



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

Protopiirilevyjen halpavalmistus -  
tilannekatsaus 2014  
Market review of low-cost PCB  
manufacturing for prototyping in 2014

Toni Suutari

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Toni Suutari  
**Protopiirilevyjen halpavalmistus - tilannekatsaus 2014**

2015

Kandidaatintyö.  
20 s.

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Mikko Kuisma

Työssä selvitetään protopiirilevyjen halpavalmistuksen teknisiä rajoitteita ja kustannuksia. Tutkimuksessa kerätään tietoja piirilevyvalmistajien verkkosivuilta ja vertaillaan eri valmistajien hintoja ja piirilevyjen valmistukseen liittyviä teknisiä rajoitteita. Selvitetään myös piirilevyjen valmistuksen markkinatilannetta.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Degree Programme in Electrical Engineering

Toni Suutari

**Market review of low-cost PCB manufacturing for prototyping in 2014**

2015

Bachelor's Thesis.  
20 p.

Examiner: Research Scientist Mikko Kuisma

The goal of this thesis is to research the technical limitations and prices of low-cost manufacturing printed circuit boards. Data about the price and technical limitations of manufacturing is gathered from websites of PCB manufacturers and then compared. State of PCB market is also examined.

# SISÄLLYSLUETTELO

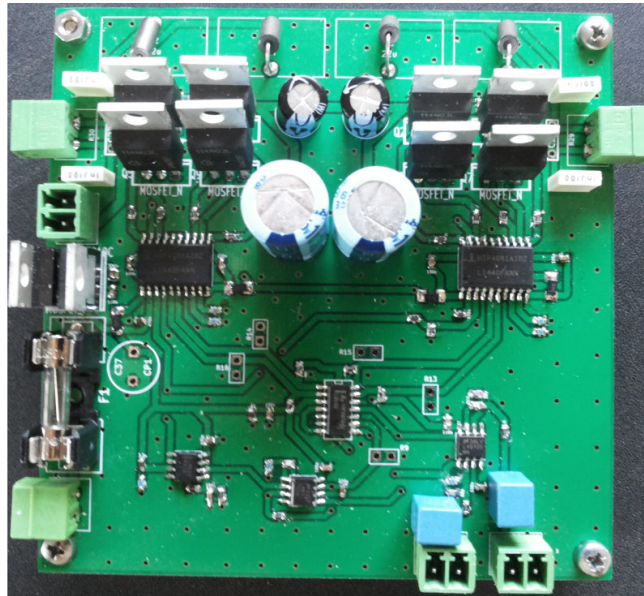
KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT . . . . .	4
1 JOHDANTO. . . . .	5
2 PIIRILEVY . . . . .	8
3 MARKKINATILANNE. . . . .	11
4 VERTAILUA VALMISTAJIEN VÄLILLÄ . . . . .	14
5 YHTEENVETO . . . . .	17
LÄHTEET. . . . .	18

## KÄYTETYT LYHENTEET JA TERMIT

EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
FR-4	Piirilevyn valmistusmateriaali, joka koostuu lasikuidusta ja epoksista
Pad	Piirilevyllä oleva kuparialusta johon komponentti juotetaan kiinni
PCB	Printed circuit board, piirilevy
Silkscreen	Silkkipainokerros on piirilevyllä silkkipainettu kerros, joka sisältää komponenttien ääriviivat ja tekstiä
Soldermask	Juotteenestoinnoite on piirilevyn pinnalla oleva lakkakerros, joka estää juotteen leviämisen piirilevyllä
Trace, veto	Piirilevyllä komponentteja yhdistävä kuparijohdin

