



Kandidaatintutkielma

# Mikrobien desinfiointi ultraviolettisäteilyllä suu- ja nenäsuojaimista

Titta Kiiskinen

# Sisällysluettelo

<b>Käytetyt lyhenteet</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Johdanto</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Mikrobit</b> .....	<b>5</b>
2.1 DNA:n rakenne.....	6
2.2 Virukset .....	7
2.3 Bakteerit.....	8
2.4 Sienet.....	9
<b>3. Ultraviolettisäteily</b> .....	<b>10</b>
3.1 Sähkömagneettinen säteily.....	10
3.2 Ultraviolettisäteily.....	10
3.3 Ultraviolettisäteilyn tuottaminen .....	12
3.4 Ultraviolettisäteilyn teho ja sen mittaaminen .....	13
3.5 Ultraviolettisäteilyn terveydelliset haitat.....	13
3.6 Desinfointimenetelmät .....	15
<b>4. UV-säteilyn vaikutusmekanismit mikrobeihin</b> .....	<b>16</b>
4.1 UV-säteilyn vaikutus DNA/RNA:han .....	17
4.2 DNA:n sekvenssin ja konformaation vaikutus.....	19
4.3 Syklobutaanipyrimidiinidimeerien muodostuminen.....	19
4.4 DNA:n korjausmekanismit .....	21
4.4.1 Valoreaktiointi .....	22
4.4.2 Emäksenpoistokorjaus (BER).....	22
4.4.3 Nukleotidinpoistokorjaus (NER).....	23
4.5 Mikrobitien rakenteelliset puolustusmekanismit.....	24
4.6 Vaadittava UV-säteilyn määrä.....	25
<b>5. UV-valon absorboituminen materiaaleissa</b> .....	<b>26</b>
5.1 UV-säteilyä aktivoivia ja inaktivoivia tekijöitä.....	27
5.2 UV-säteilyn eteneminen kuituverkostoissa ja kankaissa.....	27
5.3 Veden, ilman ja pintojen desinfiointi .....	28
<b>Kirjallisuusviitteet</b> .....	<b>30</b>

## Käytetyt lyhenteet

6-4PP	6-4 pyrimidine-pyrimidone photoproduct ( <i>6-4-pyrimidiinipyrimidonivalotuote</i> )
ATR	attenuated total reflectance ( <i>sisäinen heijastus</i> )
BER	base excision repair ( <i>emäksenpoistokorjaus</i> )
CPD	( <i>syklobutaanipyrimidiinidimeeri</i> )
DNA	deoxyribonucleic acid ( <i>deoksiribonukleiinihappo</i> )
FTIR	Fourier-transform infrared spectroscopy ( <i>Fourier-muunnosinfrapunaspektroskopia</i> )
LED	light-emitting diode ( <i>hohtodiodi</i> )
NER	nucleotide excision repair ( <i>nukleotidinpoistokorjaus</i> )
RH	relative humidity ( <i>suhteellinen kosteus</i> )
RNA	ribonucleic acid ( <i>ribonukleiinihappo</i> )
TUV	UV-assisted TiO <sub>2</sub> photocatalysis (TiO <sub>2</sub> -fotokatalyyssi)
UV	ultraviolet ( <i>ultravioletti</i> )
UVA	UV-säteily, aallonpituus 315-400 nm
UVB	UV-säteily, aallonpituus 280-315 nm
UVC	UV-säteily, aallonpituus 100-280 nm
UVGI	ultraviolet germicidal disinfection (mikrobeja tuhoava UV-säteily)
VUV	vakuumi-UV, aallonpituus 100-200 nm

