Ante Lokas, Ivan Puljić

**Razvoj tehnologije hlađenja procesora**

Seminarski rad

**Studij:** Preddiplomski studij

**Studijska grupa:** Informatika

**Predmet**: NAR

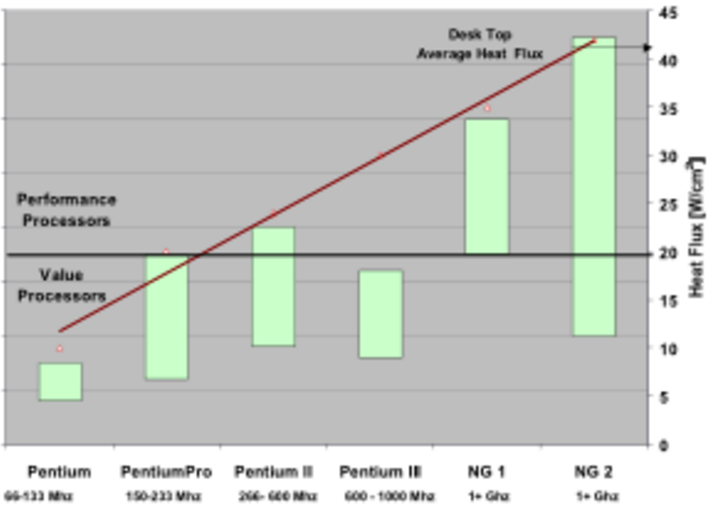
**Ak. god.**: 2015/2016.

**Nastavnik**: Prof. dr. sc. Andrina Granić

Split, 2015.

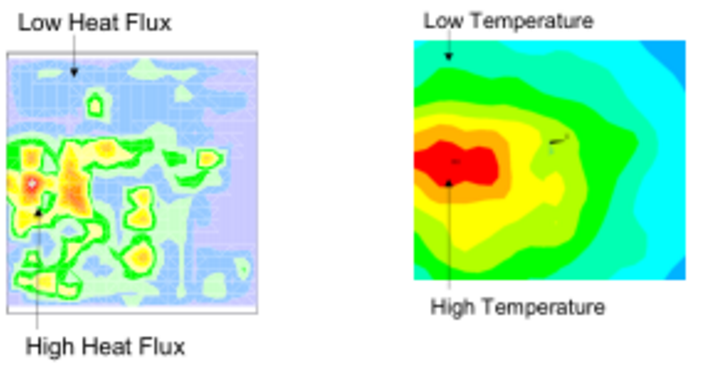
# Uvod

U posljednja tri desetljeća računala su doživjela drastičan napredak iz svih aspekta promatranja, a posebno s obzirom na procesorsku moć. Centralna procesorska jedinica tjekom svog rada emitira neželjenu toplinu, zbog čega se pouzdanost rada procesora dovodi u rizično područje ukoliko hlađenje nije dobro projektirano . Potrebno je održavati temperaturu ispod određene granice, a pouzdanost rada se smanjuje eksponencijalno ako temperatura prelazi granicu. U ovom radu ćemo analizirati različite tehnologije i pristupe hlađenja procesora, te njihove prednosti i nedostatke. Moderni mikroprocesori u svojoj implementaciji sadrže napredne termičke monitore i mehanizme koji ako temperatura prijeđe predefinirani limit preventiraju katastrofalne štete koje mogu nastati. Pri svakom proučavanju hlađenja procesesora treba voditi računa o Moore-ovom zakonu koji projicira da će broj tranzistora smještenih u integriranim krugovima udvostručiti svake dvije godine. Kako procesorska moć raste eksponencijalno iz godine u godinu, adekvatne metode hlađenja postaju sastavni djelovi složenih kalkulacija u dizajniranju novih mikroprocesora. Potrebe energije za rad mikroprocesora nisu moglo pratiti stalno povećavanje gustoće integriranih krugova, što je dovelo do veće disipacije. Dobra rješenja unutar arhitekture mikroprocesora su uspjele donekle ublažiti rast energije koju mikroprocesor koristi, ali ga svakako nisu rješile. Taj problem se reflektira u prosječnom dotoku topline (average heat flux) koji nam govori kolika je disipacija po nekoj jedinici prostora Slika 1 nam prikazuje linearan rast faktora average heat flux s vremenom kako se moć procesora povećava.