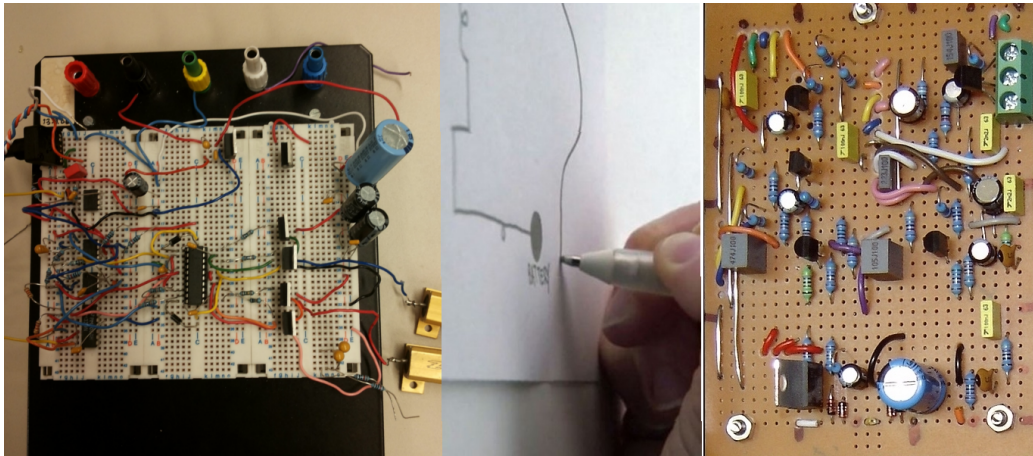
# 1. JOHDANTO

Elektroniikkalaitteen valmistuksen yhtenä osana on laitteen kytkennän testaaminen. Prototyypillä testataan laitteen teknisen kokonaisuuden toimivuus ja valmistettavuus. Elektroniikkalaitteen kytkennän eri osa-alueita testataan erikseen suunnittelun yhteydessä ennen prototyypin valmistusta, mutta kokonaisuuden testaus tehdään yleensä prototyypivaiheessa. Kuvassa 1.1 on esitetty 10 cm<sup>2</sup> piirilevyille toteutettu D-luokan audiovahvistimen prototyyppi.



Kuva 1.1: D-luokan audiovahvistimen prototyyppi.

Elektroniikkalaitteiden prototyypin testaamiseen on eri vaihtoehtoja: piirilevy, koekytkentäalusta ja reikäpiirilevy. Nykyään voidaan myös piirtää piiri tarkoitukseen suunnitellulla kynällä, kuten Circuit Scribe, jossa kynän johtava muste muodostaa piirin.



Kuva 1.2: Vasemmalla koeyhtäälusta, keskellä kynällä piirretty piiri ja oikealla reikäpiirilevy.

Koeyhtäälusta soveltuu parhaiten pienten yhtäntöjen tai yksittäisten komponenttien testaukseen. Laajemmissa yhtäntöissä komponentteja yhdistävät johdot toimivat antennina, jotka aiheuttavat EMC -ongelmia. Ja täten yhtäntä on herkkä häiriöille etenkin taajuuksien kasvaessa.

Kynällä piirretyssä piirissä on mahdollista käyttää pintaliitoskomponentteja, mutta piiri on rajoitettu yhteen kerrokseen. Piirretyn piirin rajoitteina ovat sen tehon kesto ja laajempien piirien piirtämisen työläys.

Reikäpiirilevy ei ole yhtä herkkä häiriöille kuin koeyhtäälusta mutta monimutkaisten yhtäntöjen toteuttaminen on hankalaa suunnitteluohjelmien puutteen vuoksi. Tästä johtuen on myös helppo kytkeä komponentti väärin tai aiheuttaa levyllä oikosulku ja mahdollisesti tuhota prototyypin testattavat komponentit.

Yleensä lopullinen tuote toteutetaan piirilevyllä, jonka vuoksi suunniteltua yhtäntää tulisi testata piirilevyllä. Testauksen kulujen vähentämiseksi protopiirilevyn tulisi olla mahdollisimman halpa. Piirilevyiltä tarvittavia ominaisuuksia voidaan vähentää protovaiheessa, esimerkiksi padien kultaus hapettumisen estämiseksi voidaan jättää pois, jolloin valmistuskustannukset saadaan pienemmiksi.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää protopiirilevyjen halvavalmistuksen nykytilannetta kirjallisuustutkimuksella ja tarkastelemalla piirilevyvalmistajien verkkosivustoja. Työssä selvitetään minkälainen on tämän

hetkinen piirilevyjen markkinatilanne ja vertaillaan piirilevyvalmistajien valmistukseen liittyviä teknisiä rajoitteita sekä piirilevyjen hintoja.

Tutkimus tehdään yksityishenkilön näkökulmasta, joten rajaudutaan pienen 1-10 kappaleen erään piirilevyjä. Vertailtavien valmistajien rajauksen apuna käytetään pcbshopper.com -verkkosivustoa, ja täten keskitytään kiinalaisten piirilevyvalmistajien tarkasteluun. Suurin osa Kiinassa valmistetuista piirilevyistä on normaaleja monikerrospiirilevyjä (WECC 2014), joten tutkimuksessa keskitytään niiden vertailuun. Tutkimuksessa oletetaan prototyypin kytkennän mahtuvan 5 tai 10 cm<sup>2</sup> kokoiselle piirilevyille. Työssä tarkastellaan 1-10 kappaleen eriä prototyyppien testaukseen sopivia 5 ja 10 cm<sup>2</sup> kokoisia 2- ja 4-kerrospiirilevyjä, jotka maksavat alle \$50. Teknisiä rajoitteita piirilevyllä ovat vetojen leveydet ja niiden minimietäisyys, reikien koko, kuparikerroksen paksuus, silkipainokerroksen leveys ja tekstin koko sekä juotteenestopinnoitteen leveys ja varoetäisyys.



## 2. PIIRILEVY

Piirilevy on elektroniikkalaitteissa komponentit toisiinsa yhdistävä kiinnitysalusta. Yleensä piirilevyn runko on valmistettu FR-4 materiaalista, johon on kiinnitetty kuparikerros. FR-4 (fire resistant 4) koostuu lasikuitukerroksesta, jotka on liimattu yhteen epoksilla (Karjalainen 2007; Wikipedia 2014). Kuparikerroksen avulla toteutetut vedot, eli johtavat kuparilinjat komponenttien ja padien välillä, läpiviennit ja padit muodostavat levyllä olevan piirin. Lisäksi levyllä on mahdollisesti juotteenestopinnoite ja silkkipainokerros.