## 1. Johdanto

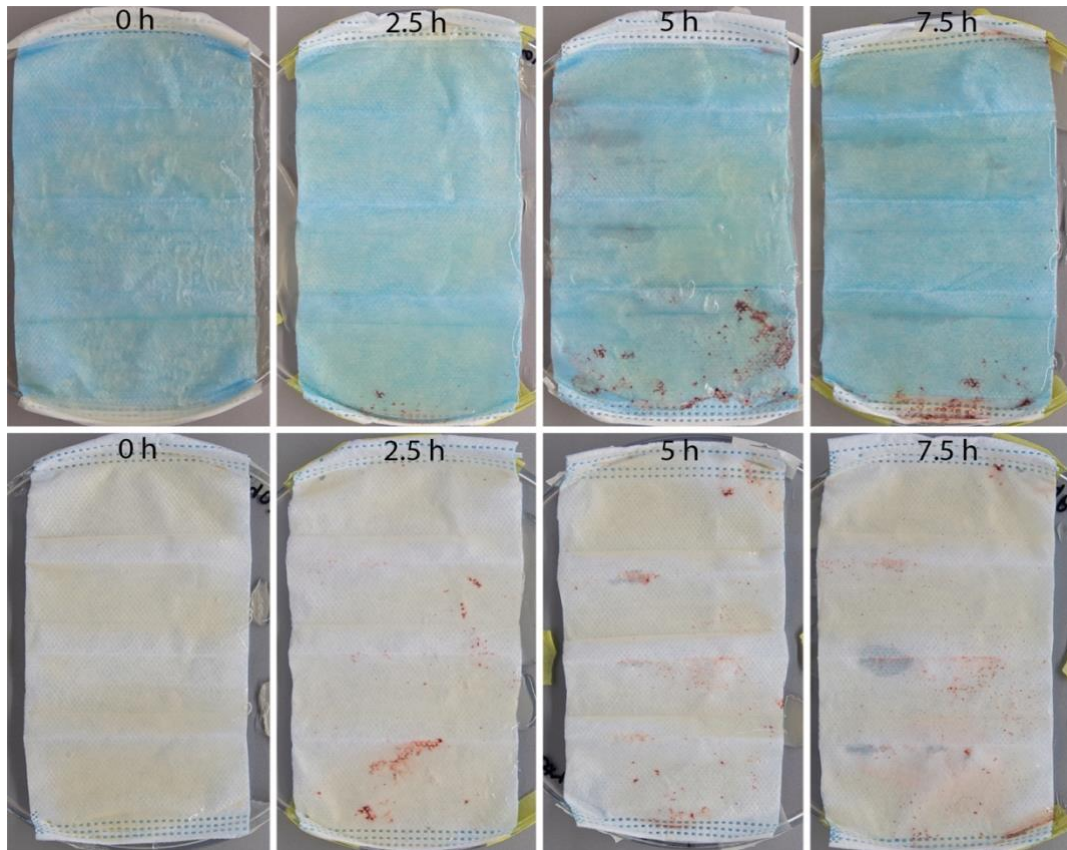
Kasvomaskien tarjonta voi olla rajoitettua erityisesti pandemioiden aikana. Kertakäyttöiset suojaimet tulee hävittää jokaisen käyttökerran jälkeen, jotta estetään tartunnan aiheuttavan aineen päätyminen elimistöön. Yksi vaihtoehto kertakäyttöisten suojainten uudelleenkäyttöön on niiden puhdistaminen fysikaalisella tai kemiallisella käsittelyllä. Jotta tällainen vaihtoehto olisi käytännöllinen, käsittelyn on ylläpidettävä maskin suodatustehoa eikä se saa jättää vaarallisia jäämiä. Haluttuja ominaisuuksia puhdistusmenetelmälle olisivat myös alhaiset kustannukset, korkea suorituskyky ja helppokäyttöisyys. Yksi vaihtoehto tähän voisi olla mikrobeja tuhoavan ultraviolettisäteilyn (UV) käyttö (Fisher & Shaffer, 2011). UV-säteilyä käytetään laajasti erilaisissa teollisissa prosesseissa ja lääketieteessä useisiin tarkoituksiin kuten bakteerien tappamiseen, fluoresoivien vaikutusten luomiseen, musteiden ja hartsien kovettamiseen, valohoitoon ja ruskettumiseen (Ling, Sanny, & Moebis, 2018). Tässä työssä käsitellään mikrobien tuhoamista ultraviolettisäteilyn avulla erityisesti kasvomasteista ja muista suojarusteista.

Mikrobeja tuhoava ultraviolettisäteily on vakiintunut tapa desinfioida ilmaa, vettä sekä monia pintoja. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi tartuntatautien leviämisen estämisessä. Elohopeahöyrylamppuja käytetään yleisesti mikrobeja tuhoavan ultraviolettisäteilyn tuottamiseen ja ne lähettävät lyhytaaltoista UVC-säteilyä pääasiassa aallonpituudella 254 nm. UVC-säteily tappaa tai inaktivoi mikrobeja vahingoittamalla niiden DNA:ta. Pääasiallinen tapa inaktivaatiossa on pyrimidiinidimeerien muodostuminen vierekkäisten tymiiniemästen väliin. Tämä tekee mikrobeista kykenemättömiä replikoitumaan (Reed, 2010).