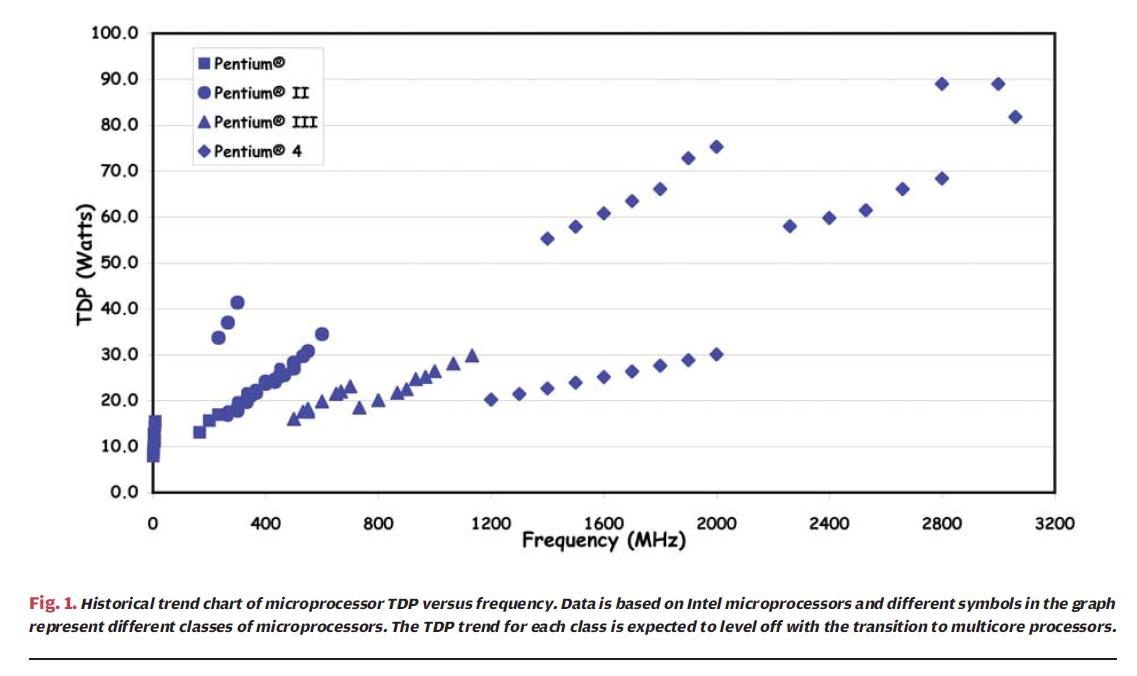
*slika 1*

Problematična stvar kod zagrijavanja mikroprocesora je to što se on ne zagrijavaja jednoliko kao jedna cjelina, već se u nekim točkama mjeri ekstremno viska temperatura, dok je u ostalim djelovima znatno niža temperatura. Takvo zagrijavanje dodatno otežava dizajniranje procesora te se dizajneri moraju striktno držati određenih granica koje su dosta veće od prosječnog dotoka topline. Distribuciju topline izmjerenu u heat flux jedinicama možemo vidijeti na slici2.



*slika2*

Još jedan od vrlo bitnih faktora vezanih uz hlađenje mikroprocesora je **Thermal Design Power(**TDP) TDP. Izražava se u (W), i vrlo je bitan dizajnerima hlađenja jer upravo on reprezentira maksimalnu održivu razinu disipacije mikroprocesora za vrijeme izvođenja nekih stvarnih aplikacija. Što je TDP veći, procestor će zahtjevati bolje i jače hlađenje. U situacijama gdje se bira između duljine trajanja baterije nekog sistema i snage izvedbe sistema, TDP može igrati značajnu ulugu jer se iz disipacije da naslutiti hoće li mikroprocesor trošiti više ili manje energije. Slika 2 nam pokazuje rast TDP zajedno s povećanjem frekvencije procesora kroz povijest.