Juotteenestopinnoite on lakkakerros, joka estää juotteen leviämisen paideilta kuparivedoille. Tämä helpottaa komponenttien juottamista vähentämällä juotteen leviämisen aiheuttamia virheitä. Juotteenestopinnoitteen käyttö mahdollistaa aaltojuottamisen, jossa piirilevy kuljetetaan sulan tina-aallon läpi. (Gold Phoenix 2014a)

Silkkipainokerros tarkoittaa piirilevyllä juotteenestopinnoitteen päälle silkkipainatuksella tehtyä kerrosta, joka sisältää kuvan tai tekstin. Yleisesti silkkipainokerros sisältää komponenttien ääriiviivat ja tunnisteet niiden asettelun selkeyttämiseksi. (Gold Phoenix 2014b)

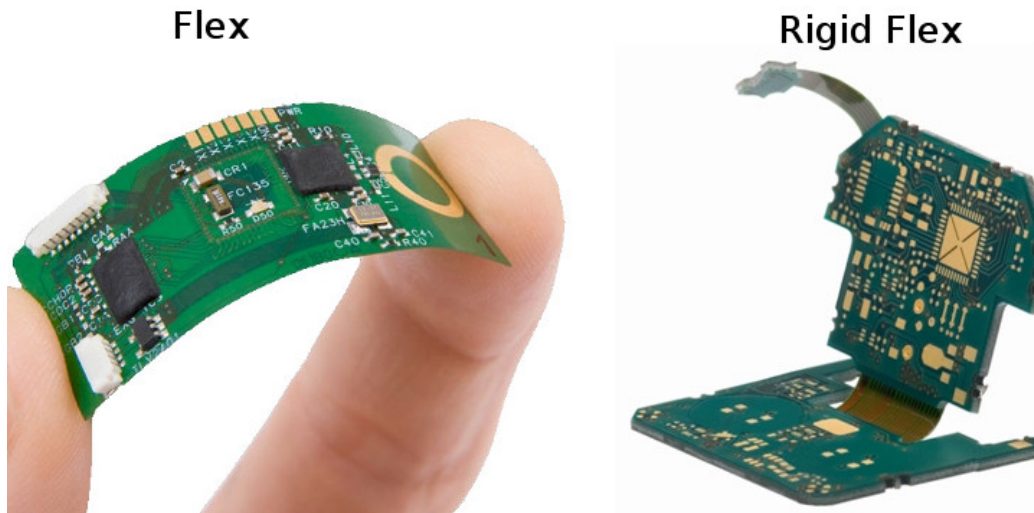
Piirilevy koostuu yhdestä tai useammasta kerroksesta. Suurin osa piirilevyistä on monikerrospiirilevyjä (WECC 2014). Muita piirilevytyyppejä on Flex-, Rigid Flex- ja HDI-piirilevy.

High Density Interconnect, HDI -piirilevyt ovat piirilevyjä, joissa on suurempi johdintiheys kuin normaaleissa piirilevyissä. HDI -piirilevyjen vetojen minimietäisyydet ovat  $\leq 100\mu m$ , läpivetojen halkaisija pienempi kuin  $150\mu m$  ja padit ovat pienempiä kuin  $400\mu m$  sekä padien tiheys suurempi kuin  $20\text{ pad/cm}^2$ . (NCAB Group 2012)

Flex -piirilevyt, eli taipuvat piirilevyt on valmistettu helposti taipuvasta materiaalista. Valmistusmateriaalina on tyypillisesti polyimidi, polyeetterieetteriketoni tai johtava polyesterikalvo. (Wikipedia 2015) Koska levyt taipuvat helposti, ne saadaan mahtumaan pieneen tilaan ja ovat helposti muotoiltavissa lopullisen tuotteen kotelon muotoon.

