



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

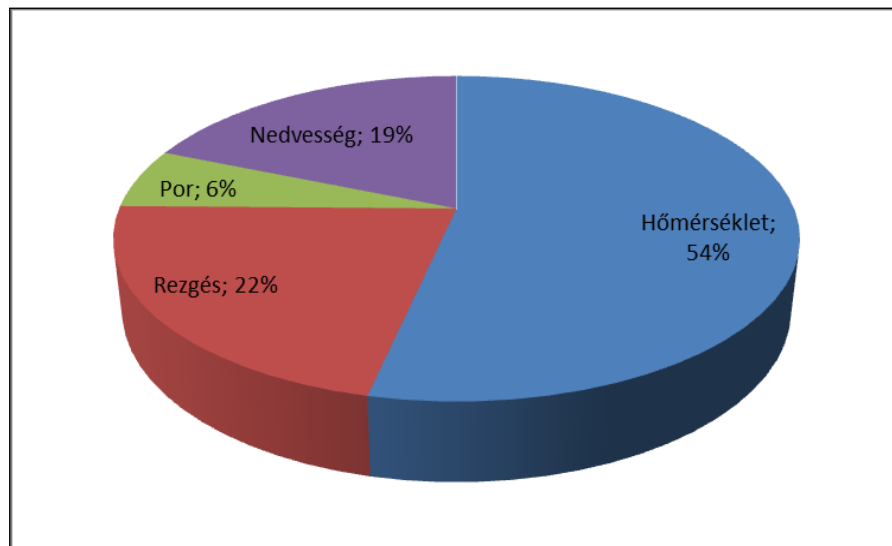
Elektronika alapjai

11. előadás

Teljesítmény és hőmérsékleti problémák

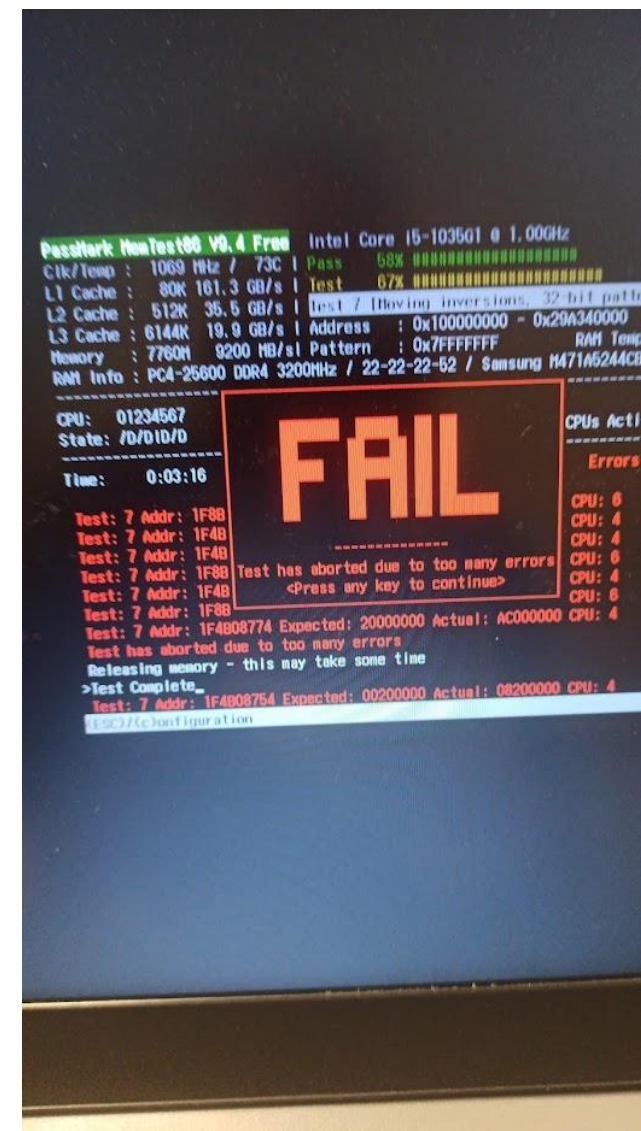
- A teljesítmény és a hőmérséklet összefüggései
 - Meghibásodás okai
 - Teljesítmény plafon
 - Energiatakarékossági módok
- IT eszközök hűtése
 - Hővezetés, hőáramlás, hősugárzás
 - Egyszerű közelítés, a hőellenállás
 - Integrált áramkörök maghőmérsékletének számítása
 - Passzív hűtés
 - Kényszerített léghűtés
 - Folyadékűtés
 - Heat-pipe

Miért fontos ez a kérdés?

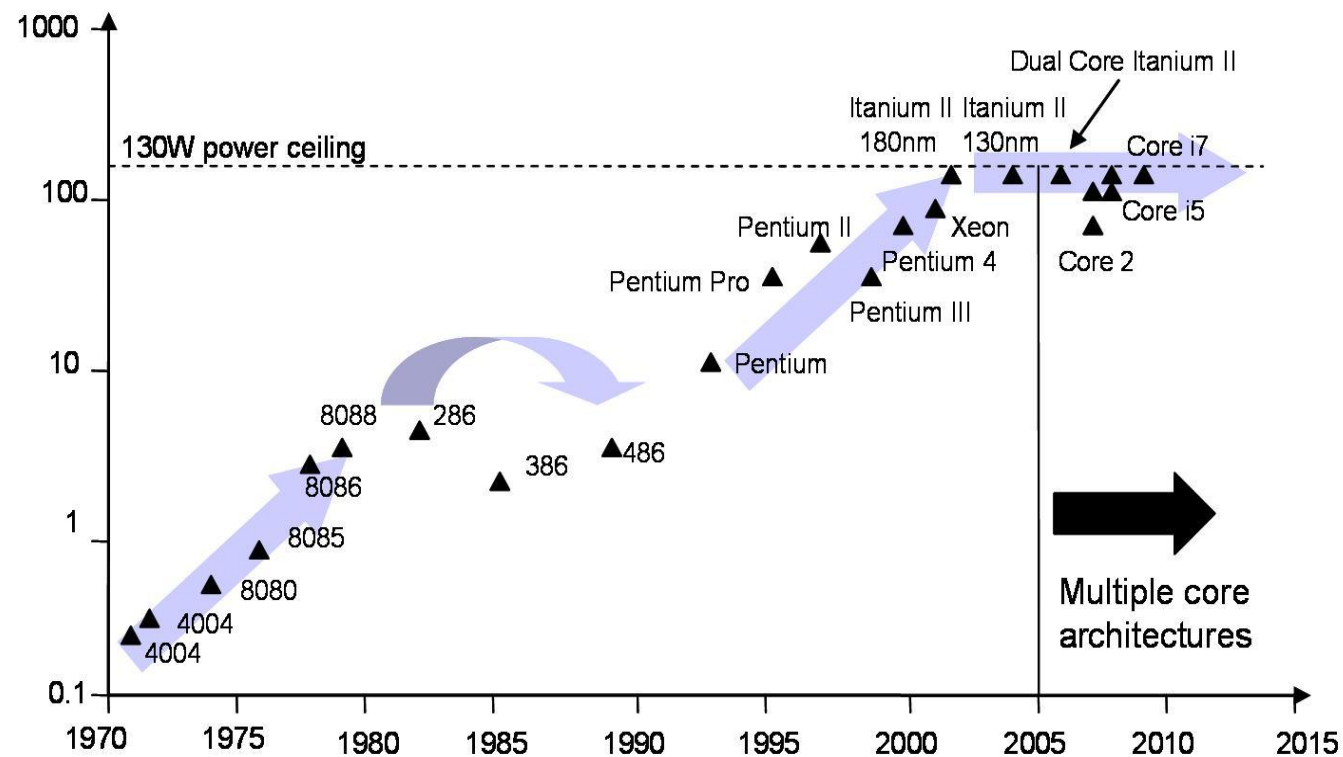


■ Az elektronikus eszközök meghibásodásának főbb okai:

- Túl magas hőmérséklet (**több mint 50%!)**
- Rezgés
- Nedvesség
- Por



A teljesítmény plafon



Adapted from ARC 2010 presentation by Dr. Ram Krishnamurthy, Intel Research

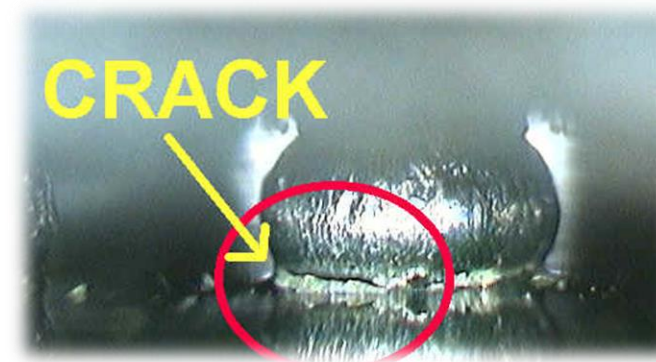
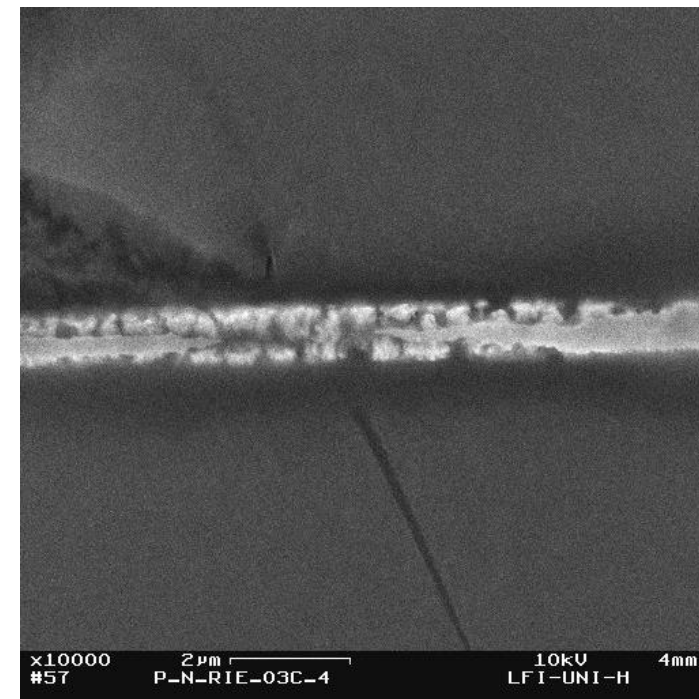
- A méretcsökkentéssel szinte minden – számunkra fontos – paraméter javul
 - Kivéve a felületegységenkénti teljesítmény!

- Kb. 100-130W az a teljesítmény, ami egy integrált áramkörből hagyományos eszközökkel eltávolítható
 - Hagyományos eszközök
 - Hűtőborda
 - Kényszerített léghűtés
 - Mobil alkalmazásokban további problémák lépnek fel
 - Kis területről kell elszállítani a hőt egy nagyobb felszín irányába
 - Hőcső (heatpipe)
- Mivel CMOS áramkörökben $P \sim fV_{DD}^2$
 - A frekvencia egy bizonyos határon nem növelhető
 - A tervezők rá vannak kényszerítve a tápfeszültség csökkentésére
- Az áramkörnek meg kell védeni magát
 - Modern integrált áramkörökben teljesítmény menedzsment található
 - Nemcsak az OS igényeitől, hanem a hőmérséklettől függően is szabályoz a különböző állapotok között.

A sötét szilícium

- Jól hangzó, marketing elnevezés 😊
- A lényeg:
 - A technológia alkalmas arra, hogy még több tranzisztort integráljon adott felületegységre.
 - Ezeket azonban nem kapcsolhatjuk be! Túllépjük a teljesítményplafont.
 - Tehát pl. a magok számát vagy a cache méretét nem növelhetik meg tetszőlegesen (vagyis megnövelhetik, de egyszerre nem használhatók – ettől „sötét” a szilícium)
- Mit lehet kezdeni a „maradék” tranzisztorokkal?
 - Energiahatékony gyorsító áramkörök
 - Application specific instruction set processors
 - Pl. ARM big.LITTLE
 - Nagy számítási teljesítményű mag + energiahatékony mag.
 - A kettő között az átjárást az op. rendszer felügyeli.

- Integrált áramkörök funkcionális működését megghiúsítja
 - A kapu késleltetések megnövekednek.
 - Ha ez egy kritikus útvonalon következik be, a logikai rendszer hibázik
 - „lefagy” ☺
- Az alkatrészek meghibásodhatnak
 - 150°C felett a hozzávezetések, forrasztások, vezető ragasztások elengedhetnek
 - A nagy áramsűrűség okozta vezetékmeghibásodások (az ún. elektronmigráció) valószínűségét növeli
 - 90°C felett hosszú távú degradációs folyamatok indulnak be
 - Különösen ciklusos terhelés hatására, az eltérő hőtágulási együtthatók miatt
 - Rétegek elválhatnak egymástól, eltörhetnek, stb.
- A hiba valószínűsége exponenciálisan nő a hőmérséklettel.



Arrhenius - összefüggés

- Eredeti változatában kémia reakciók sebességének hőmérsékletfüggését modellezi
- De alkalmazható a meghibásodás hőmérsékletfüggésének modellezésére
 - Mivel a meghibásodások nagy része kémiai reakción, diffúzión vagy migráción alapul
 - Egyik legrégebben használt modell.

- $k = Ae^{-\frac{E_a}{k_B T}}$

- k– reakciósebesség
- E_a – aktivációs energia, mechanizmusfüggő, általában 0,3..1,5eV
- k – Boltzmann konstans, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K ill. $8,617 \cdot 10^{-5}$ eV/K
- T – abszolút hőmérséklet
- A – konstans.

