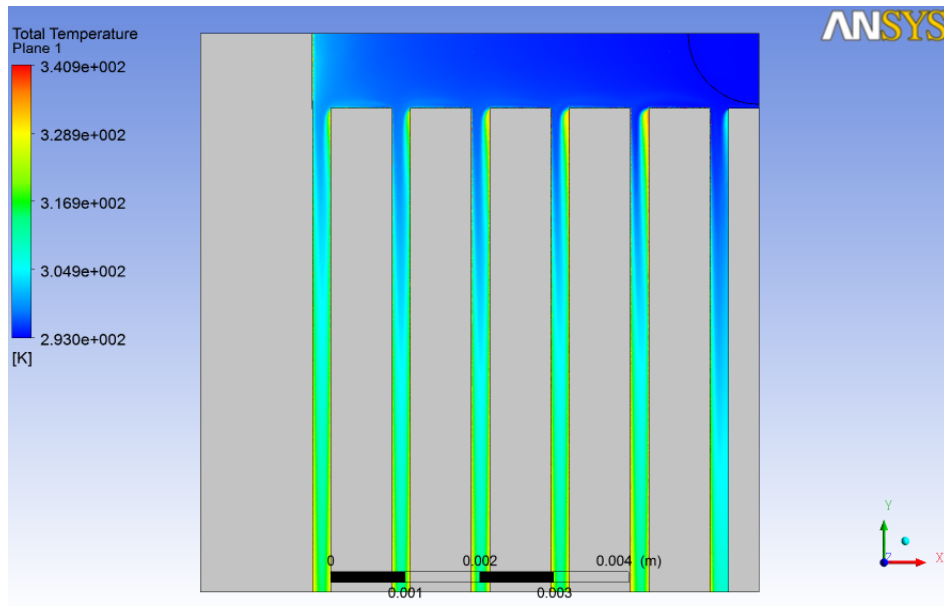
Összehasonlítás egy alternatív csatornageometriával és egyéb hűtési módokkal

6.1. Párhuzamos mikrocsatornás hűtőeszköz

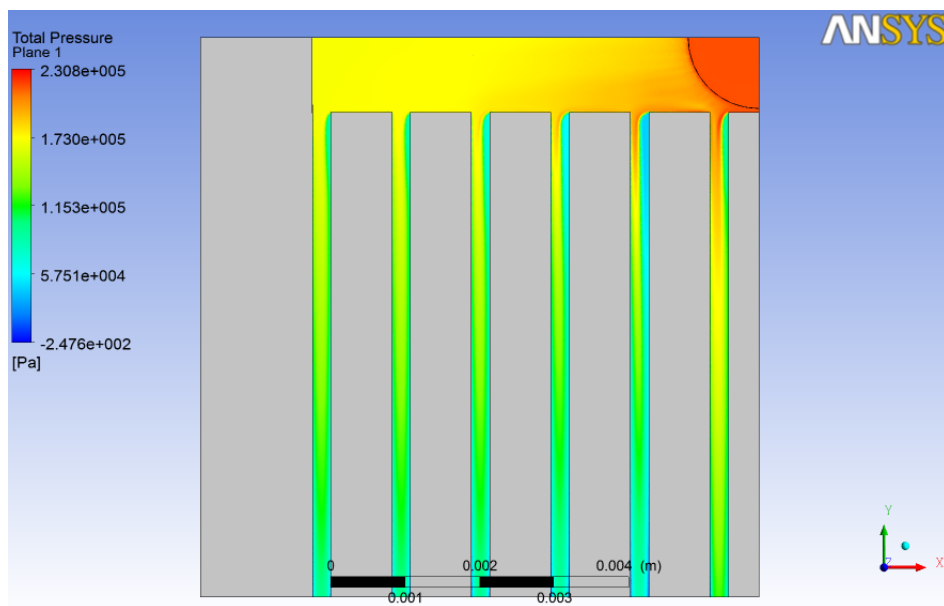
Folytattunk szimulációkat egy jelenleg még nem legyártott párhuzamos csatornákból felépülő eszközön is. Az eredményekből (lásd 6.1. táblázat) látszik, hogy ezen eszköz nagyobb tömegáramoknál az előbb vizsgált elrendezésénél jóval rosszabb termikus tulajdonságokkal rendelkezik, kisebb tömegáramoknál azonban az eltérés nem olyan jelentős. A szimulációs eredményeket illusztrálják a 6.2., 6.4., 6.3., ábrák.