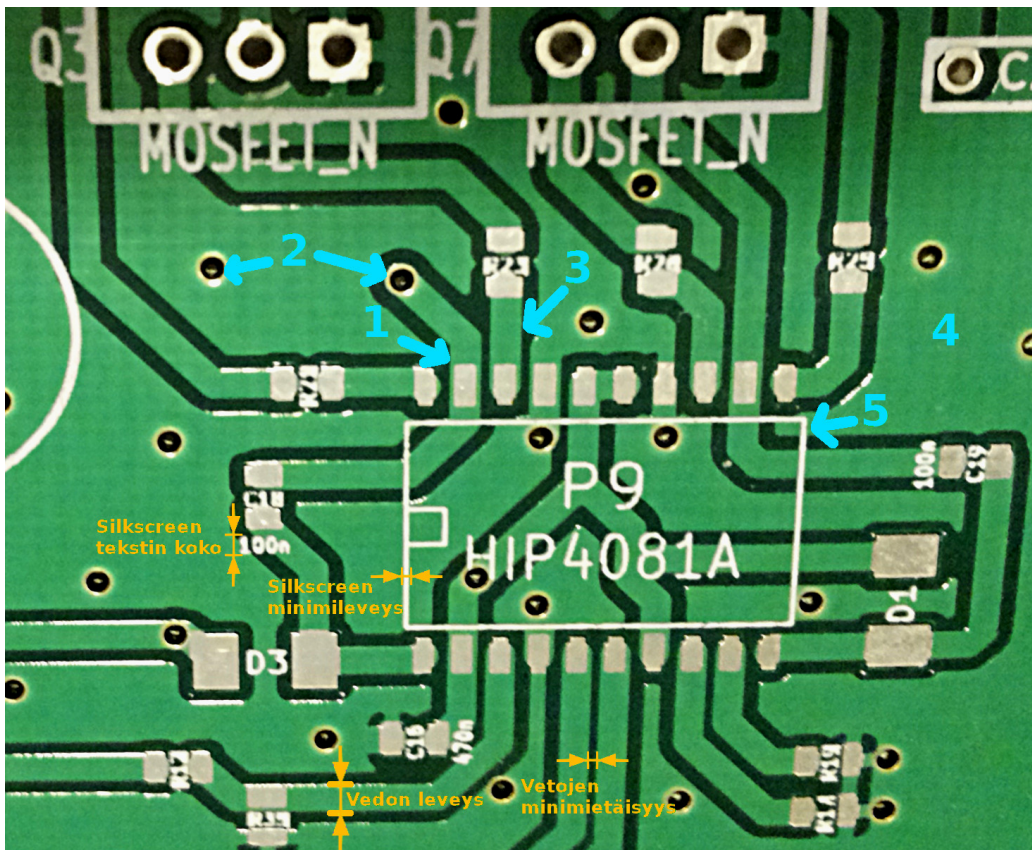
Rigid Flex -piirilevyt koostuvat useista monikerrospiirilevyistä, jotka on

yhdistetty toisiinsa taipuvasta piirilevystä toteutetulla johdotuksella.(TTM Technologies 2015) Flex- ja Rigid Flex-piirilevyt on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1: Flex- ja Rigid Flex-piirilevy. (IMEC 2009; Altium 2013)

Tyypillisen monikerrospiirilevyn kuparikerroksen paksuus on 0.035 mm ja sisäisen kuparikerroksen paksuus 0.017 mm, kun kerroksia on enemmän kuin kaksi. Piirilevyn vetojen tyypillinen minimileveys ja -etäisyys on 0.15mm ja reikien koko 0.3 - 6.35 mm. Piirilevyn eri osia ja valmistuksen teknisiä rajoitteita on selvennetty kuvassa 2.2.



Kuva 2.2: Kirjoittajan suunnitteleman, kuvassa 1.1 esitetyn, D-luokan audiovahvistimen prototyypin pääteaste piirilevyllä. Kuvaan on merkitty piirilevyn eri osia ja valmistuksen teknisiä rajoitteita.

Kuvan 2.2 numeroidut kohdat:

1. Padien avulla yhdistetään komponentit piirilevyyn.
2. Läpiviennellä saadaan yhdistettyä piirilevyn eri kuparikerrokset toisiinsa tai siirrettyä veto kulkemaan levyn toisella puolella tai kerroksella.
3. Vedoilla yhdistetään komponentit toisiinsa.
4. Juotteenestopinnoite eli levyn pinnalla oleva lakkakerros estää juotteen leviämisen levyllä.
5. Komponentin ääriviivat ja tunniste silkipainokerroksella.

### 3. MARKKINATILANNE

Älypuhelinien ja taulutietokoneiden nopea kasvu vuonna 2012 aiheutti piirilevyvalmistajien hintakilpailun (Research In China 2014), jonka seurauksena piirilevyjen hinnat alenivat merkittävästi. Piirilevyteollisuuden vuosittainen kasvu lähivuosina on ollut noin 6 % ja normaalien monikerrospiirilevyjen tuotanto on vähentynyt valmistajien siirtyessä taipuvien piirilevyjen valmistukseen (Research In China 2014).

Piirilevyjen valmistus voidaan jaotella useaan eri osaan piirilevytyypin mukaan. Yksi jaotteluperiaate on esitetty taulukossa 3.1, jossa listataan eri tyyppien tuotantoarvot vuonna 2013.

