

Ellinoora Toivonen

MIKROBIAALISET TEKIJÄT ELEKTRONIIKASSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Yliopistonlehtori Erja Sipilä
5/2021

TIIVISTELMÄ

Ellinoora Toivonen: Mikrobiaaliset tekijät elektroniikassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Pääaine: Elektroniikka
Tarkastaja: Yliopiston lehtori Erja Sipilä
Toukokuu 2021

Mikrobit ovat mikroskooppisen pieniä eliöitä, joita esiintyy kaikkialla maapallolla. Mikrobit voivat olla haitaksi tuhoamalla elektroniikkalaitteita, mutta niistä on myös hyötyä elektroniikan sovelluksissa. Tämän kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on käsitellä mikrobien aiheuttamia haittoja sekä niiden antamia hyötyjä elektroniikassa. Työssä käsitellään kaikkien mikrobien aiheuttamat haitat erikseen, sekä miten näitä haittoja voitaisiin mahdollisesti ehkäistä. Työssä käsitellään mikrobien hyötyjä esimerkiksi kiertotalouden, uusien materiaalien sekä elektroniikan rakennuspalikoiden osalta.

Tulevaisuudessa ilmastonmuutos tulee lisäämään mikrobien aiheuttamia haittoja, sillä ilmaston lämpeneminen sekä ilmankosteuden nousu mahdollistavat mikrobeille otolliset elinolosuhteet. Bakteerit ja sienet ovat sopeutuneet käyttämään elektroniikan materiaaleja, kuten esimerkiksi metalleja ja muoveja ravinnokseen, mikä mahdollistaa niiden kasvun piirilevyillä. Mikrobien aiheuttamat haitat piirilevyillä voivat olla esimerkiksi piirilevyn täysi toimintakyvyttömyys, oikosulut tai eristeiden ominaisuuksien muuttuminen. Mikrobeja pystytään kuitenkin torjumaan sähkövirralla, biosideilla tai monomeerikalvoilla. Mikrobien pääsyä piirilevyille voidaan myös ehkäistä si-
netöimällä sekä koteloimalla mikropiirejä.

Mikrobeilla on todella laajat käyttökohteet elektroniikan sovelluksissa. Mikrobien avulla elektroniikkajätteestä pystytään keräämään uudelleenkäytettävät materiaalit, millä voidaan vähentää kasvavan elektroniikkajätteen määrää. Mikrobien aineenvaihduntatuotteita voidaan käyttää esimerkiksi loogisten porttien, holografisten muistien tai optoelektroniikan sovellusten valmistuksessa. Mikrobeilla on myös laajasti erilaisia nanoteknologian sovelluksia, esimerkiksi kanavatransistoreina sekä teholähteinä.

Avainsanat: Mikrobit, elektroniikka, kiertotalous, nanoteknologia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ELEKTRONIIKKALAITTEET	2
2.1 Elektronikkalaitteiden valmistus.....	2
2.2 Elektronikkalaitteiden materiaalit	3
2.3 Elektronikkalaitteiden ominaisuudet	5
3. MIKROBIEN OMINAISUUDET.....	6
3.1 Bakteerit.....	6
3.2 Homeet ja hiivat	7
3.3 Levät ja arkit	9
3.4 Virukset.....	10
4. MIKROBIEN HAITAT ELEKTRONIIKKALAITTEILLE	12
5. MIKROBIEN HYÖDYT ELEKTRONIIKASSA	16
5.1 Mikrobit kiertotaloudessa	16
5.2 Mikrobit tuottamien pigmenttien sovellukset	17
5.3 Nanoteknologian sovellukset.....	18
6. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BT	epokshartsimateriaali (bismaleimidi-triatsiini)
Df	häviökerroin
DNA	deoksiribonukleiinihappo
FR4	Lasilla vahvistettu hartsilaminaattimateriaali
Gy	absorboituneen annoksen yksikkö
NAND	ei-ja
NOR	ei-eikä
NOT	ei
RNA	ribonukleiinihappo
XOR	poissulkeva tai

1. JOHDANTO

Biologiset haitat elektroniikkalaitteille alkoivat kiinnostaa toisen maailmansodan aikana Yhdysvaltain puolustusministeriötä, sillä trooppisessa ilmastossa elektronisissa laitteissa alkoi esiintyä vakavia toimintahäiriöitä. Toimintahäiriöiden ymmärrettiin johtuvan mikrobeista, joten mikrobien vaikutusta alettiin tutkimaan enemmän. (Lascaro 1970; Wasserbauer 2004) Mikrobien erilaiset ominaisuudet ja aineenvaihduntareaktiot mahdollistavat mikrobien selviämisen erilaisissa orgaanisissa ja epäorgaanisissa aineissa, myös piirilevyillä ja johdoissa. Mikrobien haitat elektroniikkalaitteissa on jatkuvasti kasvava ongelma, sillä ilmastonmuutoksen aiheuttama ilmastonlämpeneminen ja kasvava ilmankosteus parantavat mikrobien mahdollisuuksia selvitä myös ravintoköyhemmissä ympäristöissä (Alava et al. 1996).

Mikrobiologisten tutkimusmenetelmien kehittyessä alettiin tutkimaan myös mikrobien hyödyllisiä ominaisuuksia elektroniikkaan liittyen. Elektroniikkajätteen määrä on ollut jatkuvassa kasvussa jo vuosikymmeniä (Olenrewaju 2021). Elektroniikkajätteen joukossa on paljon materiaaleja, jotka voitaisiin uudelleenkäyttää (Brandl et al. 2001). Mikrobien mahdollisuuksia kiertotaloudessa on tutkittu ja tulevaisuudessa mikrobeilla voidaan ottaa talteen tärkeitä metalleja (Brandl et al. 2001). Tutkijat ovat löytäneet mikrobeista paljon hyödyllisiä ominaisuuksia nanoteknologian sovelluksiin. Mikrobeja voidaan käyttää esimerkiksi pieninä generaattoreina tai biosensoreina (Niemeyer 2006).

Tämä työ on kirjallisuusselvitys, jossa tutkitaan mikrobien haittoja ja mahdollisia käyttökohteita elektroniikassa. Toisessa luvussa perehdytään elektroniikkalaitteiden erilaisiin materiaaleihin ja ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat niiden kykyyn torjua mikrobikasvua, sekä tekijöihin, jotka mahdollistavat mikrobikasvun. Kolmannessa luvussa käsitellään erilaisia mikrobeja ja niiden mahdollisia elinympäristöjä. Neljännessä luvussa toisen ja kolmannen luvun ominaisuudet yhdistetään ja käsitellään mikrobien aiheuttamia haittoja elektroniikkalaitteille. Viides luku käsittelee tulevaisuuden elektroniikan sovelluksia, joissa mikrobeja voidaan käyttää hyödyksi. Kuudennessa luvussa yhdistetään havainnot ja johtopäätökset.

2. ELEKTRONIKKALAITTEET

Mikropiiri on piille tai muulle puolijohdemateriaalille valmistettu sähköllä toimiva komponentti. Useimmiten mikropiiri on elektroniikkalaitteen ydin. Elektroniikkalaitteita ovat esimerkiksi älypuhelimet, tietokoneet tai kamerat. Elektroniikkalaitteissa käytetään erilaisia komponentteja, esimerkiksi vastuksia, kondensaattoreita tai transistoreja. Näillä komponenteilla on kaikilla omat sähköiset ja mekaaniset ominaisuutensa, joilla mahdollistetaan laitteen toiminta. (Storey 2006)

Piirilevyjen valmistuksen eri vaiheissa, esimerkiksi komponenttien koteloinnissa käytetään orgaanisia ja epäorgaanisia materiaaleja (Rao & Tummala 2019). Jotkin näistä materiaaleista, kuten esimerkiksi muovit, hartsit ja kupari ovat sellaisia, että mikrobit voivat käyttää näitä ravintonaan (Alava et al. 1996). Toisaalta piirilevyt mahdollistavat mikrobeille lämpimät kasvuolosuhteet. Kosteassa ympäristössä huonosti koteloituun elektroniikkalaitteeseen voi myös päästä kosteutta ja pölyä (Rao & Tummala 2019). Nämä olosuhteet ovat ideaalisia mikrobialiselle kasvustolle (Alava et al. 1996). Tässä kappaleessa käsitellään elektroniikkalaitteiden materiaaleja ja ominaisuuksia, jotka vaikuttavat niiden kykyyn sietää mikrobialisia haittatekijöitä. Samalla käsitellään myös valmistuksen niitä vaiheita, jotka altistavat mikrobialiselle kasvulle.