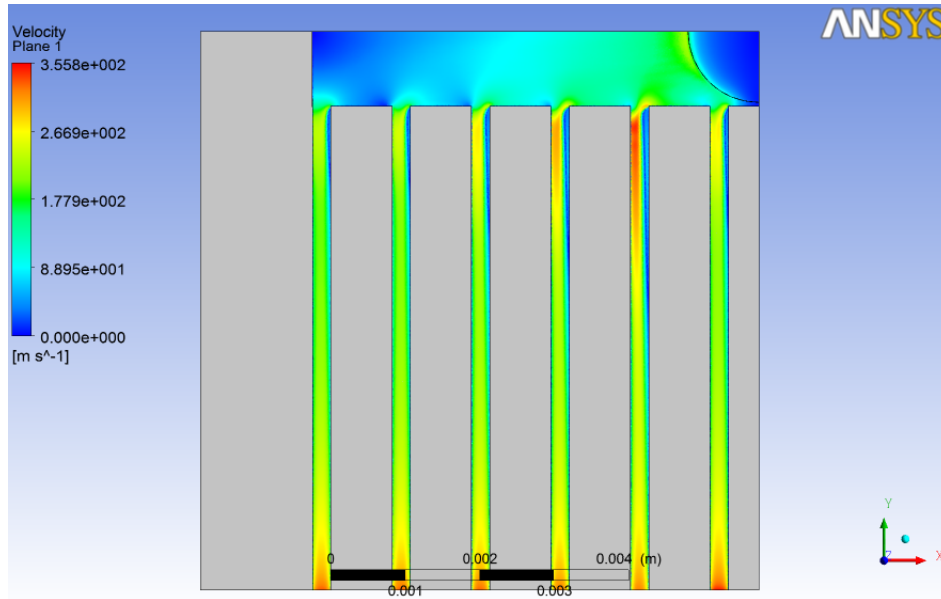
6.1. ábra. A csatorna a peremfeltételekkel bejelölve. A be- és kifelé mutató fekete nyilak az inletet ill. az outletet jelölik, a piros nyilak a szimmetriát jelölik, a zölddel kijelölt térfogat pedig a csatornát jelöli.



6.2. ábra. A hőmérséklet elosztása a csatornában. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 480 \text{ sl/h}$.



6.3. ábra. Nyomásésés a hűtőcsatornáknban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 480 \text{ sl/h}$.



6.4. ábra. A sebesség elosztása a hűtőfolyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 480 \text{ sl/h}$.

$\dot{m} [\text{sl/h}]$	60	120	240	480
$R_{eredeti} [K/W]$	28.12	18.62	10.67	6.03
$R_{paral} [K/W]$	31.23	22.98	17.52	12.13

6.1. táblázat. A különböző geometriák hőellenállásának tömegáramtól való függése. Az első sorban található a már vizsgált megvalósított eszköz, másodikban a párhuzamos csatornás modell

6.2. Összehasonlítás egy konvencionális hűtőeszközzel

Az érdekesség kedvéért hasonlítsuk össze a mikrocsatornás hűtőeszközünk hatékonyságát a Spire Swirl III hűtőeszközzel (<http://www.spire-corp.com/cpu-coolers/swirl-iii-sp612b1-v3-pci/specs/>).