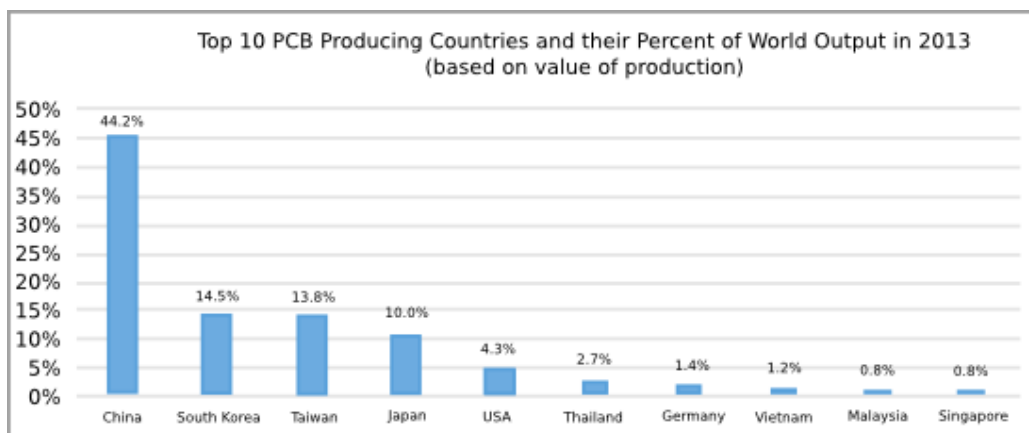
Taulukko 3.1: Piirilevytuotannon jaottelu miljoonissa US dollareissa. “Other Asia” sisältää Indonesian, Malesian, Filippiinit, Singaporen, Thaimaan ja Vietnamin. (WECC 2014)

**In millions of U.S. dollars**

Country or Region Where PCBs Were Produced	Rigid 1-2 Sided	Standard Multilayer	HDI/ Microvia/ Build-Up	IC Substrate	Flexible Circuits	Rigid Flex	Others	Total Aggregate Data in US\$
China	2,016	13,148	4,605	653	4,672	248	4	25,345
Hong Kong	4	72	8	57	0	0	1	142
India	256	144	0	0	21	2	3	426
Japan	1,040	1,622	681	2,038	832	103	303	6,618
South Korea	711	2,152	1,497	2,620	1,778	674	0	9,433
Taiwan	685	1,751	1,262	2,704	1,584	158	0	8,144
Other Asia	640	626	358	652	1,452	33	0	3,760
Western Europe	684	992	358	0	170	166	0	2,370
North America	300	1,791	195	16	278	105	365	3,050
Central & South America	56	29	0	0	1	0	0	86
Israel & North Africa	54	27	13	0	1	42	0	138
<b>Global Total</b>	<b>6,446</b>	<b>22,354</b>	<b>8,978</b>	<b>8,739</b>	<b>10,788</b>	<b>1,531</b>	<b>676</b>	<b>59,512</b>

Taulukosta 3.1 nähdään normaalien monikerrospiirilevyjen valmistuksen olevan tuotantoarvon perusteella suurin. Kiinasta tuli maailman suurin piirilevyvalmistaja vuonna 2006 (Mao et al. 2011). Vuonna 2013 Kiina oli johtava piirilevyvalmistaja 44,2 %:n osuudella koko piirilevytuotannosta (kuva 3.1).

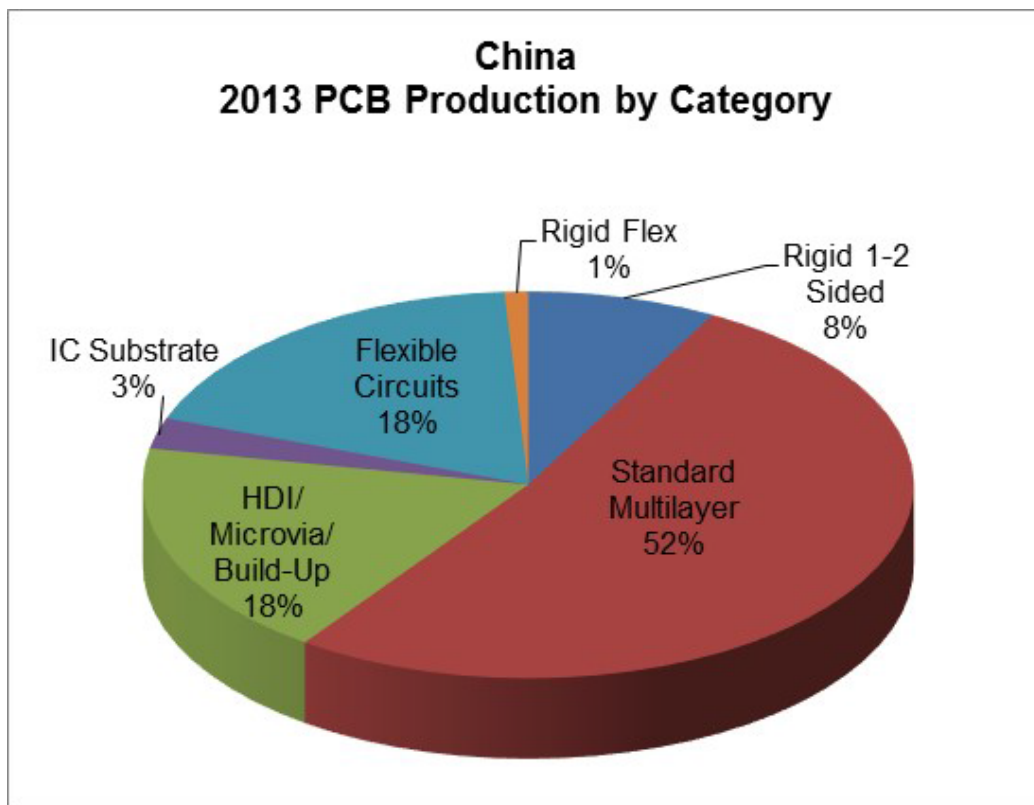
Piirilevyjen valmistus keskittyy pääosin Aasiaan, kuten voidaan nähdä taulukosta 3.1 ja kuvasta 3.1. Tämän seurauksena myös suurin osa halvoista piirilevyistä valmistetaan Kiinassa.