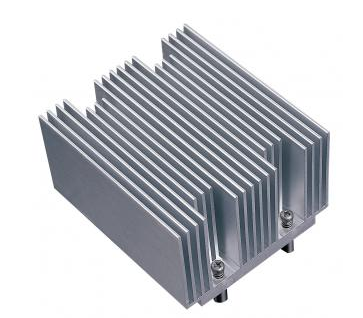
*slika 3*

Nekad su za vrijeme izvedbe mogući kratki skokovi disipacije koji prelaze dopuštenu razinu TDP-a ali oni ne predstavljaju problem ukoliko je njihovo trajanje ne premašuje granice koje postavio proizvođač mikroprocesora. Danas se od tehnologija hlađenja najviše koristi hlađenje zrakom koje ima široku primjenu u desktop računalima. Nakon zračnog hlađenja najviše se koristi pasivno hlađenje. Zbog malog prostora za napredovanje zračnog hlađenja ,vodeno hlađenje se brzo razvija, i dobiva sve veći prostor na tržištu. Također ćemo spomenuti neke alternativne metode hlađenja kao što su hlađenje peltier elementom i tehnologije koje se predviđaju za korištenje u budućnosti.

# Aktivno hlađenje zrakom

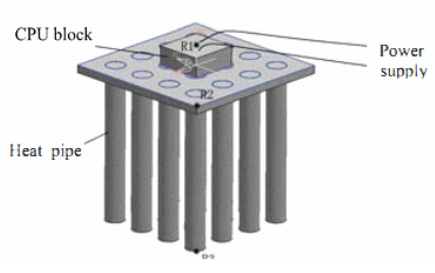
Hlađenje zrakom koje uključuje korištenje ventilatora, je dominantna metoda u hlađenju mikroprocesora u računalnim sistemima. Ima nekoliko prednosti kao što su mala cijena, relativno niska razina buke i ne sadrži puno kablova. Glavna funkcija ventilatora je da dovode hladniji zrak iz okoline koji će preuzeti dio topline procesora na sebe i tako hladiti procesor. Više ventilatora se može spojiti serijski (jedan na drugom) ili paralelno (jedan do drugog). Serijsko spajanje ventilatora omogučuje jače strujanje zraka, dok paralelno pokriva više prostora. Zračno hlađenje je vrlo teško pratilo brzi razvoj mikroprocesora i potrebu za njegovim hlađenjem, radi čega je došlo do razvoja nekih novih tehnologija hlađenja procesora.

Jedno od rješenja u tehnologiji hlađenja koje je došlo kao odgovor na sve veće zahtjeve je hladnjak. Heat sink je pojam jednostavne komponente koja toplinu iz čvrstog materijala zbog svoje velike površine prenosi u okolni plin ili tekućinu. Kako bi se stvorila dodatna površina heat sink ima puno rebara , izbočine u obliku kvadra. Najbitnija svojstva heat sink-a su vrsta materijala, termalna konduktivnost i dizajn rebara. Primjer heat sinka možete vidjeti na *slici 4.*