Ennek hőellenállása 0.282 K/W , a tömege 1 kg körüli, és az öt hűtő levegő térfogatárama $83.12 \text{ köbláb/perc} = 141\,221 \text{ l/h}$. Összevetve az általunk felvetett eszközzel, hőellenállása kb. hússzor kisebb. Azonban vegyük észre, hogy azon túl, hogy a mérete jelentősen nagyobb a mi gyakorlatilag elhanyagolható helyfoglalású megoldásunkkal szemben, az általa felhasznált levegőmennyiség kb. 300-szor több. A mikrocsatornás hűtőrendszerek megfelelő elhelyezés esetén - felhasználva a kisebb helyfoglalást és levegőfogyasztást - hatékonyságban megelőzik a konvencionális működésű hűtőeszközöket.

7. fejezet

A megvalósított hűtőeszköz mérése termikus tranziens tesztelés segítségével

Amennyiben időben változó, tehát nem stacionárius esetet vizsgálunk, ahogy azt az eddigiekben tettük, nem lesz elegendő az, hogy az elrendezést ohmos ellenállásokkal modellezzük. A tranziens jelenségeknél szerepet játszik az alkatrészeink hőkapacitása is, amit az áramkörü modellben kondenzátorok képviselnek [6].

Ily módon egy vizsgált test termikus leírásának pontos elektromos ekvivalense egy elosztott paraméteres RC hálózat lesz, azonban mi a modellezés folyamán ezt az egyszerűség kedvéért sokszor egy koncentrált paraméteres hálózattal helyettesítjük.

A termikus tranziens mérés folyamán a vizsgált alkatrészünkre egy bizonyos gerjesztést adunk, majd figyeljük az erre adott válaszát egész addig, amíg be nem áll egy egyensúlyi állapot. Eme válasz időbeli lefolyásából megkaphatjuk a struktúrafüggvényt, amely jellemzi az elosztott paraméterű hálózatunkat.

Egy egyszerű termikus RC hálózat egységugrásra adott $a(t)$ válaszfüggvénye R amplitúdójú és egy τ időállandóval rendelkezik ($\tau = R_{TH} \cdot C_{TH}$ - így adott hőellenálláshoz és időállandóhoz a hőkapacitás meghatározható):

$$a(t) = R(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (7.1)$$

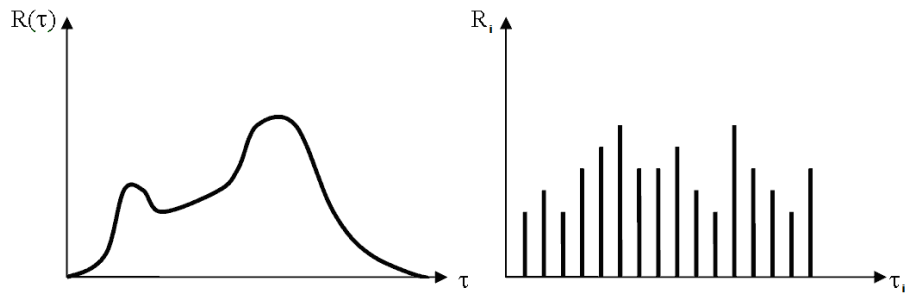
Egy véges sok elemből álló RC hálózat válasza:

$$a(t) = \sum_i R_i (1 - \exp(-t/\tau_i)) \quad (7.2)$$

Egy elosztott paraméterű RC hálózat válasza pedig:

$$a(t) = \int_0^t R(\tau) (1 - \exp(-t/\tau)) d\tau, \quad (7.3)$$

ahol $R(\tau)$ az adott időállandóhoz tartozó ellenállás. Amennyiben ábrázoljuk ezt τ függvényében, megkapjuk az ún. időállandó-spektrumot (lásd a 7.1. ábra)