2.1 Elektroniikkalaitteiden valmistus

Mikropiiri, toiselta nimeltään integroitu piiri, on puolijohdekomponentti, joka sisältää aktiivisia ja passiivisia komponentteja. Vahvistimet, mikroprosessorit ja suorittimet ovat kaikki mikropiirejä. Nämä mikropiirit toimivat puolijohteiden avulla. Suosituimpia puolijohdeita, joita käytetään mikropiirien valmistamiseen, ovat pii, germanium, gallium arsenidi ja gallium nitridi. Mikropiirit valmistetaan valmistamalla ensimmäiseksi puolijohdekiekko, josta myöhemmin valmistetaan komponentit. Kiekkojen valmistuksessa bakteerit saattavat päästä kiekon pinnalle, minkä takia on erittäin tärkeää, että kiekot valmistetaan puhdastiloissa. Mikrobit voivat päästä kiekkoille esimerkiksi ilmasteitse tai työntekijöiden kengissä pölypartikkelien mukana. (Rao & Tummala 2019)

Valmis paloitetu piikiekkko asetetaan komponenttikoteloon ja pakataan. Pakkauksen tehtäviä ovat signaalin välittäminen, tehon jakaminen ja lämmön siirtäminen. Pakkauksella myös eristetään mikropiiri muusta piirilevystä ja suljetaan ulkopuolelle kosteutta, pölyä ja mikrobeja. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019). Pakkaukset voivat materiaalista riippuen olla kuitenkin alttiita korroosiolle. Esimerkiksi sienet voivat käyttää ravintonaan

erilaisia muoveja, jolloin pakkauksesta tulee niille potentiaalinen kasvuympäristö (Wainwright et al. 1993; Brandl et al. 2001).

Komponentti eristetään ympäristöstä ja tämä tapahtuu sinetöinnin tai koteloinnin avulla. Sinetöinnillä ja koteloinnilla suojataan elektronista laitetta ulkoisilta saasteilta ja kosteudelta. Sinetöinnissä kotelona käytetään epäorgaanisia aineita, kuten metalleja tai keraameja. Koteloinnissa käytetään erilaisia koteloita. Käytettyjä materiaaleja koteloille ovat esimerkiksi piidioksidi, epoksihartsit, syanaattiesteri ja uretaani. Kotelointi tehdään valamalla tai nestekoteloimalla. Sinetöinnissä kotelo juotetaan tai lasikoteloidaan tiiviiksi ja sen sisälle muodostetaan näin inertti ympäristö. Sinetöinti on mikrobien kannalta luotettavampi tapa, mutta jotkin mikrobilajikkeet voivat käyttää myös metalleja ravintonaan. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019)

Piirilevy koostuu pohjalevystä ja johdinpiiristä. Pohjalevy on eristävää materiaalia ja se antaa mekaanista tukea komponenteille ja johtimille. Pohjalevyn päällä on johdinpiiri, joka on yleisimmin kuparifoliota. Johdinpiiri mahdollistaa yhteyden komponenttien välille. Laminaatti on osa piirilevyn pohjalevyä. Se koostuu lujitteesta, hartsista ja johtavasta kerroksesta. Laminaatti valmistetaan hartsilla kyllästetyistä lujitekuitumatoista, jotka päällystetään kuparifoliolla. Lujite kovettaa laminaatin. Yleisesti käytettyjä lujitteita ovat paperi ja lasikuitu. Hartsin tarkoituksena on sitoa lujite yhteen ja samalla esimerkiksi stabiloida lämpöä. Hartsimateriaaleina käytetään esimerkiksi fenolihartsia, epoksia tai polyimidiä. Laminaatin johtava kerros valmistetaan usein kuparista, nikkelistä tai ruostumattomasta teräksestä. (Rao & Tummala 2019)

2.2 Elektroniikkalaitteiden materiaalit

Mikropiirien ja komponenttien pakkauksessa käytetään erilaisia substraatteja. Näitä substraatteja valmistetaan puolijohteista, keraameista, orgaanisista materiaaleista, lasista tai metalleista. Hermeettisellä pakkauksella tarkoitetaan pakkausta, joka muodostetaan yleisimmin keraameista ja ei-hermeettisellä pakkausta, joka valmistetaan yleisimmin muoveista. Hermeettinen pakkaus on tiiviimpi kuin ei-hermeettinen, joten se suojaa paremmin. Eristävinä substraatteina käytetään esimerkiksi orgaanisia laminaatteja, kuten esimerkiksi FR4:ää, alumiinioksidia tai lasia. Keraamit ovat yksi yleisimmistä substraattimateriaaleista ja ne ovat epäorgaanisia kiinteitä aineita, jotka valmistetaan metallien ja epämetallien yhdisteistä. Niiden pääluokat ovat metallioksidit, nitridit, karbidit sekä fluoridit. Orgaanisia substraatteja ovat esimerkiksi polymeerilasikomposiitit, epoksit, polyimidit sekä fluoropolymeerit. Suurin osa pakkauksista tai levyistä on valmistettu näistä materiaaleista. Yleisessä käytössä ovat esimerkiksi FR4 ja BT (bismaleimidi-triat-

siini). Mikropiirien valmistamisen lisäksi piitä käytetään myös pakkaamisessa sen erinomaisen lämmönsietokyvyn sekä tarkkuuden ansiosta. Viimeisenä pakkausmateriaalina käytetään lasia. Laseiksi luokitellaan epäorgaaniset, ei-metalliset ja ei-kiteiset kiinteät aineet, jotka on valmistettu lasia muodostavista oksideista, esimerkiksi piidioksidista tai boorioksidista. (Rao & Tummala 2019)

Piirilevyjen johtojen yhteydet valmistetaan johtavista aineista. Kupari on yleisin käytetty johdinmateriaali sen erinomaisen sähkönjohtokyvyn takia. Muita mahdollisia johdinmateriaaleja ovat esimerkiksi keraamit, lasit tai polymeerit. Juotepohjaisia aineita käytetään yhteyden luomiseen. Juotteina käytetään usein tinapohjaisia materiaaleja. Tinaan sekoitetaan esimerkiksi hopeaa tai kuparia. Yleisin käytetty juote on Sn96.5/Ag3.5, jonka sulamispiste on 227 °C. Johtimet voidaan valmistaa myös johtavista liimoista. Niillä on alhainen kovettumislämpötila, mikä alentaa tarvittavaa tuotantolämpötilaa. Liimat ovat tyyppillisesti polymeerejä, joihin on sekoitettu johtavia hopeapartikkeleja. Komponenttien pientyminen on aiheuttanut tarpeen myös ohuemmille johtimille, mihin on vastattu nanomateriaaleilla. Näitä materiaaleja ovat esimerkiksi nanohopea ja nanokupari, joiden nanohiukkasia sekoitetaan erilaisiin liimoihin. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019)

Passiivisiin komponentteihin luokitellaan vastukset, kondensaattorit ja käämit. Ne vievät usein 50 % koko piirilevyn pinta-alasta. Kondensaattorien valmistuksessa käytetään esimerkiksi erilaisia metallien oksideja, metalleja, polymeereja tai keraameja. Käämi muodostetaan sydäimestä ja sen ympärille kierrettävästä johtimesta. Sydän voi olla ilmasydän tai magneettisesta metallista valmistettu. Käämin ympärille kierrettävät johtimet johtavat sähköä. Ferromagneettisia materiaaleja, eli magneettisina pysyviä materiaaleja ovat esimerkiksi nikkeli, rauta, sinkki ja magnesium. Vastuksia valmistetaan esimerkiksi keraameista, metalliseoksista tai polymeerikomposiiteista. Käytettyjä metalliseoksia ovat esimerkiksi nikkelin, kromin, alumiinin tai sinkin seokset. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019)

Tärkeä osa piirilevyjen toimintaa on lämmönsäätely. Korkealla ja vaihtelevalla teholla toimivat laitteet luovuttavat paljon lämpöä ympäristöönsä. Jos tätä lämpöä ei poisteta, laite voi vikaantua. Lämmönsäätelyä varten komponentteihin voidaan lisätä lämpönieruja. Nämä lämpönierut valmistetaan usein alumiinista, sillä alumiinilla on hyvä lämmönjohtokyky. Lämmönsäätelyyn voidaan vaikuttaa myös rajapinnoilla kahden kiinteän pinnan välissä. Nämä rajapinnat valmistetaan usein polymeereistä, juotteista tai esimerkiksi lämpö-öljystä. Lämpö-öljy koostuu epäorgaanisista puutereista, jotka lisätään öljyyn. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019)

2.3 Elektroniikkalaitteiden ominaisuudet

Piirilevyillä on sovelluksesta riippuen erilaiset sähköiset, mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. Sähköisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi piirilevyn resistiivisyys, häviökerroin tai dielektrinen lujuus. Resistiivisyys kertoo, kuinka paljon piirilevymateriaali vastustaa sähköä. Resistiivisyyttä mitataan ohmimetreinä ($\Omega\text{-m}$) tai ohmisenttimetreinä ($\Omega\text{-cm}$). Häviökerroin kertoo tehohäviön piirilevymateriaalissa (D_f). Dielektrinen lujuus taas kertoo piirilevymateriaalin kyvyn vastustaa sähköistä hajoamista piirilevyn Z-suunnassa (V/m). Sähköiset ominaisuudet ovat tärkeitä tekijöitä piirilevyjen suunnittelussa, mutta ne vaikuttavat vain vähän mikrobien mahdollisuuksiin elää piirilevyllä. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019)

