



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

*Tietotekniikan koulutusohjelma*

**SAMPSA KURRI**

**MIKROPROSESSORIN YLIKELLOTTAMINEN**

Diplomityö

Tarkastajat: Professori Pekka Loula  
ja professori Tarmo Lipping  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja Sähkötekniikan  
tiedekunnan tiedekuntaneuvoston  
kokouksessa 9. joulukuuta 2009

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tietotekniikan koulutusohjelma

**KURRI, SAMPSA:** Mikroprosessorin ylikellottaminen

Diplomityö, 67 sivua, 3 liitesivua

Huhtikuu 2010

Pääaine: Tietoliikennetekniikka

Tarkastajat: Professori Pekka Loula ja professori Tarmo Lipping

Avainsanat: Mikroprosessori, ylikellottaminen, kellotaajuus, lämpötila, käyttöjännite, jäähdytys, pii, integroitu piiri, transistori

Mikroprosessorin ylikellottaminen tarkoittaa sen asettamista toimimaan yli valmistajan tehtaalla määrittämän vakiokellotaajuuden, minkä ansiosta tietokoneen suorituskyky paranee. Vaikka mikroprosessorin piisirun valmistusmenetelmä on hyvin tarkka, rakentuu se useista miljoonista transistoreista ja niihin syntyy valmistuksen yhteydessä pieniä eroja. Valmistaja testaa ja määrittää piisiruille huolellisesti sellaisen kellotaajuuden, jolla mikroprosessori toimii määritellyissä olosuhteissa 100 % varmuudella. Tämä mahdollistaa myös ylikellottamisen, sillä valmistajan mikroprosessorille määrittelemä kellotaajuus ei ole teknisin perustein valittu maksimi, vaan se on suositus ylärajasta.

Tässä diplomityössä tutustutaan mikroprosessorin historiaan, toimintaan ja valmistukseen sekä selvitetään ylikellottamiseen liittyvät tekijät, toimenpiteet ja riskit. Diplomityöni käytännön mittauksissa selvitän, kuinka mikroprosessorin kellotaajuus skaalautuu korkeammalle ja sen myötä suorituskyky paranee, kun käyttöjännitettä korotetaan yli valmistajan määrittelemän jännitealueen ja toimintalämpötila lasketaan nestemäisen tyypin avulla 20 celsiusasteesta kryogeeniseen -170 celsiusasteeseen.

Mittausten yhteenvetona voidaan todeta, että tutkitun mikroprosessorin kellotaajuutta pystyttiin nostamaan vakiokellotaajuuteen nähden käyttöjännitettä korottamalla ja mikroprosessorin lämpötilaa laskemalla yli 50 % ja samalla suorituskyky parani testeissä käytetyssä Cinebench R10 -testiohjelmassa 35 %. Suorituskyvyn parantaminen kiinnostaa hintatietoisten kuluttajien lisäksi myös mikroprosessorivalmistajia, jotka ovat vuosien varrella julkaisseet markkinoille ylikellottamisen mahdollistavia mikroprosessorimalleja ja kehittäneet mikroprosessorin kellotaajuuden automaattista korottamista hyödyntäviä teknologioita, jotka parantavat sen suorituskykyä.

Diplomityön ylikellottamisen teoriaosaa tukee teknillinen ja tieteellinen kirjallisuus sekä valmistajien julkaisemat tuotetiedot ja spesifikaatiot. Mittauksissa ja niiden valmisteluissa käytettiin hyväksi omaa vuosien varrella keräämääni henkilökohtaista kokemusta mikroprosessorien ylikellottamisesta ja suorita työni kautta hankittuja kontakteja mikroprosessorivalmistajien Intelin ja AMD:n työntekijöihin.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

**KURRI, SAMPSA:** Overclocking of the microprocessor

Master of Science Thesis, 67 pages, 3 appendix pages

April 2010

Major: Telecommunication

Examiners: Professor Pekka Loula and Professor Tarmo Lipping

Keywords: Microprocessor, overclocking, clock frequency, temperature, operating voltage, cooling, silicon, integrated circuit, transistor

The overclocking of the microprocessor means adjusting it to operate over the default operating clock frequency that the manufacturer has specified at the production plant in order to improve the performance of the computer. Although the manufacturing process of the microprocessor is very precise, the microprocessor consists of millions of transistors which are prone to tiny differences from each other during the production. Manufacturers test and determine the operating frequency to every silicon chip so that the microprocessor will operate under the specification with 100 % reliability. This allows overclocking of the microprocessor since the operating clock frequency is not defined by technical limits but it is a recommendation of the maximum limit.

In this thesis the history, the functioning and the manufacturing of the microprocessor will be looked into more closely and the factors and risks of overclocking will be clarified. In the practical tests of my thesis I present how the microprocessor's operating clock frequency will scale higher and the performance improve when the operating voltage will be raised over the manufacturer's recommendation and the operating temperature will be lowered from 20 Celsius degrees to cryogenic -170 Celsius degrees with liquid nitrogen.

As a conclusion of the tests performed, the operating clock frequency of the studied microprocessor was raised over 50 % under certain conditions which resulted in an improvement of the microprocessor's performance by 35 % in the Cinebench R10 benchmark. In addition to price-conscious consumers, improving microprocessor's performance is an interesting topic also for the manufacturers who have in the recent years released on the market microprocessor models allowing overclocking and developed technologies that make the operating frequency automatically higher to achieve better performance.

In the thesis the theory part concerning of the overclocking is supported by technical and scientific studies as well as manufacturer's datasheets and specifications. The vast knowledge that I have of overclocking and the contacts from Intel and AMD that I have made through work were taken into use in the preparations and the performed tests of my thesis.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty kiihtyvässä tahdissa kesän 2007 ja kevään 2010 välisenä aikana työskennellessäni samanaikaisesti omassa yrityksessäni. Työn tavoitteena oli perehtyä mikroprosessorin ylikellottamiseen pintaa syvemmillä teoriatasolla ja suorittaa käytännön mittauksia mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautumisesta käyttöjännitettä korottamalla ja toimintalämpötilaa laskemalla. Työn ohessa tarkoituksena oli opiskella fysiikan ja elektroniikan lainalaisuuksia tutkimalla monimutkaisen hiekasta satojen miljoonien transistorien piisiruksi työstettävän mikroprosessorin toimintaa ja rakennetta. Työn tekeminen oli mielenkiintoinen, opettava ja ajallisesti pitkä kokemus, jonka aikana opin paljon työn aiheen taustoista ja itsestäni.

Haluan kiittää työn ohjaajina toimineita professoreita Pekka Loulaa ja Tarmo Lippingiä rakentavasta ja perusteellisesta palautteesta sekä arvokkaista kommentteista, joiden ansiosta työstä muodostui ehjä ja looginen kokonaisuus.

Suuret kiitokset myös perheelleni ja ystävilleni, jotka ovat aina tukeneet minua henkilökohtaisissa haasteissani. Haluan erityisesti kiittää aviovaimoani Anu Kurria, jonka tuki ja ymmärrys työn valmistuessa vuosien varrella olivat äärimmäisen tärkeitä. Haluan myös erikseen kiittää edesmennyttä isoisääni, opetusneuvos Väinö Kinnusta, joka kannusti ja innoitti minua suorittamaan peruskoulun jälkeen tietotekniikan perustutkinnon Kokemäen jokilaakson ammattiopistossa Ulvilan toimipisteessä, ylioppilastutkinnon Ulvilan lukiossa ja diplomi-insinöörin tutkinnon Tampereen Teknillisen Korkeakoulun Porin yksikössä.

Porissa 20.4.2010

Sampsa Kurri

# SISÄLLYS

1.	Johdanto .....	1
2.	Mikroprosessori .....	2
2.1.	Maailman ensimmäinen integroitu puolijohdepiiri .....	2
2.2.	Mikroprosessorin historia.....	2
2.3.	Mooren laki .....	5
2.4.	Mikroprosessorin kellotaajuus ja toiminta.....	6
2.5.	Mikroprosessorin suorituskyky .....	9
2.5.1.	Standard Performance Evaluation Corporation .....	10
2.6.	Mikroprosessorin suunnittelu ja valmistus.....	12
3.	Mikroprosessorin ylikellottaminen .....	21
3.1.	Teoria .....	21
3.2.	Kellotaajuuden korottaminen .....	22
3.3.	Lämpötila .....	22
3.4.	Mikroprosessorin lämmöntuotto ja jäähdytys.....	23
3.5.	Käyttöjännite .....	31
3.6.	Kellotaajuuden, käyttöjännitteen ja lämpötilan välinen suhde .....	32
3.7.	Ylikellottamisen riskit ja ongelmat .....	34
4.	Ylikellotustestit .....	36
4.1.	Testikokoonpano .....	37
4.2.	Testikonfiguraatio .....	39
4.3.	Mittaukset.....	46
4.3.1.	Skaalautuminen käyttöjännitteen suhteen.....	47
4.3.2.	Skaalautuminen lämpötilan suhteen .....	48
4.3.3.	Skaalautuminen käyttöjännitteen ja lämpötilan suhteen.....	49
4.4.	Mittaustulosten yhteenveto .....	50
5.	Ylikellottaminen ja kaupallisuus.....	52
5.1.	Ylikellottaminen kuluttajan näkökulmasta .....	52
5.2.	Ylikellottaminen valmistajan näkökulmasta .....	53
5.2.1.	Intelin Extreme Edition -mallisto .....	54
5.2.2.	Intelin Turbo Boost -teknologia.....	55
5.2.3.	AMD:n Athlon 64 FX- ja Black Edition -mallistot .....	57
6.	Yhteenveto .....	58
	Lähteet.....	60

Liite 1: Kellotaajuuden skaalautuminen käyttöjännitteen suhteen.....	68
Liite 2: Kellotaajuuden skaalautuminen Tc-lämpötilan suhteen.....	69
Liite 3: Suorituskyvyn skaalautuminen kellotaajuuden suhteen .....	70

## LYHENTEET, TERMIT JA NIIDEN SELITYKSET

<b>AMD</b>	Advanced Micro Devices. Yhdysvaltalainen mikroprosessorivalmistaja.
<b>BIOS</b>	Basic Input-Output System. Tietokoneohjelma, joka lataa käyttöjärjestelmän ja kommunikoinnin laitteiston kanssa.
<b>BCLK</b>	Base Clock. Intelin Core i3-, i5- ja i7-mikroprosessoreissa käyttämä 133 MHz:n peruskello.
<b>CADC</b>	The Central Air Data Computer.
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor. P- ja n-kanavaisia MOSFET-transistoreita yhdistettynä samaan piirisuunnitteluun.
<b>CPU</b>	Central Processing Unit. Mikroprosessorin laskennallinen ydin.
<b>CVD</b>	Chemical Vapor Deposition. Teollisuudessa käytettävä kemiallinen kaasufaasipinnoitusmenetelmä, jota käytetään synteettisten timanttien valmistuksessa.
<b>DDR3</b>	Double Data Rate 3. Kolmannen sukupolven DDR-muististandardi.
<b>DEC</b>	Digital Equipment Corporation.
<b>DIP</b>	Dual in-line package. Piirilevyllä käytettävien mikrokytkimien pakkaustyyppi, jossa on kaksi riviä liitäntäpinnejä.
<b>EGS</b>	Electric Grade Silicon. Puhdistettua piitä, joka soveltuu puolijohteiden valmistukseen.
<b>FLOPS</b>	Floating point Operations per Second. Liukulukulaskuja sekunnissa.
<b>GHz</b>	Gigahertsi.

<b>HDL</b>	Hardware Description Language. Laitteiston kuvauskieli, tekstimuotoinen tapa kuvata integroitu piiri.
<b>IBM</b>	International Business Machines.
<b>IPC</b>	Instructions Per Clock. Käskyjä per kellojakso.
<b>KHz</b>	Kilohertsi.
<b>MGS</b>	Metallurgical Grade Silicon. Noin 98-99 % puhdas metallurginen eli raakapii.
<b>MHz</b>	Megahertsi.
<b>MOSFET</b>	Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor. Transistorityyppi.
<b>PCU</b>	Power Control Unit. Intelin Nehalem-arkkitehtuurin mikroprosessorihin integroitu ohjausmikrokontrolleri.
<b>PC</b>	Personal Computer. Henkilökohtainen työpöytätietokone.
<b>PLL</b>	Phase-Locked Loop. Vaihelukittu silmukkapiiri.
<b><math>\text{SiHCl}_3</math></b>	Piikloroformi eli trikloorisilaani.
<b>SPEC</b>	Standard Performance Evaluation Corporation. Tietokoneiden nopeustestiohjelmiä tuottava järjestö.
<b>TDP</b>	Thermal Design Power. Valmistajan ilmoittama maksimi wattimäärä, jonka jäähdytysratkaisun on kyettävä haihduttamaan mikroprosessorilta
<b><math>V_{\text{core}}</math></b>	Mikroprosessorille syötettävä käyttöjännite.
<b>VRM</b>	Voltage Regulator Module. Mikroprosessorin virransyöttömoduuli emolevyllä.
<b>VLSI</b>	Very-Large-Scale-Integration.
<b>G</b>	Tilavuusvirtausnopeus
<b><i>m</i></b>	Massavirtausnopeus

<b>P</b>	Ilmanpaine
<b>HP</b>	Tuulettimen moottorin tehonkulutus
<b>K</b>	Tuulettimen ominaisuuksista riippuva verrannollinen järjestelmävakio
<b>N</b>	Tuulettimen kierrosnopeus minuutissa
<b>D</b>	Tuulettimen halkaisija
$\rho$	Ilman tiheys
$\mu_n$	Varauksen kuljettajien liikkuvuus
<b>W</b>	Hilan leveys
<b>L</b>	Hilan pituus
<b>C<sub>ox</sub></b>	Hilaoksidin kapasitanssi per yksikköala
<b>V<sub>gs</sub></b>	Transistorin käyttöjännite
<b>V<sub>th</sub></b>	Transistorin kynnysjännite
<b>V<sub>ds</sub></b>	Transistorin nielun ja lähteen välinen jännite
$\Delta T$	Lämpötilaero
<b>A<sub>e</sub></b>	Reaktion taajuustekijä
<b>E<sub>a</sub></b>	Reaktion aktivoitumisenergia
<b>K</b>	Boltzmannin vakio
<b>T</b>	Juoteliitosten lämpötila kelvineissä

# 1. JOHDANTO

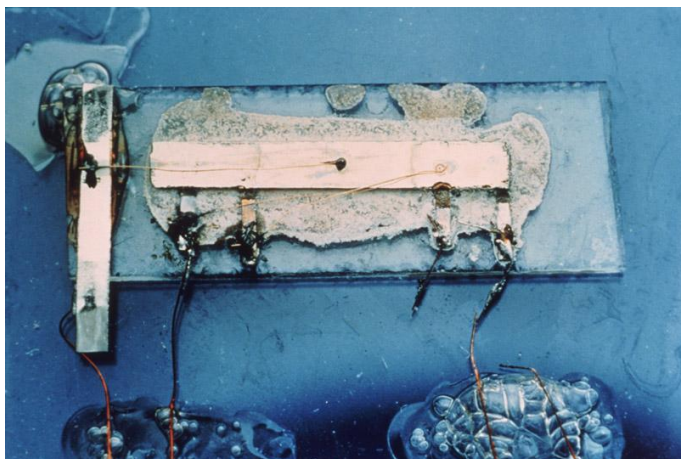
Mikroprosessorien tai muiden piipohjaisten puolijohdepiirien kellotaajuuden korottamista kutsutaan ylikellottamiseksi. Vaikka yleisesti oletetaan, että kyseessä ovat vain innokkaimpien harrastajien kotioloissaan suorittamat kokeilut, suuret valmistajat ovat panostaneet ylikellotusominaisuuksien kehittämiseen huomattavia voimavaroja jo vuosikymmenen ajan. Tuotekehityksen lisäksi maailmalla järjestetään ylikellotuskilpailuja, joiden palkinnot voivat olla useita tuhansia euroja.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka mikroprosessorin kellotaajuutta pystytään nostamaan yli valmistajan asettaman arvon jäähdytystä parantamalla ja/tai käyttöjännitettä korottamalla. Tutkimushypoteesinani on, että mitä kylmemmäksi mikroprosessorin piisiru saadaan jäähdytettyä ja korkeammaksi käyttöjännitettä korotettua tiettyihin pisteisiin asti, sitä korkeammalla kellotaajuudella se kykenee toimimaan. Tutkimusaineistonani käytän valmistajien julkaisemia tuotetietoja, työtä varten tehtyjä mittaustuloksia ja aihetta tukevaa teknillistä ja tieteellistä kirjallisuutta.

Johdannon jälkeen toisessa luvussa käsittelen mikroprosessorin historiaa ja perusominaisuuksia yleisellä tasolla sekä käyn läpi rakenteeseen, valmistukseen, toimintaan ja suorituskykyyn liittyviä asioita ja yksityiskohtia. Kolmannessa luvussa keskityn ylikellottamiseen teoriatasolla sekä käyn läpi siihen liittyviä asioita ja niiden soveltamista ylikellottamisprosessiin. Neljännessä luvussa esitän käytännön testien tuloksia Advanced Micro Devicesin (AMD) valmistamalla Phenom II X4 965 Black Edition -mallisella mikroprosessorilla ja tutkin, kuinka mikroprosessorin kellotaajuutta saadaan nostettua, kun piisirun lämpötila lasketaan mikroprosessorin pinnasta mitattuna 20 celsiusasteesta kryogeeniseen -170 celsiusasteeseen ja käyttöjännitettä korotetaan 1,345 voltista 1,592 volttiin. Viides luku käsittelee ylikellottamisen hyötyä kuluttajalle ja siihen liittyvää kaupallisuutta mikroprosessorivalmistajien näkökulmasta.

## 2. MIKROPROSESSORI

### 2.1. Maailman ensimmäinen integroitu puolijohdepiiri



*Kuva 2.1. Jack Kilbyn kehittämä maailman ensimmäinen integroitu piiri [1].*

Jack Kilby kehitti vuonna 1958 germaniumkiteeseen perustuneen integroidun piirin (kuva 2.1.), johon hän oli liittänyt viisi komponenttia ja liimannut ne lasipalaselke. Kun Kilby liitti luomuksensa oskilloskooppiin ja painoi nappia, seurauksena oli päättymätön sinikäyrä oskilloskoopin näytöllä. Kilby oli kehittänyt maailman ensimmäisen toimivan integroidun puolijohdepiirin ja patentoi sen nimiinsä seuraavana vuonna [2]. Vuonna 2000 Kilby palkittiin keksinnöstään fysiikan Nobelin palkinnolla [3].

### 2.2. Mikroprosessorin historia

Mikroprosessori on tietokoneen tärkein osa ja sitä kutsutaan myös keskusyksiköksi (CPU, Central Processing Unit). Sen tehtävä on yksinkertaistettuna lukea keskusmuistiin tallennettua ohjelmaa ja suorittaa ohjelmassa määrättyt toimenpiteet. Suurimman osan ajasta mikroprosessori lukee tietoa keskusmuistista, joka on suoritettavan ohjelman lukua. Lisäksi mikroprosessori lukee tietoa liitäntäpiireistä sekä kirjoittaa sitä muistiin ja liitäntäpiireihin. Tämä johtuu vastaavasti niistä toimenpiteistä, jotka muistiin tallennetussa ohjelmassa on käsketty suorittaa. Mikroprosessori suorittaa kaikki aritmeettis-loogiset toimenpiteet, kuten laskutoimitukset ja lukujen vertailut.



*Kuva 2.2. Intelin 4004-mikroprosessori [4].*

Yksi maailman ensimmäisistä kaupallisista mikroprosessoreista oli Intelin 15. marraskuuta 1971 julkaisema, yrityksen insinööri Federico Fagginin kehittämä yhden piirin nelibittinen Intel 4004 (kuva 2.2.). Samaan aikaan 1970-luvun alussa myös Texas Instruments kehitti omaa nelibittistä TMS 1000 -mikroprosessoriaan, mutta se tuli aluksi markkinoille ainoastaan yrityksen omissa taskulaskinmalleissa. Garrett AiResearch suunnitteli ja kehitti vuosina 1968–1970 useamman piirin The Central Air Data Computer -järjestelmää (CADC), jota käytettiin Yhdysvaltojen merivoimien F-14 Tomcat hävittäjälentokoneen lennonohjauksessa. CADC:n suunnitteluryhmän jäsen Ray Holt yritti julkaista piirisarjan suunnitelmat *Computer Design* -lehdessä, mutta merivoimat kielsivät paperin julkaisun kansalliseen salaisuuteen vedoten.

Intel jatkoi kaupallisten mikroprosessorien kehitystä heti seuraavana vuonna lanseeraamalla kahdeksanbittisen 8008-mallin ja jatkoi parantamalla suorituskykyä ja ominaisuuksia edelleen 8080- ja 8085-malleilla. 1970-luvun puolivälissä mikroprosessorimarkkinoille pyrkivät myös muun muassa RCA, International Business Machines (IBM), Motorola, Advanced Micro Devices (AMD) ja Fairchild. Motorolan julkaistua vuonna 1975 Moto 6800 -piirin, suunnittelutiimi erosi ja perusti oman MOS Technology -yrityksen. Yritys suunnitteli pikaisesti MOS 6502 -mikroprosessorin ja myi sitä 25 dollarin hinnalla, kun Intelin 8080- ja Motorolan 6800-mikroprosessorien hinta oli 179 dollaria. Aggressiivinen hinnoittelu pakotti Intelin ja Motorolan laskemaan piiriensä hinnan 79 dollariin, mutta MOS 6502 -mikroprosessori sai sen myötä uskottavuutta ja on käytössä esimerkiksi Apple II- sekä useissa Commodore- ja Atari-tietokoneissa. AMD:n alkuperäinen bisnesidea ei ollut luoda omia tuotteita, vaan valmistaa olemassa olevia tuotteita lisenssien alaisuudessa ja vuonna 1975 se alkoi myydä klooneja Intelin 8080-mikroprosessorista.

16-bittisiä mikroprosessoreita oli vuonna 1975 julkaisemassa Digital Equipment Corporation (DEC) ja Fairchild Semiconductor, joiden ratkaisut koostuivat kuitenkin useammasta piiristä. Vuonna 1976 Texas Instruments julkaisi ensimmäisen 16-bittisen yhden piirin TMS 9900 -mikroprosessorin. Vuonna 1978 Intel pyrki jättämään kilpailijat taakseen siirtymällä 16-bittiseen prosessoriin julkistamalla x86-

arkkitehtuuriin perustuvan 8086-mallin, jolloin kaikki muut mikrotietokoneen komponentit, kuten muistit ja liitäntäpiirit olivat kuitenkin vielä kahdeksanbittisiä. Siksi Intel julkaisi seuraavana vuonna 8088-prosessorin, joka oli sisäisesti 16-bittinen, mutta sen ulkoinen tietoväylä on 8-bittinen. 8086 on hieman nopeampi, sillä se pystyy hakemaan 16-bittisen tiedon yhdellä kellojaksolla, kun 8088-prosessorilta siihen kuluu kaksi kellojaksoa. Molempien prosessoreiden osoiteväylä on 20-bittinen, joten niiden muistiavaruus on yhden megatavun suuruinen. Inteliltä eronnut Federico Faggin suunnitteli ja julkaisi vuonna 1976 kahdeksanbittisen Zilog Z-80 -mikroprosessorin ja vuonna 1979 16-bittisen Z8000-mallin, jotka tulivat suosituiksi muistirajapintansa ansiosta. Prosessorin tuottamat muistin virkistysignaalit tarjosivat alhaisemmat järjestelmän kustannukset ja helpottivat suunnittelua. Mikroprosessoreiden historian hienoista hetkistä löytyy lisää tietoa ja yksityiskohtia esimerkiksi IBM:n kotisivujen teknisestä kirjastosta osoitteesta <http://www.ibm.com/developerworks/library/pa-microhist.html>. [4; 5]

X86-mikroprosessoreiden varsinainen menestystarina alkoi vuonna 1981, kun IBM julkaisi ensimmäisen Intelin 8088-mikroprosessorin perustuvan mikrotietokoneen (PC, Personal Computer). Vielä nykyisinkin PC:ksi kutsutaan tietokoneita, joissa käytetään x86-arkkitehtuuriin perustuvaa mikroprosessoria. Yhteisiä piirteitä x86-arkkitehtuurin mukaisissa prosessoreissa ovat peruskäskykanta, rekisterit ja segmentoitu muistiarkkitehtuuri. Suunnittelussa on ollut pääperiaatteena, että vanhemman sukupolven prosessorille kirjoitetut ohjelmat toimivat uudemmissakin prosessoreissa sellaisenaan. Ensimmäisessä PC:ssä oli vain 64 kilotavun keskusmuisti ja 5,25 tuuman levykeasema, jonka kapasiteetti oli 360 kilotavua. Kaksi vuotta myöhemmin julkaistuun päivitettyyn malliin oli lisätty 10 megatavun tallennuskapasiteetillinen kiintolevy. PC-mikrot ovat kehittyneet 30 vuodessa huimaa tahtia ja nykypäivän työpöytä-tietokoneissa keskusmuistia voi olla käytössä esimerkiksi 12 gigatavua ja kiintolevyjen koot mitataan teratavuissa. PC-tietokoneissa mikroprosessorit perustuvat edelleen x86-arkkitehtuuriin, mutta ne sisältävät suuren joukon uusia prosessorin toimintaa tehostavia ohjelmakäskyjä ja ominaisuuksia.

Kaksi suuremman luokan uudistusta x86-arkkitehtuuriin ovat olleet vuonna 1985 lanseerattujen Intel386-prosessoreiden myötä esitelty 32-bittiset rekisterit sekä AMD:n vuonna 2000 lanseeraama x86-64-laajennus, joka toi mukanaan tuen 64-bittisille rekistereille [6]. X86-64-laajennus nimettiin myöhemmin markkinointia varten AMD 64:ksi. Intel kehitti aluksi yhteistyössä Hewlett-Packardin kanssa omaa 64-bittistä IA-64-arkkitehtuuriaan, joka ei kuitenkaan ollut yhteensopiva 32-bittisen x86-arkkitehtuurin kanssa. IA-64-arkkitehtuuri on nykyisin käytössä Intelin Itanium-mikroprosessoreissa, mutta työpöytä-mikroprosessoreihin Intel lisensoi lopulta itselleen AMD:lta 64-bittisen laajennuksen, jota se kutsuu omissa prosessoreissaan Intel 64 - ominaisuudeksi.

Pienempiä uudistuksia x86-arkkitehtuuriin on nähty vuosien varrella useampia. Ensimmäinen uudistus oli Intelin vuonna 1982 julkaiseman 80286-mikroprosessorin yhteydessä esitelty suojattu tila, jonka 24-bittinen segmentin kantaosoite deskriptorilta

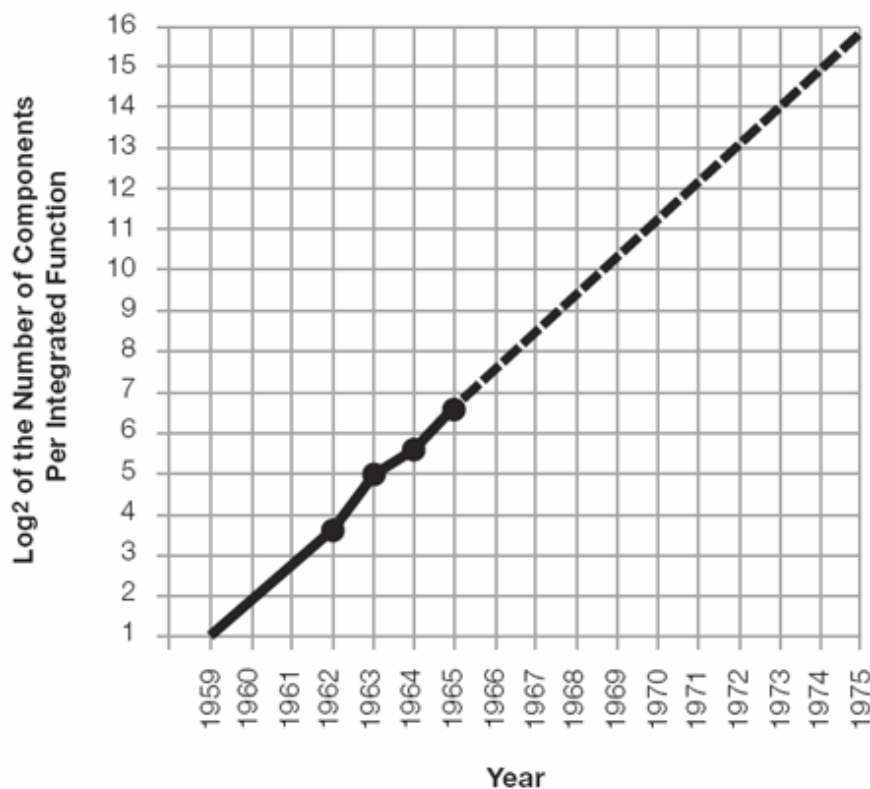
eli datatietueelta mahdollistaa keskusmuistin maksimikooksi 16 megatavuuta, tuen virtuaalimuistin hallinnalle ja tarjoaa suojatun muistin, joka estää ohjelmia korruptoimasta toisiaan. 386 oli yrityksen ensimmäinen 32-bittinen mikroprosessori, jonka myötä muistiavaruus kasvoi neljään gigatavuun, eikä segmentointia enää tarvinnut välttämättä käyttää. Tämä helpotti suurten ohjelmien ja modernien käyttöjärjestelmien kehittämistä merkittävästi. Intel486-mallin myötä matematiikkasuoritin integroitiin samaan piiriin perussuorittimen kanssa ja viisivaiheisen liukuhihnansa ansiosta se pystyi aloittamaan uusien käskyjen suorittamisen selvästi useammin kuin Intel386, jossa käskyjen välillä tarvittiin aina useampi kellojakso [7].