Jo vuonna 1845 tiedettiin, että mikrobit reagoivat valoon. Läpimurto tapahtui vuonna 1877, kun Downes ja Blunt havaitsivat, että Pasteurin liuosta sisältävien koeputkien altistaminen auringonvalolle estää mikrobien kasvun koeputken sisällä. Lisääntyneen altistumisen yhteydessä koeputket säilyivät bakteerittomina useita kuukausia (Downes & Blunt, 1877). Edistystä tapahtui vuonna 1903, kun Niels Finsenille myönnettiin Nobel-palkinto hänen työstään säteilyn käytöstä sairauksien hoitoon. Vuoteen 1910 mennessä ensimmäinen juomaveden UV-desinfiointijärjestelmä otettiin käyttöön Marseillessa, Ranskassa. Vähitellen samankaltaisia järjestelmiä otettiin käyttöön myös Itävallassa ja Sveitsissä, ja vuoteen 1985 mennessä järjestelmiä oli Euroopassa jo käytössä n. 1500 kappaletta. Viime vuosikymmenien aikana UV-desinfioinnin tehoa ja turvallisuutta on kehitetty ja parannettu ja puhdistusteknologia on levinnyt laajaan käyttöön (Reed, 2010).

## 2. Mikrobit

Mikrobit ovat pieniä eliöitä, joihin luetaan mukaan bakteerit, levät, alkueläimet, hiivat, homeet ja joissain tapauksissa virukset. Mikrobeja esiintyy laajalti kaikkialla, ja niihin kuuluu sekä haitallisia että hyödyllisiä mikrobeja (Sataloff, Johns, & Kost, 2013). Bakteereja ja viruksia kertyy hengityssuojaimiin hengityksen, ilmassa olevan bioaerosolin, pisaroiden tai kosketuksen kautta. Hengitysteiden pisarat voivat olla erikokoisia ja yleisesti ne luokitellaan aerosoleiksi (alle 5  $\mu\text{m}$ ) ja pisaroiksi, jotka ovat suurempia kuin 5  $\mu\text{m}$ . Vaikka pisaroihin vaikuttaa suurelta osin ympäristötekijät, kuten kosteus ja lämpötila, ne eivät kulkeudu painovoiman vuoksi pidemmälle kuin 1-2 m. Aerosolit pysyvät ilmassa pisaroita pidempään niiden pienen koon vuoksi ja täten niillä on keskeinen rooli infektioiden leviämisessä. Aerosolit voivat pysyä ilmassa useista minuuteista jopa tunteihin. Hengityssuojaimet toimivat tehokkaana suojana lieventäen infektioiden leviämistä pisaroiden ja aerosolien välityksellä. Aerosolien suodatus perustuu viiteen perusmekanismiin: painovoimainen sedimentaatio, inertiaalinen vaikutus, mekaaninen sieppaus, diffuusio ja elektrostaattinen vetovoima. Suuremmilla aerosolihiukkasilla ensimmäisillä kahdella mekanismilla on suuri merkitys, ja kun aerosolikoko pienenee diffuusiolla ja mekaanisella sieppauksella on suurin vaikutus. Nanometrikokoiset hiukkaset, jotka pystyvät helposti liikkumaan suodatinkuituverkon aukkojen läpi, pyritään kiinnittämään maskiin elektrostaattisen vetovoiman avulla, jolloin ne sitoutuvat kuituihin (Konda et al., 2020). Maskiin kertynyttä mikrobimäärää voidaan havainnoida esimerkiksi väriaineen avulla (**Kuva 1**).



**Kuva 1. Kirurgisen maskin likaantuminen käytössä.** Ylhäällä puoliksi leikatun maskin ulkopuoli ja alhaalla sisäpuoli. Ajat kuvaavat maskin käyttöaikaa ja punainen väri osoittaa maskiin kertyneet mikrobit. Lähde: (T. Kiiskinen, 2021)

## 2.1 DNA:n rakenne

DNA eli deoksiribonukleiinihappo sisältää geneettisen informaation, joka eliön lisääntyessä välittyy jälkeläisille. Kaikki eliöt sisältävät DNA:ta lukuun ottamatta joitakin viruksia, jotka käyttävät RNA:ta niiden geneettisen informaation välittäjänä. RNA eli ribonukleiinihappo eroaa DNA:sta sokeriosan sekä yhden emäksen perusteella. RNA:ssa deoksiriboosin tilalla on riboosi ja tyymiinin tilalla on urasiili. Eukaryoottisolussa DNA löytyy tumasta ja prokaryoottisolussa nukleoidista (Sataloff et al., 2013).