Mikrobien selviämisessä tulee ottaa huomioon piirilevyn kemialliset ja mekaaniset ominaisuudet. Mekaanisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi lämmönsietokyky, stressinsietokyky, venyvyys tai kosteus. Mikrobeja ajatellen etenkin lämmönsietokyky ja kosteus ovat tärkeitä. Suurin piirilevyjen hajoamista aiheuttava tekijä on väsymä, joka aiheuttaa 90 % kaikista rakenteellisista sekä sähköisistä vioista. Sähköiset viat johtuvat kuitenkin melkein aina siitä ympäristöstä, mihin ne on suunniteltu. Systeemi, joka on suunniteltu todella korkeisiin lämpötiloihin, tulee todennäköisemmin vikaantumaan juuri näiden korkeiden lämpötilojen johdosta. Kosteissa oloissa viat johtuvat todennäköisimmin korroosioista. Korroosio pääsee systeemin sisälle ilman asianmukaista kotelointia ja sinetöintiä. Syntyvä korroosio voi myös olla mikrobien kasvusta johtuvaa. Kosteassa toimivat piirilevyt ovat alttiimpia mikrobien aiheuttamalle korroosiolle, sillä mikrobit tarvitsevat vettä elääkseen. (Jin et al. 2017; Rao & Tummala 2019)

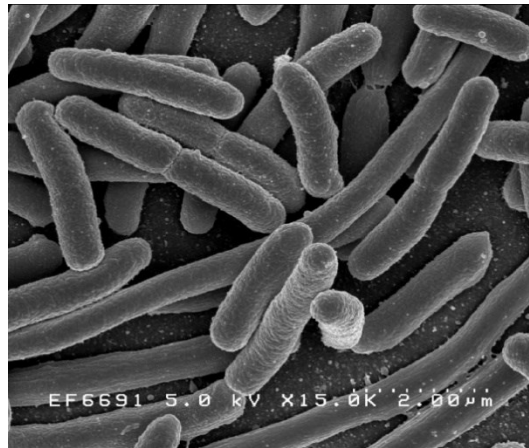
3. MIKROBIEN OMINAISUUDET

Mikrobeihin luokitellaan kaikki mikroskooppisen pienet eliöt. Ne eivät ole yksi eliöryhmä, vaan mikrobeja löytyy useista eri eliöryhmistä. Kaikki bakteerit ja arkit kuuluvat mikrobeihin, mutta mikrobeja löytyy myös sienistä ja kasveista. Sieniin luokiteltavat homeet ja hiivat ovat mikrobeja, sekä kasveihin luokiteltavat yksisoluiset levät. Osa alkueliöistä eli protoktisteista kuuluu myös mikrobeihin. Viruksia ei luokitella eläviksi eliöiksi, sillä niillä ei ole omaa itsenäistä aineenvaihduntaa ja ne tarvitsevat isäntäsolun lisääntyäkseen. Virukset luokitellaan kuitenkin mikrobeiksi. (Madigan et al. 2018)

Mikrobeja elää kaikkialla meidän elinympäristössämme. Mikrobeja ei voi nähdä paljaalla silmällä, mutta niillä on suuri vaikutus meidän elämäämme. Mikrobit voivat olla yksi- tai monisoluisia ja ne elävät usein yhteisössä muiden mikrobien kanssa. (Madigan et al. 2018) Mikrobit ovat kiinnostava eliöryhmä elektroniikan kannalta, sillä mikrobien kyky käyttää aineenvaihduntaansa erilaisia muoveja, metalleja sekä esimerkiksi lasia vaikuttaa elektroniikkalaitteiden toimintaan (Wainwright et al. 1993; Brandl et al. 2001). Mikrobien pieni koko vaikeuttaa elektroniikkalaitteiden eristämistä niin, että mikrobit eivät pääsisi niihin sisälle. Mikrobeilla on suuri diversiteetti eli monimuotoisuus, ja jotkin lajit selviävät kuumissa, kuivissa ja hapettomissakin olosuhteissa (Madigan et al. 2018).

3.1 Bakteerit

Bakteerit on yksi eliökunnan kuudesta kunnasta. Bakteerit ovat kaikki esitumallisia eli prokaryootteja, eikä niillä ole ribosomeja lukuun ottamatta omia soluelimiä. Bakteereilla on laaja ekologinen lokero ja niitä esiintyy kaikkialla maapallolla, esimerkiksi ihmisessä, valtamerissä, elintarvikkeissa ja myös elektroniikkalaitteissa. Bakteereita on montaa eri muotoa ja kuvassa 1 on esimerkkinä *Escherichia coli* -bakteeri. Bakteerit voivat olla anaerobisia tai aerobisia. Anaerobiset bakteerit voivat joko selvitä ilman happea tai kuolevat hapen läheisyydessä. Aerobiset bakteerit taas tarvitsevat happea selvitäkseen. Tämä on ongelma, kun yritetään suunnitella bakteereille sopimattomia olosuhteita. (Solunetti 2006b)



Kuva 1. *Escherichia coli* -bakteeri suurennettuna 25 000 kertaa. (Rocky Mountain laboratories, 2005)

Bakteerien metabolia eli aineenvaihdunta on todella monimuotoista. Heterotrofiset bakteerit saavat hiilensä orgaanisista aineista ja autotrofiset bakteerit epäorgaanisista aineista. Bakteereilla on myös keinoja hajottaa erilaisia aineita, esimerkiksi hiilivetyjä tai synteettisiä kemikaaleja. Jotkin bakteerit voivat käyttää ravintonaan lasia tai metalleja (Brandl et al. 2001). Bakteerien aineenvaihduntatuotteina ne saattavat erittää ulkopuolelleen esimerkiksi erilaisia happoja. (Madigan et al. 2018)

Bakteerit jakautuvat suvuttomasti jakautumalla, joten bakteerin jälkeläiset ovat sen kloonveja. Mutaatioiden avulla bakteerit saavat uusia ominaisuuksia. Koska bakteerien lisääntyminen on hyvin nopeaa, nämä ominaisuudet näkyvät nopeasti bakteeripopulaatiossa. (Madigan et al. 2018) Uudet ominaisuudet voivat vaikuttaa bakteerien selviämiseen eri osissa elektroniikkalaitteita ja vaikuttaa esimerkiksi siihen, mitä bakteerit voivat käyttää ravintonaan (Brandl et al. 2001)

3.2 Homeet ja hiivat

Homeet ovat sieniä, jotka kasvavat monisoluisina rihmastoina. Homeet ovat kaikki eukaryootteja eli tumallisia eliöitä. Homeilla on suuri merkitys kasvibiomassan hajottajina. Homeet käyttävät ravintonaan kuollutta eloperäistä ainetta. Kaikki homeet tarvitsevat aineenvaihduntareaktioihinsa happea ja niukasti vettä. Homeet jakautuvat sekä suvullisesti, että suvuttomasti kuroumaitiöiden avulla. (Solunetti 2006d) Kuvassa 2 näkyy homekasvustoa petrimaljalla.



Kuvat 2 ja 3. Vasemmassa kuvassa homeita petrimaljalla (Khaz 2018). Oikeassa kuvassa hiivasoluja (Science photo library).

Hiivat ovat yksisoluisia sieniä, joista suurin osa elää yksisoluisena, eikä muodosta rihmastoja. Hiivat elävät kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa ja niitä käytetään usein elintarvikkeiden valmistamisessa. Hiivat lisääntyvät suvuttomasti silmikoitumalla, jolloin tytärsolu kurotuu irti emosolusta. (Solunetti 2006c) Kuvassa 3 on useita silmikoituneita homesoluja.