Vuonna 1993 Intel otti prosessorimalleissaan käyttöön Pentium-tuotemerkin ja unohti aiemmat numerosarjat. Pentiumien suurin uudistus oli toisen liukuhihnan lisääminen, minkä ansiosta u- ja v-liukuhihnat pystyivät yhdessä suorittamaan kaksi käskyä kellojaksossa. Pentiumien kehitys jatkui aina vuoteen 2004 asti ja uusissa malleissa esiteltiin uusia suorituskykyä parantavia käskykantoja, korkeampia kellotaajuuksia, suurempia välimuisteja ja optimointeja liukuhihnaan. Lopulta Intel keskeytti korkeampaan kellotaajuuteen perustuvan suunnitteluperiaatteen ja siihen perustuneen Netburst-arkkitehtuurin [8], sillä viimeisten Pentium 4 -mallien lämmöntuotto nousi yli 3,5 gigahertsin kellotaajuudella 115 wattiin [9] ja samaan aikaan suorituskyky ei enää pärjännyt AMD:n kilpaileville malleille. Ensimmäiset 64-bittiset työpöytä mikroprosessorit julkaisi markkinoille AMD vuonna 2003, kun se esitteli Athlon 64 -malliset mikroprosessorit. Niiden muistiavaruus kasvoi AMD 64 -laajennuksen ansiosta 32-bittisten prosessoreiden neljän gigatavun maksimista 16 teratavuun.

Vuodesta 2005 eteenpäin mikroprosessorivalmistajat ovat keskittyneet yhden ytimen mahdollisimman korkean kellotaajuuden ja suorituskyvyn sijaan lisäämään ytimiä suorittamaan tehtäviä rinnakkain, parantamaan suorituskykyä kellojaksoa kohti ja optimoimaan mikroprosessorin tehonkulutusta energiaystävällisempään suuntaan. Käyttöjärjestelmien ja ohjelmistojen kehittyessä tukemaan useampaa kuin yhtä säiettä, myös mikroprosessorin on kyettävä suorittamaan yhtäaikaisesti useampaa tehtävää.

### **2.3. Mooren laki**

1960-luvun puolivälissä Fairchild Semiconductorin tutkimus- ja kehityslaboratorion johtaja Gordon Moore teki Electronics-lehden 35-vuotisjuhlanumeroon kirjoittamassaan artikkelissaan ennustuksen, että komponenttien määrä kaksinkertaistuisi integroiduissa piireissä joka vuosi seuraavan kymmenen vuoden ajan (kuva 2.3.) [10]. Mooren ennustus osoittautui lähes paikkaansa pitäväksi ja sitä sovellettiin myös useisiin muihin puolijohdeteollisuuden kehitysennustuksiin. Mooren ennustus tuli vuosien varrella puolijohdeteollisuudessa niin tunnetuksi, että sitä alettiin kutsua lopulta Mooren laiksi.



Kuva 2.3. Mooren ennustus *Electronics*-lehden numerossa 8 vuonna 1965 [10].

Mooren kirjoittaessa artikkeliaan *Electronics Magazine* -lehteen, markkinoiden monimutkaisimmat integroidut piirit rakentuivat noin 30 transistorista ja vastuksesta. Moore työskenteli itse projektissa, jonka komponenttien lukumäärä oli 60 kappaletta. Kun Moore kirjoitti numerot paperille ja mietti, miten puolijohdeteollisuus oli kehittynyt Texas Instrumentsilla työskennelleen Jack Kilbyn vuonna 1958 esittelemästä maailman ensimmäisestä integroidusta piiristä, oli hänen yksinkertainen ennustukseensa vuosittain kaksinkertaistuvasta transistorimäärästä valmis.

10 vuotta myöhemmin vuonna 1975 Moore korjasi lakiaan ja määrittä transistoreiden lukumäärän kaksinkertaistuvan kahden vuoden välein [11]. Inteliä perustamassa ollut Moore ja hänen lakinsa olivat useiden vuosikymmenien ajan tärkeä osa Intelin kehitysstrategiaa ja yrityksen markkinointia puolijohdeteollisuuden kehityksessä aina 2000-luvulle asti [12]. Nykyisin Mooren lakia kunnioitetaan yhä tärkeänä osana puolijohdekehityksen historiaa, mutta sen soveltuvuudesta nykypäivän kehitystahtiin on kiistelty jo vuosien ajan. Tästä huolimatta Intel turvautuu yhä tuotteidensa markkinoinnissa nykyisin yrityksen hallituksen puhemiehenä toimivan Mooren lakiin [13].

## 2.4. Mikroprosessorin kellotaajuus ja toiminta

Mikroprosessorin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on kellotaajuus, jolla se toimii (kuva 2.4.). Kellotaajuus tarkoittaa sitä, kuinka monta kertaa mikroprosessorin piisirulle

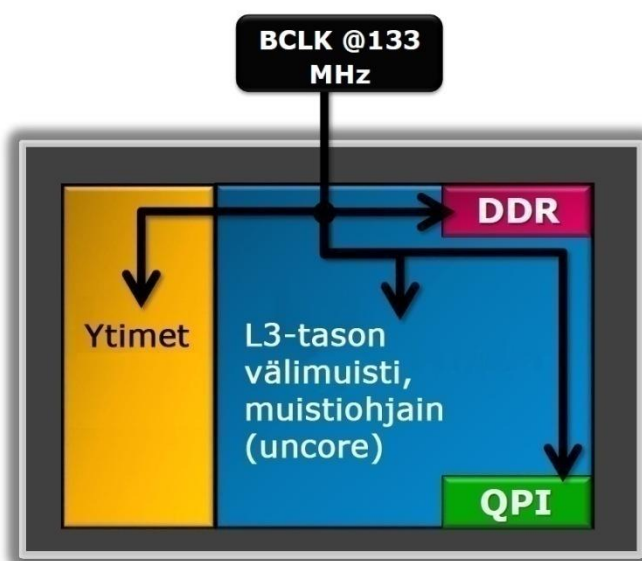
integroidut kytkiminä toimivat transistorit voivat vaihtaa tilaansa tietyssä ajanjaksossa. Mikroprosessorien kelloaajuuden perusyksikkö on hertsi (Hz), mutta jo lähes mikroprosessorien historian alusta alkaen nopeudet on ilmoitettu megahertseinä (MHz). Kappaleessa 2.1 esitelty Intelin 4004-mikroprosessori, joka suunniteltiin alun perin japanilaisen Busicomien taskulaskimiin, rakentui 2300 transistorista ja sen maksimikelloaajuus oli 740 kilohertsiä (kHz). Suunnitellussa 4004-mikroprosessorissa transistorit kykenivät vaihtamaan tilaansa 740 000 kertaa sekunnissa [14]. IBM:n vuonna 1981 julkaisemassa maailman ensimmäisessä PC-tietokoneessa käytetty Intelin 8088-mikroprosessori toimi 4,77 MHz:n kelloaajuudella. Vuonna 2000 prosessorivalmistajat Intel ja AMD esittelivät markkinoille ensimmäistä kertaa gigahertsin (GHz) kelloaajuudella toimivat mikroprosessorimallit. Nykypäivänä Markkinoiden suorituskykyisimpien mikroprosessorien kelloaajuudet liikkuvat 3,5 gigahertsissä ja terahertsin kelloaajuudella on saatu toimimaan vasta yksittäisiä transistoreita [15].



*Kuva 2.4. Mikroprosessorin sisäinen kellosignaali.*

Kaikki digitaalinen elektroniikka edellyttää jonkinlaisia kelloja voidakseen toimia yhdessä. Kello-oskillaattorin tehtävänä on tahdittaa tietokoneen sisäiset toiminnot niin, että eri osat suorittimen sisällä ja sen ulkopuolella toimivat samassa tahdissa. Mitä suurempi kello-oskillaattorin taajuus on (kuva 2.4.), sitä nopeammin mikroprosessori ja koko tietokone toimivat. Mikroprosessori voi sisältää sisäisen kello-oskillaattorin, jolloin siinä on liitännät ulkoiselle kielelle. Toinen vaihtoehto on, että mikroprosessori tarvitsee toimiakseen kokonaan ulkopuolisen kello-oskillaattorin.

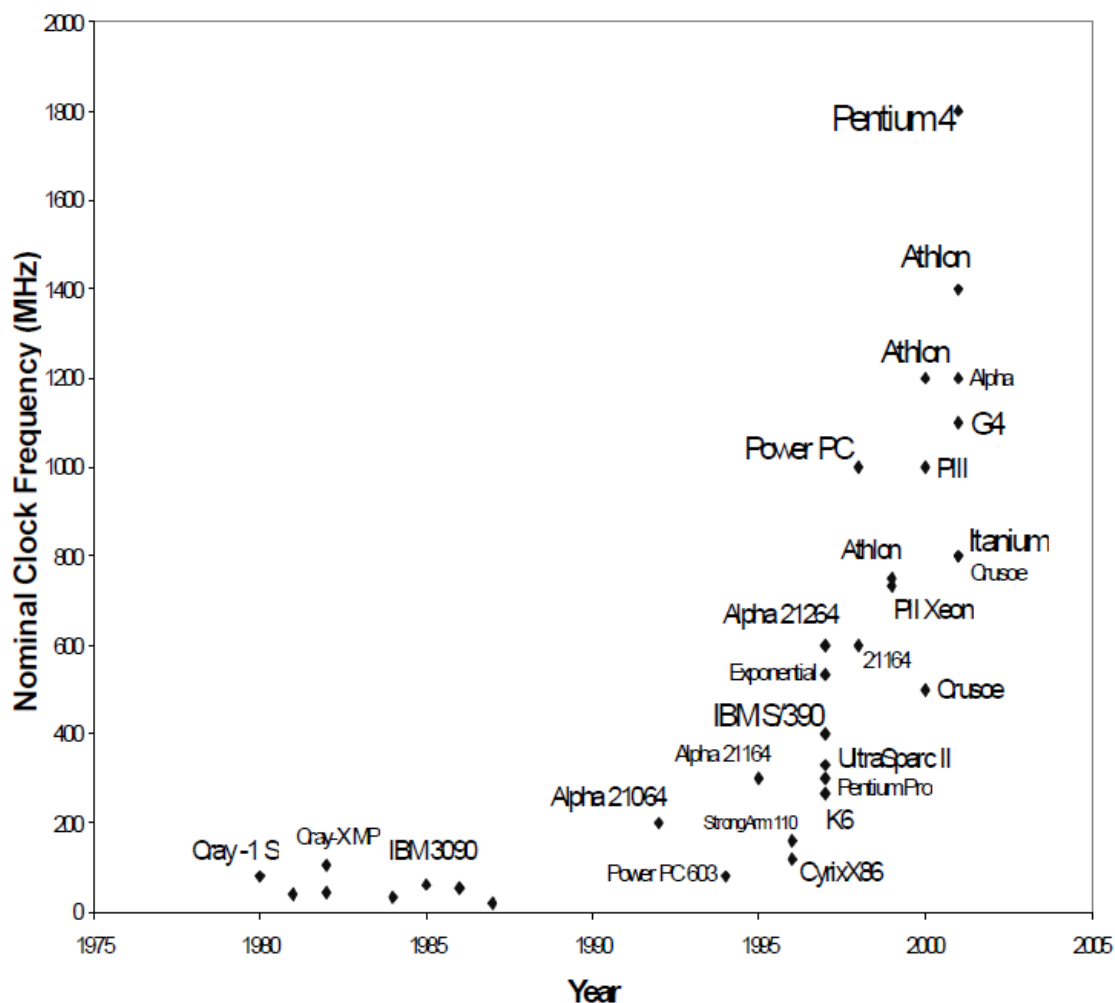
Jokaisella mikroprosessorin kellojaksolla suoritetaan yksi vaihe, jonka jälkeen suoritus siirtyy seuraavaan vaiheeseen. Käsky siirtyy liukuhihnan vaiheesta toiseen kellopulssein tahdittamana. Kellopulsseja tarvitaan myös, kun tietoa siirretään ohjelaitteille. Kellon avulla mikroprosessori ja väylällä oleva ohjain voivat tahdistaa toimintansa niin, että kirjoittava osapuoli esittää datan ja osoitteen siten, että vastaanottava osapuoli tietää, mistä hetkestä eteenpäin väylällä on kelvolliset arvot. Toimintaa tahdistetaan kellopulsseiden reunoilla ja puhutaan joko pulssin nousevasta ja/tai laskevasta reunasta. Kellojen muodostaminen tapahtuu omassa lohossa ja siihen käytetään joko valmiita oskillaattoreita tai kiteitä ohjaamaan mikroprosessorissa olevaa oskillaattoriipiiriä. Vanhoissa mikroprosessoreissa käytettiin yksi oskillaattori jokaista tarvittavaa kelloa varten. Nykyaikaisissa mikroprosessoreissa on mahdollista johtaa jakamalla ja kertomalla kaikki tietokoneen tarvitsemat kelloaajuudet samasta peruskellosta, kuten esimerkiksi keskusmuistin, emolevyn liitäntäväylien ja mikroprosessorin ja piirisarjan välisen väylän kelloaajuus. [16]



Kuva 2.5. Ulkoisen BCLK -peruskellon käyttö mikroprosessorissa.

Intel kutsuu uusimmissa mikroprosessoreissaan ulkoista peruskelloa Base Clock -termillä (BCLK), jonka kellotaajuus on 133 MHz (kuva 2.5.) [17] ja AMD:n mikroprosessoreissa peruskelloksi kutsutaan 200 MHz:n referenssitaajuutta [18]. Molempien valmistajien nykypäivän mikroprosessorimallien kokonaiskellotaajuus muodostetaan kertomalla peruskello mikroprosessorin sisäisellä kertoimella, joka muodostetaan vaihelukitus silmukassa (Phase Locked Loop, PLL). Mikroprosessorimallin sisäinen kerroin määritetään ja asetetaan valmistajan toimesta jo valmistuksen yhteydessä, mutta sitä kontrolloidaan virransäästöön ja suorituskyvyn parannukseen liittyvillä ominaisuuksilla automaattisesti. Myös käyttäjä voi muuttaa mikroprosessorin sisäistä kerrointa emolevyn BIOS:sta.

Mikroprosessorien haitallisena ominaisuutena niiden virrankulutus kasvaa kellotaajuuden kasvaessa. Virrankulutuksen kasvaminen lisää komponentin lämpenemistä, lämpeneminen vanhentaa komponenttia ja saattaa lopulta jopa rikkoa sen. Siksi mikroprosessoreissa ei aina välttämättä käytetä mahdollisimman korkeaa kellotaajuutta [19]. Mikroprosessorin lämmöntuoton kasvamista kellotaajuuden suhteen ja vikataajuuden tiheyttä käsitellään työssä tarkemmin luvussa 3.7 Ylikellottamisen riskit ja ongelmat.



Kuva 2.6. Mikroprosessorien kellotaajuuden kasvaminen vuoteen 2002 asti [20].

Mikroprosessorien kellotaajuus kaksinkertaistui vuoteen 2002 asti kolmen vuoden välein (kuva 2.6.) [20]. Tuolloin mikroprosessorien kellotaajuuden ennustettiin jatkavan kasvua 5-10 GHz:iin, mutta toistaiseksi korkeimmalla kellotaajuudella markkinoille julkaistu x86-arkkitehtuuriin perustuva malli on Intelin Pentium 4 570J, joka toimii 3,8 GHz:n kellotaajuudella [21].

## 2.5. Mikroprosessorin suorituskyky

Kun sanotaan, että joku tietokone on nopeampi kuin toinen, sillä voidaan eri yhteyksissä tarkoittaa eri asioita. Työpöytä-tietokoneen käyttäjän kohdalla puhutaan yleensä yksittäisten ohjelmien käskyjen suorittamiseen kuluvasta ajasta, jota kutsutaan prosessoriajaksi. Prosessoriaika on kertakäyttöinen resurssi ja mitä lyhyemmässä ajassa tietokone suorittaa ohjelman käskyt, esimerkiksi koodaa musiikki- tai videotiedoston formaatista toiseen, purkaa tai pakkaa suuren joukon tiedostoja, laskee monimutkaisilla kaavoilla joukon laskutoimituksia tai mitä suuremmalla ruudunpäivitysnopeudella se renderöi 3D-grafiikkaa näytölle, sitä suorituskykyisempi tietokone on.

Palvelinmaailmassa suorituskyvyn sijaan tärkeintä on suoritusteho eli kuinka monta tehtävää saadaan suoritettua esimerkiksi tunnissa.

Mikroprosessorin kellotaajuus on yksi tärkeimmistä arvoista, kun puhutaan tietokoneen suorituskyvystä. Yhden kellojakson aikana prosessori suorittaa yhden perusoperaation ja yksi kellojakso tarkoittaa tilanvaihtoa loogisen nollan ja ykkösen välillä. Eri mikroprosessorimallien suorituskykyä ei voida suoraan vertailla kellotaajuuden mukaan, sillä suorituskykyyn vaikuttaa aina myös mikroprosessorin arkkitehtuuri ja sen Instructions Per Clock -tehokkuus (IPC) eli kuinka monta käskyä se kykenee suorittamaan yhden kellojakson aikana. Ainoastaan samaan arkkitehtuuriin perustuvia mikroprosessoreita voidaan vertailla keskenään kellotaajuutta katsomalla ja mikroprosessorin suorituskyky voidaan laskea kellotaajuuden ja IPC-tehokkuuden tulona:

$$\text{Suorituskyky} = \text{Kellotaajuus} \cdot \text{Käskyjä kellojaksossa} \quad (2-1)$$

Prosessoriaika on riippuvainen edellä mainitusta kellotaajuudesta ja IPC-tehokkuudesta sekä lisäksi käskyjen lukumäärästä. 10 % parannus mihin tahansa edellä mainituista ominaisuuksista johtaa 10 % parannukseen prosessoriajassa [22]. Mikroprosessorin käyttämä perusarkkitehtuuri on kytköksissä kellotaajuuteen siten, että jokaisen käskyn suorittamiseen vaaditaan tietty määrä kellojaksoja. Näin ollen, mitä korkeammalla kellotaajuudella mikroprosessori toimii, sitä enemmän käskyjä se kykenee suorittamaan samassa ajanjaksossa. Mikroprosessoreihin on kehitetty vuosien varrella uusia lisäkäskykantoja, joiden avulla saadaan muun muassa vähennettyä suoritettavien peruskäskyjen lukumäärää ja sitä myötä vähennettyä prosessoriaikaa.

Ajan lisäksi yleisesti käytetty mikroprosessorin suorituskyvyn mittari on suoritettavien liukulukulaskujen lukumäärä sekunnissa eli Floating Point Operations Per Second (FLOPS). FLOPS on yleinen termi varsinkin tieteellisessä laskennassa, joka perustuu vahvasti supertietokoneilla suoritettaviin liukulukulaskuihin. Supertietokoneista ilmoitetaan tavallisesti niiden teoreettinen ja käytännössä saavutettu FLOPS-laskentateho, jotka listataan kahdesti vuodessa päivittyvällä Top500.org-sivuston ylläpitämällä maailman supertietokoneiden nopeuslistalla. Tällä hetkellä listan kärjessä on Yhdysvalloissa sijaitsevan Oak Ridge National Laboratoryn Jaguar-supertietokone, joka rakentuu 224 162 prosessoriytimeistä. AMD:n 2,6 GHz:n kellotaajuudella toimivista kuusiytimisistä Opteron-prosessoreista rakentuva Jaguar kykenee teoriassa 2,3 petaflop/s:n ja käytännössä 1,75 petaflop/s:n laskentatehoon. [23]

### 2.5.1. Standard Performance Evaluation Corporation

Standard Performance Evaluation Corporation (SPEC) on voittoa tavoittelematon järjestö, joka on perustettu vakiinnuttamaan, ylläpitämään ja varmentamaan standardoitua joukkoa olennaisia testiohjelmia, joita voidaan käyttää uusimman sukupolven suorituskykyisten tietokoneiden suorituskyvyn mittaamiseen. SPEC kehittää

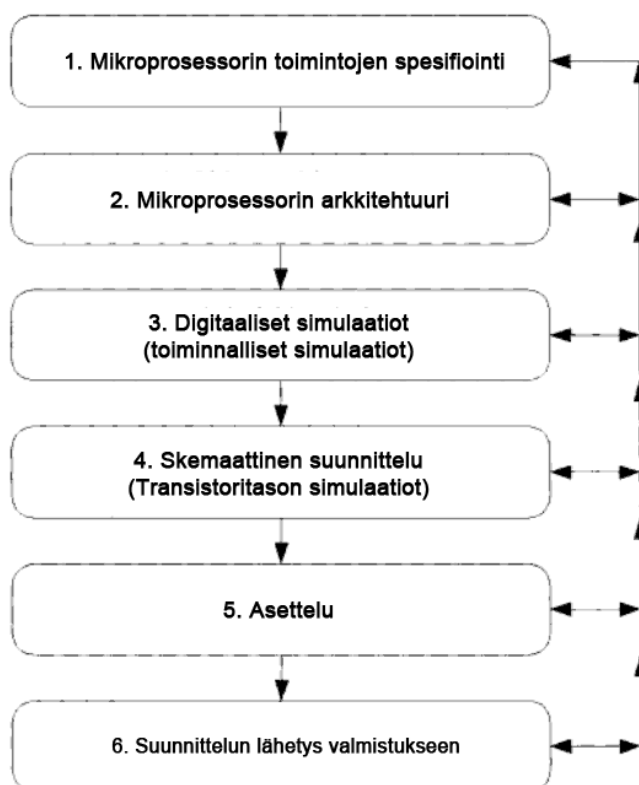
testiohjelmiä sekä tarkistaa ja julkaisee tulokset jäsenorganisaatioilta ja muilta lisenssin hankkineilta tahoilta. Yrityksen tunnetuin testiohjelma on tietokoneen prosessorin, muistin alijärjestelmän ja kääntäjän suorituskykyä mittaava SPEC CPU2006, joka koostuu kokonaislukusuorituskykyä mittaavasta CINT2006- ja liukulukusuorituskykyä mittaavasta CFP2006-osioista. SPEC CPU2006 sisältää yhteensä 29 eri testiä ja ne toimitetaan valmiiden ohjelmien sijaan lähdekoodeina. Testien tulokset yhdistetään lopputulokseksi geometrisellä keskiarvolla, jonka ansiosta painotus pysyy samanlaisena riippumatta niiden suoritusajasta. [24]

*Taulukko 2.1 Luettelo ja kuvaus SPEC-testeistä.*

<b>SPEC-testi</b>	<b>Kuvaus</b>
SPEC CPU2006	Mittaa eri tietokonejärjestelmien suorituskykyä laskentaintensiivisillä työkuormilla
CINT2006	Ensimmäinen osa SPEC CPU2006 -testistä, joka mittaa mikroprosessorin kokonaislukusuorituskykyä
CFP2006	Toinen osa SPEC CPU2006 -testistä, joka mittaa mikroprosessorin liukulukusuorituskykyä
SPECviewperf 10	Mittaa järjestelmän 3D-suorituskykyä OpenGL-rajapinnalla ja ilmoittaa suorituskyvyn renderöityjen ruutujen lukumäärällä sekunnissa
SPECjms2007	Mittaa Javan JMS-viestirajapinnan suorituskykyä järjestelmän kaikilla komponenteilla, mukaan lukien laitteisto, JMS-palvelinohjelmisto, tietokantaohjelmisto ja tietoverkko
SPECweb2009	Mittaa verkkopalvelimen suorituskykyä erilaisilla työkuormilla, kuten täysin suojatulla SSL-pohjaisella liikenteellä, osittain suojatulla SSL-liikenteellä ja suurten tietomäärien latauksella

## 2.6. Mikroprosessorin suunnittelu ja valmistus

Mikroprosessori on äärimmäisen monimutkainen integroitu piiri, joka rakentuu nykypäivänä sadoista miljoonista tai jopa miljardeista transistoreista. Mikroprosessorin suunnittelussa on monia vaiheita, mutta tärkeimmät ovat logiikan ja piirikytken suunnittelu sekä asettelu. Jokainen suunnittelun ja valmistuksen vaihe on huolellisesti määritelty ja vahvistetaan korkean tason abstraktisuudella. Valtaosassa piirisuunnittelun testaamista ja simulointia käytetään apuna laitteiston kuvauskieltä (HDL, Hardware Description Language), joka on tekstimuotoinen ohjelmointikieltä muistuttava tapa kuvata integroitu piiri.



Kuva 2.7. Mikroprosessorin suunnitteluvuo yksinkertaistettuna [25].

Mikroprosessorin suunnittelussa ja kehityksessä (kuva 2.7.) ensimmäinen vaihe on määrittellä markkinointitiedoista, mitkä toiminnallisuudet mikroprosessoriin tarvitaan ja käytetäänkö suunnittelun perustana jo olemassa olevaa arkkitehtuuria vai suunnitellaanko kokonaan uusi arkkitehtuuri. Uuden arkkitehtuurin suunnittelu puhtaalta pöydältä on ajallisesti huomattavasti pidempi prosessi, joten edellisistä arkkitehtuureista saatetaan käyttää tiettyjä hyväksi todettuja ominaisuuksia ja kehittää vain muutosta kaipaavia lohkoja. Mikroprosessorin täytyy mukaila väyläliitännöiden, ajoitusten ja valmistuksessa käytettävän koteloinnin standardeja, joten niiden tärkeys ja prioriteetti on päätettävä ensin. Yleensä mikroprosessorin suunnittelussa on usein tehtävä kompromisseja ja jokaista vaatimusta ei voida täyttää, sillä niiden toteuttaminen veisi liian kauan aikaa.

Mikroprosessorin arkkitehtuuri on pääasiallisesti tapa, jolla integroitu piiri jaetaan toiminnallisiin lohkoihin ja kuinka lohkot ovat yhdistetty toisiinsa. Arkkitehtuuria määriteltessä jokainen lohko optimoidaan siten, että halutut suorituskykyavoitteet täyttyvät. Lohkojen asettelun suhteen arkkitehtuuri ilmaisee muun muassa, kuinka iso lohko on, mihin se on järkevintä sijoittaa, mikä on lohkojen välinen looginen suhde ja mitkä ovat tärkeitä signaaleja.

Digitaaliset tai toiminnalliset simulaatiot suoritetaan osana suunnittelun käyttäytymismallin validointia, joka vahvistaa, että mikroprosessorin arkkitehtuuri on toteuttamiskelpoinen ja suoriutuu halutunmukaisesti. Skemaattisessa suunnittelussa eri lohkot jalostetaan kytkentäkaavioiksi, jotka esittävät transistoritason suunnittelua. Tässä suunnitteluvaiheessa on käsiteltävä käytännön ilmiöitä, kuten lämmöntuottoa, tehonkulutusta, resistanssia, kapasitanssia ja johtimia. Lisäksi suunnittelun toiminnallisuus ja piirin lopullinen koko vahvistetaan.