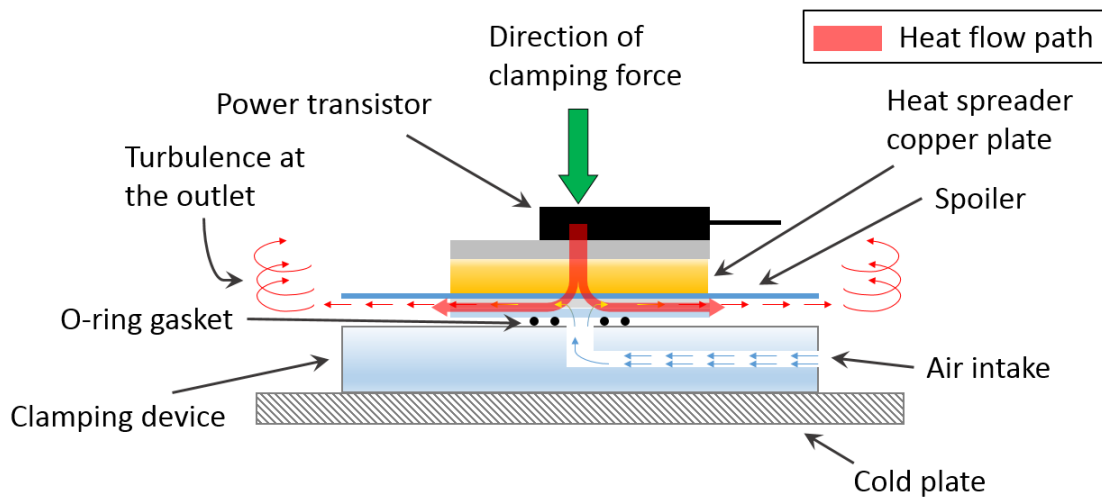


7.1. ábra. Időállandó-spektrum. Jobb oldalt látható a diszkrét értékekből álló koncentrált paraméteres hálózaté, a bal oldalon pedig egy elosztott paraméteresé

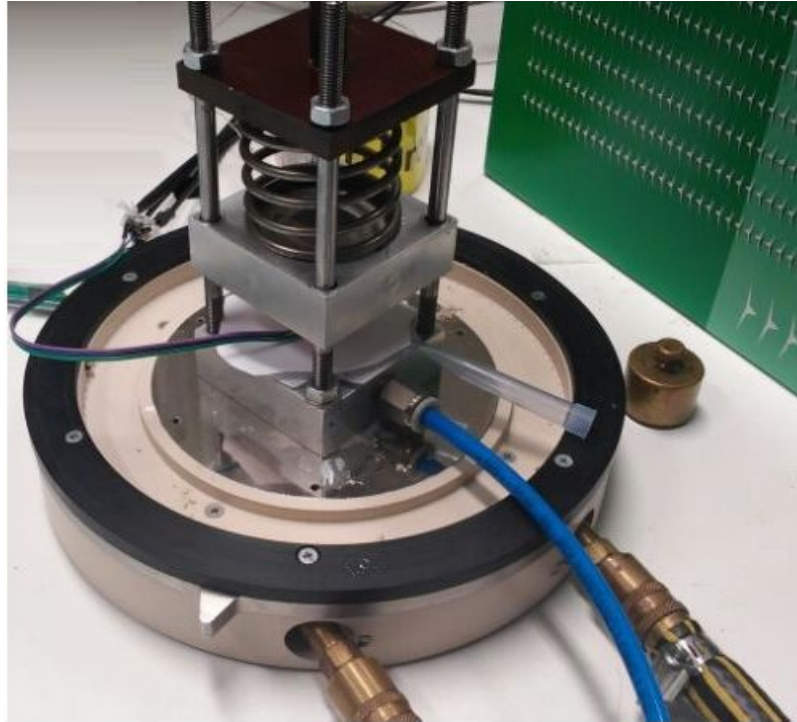
Az időállandó-spektrum alkalmas az elosztott paraméteres RC hálózat saját és transzfer tulajdonságainak leírására is. Az ebből megkapható kumulatív struktúrafüggvény az egydimenziós hővezetési út hőkapacitását ábrázolja, a hőforrástól mért hőellenállás függvényében. A következő részekben részletezett méréseink folyamán ezen struktúrafüggvény felállítása lesz a célunk.