Tässä tutkielmassa sienillä tarkoitetaan homeita ja hiivoja. Sienillä on paljon erilaisia mekanismeja selvitä ja kasvaa myös niille epäedullisemmissä elinympäristöissä. Ne selviävät esimerkiksi myrkyllisissä metalleissa sekä nestemäisessä ja kiinteässä jätteessä. Tämän takia niiden vaikutusta elektroniikkalaitteisiin on tutkittu paljon esimerkiksi Japannissa, missä kosteus ja lämpötila takaavat sienille otolliset kasvuolosuhteet. (Inoue 1988; Drauzio et al. 2018)

Yksi sienten tärkeistä ominaisuuksista niiden selviämiseksi on niiden kyky elää hyvinkin ravintoköyhissä ympäristöissä. Sienet pystyvät itse laajentamaan omaa pinta-alaansa ja kurottautumaan suurelle alalle rihmastojensa avulla. Näin sienet pystyvät ottamaan sisään ravintoaineita kauempaa ympäristöstään. (Drauzio et al. 2018) Piirilevyjen valmistuksessa käytetään paljon muovisia materiaaleja, esimerkiksi epoksia, polyetyyleeniä tai polypropyleeniä. Muovit ovat hiilipohjaisia aineita, ja sienet pystyvät käyttämään niitä ravintonaan ja täten voivat kasvaa piirilevyllä. (Inoue 1988)

Sienet kestävät hyvin korkeita ja matalia lämpötiloja. Eläviä sieniä on löydetty jäätiköiltä, lumen pinnalta ja syvistä valtameristä. Sieniä on myös löydetty 80 asteen lämpötiloista. (Drauzio et al. 2018) Lämmönsietokyky on tärkeä ominaisuus, sillä käytössä olevien virtapiirien lämpötila kohoaa nopeasti satoihin asteisiin (Rao & Tummala 2019).

Piirilevyjen valmistuksessa ja niiden komponenteissa käytetään metalleja. Nämä metallit voivat olla myrkyttömiä tai myrkyllisiä. Yleisiä käytössä olevia piirilevymetalleja ovat esimerkiksi kupari ja nikkeli (Rao & Tummala 2019). Sienet ovat sopeutuneet kasvamaan

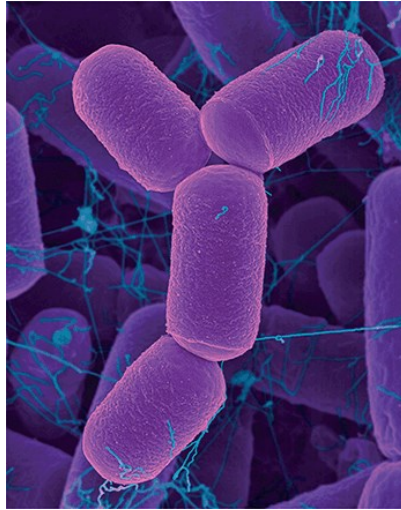
näiden metallien pinnalla ja pystyvät käyttämään niitä jopa ravintonaan. Sienillä on useita suoria ja epäsuoria tapoja, jotka vaikuttavat niiden selviämiseen metallisissa ympäristöissä. Ne pystyvät esimerkiksi vähentämään käytetyn metallin määrää siirtämällä näitä metalleja vakuoleihin tai soluseinämään. (Drauzio et al. 2018)

Homeet ja hiivat pystyvät kestämään myös ionisoivaa säteilyä. Tätä ominaisuutta on tutkittu etenkin ydinonnettomuuksien jälkeen. Jotkin sienilajit selvisivät 5000 Grayta säteilyä ydinonnettomuuden jälkeen. Noin 5–10 Grayta riittää tappamaan ihmisen. Sienillä on kyky erittää melaniinia ja korkea melaniinipitoisuus korreloi hyvän säteilynkestokyvyn kanssa. (Drauzio et al. 2018)

3.3 Levät ja arkit

Levät ovat aitotumallinen ryhmä, johon luokitellaan yksi- ja monisoluisia eliöitä, jotka kaikki pystyvät fotosynteesiin. Levät eivät kuulu mihinkään yhteen eliöryhmään, vaan niitä yhdistää lehtivihreä ja niiden kyky yhteyttää. Levät luokitellaan enemmänkin niiden elintapojen ja piirteiden kuin kehityshistorian perusteella. Levät jaetaan yksisoluisiin, rihmamaisiin sekä sekovartisiin leviin. Kaikki levät eivät ole mikrobeja, vaan jotkin levät saattavat olla useita metrejä pitkiä. Yksisoluiset levät kuuluvat mikrobeihin. Kaikki levät tarvitsevat aineenvaihduntareaktioihinsa happea ja vaativat elääkseen pysyvää kosteutta ja valoa. Levät elävät usein yhteistyössä muiden eliöiden, esimerkiksi sienten kanssa. Tässä kirjallisuusselvityksessä käsitellään mikrobeihin luokiteltavia leviä. (Solunetti 2006e)

Arkit eli arkeonit ovat esitumallinen eliöryhmä, jotka muistuttavat läheisesti bakteereita. Arkeoneille tyypillistä on niiden sopeutuminen todella äärimmäisiin olosuhteisiin. Arkkeja on löydetty meren pohjien kuumista lähteistä ja suolajärvistä. Arkkeja on löydetty myös esimerkiksi ihmisen suolistosta. (Solunetti 2006a) Arkit ovat äärimmäisten elinympäristöjensä takia pienempi riski elektroniikkalaitteille kuin esimerkiksi bakteerit. Arkkien tuottamilla entsyymeillä sekä niiden tuottamalla biomassalla on kuitenkin sovelluksia elektroniikassa. (Schiraldi et al. 2002)



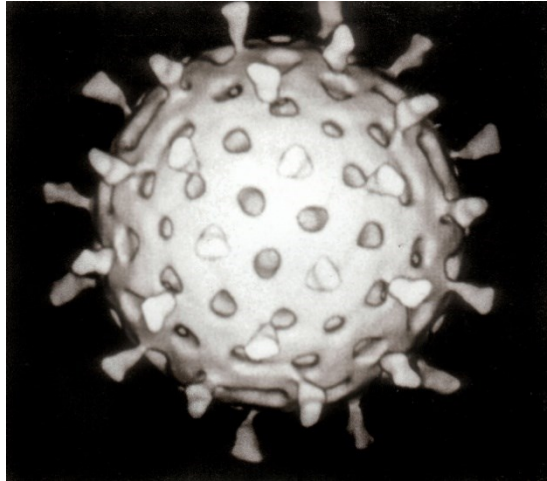
Kuva 4. *Methanobacterium thermoautotrophicum* -arkki. (Kunkel 2017)

Arkit jaetaan viiteen pääryhmään: halofiileihin, metanogeenihin, termofiileihin sekä asidotermofiileihin. Halofiilit elävät korkeassa suolapitoisuudessa. Metanogeenit elävät märehittävien eläimistöissä, missä ne tuottavat metaania. Kuvassa 4 on metaania tuottava arkki. Termofiilit tarvitsevat kasvuunsa yli 45 °C lämpötilan. Asidotermofiilit taas viihtyvät happamassa ja kuumassa ympäristössä. (Schiraldi et al. 2002)

Asidotermofiileillä on saatu lupaavia tuloksia erilaisten metallien erottelussa ja niitä voidaan käyttää metallien erotteluun elektroniikkajätteessä. Halofiilit pystyvät tuottamaan karotenoidipigmenttejä ja protonipumput suojaavat niitä suolaisuudelta. Halofiilien protonipumppu bakteerirhodopsiini on valolla toimiva protonipumppu. Tätä protonipumppua voidaan käyttää loogisissa porteissa, optisissa muisteissa sekä RAMissa tai elektroniisissa sensoreissa. (Ashwini et al. 2017)

3.4 Virukset

Virusia ei luokitella virallisesti eliöiksi, vaan virus on ainoastaan partikkeli, joka sisältää genomin, proteiinihuoren ja joissain tapauksissa lipidikalvon. Virukset eivät ole eläviä, eivätkä ne kasva tai lisäänty jakautumalla. Virukset ovat riippuvaisia isäntäsolusta, jota ne tarvitsevat lisääntyäkseen. Virusten perimä on RNA:ta tai DNA:ta ja perimäaine voi olla yksi- tai kaksisäikeistä. Genomin koko on huomattavasti pienempi kuin eukaryooteilla tai prokaryooteilla. Vaikka virusia ei luokitella eläviksi, luokitellaan ne kuitenkin mikrobeihin kokonsa vuoksi. (Solunetti 2006f) Kuvassa 5 on tietokoneella rekonstruoitu rotaviruspartikkeli.



Kuva 5. Tietokoneella rekonstruoitu rotaviruspartikkeli (Beards 2008).

Virukset lisääntyvät tunkeutumalla isäntäsoluun ja vapauttamalla genominsa isäntäsolun sisälle. Geenit replikoituvat isäntäsolun sisällä ja kypsyvät. Lopulta valmiit virukset vapautuvat isäntäsolun sisältä, tuhoten samalla isäntäsolun. (Solunetti 2006g) Virukset eivät kasva samalla tavalla kuin muut mikrobit, joten niiden haitat elektroniikkalaitteille ovat todella vähäisiä. Viruksia voidaan kuitenkin käyttää hyödyksi esimerkiksi nanoteknologiassa elektroniikan rakennuspalikoina (Singh et al. 2006).