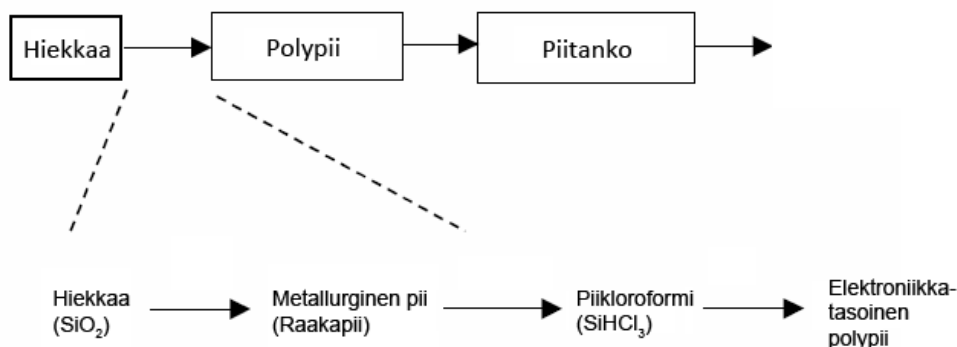
Asettelu on suunnittelun vaihe, jossa simuloitu kytkentäkaavio toimitetaan asettelusuunnittelijoille, jotka työstävät polygoneihin perustuvan esityksen piiristä. Lopuksi koko mikroprosessorin lohkojen asettelu tarkistetaan, ettei siinä ole esteitä valmistusteknisille vaatimuksille ja se vastaa lopullista kytkentäkaaviota. Suunnittelun lopputulos ovat mikroprosessorin eri kerroksien lasiset maskit, joiden avulla piikiekolle valotetaan piirikuviot. [25]

Mikroprosessorin valmistukseen liittyy viisi päävaihetta, jotka ovat materiaalien valmistelu, piikiteen eli piitangon kasvatus, piikiekon valmistaminen ja piisirujen lajittelu, valmiiden piisirujen kotelointi ja pakkaus [26]. Koko monimutkainen valmistusprosessi hiekasta mikroprosessoriksi sisältää yli 300 yksittäistä vaihetta, mutta prosessi on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 2.7.



*Kuva 2.7. Mikroprosessorin valmistus yksinkertaistettuna.*

Pii on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine hapen jälkeen ja sen osuus on noin 25 % maankuoren massasta. Piin tavallisin luonnossa esiintyvä yhdiste on piidioksidi, jota esiintyy hiekassa ja kvartseissa. Piikiekkkojen raaka-aineena käytettävä polypii valmistetaan huolellisesti valikoidusta puhdistetusta hiekasta kolmessa vaiheessa (kuva 2.8.).



Kuva 2.8. Hiekan prosessointi piitankojen raaka-aineeksi polypiksi.

Puhdistetusta hiekasta erotetaan pii kuumentamalla sitä ja sekoittamalla siihen valokaariuunissa hiiltä. Useamman kemiallisen reaktion seurauksena valokaariuunista saatava pii on 98 % puhdasta metallurgista piitä eli raakapiitä (MGS, Metallurgic Grade Silicon). Metallurginen pii puhdistetaan liuottamalla epäpuhtauksia sisältävät piishiukkaset suolahappoon, joiden välisestä reaktiosta muodostuu piikloroformia eli trikloorisilaania (SiHCl<sub>3</sub>). Lopuksi huoneenlämmössä nestemäinen piikloroformi puhdistetaan tislauksprosessissa elektroniikkalaatuiseksi polypiksi (EGS, Electronic Grade Silicon). [27; 28]



Kuva 2.9. Polypiiimpaleita.

Puolijohteissa käytettävän polypiin (kuva 2.9.) on täytettävä elektroniikkalaatuisen piin kriteerit eli sen oltava 99,999999999 % puhdasta ja joukossa saa olla ainoastaan yksi vieras atomi miljardia piiatomia kohti [28]. Puhdistetusta elektroniikkalaatuisesta piistä kasvatetaan kiinteä piikide eli piitanko, josta leikataan huolellisesti irti ohuita, alle millimetrin paksuisia piikiekköjä. Piikiteen valmistuksessa käytetään yleisesti kahta eri

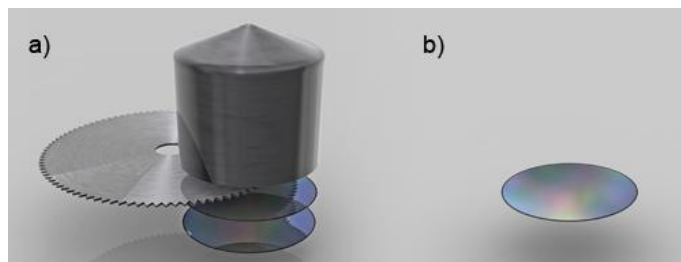
menetelmää, jotka ovat puolalaisen tiedemiehen Jan Czochralskin mukaan nimetty Czochralskin menetelmä [28] tai float-zone-prosessi [30].

Czochralskin menetelmässä piikiteen valmistus aloitetaan kuumentamalla piikimpaleilla täytetty sulatusastia 1415 celsiusasteeseen, jossa kimpaleet sulavat nestemäiseksi. Piikidettä aletaan kasvattaa piisulasta kastamalla siihen siemenkide, jonka pinnalle sula pii alkaa vähitellen kiteytyä. Siemenkide on pieni kide, jonka yhdenmukainen kiderakenne on sama kuin piikiteessä tarvittava kiderakenne. Piikidettä pyritetään tasaisesti ja samanaikaisesti vedetään pois piisulasta sitä mukaan, kun uutta kidettä syntyy. Syntyvän piitangon ominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa kasvatusuunin lämpötilajakauma, sulan ja ympäröivän kaasun virtaukset, seosaineiden kulkeutuminen, ympäröivien materiaalien kuluminen sekä mahdolliset ulkoiset magneettikentät. Piikiteen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat säännöllisen kiderakenteen lisäksi kiteen halkaisija, happiatomien ja muiden seosaineiden lukumäärä sekä jakauma kidehilassa. [31]



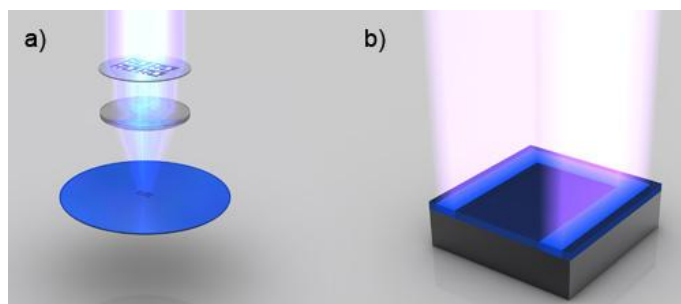
*Kuva 2.10. Czochralskin menetelmällä valmistettu piikide [32].*

Kovan lasimaisen piikiteen valmistaminen kestää muutamia päiviä, valmis piitanko painaa noin 100 kilogrammaa ja on noin pari metriä korkea (kuva 2.10.). Nykyään mikroprosessorit valmistetaan halkaisijaltaan 300 millimetrin eli 12 tuuman piikiekoille, mutta puolijohdeteollisuus on siirtymässä tulevaisuudessa halkaisijaltaan 450 mm piikiekkojen käyttöön. Puolijohdevalmistajille tämä tarkoittaa suuria investointeja, jotta tehtaiden laitteet ovat yhteensopivat uuden standardin kanssa, mutta vastineeksi yhdellä piikiekolla pystytään valmistamaan kerralla suurempi määrä piisiruja.



*Kuva 2.11. a) Valmis piikide leikataan piikiekoiksi b) piikieppo käsitellään peilipintaiseksi [33].*

Valmiista piikiteestä sahataan irti muutaman millimetrin paksuisia piikieppoja (kuva 2.11.a). Irti sahatut piikiepot käsitellään hiomalla ensin mekaanisesti ja lopuksi kemiallisesti, jotta niihin saadaan virheetön ja tasainen peilipinta (kuva 2.11.b). Esimerkiksi Intel ostaa piikieppoaihiot kolmansilta osapuolilta valmiina. Suomessa toimii piikieppoja valmistava yritys Okmetic, joka toimittaa asiakaskohtaisesti räätälöityjä piikieppoja anturi- ja puolijohdteollisuudelle ja myy teknologiaosaamistaan eteenpäin.

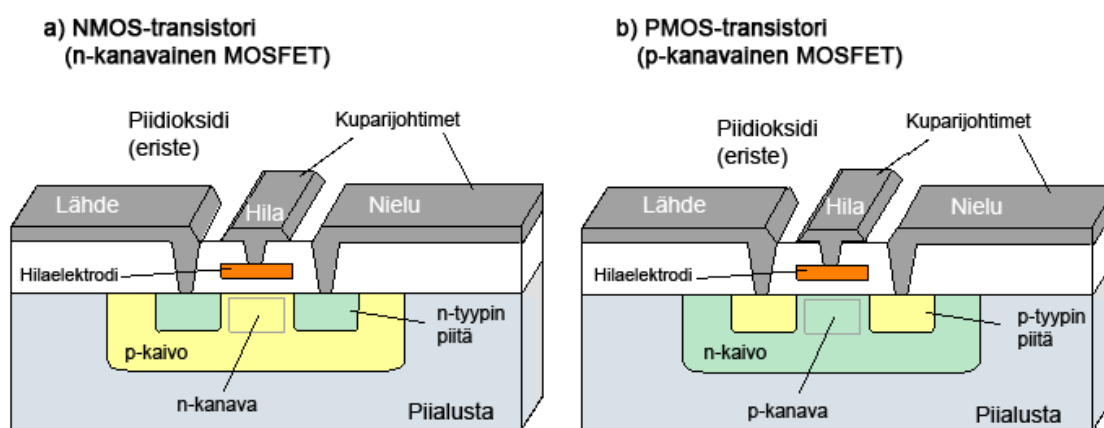


*Kuva 2.12. a) Piikiepon piirien valotus maskilla b) transistorin altistuminen ultraviolettivalolle [33].*

Mikroprosessorien tuotantolaitoksessa valmistusprosessi aloitetaan kuumentamalla piikieppo erittäin korkeaan lämpötilaan sulatusuunissa, jossa pii reagoi hapen kanssa muodostaen oksidikerroksen piikiepon päälle. Ohut hapen ja piin yhdiste eli oksidikerros toimii sähköisenä eristeenä piikiepon päällä ja on yksi sähköpiirien avaintekijöistä. Tyhjiössä pyörivän piikiepon oksidikerroksen päälle kaadetaan erittäin ohut ja tasainen kerros valoherkkää ainetta, jota kutsutaan fotoresistiksi. Fotoresisti on herkkä ultraviolettivalolle, mutta kestää tiettyjä etsauskemikaaleja, joille se myöhemmässä vaiheessa altistetaan. Lasiset maskit, joissa on läpinäkyviä ja läpikuultavia alueita, ovat mikroprosessorin suunnitteluvaiheen lopputulos ja määrittelevät jokaisen piirin kerroksen piirikuvion. Maski asetetaan koneellisesti piikiepon päälle, jonka jälkeen ultraviolettivaloa väläytetään läpinäkyvien kohtien läpi puolijohdealuistaan piisiru kerrallaan (kuva 2.12.a). Maskin ja piisirun välissä käytetään

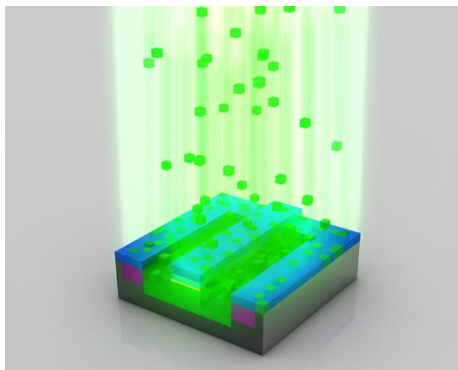
linssiä, joka pienentää maskin kuvaa. Yleensä maskin piirikuviot siirtyvät piikiekolle neljä kertaa pienempinä.

Transistoritasolla ne alueet fotoresististä, jotka eivät ole maskin kuvioiden alla ja altistuivat ultraviolettivalolle (kuva 2.12.b), pehmenevät liukenevaksi ja voidaan helposti poistaa liuottimella. Tätä prosessin vaihetta kutsutaan fotolitografiaksi. Kemiallinen etsaus fluorivetyhapolla poistaa transistorista oksidikerroksen niiltä osin, joista fotoresisti liuotettiin pois päältä. Jäljelle jäänyt fotoresisti suojaa etsauksen aikana sitä osaa oksidikerroksesta, joka muodostaa halutun piikuviokerroksen. Kun fotoresisti poistetaan oksidikerroksen päältä, jäljelle jää maskin mukainen kuvio oksidikerrosta. Transistoriin lisätään useita kerroksia, kuten esimerkiksi hilaeriste, hila ja eristekerros, edellä selostetun fotolitografian ja etsauksen avulla. Jokaisessa kerroksessa on uniikki kuvio ja yhdistettynä kerrokset muodostavan piirin kolmiulotteisen rakenteen.



Kuva 2.13. a) NMOS-transistorin rakenne b) PMOS-transistorin rakenne

Miljoonista transistoreista rakentuvia mikroprosessoria kutsutaan Very-Large-Scale-Integration-termillä (VLSI). Mikroprosessorit perustuvat Complementary Metal Oxide Semiconductor -logiikkaan (CMOS), jossa yhdistetään p- ja n-kanavaisia Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect -transistoreita (MOSFET) samaan piirisuunnitteluun. Lopputuloksena on piiri, joka ei kuluta lepotilassa virtaa virtavuotoja lukuun ottamatta. CMOS:n virrankulutus määräytyy kytkimien ajamisen kapasitanssien suuruudesta ja samanaikaisesti tapahtuvien tilamuutosten lukumäärästä. Valmistusprosessissa transistorista tehdään joko n-kanavainen NMOS tai p-kanavainen PMOS (kuva 2.13.). Transistori on symmetrinen, joten virta voi kulkea lähteestä nieluun tai nielusta lähteeseen. NMOS-transistori on johtavassa tilassa, kun hilajännite ylittää niin sanotun kynnysjännitteen, jonka jälkeen virta kulkee kanavassa ja pois päältä, kun hilajännite on alle kynnysjännitteen. PMOS-transistori toimii päinvastaisesti eli on pois päältä, kun hilajännite on yli kynnysjännitteen ja johtavassa tilassa, kun hilajännite on alhaisempi kuin kynnysjännite.

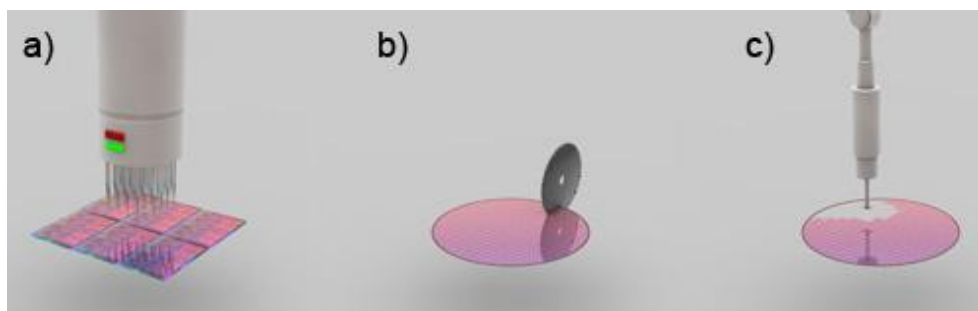


*Kuva 2.14. Fotoresistillä suojaamattomien piin kohtien altistaminen ionisäteelle, joka muodostaa lähteen ja nielun [33].*

N-kanavaisen transistorin valmistuksessa piikieppo altistetaan boori-ionisäteelle, jotka istuttavat itsensä fotoresistillä suojatun keskiosan molemmille puolille. Ne toimivat transistorin nieluna ja lähteenä ja niitä kutsutaan p-kaivoiksi. (kuva 2.14.). Boori-ioni on booriatomi, josta on poistettu elektroni ja näin ollen se on positiivisesti varautunut. Tämä varaus mahdollistaa ionien kiihdytyksen elektrostaattisesti ja antaa niille tarpeeksi energiaa, jotta ne voidaan istuttaa piikiekolle. Ionit ammutaan piikiekon pinnalle erittäin suurella nopeudella ja sähkökenttä kiihdyttää ne yli 300 000 km/h nopeuteen. Ionien istutuksella eli douppauksella piin sähkönjohtavuutta saadaan muutettua halutuilla alueilla. P-kanavaisen transistorin valmistuksessa piikieppo altistetaan fosfori-ionisäteelle, jolle altistettuja alueita eli nielua ja lähettä kutsutaan n-kaivoiksi.

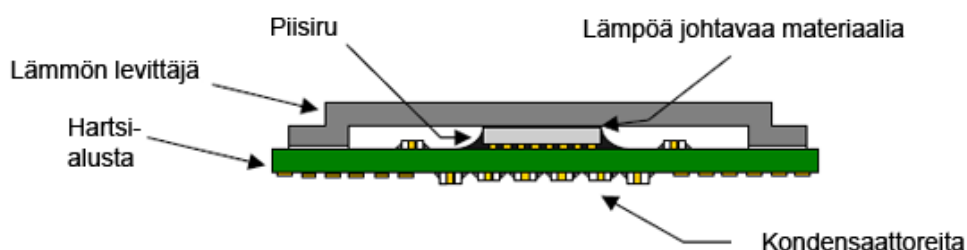
Kun n- ja p-tyyppiset alueet ovat paikoillaan, MOSFET-transistori tarvitsee vielä hilan. Aluksi piin päälle lähteen ja nielun väliin luodaan ohut eristekerros ja lopuksi sen päälle levitetään ohut kerros polypiiitä tai muuta materiaalia toimimaan johtimena. [34]

Douppauksen jälkeen transistori alkaa olla valmis ja eristekerrokseen etsataan kolme reikää, jotka täytetään kuparilla. Kuparin täyttöä varten piikiekot laitetaan kuparisulfaattijärjestelmään, jossa kupari-ioneita laskeutetaan transistorille elektropinnoitukseksi kutsuttavalla prosessilla. Kupari-ionit matkaavat positiiviselta anodilta negatiiviseen katodiin ja elektropinnoituksen seurauksena kupari-ionit muodostavat piikiekon päälle ohuen kuparikerroksen. Lopuksi ylimääräinen kupari hiotaan eristekerroksen päältä pois. Kuparilla täytetyt reiät toimivat kontaktipintoina kuparijohtimille, jotka ovat yhteydessä muihin transistoreihin muodostaen piirisuunnittelun mukaisen kytkennän. Nykypäivän mikroprosessorit saattavat muodostua yli 20 kerroksesta piirikuvioita ja johtimia.



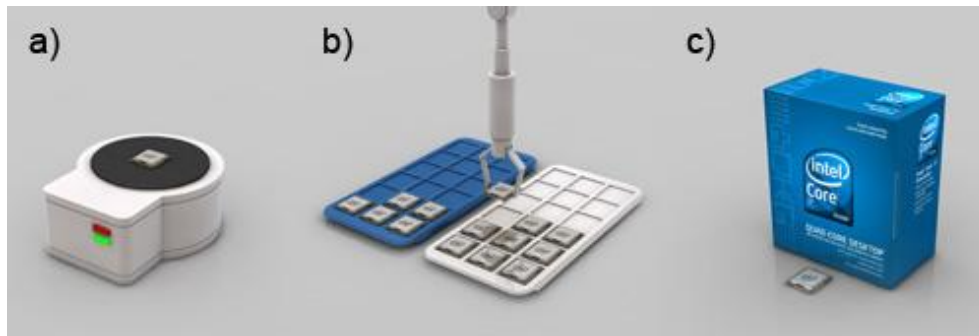
Kuva 2.15. a) Valmiit piisirut erittelytestataan b) leikataan irti piikiekolta c) lajitellaan koteloitavaksi [33].

Kun kaikki piirisuunnittelun miljoonat transistorit on yhdistetty toisiinsa kuparijohtimilla ja piisiru on valmis, se testataan ensimmäisen kerran piikiekon erittelytestissä (kuva 2.15.a). Tässä vaiheessa piikiekon jokaiseen piisiruun syötetään joukko testejä ja jos saadut parametrit ovat halutun mukaiset, piisiru jatkaa tuotantoon. Ne piisirut, jotka eivät anna piikiekon erittelytestissä toivotunlaista vastausta testeihin, eivät päädy mikroprosessorihin, vaan hävitettäväksi. Piikiekosta sahataan huolellisesti sahausviivoja pitkin irti kaikki piisirut (kuva 2.15.b) ja testien perusteella valitut piisirut lajitellaan koteloitaviksi ja mikroprosessoreiksi valmistettaviksi (2.15.c).



Kuva 2.16. Mikroprosessorin piisirun kotelointi ja suojaaminen.

Koteloinnissa piisiru istutetaan orgaaniseen lasikuidulla vahvistettuun hartsialustaan, joka tarjoaa elektronisen ja mekaanisen liitännän mikroprosessorille (kuva 2.16.). Näiden liitäntöjen avulla se kommunikoi muiden tietokoneen komponenttien kanssa. Hartsia käytetään piisirun alustana sen sähköisesti eristävän ominaisuuden ja keraamiseen alustaan verrattuna edullisen hinnan takia. Alustassa on myös muutamia ohituskondensaattoreita, joiden tehtävänä on ehkäistä ulkoisia häiriöitä. Piisiru on suojattu nykypäivän mikroprosessoreissa kuparisella nikkelillä päällystetyllä lämmön levittäjällä. Sen tehtävänä on levittää piisirun tuottama lämpö laajemmalle alalle ja päälle asennettavaan jäähdytyslementtiin. Piisirun ja lämmön levittäjän välissä on lämpöä johtavaa materiaalia.



*Kuva 2.17. Koteloidut mikroprosessorit luokkatestataan ja pakataan myyntiä varten [33].*

Valmiit mikroprosessorit testataan vielä uudelleen, että ne toimivat myös koteloinnin jälkeen ja käyvät läpi luokkatestauksen, jossa niiden ominaisuudet, kuten tehonkulutus ja maksimikellotaajuus määritellään eri ilmankosteus- ja lämpötila-arvoilla (kuva 2.17.a). Näiden testien tulosten perusteella samanlaisilla ominaisuuksilla varustetut prosessorit lajitellaan ja merkitään tietyllä mallinimellä (kuva 2.17.b). Valmistusprosessi päättyy mikroprosessoreiden toimitukseen asiakkaille. OEM-valmistajille toimitettavat mikroprosessorit lähetetään eteenpäin sellaisinaan ja kuluttajille myyntiin menevät pakataan erilliseen myyntipakkaukseen (kuva 2.17.c). [26; 33; 34; 42; 61]

## 3. MIKROPROSESSORIN YLIKELLOTTAMINEN

### 3.1. Teoria

Ylikellottamiseksi kutsutaan mikroprosessorin kellotaajuuden korottamista yli sen arvon, jonka valmistaja on sille tehtaalla asettanut. Ylikellottaminen on suora käänös englanninkielisestä verbistä *overclocking*. Clocking viittaa mikroprosessorin kellotaajuuteen ja sen muuttamiseen ja over puolestaan sen korotetaan. Kellotaajuuden noustessa mikroprosessorin käsittelemien kellojaksojen lukumäärä tiettyä aikajaksoa kohti kasvaa. Tämä tarkoittaa transistorien tilamuutosten määrän lisäystä samaa aikayksikköä kohti, joka lisää mikroprosessorin virrankulutusta ja sitä myöden transistorien tuottamaa lämpöä. Yleisesti ottaen ylikellottaminen tarkoittaa jonkin tietokoneen komponentin suorituskyvyn parantamista.

Mikroprosessorin valmistaja ei tiedä piikiekolta valmistuvien sirujen tarkkoja toimintataajuuksia ennen kuin ne on testattu. Koska mikroprosessorit ovat hyvin pieniä, syntyy niihin eroja, vaikka valmistusmenetelmä on hyvin tarkka. Kellotaajuuden rajoiksi valitaan sellaiset lukemat, joilla mikroprosessori selviytyy ominaisuuksiin määrittelyissä olosuhteissa 100 % varmuudella. Tämä mahdollistaa myös ylikellottamisen, sillä valmistajan mikroprosessorille määrittelemä kellotaajuus ei ole teknisin perustein valittu maksimi, vaan se on suositus ylärajasta. [35]

Kävimme edellisessä luvussa läpi mikroprosessorin päävalmistusvaiheet ja sen loppuvaiheisiin lukeutuvan luokkatestauksen. Jokainen toimiva ja valmistajan määrittelemät spesifikaatiot täyttävä mikroprosessori luokitellaan piisirulta saatujen mittaustulosten perusteella eri kellotaajuuksilla toimiviksi malleiksi. Vaikka samalta piikiekolta irtileikattavat mikroprosessorit maksavat valmistajalle tismalleen yhtä paljon, joutuu loppukäyttäjä maksamaan piisirusta laatueron mukaan. Saman mikroprosessorituotepäheerhien mallien hintaerot saattavat olla satoja euroja ja loppukäyttäjä maksaa kellotaajuuden määrittämistä suorituskyvystä.

Kuluttajilla ei ole käytettävissä mikroprosessorivalmistajien testaus- ja analysointityökaluja, statistiikkatietoja ja matemaattisia malleja, joiden avulla voitaisiin selvittää kunkin mikroprosessorin yksilöllinen maksimi kellotaajuus, jolla se kykenee luotettavasti toimimaan. Suuri osa ylikellottamista on kuluttajan itsenäisesti tekemää kokeilua ja käytännön testaamista, mistä kerätään tietoa erehdysten kautta mikroprosessorin maksimia vakaata kellotaajuutta etsiessä. [36]

### 3.2. Kellotaajuuden korottaminen

Jos käyttäjä haluaa mikroprosessoristaan suorituskykyisemmän, hän pystyy ainoastaan korottamaan kellotaajuutta, sillä arkkitehtuuri on jo suunniteltu ja toteutettu transistoritasolla. Mikroprosessorin kokonaiskellotaajuutta voidaan korottaa nostamalla mikroprosessorimallista riippuen sen sisäisen kellotaajuuden kerrointa tai ulkoista peruskelloa, joita käytetään kokonaiskellotaajuuden muodostamiseen. Mikroprosessorin sisäinen kerroin vaikuttaa ainoastaan mikroprosessorin kokonaiskellotaajuuteen, mutta ulkoiseen kellotaajuuteen on usein sidottu myös muiden komponenttien, kuten keskusmuistin ja järjestelmäväylien kellotaajuus, kuten luvussa 2.4 mainittiin.

Ensimmäisissä PC-tietokoneissa mikroprosessorin kellotaajuus muodostettiin emolevyille asennetun kideoskillaattorin avulla. Kideoskillaattori on elektroninen piiri, joka käyttää pietsosähköisestä materiaalista tehdyn värisevän kristallin mekaanista resonanssia tuottamaan hyvin tarkkafrekvenssisen sähkösignaalin. Mikroprosessoria pystyttiin ylikellottamaan vaihtamalla emolevyille suurempi kideoskillaattori. 1990-luvulla mikroprosessoreiden ja emolevyjen kehittyessä prosessorin parametrit eli sisäisen kellotaajuuden kerroin ja ulkoinen kellotaajuus asetettiin prosessorimallin mukaan emolevytä kiinteästi jumbpereilla tai DIP-kytkimillä, jolloin ne tulivat käyttöön, kun tietokone käynnistettiin.

2000-luvun alussa emolevyistä katosivat erilliset jumbperit ja DIP-kytkimet, ja emolevyvalmistajat tarjoavat nykypäivänä kaiken kattavat säätömahdollisuudet mikroprosessorin ja muiden PC-kokoonpanon komponenttien parametrien säätämiseen Basic Input-Output Systemistä (BIOS) käsin. Lisäksi useita mikroprosessorin parametreja on mahdollista muuttaa ohjelmallisesti reaaliajassa käyttäjärjestelmästä käsin.

### 3.3. Lämpötila

Lämpötila on suure, joka kuvaa miten kylmä tai kuuma jokin esine tai aine on. Kyseessä on makroskooppinen fysikaalinen suure eli se voidaan havaita vain suurella atomijoukolla, muttei yksittäisillä atomeilla. Lämpöliike on aineen perusosasten, atomien tai molekyylien, epäsäännöllistä värähdysliikettä. Mikroskooppisella tasolla lämpötila voidaan määritellä atomin tai molekyylin keskimääräiseksi liike-energiaksi vapausastetta kohti kerrottuna vakiolla, joka on Boltzmannin vakio jaettuna kahdella. Alin teoreettisesti mahdollinen lämpötila eli absoluuttinen nollepiste on tila, jossa tämä liike-energia on nolla. Makroskooppisella tasolla lämpötila osoittaa, kumpaan suuntaan lämpöenergia virtaa kappaleesta toiseen niiden ollessa kosketuksessa. Tällöin lämpö virtaa kuumemmasta kappaleesta kylmempään kappaleeseen.