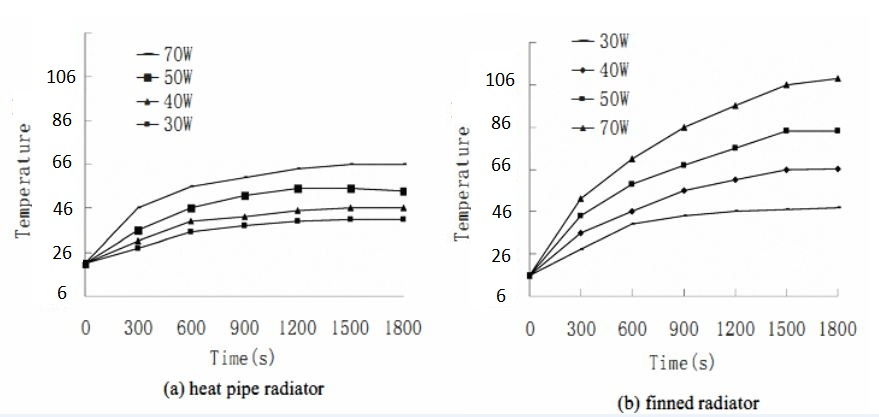
*Slika4*

U potrazi za boljim rješenjima pokušalo se unaprijediti postojeći heat sink da prenese još više topline na okolinu. Istraživanja su proučavala heat sink sa cijevima kao zamjena za dotadašnja rebra. Primarna razlika cijevi i nožica je ta što su cijevi šuplje. Predpostavka je da će cijevi iste veličine kao rebra imati veći prijenos topline na okolinu što i ima smisla jer je šuplja cijev u doticaju s zrakom s dvije strane. *Slika5* nam prikazuje izvedbu heat sink-a koji koristi cijevi.



*slika5*

Istraživanja su usporedila performanse heat sinka-a sa cijevima i heat sink-a sa rebrima pri različitim snagama struje. *Slika6*  nam zorno pokazuje koliko heat sink s cijevima ima bolje svojstvo hlađenja. Razlika je najveća kad je snaga sruje najjača.



*slika6*

Heat sink mora biti pažljivo postavljen na mikroprocesor da bi novooformljena veza materijala imala što veću toplinsku vodljivost. To podrazumjeva priajnjanje dvije površine koje se tvornički izglađuju da bi bilo što više točaka dodira. S obzirom da su i heat sink i procesor sačinjeni od metala, njihove površine unatoč izglađivanju karakteriziraju hrapave površine na mikroskopskoj razini. Kad se takve dvije površine prislone jedna na drugu, mikroskopski gledajući kontakt se ostvaruje samo na višim točkama tih dvaju površina. Niže točke ostaju nepovezane i na tim mjestima ostaju praznine popunjene zrakom. Tipična veza ima od više od 90% praznina popunjenih zrakom što predstavlja vrlo ozbiljan problem jer zrak ima manju toplinsku vodljivost. Materijali s većom toplinskom vodljivosti od zraka se koriste kako bi popunili zračne praznine i napravili puno bolju vezu. Mnogo vrsta materijala se razvilo za svrhe bolje toplinske vodljivosti, a možemo ih kategorizirati u tri katekorije:

1. Materijali promijenjivog stanja - ponašaju kao vezivna sredstva nakon što dosegnu temperaturu topljenja, obično 45 – 62, na toj temperaturi njihova viskoznost se drastično poveća. Počinju teči kroz vezu i popunjavati praznine koje su bile prisutne. Cijeli proces zahtjeva nešto kompresivne sile koja stišće dvije površine i tjera materijal da teče kroz vezu. Termalni otpor veze može pasti do 0.06 C-cm2 /W
2. Polimerni spojni hibridi – ovi materijali sadrže lako topljivu metalnu leguru koja počinje teči na temperaturama oko 65 C i stvara vezu sa niskim termalnim otporom, otpor može pasti ispod 0.1 C-cm2 /W pri minimalnoj debljini veze
3. Termičke trake – mogu biti akrilne ili silicijske, uglavnom se koriste zbog svog mehaničkog svojstva lijepljenja, njihova toplinska vodlljivost je srednja pa im efikasnost ovisi o mogućnosti povezivanja dvije površine.

# Pasivno Hlađenje ili hlađenje toplinskim cijevima

Osnovna razlika između aktivnog i pasivnog hlađenja je u tome što pasivni sustavi koriste fizička svojstva metala da brzo odvode toplinu, koja se daljnjim strujanjem zraka izbacuje iz kućišta. Ovakvi sustavi rade na principu odvođenja topline sa grijanog tijela kroz metalne cijevi koje su zatvorne na vrhu. Toplina se prenosi na rebra samog heat sink-a, i dalje raznosi na okoliš. Toplinska provodljivost metala puno je bolja od one vode. Orginalna norma za desktop računala bila je ventilatorom hlađeni aluminijski odvodi topline, dok su danas značajke mnogih odvoda topline bakreno bazirane ploče ili su u cijelosti izgrađeni od bakra. Između izvora topline (chipset, procesor) i hladnjaka se nalazi Termalna pasta, koja proces prijenosa topline poboljšava svojim dobrim toplotno-provodnim karakteristikama. Osnovni zahtjevi ovakvog sustava je dobra provjetrenost kućišta, ili "zračni tunel", sa odgovarajućim hladnjakom koji uvlače svjež, a izbacuju topli zrak. Na *slici7* vidimo izvedbu pasivnog hladnjaka.