4. MIKROBIEN HAITAT ELEKTRONIKKALAITTEILLE

Elektroniikkalaitteiden hajoaminen alkoi toisen maailmansodan aikaan kiinnittää huomiota etenkin kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa. Pitkään uskottiin, että elektroniikkalaitteiden hajoaminen johtui ainoastaan kosteudesta. Tutkiessa kuitenkin huomattiin, että etenkin bakteerit ja homeet vaikuttivat elektroniikkalaitteiden nopeampaan hajoamiseen. (Wasserbauer 2004; Luce & Mathes 2010)

Lucen ja Mathesin tutkimuksessa tutkittiin homeen vaikutusta johdinten resistanssiin sekä häviökertoimeen ja kapasitanssiin eri taajuuksilla. Tutkimuksessa käytettiin sellaisia biologisia olosuhteita, että homeen ja kosteuden vaikutus pystyttiin erottelemaan toisistaan. Huomattiin, että home vaikutti ainoastaan pintasuureisiin ja usein kosteuden vaikutus oli suurempi piirin toiminnalle. Home vaikutti piirissä kuitenkin laskemalla piirin shunttivastusta. Jos shunttivastuksen lasku ei ole toivottavaa, se voitiin välttää hermeettisellä koteloinnilla. Kosteus ja home saattavat myös vaikuttaa elektronisten komponenttien selektiivisyyteen sekä herkkyyteen etenkin kuulotaajuudella. (Luce & Mathes 2010)

Alavan et al. (1996) tutkimuksessa vertailtiin bakteerien, levien sekä homeiden aiheuttamaa tuhoa piirin toiminnalle. Tutkimuksessa tutkittiin erikseen sähköisten suureiden muutosta ilman jännitettä sekä ajamalla piiriin 9 V jännite. Taulukossa 1 on taulukoituna piirien toimintakyky viiden viikon tutkimusjakson aikana eri mikrobeilla.

Taulukko 1. Piirien toiminta viiden viikon tutkimusjakson aikana eri mikrobeilla. (Alava et al. 1996)

Piiri/viikko	1	2	3	4	5
Bakteeri, ilman potentiaalia	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Bakteeri potentiaalilla	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
Sienet ilman potentiaalia	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Sienet potentiaalilla	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei
Levät ilman potentiaalia	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Levät potentiaalilla	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kontrollipiiri	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä

Tutkimuksessa arvioitiin piirien toimintaa tarkastelemalla niiden yleistä toimintaa emission ja taajuuden osalta. Samalla tarkasteltiin sekä syntyneiden korroosiopisteiden määrää, että piirilevyn pinnan hajoamista. Piiri luokiteltiin toimivaksi, jos piiri emittoi ääntä halutulla taajuudella. Taulukon 1 tutkimustuloksista huomataan, että mikään mikrobi ei vaikuttanut piirin toimintaan ilman potentiaalia. Sienet sekä bakteerit vaikuttivat kuitenkin piirin toimintaan, kun piiriin ajettiin 9 V jännite. Bakteerien vaikutus oli nopein ja suurin, sillä bakteerit aiheuttivat piirin toimimattomuuden jo heti ensimmäisellä viikolla. (Alava et al. 1996)

Taulukko 2. Levän aiheuttama kolonisaatio sekä bakteerien ja sienten tuhoama pinta-ala virtapiiristä prosentteina. (Alava et al. 1996)

Piiri/viikko	1	2	3	4	5
Bakteeri, ilman potentiaalia	10	10	12.5	12.5	15
Bakteeri potentiaalilla	10	12.5	15	15	35
Sienet ilman potentiaalia	10	10	12.5	12.5	12.5
Sienet potentiaalilla	10	10	15	15	22.5
Levät ilman potentiaalia	10	12.5	15	15	17.5
Levät potentiaalilla	2.5	2.5	0	0	0
Kontrollipiiri	0	0	0	0	0

Taulukossa 2 on taulukoituna se pinta-ala, joka virtapiiristä tuhoutui viikkojen aikana, tai levän tapauksessa sen kolonisoima pinta-ala. Taulukosta 2 huomataan, että bakteerit potentiaalilla olivat suurin riski virtapiirille. Toiseksi suurinta tuhoa aiheuttivat sienet. Virtapiirin pinta laskettiin tuhoutuneeksi, jos siinä oli selkeitä merkkejä tuhoutumisesta ja korroosiosta, tai jos se oli levän kolonisoima. Levä ei tuhonnut virtapiiriä samalla tavalla kuin bakteerit ja sienet, jonka takia sen vaikutus laskettiin sen kolonisoimasta pinta-alasta. Huomattavaa on, että bakteerit ja sienet viihtyivät paremmin piirissä, jossa käytettiin jännitettä, mutta levät eivät kestäneet jännitettä ollenkaan. Bakteerien sekä sienten vaikutus piirilevyille on kuitenkin erittäin huomattava. Tämä tulisi ottaa huomioon, kun suunnitellaan piirilevyjä, jotka altistuvat ympäristölle, etenkin kosteissa ja lämpimissä ilmastoissa. (Alava et al. 1996)

Muoviset materiaalit, kuten hartsi, polyetyleni ja polypropyleeni ovat yleisessä käytössä elektronisissa laitteissa, mutta ovat alltiita sienirihmaston kasvulle. Homeiden ja hiivojen

aiheuttama kontaminaatio johtaa näiden materiaalien hajoamiseen, ja näin vaikuttaa piirilevyn toimintaan. Inouen (1988) tutkimuksessa näytteitä kerättiin esimerkiksi piirilevyiltä, mikropiireiltä sekä piikiekoilta. Tutkimusolosuhteet olivat 24–27 °C, 90–95 % ilmankosteudessa 5–7 päivän ajan. (Inoue 1988)



Kuva 6. Sienirihmaston kasvua piirilevyllä. (Inoue 1988)

Kuvasta 6 nähdään, että vain viikon aikana piirilevy on sienirihmaston kasvun johdosta tuhoutunut lähes kokonaan. Kuvasta nähdään myös, että yhteydet piirilevyllä ovat hajonneet, eikä piirilevy ole enää toimintakelpoinen. Piirissä näkyy lukuisia oikosulkuja. Tutkimuksesta huomataan, että piirilevyjen altistaminen ympäristölle voi johtaa lyhyessä ajassa sen täyteen toimintakelvottomuuteen mikrobialisen kasvuston johdosta. (Inoue 1988)

Mikrobit saattavat aiheuttaa tai kiihdyttää korroosioreaktioita muuttamalla potentiaalia simuloiden anodisia tai katodisia reaktioita metallien pinnalla. Mikrobit voivat vaikuttaa myös eristeiden neliöresistanssiin. Vaikutukset riippuvat materiaalista sekä materiaalin päällä olevan ohuen vesikerroksen paksuudesta. Mikrobit pystyvät vaikuttamaan kerrokseen esimerkiksi: muodostamalla hydrofiilisiä molekyyliä pinnalle, erittämällä johtavia aineita (suoloja tai happoja) sekä tuhoamalla pintaa, joka sitoo kosteutta. Eristeiden sisällä mikrobit vaikuttavat samalla tavalla, mutta tuhoavat eristeen sisäistä rakennetta ulkoisen sijaan. (Falkiewicz-Dulik et al. 2015)

Mikrobialiseen kasvuun eristeissä vaikuttavat olosuhteet. Nostamalla suhteellista ilmankosteutta sekä lämpötilaa kasvu nopeutuu. Kasvu on nopeampaa myös suljetuissa ympäristöissä, kuten esimerkiksi sukellusveneissä, lentokoneissa tai avaruusasemilla. Homeiden ja hiivojen kasvu piirilevyillä vaikuttaa neliöresistanssiin ja aiheuttaa oikosulkuja. Hometta on raportoitu esimerkiksi tietokoneiden emolevyillä, radioissa tai tutkissa. Homeet ovat aiheuttaneet laitteiden hajoamisen. (Falkiewicz-Dulik et al. 2015)

Sähkövirtaa voidaan käyttää hyväksi mikrobien torjunnassa. Bakteerit ovat suurin riskitekijä elektroniikalle. Bakteerien solukalvon pinta on yleensä negatiivisesti varautunut.

Vastakkaiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa, joten positiivisesti varautuneella elektrodilla voidaan vetää bakteereita elektrodin pinnalle. Nämä bakteerit voidaan tappaa 1–1,5 V jännitteellä. Jännitteellä voidaan myös estää bakteerien kerääntyminen piirilevyjen pinnalle vaihtelemalla potentiaalia välillä -0,6–1,2 V. Jännitteen avulla voidaan myös levittää piirilevyn pinnalle erilaisia biosideja, esimerkiksi zeoliitteja. Biosidit ovat valmisteita, joita käytetään esimerkiksi materiaalien ja esineiden suojaamiseen tuhoeläimiltä tai mikrobeilta (Tukes). Mikrobiaalista kasvua voidaan myös estää ohuilla monomeerikalvoilla, jotka estävät biokalvon muodostumista laitteen pinnalle. (Falkiewicz-Dulik et al. 2015)

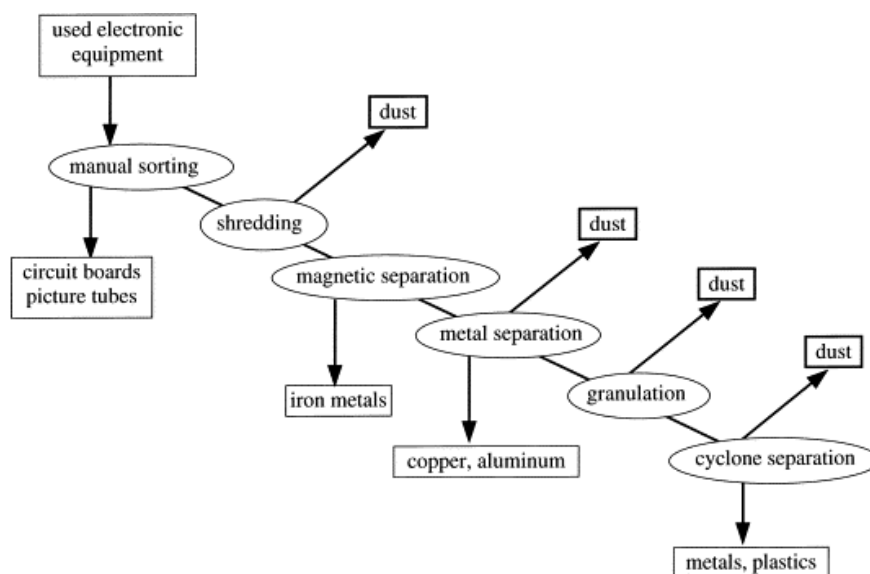
5. MIKROBIEN HYÖDYT ELEKTRONIIKASSA

Mikrobien laajat erilaiset ominaisuudet sekä niiden biohajoavuus ovat kiinnostavia ominaisuuksia tulevaisuuden elektroniikan sovelluksille. Mikrobien käyttöä on tutkittu etenkin kiertotaloudessa, sillä mikrobit pystyvät alhaisilla kustannuksilla kierrättämään elektroniikkajätettä. Joidenkin mikrobien tuottamat pigmentit ovat erittäin kiinnostavia optoelektroniikan sovelluksia varten, sillä ne reagoivat valoon. Näitä pigmenttejä on tutkittu myös esimerkiksi kytkiminä tai loogisina portteina.

Mikrobit ovat biologista materiaalia, joten ne ovat usein turvallisempi vaihtoehto nanoteknologian sovelluksissa. Tulevaisuudessa mikrobeja voidaan käyttää esimerkiksi biosensoreissa, nanokokoisissa generaattoreissa tai transistoreissa.

5.1 Mikrobit kiertotaloudessa

Elektroniikkalaitteiden lyhyt elinkaari, sekä jatkuva kulutuksen kasvu aiheuttavat nopeaa nousua elektroniikkajätteen määrissä. Esimerkiksi Saksassa heitetään 1 100 000 tonnia elektroniikkalaitteita pois vuosittain. Arvioidaan, että sähkö- ja elektroniikkajätteen määrä tulee kasvamaan nykyisestä 55,5 miljoonasta tonnista vuodessa 74,7 miljoonaan tonniin vain kymmenessä vuodessa. (Olanrewaju 2021) Tämä elektroniikkajäte sisältää myös uudelleenkäytettäviä materiaaleja. Mikrobeja on alettu käyttää näiden uudelleenkäytettävien materiaalien erottelussa, sillä niillä on kyky eritellä mikrobiologisten prosessien avulla raaka-aineet, pienistäkin määristä jätettä. (Brandl et al. 2001)



Kuva 7. Kaavio perinteisestä jätteenkierrätyksestä (Brandl et al. 2001)

Nykyinen elektroniikkajätteen kierrätys noudattaa prosessia, jonka kaavio näkyy kuvassa 7. Ensimmäiseksi elektroniikkalaitteet lajitellaan manuaalisesti, hajotetaan sekä erotellaan esimerkiksi magneettisesti ja syklonin avulla. Elektroniikkajätteen lajittelu mikrobien avulla astuu kuvaan silppuamisen (shredding) jälkeen. Lajittelussa käytetään tomua, jota saadaan tämän prosessin lopputuloksena. Mikrobeja pystytään käyttämään erilaisten metallien erotteluun tästä tomusta. (Brandl et al. 2001)

Mikrobien käyttäminen antaa elektroniikkajätteen kierrätykselle muutamia huomattavia etuja fysikaalisiin ja kemiallisiin menetelmiin verrattessa. Fysikaaliset ja kemialliset prosessit tuottavat jätettä, esimerkiksi ympäristölle haitallisia raskasmetalleja. Nämä prosessit eivät ole myöskään spesifejä tietyille metalleille. Biologisia menetelmiä käytettäessä pystytään prosessi spesifioimaan haluttuihin metalleihin. Biologisissa prosesseissa kustannukset ovat alhaiset ja menetelmät sopivat myös alhaisille metallipitoisuuksille. Fysikaalisissa ja kemiallisissa prosesseissa tuotantokustannukset ovat korkeita, eivätkä prosessit ole kovin tehokkaita. Biologiset prosessit ovat siis kustannustehokkaampi vaihtoehto elektroniikkajätteen kierrätykselle. (Auerbach et al. 2019)

5.2 Mikrobien tuottamien pigmenttien sovellukset

Jotkin mikrobit, esimerkiksi halofiilit arkit, tietyt homeet tai levät pystyvät tuottamaan pigmenttejä. Näitä pigmenttejä pystytään käyttämään esimerkiksi optoelektronikan sovelluksissa. Pigmentit ovat vakaita ja niillä on hyvä optoelektroninen suorituskyky. (Ashwini et al. 2017)

Halofiilit arkit pystyvät tuottamaan karotenoidipigmenttejä, jotka toimivat protonipumpuina. Protonipumput suojaavat arkkeja niiden suolaiselta elinympäristöltä. Halofiilien arkkien protonipumppu bakteerirhodopsiini toimii valolla, se on optisesti aktiivinen ja herkkä. (Singh & Roy 2003; Mathesz et al. 2013; Ashwini et al. 2017). Bakteerirhodopsiinin käyttökohteita ovat esimerkiksi loogiset portit, optiset muistit sekä sensorit. Bakteerirhodopsiinia voidaan käyttää myös optisissa kytkimissä, jotka mahdollistavat usean signaalin liikkumisen yhtä aikaa samalla kanavalla. Elektronisissa kytkimissä ainoastaan yksi signaali voi käyttää yhtä kanavaa kerrallaan. (Ashwini et al. 2017)

Holografinen muisti on valoa heijastava kide, joka on dopattu siirtymämetalleilla. Tulevaisuudessa on tarvetta holografisille muisteille, sillä esimerkiksi piikiekkujen ja magneettisten kovalevyjen fysikaaliset rajat ovat saavutettu. Holografista muistia voidaan käyttää tulevaisuudessa esimerkiksi tietokoneissa tai muissa elektronisissa laitteissa, joissa tarvitaan muistia. Bakteerirhodopsiinia on tutkittu holografisen muistin käyttötär-

koitukseen, sillä se on vakaa, kestää lämpöä ja sen kirjoitusnopeus on vain mikrosekunteja. Bakteerirhodopsiini voi toimia käänteisenä kuvamuuntimena, jolla siirretään kuvia optisilla signaaleilla. (Ashwini et al. 2017)

Bakteerirhodopsiinia on tutkittu vaihtoehtona loogisille porteille. Bakteerirhodopsiinin on tutkittu toimivan NOT-porttina ja universaaleina NOR- ja NAND-portteina. (Singh & Roy 2003) Bakteerirhodopsiini pystyy suorittamaan erittäin nopeita loogisia operaatioita. Bakteerirhodopsiinia pystytään myös käyttämään XOR-porttina (Mathesz et al. 2013).