Lämpötilaa mitataan SI-järjestelmässä kelvineillä (K) tai celsiusasteilla (°C). Celsiusasteikko määriteltiin merkitsemällä puhtaan veden jäätymispistettä nollalla ja normaalia kiehumispistettä luvulla 100. Kelvin-asteikko sen sijaan on määritelty niin, että absoluuttinen nollapiste on nolla kelviniä eli -273,15 celsiusastetta, mutta lämpötilaeroja ilmaistaessa kelvin on yhtä suuri kuin celsiusaste. Absoluuttinen nollapiste on matalin lämpötila, joka voidaan saavuttaa makroskooppisessa järjestelmässä, mutta se on teoriassa ja käytännössä mahdoton saavuttaa. Absoluuttisen nollapisteen saavuttaminen merkitsisi sitä, että atomit olisivat täysin pysähtyneet, elektronit alimmilla energioillaan ja kide täysin järjestäytynyt. Etenkin Yhdysvalloissa lämpötilan mittaukseen käytetään Fahrenheit-asteikkoa, jossa nollapisteeksi valittiin alin jäätymispiste, joka minkäänlaisella suolan ja veden liuoksella tiedettiin olevan, ja ihmisen normaali ruumiinlämpö määriteltiin arvoksi 96.

Korkein mahdollinen nykyisten teorioiden tuntema lämpötila on Planckin lämpötila ( $1,4 \cdot 10^{32}$  kelviniä). Se on lämpötila, joka universumilla oli alkuräjähdyksen hetkellä. Planckin lämpötilan yläpuolella nykyiset teoriat eivät päde, mutta hypoteettisesti voidaan kuitenkin ajatella, että lämpötilan yläraja olisi äärettömässä. Tämä perustuu suppeaan suhteellisuusteoriaan, jonka mukaan massallinen kappale ei voi ylittää valonnopeutta. Koska lämpö on hiukkasten liikettä ja hiukkasten liike riippuu nopeudesta ja massasta, valonnopeuteen kiihtyvän massallisen hiukkasen massa ja samalla myös lämpötila olisi ääretön. Käytännössä näin ei kuitenkaan pääse tapahtumaan, sillä hiukkasten keskinäisen törmäilyn ja muiden ulkoisten tekijöiden takia ne eivät saavuta valonnopeutta. [37]

### 3.4. Mikroprosessorin lämmöntuotto ja jäähdytys

Mikroprosessorien lämmöntuotto on saatu hoidettua piisirujen keraamisten pakkausmateriaalien avulla pelkällä lämmön säteilyllä aina 1990-luvun alkupuolelle asti, kunnes Intelin ensimmäisten Pentium-prosessorien myötä transistorimäärä ylitti yhden mikrometrin valmistusprosessilla miljoonan kappaleen lukumäärän. Mikroprosessorin transistoreiden kytkennästä seurannutta lämmöntuottoa ei enää kyetty pitämään alle mikroprosessorin maksimi toimintalämpötilaksi määrätyn arvon pelkällä lämmön säteilyllä, vaan jäähdytyksessä tarvittiin apuna mikroprosessorin tuottaman lämmön johtumista jäähdytyssiiliin. Sen jälkeen suorituskykyisten mikroprosessorien suunnittelussa tehonkulutuksesta ja lämmöntuotosta on tullut yksi suurimmista haasteista. Raju kasvu kelloaajuuksissa ja piirisuunnittelun monimutkaisuudessa on ohittanut pienempien viivaveykyksien ja alhaisempien käyttöjännitteiden tarjoamat edut. Mikroprosessorin tehonkulutus määrittelee, kuinka monta transistoria piiriin voidaan integroida ja kuinka korkealla kelloaajuudella piiri voidaan asettaa toimimaan. [38; 39]

*Taulukko 3.1. Intelin ja AMD:n mikroprosessorien kellotaajuuksia ja TDP-arvoja [40].*

<b>Proessorimalli</b>	<b>Kellotaajuus</b>	<b>TDP-arvo</b>
Intel Pentium	75 – 200 MHz	8,0 – 15,5 W
Intel Pentium MMX	166 – 233 MHz	13,1 – 17,0 W
Intel Pentium II	233 – 450 MHz	16,8 – 43 W
Intel Pentium III	450 – 1400 MHz	16 – 42,7 W
Intel Pentium 4	1,3 – 3,4 GHz	46,9 – 115 W
Intel Pentium D	2,66 – 3,73 GHz	95 – 130 W
Intel Core 2	1,6 – 3,2 GHz	65 – 150 W
Intel Core i3, i5 & i7	2,4 – 3,46 GHz	73 – 130W
AMD K5	75 – 133 MHz	11,8 – 16,4 W
AMD Athlon	500 – 1400 MHz	42 – 72,1 W
AMD Athlon XP	1,33 – 2,33 GHz	48,5 – 76,8 W
AMD Athlon 64	1,8 GHz – 3,2 GHz	45 – 125 W
AMD Athlon 64 X2	1,9 GHz – 3,2 GHz	35 – 125 W
AMD Phenom	1,8 – 2,6 GHz	65 – 140 W
AMD Phenom II	2,4 – 3,4 GHz	65 – 140 W

Nykypäivänä moniytimisten ja suurilla välimuisteilla varustettujen mikroprosessorien piisirut rakentuvat useista sadoista miljoonista transistoreista ja suorituskykyisimpien mallien lämmöntuotto on täydessä rasituksessa reilusti yli 100 wattia (taulukko 3.1.). Valmistajat ilmoittavat mikroprosessorien lämmöntuoton Thermal Design Power -arvona (TDP), joka tarkoittaa maksimi määrää lämpöä, jonka jäähdytysratkaisun on kyettävä haihuttamaan mikroprosessorilta, jotta se kykenee toimimaan sille määritettyjen spesifikaatioiden sisällä [41]. Transistorit tuottavat jatkuvasti tilaa vaihtaessaan niin paljon lämpöä, että ilman aktiivista jäähdytystä piisirun lämpötila nousisi välittömästi yli sille suunnitellun maksimilämpötilan ja se saattaisi vaurioitua fyysisesti pysyvästi. Valmistajat ovat aina tutkineet mikroprosessorien lämpöominaisuudet ja toteuttaneet niiden dokumentoinnin huolellisesti. Nykyisin mikroprosessorit ovat myös varustettu rautatason logiikalla, joka sammuttaa piirin tai laskee kellotaajuutta automaattisesti varoimenpiteenä lämpötilan noustessa vaarallisen korkeaksi.

Termodynamiikan toinen pääsääntö määrittelee, että lämpö virtaa aina oma-aloitteisesti lämpimämmästä alueesta kylmempään alueeseen. Kaikki aktiiviset laitteet ovat lämmönlähteitä, joten ne ovat aina lämpimämpiä kuin niiden välittömän ympäristön keskilämpötila [42]. Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla, jotka ovat

johtuminen, konvektio ja säteily. Mikroprosessorin jäähdytystehokkuuden määrittelee suurimmaksi osaksi jäähdytys-elementissä käytetyn materiaalin lämmönjohtavuus, jonka yksiköksi määritetään SI-järjestelmässä watti kelvin kertaa metriä kohtaan eli  $W/(K \cdot m)$  [43].

Valmistajat alkoivat kiinnittää mikroprosessorien lämmöntuottoon erityistä huomiota vuonna 1993, kun Intel julkaisi markkinoille Pentium-prosessorin. Yritys ohjeisti järjestelmärakentajia Thermal Design Guidelines -dokumentissaan [44], että 60 ja 66 MHz:n kellotaajuuksilla toimivien Pentium-prosessorien toimintalämpötila täytyy pysyä alle 100 celsiusasteessa. Yritys totesi itse, että 15,5 watin lämmöntuotolla ja 40–45 celsiusasteen tyypillisessä ympäröivässä lämpötilassa Pentiumin toimintalämpötilaa ei saada pidettyä alle sadassa asteessa ilman pakotettua konvektiota eli metalliseen jäähdytys-siiliin liitettyä tuuletinta. Intel tarjosi järjestelmävalmistajille tarkat tutkimus- ja mittaustulokset Pentium-prosessorille soveltuvista jäähdytysratkaisuksista, joiksi se suositteli helpoimmaksi ja kustannustehokkaimmaksi metallisen jäähdytys-siilin ja tuulettimen yhdistelmää. Nykypäivänä mikroprosessorivalmistajat ilmoittavat jokaiselle mallille oman TDP-arvon, toimittavat myyntipakkauksen mukana niille suunnitellun ja lämmöntuotosta asianmukaisesti huolehtivan alumiinista, kuparista tai niiden yhdistelmästä valmistetun jäähdytys-siilin ja siihen kiinnitetyn tuulettimen sekä asennusratkaisun. Järjestelmärakentajien ja kuluttajien ei siis tarvitse huolehtia mikroprosessorin lämpötiloista mukana toimitetulla jäähdytysratkaisulla, vaan valmistaja on mitoitannut omissa mittauksissaan ja testeissään jäähdytysratkaisun tarvittavan tehokkaaksi, jotta mikroprosessori toimii sille määritellyn toimintalämpötilan rajoissa.

Markkinoilla on myös useita erilaisia kolmansien osapuolien valmistamia jäähdytysratkaisuja. Suurimmat syyt jäähdytysratkaisun vaihtamiseen ovat äänen tason alentaminen käyttäjälle miellyttävämmäksi sekä parempi jäähdytysteho. Mikroprosessoria voidaan jäähdyttää monilla eri tavoin, joista nykypäivänä yleisin menetelmä on ilmajäähdytys. Muita sovellettuja jäähdytysmenetelmiä ovat nestekierto, kylmäkompressori sekä lyhytaikaisiin kokeiluihin soveltuvat kuivajää, nestemäinen typpi ja nestemäinen helium.

## Lämpötahna

Jäähdytys-elementin pohja ja mikroprosessorin lämpöä levittävä suoja eivät ole mikroskooppisella tasolla täysin tasaisia, joten niiden väliseen liitoskohtaan jää runsaasti ilmataskuja. Ilman  $0,026 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  lämmönsiirtokyky on erittäin huono, joten se täytyy eliminoida liitoskohdan lämmönsiirtoreitiltä. Ilmataskujen täyttämiseksi jäähdytys-siili painetaan mikroprosessorin pintaa kohti kiristysmekanismilla ja väliin levitetään ohut kerros ilmaa paremmin lämpöä johtavaa lämpötahnaa. Lämpötahna koostuu silikonista tai hiilivetyöljystä, johon on sekoitettu lämpöä johtavaa materiaalia, kuten alumiinioksidia, sinkkioksidijauhetta, hienonnettua hopeaa tai CVD-timanttia (Chemical Vapor Deposition). Seoksen lopputuloksena on lämpötahna, joka täyttää

ilmataskut ja lämmönsiirtokyky on noin 1,0–16,0 W/m·K eli huomattavasti parempi kuin ilmalla [42].

## Jäähdytys siili

Jäähdytys siilit valmistetaan tyypillisesti hyvin lämpöä johtavista materiaaleista, kuten kuparista ja alumiinista. Kupari on merkittävästi painavampaa ja kalliimpaa, kuin alumiini, mutta samalla sen 400 W/m·K lämmönjohtokyky on lähes kaksi kertaa parempi kuin alumiinin 237 W/m·K [45]. Nämä kaksi materiaalia sopivat teollisuuden käyttöön hinnaltaan, sillä niitä on helppo työstää koneellisesti ja ne kelpaavat monenlaiseen käyttöön [42].

Puhdas hopea on lämmönjohtokyvyltään vain hieman parempi kuin kupari, mutta sen käyttöä rajoittaa korkea hinta. Lämmönjohtokyvyltään ylivoimaisesti paras materiaali olisi timantti (1000 W/m·K) [46], mutta sen käytössä on omat haasteensa, kuten raaka-aineen korkea hinta ja vaikea työstettävyys. Saksalaisen Fraunhofer-Gesellschaft-instituutin tutkijat ovat kehittäneet materiaalin, jossa on sekoitettu timanttijauhetta kupariin ja sen lämmönjohtavuus on 1,5-kertainen pelkkään kupariin verrattuna. Haasteena on ollut kuparin ja timantin välisen sidoksen saavuttaminen, joka on onnistunut käyttämällä pientä määrää kromia. Kromi luo timanttiin karbidikerroksen ja mahdollistaa sidoksen kuparin kanssa. [47]

Jäähdytys siili voidaan valmistaa useilla eri menetelmillä, joista yleisimmät ovat meistäminen, puristus, valaminen sekä elementti- ja aallotetut jäähdytyslevyt. Meistämisessä alumiini- tai kupariliuskat viimeistellään painamalla haluttuun muotoon meistillä. Kyseessä on yksinkertainen ja halpa, mutta vähäisen jäähdytyskyvyn tarjoava ratkaisu. Puristuksessa metalliä puristetaan reiän läpi ja reiän kaksiulotteinen muoto kopioituu pursotettuun metalliin. Tämän jälkeen siitä leikataan ja työstetään sopivan kokoisia jäähdytys siilejä, jotka kykenevät haihuttamaan suuria lämpökuormia, mutta jäähdytysripojen tiheys ja paksuus on rajoitettu tiettyihin alarajoihin. Valamalla kuparin ja alumiinin seoksia saadaan tehtyä tietyn mallisia ja tiheän rivaston omaavia jäähdytys siilejä. Aallotetuissa jäähdytys siileissä yhdestä metallipalasta taitellaan neliöaaltoa muistuttavaa profiilia ja elementtijäähdytyslevyissä metallilevyt juotetaan uritettuun metallipohjaan. [48]

Pienitehoisten laitteiden jäähdytys voidaan toteuttaa vapaan konvektion ja säteilyn avulla, joka ei sisällä liikkuvia tai rikkoutuvia osia. Vapaaseen konvektioon perustuva jäähdytys on tehokkaimmillaan silloin, kun ympäröivän ilman kulkureitillä on mahdollisimman vähän sen liikettä vastustavia esteitä. Nykypäivän mikroprosessorien lämmöntuotto on niin korkea, että vapaa konvektio onnistuu vain harvoilla vähävirtaisilla mobiilikäyttöön suunnatuilla malleilla tai mikroprosessoria alikellottamalla ja siten lämmöntuottoa laskemalla.

## Ilmajäähdytys

Kun vapaa konvektio ei ole riittävä jäähdytys mikroprosessorille, jäähdytys­siiliin voidaan liittää tuuletin siirtämään ilmapirtaa. Näin saadaan aikaan pakotettu konvektio, jonka suorituskykyä voidaan säätää tuulettimen eri parametreilla. Tuulettimia koskevat yksinkertaiset lait, jotka määrittelevät sen suorituskyvyn nopeuden, virtauksen, paineen, tiheyden ja tehon suhteen. Tilavuusvirtausnopeus  $G$ , massavirtausnopeus  $m$ , ilmanpaine  $P$  ja tuulettimen moottorin tehonkulutus  $HP$  saadaan laskemalla:

$$G = K_G N D^3 \quad (3-1)$$

$$m = K_m \rho N D^3 \quad (3-2)$$

$$P = K_\rho \rho N^2 D^2 \quad (3-3)$$

$$HP = K_{HP} \rho N^3 D^5 \quad (3-4)$$

$K$  on jokaisessa yhtälössä verrannollinen järjestelmävakio, joka riippuu tuulettimen koosta ja suunnittelusta ja voidaan laskea, kun tiedetään tuulettimen staattinen paine ja virtausnopeus yhdellä hetkellä,  $N$  on tuulettimen kierrosnopeus minuutissa,  $D$  tuulettimen halkaisija ja  $\rho$  ilman tiheys. Pakotetun konvektion avulla jäähdytys­siilistä saadaan haihdutettua huomattavasti suurempi määrä lämpöä, kuin vapaalla konvektiolla ja kyseessä on nykypäivänä yleisin mikroprosessorien jäähdytysmenetelmä. [42]

## Nestejäähdytys

Mikroprosessorin jäähdyttäminen nestekierron avulla on suurimmaksi osaksi innokkaimpien harrastelijoiden puuhastelua, mutta teollisuudessa ja armeijassa nestejäähdytystä käytetään useissa sovelluksissa [49]. Mikroprosessorivalmistajien toimesta markkinoilla ei kuitenkaan ole yhtään mallia, joka vaatisi nestejäähdytyksen toimiakseen määriteltyjen lämpötilarajojen sisällä. Siitä huolimatta markkinoilla on runsaasti kolmansien osapuolien jälkiasennettavia nestejäähdytysratkaisuja, jotka perustuvat epäsuoraan ja suljettuun nestejäähdytysjärjestelmään.

Mikroprosessorin nestejäähdytysjärjestelmä vastaa perusrakenteeltaan esimerkiksi auton moottorin jäähdytysjärjestelmää. Pumppu kierrättää nestettä säiliöstä mikroprosessorille jäähdytys­siiliin sijaan asennettuun alumiiniseen tai kupariseen blokkiin, jonka sisälle on työstetty virtauskanavat nesteelle ja kyljissä on letkukarat nesteen sisään ja ulostulojen kautta jäähdyttimelle. Jäähdyttimen kennostoissa mikroprosessorin lämmittämän nesteen lämpö siirretään pakotetulla konvektiolla ilmaan. Tämän jälkeen jäähtynyt neste kierrätetään takaisin säiliöön, josta pumppu pumppaa sen uudelleen kierto.

Nestejäähdytyksellä voidaan saavuttaa ilmajäähdystä parempi lämmönpoisto kapasiteetti kuin ilmajäähdetyksellä sillä nesteiden lämmönjohtavuus on yleensä parempi kuin kaasuilla [50]. Esimerkiksi veden lämmönjohtavuus on 0,6 W/m·K ja lämpökapasiteetti 4,18 kJ/kg, kun ilman lämmönjohtavuus on yli 20 kertaa ja lämpökapasiteetti neljä kertaa heikompi 1,01 kJ/kg [45]. Oikein rakennettuna nestejäähdytysratkaisu on myös huomattavasti hiljaisempi kuin samantehoinen perinteinen jäähdytysilin ja tuulettimen yhdistelmä.

### **Kylmäkompressorijäähdytys**

Jäähdytysmarkkinoilla kuluttajille on ollut vuosien varrella tarjolla muutamia kaupallisia kylmäkompressoriin perustuvia ratkaisuja mikroprosessorin jäähdyttämiseksi. Kylmäkompressorijäähdytysjärjestelmän komponenttien korkea hinta, massatuotannon valmistuskustannukset, haasteet kylmäaineilla varustettujen yksiköiden kuljettamisessa ja maahantuonnissa, tuotetakuu sekä vähäinen kysyntä ovat kuitenkin nousseet jokaisella yrittäjällä lähes ylitseväsemättömiksi esteiksi.

IBM käytti vuonna 1997 julkaistussa S/390 G4 CMOS -palvelimessa kylmäkompressorijäähdytystä, joka oli yrityksen mukaan markkinoiden ensimmäinen kyseistä jäähdytystekniikkaa käyttävä suorituskykyinen palvelinjärjestelmä. IBM käytti jäähdytysjärjestelmän suunnittelussa erityisesti resursseja jäähdytysjärjestelmän komponenttien valintaan sekä kondensaation ja höyrystimen lämpötilan kontrollointiin. Suunnittelussa huomioitiin myös osien hinta, luotettavuus ja jäähdytysteho. [51]

Kun mikroprosessorin jäähdyttämistä nestekierrolla verrattiin auton moottorin jäähdytykseen, kompressorijäähdytyksen juuret juontavat pakastimeen. Pakastimen kierto on täytetty kaasumaisella kylmäaineella, jonka kompressori puristaa korkeaan paineeseen. Lauhduttimessa kompressorilta tuleva kaasu muuttuu nesteeksi ja se luovuttaa lämpöä ympäristöön. Lauhduttimelta nestemäinen kylmäaine kulkeutuu kosteuden poistavan kuivaimen ja kapilaariputken kautta höyrystimelle, jossa se alkaa kiehua ja muuttuu takaisin kaasuksi. Tämän seurauksena lämpö siirtyy höyrystimen ympäristöstä höyrystimeen. Lopulta kylmäaineen kiehuessa syntynyt höyry palaa takaisin kompressorille puristettavaksi. [52]

Hieman kehittyneemmässä ja mikroprosessorin jäähdytykseen paremmin soveltuvassa kylmäkompressorijärjestelmässä on mukana muutamia lisäkomponentteja, sillä jäähdytystarve on erilainen kuin pakastimessa jäähdyttävien elintarvikkeiden. Prosessorin tuottama lämpökuorma vaihtelee rasiuksen mukaan ja tästä syystä järjestelmässä on hyvä olla termostaattinen paisuntaventtiili, jonka anturi tunnustelee imulinjan tulistusta. Tulistus on mittauskohdassa vallitseva höyryn lämpötilan ja höyrystymispaineen ja -lämpötilan välinen ero. Mitattava tulistus ohjaa paisuntaventtiilin kautta tapahtuvaa kylmäaineen sisäänruiskutusta. Paisuntaventtiili on tarpeellinen, sillä jos kaikki kylmäaine ei muuttuisi höyrystimessä nesteestä höyryksi, kompressorille palaisi höyryn sijaan nestettä, joka koituisi sen kohtaloksi. Lauhduttimen jatkeena painepuolella on kylmäainesäiliö, johon kerätään paisuntaventtiilin säädön seurauksena ylimääräiseksi jäävää kylmäainetta. Kylmäainesäiliön ja paisuntaventtiilin

välissä käytetään usein tarkastuslasia, josta voidaan todeta, että kylmäaine kulkee nestelinjassa nestemäisenä.

Yhdellä kompressorilla voidaan saavuttaa kylmäaineesta riippuen mikroprosessorille asennettavan höyrystimen lämpötilaksi noin -45 celsiusastetta. Innokkaimmat harrastelijat ovat kytkeneet kaksi tai useampia kylmäkompressoreita sarjaan, jolloin ensimmäisen vaiheen kompressorin imupuoli jäädyttää toisen vaiheen kompressorin painepuolta. Tarpeeksi tehokkailla kompressoreilla ja oikeilla kylmäaineilla on mahdollista saada mikroprosessorille asennettavan höyrystimen lämpötila laskemaan alle -100 asteeseen.

Kylmäkompressorijärjestelmiä voidaan käyttää mikroprosessorin jäädytyksessä jatkuvassa käytössä, mutta se vaatii komponenttien huolellisen eristämisen kondensaation välttämiseksi sekä jatkuvaa tarkkailua toimintahäiriöiden varalta. Myös korkea sähkönkulutus, melutaso ja hinta ovat kylmäkompressorijäädytyksen haittapuolia.

## **Kuivajää**

Jos mikroprosessorin lämpötila halutaan laskea alle -50 celsiusasteen, edullinen ja helppo keino on käyttää yhden ilmakehän paineessa -79 celsiusasteista hiilidioksidijäää eli kuivajäää. Se valmistetaan hiilidioksidista alentamalla painetta ja lämpötilaa hallitusti. Nestemäinen hiilidioksidi muuttuu puhtaaksi, valkoiseksi ja kylmäksi hiilihappolumeksi, joka puristetaan korkeassa paineessa kuivajääpaloiksi. Nimensä kuivajää on saanut siitä, että se sublimoituu eli höyrystyy kiinteästä olomuodosta suoraan kaasuksi muuttumatta välillä nesteeksi. Kuivajäällä on erittäin suuri ominaishöyrystymislämpö eli 573,6 kJ/kg ja höyrystyminen tapahtuu -78,5 celsiusasteen lämpötilassa normaali-ilmapaineessa. [53]

Markkinoilla ei ole kaupallisia kuivajäää hyödyntäviä ratkaisuja mikroprosessorin jäädyttämiseen, vaan sen käyttö on vakiintunut harrastelijoiden keskuudessa lyhytkestoisissa kokeilumielisissä ylikellotustesteissä. Kuivajääjäädytyksessä mikroprosessorin päälle asennetaan alumiininen tai kuparinen kulho, joka täytetään kuivajäällä ja joukkoon sekoitetaan vahvaa pakkasen kestävää alkoholia, kuten esimerkiksi mahdollisimman puhdasta etanolia. Etanoli, jonka lämmönjohtavuus on 0,182 W/m·K [46], täyttää kuivajäärakeiden väliin jäävät ilmataskut ja johtaa mikroprosessorin tuottaman lämmön kulhon kautta paremmin kuivajäähän kuin ilma.

## **Nestemäinen typpi**

Typen ominaishöyrystymislämpö 200 kJ/kg ei ole aivan yhtä suuri kuin kuivajäällä, mutta se on nestemäisenä huomattavasti kylmempää. Nestemäisen typen kiehumispiste on -196 celsiusastetta, joka mahdollistaa mikroprosessorin nopean jäädytyksen erittäin alhaiseen lämpötilaan. Ensimmäisenä typen onnistuivat nesteyttämään vuonna 1883 Jagiellonian yliopistossa puolalaiset fyysikot Zygmunt Wróblewski ja Karol Olszewski [54]. Nestemäinen typpi valmistetaan puristamalla ilmaa, joka koostuu 80 % typestä,

korkeaan paineeseen ja päästämällä se laajentumaan, minkä seurauksena se kylmenee Joule-Thomsonin efektin mukaisesti [55]. Koska typpi kiehuu alhaisemmassa lämpötilassa kuin ilma, voidaan se erottaa ilmasta tislamalla ja puristaa uudelleen, kunnes se jäähtyy nestemäiseksi. Nestemäinen typpi on olomuodoltaan hieman vettä kevyempi väritön ja hajuton neste [56].

Nestemäisen typen käyttö on yleistynyt mikroprosessorin jäähdytyskeinona lyhykestoisissa testeissä harrastajien keskuudessa, mutta myös mikroprosessorivalmistajat Intel ja AMD ovat käyttäneet jäähdytysmenetelmää omissa teknologiaesityksissään saavuttaakseen mahdollisimman korkeita kellotaajuuksia. Markkinoilla ei ole nestemäiseen tyypeen perustuvia kaupallisia jäähdytysratkaisuja, vaan sitä käytetään harrastelijoiden toimesta samoin kuin kuivajäää eli kaatamalla sitä alumiiniseen tai kupariseen mikroprosessorin päälle asennettuun kulhoon. Mikroprosessorin tuottama lämpö johtuu sen päälle asennettuun kulhoon ja nestemäinen typpi sitoo höyrystyessään kulhon lämmön itseensä.

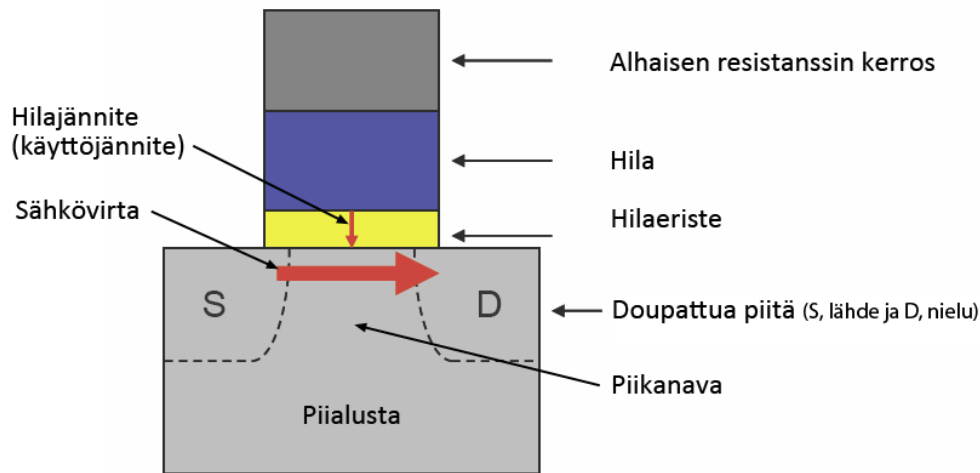
### **Nestemäinen helium**

Helium on maailmankaikkeuden toiseksi yleisin alkuaine vedyn jälkeen ja sitä muodostuu maaperässä radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Heliumia saadaan tuotettua erottamalla sitä maakaasusta. Vuonna 1908 hollantilainen fyysikko Heike Kamerlingh Onnes onnistui ensimmäisen kerran nesteyttämään heliumia. Heliumin nesteytystekniikat perustuvat lähes poikkeuksetta kiertoprosesseihin, joissa olennaisena osana olevan työnesteen annetaan vuoron perään puristua, laajentua sekä vaihtaa lämpöä ympäristön kanssa. Heliumin nesteytyksen perustekniikka on säilynyt miltei muuttumattomana vuosien saatossa. [57]

Nestemäinen helium on kylmin maapallolla esiintyvä neste ja sen kiehumispiste on  $-268,9$  celsiusastetta [45]. Nestemäisen heliumin ominaishöyrystyslämpö on noin 10 kertaa heikompi kuin nestemäisellä typpellä, mutta alhaisemman lämpötilan ansiosta sen avulla mikroprosessorilla voidaan jäähdyttää alle  $-200$  celsiusasteeseen. Nestemäinen helium on hajuton, väritön eikä se ole syövyttävää, palavaa eikä myrkyllistä [58]. Kuten kuivajään ja nestemäisen typen tapauksissa, markkinoilla ei ole kaupallisia ratkaisuja mikroprosessorin jäähdyttämiseksi, jotka hyödyntäisivät nestemäistä heliumia. Alhaisen ominaishöyrystyslämmön takia nestemäistä heliumia vaaditaan huomattavasti suurempi määrä kuin nestemäistä tyyppiä ja sen hinta on moninkertainen. Mikroprosessorin toimintaa ja ylikellottamista on testattu kokeellisessa mielessä nestemäisellä heliumilla alle  $-200$  celsiusasteessa onnistuneesti muutamia kertoja harrastelijoiden sekä mikroprosessorivalmistaja AMD:n toimesta. Nestemäistä heliumia käytetään samoin kuin nestemäistä tyyppiä eli sitä syötetään mikroprosessorille asennettuun alumiinista tai kuparista valmistettuun kulhoon.