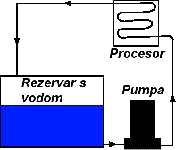


*Slika7*

Velika, a može se reći i najveća prednost pasivnog hlađenja je razina buke, koja praktično ne postoji, jer nema pokretnih dijelova. Ono što je kod ovakvog sustava loše je nizak nivo rasipanja topline, masa hladnjaka koji služi kao tijelo za prijenos topline, i potreba za konstantnim protokom zraka kroz kućište. Pasivno hlađenje ne može se koristiti za toplinske izvore koji generiraju više temperature, zbog svog sporog odvođenja topline. Jedan od načina za poboljšanje pasivnog hlađenja je poliranje baze hladnjaka vodenim brus papirom visokog stupnja granulacije, a kasnije i polir pasta visoke kvalitete. Poliranje baze, a i samog grijanog tijela se dobiva veća površina prianjanja između njih, što ubrzava proces prenošenja topline uklanjanjem mikroskopskih nepravilnosti u izradi. Pasivni odvodi mogu se pronaći na starijim računalima,dijelovima koji se manje griju, te računala manje snage. Materijal koji se najčešće koristi za izradu hladnjaka je aluminij, zbog povoljnog odnosa težine, cijene i toplinske provodljivosti. Oni koji žele pasivno hlađenje dovesti na višu razinu se odlučuju za hladnjak izrađen od bakra, koji je mnogo bolji provodnik topline, ali je pritom teži, što u nekim slučajevima može biti problem. Moguće su i kombinacije prethodno navedenih varijanti, gdje se srž, ili srednji dio hladnjaka koji izravno liježe na izvor topline izrađuje od bakra i ima oblik uspravnog valjka, dok je ostatak tijela hladnjaka izrađen od aluminija. Najčešća mjesta za upotrebu pasivnog hlađenja su chipset, RAM i grafičke kartice niže klase, ali postoje i pasivno hlađeni procesori, pa i napajanja.

# Hlađenje vodom

Bolna točka, odnosno mana zraka je njegova niska provodljivost topline što zahtjeva vrlo veliku površinu rebara i vrlo jako strujanje zraka da bi se dovoljno efikasno mogla provesti odvođenje topline. Zrak koji ventilator uzima je direktno zrak iz kućišta pa su performanse takvog hlađenja uvelike uvjetovane temperaturom okoline. Voda zbog svoje gustoće i specifičnog zagrijavanja i svoje sposobnosti da absorbira toplinu kroz sistem hlađenja je 3500 puta veća nego kod zraka. Prenošenje topline vode radi na sličnom principu kao zračno, samo što je sam postupak drastično drugačiji. Prednost takvog sistema je što voda kao termičko provodljivo sredstvo puno bolje provodi toplinu od zraka, izmjena topline ne mora biti striktno blizu procesora, čime se uvelike povećava efikasnost odvođenja topline.



*slika8*

Na slici je shematski prikazano strujanje vode od rezervara preko pumpe do procesora i natrag do rezervara. Rezervar i pumpa se nalaze izvan kućišta što uklanja utjecaj toplog zraka iz kućišta na temperaturu vode. To je jedan zatvoreni sustav koji nema kontakt s okolinom. Po mogućnosti se još može dodati rashlađivanje vode što bi smanjilo temperaturu vode, a time i samog procesora. Montirao bi se na vodovodne cijevi, po mogućnosti između pumpe i procesora, a izgledalo bi kao na slici. To je namotana cijev od bakra koja je pričvršćena direktno na ventilator. Strujanjem zraka između jedne i druge cijevi se odvodi toplina s vode. Još bolji (ali kompliciraniji) sistem hlađenja vode bi bio sistem hladnjaka.Cijevi su gusto naredane jedan do druge, a prolaze kroz rebra ili gustu mrežu. Na taj se način povećava efektivna površina cijevi i uz dostatno jak ventilator se može postići mnogostruko niža temperatura vode*.* Mane ovakvog načina hlađenja su kompliciranost, cijena i sigurnost takvog sustava. Takav sustav zahtjeva dodatni prostor do kompjutera (iako ne mora biti blizu), a i dvije cijevi koje idu iz kompjutera nisu dobrodošle. Sama ideja o vodi u kompjuteru povlači za sobom i pomisao o mogućem puštanju vode, što je moguće i ovisi o kvaliteti izrade. Voda je veliki neprijatelj elektronici i jedino kako bi se moglo zaštititi od sličnih problema je; 1) izrada vrlo sigurnog i dobro testiranog sustava vodenog hlađenja; 2) korištenje 10% specijalne emulzije ulja koja osim što sprječava koroziju i ne provodi struju bolje pristaje uz površine i povećava toplinsku provodljivost do 15%. Cijena takvog sistema isto nije zanemariva.