7.1. A mérési elrendezés

A mérési elrendezés a/az 7.2. és 7.3 ábrákon látható.



7.2. ábra. A mérési elrendezés vázlatja.[7]



7.3. ábra. A mérési elrendezés fényképe. [7]

A mérés folyamán egy adott teljesítménnyel fűtjük a tranzisztort, mely szoros termikus kontaktusban van az alatta levő rézlapkával, ami már homogén hőmérsékletűnek vehető. Ez a rézlapka érintkezik a hűtőcsatornával, és ezen keresztül távozik a hő a rendszerből.

Annak érdekében, hogy ne a cold-plate felé távozzék a hő, o-gyűrűket iktatunk be eme párhuzamos hűtőbe. Az elrendezés alján pedig a már említett állandó hőmérsékleten tartott cold-plate található.

A levegőt alulról pumpáljuk a csatornába egy áramlási ráta szabályozására alkalmas műszerrel - így pontosan tudjuk, mekkora a beáramló levegő tömegárama, nyomása és hőmérséklete.

Először hagyjuk felmelegedni a tranzisztort a rákapcsolt teljesítménytől, majd a gerjesztés kikapcsolásával figyeljük a hűlési folyamatot (A tranzisztor nyitófeszültségéből következtetünk a hőmérsékletére). A hűlési görbét feldolgozva pedig megkapjuk a kumulatív struktúrafüggvényt.

7.2. A mérés problémái

A kapott szimulációs eredményeket összevettem a [5] publikációban található mérési eredményekkel. Az találtam, hogy a mért hőellenállás jóval kisebb, mint amire a szimulációs elméleti eredményekből számítani lehetett. Mivel mind a szimulációs és mind az analitikus számításokkal kapott értékek egybevágnak, emiatt a mérési módszert kellett megvizsgálnom. Konzulensem javaslatára a következő jelenségek hatását vizsgáltam meg:

- A tranzisztor nyitófeszültségének hőmérsékletfüggése. Ez a hiba hőmérővel való kalibrálással kiküszöbölhető.

- Az o-gyűrűk rugalmassága hőmérsékletfüggő. Ez csak kis mértékben befolyásolja a mérésünk pontosságát.

- A hűtő levegő hőmérsékletének változása a mérés folyamán. Fontos megvárni, hogy beálljon ennek hőmérséklete a mérés megkezdése előtt
- A befogó hőmérséklete nem állítható be teljesen pontosan
- A tranzisztor hőjét a környező álló levegő is elszállítja. Ennek megoldására a tranzisztor polisztirol ágyba helyeztük, hogy lehetőleg minél kisebb felületen érintkezzen a levegővel
- A hűtőcsatornából kiáramló gyors (közel 100 m/s) levegő turbulenciát hoz létre, hűti az alkatrészüket, így csökkenti a hőellenállást. Ezt megfelelő “árnyékolókkal” csökkenthetjük. Ez a hatás a legjelentősebb a felsoroltak között, ennek kiküszöbölésével nagyot változtak mérésünk eredményei is. A mérési hibák kiküszöböléséről [7] foglalkozik részletesen.