- Magasabb hőmérsékleten tehát csökken az élettartam
 - Ezért magasabb hőmérsékleten tesztelik az alkatrészeket, és ez alapján határozzák meg a modell konstansait.
 - A gyorsítási faktor T_2 nagyobb és T_1 kisebb hőmérséklet között:
 - $AF = e^{\frac{Ea}{k}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}$
 - Pl. 0,4eV aktivációs energia, 25°C ill 100°C esetén ez kb. 23
 - Azaz ha pl. azt mértük (mérte a gyártó) nagymennyiségű minta alapján, hogy egy adott alkatrész várható élettartama 5000h 100°C-on, akkor ebben az esetben, ha szobahőmérsékletre sikerül hűteni 115 ezer óra lesz!
 - 5 ezer óra az kb. 7 hónap, 115 ezer óra viszont több mint 13év!
 - A mérnöki gyakorlatban néha még egyszerűbb összefüggést használunk:
 - Pl. alumínium elektrolit kondenzátor esetén 10°C hőmérséklet csökkentés megkétszerezi a várható élettartamot. (ez nem jelenti azt, hogy teljesen tönkremegy, pl. a kapacitás 30%-os csökkenése jelenti az elromlást!)



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elméleti alapok

Röviden...

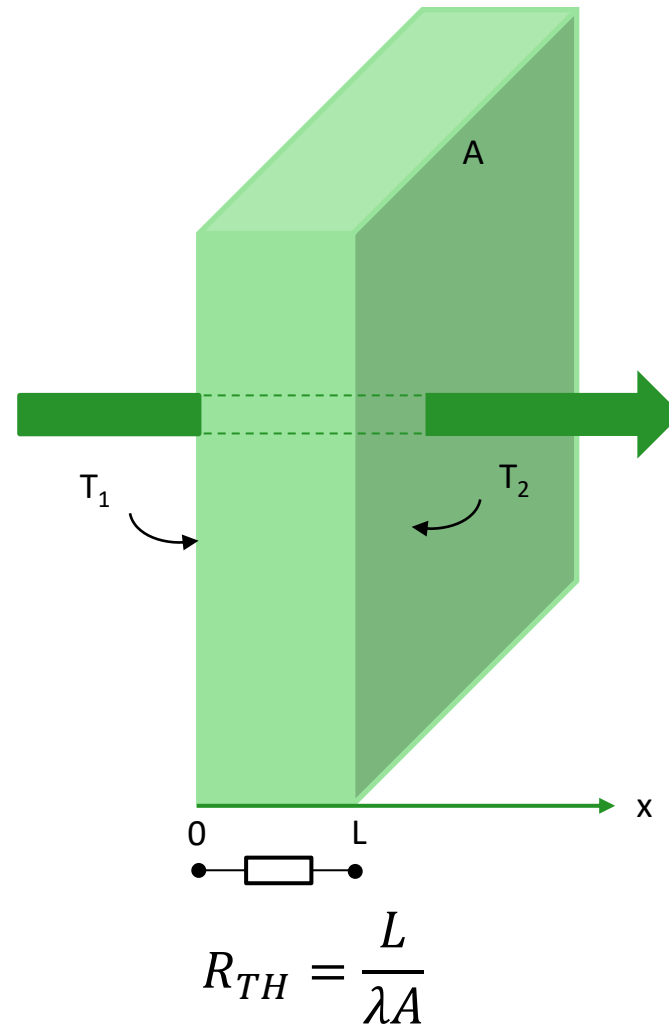
- A hőáramot a \mathbf{p} hőáram sűrűséggel jellemezhetjük.
 - A hőáramsűrűség vektor iránya mutatja a hő áramlási irányát, abszolút értéke pedig megadja az egységnyi keresztmetszeten, egységnyi idő alatt átáramló energia mennyiségét. [$\text{J}/\text{m}^2\text{s}$, W/m^2]
 - Egy adott V térfogatú anyag hőmérsékletének ΔT -vel történő megemeléséhez szükséges energia
 - $\Delta E = c_v V \Delta T$, ahol c_v a térfogatra vonatkoztatott hőkapacitás
- Végtelenül kis térfogatot vizsgálva, amely g [W/m^3] teljesítménysűrűségű hőforrást tartalmaz, az energia folytonossági egyenletéhez jutunk
 - $\text{div } \mathbf{p} = g - \frac{c \partial T}{\partial t}$
- Azaz a hőforrás által keltett hőmennyiség egy része a felületen távozik, más része pedig a térfogatot melegíti.

- A hőmérsékletkülönbség hatására energiakiegyenlítődési folyamatok indulnak meg.
 - **Hővezetés**
 - A hő részecskéről részecskére adódik át, de nincs anyagáramlás
 - $p = -\lambda(T) \text{grad } T$, ahol λ [W/mK] pedig a (hőmérséklet függő) hővezetési együttható (Fourier – egyenlet)
 - **Hőátadás** (konvekció)
 - a termikus energia átadása a különböző energiájú részek helyváltoztató mozgásával történik. Egy T hőmérsékletű felületen a T_0 hőmérsékletű áramló hőáram sűrűsége:
 - $p = h(T - T_0)$, ahol h a hőátadási tényező.
 - **Hősugárzás**
 - környezeténél magasabb hőmérsékletű test energiájának egy részét elektromágneses sugárzás formájában adja le környezetének. A T hőmérsékletű test által a T_0 hőmérsékletű környezete felé kibocsátott energia:
 - $p = \epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$ ahol ϵ a felület emisszivitása, $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ pedig STEFAN-BOLTZMANN állandó.
 - (Vigyázat! Itt T az abszolút hőmérséklet!)

- Ha a hővezetés összefüggését behelyettesítenénk a folytonossági egyenletbe, egy differenciálegyenletet kapnánk.
- Kézenfekvő azonban az analógia az elektromos áramerősség és a hőáram, valamint a feszültség és a hőmérséklet között
 - az elektromos hálózatok mintájára absztrakt, koncentrált elemeket definiálunk, hogy a gyakorlati számításokat egyszerűbbé tegyük.
- Az analógia a következő
 - Hőmérséklet \leftrightarrow feszültség
 - Hőáram (teljesítmény) \leftrightarrow áram
 - Egy anyag két felülete között, ha hőmérsékletkülönbség van, akkor hőáram fog folyni, méghozzá a hőmérsékletkülönbséggel arányosan \rightarrow hőellenás