1. **AHLS (Active Liquid Heat Sink)**

Novi dizajn napravljen da bi pojednostavio prethodni te otklonio vanjsku pumpu tipičnog vodenog sistema hlađenja. Sastavljen je od tekućine za hlađenje, pumpe, ventilatora i radiatora. Glavni koncept sistema je da heat sink aktivno pumpa tekućinu, bez pomoći pumpe. Novi dizajn integrira pumpu što eleiminira potrebu za kućištem pumpe. To smanjuje dimenzije sustava za hlađenje. Okretna sila motora ventilatora je transmitiran do propela preko magnetske spojke, što znači da nije potreban dodatni motor da bi se pokrenula tekućina za hlađenje. Na slici 9 vidimo klasično vodeno hlađenje(lijevo) i active liquid heat sink tehnologiju(desno).



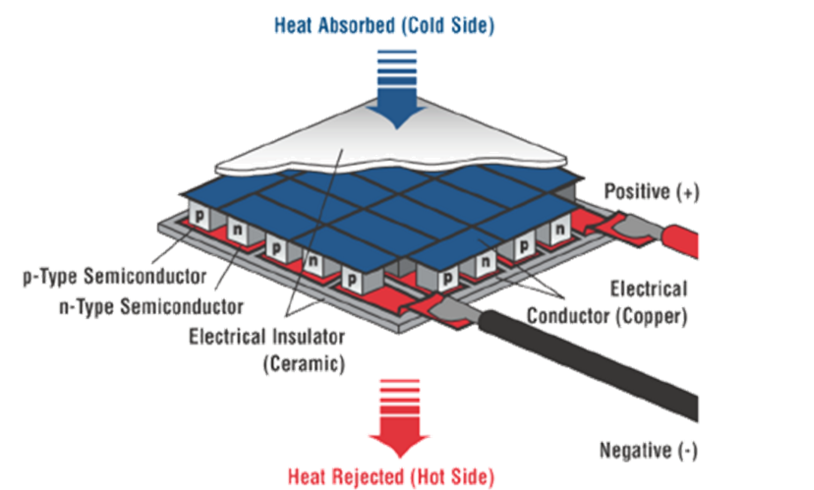
*slika9*

Sva ranija navedena poboljšanja smanjuju cijenu i rizičnost ovakvog sistema.

# Termoelektrično hlađenje

Promjenom polariteta napona mijenja se i tok struje. Posljedica je hlađenje u točki B i zagrijavanje u točki A. Ovu pojavu prvi je opisao francuski fizičar Jean Peltier pa se po njemu zove Peltierov efekt što je osnovni princip termoelektričnog hlađenja procesora.

Termoelektrični hladnjak je koji se temelji na jednom fizikalnom svojstvu; ako se pusti struja kroz 2 različita povezana modula tada će metali reagirati tako da će početi "prebacivati" toplinu s jednog modula na drugi. Zbog toga dolazi i naziv termička pumpa. Prolaskom struje dolazi do translatiranja topline s jedne plohe na drugu, čime jedna postane hladna, a druga, topla. Idealni hladnjak za odvođenje disipirane topline modula trebao bi biti sposoban apsorbirati neograničenu količinu topline, a da se njegova temperatura ne poveća. Kako to nije moguće u stvarnosti, kod projektiranja treba odabrati hladnjak koji će imati što manji porast temperature tijekom rada uređaja. Za većinu primjena prihvatljiv je porast temperature pasivnog hladnjaka 5 do 10°C iznad temperature okoline. Na slici 12 je shematski prikazano termoelektrično hlađenje.