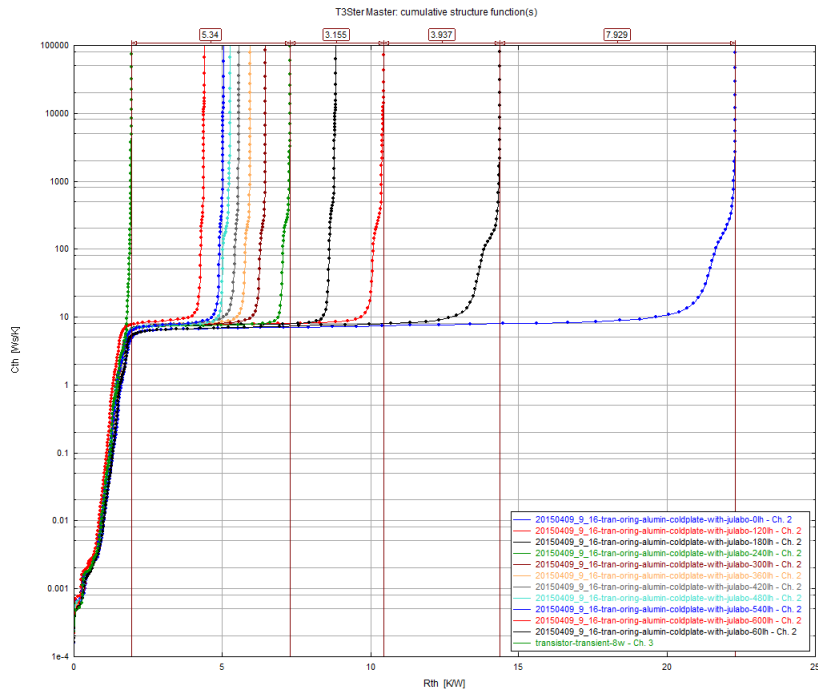
7.3. Mérési eredmények

A fent felsorolt problémákat figyelembe véve egy második, tökéletesebb mérési elrendezés készült. Ennek mért hőellenállása jobb egyezést mutat a mérési és szimulációs eredményekkel. Elvégeztem még egy szimulációt, melyben a csatornát fedő bórüveg termikus hatásait elhanyagoltam; ez az elrendezés nagyon jó egyezést mutat a második mérés eredményeivel (lásd 7.1. táblázat). Ez azzal magyarázható, hogy az általunk használt bórüveg pontos termikus tulajdonságait nem ismerjük.

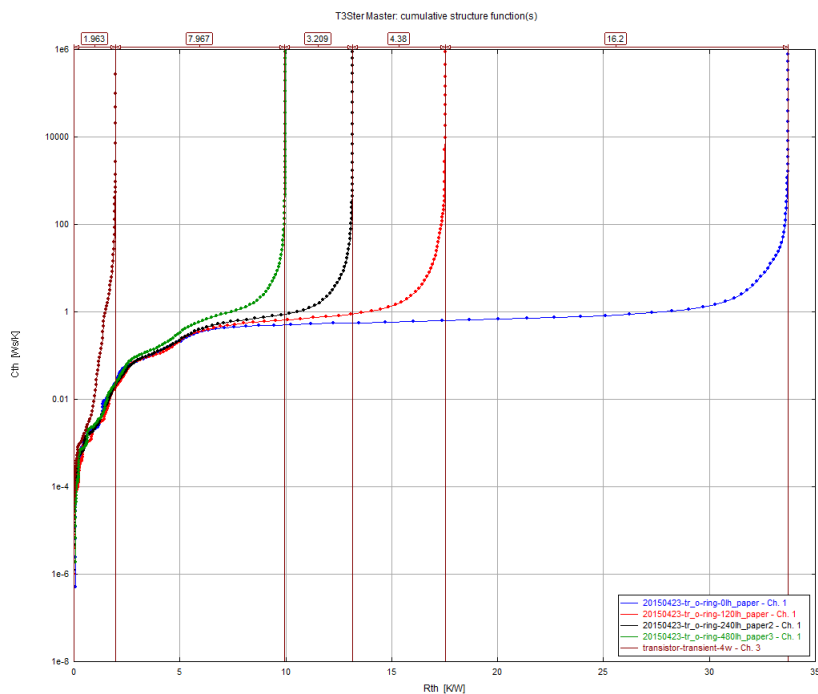
Az első és a második elrendezés kumulatív struktúrafüggvényei a 7.4 és 7.5. ábrákon láthatóak.