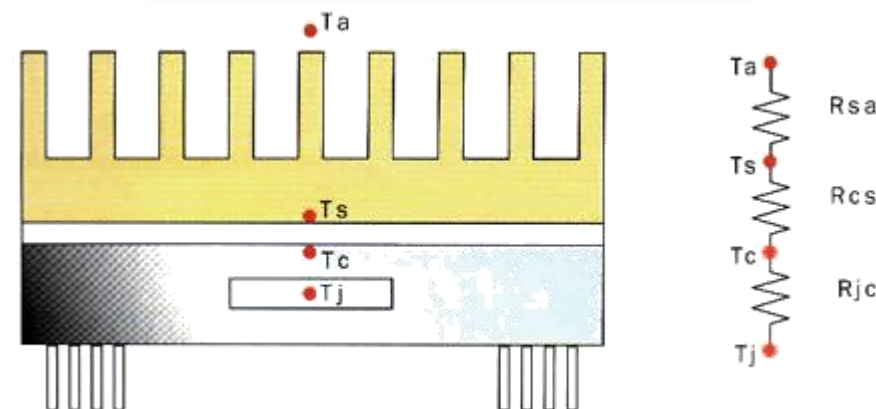
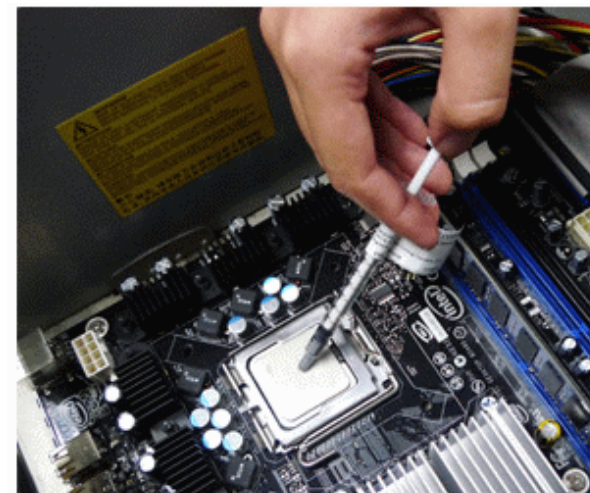
Hőellenállás

- Egy homogén L hosszúságú, A felületű anyagra a Fourier egyenletet felírva:
 - $p = \lambda \frac{T_2 - T_1}{L}$
 - A teljes A felszínre
 - $P = \lambda A \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{T_2 - T_1}{\frac{1L}{\lambda A}} = \frac{T_2 - T_1}{R_{TH}}$
 - Ahol R_{TH} [K/W] a hőellenállás
- Ez természetesen csak egy **közelítés!**
 - A hőáramlás 3D probléma
 - Az elektromosságban min. 10^{10} arány van a vezető és szigetelő anyagok vezetőképessége között
 - Itt kb. 10^3 pl. réz kb. $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, üvegyapot $0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$



Az egyszerű modell

- Leggyakrabban arra vagyunk kíváncsiak, hogy egy adott külső hőmérséklet és teljesítmény esetén az integrált áramkör belső hőmérséklete (a továbbiakban junction) a kritikus határ alatt marad-e, vagy sem. (adatlap megadja, pl. 125°C)
- Nagy biztonsági tartalékkal dolgozunk, így a hőellenálláson alapuló egyszerű közelítések jogosak.
- Az integrált áramkört két vagy három hőellenállással modellezzük:
 - A szilícium chiptől a tok felszínéig: R_{THJC}
 - **A tok és hűtőborda közötti kitöltő anyag** (hővezető zsír, TIM, thermal interface material)
 - Feladata a jó hővezetés biztosítása – a felületek közötti érdesség kitöltése, hogy a rossz hővezető levegő ne maradjon meg.
 - A hűtőborda hőellenállása
 - (ha kényszerített légárammal hűtött, pl. függ a ventilátor fordulatszámától, stb.)



Példa

- Adott egy szerver CPU, átlagos teljesítménye $TDP = 80W$
 - $R_{THjc} = 0,4 \text{ K/W}$ (1W teljesítményre $0,4^\circ\text{C}$ hőmérséklet növekedés)
 - a hűtésre a katalógus adat: $R_{THca} = 0,09 \text{ K/W}$ (Spire Gemini Rev. 3.)
- Mekkora lesz a CPU belső hőmérséklete, ha a külső hőmérséklet 25°C ?
 - $T_J = P(R_{THjc} + R_{THca}) + T_A = 64,2^\circ\text{C}$
- 100W-os csúcsteljesítményen járattva, egy rosszabb minőségű hűtővel, egy forró nyári napon, elromlott légkondicionáló esetén?
 - Ha $R_{THca} = 0,315 \text{ K/W}$ (Spire Rotor Rev.4.)
- $T_J = P(R_{THjc} + R_{THca}) + 35 = 106,5^\circ\text{C}$

Termikus tervezési teljesítmény

- (TDP – thermal design power)
 - Egy átlagos hőteljesítmény, amire a hűtési rendszert méretezni kell.
 - A csúcs ezt meghaladhatja, általában 50%-al.
 - Intel mikroprocesszorokban 3 TDP profil is van
 - Nominális
 - cTDP Down – „csendes” működés, kisebb fordulatszámon jár a ventilátor
 - cTDP UP – nagyobb hűtőteljesítményt igényel – nagy fordulatszám (hangos)
 - A belső szabályozás (órajel, tápfeszültség) nem engedi ezen teljesítmények meghaladását

Essentials		CPU Specifications	
Product Collection	Intel® Core™ i9 processors (14th gen)	Total Cores ?	24
Code Name	Products formerly Raptor Lake	# of Performance-cores	8
Vertical Segment	Desktop	# of Efficient-cores	16
Processor Number ?	i9-14900KS	Total Threads ?	32
Lithography ?	Intel 7	Max Turbo Frequency ?	6.2 GHz
Recommended Customer Price ?	\$689.00-\$699.00	Intel® Thermal Velocity Boost Frequency ?	6.2 GHz
		Intel® Turbo Boost Max Technology 3.0 Frequency [†] ?	5.9 GHz
		Performance-core Max Turbo Frequency ?	5.7 GHz
		Efficient-core Max Turbo Frequency ?	4.5 GHz
		Performance-core Base Frequency ?	3.2 GHz
		Efficient-core Base Frequency ?	2.4 GHz
		Cache ?	36 MB Intel® Smart Cache
		Total L2 Cache	32 MB
		Processor Base Power ?	150 W
		Maximum Turbo Power ?	253 W

Természetes hőátadás

■ Közegáramlás

- A melegebb hűtőközeg sűrűsége csökken, így felfele száll (ha van gravitációs tér...)

- $P_{conv} = h_{conv} A_S (T_S - T_F)$

- Ahol h a hőátadási tényező

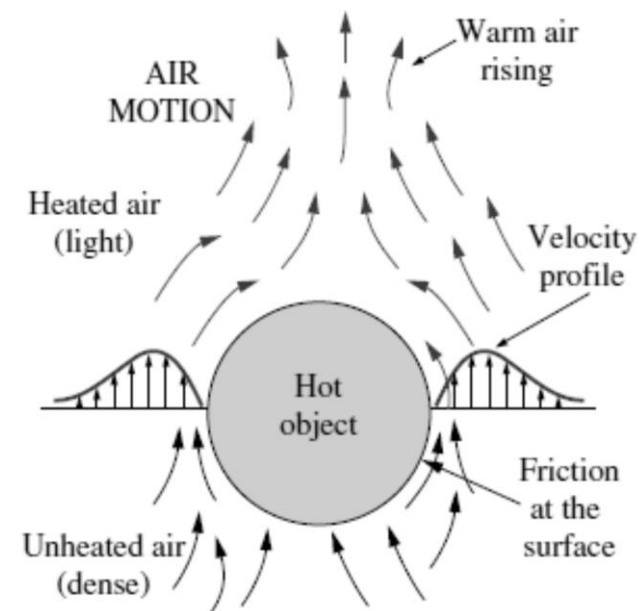
■ Általában az eszközeinkben az áramlás lamináris (örvénymentes)




- A hőmérsékleti különbségek általában 100°C-nál kisebb, a jellegzetes méretek pedig a cm-m nagyságrendjében vannak.