*Slika12*

Razlika temperature između jedne i druge plohe varira ovisno o modelu i jačini elementa, a doseže 60°C pa čak i više. No i topla strana zahtjeva hlađenje – najjednostavnije je staviti obično ili malo bolje zračno hlađenje na njega. Na slici 12 vidimo implementaciju termoelektričnog hlađenja u kombinaciji sa pasivnim hlađenjem. Za još veće iskorištavanje takvog sistema je potrebno bolje hlađenje strane koja preuzima toplinu, jer što se bolje ohladi, to će više hladiti procesor (zbog fiksne temperaturne razlike koju on proizvodi), bolje rješenje je hlađenje vodom (odnosno emulzijom). Termoelektrični moduli zbog svoje izvedbe spadaju u visoko pouzdane komponente. Postoji mnogo primjera korištenja termomodula dvadeset i više godina. Njihov «životni vijek» često nadmašuje trajanje pridružene opreme. Pouzdanost, vijek trajanja i kvarovi termomodula puno ovise o konkretnoj primjeni. Moduli imaju relativno veliku mehaničku čvrstoću na pritisak, ali malu posmičnu čvrstoću. Ne smiju služiti u sustavu za glavnu mehaničku potporu. U primjenama gdje su prisutne ozbiljne vibracije i mehanički šokovi, modul se instalira opterećenjem na pritisak, tj. pričvršćuje stezanjem. Pri tome pritisak mora biti dovoljan da ga bočne i poprečne sile ne pomaknu ili olabave. Slaba pritegnutost kod više modula grupiranih u jednu cjelinu za hlađenje smanjuje toplinsko djelovanje i ubrzava kvarove. Najveća prednost termomodula je da rade na električnom principu bez pokretnih dijelova što značajno pojednostavljuje održavanje. Ne stvaraju buku ni električni šum tijekom pa se mogu koristiti zajedno s osjetljivim elektroničkim senzorima. U usporedbi s mehaničkim sustavima hlađenja mnogo su manji i lakši te iste snage, a u radu ne koriste nikakve kemikalije ili plinove koji mogu biti štetni za okolinu.

# Budući trendovi 2D mikrokanalno hlađenje

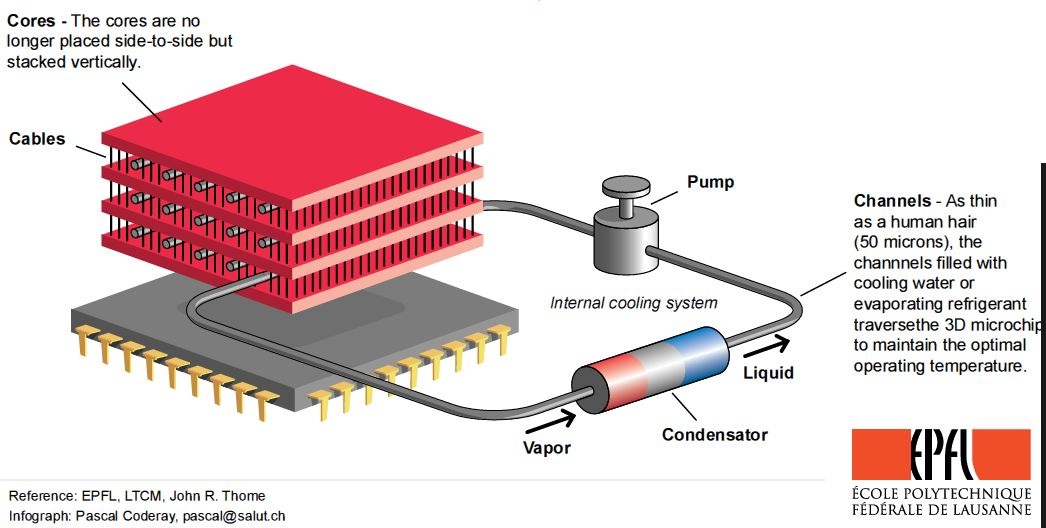
Niti jedan od rezultata današnjih sustava ne uspijeva hladiti do 7.9W/mm2  (limit mikrokanalnog hlađenja), barem do 16nm tehnologije čvora. To čini 2D mikrokanalnu tehnologiju izvodljivom opcijom hlađenja za buduće čipove visokih performansi.