Kuva 3.1: Piirilevytuotannon osuus jaoteltuna maan mukaan. (IPC 2013)

Kuvasta 3.1 nähdään, että suurin osa piirilevyistä valmistetaan Kiinassa. Kiina, Etelä-Korea, Taiwan ja Japani valmistaa yli 80 %:a kaikista piirilevyistä.

Suurin osa valmistetuista piirilevyistä on normaaleja monikerrospiirilevyjä. Kuvassa 3.2 on esitetty WECC:n vuoden 2013 raportin mukainen jakauma Kiinassa valmistetuista piirilevyistä.



Kuva 3.2: Piirilevyjen valmistus Kiinassa piirilevytyypin mukaan vuonna 2013. (WECC 2014)

## 4. VERTAILUA VALMISTAJIEN VÄLILLÄ

Vertailu toteutettiin yksityishenkilön näkökulmasta. Täten voidaan olettaa, että piirilevyn tilaajalla ei ole suhteita valmistajaan tai erillisiä sopimuksia valmistajan kanssa, joten valmistajien hintoja ei ole kilpailutettu.

Vertailussa käytettiin apuna pcbshopper.com -verkkosivustoa, jonka hakukoneella listattiin 5 ja 10 cm<sup>2</sup> kokoisia piirilevyjä. Haku rajattiin 1-10 kappaleen tilauserään sekä valmistajiin, jotka toimittivat piirilevyjä Suomeen. Haun tulokset järjestettiin valmistushinnan mukaan ja tarkasteltiin tarkemmin 10 halvinta valmistajaa. Näistä valittiin tarkasteluun ne valmistajat jotka valmistivat tutkimuksen rajaukseen sopivia piirilevyjä alle \$50:lla.

Rajoitteisiin sopivia valmistajia hakutuloksessa olivat ShenZhen2U, Dirt Cheap Dirty Boards, ITEAD Studios, Seeedstudio, Elecrow, MakerStudio, OSH Park ja Smart Prototyping. Näiden valmistajien verkkosivuilta kerätyjä valmistukseen liittyviä teknisiä rajoitteita on listattu taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1: Tutkimuksessa tarkasteltujen piirilevyvalmistajien ilmoittamia teknisiä rajoitteita.

		ShenZhen2U	Dirt Cheap Dirty Boards	ITEAD Studios	Seeedstudio	Elecrow	MakerStudio	OSH Park	Smart Prototyping
Vedon leveys	[mm]	0,1524	0,127	0,15	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524
Vetojen minimietäisyys	[mm]	0,1524	0,127	0,15	0,1524	0,2032	0,2032	0,1524	0,1524
Silkscreen leveys	[mm]	0,1524	0,15	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524	0,1524
Silkscreen tekstin koko	[mm]	0,8128	0,15	0,1524	1	0,8128	0,8128	0,1872	0,8128
Kuparikerros, ulompi	[mm]	0,03	0,035	0,035	0,035 – 0,070	0,035	0,035	0,035	0,035
Kuparikerros, sisempi	[mm]	0,01 – 0,018	0,017	0,017 – 0,1	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Reikien halkaisija	[mm]	0,3 – 6,35	>0,3	0,3 – 6,30	0,3 – 6,35	0,3 – 6,35	0,3 – 6,35	0,3 – 6,73	>0,3
Soldermask leveys	[mm]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2		
Soldermask varetäisyys	[mm]	0,13	0,1	0,1	0,13	0,2	0,2		

Taulukosta 4.1 nähdään, että teknisissä rajoitteissa valmistajien välillä ei ole suuria eroja. Eniten poikkeamia on vetojen minimimietäisyyksissä, reikien halkaisijoissa ja silkkipainokerroksen tekstin koossa.

Valmistajien hintoja on verrattu taulukossa 4.2. Hintojen vertailussa rajoitettiin 5 cm<sup>2</sup> ja 10 cm<sup>2</sup> 2-kerrospiirilevyihin ja 5 cm<sup>2</sup> 4-kerrospiirilevyihin.