■ A hőátadási tényező levegőre, atmoszférikus nyomáson:

- $h_{conv} = K \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

- Ahol K egy konstans, geometriától és orientációtól függ, L_C a karakterisztikus méret

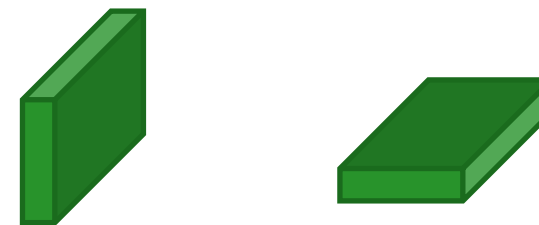


Geometria	Karakterisztikus hossz	Hőátadási tényező
	magasság	$h_{conv} = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}$
Felülről 	$4A/p$ (p – kerület)	$h_{conv} = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25}$
alulról 	$4A/p$ (p – kerület)	$h_{conv} = 0,59 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25}$
Egy alkatrészre a PCB-n	alkatrész mérete	$h_{conv} = 2,44 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25}$

- Közelítő, de jó összefüggések – mérések alapján.
 - Minél nagyobb a hőmérséklet különbség, annál nagyobb a hőátadási együttható
 - Erőteljesen függ a geometriától
 - Tehát nem mindegy, hogyan helyezkedik el a disszipáló alkatrész

Példa: mekkora a hőátadás egy 2,5" HDD-n?

- Legyen 10°C-al magasabb hőmérsékletű
 - 2,5" form factor: 100mm × 69,85mm × 9,5mm
 - Kiszámolva és behelyettesítve, az eltávozott hő, mW
 - (behelyettesítve az előző dia képleteibe)
 - (a képleteket nem kell sehogy sem tudni. Jók és gyorsak a szimulátorok)

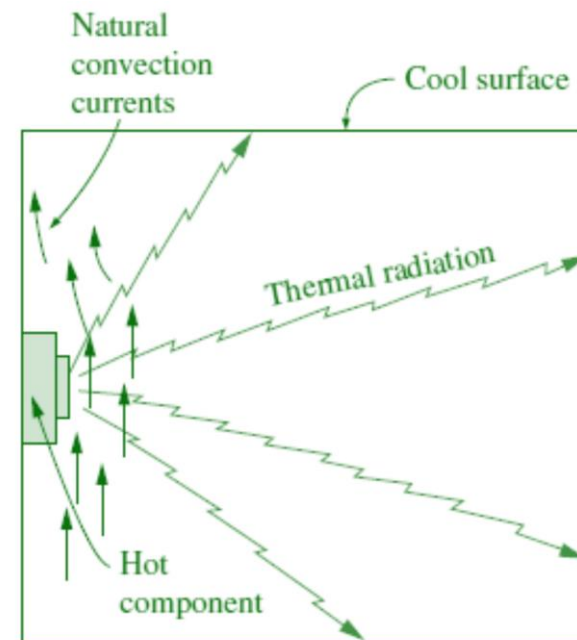


	Függőlegesen	Vízszintesen
Oldal	894	110
Felül	18	129
Alul	8	58
Összesen	920	298

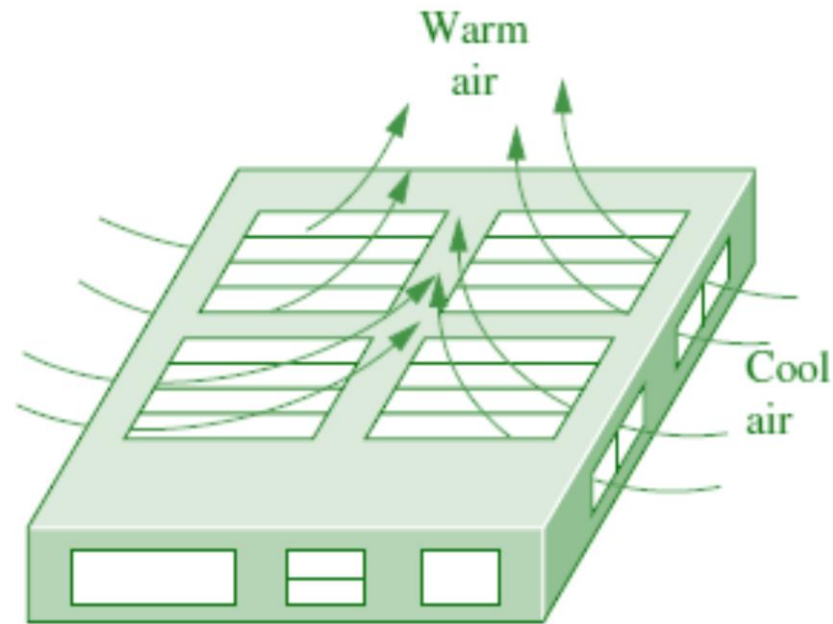
- Tehát a függőlegesen szerelt HDD sokkal jobban hűl természetes konvekcióval.

Hőszugárzás

- Ha meleg felszín teljesen körül van véve hidegebb környezettel
 - Hőszugárzással történik a hőleadás
 - Fontos a felület emisszivitási tényezője
 - Műanyag, festett felületek esetén nagy
 - Pl. hűtőbordákat feketére festenek...
 - (Itt a “fekete” azt jelenti, hogy az emisszivitás nagy IR tartományban. De általában a fekete színű festékeknek nagy az emisszivitása)
 - $P_{rad} = \epsilon A_s \sigma (T_S^4 - T_A^4)$
 - (ököl szabály – kb. megegyezik a természetes konvekcióval)
 - Ha viszont a környezet hőmérséklete kb. megegyezik, akkor a nettó hőszugárzás kb. 0.



Passzív hűtés megvalósítása



- Az eszköz oldalán és tetején elhelyezkedő nyílásokkal.
 - Az oldalán elhelyezett nyílásokon áramlik be a hideg levegő, ami felmelegedve az eszköz tetején távozik.
 - Tipikusan a SOHO eszközök
 - Nem szerelhetők rack-be.

Egy zárt doboz hűtése

- Vizsgáljuk meg az ábrán látható zárt dobozt!
 - Mérete: 15cm×30cm×40cm
 - 75W teljesítményt disszipál az elektronika.
 - Egy állványon áll, ennek hővezetését elhanyagoljuk.
 - 35°C szobában nem lépheti át a külső hőmérséklet a 65°C-t
 - Kell-e ventilátor?