Ako mikrokanalno hlađenje postane praktično i dosegne točku ekonomičnosti, bit će sposobno za masovno tržiste sustava, a evolucijska skala trenutnog arhitekturskog pristupa (u osnovi duplanje generalne namjene jezgri i zadržavanje iste mikroarhitekture) postaje izvodljiva. U slučaju da 2D nedosgne tu točku, limit zračnog hlađenja uvjetuje nas na izdvajanje veće učinkovitosti iz ahitekture koristeći specijalizirane jezgre (npr. grafički procesori i drugi specijalizirani "coprocesori" mogu biti bolje energetske učinkovitosti,tj. performanse po watt-u), što nas dovodi do veće heterogenosti arhitekture. Također je moguće ugraditi DRAM na isti čip zbog smanjivanja uzaludno potrošene snage ili ići na 3D integraciju zbog istih razloga. Ako je tako, nikad neće biti dovoljno tržišta da 2D mikrokanal postane mainstream.

Ostala ograničenja mikrokanalnog hlađenja za velike 2D čipove je u neefikasnosti u pumpanju tekućine za hlađenje u duže mikrokanale. Eksperimentalni rezultati pokazuju da veći čipovi značajno smanjuju efikasnost mikrokanalnog hlađenja[15] To može zahtijevati promjenu na 3D čipove i posljedično 3D mikrokanalno hlađenje.

# Budući trendovi 3D mikrokanalno hladenje

3D mikrokanalno hlađenje čini se kao mogućnost koja riješava termalni problem u budućim visoko-performansnim multiprocesorima, ako ova tehnologija sazrije u bliskoj budućnosti. Jednom kada krenemo u pravcu 3D-a, mikrokanalno hlađenje može postati sposobno, zbog puno većeg problema u hlađenju i više slojeva u koje možemo staviti kanale. Zapravo, mikrokanalno hlađenje može biti preduvjet implementiranje 3D čipova s više od samo dva sloja, koliko imaju oni danas. Mogućnost paralelnih "staza" za hlađenje u 3D mikrokanalnom hlađenju među slojevima silicija čini TDP 3D čipa gotovo linearno proporcionalan broju slojeva, što znači odličnu skalabilnost performansi. Međutim, s 3D mikrokanalnim hlađenjem, mikrokanali mogu zakomplicirati proces proizvodnje i zauzimati dragocjeni prostor na čipu. Također, ako je mikrokanalno hlađenje dovoljno efikasno, moguće je da će se arhitektura čipa vratiti osnovnoj namjeni. Na slici13 je prikazan model 3d mikrokanalnog hlađenja sa 3 sloja popunjena kanalima debljine vlasi kose.



*slika13*

9.Budući trendovi HydroTherm

Termoelektrična rješenja na mnogo načina ne iskorištavaju sve mogućnosti termoelektrične tehnologije. Površina procesosrskog čipa je obično do 7 puta manja od površine termoelektričnog modula. Korištenje većih površina kako bi se situacija poboljšala je ograničeno otporom vodljivosti matrijala veće površine. Ideja za rješavanje tog problema je da termoelektrični hladnjak hladi tekućinu koja se ohlađena dovodi na mikroprocesorski čip. Jezgra ovog sistema su skup termoelektričnih modula koji bi radili na svom maksimumu te bi koristile mikrokanale za provođenje vode. Za razliku od današnje implementacije termoelektričnog sistema HydroTherm bi mogao hladiti 180 watni procesor u ambientu od 25 C pri potrošnji energije 220 W. Drugim rječima za manje energije bi mogao hladiti duplo topliji procesor.