Xylindein on sienistä saatava pigmentti. Sienistä saatavat pigmentit ovat halpoja, niiden yhdisteitä on helppo prosessoida ja ne ovat tuunattavissa. Nämä pigmentit ovat vakaita ja niillä on hyvä optoelektroninen suorituskyky. Sienistä saatavat pigmentit ovat luonnollisesti tuotettuja sekä biohajoavia. Xylindeinin käyttöä on tutkittu esimerkiksi puolijohdemateriaalina. Pigmenttiä voitaisiin käyttää myös esimerkiksi optoelektroniikan ohutkalvo-sovelluksissa. (Giesbers et al. 2019)

5.3 Nanoteknologian sovellukset

Nanopartikkelien tuottaminen perinteisin metodein on kallista ja vaatii myrkyllisiä kemikaaleja. Tämän takia vihreille sekä myrkyttömille metodeille on suuri tarve. Mikrobeja voidaan käyttää hyväksi nanopartikkelien synteesissä. Näitä nanopartikkeleita voidaan käyttää tulevaisuudessa elektroniikan sovelluksissa. Biosynteesillä pystytään valmistamaan esimerkiksi kultaa, hopeaa, platinaa tai piidioksidia käyttämällä hyväksi bakteereita, viruksia sekä sieniä. (Narayanan & Sakthivel 2010)

Mikrobit ovat kiinnostavia tutkimuskohteita nanoteknologiassa. Kehittynyt tutkimus mikrobien DNA:sta sekä tietämys niiden tuottamista proteiineista tuottavat jatkuvasti uusia mielenkiintoisia kohteita nanobioteknologian sovelluksille. Tulevaisuudessa mahdollisia käyttökohteita mikrobeille saattavat olla esimerkiksi: nanosensorit, ultranopeat kytkimet, tehonlähteet, transistorit sekä mikrobien käyttäminen rakennuspalikoina elektronisille laitteille. (Niemeyer 2006) Nanobioteknologian käyttö elektroniikassa on erittäin suosittu tutkimuskohde ja sille löytyy jatkuvasti uusia käyttökohteita. Nanobioteknologia saattaa kin olla yksi tärkeistä ratkaisuista ilmastonmuutosta vastaan.

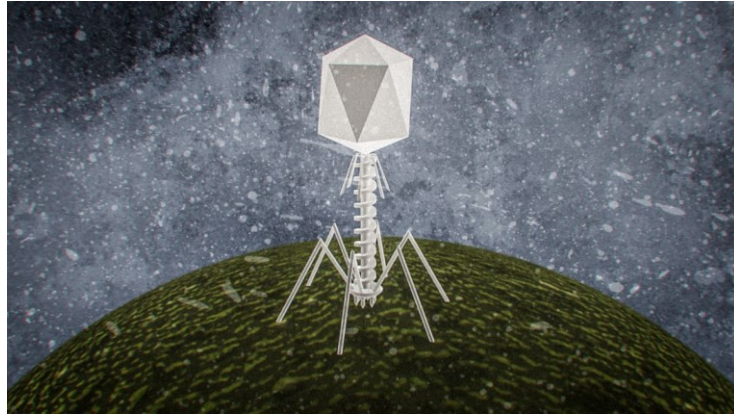
Kaikki bakteerit eivät elä happirikkaissa ilmastoissa, vaan jotkut joutuvat kehittämään selviytymiskeinoja hapettomuutta vastaan. Nämä bakteerit ovat kehittäneet keinon siirtää elektroneita ohuita proteiinisäikeitä pitkin. Elektronien liikkeestä syntyy sähköä, joten näillä bakteereilla on kyky saada aikaan sähkövirta. On myös löydetty arkkeja, joilla on tämä sama ominaisuus ja samat proteiinisäikeet. (Cat 2019)

Bakteerien ja arkkien nanosäikeitä voidaan käyttää hyväksi luodessa biosensoreita tai bioelektroniikkaa. Nanojohtimet ovat kestäviä, vakaita ja kestävät jopa yli sadan asteen lämpötiloja. Nämä nanojohtimet pystyttäisiin valmistamaan käyttämättä myrkyllisiä kemikaaleja ja lopputuotteissa ei olisi myrkyllisiä tuotteita. (Cat 2019) Mikrobiaaliset nanojohtimet olisivat hyviä käyttökohteita biolääketieteessä, sillä niitä olisi helpompi pukea päälle tai implantoida kehoon. Nämä johtimet eivät vahingoitu ruumiinnesteissä tai kehon lämmössä. (Niemeyer 2006)

Virusia voidaan käyttää myös transistorien, kytkinten sekä muistien valmistamiseen. Tupakan mosaiikkivirusta yhdistettiin metallisten nanopartikkelien kanssa ja saatiin aikaan elementtejä elektronista muistia varten. Tätä nanoskaalan muistia pystytään kytkeämään päälle sekä pois elektronisesti. Samassa tutkimuksessa DNA-juostetta yhdistettiin hiilinanoputkien kanssa tavoitteena saada aikaan kanavatransistoreita. Tutkimuksessa virus sulautettiin ei-johtavaan polymeeriin, joka asetettiin kahden metallielektrodin väliin. Kun nämä elektrodit asetettiin potentiaaliin, sähkövirta alkoi kulkea niiden välillä noin 3 V kohdalla. (Knez & Gösele 2006)

Tulevaisuudessa on tarve päästä elektroniikan gigahertsin taajuudella toimivista laitteista jopa terahertsin taajuuksiin. Viruksista rakennetut kytkimet toimivat noin megahertsin nopeudella, mutta tulevaisuuden tietämys biologisista rakennuspalikoista saattaa mahdollistaa nousun terahertsien tasolle. Tutkimuksien avulla saatetaan jopa mahdollistaa kaupallinen elektroniikka, joka toimisi biologisilla komponenteilla. (Knez & Gösele 2006)

Viruksista sekä bakteereista on saatu valmistettua myös teholähteitä. Virusten tuottamasta mekaanisesta energiasta on saatu tuotettua sähköä. Sähköntuottaminen perustuu piezoelektriseen efektiin. Piezoelektrinen efekti syntyy, kun käytetyn materiaalin molekyylien toisessa päässä on enemmän positiivista varausta kuin molekyylin toisessa päässä. Nämä molekyylit tarttuvat toisiinsa muodostaen rakenteen, jossa molekyylien positiiviset päät osoittavat toiseen suuntaan ja negatiiviset päät toiseen suuntaan. Puolien välille syntyy potentiaaliero. Nykyiset piezoelektriset generaattorit toimivat myrkyllisillä materiaaleilla, joten viruksista yritetään tuottaa myrkytöntä, vihreää sekä edullisempaa vaihtoehtoa. (Lee et al. 2012)



Kuva 8. Bakteriofagin rakenne. (Yle Uutisgrafiikka 2018)

Teholähteen rakentamiseksi tutkijat lisäsivät bakteriofagivirukseen glutamaattia lisätäkseen negatiivisen puolen negatiivista varausta entisestään. Kuvassa 8 näkyy tyypillinen bakteriofagiviruksen rakenne. Viruksia lisättiin noin miljoona kappaletta yhdelle elektrodikalvolle. Näitä kalvoja lisättiin useita päällekkäin efektin vahvistamiseksi. Generaattorin tuottama sähkövirta oli 6 nA ja jännite 400 mV. Tämä on vähemmän kuin tavallisissa piezoelektrisissä sovelluksissa, mutta sovelluksella on tulevaisuudessa potentiaalia päästä samalle tasolle. (Lee et al. 2012)

6. YHTEENVETO

Ilmastonmuutoksen aiheuttama ilmaston lämpötilan kohoaminen sekä ilmankosteuden kasvaminen mahdollistavat mikrobeille otollisen elinympäristön, mikä voi johtaa elektroniikkalaitteiden toimintahäiriöihin. Mikrobit ovat kuitenkin ominaisuuksiltaan ja aineenvaihduntatuotteiltaan myös erittäin hyödyllinen työkalu elektroniikan sovelluksissa. Tässä työssä tarkastellaan mikrobialisten tekijöiden vaikutusta elektroniikan toimintakykyyn, sekä tarkastellaan mikrobien mahdollistamia sovelluksia tulevaisuuden sekä nykypäivän elektroniikassa.

Erityisesti bakteerit sekä sienet aiheuttavat elektroniikkalaitteissa toimintahäiriöitä. Bakteerit sekä sienet pystyvät käyttämään ravintonaan erilaisia metalleja ja muoveja. Jotkin bakteerit ja sienet pystyvät myös elämään hapettomissa, myrkyllisissä sekä ravinnottomissa olosuhteissa. Tämä aiheuttaa vaikeuksia niiden torjunnassa.

Sienten sekä bakteerien aiheuttamat vahingot voivat aiheuttaa elektroniikkalaitteen täydellisen toimintakyvyttömyyden vain viikkojen aikana. Bakteerit hajottivat piirilevyn yhdessä viikossa, kun taas sienillä siihen meni kaksi viikkoa. Toimintakyvyn menettäminen johtuu bakteerien ja sienten aiheuttamista korroosipisteistä, johdinten tuhoutumisesta johtuvista oikosuluista sekä eristeen sisäisten tai ulkoisten ominaisuuksien muuttamisesta. Näitä mikrobeja voidaan kuitenkin torjua sähkövirralla, biosideilla tai ohuilla monomeerikalvoilla. Vahinkoihin vaikuttaa myös mikropiirin eristäminen ympäristöstä, mikä voidaan tehdä koteloimalla tai sinetöimällä.