$\dot{m}[sl/h]$	60	120	240	480
$R_{meas}[K/W]$	36.37	25.07	13.43	7.56
$R_{calc}[K/W]$	51.24	26.45	15.35	10.81
$R_{sim}[K/W]$	28.12	18.62	10.67	6.03
$R_{borgl}[K/W]$	39.15	22.85	14.30	7.50

7.1. táblázat. A hőellenállás tömegáramtól való függése. Az első sorban található a mért, másodikban az analitikus modell, harmadikban és a negyedikben a szimuláció során kapott eredmények a bórüveg figyelembevételével és anélkül. Látható az egyezés a mért és a bórüveg hővezetését elhanyagoló szimulált eredmények között.



7.4. ábra. Az első elrendezés kumulatív struktúrafüggvénye.



7.5. ábra. A második elrendezés kumulatív struktúrafüggvénye.

Összegzés, további tervek

Irodalomkutatást végeztem a mikroméretű hűtőeszközök témakörében. Áttekintettem az ehhez a témához kapcsolódó hőjelenségek elméletét, melyet konkrét példákon is megvizsgáltam.

Termikus tranziens módszerrel megmértem egy mikrocsatornás hűtőeszköz kumulatív struktúrafüggvényét. Megvizsgáltam, hogyan függ a csatorna hőellenállása a hűtőfolyadék tömegáramától.

Az áramlási jelenségek analitikusan nehezen kezelhetőek, ezért a munkám folyamán főleg a hűtőeszközök működésének számítógépes modellezésével foglalkoztam. Elkészítettem egy egyszerű hűtőeszköz modelljét, melyben az elvárásnak megfelelően megfigyelhető a hőellenállás csökkenése a növekvő áramlási sebességgel. Elkészítettem továbbá a megvalósított hűtőeszköz modelljét; a szimuláció eredménye jó egyezést mutatott a mérési eredményekkel.

Vizsgáltam a háló finomságának hatását a szimuláció eredményére, három különböző felosztás esetén. Ezen kívül szimulációkat futtattam egy alternatív csatornageometriájú eszközön, amely párhuzamos csatornákat tartalmaz; továbbá összevettem a rendszer hatékonyságát egy konvencionális hűtőeszközével. Az eredmények szerint a mikrocsatornás hűtőeszközök hatékonysága megfelelő elrendezés esetén lényegesen felülmúlja a konvencionális hűtőeszközökét.

Irodalomjegyzék

- [1] Sauciuc et al. Air-cooling extension – performance limits for processor cooling applications. *Proceedings of the XXth SEMI-THERM Symposium*, pages 74–80, 2003.
- [2] D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease. High performance heat sink for vlsi. *IEEE Electron Dev. Lett.*, EDL-2(5):126–129, 1981.
- [3] M.M. Sabry, A. Sridhar, D. Atienza, Y. Temiz, Y. Leblebici, S. Szczukiewicz, N. Borhani, J.R. Thome, T. Brunswiler, and B. Michel. Towards thermally-aware design of 3d mpsoCs with inter-tier cooling. In *Design, Automation Test in Europe Conference Exhibition*, pages 1–6, March 2011.
- [4] W Yu, MPY Desmulliez, A Druke, M Leonard, RS Dhariwal, D Flynn, G Bognár, A Poppe, G Horvath, Z Kohari, et al. High-aspect-ratio metal microchannel plates for microelectronic cooling applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2):025004, 2010.
- [5] G Takács, PG Szabó, B Plesz, and Gy Bognár. Improved thermal characterization method of integrated microscale heat sinks. *Microelectronics Journal*, 45:1740–1745, 2014.
- [6] Vladimir Székely and Tran Van Bien. Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method. *Solid-State Electronics*, 31(9):1363–1368, 1988.
- [7] G Takács, PG Szabó, B Plesz, and Gy Bognár. Enhanced thermal characterization method of microscale heatsink structures. *Microelectronics Journal*, 2015. megjelenés alatt.