Minimi tilausmäärä on valmistajasta riippuen joko 5 tai 10 kappaletta, poikkeuksena kuitenkin OSH Park jossa tilausmääränä on 3 kappaletta ja hinta määräytyy piirilevyn pinta-alan mukaan. 10 kappaletta 5 cm<sup>2</sup> piirilevyjä on keskimäärin vain 5-10 snt kalliimpi kuin 5 kappaletta, jolloin 10 kappaleen valmistuserä tulee kannattavammaksi. Täten taulukossa 4.2 vertaillaan 10 kappaleen valmistuseriä.

Taulukko 4.2: pcbshopper.com -verkkosivulta kerättyjä hintoja 5 ja 10 cm<sup>2</sup> piirilevyille.

Valmistaja	Hinta 5x5cm 2 kerrosta	Hinta 10x10cm 2 kerrosta	Hinta 5x5cm 4 kerrosta	Kpl
ShenZhen2U	\$9.90	\$11.90	\$22.90	10
Dirt Cheap Dirty Boards	\$14	\$25	\$48	10
ITEAD Studio	\$9.90	\$19.90	\$65	10
Seedstudio	\$9.90	\$21.90	\$39.90	10
Elecrow	\$9.90	\$15.90	\$23.90	10
Maker Studio	\$9.99	\$9.99	—	10
OSH Park	\$10	\$20	\$20	3
Smart Prototyping	\$9.90	\$11.90	\$29.90	10

Taulukosta 4.2 nähdään, että 5 cm<sup>2</sup> 2-kerrospiirilevyjen hinta on noin \$10 ja valmistajien välillä ei ole suuria eroja. 10 cm<sup>2</sup> piirilevyissä ja 4-kerrospiirilevyjen hinnoissa on selviä eroja valmistajien välillä. Maker Studio on halvin 10 cm<sup>2</sup> piirilevyn valmistaja ja OSH Park halvin 4-kerrospiirilevyn valmistaja. Kappalemäärältä halvin 4-kerrospiirilevyn valmistaja on kuitenkin ShenZhen2U. ITEAD Studio:n 4-kerrospiirilevyn hinta on yli tarkastelulle määritetyn \$50 raja-arvon ja Maker Studio ei valmista 4-kerrospiirilevyjä.



Osa valmistajista tuottaa myös piirilevyjä, joissa on enemmän kuin kaksi kerrosta alle \$50:lla. Näiltä valmistajilta ostettaessa \$50 riittää 5 kappaleeseen  $10 \text{ cm}^2$  4-kerrospiirilevyjä. Hintaerot valmistajien välillä tulevat selvemmin esiin piirilevyn koon ja kerrosten määrän kasvaessa. Vertailtujen valmistajien määrä on pieni joten tuloksista ei voi tehdä yleistäviä johtopäätöksiä.

## 5. YHTEENVETO

Tutkimus tehtiin syksyllä 2014. Markkinatilannekatsauksen mukaan tutkimuksen toteuttamisen aikaan eniten piirilevyjä valmistettiin Kiinassa ja vertailuun valituista valmistajista kaikki olivat kiinalaisia. Piirilevyvalmistuksen hintatilanne muuttuu kuitenkin jatkuvasti, joten tulokset vanhenevat nopeasti. Tekniset rajoitteet eivät muutu yhtä nopeasti, mutta valmistajien ottaessa käyttöön uudempia tekniikoita, voivat tässä tutkimuksessa esitetyt valmistuksen tekniset rajoitteet muuttua.

Tutkimuksessa todettiin, että alkuperäinen rajausta 2-kerrospiirilevyjen osalta 50 dollariin osoittautui isoksi summaksi. Rajauksen olisi voinut asettaa alemmaksi, sillä moni valmistaja myy 10 kappaletta  $5 \text{ cm}^2$  2-kerrospiirilevyjä 10 dollarilla.

Piirilevyjen valmistuksen teknisissä rajoitteissa eri valmistajien välillä ei ole suuria eroja. Suurimmat erot teknisissä rajoitteissa valmistajien välillä ovat vetojen minimietäisyyksissä, reikien halkaisijoissa ja silkipainokerroksen tekstin koossa.

Tutkimuksessa verrattiin vain pientä määrää valmistajia. Jatkotutkimuksessa olisi mahdollista laajentaa rajausta, jotta saataisiin kattavampi tulos, jonka pohjalta voidaan tehdä enemmän johtopäätöksiä. Jatkotutkimuksessa voitaisiin myös keskittyä taipuviin piirilevyihin, joiden osuus on kasvanut viime vuosina.