### 3.5. Käyttöjännite

Mikroprosessorit vaativat toimiakseen tietyn käyttöjännitteen, josta käytetään usein termejä  $V_{core}$  ja  $V_{cc}$ . Valmistaja määrittelee jokaiselle mikroprosessorimallilleen toimintaan vaadittavan käyttöjännitteen tai jännitealueen, jonka emolevyn virransyöttö syöttää prosessorikannan kautta mikroprosessorille. Mikroprosessoreiden valmistustekniikan pienentyessä myös transistorien ohjaamiseen tarvittava käyttöjännite on pienentynyt merkittävästi. Ensimmäisissä mikroprosessoreissa käytettiin viiden voltin käyttöjännitettä suoraan virtalähteestä, mutta pienempien viivavevyksien eli transistorien pienemmän koon myötä ensin siirryttiin virtalähteen 3,3 volttiin ja lopulta emolevylle integroidun jännitteen regulointipiiriin (VRM, Voltage Regulator Module) kautta vieläkin alhaisempiin käyttöjännitteisiin. Nykypäivänä mikroprosessoreiden käyttöjännitteet ovat 32 ja 45 nanometrin valmistustekniikoilla mallista ja rasitusasteesta riippuen noin 0,8-1,5 volttia.



Kuva 3.1. MOSFET-transistorin perusrakenne.

Käyttöjännitteellä ohjataan mikroprosessorin piisiruun integroituja satoja miljoonia transistoreita, jotka ovat yhdistetty toisiinsa kuparijohtimilla tietyssä piirikuviossa. Transistorit toimivat yksinkertaisina kytkiminä, joiden kaksi tilaa toimii elektronisen tiedon ykkösinä ja nollina, joihin mikroprosessorin toiminta perustuu. Nykypäivän mikroprosessoreissa käytettävät CMOS-logiikkaan perustuvat kanavatransistorit rakentuvat piialustalle integroiduista lähteestä, nielusta ja niitä yhdistävästä puolijohdekanavasta. Kanava on eristetty sähköisesti ohuella hilaeristeellä hilasta, jota ohjataan hilajännitteellä. Hilalle syötettävällä transistorin käyttöjännitteellä ohjataan lähteestä nieluun kulkevan virran voimakkuutta ja transistorin kytkentätilaa eli johtaako se virtaa vai ei (kuva 3.1.).

Transistorit suunnitellaan siten, että niiden kynnyksjännite olisi mahdollisimman alhainen, jotta suorituskyky olisi mahdollisimman hyvä. Kanavan pituudella eli lähteen ja

nielun välisellä etäisyydellä on olennainen vaikutus transistorin tilanvaihtonopeuteen. Kehittyneempien litografiatekniikoiden myötä kanavan pituutta on mahdollista pienentää nykyisestä merkittävästi, mutta kun lähteen ja nielun välinen etäisyys tulee tiettyä kriittistä pistettä pienemmäksi, tapahtuu lyhytkanavaimiö, jolloin hila ei enää pysty ohjaamaan kanavavirran kulkua ja transistori lukittuu pysyvästi johtavaan tilaan. Nykyisen CMOS-transistoritekniikan etuja ovat hyvä suorituskyky eli transistorien kytkentänopeus, minimaalinen tehonkulutus, sillä kanavavirran ohjaukseen tarvitaan vain jännite ja teoriassa ei lainkaan virtaa sekä edulliset valmistuskustannukset.

Alhaisen kynnysjännitteen saavuttamiseksi ja transistorien suorituskyvyn parantamiseksi valmistustekniikoita kehitetään jatkuvasti, mutta pienempiin transistoreihin siirryttäessä kohdataan erilaisia fyysisiä ja teknisiä ongelmia sekä haasteita. Esimerkiksi ideaalisessa tilassa ohut kanavan ja hilan toisistaan erottava hilaeriste toimii täydellisenä eristeenä. Paremman kanavavirran voimakkuuden saavuttamiseksi hilaeriste on nykyisin enää muutamien atomien paksuinen ja saattaa aiheuttaa virran vuotoa sen läpi. Ohut hilaeriste mahdollistaa transistorin nopeamman kytkennän, mutta virtavuoto johtaa epähaluttuihin seurauksiin, joita ovat transistorin käyttäytyminen väärin ja se kuluttaa enemmän tehoa kuin pitäisi. Intelin ja AMD:n nykyisissä valmistustekniikoissa on käytössä useita menetelmiä, jotka mahdollistavat pienemmät viivaleveydet ja transistorien paremman suorituskyvyn. Yksi läpimurroista transistorikehityksessä on ollut piiatomien venyttäminen, joka nopeuttaa transistorien kytkentää. Kanavassa olevat piiatomit ovat hilamaisessa rakenteessa ja niitä venytetään siten, että atomien väliin jää normaalia suurempi välimatka, jolloin NMOS-transistori kytkeytyy nopeammin. Vastaavasti PMOS-transistorissa piiatomien puristaminen kasaan ja atomien etäisyyksien lähentäminen auttaa kytkentänopeudessa. Intel on hiljattain korvannut perinteisesti piidioksidista valmistetun hilaeristeen hafnium-pohjaisella korkean  $k$ -arvon materiaalilla, jonka ominaisuudet ovat vastaavat kuin piidioksidilla, mutta se voi olla paksumpi ja vähentää virtavuotoja [59]. Koska korkean  $k$ -arvon hilaeriste ei ole yhteensopiva perinteisesti käytetyn polypiihilan kanssa, Intelin täytyi kehittää lisäksi sen tilalle uusi metallihila. Intel kutsuu nykyisin tuotannossa olevia 45 ja 32 nanometrin tekniikalla valmistettavia transistoreita high- $k$  + metal gate -transistoreiksi. AMD on kehittänyt yhteistyössä IBM:n kanssa SOI-tekniikkaa (silicon-on-insulator), jossa on pelkän piialustan sijaan kahden piikerroksen välissä eristekerros. Eristeenä käytetään yleensä piidioksidia tai harvemmin safiiria.

### **3.6. Kellotaajuuden, käyttöjännitteen ja lämpötilan välinen suhde**

Mikroprosessorin miljoonat transistorit vaihtavat tilaansa synkronoituna sisäiseen kellotaajuuteen, joka on nykypäivän suorituskykyisimmissä prosessoreissa noin 3,5 gigahertsiä eli transistorit voivat vaihtaa tilaansa tarvittaessa 3,5 miljardia kertaa sekunnissa. Ylikellottamisessa kasvatetaan mikroprosessorin kellotaajuutta, jonka seurauksena transistorit vaihtavat tilaansa nopeammin. Esimerkiksi vakiona 3,5 gigahertsin kellotaajuudella toimivan mikroprosessorin ylikellottaminen 4,0 gigahertsiin tarkoittaa sitä, että transistorit vaihtavat tilaansa neljä miljardia kertaa sekunnissa. Tilan

vaihtaminen täytyy tapahtua 14,3 % nopeammin eikä kanavassa kulkeva virta välttämättä enää riitä vaihtamaan transistorin tilaa riittävän nopeasti. Tämän seurauksena transistori ei kykene tuottamaan sille ohjattua loogista tilaa, joka johtaa järjestelmän epävakauteen sovelluksen tai käyttöjärjestelmän tekemien virheellisten laskutoimitusten myötä. Transistorien kanavassa kulkevan virran suuruutta voidaan kasvattaa korottamalla mikroprosessorille syötettävää käyttöjännitettä, jonka ansiosta kynnysjännite ylittyy helpommin ja transistorin tila vaihtuu nopeammin. MOSFET-transistorin kanavan virta  $I_d$  voidaan laskea kaavalla:

$$I_d = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left( (V_{gs} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right) \quad (3-5)$$

missä  $\mu_n$  on varauksen kuljettajien liikkuvuus,  $W$  hilan leveys,  $L$  hilan pituus,  $C_{ox}$  hilaoksidin kapasitanssi per yksikköala,  $V_{gs}$  transistorin käyttöjännite,  $V_{th}$  transistorin kynnysjännite ja  $V_{ds}$  transistorin nielun ja lähteen välinen jännite. Mikroprosessorin käyttöjännitteen korottaminen ja kellotaajuuden nostaminen eli transistorien vaihtotiheyden kasvattaminen lisäävät transistorien tuottamaa lämpöä. MOSFET-transistorin ohjausteho eli tehonkulutus transistorin vaihtaessa tilaa saadaan laskettua kaavalla:

$$P = CV^2f \quad (3-6)$$

missä  $C$  on kapasitanssi,  $V$  käyttöjännite ja  $f$  kellotaajuus. Mikroprosessorin lämmöntuoton kasvaessa, sitä on jäähdytettävä tehokkaammin. FET-transistorien lämpötilakerroin on negatiivinen, joten kun sen lämpötilaa lasketaan, kanavan virta kasvaa. Tämän seurauksena hilajännite ja kynnysjännite kasvavat [60]. Metallien, kuten mikroprosessorin johtimissa käytettävän kuparin, ominaisvastuksen lämpötilakerroin on positiivinen eli resistanssi kasvaa lämpötilan kasvaessa ja laskee lämpötilan laskiessa. Tämä tarkoittaa sitä, että mikroprosessoria jäähdytettäessä kuparijohtimissa virran suuruus kasvaa. Materiaalin ominaisvastus  $\rho$  eri lämpötiloissa ja resistanssi  $R$  voidaan määrittellä seuraavilla kaavoilla:

$$\rho = \rho_{20^\circ\text{C}}(1 + \Delta T\alpha) \quad (3-7)$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3-8)$$

missä  $\rho_{20^\circ\text{C}}$  on materiaalin ominaisvastus 20 celsiusasteessa,  $\alpha$  ominaisvastuksen lämpötilakerroin ja  $\Delta T$  lämpötilaero verrattuna 20 celsiusasteeseen. Resistanssia laskettaessa  $\rho$  on materiaalin ominaisvastus,  $l$  johtimen pituus ja  $A$  johtimen pinta-ala.

### 3.7. Ylikellottamisen riskit ja ongelmat

Mikroprosessorin ylikellottamiseen liittyy ongelmia ja riskejä. Kuluttajan näkökulmasta yksi suurimmista ongelmista on valmistajan tuotteelle myöntämän takuun umpeutuminen, kun mikroprosessoria käytetään valmistajan määrittelemien spesifikaatioiden ulkopuolella.

Fyysisellä tasolla mikroprosessorin toiminta valmistajan määrittelemien spesifikaatioiden ulkopuolella saattaa johtaa mikroprosessorin vaurioitumiseen eli se ei enää kykene suorittamaan sille suunniteltua tehtävää. Vauriomekanismit tapahtuvat yleensä alimmalla rautatasolla, mutta niiden vaikutukset havaitaan usein järjestelmätasolla eli tietokone ei esimerkiksi käynnisty, kun siihen kytketään virrat päälle. [61]

Ohjelmistopuolella liian korkea kelloaajuus tai toimintalämpötila voi ilmetä sovelluksien ja käyttöjärjestelmän epävakautena, jotka saattavat johtaa esimerkiksi virheellisiin laskutoimituksiin. Tämä johtuu siitä, että transistori ei kykene vaihtamaan tilaansa liian korkeassa lämpötilassa. Virheellisten rekisteriarvojen seurauksena mikroprosessori saattaa toimia tai palauttaa laskutoimitusten seurauksena arvoja, joiden pitäisi olla mahdottomia tapahtua. [62]

Järjestelmän luotettavuus määritellään todennäköisyydellä, jolla järjestelmä täyttää vaaditut spesifikaatiot tietyllä ajanjaksolla. Mikroprosessoreissa ei ole liikkuvia osia, joten ne kykenevät usein toimimaan luotettavasti useita vuosia etenkin lähellä huonelämpötilaa. Käytännössä nykypäivän integroidut piirit toimivat kuitenkin huomattavasti korkeammassa lämpötiloissa ja valitettavasti useimmat elektroniikkakomponentit ovat taipuvaisia vaurioitumaan, jos ne ovat pitkitetysti altistuneita liian korkealle yli spesifikaatioiden mukaiselle lämpötilalle. Jos ylikellottamisen myötä lisääntyneestä lämmöntuotosta ei huolehdi asianmukaisesti, mikroprosessorin sisälle voi syntyä jännitteitä tai venymiä, jotka saattavat aiheuttaa termomekaanisia vaurioita. Termisesti aiheutuvia jännityksiä ja venymiä syntyy mikroprosessorin sisässä esimerkiksi materiaalien eri lämpölaajenemiskertoimista ja lämpötilan gradienteista johtuen [61]. Vuotovirrat aktiivisissa laitteissa kaksinkertaistuvat jokaisen 10 celsiusasteen lämpötilanousun seurauksena ja tietyissä olosuhteissa 10–20 celsiusasteen korotus piirin lämpötilassa voi jopa kaksinkertaistaa vikataajuuden [26].

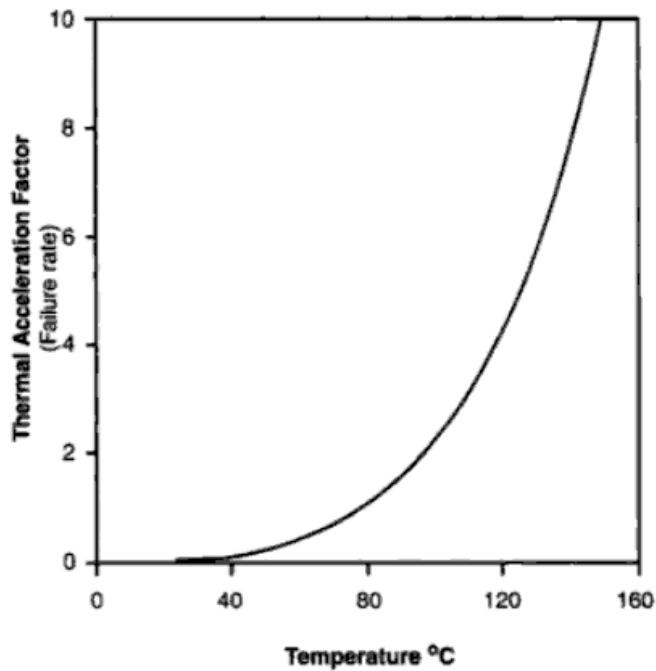
Elektromigraatio määritellään suurten virrantiheyksien aiheuttamana atomien liikkeenä metallijohtimissa. Integroituun piiriin liitetyt metalliatomit, kuten kääntösirukoteloinnissa käytettävät juotokset, ovat suuren virran ”elektronituulen” vaikutuksen alaisena. Atomit altistuvat mekaaniselle voimalle, jonka seurauksena ne irtoavat fyysisesti omilta paikoiltaan. Tämä aiheuttaa metalliaukkoja johtimiin ja kun prosessi jatkuu, resistanssin laskeminen läpi johtimen lisääntyy ja johtaa lopulta elektronisen piirin avautumiseen. Elektromigraatiosta saattaa seurata katastrofaalinen vaurio laitteeseen. [61]

Luotettavuusanalyseissä voidaan käyttää hyväksi Arrheniuksen yhtälöä määrittäessä jonkin komponentin lämpötilasta riippuvaa vikataajuutta ( $F$ ) ja vertailla laitteen vikataajuutta eri lämpötiloissa:

$$F = Ae^{-E_A/KT} \quad (3-10)$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{Ae^{E_A/KT_1}}{Ae^{E_A/KT_2}} \quad (3-11)$$

missä  $A_e$  on reaktion taajuustekijä,  $E_a$  reaktion aktivoitumisenergia elektronivolteina,  $K$  Boltzmannin vakio ( $8,63 \times 10^{-5}$  eV/K) ja  $T$  juoteliitosten lämpötila kelvineissä.  $T_1$  ja  $T_2$  ovat lämpötilat, joissa vikataajuutta halutaan vertailla.



Kuva 3.2. Vikataajuuden riippuvuus lämpötilasta [61].

Elektroniikkakomponenttien luotettavuuden ja toimintalämpötilan välillä on suora yhteys, joka on usein esitetty kuvan 3.2. kaltaisen kaavion muodossa. Kaavio kuvastaa vikataajuuden lähes eksponentiaalista riippuvuutta komponentin lämpötilan suhteen.

## 4. YLIKELLOTUSTESTIT

Mikroprosessoreiden ylikellottaminen on levinnyt maailmanlaajuisesti ja monille kuluttajille tietokoneen suorituskyvyn parantaminen mahdollisimman hyväksi on tavallinen harrastus. Ylikellottaminen voidaan jakaa kahteen kategoriaan, joista ensimmäisessä tavoitellaan päivittäiseen arkikäyttöön mahdollisimman suorituskykyistä ja vakaata tietokonetta ja toisessa tapauksessa tietokoneella yritetään saavuttaa mahdollisimman korkea hetkellinen suorituskyky tietyssä testiohjelmassa, jonka lopputulosta voidaan verrata muiden käyttäjien saavuttamiin tuloksiin. Nykypäivänä maailman parhaat tulokset testiohjelmissa vaativat huippuunsa viritetyn tietokoneen, jonka saavuttamiseksi komponenttien jäähdyttämisessä käytetään esimerkiksi nestemäistä tyypeä. Näin pitkälle harrastukselle omistautumista ja alhaisissa lämpötiloissa operoitavaa ylikellotettua tietokonetta kutsutaan extreme-ylikellottamiseksi.

Kouluprojektista lähtenyt ja nykyisin suurimmaksi osin harrastustoiminnalla pyöritettävä HWBot-sivusto (<http://www.hwbot.org>) ylläpitää listoja, valvoo omia sääntöjään ja pisteyttää suosituissa testiohjelmissa saavutettuja tuloksia. Sivustolle on rekisteröitynyt yli 20 000 ylikellottajaa, jotka ovat lähettäneet ylikellotetulla tietokoneellaan ajettuja testituloksia sivuston tietokantaan. Pisteytystä varten kehitetyt algoritmit antavat jokaisesta tuloksesta tietyn määrän henkilökohtaisia pisteitä ja joukkuepisteitä, jotka lasketaan yhteen henkilökohtaista ylikellottajien liigaa ja joukkueiden välistä järjestystä varten. Uusien tulosten myötä pistemäärä päivittyy ja sijoitukset vaihtuvat reaaliaikaisesti. Testiohjelmien parhaita tuloksia kutsutaan yhteisössä maailmanennätyksiksi, mutta ne ovat usein hyvin lyhytkestoisia, sillä markkinoille julkaistaan jatkuvasti uusia ja suorituskykyisempiä komponentteja, jotka voidaan ylikellottaa entistä suorituskykyisemmiksi.

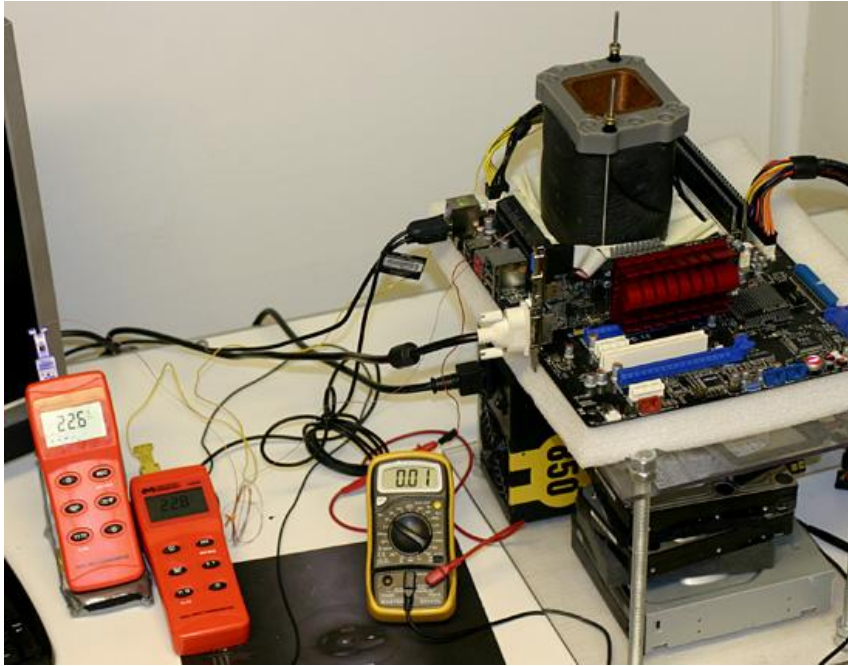
Komponenttivalmistajat ovat hyödyntäneet konseptia järjestämällä maailmanlaajuisia ylikellotuskilpailuja, joissa karsintojen kautta tai suoraan valitsemalla ylikellottajat kutsutaan kilpailupaikalle, kaikille jaetaan identtiset komponentit ja tietyssä ajassa ja sääntöjen puitteissa yritetään saavuttaa mahdollisimman hyvä tulos tietyissä testiohjelmissa. Kilpailujen palkinnot ovat viime vuosina olleet suuruudeltaan muutamia tuhansia euroja ja usein kilpailijat saavat vaivanpalkaksi osallistumisestaan myös komponenttipalkintoja.

## 4.1. Testikokoonpano

Käytännön ylikellotustestissä tutkittiin mikroprosessorin kykyä toimia valmistajan tehtaalla määrittämää spesifikaatiota korkeammalla kellotaajuudella. Kolmessa erillisessä mittauksessa mikroprosessorin ylikellottamista tutkittiin suhteessa sille syötettävään käyttöjännitteeseen ja lämpösuojan pinnasta mitattuun lämpötilaan sekä molempien yhdistelmään.

Mikroprosessorin ylikellotetun kellotaajuuden seurauksena testikokoonpanon hetkellisen vakauden ja suorituskyvyn mittaamiseen käytettiin Maxonin Cinebench R10 -testiohjelman, joka kuormittaa kaikkia käytössä olevia prosessoriytimiä tehtävienhallinnan mukaan 100 prosentin käyttöasteella. Cinebench R10 -testiohjelma on yksi monista mikroprosessorivalmistajien ja lehdistön käyttämistä testiohjelmissa mikroprosessorien suorituskykymittauksissa. Testissä mikroprosessorilla renderöitiin fotorealistinen 3D-ympäristö projektitiedostosta ja testiohjelma perustuu Maxonin Cinema 3D -animaatio-ohjelmistoon, jota on käytetty muun muassa Hämähäkkimies-, Star Wars- ja Narnian tarinat -elokuvien 3D-sisällön luomiseen. MAXON Cinebench R10 mittaa tietokoneen suorituskykyä antamalla tulokseksi 3D-ympäristön renderöintiin kuluneen ajan yhden sekunnin tarkkuudella ja on Maxonin mukaan 100 % vertailukelpoinen eri käyttöjärjestelmien ja laitekokoonpanojen kesken. [63]

Testeihin valittiin AMD:n 45 nanometrin SOI-tekniikalla valmistettavaan ja 758 miljoonasta transistorista rakentuvaa piisirua käyttävä Phenom II X4 965 Black Edition -mikroprosessori, jonka kellotaajuudeksi AMD on määrittänyt 3,4 gigahertsiä. Mikroprosessorissa on neljä ydintä, joista jokainen on varustettu 512 kilotavun suuruisella toisen tason välimuistilla sekä ytimien kesken jaetulla kuuden megatavun suuruisella kolmannen tason välimuistilla. AMD ilmoittaa teknisissä tuotetiedoissa Socket AM3 -kantaisen mikroprosessorin käyttöjännitteeksi 0,85–1,4 voltia ja toimintalämpötilaksi 0-62 celsiusastetta [64]. Mallinimen lisäosa Black Edition viittaa siihen, että mikroprosessorin kokonaiskellotaajuuden muodostava sisäinen kerroin on lukitsematon ja kuluttajan vapaasti määritettävissä [65].



*Kuva 4.1. Ylikellotustesteissä käytetty PC-tietokone.*

Alustaksi testikokoonpanoon (kuva 4.1. ja taulukko 4.1.) asennettiin ASUSTekin Crosshair III Formula -emolevy, joka perustuu AMD 790FX -piirisarjaan ja tukee AMD:n Socket AM3 -kantaisia mikroprosessoria sekä Double Data Rate 3 -muististandardia (DDR3). DDR3-muisteiksi asennettiin kaksi kappaletta Corsairin gigatavun suuruista CM3X1024-1800C7DIN-muistikampoja. Näytönohjaimeksi valittiin AMD:n Cedar-grafiikkapiiriin perustuva ATI Radeon HD 5450 -näytönohjain. Virtalähteenä toimi Antecin 850-wattinen TruePower Quattro. Käyttöjärjestelmäksi asennettiin Microsoftin Windows 7 Ultimaten 32-bittinen versio.

*Taulukko 4.1. Testikokoonpanon komponentit ja mittalaitteet*

Mikroprosessori	AMD Phenom II X4 965 Black Edition
Emolevy	ASUSTek Crosshair III Formula
DDR3-muistit	2 kpl Corsair CM3X1024-1800C7DIN
Näytönohjain	AMD ATI Radeon HD 5450
Virtalähde	Antec TruePower Quattro 850W
Tallennusmedia	Intel SSDSA2MH160G201
Käyttöjärjestelmä	Windows 7 Ultimate (32-bittinen versio)
Lämpömittari	Wavetek TDM90
Yleismittari	Mastech MAS830L
Kuparinen jäähdytyskulho	Kingpin Cooling Dragon F1 Extreme Edition

## 4.2. Testikonfiguraatio

Phenom II X4 965 Black Editionin lämpötilaa kontrolloitiin nestemäisellä tyypellä, jota kaadettiin mikroprosessorin päälle asennettuun kuparikulhoon. Nestemäisen tyypen avulla mikroprosessorin lämpötila pystyttiin pitämään Wavetek TDM90 -lämpömittarilla mitattuna 20 ja kryogeenisen -170 celsiusasteen välissä noin kolmen asteen tarkkuudella. 20 celsiusasteen lämpötila-arvo valittiin siksi, että se on lähellä tavallista huonelämpötilaa ja usein kiinteiden aineiden, nesteiden ja kaasujen ominaisuudet ilmoitetaan kyseisessä lämpötilassa. -170 celsiusastetta oli alhaisin nestemäisellä tyypellä saavutettu lämpötila, kun prosessori renderöi ylikellotettuna 100 % käyttöasteella Cinebench R10 -testiä.

Mikroprosessorin käyttöjännitettä säädettiin 0,025 voltin askelin AMD:n kotisivuilta ladattavissa olevalla OverDrive-ohjelmalla [66], jonka avulla käyttöjännitettä voidaan nostaa käyttöjärjestelmästä käsin. Käyttöjännitettä korotettiin OverDrive-ohjelmalla 1,65 volttiin ja emolevyltä mitattuna 1,592 volttiin asti eli noin 18 % vakiokäyttöjännitettä korkeammalle. Tämän korkeammalle testattavan mikroprosessorin käyttöjännitettä ei korotettu turvallisuussyistä, sillä 18 % korotus käyttöjännitteeseen lisää mikroprosessorin tehonkulutusta kaavan 3-6 mukaan noin 32 %.