Ábrák jegyzéke

1.1.	LIGA technológiával készített mikrocsatornás hűtőeszköz nagyított képe [4]	3
1.2.	Szilícium hordozóba integrált mikrocsatornákkal ellátott hűtőeszköz	4
2.1.	Egy fal hővezetési modellje. Az egyik felében a hővezetési állandó k_1 , a másikban k_2	7
2.2.	A hőmérséklet helyfüggése a falon belül	8
2.3.	Hűtendő alkatrész modellje	9
3.1.	Az általunk vizsgált alkatrész elrendezése	11
3.2.	A hűtőcsatorna a Geometry modulban. Látható a képen a csatorna elhelyezkedése, a hőforrás pedig sárgával van kijelölve.	12
3.3.	A hűtőcsatorna a Mesh modulban. A képen látható a folyadék és környéke közti kontraszt	13
3.4.	A CFX-pre modul. A képen nyilakkal kijelölve láthatóak azok a határfelületek, ahol a különböző anyagú komponensek érintkeznek egymással, a háttérben levő zöld színű háló pedig a hőforrás.	14
4.1.	A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A csatornában nincs áramlás, $v = 0m/s$. Látható, hogy a levegő a szilárd alkatrészek hőmérsékletét átveszi, és nem lát el hűtő funkciót.	15
4.2.	A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 10m/s$. Látható, hogy a levegő a befolyás helyén szobahőmérsékletű, majd a forró szilícium mentén áramolva folyamatosan felmelegszik, míg a jó hővezető szilícium és réz elemek hőmérséklete közel megegyezik.	16
4.3.	A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 25m/s$	16
4.4.	A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 50m/s$	17
4.5.	A hőmérséklet elosztása a vizsgált tartomány egy szeletében, mely tartalmazza a hőforrást és a csatornát is. A beáramló levegő sebessége $v = 100m/s$	17
5.1.	A csatorna a peremfeltételekkel bejelölve. A be- és kifelé mutató fekete nyilak az inletet ill. az outletet jelölik, a piros nyilak a szimmetriát jelölik, a zöld nyilak pedig a hőátadást jelzik a szomszédos tartományok között	19
5.2.	A hőmérséklet elosztása a szilíciumban és a folyadékban. A hűtőfolyadék tömegáram $\dot{m} = 30sl/h$	19

5.3.	A hőmérséklet elosztása a hűtőcsatorna keresztmetszetében. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 30sl/h$.	20
5.4.	A sebesség elosztása a hűtőfolyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 60sl/h$.	20
5.5.	Nyomáskereső a hűtőfolyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 60sl/h$.	21
5.6.	A hőmérséklet elosztása a szilíciumban és a folyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 60sl/h$.	21
5.7.	A hőmérséklet elosztása a szilíciumban és a folyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 120sl/h$.	22
5.8.	A háló a sarki csatornakijáratnál $4 \cdot 10^{-5}$ elemméret mellett.	23
5.9.	A háló a sarki csatornakijáratnál $2 \cdot 10^{-5}$ elemméret mellett.	23
5.10.	A háló a sarki csatornakijáratnál $1 \cdot 10^{-5}$ elemméret mellett.	24
6.1.	A csatorna a peremfeltételekkel bejelölve. A be- és kifelé mutató fekete nyilak az inletet ill. az outletet jelölik, a piros nyilak a szimmetriát jelölik, a zölddel kijelölt térfogat pedig a csatornát jelöli.	25
6.2.	A hőmérséklet elosztása a csatornában. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 480sl/h$.	26
6.3.	Nyomáskereső a hűtőcsatornában. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 480sl/h$.	26
6.4.	A sebesség elosztása a hűtőfolyadékban. A hűtőfolyadék tömegárama $\dot{m} = 480sl/h$.	27
7.1.	Időállandó-spektrum. Jobb oldalt látható a diszkrét értékekből álló koncentrált paraméteres hálózaté, a bal oldalon pedig egy elosztott paraméteresé	29
7.2.	A mérési elrendezés vázlata.[7]	29
7.3.	A mérési elrendezés fényképe. [7]	30
7.4.	Az első elrendezés kumulatív struktúrafüggvénye.	32
7.5.	A második elrendezés kumulatív struktúrafüggvénye.	32