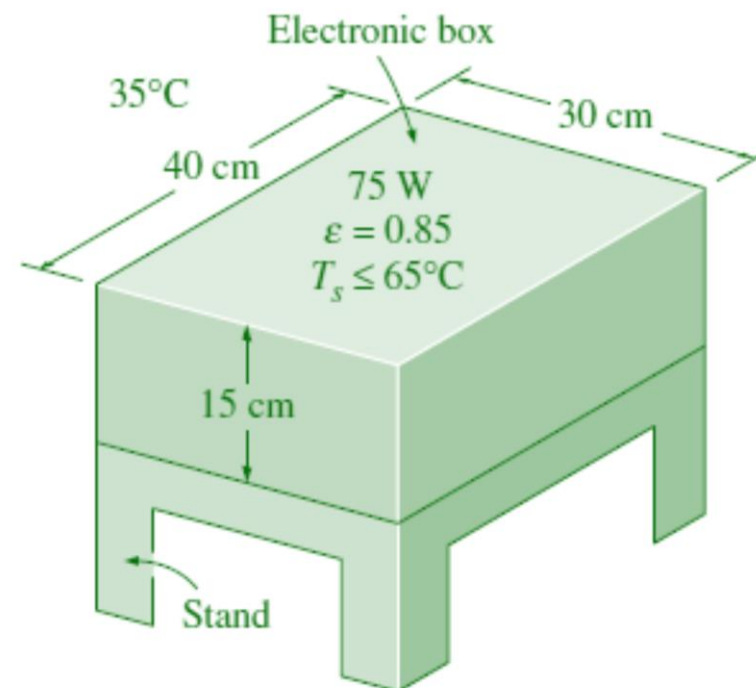
■ MEGOLDÁS

- Nézzük meg mi történik, ha 65°C a felszín!

- Számítsuk ki a kisugárzott teljesítményt!

- $P_{rad} = \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_A^4) = 0,85 \cdot 0,33 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (338^4 - 308^4) = 64,5W$

- (jó lesz ez... 😊)



- Számítsuk ki a konvekciós hőátadási tényezőket

- Oldalfalakra:

- $h_{side} = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25} = 1,42 \left(\frac{30}{0,15} \right)^{0,25} = 5,34 W/m^2K$

- A tetejére:

- $L_C = \frac{4A}{p} = \frac{4 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,7} = 0,34 m$

- $h_{top} = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25} = 1,32 \left(\frac{30}{0,34} \right)^{0,25} = 4,05 W/m^2K$

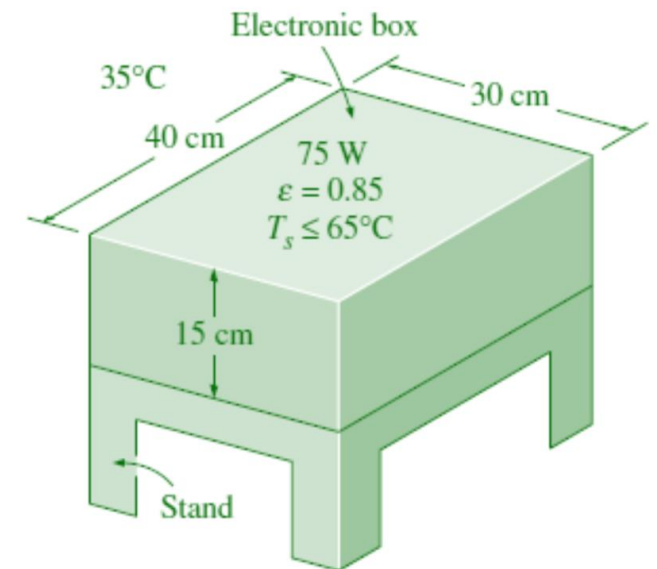
- Számítsuk ki a hőátadást!

- $P_{conv,side} = h_{side} A_{side} \Delta T = 5,34 \cdot 0,21 \cdot 30 = 33,6 W$