Ylikellottaminen suoritettiin samalla OverDrive-ohjelmalla korottamalla mikroprosessorin sisäistä kerrointa, joka kertoo ulkoisen 200 MHz:n peruskellon tietyllä kokonaisluvulla tai kokonaisluvun puolikkaalla. Sisäisen kertoimen nostaminen puolikkaalla tarkoittaa 100 MHz:n korotusta Phenom II X4 965 Black Editionin kokonaiskellotaajuuteen.



*Kuva 4.2. Mikroprosessorin geometriseen keskikohtaan liitetty lämpötila-anturi.*

AMD jyrsi Austinissa Yhdysvalloissa sijaitsevassa lämpölaboratoriossaan testejä varten CNC-koneella mittatilaustyönä Phenom II X4 965 Black Edition -prosessorin kupariseen piisirua suojaavaan lämmön levittäjän pintaan uran, joka ulottuu prosessorin geometriseen keskikohtaan asti (kuva 4.2.). Ura on 0,381 millimetriä leveä ja 0,508 millimetriä syvä. Ura on jyrstetty niin syväksi, että siihen oli mahdollista asettaa lämpöanturin johdin siten, ettei johdin vaurioidu tai puristu, kun mikroprosessorin päälle asennetaan jäähdityselementti.

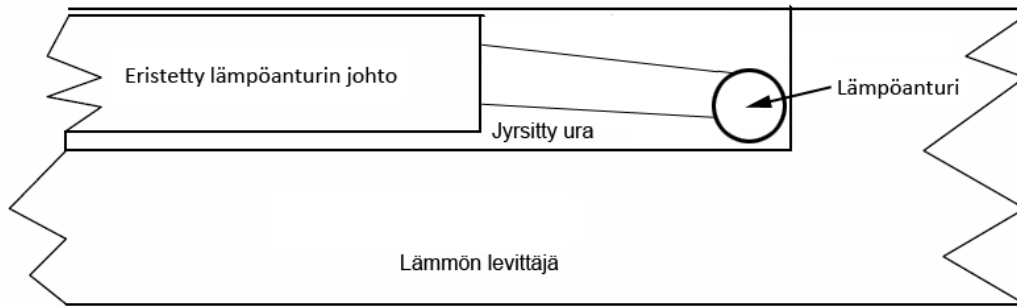


*Kuva 4.3. Mikroprosessorin lämmön levittäjään merkityt tuotetiedot.*

Piisirun päälle asennettuun lämmön levittäjään on merkitty tiedot AMD Phenom II -mikroprosessorista (kuva 4.3.):

HDZ965FBK4DGM  
CACAC AC 0944EPMW  
9A86771K90170  
Diffused in Germany  
Made in Malaysia

Kirjain- ja numerokoodeista voidaan tulkita AMD:n Processor Ordering Part Number Description -tietojen [67] avulla seuraavat yksityiskohdat: H tarkoittaa AMD Phenom -mallia, D tarkoittaa desktop- eli työpöytäprosessoria, Z965 tarkoittaa Black Edition -mallia ja 965-mallinumeroa, FB viittaa 125 watin TDP-arvoon, K mikroprosessorin kotelointiin ja Socket AM3 -prosessorikantaan, 4 ytimien lukumäärään, GM osan määrittelyyn eli piisirun versioon ja rekisteriarvoon. Mikroprosessorin piisiru on valmistettu vuoden 2009 viikolla 44 Saksassa ja koteloitu Malesiassa.



*Kuva 4.4. Poikkileikkauskuva lämpöanturin asentamisesta lämmön levittäjään jyrsittyyn uraan.*

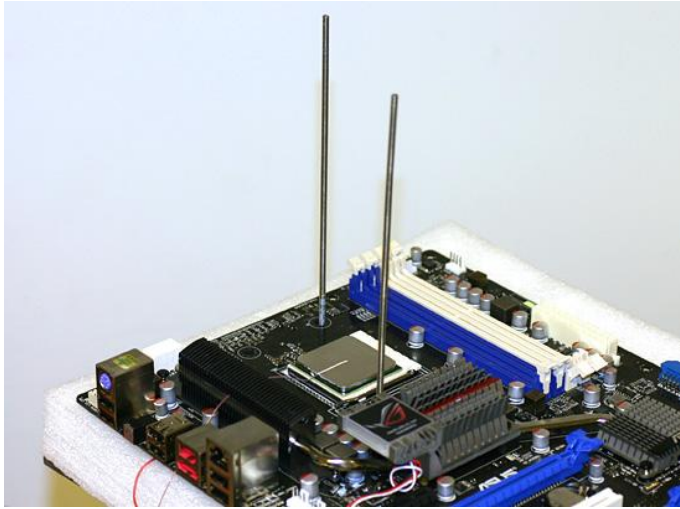
Mikroprosessoriin liitetty lämpöanturi on Omegan valmistama ja mallinumeroltaan SC-TT-K-36-36 [68]. Kyseessä on metrin mittaisella 0,127 millimetrin paksuisella johdolla varustettu K-tyypin lämpöanturi, jonka lämpötila-alue on -200–1250 celsiusastetta. Lämpöanturin ja lämpösuojan uran väliin on injektoitu pieni pisara lämpöä johtavaa Dow Corning 340 -lämpötahnaa [69] ja lämpöanturi sekä johdin kiinnitetty uraan Omegan lämpöä johtavalla Engineering's Omegabond 101 -epoksilla [70]. Näin mikroprosessorista saatiin mitattua Wavetekin TDM90-lämpömittarilla testien aikana tismalleen samasta kohdasta lämpötila-arvo mahdollisimman läheltä piisirua 0,1 celsiusasteen tarkkuudella ja mitatut lämpötila-arvot ovat vertailukelpoisia keskenään. Työssä mikroprosessorin geometrisesta keskikohdasta mitattua lämpötila-arvoa kutsutaan jatkossa  $T_c$ :ksi (kuvat 4.3. ja 4.4.).



*Kuva 4.5. Emolevyn eristys takapuolelta Armaflex-solumuovimatolla.*

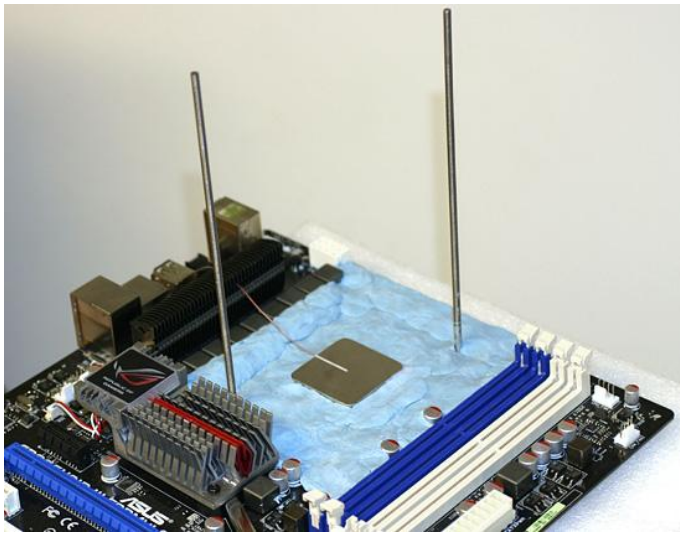
Emolevyn takapuolelle asetettiin Armaflex-solumuovimaton palanen, joka estää kondensaation muodostumista Socket AM3 -kannan kohdalle testien aikana, kun mikroprosessorin lämpötila laskee alle ympäristön lämpötilan. Lisäksi kuvassa näkyy

alumiininen taustalevy, joka tukee emolevyä ja siihen kierretään mikroprosessorille asennettavan kuparikulhon kiristämiseen käytettävät kierretangot (kuva 4.5.).



*Kuva 4.6 Phenom II X4 965 Black Edition asennettuna emolevyllle.*

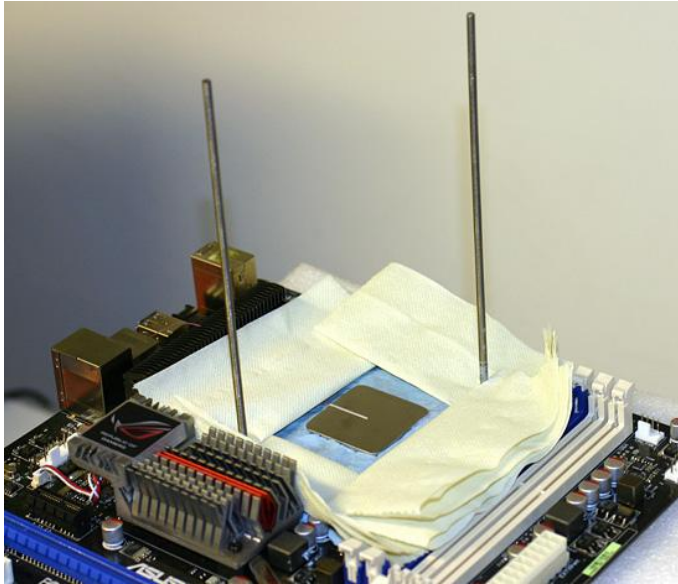
AMD Phenom II X4 965 Black Edition asennettiin Asus Crosshair III Formula -emolevyn Socket AM3 -prosessorikantaan ja kannan lukitusvipu käännettiin alas. Prosessorikannan ympärillä olevista rei'istä pujotettiin ja kierrettiin kierretangot emolevyn taustapuolelle asetettuun alumiinilevyyn (kuva 4.6.).



*Kuva 4.7. Mikroprosessorin ja Socket AM3 -kannan ympäristö eristettynä hiilikumilla.*

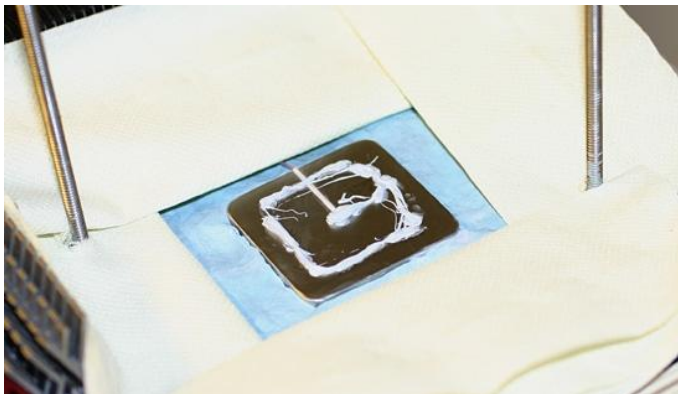
Mikroprosessorin ympäristö eristettiin hiilikumilla (kuva 4.7.), joka on valmistettu ei-vulkanoidusta kumista ja muovautuu painelemalla tiiviisti emolevyn komponenttien ympärille. Hiilikumin ensisijaisena tarkoituksena on eristää emolevyn komponentit mikroprosessorin jäähdyttämisessä metallipinnoille muodostuvalta kondensaatiolta, joka

pahimmassa tapauksessa voi aiheuttaa emolevyllä oikosulun ja vaurioittaa tietokoneen komponentteja. Toissijaisesti hiilikumi toimii myös lämpöeristeenä, sillä sen lämmönjohtavuus on huono eli noin  $0,13\text{--}0,16\text{ W/m}\cdot\text{K}$  [45]. Eristyksessä voidaan käyttää myös muita materiaaleja, kuten vaseliinia, piirilevyllakkaa, solumuovia tai pehmopaperia, mutta kaikissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Hiilikumin käyttö on yleistynyt harrastajien keskuudessa edullisen hinnan, helpon muovattavuuden ja kohtalaisen siisteyden ansiosta sitä poistaessa.



*Kuva 4.8. Pehmopaperia estämässä kondensaatiota.*

Socket AM3 -prosessorikannan ympärille painellun hiilikumin päälle asetettiin vielä pari kerrosta pehmopaperia varmuuden vuoksi imemään mahdolliset pienet vesipisarat itseensä estämässä oikosulkuja emolevyllä (kuva 4.8).

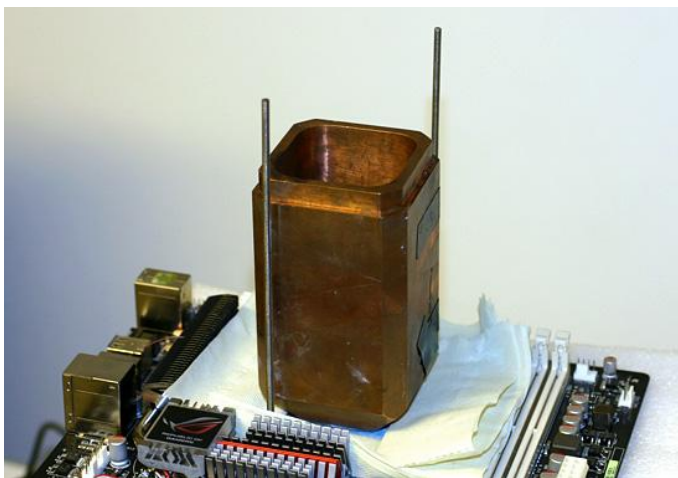


*Kuva 4.9. Lämpötahnaa pursotettuna mikroprosessorin päälle.*

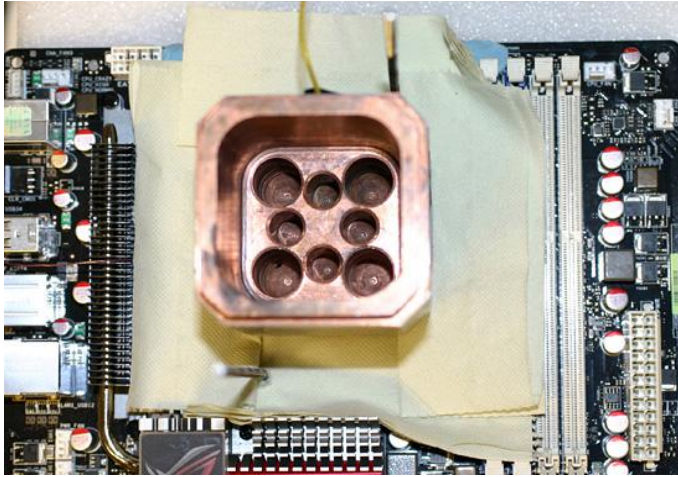


*Kuva 4.10. Lämpötahna testien jälkeen levinneenä kulhon ja mikroprosessorin väliin.*

Mikroprosessorin päälle levitettiin OCZ:n valmistamaa Freeze Extreme Thermal Conductivity Compound -lämpötahnaa, jonka lämpöresistanssi on valmistajan mukaan  $3,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  [71]. Tahna levitettiin tasaisesti mikroprosessorin lämpösuojan päälle minimoimaan ilmataskut (kuva 4.9). Testien jälkeen, kun kuparikulho oli lämmitetty huoneen lämpöiseksi ja irrotettu, nähtiin miten lämpötahna oli levinnyt ja täyttänyt mikroskooppiset ilmataskut kuparikulhon ja mikroprosessorin välissä (kuva 4.10).

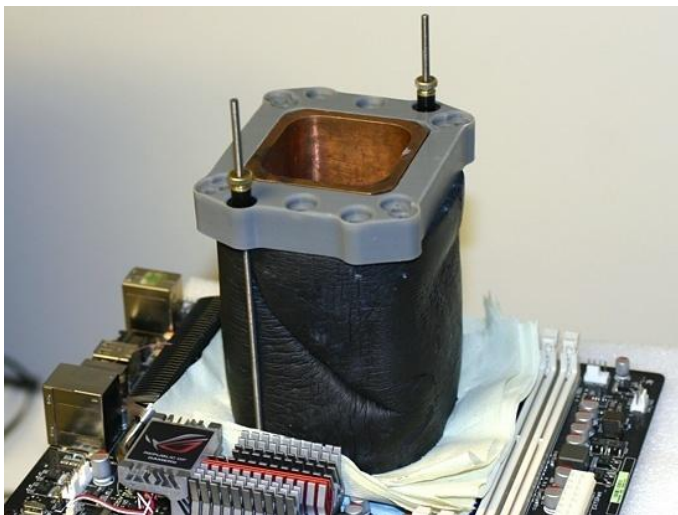


*Kuva 4.11. Kuparinen kulho asetettuna mikroprosessorin päälle.*



*Kuva 4.12. Kuparikappaleeseen jyrksityn sisuksen kuvio.*

Lämpötahnan levittämisen jälkeen mikroprosessorin päälle asetettiin 2,3 kilogramman painoinen Dragon F1 Extreme Edition -kuparikulho, jonka on valmistanut yhdestä kuparipalasta jyrsimällä yhdysvaltalainen Kingpin Cooling [72] (kuva 4.11. ja 4.12.). Käytettävän kuparin laadusta ja puhtaudesta ei ole tiedossa tarkempia yksityiskohtia. Kuparisen kulhon lämpötilaa kontrolloidaan kaatamalla sen sisälle nestemäistä tyypeä ja testeissä mikroprosessorin lämpötila pystyttiin pitämään halutussa  $T_c$ - arvossa kolmen asteen tarkkuudella.

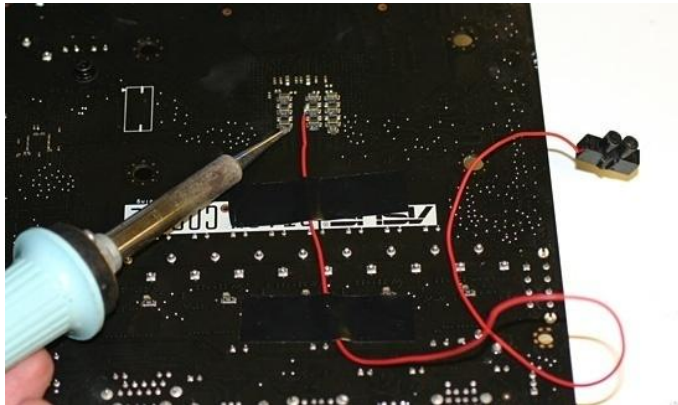


*Kuva 4.13. Kuparinen kulho eristettynä Armaflex-solumuovilla ja kiristettynä.*

Kulhon ympärille pujotettiin Armaflex-solumuoviputki, joka eristää kuparin ilmasta ja estää kondensaation syntymistä metallipinnalle. Kulhon yläosaan asetettiin muovinen sapluuna, jonka rei'istä pujotettiin läpi emolevyn takapuolelle asetettuun alumiinilevyyn kiinnitetyt kierretangot. Sapluuna kiristettiin huolellisesti muttereilla siten, että

kuparikulhon ja mikroprosessorin kontakti oli mahdollisimman tiivis ja ilmataskut täyttyivät piitahnalla (kuva 4.13).

### 4.3. Mittaukset



Kuva 4.14. Emolevylle juotettiin mittauspiste mikroprosessorin käyttöjännitteelle.

Koska ohjelmalliset jännitearvot mikroprosessorin käyttöjännitteestä vaihtelevat käytettävästä ohjelmasta riippuen, emolevyn takapuolelle juotettiin suoraan Socket AM3 -prosessorikannan kohdalle johdin kiinni pintaliitoskondensaattoriin (kuva 4.14.). Ihanteellisin mittauspiste käyttöjännitteelle olisi suoraan mikroprosessorin liitäntäpinnistä, mutta liitäntäpinnien pienen koon, Socket AM3 -prosessorikannan mekaanisen rakenteen, eristysten ja prosessoriin kohdistuvien voimien takia mittauspisteeksi valittiin emolevyn alapuoli. Mikroprosessorin käyttöjännitettä mitattiin Mastechin MAS830L-mallisella yleismittarilla 0,001 voltin tarkkuudella.



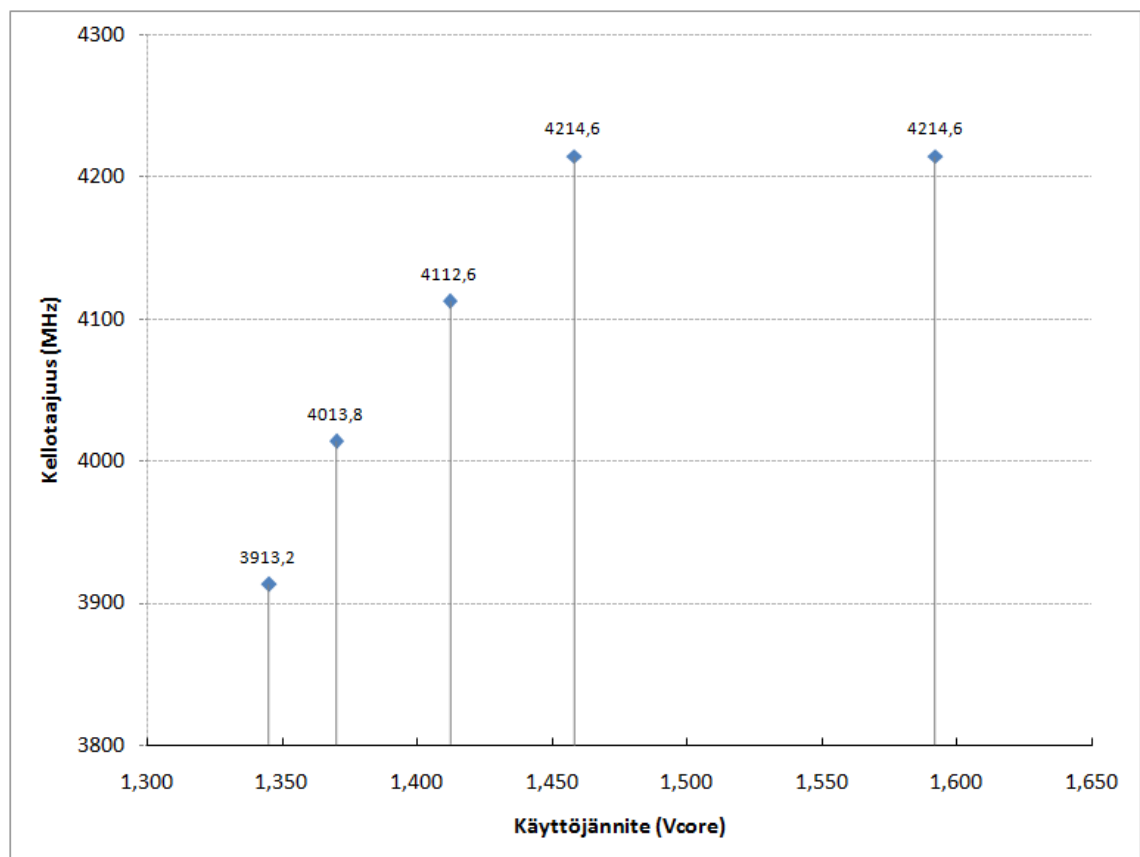
Kuva 4.15. Mikroprosessorin  $T_c$ -lämpötilaksi mitattu 20,2 celsiusastetta.

Mikroprosessorin  $T_c$ -lämpötila geometrisesta keskikohdasta mitattiin Wavetekin TDM90-lämpömittarilla 0,1 asteen tarkkuudella (kuva 4.15.). Mikroprosessorin

suorituskykyä mitattiin kirjaamalla ylös Cinebench R10 -testin ilmoittama 3D-renderöintiin kulunut aika yhden sekunnin tarkkuudella.

#### 4.3.1. Kellotaajuuden skaalautuminen käyttöjännitteen suhteen

Mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautumista käyttöjännitteen suhteen testattiin siten, että mikroprosessorin  $T_c$ -lämpötila pyrittiin pitämään lämpöä levittävän suojan pinnasta mitattuna 20 celsiusasteessa (liite 1). Testeissä mitatun  $T_c$ -lämpötilan pitäminen koko testin ajan tasan 20 celsiusasteessa on mahdottomuus, sillä AMD Phenom II X4 965 Black Editionin 758 miljoonan transistorin tuottama lämpökuorma on niin suuri, että rasiuksen alkaessa lämpötila nousee sekunneissa useita asteita. Cinebench R10 -testi käynnistettiin  $T_c$ -lämpötilan ollessa noin 18 celsiusastetta ja kulhoon kaadettiin samanaikaisesti nestemäistä typpeä siten, että  $T_c$ -lämpötila nousi maksimissaan 22 asteeseen ja laski testin aikana noin 20 asteeseen. Kaavioissa sinisellä pallolla esitetty kellotaajuus on korkein kellotaajuus, jolla Cinebench R10 -testi saatiin ajettua onnistuneesti läpi testeissä käytetyillä parametreilla (lämpötila ja käyttöjännite).



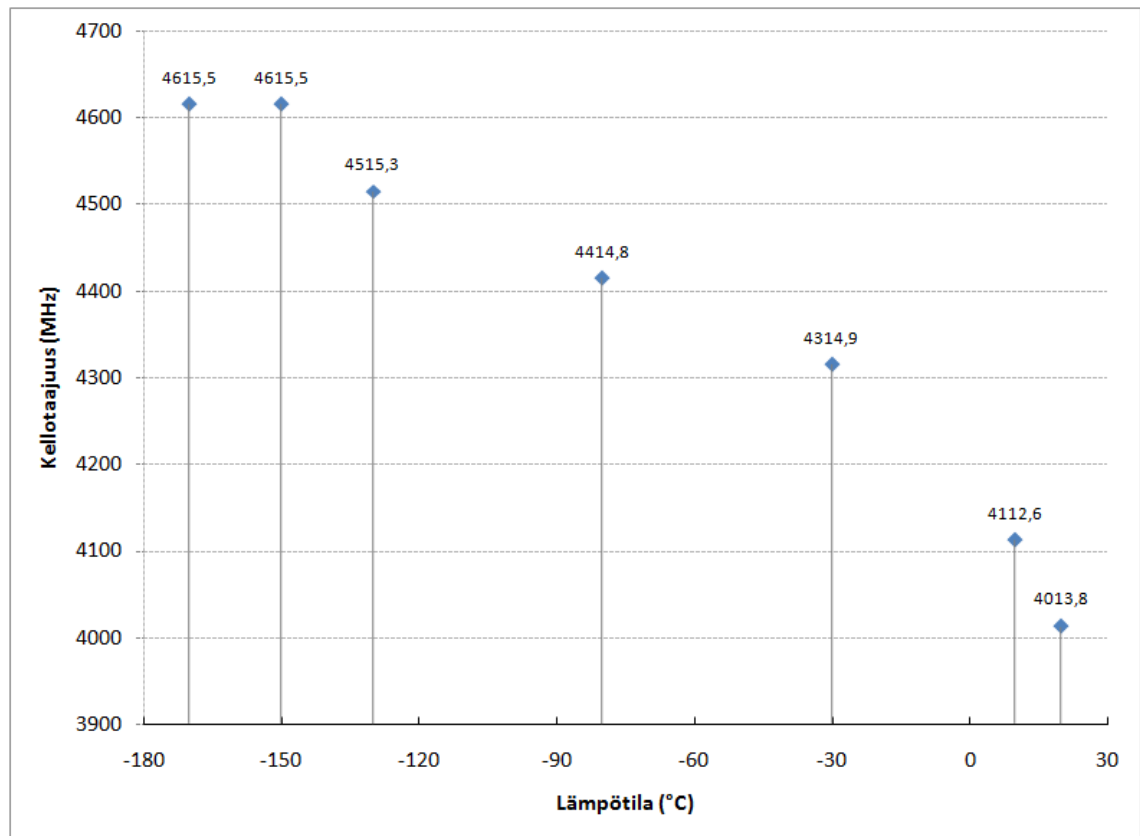
Kuva 4.16. Mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautuminen käyttöjännitteen suhteen.

Testit aloitettiin syöttämällä AMD Phenom II X4 965 Black Editionille valmistajan määrittelemä 1,375 voltin vakiojännite OverDrive-ohjelmasta asetettuna (mitattuna 1,345 voltia). AMD Phenom II X4 965 Black Edition suoritti Cinebench R10 -testin

laskenta-algoritmit onnistuneesti vakiokäyttöjännitteellä 3913,2 megahertsin kellotaajuudelle asti, mutta 4013,6 megahertsin kellotaajuudella järjestelmä kaatui joko käyttöjärjestelmän virheeseen tai testikokoonpano käynnistyi kokonaan varoittamatta uudelleen. Kun käyttöjännite korotettiin OverDrivella 1,400 volttiin (mitattuna 1,370 voltia), Cinebench R10 -testi suoritui laskutoimituksista onnistuneesti 4013,8 MHz:n kellotaajuudella, mutta seuraava askel eli 4112,6 megahertsin kellotaajuus vaati Cinebench R10 -testin onnistuneeseen läpäisyyn käyttöjännitteen korottamisen 1,45 volttiin (mitattuna 1,412 voltia). Viimeinen käyttöjännitettä korottamalla vakaasti toiminut kellotaajuus oli 4214,6 megahertsia, joka saavutettiin asetetulla 1,475 voltin käyttöjännitteellä (mitattuna 1,458 voltia). Seuraava askel eli 4314,7 MHz osoittautui liian korkeaksi kellotaajuudeksi Cinebench R10 -testin läpäisyyn 20 celsiusasteen  $T_c$ -lämpötilassa, eikä käyttöjännitteen korottaminen 1,65 volttiin (mitattuna 1,592 volttiin) auttanut mikroprosessorin toimintaan.