# LÄHTEET

- Altium (2013). *Flex and Rigid-Flex Printed Circuit Design*. URL: <http://techdocs.altium.com/display/AD0H/Flex+and+Rigid-Flex+Printed+Circuit+Design> (viitattu 22.06.2015).
- Dirt Cheap Dirty Boards*. URL: <http://dirtypcbs.com/> (viitattu 07.01.2015).
- Elecrow. *Elecrow - 10pcs- 2 layer PCB [SPP01010PP] - \$9.90*. Elecrow Bazaar. URL: <http://www.elecrow.com/10pcs-2-layer-pcb-p-1175.html> (viitattu 07.01.2015).
- Gold Phoenix (2014a). *Gold Phoenix PCB Co., Ltd.: The Fundamental of Printed Circuit Board (D. What is soldermask)*. URL: [http://www.goldphoenixpcb.com/html/Support\\_Resource/fpcbboard/arc\\_147.html](http://www.goldphoenixpcb.com/html/Support_Resource/fpcbboard/arc_147.html) (viitattu 10.12.2014).
- Gold Phoenix (2014b). *Gold Phoenix PCB Co., Ltd.: The Fundamental of Printed Circuit Board (E. What is silkscreen)*. URL: [https://www.goldphoenixpcb.com/html/Support\\_Resource/fpcbboard/arc\\_148.html](https://www.goldphoenixpcb.com/html/Support_Resource/fpcbboard/arc_148.html) (viitattu 10.12.2014).
- IMEC (2009). *IMEC reports ultra-thin chip embedding for wearable electronics*. URL: [http://www2.imec.be/be\\_en/press/imec-news/archive-2009/imec-reports-ultra-thin-chip-embedding-for-wearable-electronics.html](http://www2.imec.be/be_en/press/imec-news/archive-2009/imec-reports-ultra-thin-chip-embedding-for-wearable-electronics.html) (viitattu 22.06.2015).
- IPC (2013). *World PCB Production Report for the Year 2013*. URL: [http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?Pageid=World-PCB-Production-in-2013-Estimated-at-\\$59.4-Billion](http://www.ipc.org/ContentPage.aspx?Pageid=World-PCB-Production-in-2013-Estimated-at-$59.4-Billion) (viitattu 17.11.2014).
- ITEAD Studio. *ITEAD Studio 2Layer Green PCB 5cm x 5cm Max*. URL: <http://imall.iteadstudio.com/open-pcb/pcb-prototyping/im120418001.html> (viitattu 07.01.2015).

- Karjalainen, Kimmo (2007). *Piirilevyn suunnittelu ASIC-piirin testikäyttöön*. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. URL: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/39725/nbnfi-fe200808041758.pdf>.
- Kickstarter. *Circuit Scribe: Draw Circuits Instantly by Electroninks Incorporated* —Kickstarter. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/electroninks/circuit-scribe-draw-circuits-instantly> (viitattu 28.09.2014).
- Maker Studio. *Maker Studio PCB Prototyping*. URL: [http://makerstudio.cc/index.php?main\\_page=product\\_info&cPath=8&products\\_id=14](http://makerstudio.cc/index.php?main_page=product_info&cPath=8&products_id=14) (viitattu 07.01.2015).
- Mao, Junfa et al. (2011). "Performance enhancement research for printed circuit board manufacture in China". Teoksessa: *Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International*. Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International, s. 1–4. DOI: [10.1109/MWSYM.2011.5972722](https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972722).
- NCAB Group (2012). *HDI Printed Circuit Boards*. URL: [http://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2012/01/hdi\\_presentation\\_110913.pdf](http://www.ncabgroup.com/wp-content/uploads/2012/01/hdi_presentation_110913.pdf).
- OSH Park. *OSH Park ~ Pricing and Specifications*. URL: <https://oshpark.com/pricing> (viitattu 07.01.2015).
- Research In China (2014). *Global and China Advanced Rigid PCB Industry Report, 2014-2015*. Research In China.
- Seedstudio. *Fusion PCB, customize PCB prototype | Seedstudio*. URL: <http://www.seedstudio.com/service/index.php?r=pcb> (viitattu 07.01.2015).
- ShenZhen2U. *PCB-ShenZhen2U*. URL: <http://www.shenzhen2u.com/PCB> (viitattu 07.01.2015).
- Smart-Prototyping. *Smart-Prototyping - PCB Prototyping*. URL: <http://smart-prototyping.com/Prototyping-Services/Electronic-Prototyping/PCB-Prototyping.html> (viitattu 07.01.2015).

TTM Technologies (2015). *Flex & Rigid-Flex PCBs - TTM Technologies, Inc.*  
URL: [http://www.ttmtech.com/products/prod\\_flex.aspx](http://www.ttmtech.com/products/prod_flex.aspx) (viitattu 22.06.2015).

WECC (2014). *WECC Global PCB Production Report For 2013*. World Electronic Circuits Council.

Wikipedia (2015). *Wikipedia: Flexible electronics*. Teoksessa: *Wikipedia, the free encyclopedia*. Page Version ID: 667228970. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Flexible\\_electronics&oldid=667228970](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Flexible_electronics&oldid=667228970) (viitattu 22.06.2015).

Wikipedia (2014). *Wikipedia: FR-4*. Teoksessa: *Wikipedia, the free encyclopedia*. Page Version ID: 637353797. URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=FR-4&oldid=637353797> (viitattu 10.12.2014).