- $P_{conv,top} = h_{top} A_{top} \Delta T = 4,05 \cdot 0,12 \cdot 30 = 14,6 W$

- Összesen $P = 64,5 + 33,6 + 14,6 = 112,7 W$

- Tehát nem kell aktív hűtés

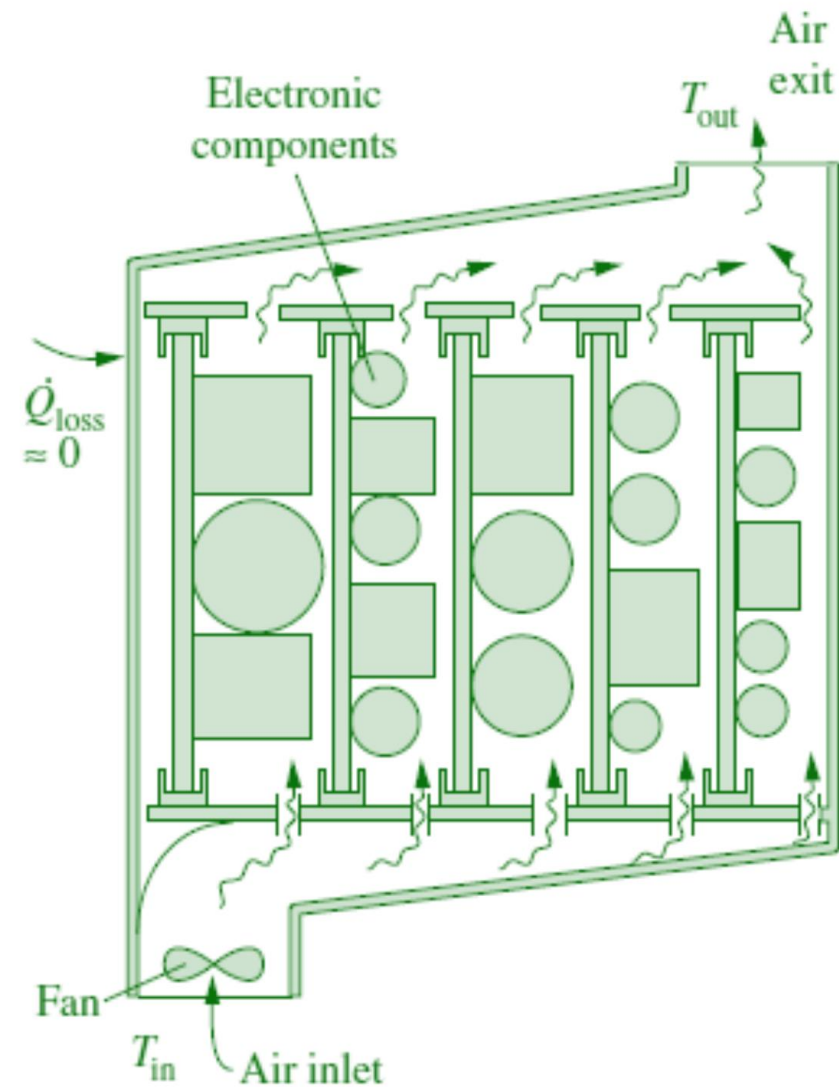


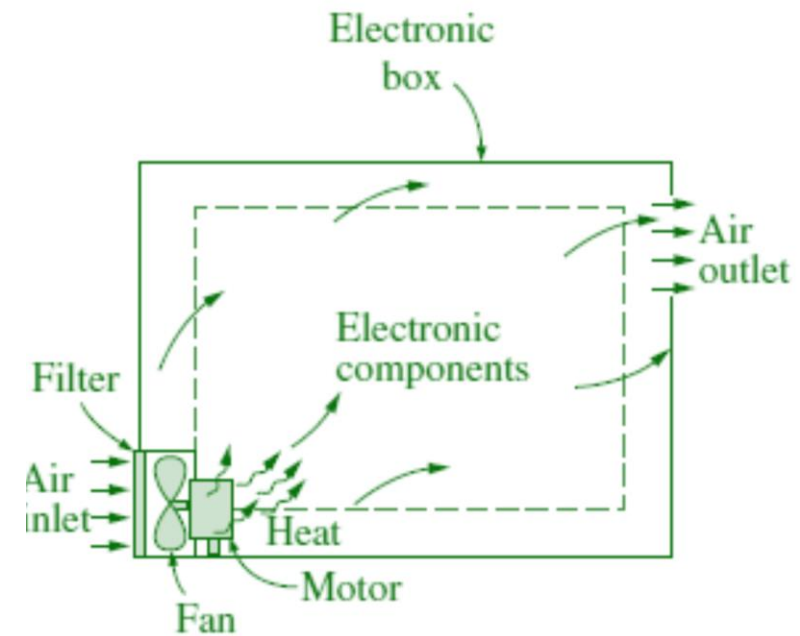
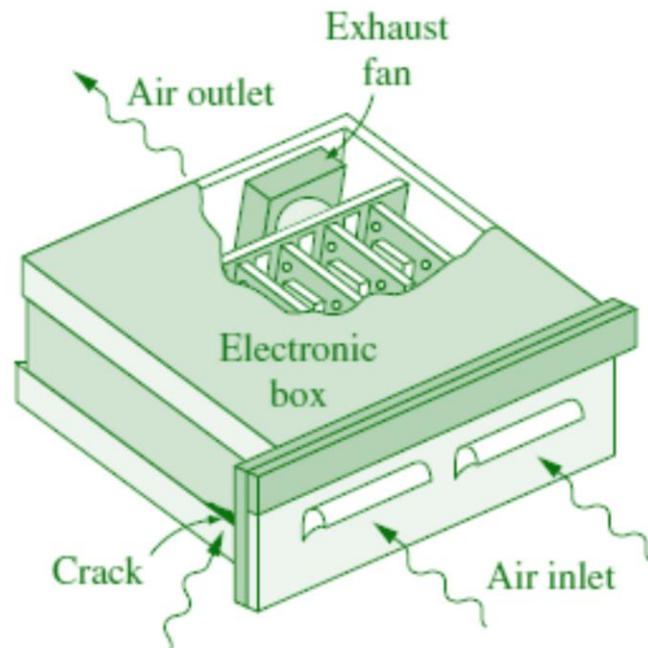
Kényszerített hűtés

- Az anyagtranszportot energia befektetésével hozzuk létre.
 - (hűtőventillátor, szivattyú stb.)
- A hűtőközeg felveszi az elszállítandó hőt
 - Hőátadással: ebben az esetben a hűtőközeg hőmérséklete megmelegszik
 - Halmazállapot változással: ebben az esetben a hűtőközeg halmazállapota megváltozik
 - A halmazállapotváltozáshoz szükséges energia nagy lehet, így a hűtés hatékony.

Kényszerített léghűtés

- Feltételezzük, hogy a hő nagy részét a légáram veszi fel.
- Ebben az esetben
 - $P = mc_p(T_{out} - T_{in})$
 - c_p a levegő fajhője, m pedig a levegő tömegárama, kg/s
 - A ki és belépő levegőhőmérsékletének mérésével a hűtőventillátor fordulatszáma szabályozható
- Jól méretezett léghűtés esetén
 - A hőmérséklet emelkedés kb. 10°C,
 - A kilépő levegő hőmérséklete max. 70°C
 - Ez biztosítja azt, hogy semelyik alkatrész sem melegszik fel kb. 100°C fölé

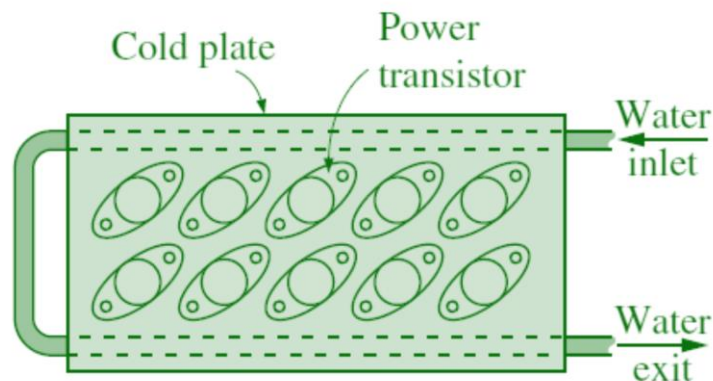




- Tipikusan rack-be szerelhető berendezések
 - Előlapon belépő nyílások, hátoldali szívóventillátor
 - Hátrány: por, szennyeződés bejut a berendezésbe
 - Vagy előlapi ventillátor
 - Van lehetőség szűrésre
 - Itt a ventillátor motorjának hője előmelegíti a levegőt

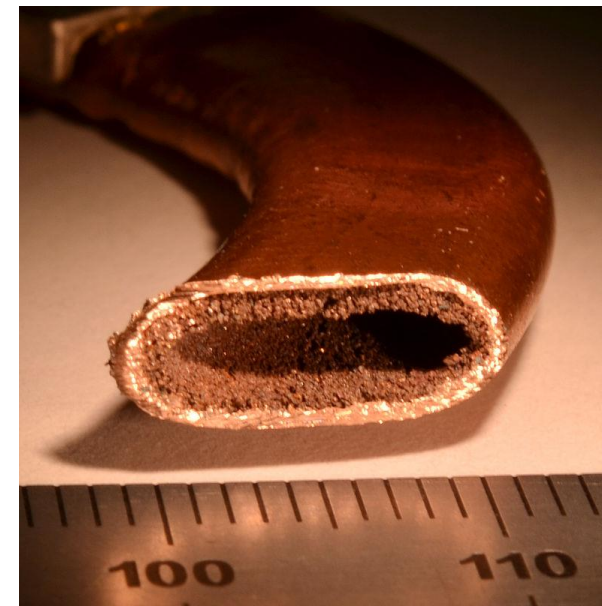
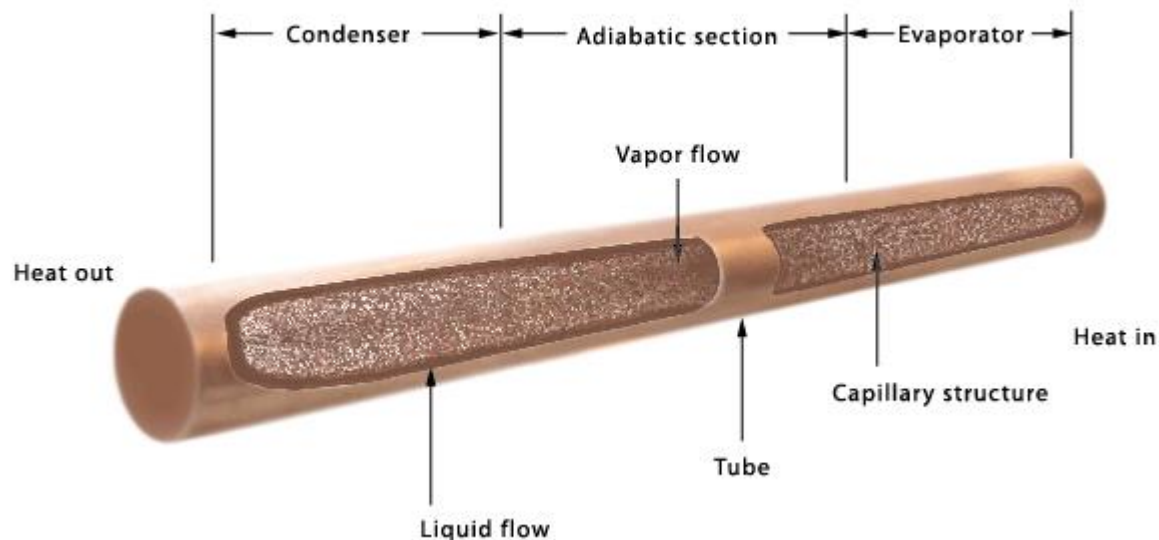
Folyadékűtés