#### 4.3.2. Kellotaajuuden skaalautuminen lämpötilan suhteen

Mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautumista lämpötilan suhteen testattiin pitämällä syötettävä käyttöjännite 1,4 voltissa ja laskemalla mikroprosessorin lämpöä levittävän suojan pinnasta mitattavaa  $T_c$ -lämpötilaa (liite 2). Mikroprosessorin käyttöjännitteeksi mitattiin  $T_c$ -lämpötilan ollessa 20 celsiusastetta 1,401 voltia, mutta -170 celsiusasteessa käyttöjännite oli laskenut 0,004 voltilla 1,397 volttiin. Mikroprosessorin  $T_c$ -lämpötilaa laskettiin nestemäisen tyyppien avulla 10 celsiusasteen askelin -170 celsiusasteeseen asti. Testeissä  $T_c$ -lämpötila nousi rajusti kellotaajuuden kasvaessa Cinebench R10 -testin käynnistyessä samaan tapaan kuin edellisessä mittauksessa. Tästä syystä testi käynnistettiin  $T_c$ -lämpötilan ollessa kolme astetta alhaisempi kuin haluttu lämpötila-arvo ja ensimmäisten sekuntien aikana lämpötila nousi rajusti noin viidellä asteella maksimissaan kaksi astetta yli halutun lämpötila-arvon, mutta tasaantui muutamassa sekunnissa haluttuun lämpötila-arvoon.



Kuva 4.17. Mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautuminen lämpötilan suhteen.

Mittaus aloitettiin 20 celsiusasteen  $T_c$ -lämpötilasta 4013,8 megahertsin kellotaajuudella, jolla Cinebench R10 -testi saatiin ajettua onnistuneesti läpi edellisessä mittauksessa käytetyllä 1,4 voltin käyttöjännitteellä. 4112,6 MHz:n kellotaajuuteen vaadittiin 10 celsiusasteen  $T_c$ -lämpötila ja 4214,6 MHz:n kellotaajuuteen 0 celsiusastetta. 4314,9 MHz:n kellotaajuudella  $T_c$ -lämpötila jouduttiin laskemaan -30 celsiusasteeseen ja 4414,8 MHz:n kellotaajuuteen vaadittiin  $T_c$ -lämpötilan laskeminen -80 celsiusasteeseen. 4515,5 MHz:n kellotaajuudella Cinebench R10 -testi saatiin ajettua läpi  $T_c$ -lämpötilan ollessa -130 celsiusastetta ja 4615,5 MHz:n kellotaajuuteen vaadittiin -150 celsiusastetta. 4715,9 MHz:n kellotaajuudella testiä ei saatu ajettua onnistuneesti läpi 1,4 voltin käyttöjännitteellä, vaikka  $T_c$ -lämpötila laskettiin -170 celsiusasteeseen.

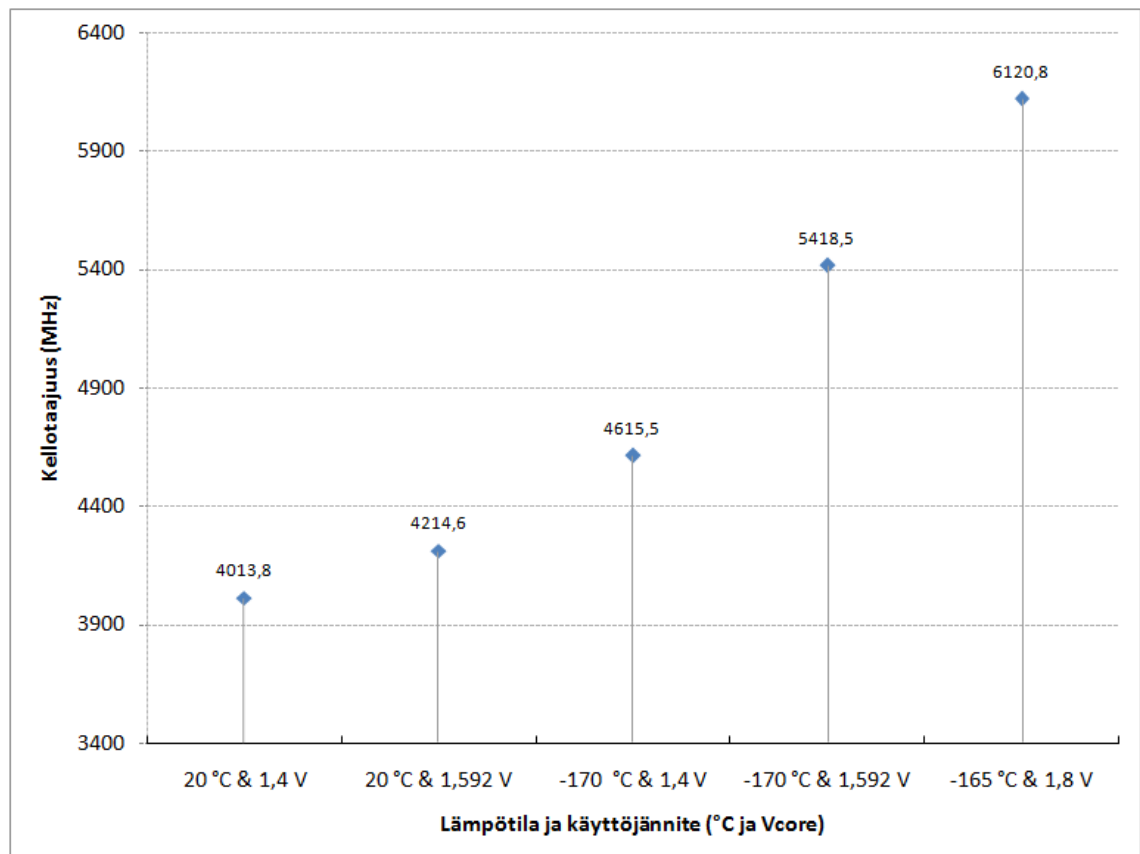
### 4.3.3. Kellotaajuuden skaalautuminen käyttöjännitteen ja lämpötilan suhteen

Kun mikroprosessorille syötettiin ensimmäisessä mittauksessa käytetty OverDrivesta asetettu 1,65 voltin käyttöjännite (mitattuna 1,592 voltia) ja  $T_c$ -lämpötila laskettiin toisessa testissä alimmillaan käytettyyn -170 celsiusasteen, Cinebench R10 -testi pystyttiin ajamaan onnistuneesti läpi AMD Phenom II X4 965 Black Editionin toimiessa 5418,5 MHz:n kellotaajuudella.

-170 celsiusasteen lämpötilassa mikroprosessorin käyttöjännitettä uskallettiin korottaa vielä yli ensimmäisessä mittauksessa käytetyn OverDrive-ohjelmasta asetetun 1,65 (mitattuna 1,592 voltia). Kun käyttöjännite korotettiin 1,8 volttiin, AMD Phenom II X4 965 Black Editionin kellotaajuus saatiin nostettua aina 6120,8 MHz:iin asti. Käyttöjännitteen korottamisesta seuranneen kasvaneen lämmöntuoton seurauksena  $T_c$ -lämpötila pystyttiin pitämään alhaisimmillaan testin aikana nestemäisen tyypin avulla -165 celsiusasteessa.

#### 4.4. Mittaustulosten yhteenveto

Mittauksissa kokeiltiin AMD Phenom II X4 965 Black Edition -mikroprosessorin ylikellottamista yli valmistajan määrittämän 3411,7 MHz:n vakiokellotaajuuden. Mittauksissa kokeiltiin käyttöjännitteen korottamisen ja lämpötilan laskemisen vaikutusta kokonaiskellotaajuuden nostamiseen ja vakauteen, kun järjestelmää kuormitettiin Cinebench R10 -testillä. Lopuksi kokeiltiin mikroprosessorin kellotaajuuden nostamista mahdollisimman korkealle korottamalla käyttöjännitettä ja laskemalle  $T_c$ -lämpötila mahdollisimman alhaiseksi.



Kuva 4.18. Mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautuminen lämpötilan ja käyttöjännitteen suhteen.

Mittausten yhteenvedona voidaan todeta, että mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautumiseen tarvitaan mikroprosessorin käyttöjännitteen korottamista ja samanaikaisesti toimintalämpötilan laskemista. Ensimmäisessä mittauksessa AMD Phenom II X4 965 Black Editionin valmistajan asettamaan 3411,7 MHz:n vakiokellotaajuuteen nähden kellotaajuutta pystyttiin nostamaan 20 celsiusasteen  $T_c$ -lämpötilassa 4214,6 MHz:iin eli 23,5 % käyttöjännitettä korottamalla 1,345 voltista 18,4 % 1,592 volttiin. Käytännössä kuitenkin jo 1,458 voltin käyttöjännite riitti 4214,6 MHz:n kellotaajuuden saavuttamiseen, eikä sen jälkeen lisäjännitteestä ollut hyötyä kellotaajuuden nostamisen suhteen.

Heti kun toisessa mittauksessa AMD Phenom II X4 965 Black Editionin  $T_c$ -lämpötila laskettiin 20 celsiusasteesta 190 asteella -170 celsiusasteeseen, kellotaajuutta pystyttiin korottamaan 4615,5 MHz:iin eli 3411,7 MHz:n vakiokellotaajuuteen nähden 35,3 %. 4615,5 MHz:n kellotaajuus saavutettiin -150 celsiusasteen  $T_c$ -lämpötilassa eikä alhaisempi -170 celsiusasteen lämpötila enää auttanut kellotaajuuden korottamiseen.

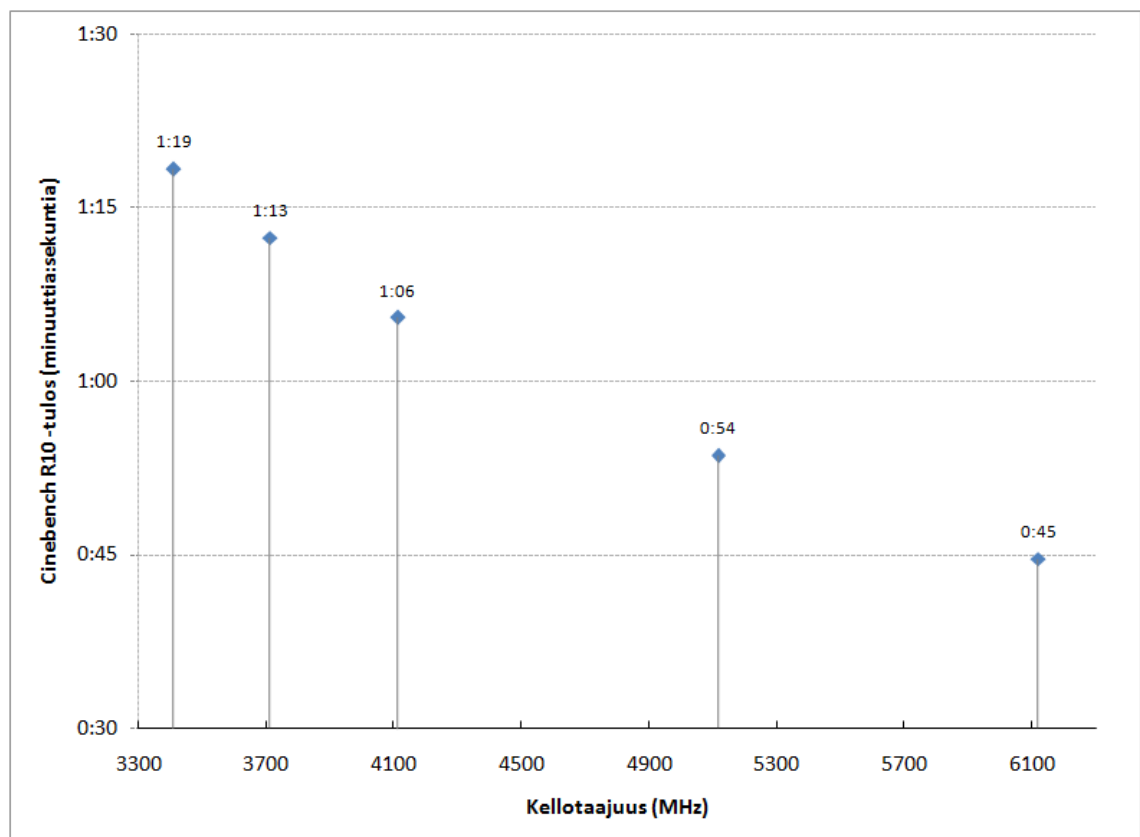
Kun ensimmäisessä ja toisessa mittauksessa suoritettut toimenpiteet eli käyttöjännitteen korottaminen ja  $T_c$ -lämpötilan laskeminen yhdistettiin, AMD Phenom II X4 965 Black Editionin kellotaajuus onnistuttiin nostamaan 5418,5 MHz:iin eli 58,8 % korkeammalle kuin 3411,7 MHz:n vakiokellotaajuus.

Kun lämpötilan laskeminen -170 celsiusasteeseen ei enää auttanut kellotaajuuden skaalautumiseen, mikroprosessorin käyttöjännitettä korotettiin yli mittauksissa käytetyn OverDrive-ohjelmasta asetetun 1,65 ja emolevyiltä mitatun 1,592 voltin 1,8 volttiin, jolloin Cinebench R10 -testi saatiin ajettua onnistuneesti läpi vielä 6120,8 MHz:n kellotaajuudella. Kyseisellä kellotaajuudella  $T_c$ -lämpötila laski testin aikana -165 celsiusasteeseen, eikä sitä kyetty enää laskemaan nestemäisen tyypin avulla, vaan alhaisempiin lämpötiloihin olisi vaadittu esimerkiksi nestemäistä heliumia. Alhaisemman toimintalämpötilan avulla kellotaajuutta olisi todennäköisesti saatu jälleen nostettua korkeammalle, mutta ennemmin tai myöhemmin kellotaajuuden skaalautuminen lakkaa kellotaajuuden ja käyttöjännitteen suhteen mikroprosessorin tehonkulutuksen ja transistorien fyysisten ominaisuuksien tullessa vastaan.

## 5. YLIKELLOTTAMINEN JA KAUPALLISUUS

### 5.1. Ylikellottaminen kuluttajan näkökulmasta

Kuluttajan on mahdollista hyötyä mikroprosessorin ylikellottamisesta siten, että tietokoneen suorituskyky paranee. Ylikellottamalla on myös mahdollista säästää rahaa ostamalla kaupasta edullisempi malli ja asettamalla itse se toimimaan suorituskykyisemmän mallin kellotaajuudella. Lisäksi mikroprosessoria ylikellottamalla voidaan saavuttaa parempi suorituskyky kuin mikroprosessorivalmistaja kykenee markkinoille tarjoamaan. Näin pystytään tyydyttämään suorituskykytarve tietyssä sovelluksessa, vaikka markkinoilta ei löytyisi tehtävään riittävän suorituskykyistä mikroprosessoria.



Kuva 5.1. Mikroprosessorin suorituskyvyn skaalautuminen kellotaajuuden suhteen.

AMD Phenom II X4 965 Black Editionin kellotaajuuden vaikutusta suorituskykyyn mitattiin Cinebench R10 -testin avulla (liite 3). 3411,7 MHz:n vakiokellotaajuudella testin suorittamiseen kului aikaa 1 minuutti ja 19 sekuntia. 10 % korotus kellotaajuuteen

eli 3712,8 MHz:iin paransi suoritusaikaa kuudella sekunnilla eli noin kahdeksalla prosentilla. 20 prosentin korotus kellotaajuuteen eli 4112,6 MHz:iin paransi suoritusaikaa 13 sekunnilla eli noin 20 %. 50 % korotus kellotaajuuteen eli 5117,4 MHz:iin paransi suoritusaikaa 25 sekunnilla eli noin 43,5 %.

AMD Phenom II X4 965 Black Editionin kellotaajuus saatiin nostettua testeissä 6120,8 MHz:iin asti korottamalla käyttöjännite 1,8 volttiin, jolloin  $T_c$ -lämpötila pystyttiin pitämään nestemäisen tyypin avulla alhaisimmillaan testin aikana -165 celsiusasteessa. 6120,8 MHz:n kellotaajuus vastaa noin 80 % korotusta 3411,7 MHz:iin vakiokellotaajuuteen nähden, jolloin suoritus aika oli 34 sekuntia eli noin 75 % parempi.

Intelin 2,66 GHz:n vakiokellotaajuudella toimiva Core i7-920 -mikroprosessori maksaa 1000 kappaleen erissä 284 dollaria ja 3,06 GHz:n kellotaajuudella toimiva Core i7-950 -malli 562 dollaria [73]. Hintaero kahden Core i7 -tuoteperheen mallin välillä on 245 euroa, vaikka käytännössä niiden ominaisuudet ovat identtiset. Intel on ainoastaan määrittänyt Core i7-950 -mallille 400 MHz korkeamman kellotaajuuden asettamalla sisäisen kertoimen 23:een, kun Core i7-920 -mallissa se on asetettu 20:een. Tämän mikroprosessoriin asetetun rekisteriarvon ja Intelillä tehdyn laadunvalvonnan johdosta Core i7-950 on kuluttajalle 98 % kalliimpi kuin Core i7-920. Mikroprosessorit perustuvat samalta piikiekolta leikattuihin piisiruihin, joiden toiminnassa Intel on havainnut laatutestauksessa pieniä eroja. Core i7-950:ssä on käytössä korkeamman kellotaajuuden saavuttanut ja vähemmän virtaa vuotavista transistoreista rakentuva piisiru kuin Core i7-920:ssä.

AMD:n 2,8 GHz:n kellotaajuudella toimiva Phenom II X4 925 -mikroprosessori on hinnoiteltu valmistajan toimesta 1000 kappaleen erissä 145 dollariin ja 3,4 GHz:n Phenom II X4 965 Black Edition 165 dollariin [74]. Myöskään näillä mikroprosessoreilla ei ole muuta eroa, kuin AMD:n omien laatutestien seurauksena 925-mallin rekistereihin tallennettu sisäinen kerroin on 14 ja 965-mallissa 17. Lisäksi Phenom II X4 965 Black Edition -mallissa sisäinen kerroin on jätetty käyttäjän vapaasti muunneltavaksi.

## 5.2. Ylikellottaminen valmistajan näkökulmasta

Mikroprosessorivalmistaja Intel suhtautui 1990- ja 2000-lukujen vaihteessa hyvin kielteisesti ylikellottamiseen. Yritys koki ylikellottamisesta ongelmia, jotka johtuivat muun muassa epärehellisten yksittäisten tietokoneosien myydessä kuluttajille ylikellotetuilla Intelin mikroprosessoreilla varustettuja PC-tietokoneita. Tietokoneosien saivat enemmän voittoa myydessään halvemmän prosessorin suorituskykyisemmäksi ylikellotettuna, mutta kuluttajat kohtasivat usein ongelmia järjestelmän epävakauden takia, sillä mikroprosessorilla oli usein käytössä riittämätön jäähdytysratkaisu. Tämän seurauksena yritys lukitsi mikroprosessorimalleissaan sisäisen kertoimen, jota kuluttajat eivät voineet muuttaa ohjelmisto- tai rautatasolla [75].

Intelin toimet ylikellottamisen estämiseksi menivät jopa niin pitkälle, että yritys patentoi useita menetelmiä sen ehkäisemiseksi, kuten mikroprosessorin kellotaajuuden

tarkastamisen sisäisestä rekisteristä ja varoituksen esittämisen tietokoneen ruudulla [76] sekä piirisarjaan integroidun ylikellottamisen tunnistusmekanismin, joka estäisi tietokoneen käytön kokonaan tai rajoittaisi sen avaintoimintoja merkittävästi [77].

### 5.2.1. Intelin Extreme Edition -mallisto

Vuoden 2003 marraskuussa kiristyneen markkinatilanteen seurauksena Intel julkaisi markkinoille Pentium 4 Extreme Edition -mallin, joka toimi 3,2 GHz:n kellotaajuudella ja sen sisäinen kerroin oli avattu kuluttajille vapaasti muunneltavaksi. Yritys markkinoi Extreme Edition -mallia tehokäyttäjille ja pelaajille, mutta ei erityisemmin mainostanut sen ylikellottamismahdollisuutta. Menneinä vuosina tapahtuneet tietokoneliikkeiden ylikellotettujen mikroprosessorien väärinkäytökset Intel ehkäisi lanseeraamalla Pentium 4 Extreme Editionin markkinoille 1000 kappaleen erissä 925 dollarin hintaisena. [78] Haastattelin diplomityötäni varten Intelin teknologian johtoryhmän jäsentä Markus Weingartneria, jonka mukaan Intelin kanta ylikellottamiseen ja näkemys Extreme-mallistosta on seuraava:

*”Intelin näkemys mikroprosessorien toiminnasta sen spesifikaatioiden ulkopuolella eli niin kutsutusta ylikellottamisesta ei ole vaihtunut vuosien varrella: Intel ei yleisesti suosittele osien käyttämistä spesifikaatioiden ulkopuolella ja ainoastaan kokeneet henkilöt, jotka tietävät mitä tekevät, voivat varovaisesti kokeilla sitä.*

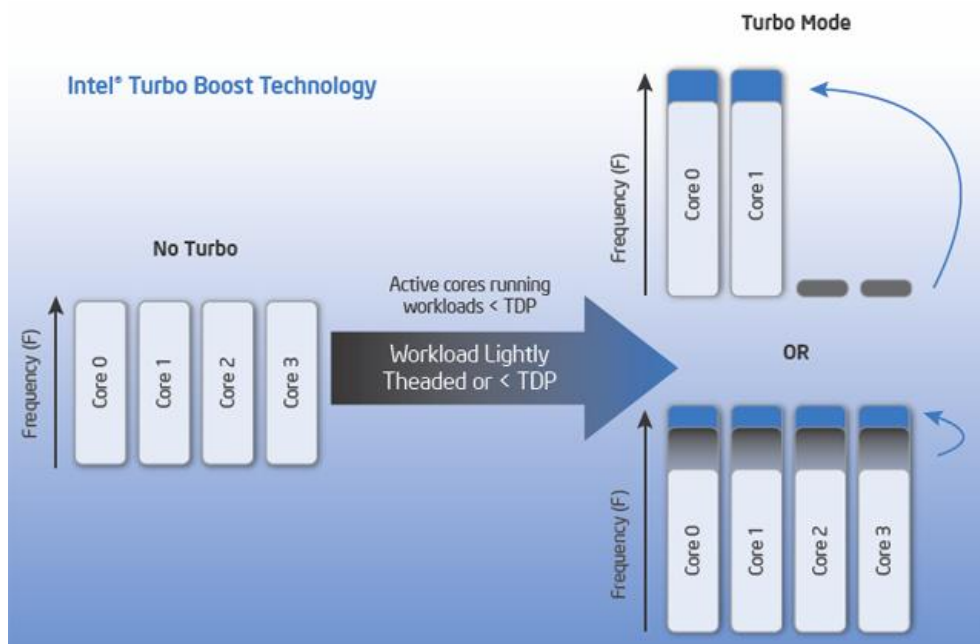
*Olemme huomanneet, että moni Intelin asiakkaista on kuitenkin osa tätä entusiastien joukkoa, joka on kiinnostunut kokeilemaan mikroprosessorin toimintaa spesifikaatioiden ulkopuolella. Tämän seurauksena olemme luoneet Extreme-mallistomme huippusuorituskykyisistä mikroprosessoreista ylikellottamiseen soveltuvia lisäämällä niihin ominaisuuksia, joiden avulla kuluttajat voivat muuttaa ylikellottamiseen tarvittavia parametreja.*

*Ylikellottaminen ei vaikuta Intelin tuotekehitykseen, vaan kyseessä on loppujen lopuksi sisäisten kertoimien ja muiden vastaavien järjestelmän muuttujien jättäminen auki entusiasteille, jotka haluavat käyttää niitä virittäääkseen tietokoneidensa suorituskykyä.”*

Intelin Extreme Edition -mallisto on kulkenut yrityksen tuotekehityksen mukana vuodesta 2003 lähtien ja markkinoilla on vuosien varrella ollut jokaisesta työpöytäkäyttöön suunnatusta prosessoriperheestä suorituskykyisin Extreme Edition -malli, jonka sisäinen kerroin on jätetty kuluttajille vapaasti muunneltavaksi. Extreme Edition -mallien suositushinta on perinteisesti ollut lähellä 1000 dollaria. Tällä hetkellä Intelin suorituskykyisin markkinoilla oleva mikroprosessori on 32 nm:n tekniikalla valmistettava kuusiytiminen 3,33 GHz:n kellotaajuudella toimiva Core i7-980X Extreme Edition -malli [79].

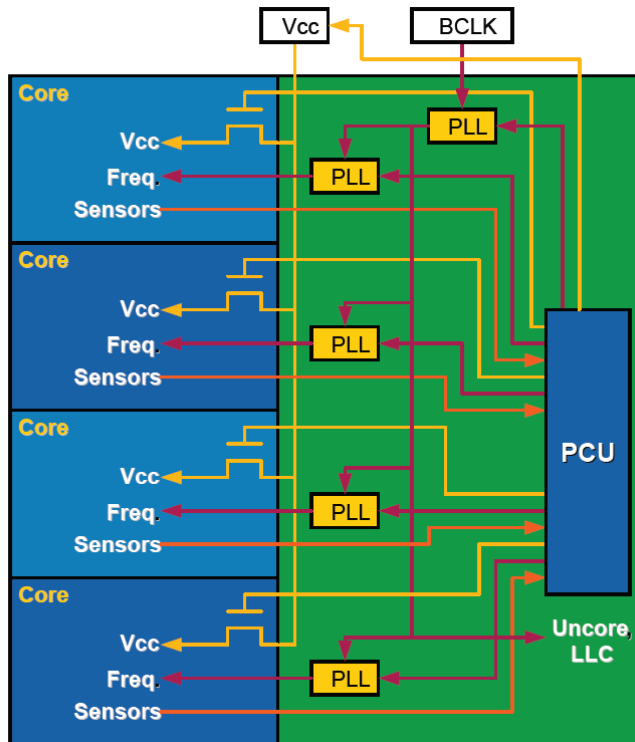
## 5.2.2. Intelin Turbo Boost -teknologia

Intel julkaisi marraskuussa 2008 Core-arkkitehtuuriin (Nehalem) perustuvat mikroprosessorimallit, joiden yksi uusista ominaisuuksista on Turbo Boost -teknologia. Teknologia sallii automaattisesti ytimien toiminnan korkeammalla kellotaajuudella paremman suorituskyvyn saavuttamiseksi, jos mikroprosessori toimii alle sille määritetyn maksimilämpötilan ja sen tehon- ja virrankulutus ovat alle spesifikaatiossa määritettyjen maksimiarvojen. Jos olosuhteet sallivat, Turbo Boost -teknologia voidaan käynnistää mille tahansa käytettävissä olevista ytimistä ja korotetun kellotaajuuden ansiosta mikroprosessorin suorituskyky paranee yksi- ja monisäikeisillä työkuormilla (kuva 5.2.) [80].



Kuva 5.2 Kuvaus Intelin kehittämästä Turbo Boost -ominaisuudesta.

Turbo Boost -teknologian ytimien kellotaajuuden kasvattamisen ehdottomana ylärajana on Intelin mikroprosessorille määrittämä tehonkulutuksen maksimiarvo, mutta sen sisällä kellotaajuutta rajoitetaan arvioidulla virran- ja tehonkulutuksella sekä mitatulla lämpötilalla, joita monitoroidaan piisirulle integroidulla PCU-mikrokontrollerilla (kuva 5.3.). PCU tarkkailee reaaliajassa piisirun lämpötilaa sekä virran- ja tehonkulutusta antureilla ja ottaa joustavasti käyttöön hienostuneet eri toimintaolosuhteille säädetyt algoritmit, jotka säätelevät käyttöjännitettä ja kellotaajuutta edellä mainittujen mitattujen raja-arvojen perusteella. [81]



Kuva 5.3. Turbo Boost -teknologiaa kontrolloiva Power Control Unit (PCU).