Mikrobeja voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi kiertotaloudessa. Mikrobien aineenvaihduntatuotteita voidaan käyttää rakennuspalikoina elektroniikassa ja niillä on useita nanoteknologian sovelluksia. Mikrobit ovat myös kaikki biohajoavia, joten ne ovat todella hyödyllisiä vihreää elektroniikkaa suunniteltaessa sekä kasvavan elektroniikkajätteen määrän hillitsemisessä.

Mikrobit voivat spesifillä prosesseillaan erotella elektroniikkajätteestä hyödylliset materiaalit kustannustehokkaasti sekä erittäin tarkasti. Elektroniikkajätteessä on paljon uudelleenkäytettäviä materiaaleja, joten mikrobit ovat hyödyllinen työkalu kiertotaloudessa. Arkkien pigmenttejä voidaan hyödyntää esimerkiksi loogisten porttien sekä holografisten muistien tuottamiseen. Tämä on hyödyllistä, sillä piikiekkojen ja magneettisten kovalevyjen fyysiset rajat tulevat lähivuosina vastaan. Mikrobeja on tutkittu paljon nanoteknologiassa ja tulevaisuudessa niitä saatetaan käyttää esimerkiksi teholähteinä tai kytkiminä.

LÄHTEET

Alava, J. I., et al. "Biodeterioration of Electronic Circuits by Bacteria, Fungi and Algae." *Materials in engineering* 17.1 (1996): 19-21. CrossRef. Web. Feb 24, 2021.

Ashwini, Ravi, S. Vijayanand, and J. Hemapriya. "Photonic Potential of Haloarchaeal Pigment Bacteriorhodopsin for Future Electronics: A Review." *Current Microbiology* 74.8 (2017): 996-1002. Web. Mar 27, 2021.

Auerbach, Romy, et al. "Critical Raw Materials – Advanced Recycling Technologies and Processes: Recycling of Rare Earth Metals Out of End of Life Magnets by Bioleaching with various Bacteria as an Example of an Intelligent Recycling Strategy." *Minerals engineering* 134 (2019): 104-17. CrossRef. Web. Apr 23, 2021.

Beards. "Computer assisted reconstruction of a rotavirus particle". (2008) Web. Apr 28, 2021. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Virukset#/media/Tiedosto:Rotavirus_Reconstruction.jpg>

Brandl, H., R. Bosshard, and M. Wegmann. "Computer-Munching Microbes: Metal Leaching from Electronic Scrap by Bacteria and Fungi." *Hydrometallurgy* 59.2 (2001): 319-26. Web. Feb 22, 2021.

Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Yeast". *Encyclopedia Britannica*. (2020) Web. Apr 28, 2021. <<https://www.britannica.com/science/yeast-fungus>>

Cat, Linh Anh. "The Shocking Biotech Applications Of Electric Bacteria." *Forbes*. (2019) Web. Apr 23, 2021 <<https://www.forbes.com/sites/linhanhcat/2019/06/24/bioelectronics-electric-bacteria/>>.

Drauzio E. N., et al. "Fungal Strategies for Dealing with Environment- and Agriculture-Induced Stresses." *Fungal biology* 122.6 (2018): 602–12. MEDLINE. Web. Feb 22, 2021.

Falkiewicz-Dulik, Michalina, Katarzyna Janda, and George Wypych. *Handbook of Material Biodegradation, Biodeterioration, and Biostabilization*. Scarborough, UNITED STATES: ChemTec Publishing. (2015) Web. Mar 28, 2021.

Giesbers, Gregory, et al. "Xylindein: Naturally Produced Fungal Compound for Sustainable (Opto)Electronics." *ACS Omega* 4.8 (2019): 13309-18. Web. Apr 20, 2021.

Inoue. "The Study of Fungal Contamination in the Field of Electronics", In: Houghton D.R., Smith R.N., Eggins H.O.W. (eds) *Biodeterioration* 7. Springer, Dordrecht. (1988)

Khaz. "Molds on a Petri dish". (2018) Web. Apr 28, 2021. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Mold#/media/File:Mold\(%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%B5%D0%BD%D1%8C\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Mold#/media/File:Mold(%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%B5%D0%BD%D1%8C).jpg)>

Knez, Mato, and Ulrich Gösele. "Bionanoelectronics: Viruses show their Good Side." *Nature nanotechnology* 1 (2006): 22-3. Web. May 6, 2021.

Kunkel. "Survey of archaea in the body reveals other microbial guests". *Science* 358.6366 (2017): 983 Web. Apr 28, 2021. <<https://science.sciencemag.org/content/358/6366/983>>

Lee, Byung Yang, et al. "Virus-Based Piezoelectric Energy Generation." *Nature nanotechnology* 7.6 (2012): 351–6. MEDLINE. Web. May 6, 2021.

Luce, Mathes. "The effect of moisture and mold on the electrical properties of electronic hook-up wire insulations", Department of Biology Rensselaer Polytechnic Institute Troy, N.Y. (2010)

Madigan, Michael T., et al. *Brock Biology of Microorganisms*, Global Edition. Harlow, United Kingdom, UNITED KINGDOM: Pearson Education, Limited. (2018) Web. Feb 22, 2021.

Mathesz, Anna, et al. "Biosensors & Bioelectronics." 46 (2013): 48-52. NDL-OPAC. Web. May 5, 2021.

Narayanan, Kannan Badri, and Natarajan Sakthivel. "Biological Synthesis of Metal Nanoparticles by Microbes." *Advances in colloid and interface science* 156.1 (2010): 1–13. MEDLINE. Web. May 6, 2021.

Niemeyer, Christof M. "Nanobiotechnology." *Reviews in Cell Biology and Molecular Medicine* American Cancer Society. (2006) Web. May 6, 2021.

Rocky Mountain laboratories. "Escherichia coli -soluja suurennettuna 25 000 kertaa". (2005) Web. Apr 28, 2021. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Bakteerit#/media/Tiedosto:Escherich-Coli_NIAID.jpg>

Schiraldi, Chiara, Mariateresa Giuliano, and Mario De Rosa. "Perspectives on Biotechnological Applications of Archaea." *Archaea* 1.2 (2002): 75-86. Web. Mar 27, 2021.

Olanrewaju S., Ian D. Williams, and Peter J. Shaw. "Waste Management." *Waste management* 120 (1989): 549–63. Web. Mar 27, 2021.

Singh, C. P., and Sukhdev Roy. "All-Optical Logic Gates with Bacteriorhodopsin." *Current Applied Physics* 3.2 (2003): 163-9. Web. Mar 27, 2021.

Singh, Pratik, Maria J. Gonzalez, and Marianne Manchester. "Viruses and their Uses in Nanotechnology." *Drug Development Research* 67.1 (2006): 23-41. Web. Apr 18, 2021.

Solunetti. "Arkit (Archaea)." (2006a) Web. Feb 23, 2021. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/arkkieliot/2/>>

Solunetti. "Bakteerit (Prokaryootti)." (2006b) Web. Feb 22, 2021. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/bakteerit/2/>>

Solunetti. "Hiivat." (2006c) Web. Feb 22, 2021. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/hiivat/2/>>

Solunetti. "Homeet." (2006d) Web. Feb 22, 2021. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/homeet/2/>>

Solunetti. "Levät." (2006e) Web. Feb 24, 2021. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/levat/2/>>

Solunetti. "Virukset." (2006f) Web. Mar 10, 2021. <<https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/virukset/>>

Solunetti. "Virusten lisääntyminen." (2006g) Web. Mar 10, 2021. <https://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/virusten_lisaantyminen_1/>

Storey, Neil. *Electronics: a Systems Approach*. 3rd ed. Harlow: Pearson/Prentice Hall, (2006). Print.

Tummala, Dr Rao R. *Fundamentals of Device and Systems Packaging: Technologies and Applications*, Second Edition. McGraw-Hill Education. (2019) Web. Mar 28, 2021.

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). "Biosidit." Web. Mar 28, 2021 <<https://tukes.fi/kemikaalit/biosidit>>.

Wainwright, M., Tasneem Adam Ali, and F. Barakah. "A Review of the Role of Oligotrophic Micro-Organisms in Biodeterioration." *International Biodeterioration & Biodegradation* 31.1 (1993): 1-13. Web. Feb 22, 2021.

Wasserbauer, Richard. "Microbial Biodeterioration of Electrotechnical Insulation Materials." *International biodeterioration & biodegradation* 53.3 (2004): 171-6. CrossRef. Web. Feb 22, 2021.

Wessel, C. J. "Biodeterioration of Plastics." *Polymer Engineering & Science* 4.3 (1964): 193-207. Web. Feb 22, 2021.

Yle Uutisgraafikka. "Viruksista voi löytyä apu, kun antibioottien teho katoaa." (2018) Web. May 6, 2021 <<https://yle.fi/uutiset/3-10133572>>

Yufeng Jin, Zhiping Wang, Jing Chen. *Introduction to Microsystem Packaging Technology*. CRC Press. (2017). Web. Feb 22, 2021.