- Mivel a folyadékok fajhője sokkal nagyobb, nagyon jó hűtés érhető el, de a technológia bonyolult (levegő kb. 1kJ/kgK , víz $4,2\text{kJ/kgK}$)
 - Szivárgás
 - Korrózió
 - a levegő páratartalmának lecsapódása a hűtőn
- Direkt vagy indirekt
 - Direkt esetben a hűtőfolyadék közvetlenül érintkezik a hűtendő felszínnel
 - Indirekt esetben egy jó hővezető anyagban (pl. rézben) keringetik a folyadékot.
 - Ez az ún. hideglemez (cold-plate)



Hő cső (heatpipe)

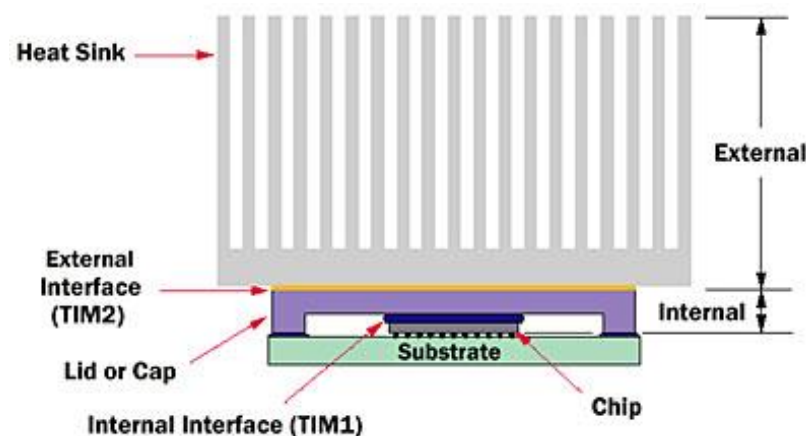
- Folyadékok esetében a párolgáshő nagy. (víz: $L_f=2256\text{kJ/kg}$)
 - A cső meleg végén a folyadék elpárolog, ezáltal hűti a hűtendő eszközt
 - A gáz a cső másik végén, ahol aktív hűtés van általában lecsapódik
 - A lecsapódott folyadék, a cső falának speciális hajszálcsöves kiképzése miatt visszaszivárog.
 - IT eszközökben általában réz hőcső, a folyadék pedig víz (alacsony nyomáson)



Hűtőeszköz kiválasztása

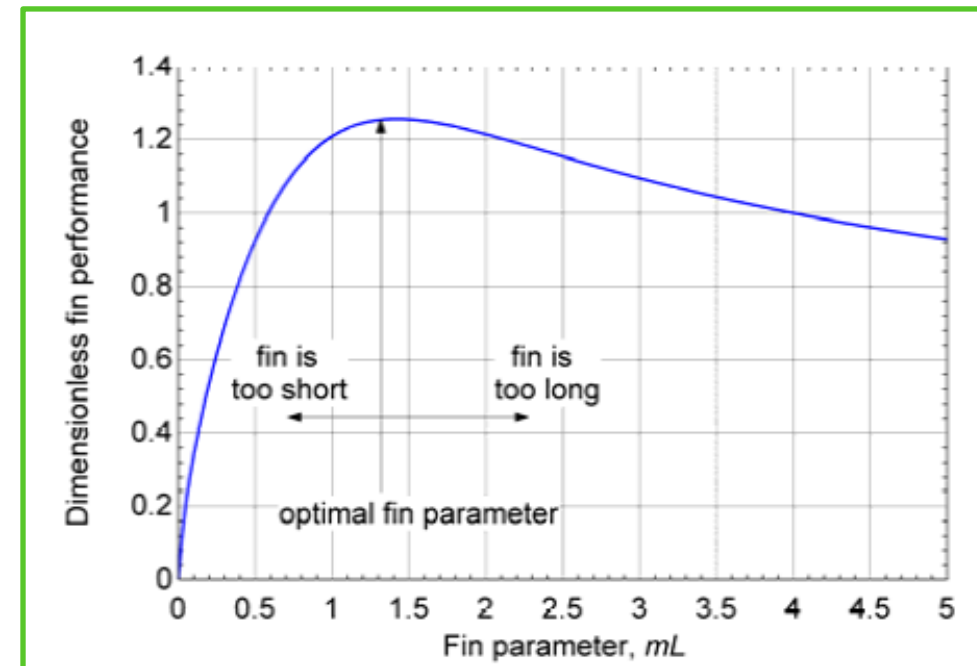
■ Legfontosabb szempontok és tényezők:

- $\dot{A}R \sim$ anyag / kidolgozottság (pl.: leggyakrabban alumínium vagy réz, de egzotikus eszközök – *heat pipe* – különféle drága megmunkálási lépések)
- Méret / geometriailag befér e a megadott helyre (pl.: rack fiók)
- Tömeg / orientáció (pl.: Ha rázkódás éri kibírja e? Rajta marad a hűtendő eszközön?)
- Működési határfeltételek (pl.: *heat pipe* adott hőmérséklettartományban tud csak hatékonyan működni)
- Ergonómia (pl.: zajártalom kérdése, rezgés, stb.)



■ Hűtőbordák esetén

- Hűtőborda szárnyainak (fin) hossza
 - Passzív / aktív hűtés esetén is fontos
 - Hűtőborda szárnyainak sűrűsége / elrendezése
 - Főleg aktív hűtés esetén fontos
- Hűtőborda szárnyain a hőmérséklet a vége felé folyamatosan csökken, így fokozatosan csökken a hőcsere
- Túl hosszú szárnyak esetén szárnyak végén a hőmérséklet azonos lehet a környezet hőmérsékletével
- így felesleges részei lesznek a hűtőbordának (*ár, tömeg vonzat*)
- **Van optimum!**
- **És szimulátorral megtalálható!**



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [Dark silicon and the end of multicore scaling](#)
- [Intel Xeon Thermal Design Guide](#)
- [Spire CPU hűtők](#)
- [Intel Core processzorok, összehasonlíthatóan](#)