Markus Weingartner painotti haastattelussa ylikellottamisen ja Turbo Boost -teknologian eroja, vaikka molemmissa tapauksissa korotetaan mikroprosessorin kellotaajuutta yli valmistajan asettaman arvon.

*”On tärkeää tiedostaa ero ylikellottamisen ja Intelin Turbo Boost -teknologian välillä. Ylikellottaminen tarkoittaa yleisesti ottaen mikroprosessorin käyttämistä valmistajan määrittämien spesifikaatioiden ulkopuolella, kun taas Turbo Boost -teknologia on tiiviin ja erittäin hienostuneen tuotekehityksen tulos.*

*Turbo Boost -teknologian mekaniikka on täysin erilainen, mitä tapahtuu kun mikroprosessoria ylikellotetaan. Turbo Boost mittaa jatkuvasti useita fyysisiä ehtoja, kuten virtojen, jännitteiden ja lämpötilojen arvoja ja säätää dynaamisesti kellotaajuutta ja käyttöjännitettä perustuen niihin ja tietokoneen sen hetkiseen työkuormaan. Turbo Boost toimii ainoastaan, jos kaikki mittaukset viittaavat siihen, että osa toimii edelleen spesifikaatioiden sisällä.*

*Turbo Boost -ominaisuudella ei myöskään ole haittoja, toisin kuin ylikellottamisella, sillä ominaisuus toimii pääasiallisesti mikroprosessorin spesifikaatioiden sisällä. Ylikellottamisessa on puolestaan haittoja, sillä jos kuluttaja ei tiedä mitä tekee, saattaa ylikellottamisen seurauksena olla tuotteen eliniän lyheneminen, takuun menetys tai jopa tuotteen täydellinen vahingoittuminen.”*

### 5.2.3. AMD:n Athlon 64 FX- ja Black Edition -mallistot

AMD kilpaili menneinä vuosina Intelin Extreme Edition -mallisten mikroprosessorien kanssa omalla Athlon 64 FX -mallistollaan, joka tarjosi vastaavasti kuluttajille vapaasti muunneltavissa olevan sisäisen kertoimen ja myyntihinta oli 1000 dollarin tienoilla [82]. Aikaisemmin yritys keräsi tehokäyttäjien ja entusiastien huomion Athlon- ja Duron-malleillaan, joiden sisäistä kerrointa pystyi mallista ja koteloinnista riippuen muuttamaan teknisin keinoin esimerkiksi vaihtamalla mikroprosessorin piirilevyn pintaliitosvastuksien paikkaa juottamalla [83], liittämällä mikroprosessorin piirilevyn liittimeen kolmannen osapuolen valmistaman jumppereilla tai kytkimillä varustetun ylikellotuspalikan [84] tai yhdistämällä keraamisen koteloinnin kultaisia liitäntäpintoja toisiinsa sähköä johtavalla materiaalilla, kuten lyijykynän grafiitilla [85].

AMD luopui kalliista FX-mallistosta Athlon-mikroprosessorien myötä, mutta lanseerasi nykyisten Phenom-mallisten mikroprosessorien kanssa Black Edition -malliston, joka tarjoaa käyttäjälle mahdollisuuden muunnella sisäistä kerrointa vapaasti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että AMD on jättänyt kuluttajalle mahdollisuuden korottaa mikroprosessorin kellotaajuutta omatoimisesti, mutta takuu ei kata ylikellottamisesta aiheutuneita vaurioita [65]. Vaikka AMD:n Black Edition -malliston mikroprosessorit ovat malliston suorituskykyisimpiä, niiden hinnoittelussa ei ole Intelin Extreme Edition- tai AMD:n aiemman FX-malliston mukaista hintalisää.

AMD on esitellyt Intelin Turbo Boost -teknologian kanssa kilpailevan Turbo CORE -teknologian, joka nostaa kuusiytimisissä Phenom II X6 -mikroprosessorimalleissa kolmen ytimen kellotaajuutta, kun kolme tai useampi ydin ovat lepotilassa [86].

## 6. YHTEENVETO

Mikroprosessoria ylikellottamalla eli asettamalla se toimimaan valmistajan asettamien spesifikaatioiden ulkopuolella, voidaan saavuttaa merkittävä parannus PC-tietokoneen suorituskykyyn. Hintatietoinen kuluttaja voi säästää aiheeseen tutustumalla rahaa ostamalla edullisemman mikroprosessorimallin ja ylikellottamalla sen suorituskykyisemmäksi. Nykypäivän emolevyt mahdollistavat kuluttajan muokkaavan mikroprosessorin parametreja BIOS:sta ja käyttöjärjestelmästä käsin, joten kellotaajuuden ja käyttöjännitteen korottaminen onnistuu helposti. Koska kyseessä on takuun ulkopuolella tapahtuvaa toimintaa, riskeihin ja ongelmakohtiin sekä niiden ehkäisyyn on syytä tutustua huolellisesti ennen kokeiluja.

Mikroprosessorivalmistajat ovat jo vuosia sitten törmänneet CMOS-valmistustekniikassa miljoonien MOSFET-transistorien aiheuttamaan massiiviseen lämmöntuottoon, joten niille asetetaan vakiokellotaajuus, joka täyttää tavoitteet suorituskyvyn, piikiekolta saatavien spesifikaatioiden mukaan toimivien piisirujen lukumäärän ja 100 % toimintavarmuuden suhteen. Mikroprosessorivalmistajan mallikohtaisesti suunnittelema kustannustehokas jäähdytysiilistä ja tuulettimesta rakentuva, pakotettuun konvektioon perustuva jäähdytysratkaisu huolehtii mikroprosessorin lämmöntuotosta spesifikaatioiden mukaisesti.

Diplomityön mittauksissa AMD:n Phenom II X4 965 Black Edition -mikroprosessorilla osoitettiin, että sen kellotaajuutta pystytään nostamaan ja suorituskykyä merkittävästi parantamaan käyttöjännitettä korottamalla ja lämpötilaa laskemalla. Mittauksissa tutkittiin mikroprosessorin kellotaajuuden skaalautumista, kun lämpötila laskettiin kryogeeniseen -170 celsiusasteeseen ja käyttöjännitettä korotettiin noin 20 % yli valmistajan määrittelemän ylärajan. Lopputuloksena lämpötilaa laskemalla ja käyttöjännitettä nostamalla mikroprosessorin kellotaajuutta pystyttiin korottamaan yli 50 % ja suorituskykyä Cinebench R10 -testissä noin 35 %.

Kuluttajien lisäksi myös mikroprosessorivalmistajat ovat kiinnostuneita ylikellottamisen tarjoamista mahdollisuuksista, mutta samalla huolissaan toiminnan väärinkäytöstä ja huijauksista, joissa edullinen mikroprosessori on myyty ylikellotettuna kalliimmalla. Valmistajat ovat suunnitelleet ja patentoineet ylikellottamisen estäviä tekniikoita, mutta päättäneet olla käyttämättä täysin ylikellottamisen estäviä menetelmiä. Nykyisin markkinoilla on kiristyneen kilpailutilanteen ja ylikellottamisesta kiinnostuneiden kuluttajien kasvaneen lukumäärän johdosta tietyiltä parametreiltaan avattuja mikroprosessorimalleja, joiden avulla mikroprosessorin ylikellottaminen onnistuu helposti sisäistä kerrointa korottamalla, jolloin ylikellottaminen ei vaikuta järjestelmän muihin komponentteihin. Lisäksi Intel ja AMD ovat molemmat kehittäneet

teknologian, jonka avulla mikroprosessorin kellotaajuutta kasvatetaan automaattisesti spesifikaatioiden sisällä hetkellisesti paremman suorituskyvyn saavuttamiseksi.

## LÄHTEET

- [1] Texas Instruments. First Integrated Circuit [WWW]. [viitattu 11.12.2009]. Saatavissa: <http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/downloadphotos.shtml>
- [2] Texas Instruments. The Chip that Jack Built [WWW]. [viitattu 11.12.2009]. Saatavissa: <http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/jackbuilt.shtml>
- [3] Nobel Foundation. The History of the Integrated Circuit [WWW]. [viitattu 11.12.2009]. Saatavissa: [http://nobelprize.org/educational\\_games/physics/integrated\\_circuit/history/index.html](http://nobelprize.org/educational_games/physics/integrated_circuit/history/index.html)
- [4] Tuva Design. Who developed the world's first microprocessor? [WWW]. [viitattu 16.3.2010]. Saatavissa: <http://www.4004.com/4004-really-first.html>
- [5] Ray M Holt. World's First Microprocessor [WWW]. [viitattu 15.1.2009]. Saatavissa: <http://firstmicroprocessor.com/>
- [6] Advanced Micro Devices. Inc. x86-64™ Technology White Paper [WWW]. [viitattu 18.1.2009]. Saatavissa: [http://www.amd.com/us-en/assets/content\\_type/white\\_papers\\_and\\_tech\\_docs/x86-64\\_wp.pdf](http://www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/x86-64_wp.pdf)
- [7]. Intel Corporation. Intel Architecture Software Developer's Manual Volume 1: Basic Architecture [WWW]. [viitattu 18.1.2009]. Saatavissa: <http://www.intel.com/design/pentiumii/manuals/24319002.PDF>
- [8] Intel Corporation. Intel's T's Deliver New Platform Enhancements Beyond Gigahertz [WWW]. [viitattu 8.4.2010]. Saatavissa: <http://www.intel.com/cd/corporate/techtrends/emea/eng/209708.htm>
- [9] Intel Corporation. Intel® Pentium® 4 Processor Family [WWW]. [viitattu 20.2.2010]. Saatavissa: <http://ark.intel.com/ProductCollection.aspx?familyId=581>
- [10] Gordon E. Moore. Cramming More Components onto Integrated Circuits, Electronics, Volume 38, (1965)8, s. 114-117.
- [11] Gordon E. Moore. [ftp://download.intel.com/museum/Moores\\_Law/Video-Transcripts/Excepts\\_A\\_Conversation\\_with\\_Gordon\\_Moore.pdf](ftp://download.intel.com/museum/Moores_Law/Video-Transcripts/Excepts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf)

- [12] Intel Corporation. Moore's Law 40th Anniversary [WWW]. [viitattu 11.12.2009]. Saatavissa: [http://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores\\_law\\_40th/index.htm](http://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/index.htm)
- [13] Intel Corporation. Moore's Law Marches on at Intel [WWW]. [viitattu 12.12.2009]. Saatavissa: [http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2009/20090922corp\\_a.htm](http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2009/20090922corp_a.htm)
- [13] Advanced Micro Devices. Clock Generator Specification for AMD64 Processors [WWW]. [viitattu 22.3.2009]. Saatavissa: [http://www.amd.com/us-en/assets/content\\_type/white\\_papers\\_and\\_tech\\_docs/24707\\_PUB.PDF](http://www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/24707_PUB.PDF)
- [14] W. David Schwaderer. The Future Data Center Part 1: Multi-Core Processors [WWW]. [viitattu 14.12.2009]. Saatavissa: <http://www.symantec.com/connect/sites/default/files/Multi-Core%20Processors.pdf>
- [15] Peter Singer. 1 THz InP Transistor Claims Speed Record [WWW]. [viitattu 13.12.2009]. Saatavissa: [http://www.semiconductor.net/article/198111-1\\_THz\\_InP\\_Transistor\\_Claims\\_Speed\\_Record.php](http://www.semiconductor.net/article/198111-1_THz_InP_Transistor_Claims_Speed_Record.php)
- [16] Kaj Granlund. Laitetekniikka. Jyväskylä 2004, Docendo Finland Oy. 350 s.
- [17] Michael Moen, Benjamin Gould. Overclocking Intel Microarchitecture (Nehalem) Based Desktop Platforms [WWW]. [viitattu 15.4.2010]. Saatavissa: <http://www.intel.com/IDF/>
- [18] Advanced Micro Devices. Clock Generator Specification for AMD Athlon 64 and AMD Opteron Processors [WWW]. [viitattu: 15.4.2010]. Saatavissa: [http://www.amd.com/us-en/assets/content\\_type/white\\_papers\\_and\\_tech\\_docs/24707\\_PUB.pdf](http://www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/24707_PUB.pdf)
- [19] Jari Koskinen. Mikrotietokonetekniikka Sulautetut järjestelmät. 1998, Otavan Kirjapaino Oy.
- [20] Vojkin G. Oklobdzija. Clocking in Multi-GHz Environment. Proc. 23rd International Conference on microelectronics. VOL 2. 2002. s. 561-567.
- [21] Intel Corporation. Intel® Pentium® 4 Processors 570J [WWW]. [viitattu: 15.4.2010]. Saatavuus: <http://processorfinder.intel.com/details.aspx?sSpec=SL82U>

- [22] John L. Hennessy. Computer Architecture: A Quantitative Approach. 3rd Edition. 2003, Morgan Kaufmann. 1136 s.
- [23] TOP500 Supercomputing Sites [WWW]. [viitattu 18.3.2010]. Saatavissa: <http://www.top500.org>
- [24] Standard Performance Evaluation Corporation [WWW]. [viitattu 8.4.2010]. Saatavissa: <http://www.spec.org>
- [25] Dan Clein. CMOS IC layout: concepts, methodologies, and tools. 2000, Newnes. 265 s.
- [26] Peter Van Zant. Microchip Fabrication. Fifth Edition. 2004, McGraw-Hill Professional Publishing. 640 s.
- [27] Chiang Mai J. Sci. High Purity Polycrystalline Silicon Growth and Characterization [WWW]. [viitattu 3.3.2010]. Saatavuus: [http://www.science.cmu.ac.th/journal-science/341\\_HighUda.pdf](http://www.science.cmu.ac.th/journal-science/341_HighUda.pdf)
- [28] William C. O'Mara, Robert B. Herring, Lee Philip Hunt. Handbook of semiconductor silicon technology. 1990, Noyes Publications. 795 s.
- [29] J. Czochralski. Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle. In: Zeitschrift für physikalische Chemie. 1918.
- [30] Pat. US 5,108,720. Float zone processing of particulate silicon. Hemlock Semiconductor Corporation, Hemlock. (Bourbina; Michael, McCormick; James R., Wheelock Scott A.). Hak.nro 07/702541, 20.5.1991 (28.4.1992).
- [31] CSC. Piikiteen kasvatus [WWW]. [viitattu 10.10.2009]. Saatavuus: <http://www.csc.fi/sivut/piima/alueet>
- [32] Gauss Centre for Supercomputing. Silicon single crystal after pulling [WWW]. [viitattu 2.2.2009]. Saatavuus: <http://www.gauss-centre.eu/science/czochralski>
- [33] Intel Corporation. From Sand to Silicon "Making of a Chip" [WWW]. [viitattu 16.5.2010]. Saatavuus: [http://download.intel.com/pressroom/kits/chipmaking/Making\\_of\\_a\\_Chip.pdf](http://download.intel.com/pressroom/kits/chipmaking/Making_of_a_Chip.pdf)

- [34] Yoshio Nishi, Robert Doering. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. 2000, CRC Press. S. 1157.
- [35] Reima Flyktman. PC-käsikirja. 2004 Helsinki, Edita Publishing Oy. 500 s.
- [36] Bob Colwell. 2004. The Zen of Overclocking. IEEE Computer Society Computer, 37, 3, s. 9-12.
- [37] Hugh D. Young, Roger A. Freedman. University Physics with modern physics. 10<sup>th</sup> edition. 2000, Addison Wesley. 1512 s.
- [38] Vivek Tiwari, Deo Singh, Suresh Rajgopal, Gaurav Mehta, Rakesh Patel, Franklin Baez. Reducing Power in High-performance Microprocessors. 35th Design Automation Conference.1998. 6 s.
- [39] L. Gwennap. Power issues may limit future CPUs. Microprocessor Report, 10(10), 1996.
- [40] Wikipedia. List of CPU power dissipation [WWW]. [viitattu 8.3.2010]. Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_CPU\\_power\\_dissipation](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_CPU_power_dissipation)
- [41] Intel Corporation. Glossary of Terms [WWW]. [viitattu 14.4.2010]. Saatavissa: <http://processorfinder.intel.com/Glossary.aspx>
- [42] Chaler A. Harper. Electronic Packaging and interconnection handbook. Fourth edition. 2005, McGraw-Hill Professional. 1000 s.
- [43] Suomen Standardoimisliitto. SI-opas [WWW]. [viitattu 14.11.2009]. Saatavissa: <http://www.sfs.fi/standard/si-opas.pdf>
- [44] Intel Corporation. Intel® Pentium® Processor Thermal Design Guidelines [WWW]. [viitattu 7.12.2009]. Saatavissa: <http://www.intel.com/support/processors/pentium/sb/cs-011039.htm>
- [45] MAOL ry. MAOL-taulukot. 1996 Helsinki, Kustannusosakeyhtiö Otava. 157 s.
- [46] David R. Lide. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 2009, CRC Press. 2804 s.
- [47] Fraunhofer-Gesellschaft . Keeping the heat down [WWW]. [viitattu 29.11.2009]. Saatavissa: <http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2009/04/ResearchNews042009Topic3.jsp>

- [48] Aavid Thermalloy. Assembled Heat Sinks [WWW]. [viitattu 11.12.2009].  
Saatavissa: <http://www.aavidthermalloy.com/products/bondfin/bondfin.shtml>
- [49] Arthur E. Bergles. 2003. Evolution of Cooling Technology for Electrical, Electronic, and Microelectronic Equipment. IEEE Transactions on components and packaging, 26, 1. S 6-15.
- [50] Sheng-Chih Lin, Kaustav Banerjee. 2008. Cool Chips: Opportunities and Implications for Power and Thermal Management. IEEE Transactions on electron devices, 55, 1. S. 245-255.
- [51] R. R. Schmidt, B. D. Notohardjono. High-end server low-temperature cooling. IBM J. RES. & DEV. VOL. 46 NO. 6, 2002. S. 739-751.
- [52] Refrigeration Basics. Main components [WWW]. [viitattu 8.12.2010].  
Saatavuus: <http://www.refrigerationbasics.com/1024x768/rb2.htm>
- [53] AGA. Kuivajää [WWW]. [viitattu 22.1.2009]. Saatavuus:  
[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/nav\\_prod\\_dryice](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/nav_prod_dryice)
- [54] William Augustus Tilden. A Short History of the Progress of Scientific Chemistry in Our Own Times. 2009, BiblioBazaar, LLC. 288 s.
- [55] J. P. Joule and W. Thompson. On the Thermal Effects of Fluids in Motion (Part I). 1853, Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
- [56] AGA. Nestemäinen typpi [WWW]. [viitattu 22.1.2009]. Saatavuus:  
[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/sol\\_cooling](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/sol_cooling)
- [57] Janne Ropponen. Heliumin nesteytys ja kryojäähdyttimet [WWW]. [viitattu 9.12.2009]. Saatavuus: <http://nikita.tnnet.fi/~weopu/kryo/>
- [58] AGA. Nestemäinen helium [WWW]. [viitattu: 22.1.2009]. Saatavuus:  
[http://www.linde.com/international/web/lg/fi/like35lgltfi.nsf/repositorybyalias/nestemainen\\_helium/\\$file/Nestem%C3%A4inen%20Helium.pdf](http://www.linde.com/international/web/lg/fi/like35lgltfi.nsf/repositorybyalias/nestemainen_helium/$file/Nestem%C3%A4inen%20Helium.pdf)
- [59] Robert Chau, Suman Datta, Mark Doczy, Brian Doyle, Jack Kavalieros, Matthew Metz. 2004. High-k/Metal-Gate Stack and Its MOSFET Characteristics. IEEE Electron device letters, 25, 6. S. 408-410.

- [60] J.H. Huang, G.B . Zhang. H. Liu. J. Duster. S. J. Wann, Ping Ko, Chenming Hu. Temperature Dependence of Mosfet Substrate Current. IEEE Electron Device Letters. Vol. 14. No 5. Huhtikuu 1993. s. 268-271.
- [61] Rao R. Tummala. Fundamentals of microsystems packaging. 2001 New York. McGraw-Hill. 967 s.
- [62] Kevin Skadron, Mircea R. Stan, Wei Huang, Sivakumar Velusamy, Karthik Sankaranarayanan, David Tarjan. Temperature-Aware Microarchitecture: Extended Discussion and Results. University of Virginia. 2003. 34 s.
- [63] Maxon. Cinebench R10 [WWW]. [viitattu 14.3.2010]. Saatavissa: <http://www.maxon.net>
- [64] Advanced Micro Devices. Product Details [WWW]. [viitattu 15.3.2010]. Saatavissa: <http://products.amd.com/en-us/DesktopCPUDetail.aspx?id=617>
- [65] Advanced Micro Devices. AMD Phenom™ X4 Quad-Core Black Edition Processor [WWW]. [viitattu 15.3.2010]. Saatavissa: [http://game.amd.com/us-en/unlock\\_phenomblack.aspx](http://game.amd.com/us-en/unlock_phenomblack.aspx)
- [66] Advanced Micro Devices. OverDrive [WWW]. [viitattu 8.4.2010]. Saatavissa [http://game.amd.com/us-en/drivers\\_overdrive.aspx](http://game.amd.com/us-en/drivers_overdrive.aspx)
- [67] Advanced Micro Devices. AMD Family 10h Desktop Processor Power and Thermal Data Sheet [WWW]. [viitattu 16.4.2010]. Saatavissa: [http://www.amd.com/us-en/assets/content\\_type/white\\_papers\\_and\\_tech\\_docs/GH\\_43375\\_10h\\_DT\\_PTDS\\_PUB\\_3.18.pdf](http://www.amd.com/us-en/assets/content_type/white_papers_and_tech_docs/GH_43375_10h_DT_PTDS_PUB_3.18.pdf)
- [68] Omega. Ready-Made Insulated Thermocouples with Spool Caps [WWW]. [viitattu 15.3.2010]. Saatavissa: <http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=5SC>
- [69] Dow Corning. 340 Heat sink compound [WWW]. [viitattu 15.3.2010]. Saatavissa: <http://www.dowcorning.com/applications/search/products/details.aspx?prod=01015443>
- [70] Omega. Thermally Conductive Epoxies and Thermally Conductive Grease [WWW]. [viitattu 15.3.2010]. Saatavissa: [http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=OB-100\\_OB-200\\_OT-200](http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=OB-100_OB-200_OT-200)

- [71] OCZ. Freeze Extreme Thermal Conductivity Compound [WWW]. [viitattu: 15.3.2010]. Saatavissa: [http://www.ocztechnology.com/products/cooling\\_products/ocz\\_freeze\\_extreme\\_thermal\\_conductivity\\_compound](http://www.ocztechnology.com/products/cooling_products/ocz_freeze_extreme_thermal_conductivity_compound)
- [72] Kingpin Cooling [WWW]. [viitattu 8.4.2010]. Saatavissa: <http://www.kingpincooling.com>
- [73] Intel Corporation. Processor Price List [WWW]. [viitattu 13.4.2010]. Saatavissa: <http://www.intc.com/pricelist.cfm>
- [74] Advanced Micro Devices. Processor Pricing [WWW]. [viitattu 13.4.2010]. Saatavissa: <http://www.amd.com/us/products/pricing/Pages/pricing.aspx>
- [75] Intel Corporation. Disabling the processor clock multiplier lock [WWW]. [viitattu 16.4.2010]. Saatavissa: <http://www.intel.com/support/processors/sb/cs-001527.htm>
- [76] Pat. US 6,535,988. System for detecting over-clocking uses a reference signal thereafter preventing over-clocking by reducing clock rate. Intel Corporation, Santa Clara. (David L. Poisner). Hak.nro 09/407,853, 29.9.1999 (18.3.2003). 15 s.
- [77] Pat. US 6,691,242. System test and method for checking processor over-clocking by retrieving an assigned speed from an register internal to the processor, comparing with running speed, and displaying caution message to user. Intel Corporation, Santa Clara. (Steven L. Pollock, Ted T. Homna). Hak.nro 09/585,860, 29.9.1999 (18.3.2003). 6 s.
- [78] Intel Corporation. Intel® Pentium® 4 Processor Extreme Edition Designed for Gamers and Computing Enthusiasts [WWW]. [viitattu 16.4.2010]. Saatavissa: [http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2003/20031103comp\\_a.htm](http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2003/20031103comp_a.htm)
- [79] Intel Corporation. Intel® Core™ i7-900 Desktop Processor Extreme Edition Series on 32-nm Process Datasheet [WWW]. [viitattu 16.4.2010]. Saatavissa: <http://download.intel.com/design/processor/datashts/323252.pdf>
- [80] Intel Corporation. Intel® Turbo Boost Technology in Intel® Core™ Microarchitecture (Nehalem) Based Processors [WWW]. [viitattu: 16.4.2010]. Saatavuus: <http://download.intel.com/design/processor/applnots/320354.pdf>

- [81] Intel Corporation. Next Generation Intel Microarchitecture (Nehalem) Family: Architectural Insights and Power Management [WWW]. [viitattu: 20.4.2010]. Saatavissa: <http://www.intel.com/idf/index.htm>
- [82] Advanced Micro Devices. AMD Unveils World's Ultimate PC Processor For 3D Games: The AMD Athlon™ 64 FX-57 Processor [WWW]. [viitattu: 16.4.2010]. Saatavuus: [http://www.amd.com/us-en/Corporate/VirtualPressRoom/0,,51\\_104\\_543~99661,00.html](http://www.amd.com/us-en/Corporate/VirtualPressRoom/0,,51_104_543~99661,00.html)
- [83] Thomas Pabst. Overclocking AMD's Athlon Processor [WWW]. [viitattu 16.4.2010]. Saatavissa: <http://www.tomshardware.com/reviews/overclocking-amd,126.html>
- [84] HighSpeed PC. GFD Overclocking Basics [WWW]. [viitattu: 16.4.2010]. Saatavissa: [http://www.highspeedpc.com/slot\\_a\\_overclocking.htm](http://www.highspeedpc.com/slot_a_overclocking.htm)
- [85] Motherboards.org. Unlocking the Duron and Athlon Using the Pencil Trick [WWW]. [viitattu: 16.4.2010]. Saatavissa: [http://www.motherboards.org/articles/guides/41\\_2.html](http://www.motherboards.org/articles/guides/41_2.html)
- [86] Advanced Micro Devices. AMD Turbo CORE technology On Select AMD Phenom II Processors [WWW]. [viitattu 19.4.2010]. Saatavissa: <http://www.amd.com>

# LIITE 1: KELLOTAAJUUDEN SKAALAUTUMINEN KÄYTTÖJÄNNITTEEN SUHTEEN

**T<sub>c</sub>-lämpötila:** 20 celsiusastetta

<b>Käyttöjännite (V<sub>core</sub>):</b>	<b>Kellotaajuus (MHz):</b>
1,345	3411,7
1,345	3511,9
1,345	3612,4
1,345	3712,8
1,345	3813,0
1,345	3913,2
1,370	4013,8
1,386	4013,8
1,412	4112,6
1,436	4112,6
1,458	4214,6
1,477	4214,6
1,503	4214,6
1,527	4214,6
1,548	4214,6
1,566	4214,6
1,592	4214,6

## LIITE 2: KELLOTAAJUUDEN SKAALAUTUMINEN TC-LÄMPÖTILAN SUHTEEN

**Käyttöjännite ( $V_{\text{core}}$ ):** 1,4 voltia

<b>Tc (°C):</b>	<b>Kellotaajuus (MHz):</b>
20	4013,8
10	4112,6
0	4214,6
-10	4214,6
-20	4214,6
-30	4314,9
-40	4314,9
-50	4314,9
-60	4314,9
-70	4314,9
-80	4414,8
-90	4414,8
-100	4414,8
-110	4414,8
-120	4414,8
-130	4515,3
-140	4515,3
-150	4615,5
-160	4615,5
-170	4615,5

## LIITE 3: SUORITUSKYVYN SKAALAUTUMINEN KELLOTAAJUUDEN SUHTEEN

Pienempi tulos on parempi

Kellotaajuus (MHz):	Cinebench R10 -tulos (minuuttia:sekuntia)
3411,7	1:19
3511,9	1:17
3612,4	1:15
3712,8	1:13
3813,0	1:11
3913,2	1:09
4013,8	1:07
4112,6	1:06
4214,6	1:05
4314,9	1:03
4414,8	1:01
4515,3	1:00
4615,5	0:59
4715,9	0:57
4816,1	0:56
4916,8	0:55
5017,2	0:54
5117,4	0:54
5217,8	0:52
5318,2	0:52
5418,4	0:50
5518,5	0:50
5619,0	0:48
5719,5	0:47
5819,5	0:47
5920,1	0:46
6020,3	0:45
6120,8	0:45