Nukleotidit ovat DNA:n ja RNA:n rakennuspalikoita. Nukleotidi koostuu emäksestä, sokeriosasta sekä fosfaatista. Nukleotidin emäs voi olla joko puriini (kaksoisrengasrakenne) tai pyrimidiini (rengasrakenne). Puriineihin kuuluu adeniini (A) sekä guaniini (G) ja pyrimidiineihin kuuluu sytosiini (C) sekä tyymiini (T). RNA:ssa tyymiinin tilalla on urasiili (U). Nämä emäkset muodostavat keskenään pareittain sidoksia. Adeniini sitoutuu tyymiiniin (urasiili RNA:ssa) kanssa ja sytosiini guaniinin kanssa. Nukleotidin emäs sitoutuu pentoosin

ensimmäiseen hiileen ja fosfaattiosa sitoutuu viidennen hiilen hydroksyyliiryhmään. Nukleotidit liittyvät toisiinsa kovalenttisilla sidoksilla pentoosin kolmanteen hiileen liittyneen hydroksyyliiryhmän sekä toisen nukleotidin fosfaattiosan kanssa (Sataloff et al., 2013).

DNA muodostaa kaksoiskiirteen missä komplementaariset emäkset sitoutuvat vetysidoksilla toisiinsa. Sokeriosa sekä fosfaatti muodostavat DNA:n selkärangan ja emäkset sijaitsevat kierteen sisäosassa. Kummankin juosteen toisessa päässä on vapaa hydroksyyliiryhmä ja toisessa päässä vapaa fosfaattiryhmä. Juosteet kulkevat vastakkaisiin suuntiin ja kiertyvät toistensa ympäri. Tämä malli tunnetaan Watson-Crickin kaksoiskiirteenä. RNA on yleensä yksijuosteinen, mutta viruksien geneettisenä materiaalina se voi esiintyä myös kaksijuosteisena (Kowalski, 2009).

Edellä kuvailtu DNA:n rakenne tunnetaan B-DNA:na. B-DNA:n halkaisija on 1.9 nm ja siinä on kymmenen emästä per käännös. Tämä on DNA:n yleisin muoto, jonka se ottaa vedessä alhaisissa suolapitoisuuksissa. DNA:n rakenne ei kuitenkaan ole staattinen, vaan se muuttuu ympäristön mukaan. Korkeissa suolapitoisuuksissa tai kuivissa olosuhteissa DNA esiintyy A-DNA muodossa. A-DNA on oikealle kiertyvä muoto kuten B-DNA:kin, mutta sillä on yksitoista nukleotidi paria per käännös kymmenen sijasta. Siten A-DNA on lyhyempi ja paksumpi kaksoiskierre, jonka halkaisija on 2.3 nm. DNA molekyyli ei esiinny lähes koskaan tässä muodossa elävissä organismeissa. DNA:n kolmas muoto on vasemmalle kiertyvä Z-DNA. Sitä esiintyy kaksoiskierteissä, jossa on paljon G:C-pareja. Tämä DNA:n muoto sisältää kaksitoista emästä per käännös ja sen halkaisija on 1.8 nm. Z-DNA:n tehtävää elävissä soluissa ei toistaiseksi tiedetä täysin (Snustad & Simmons, 2012).

## **2.2 Virukset**

Virukset ovat hyvin pieniä organismeja, joilla ei ole omaa aineenvaihduntaa ja täten vaativat isäntäsolun lisääntyäkseen. Tämän vuoksi niitä ei voida pitää elävinä organismeina, mutta ne sisältävät kuitenkin geneettistä informaatiota ja proteiineja. Virukset infektoivat laajalti eri organismeja bakteereista kasveihin ja eläimiin (Sataloff et al., 2013).

Viruspartikkelit koostuvat nukleiinihappogenomista, kapsidista ja joillakin viruksilla voi olla kapsidin ympärillä lipidivaippa. Virusten nukleiinihappo voi olla DNA:ta tai RNA:ta, yksi- tai kaksijuosteista sekä lineaarista tai sirkulaarista. Nukleiinihapon ympärillä on proteiiniukuori eli kapsidi. Muodoltaan kapsidi voi olla sauvamainen tai ikosahedraalinen. Nukleiinihappo ja kapsidi muodostavat yhdessä nukleokapsidin. Joillakin viruksilla voi olla nukleokapsidin

ympärillä lipideista koostuva kaksoiskerroksinen kalvo eli vaippa, joka on peräisin isäntäsolusta. Vaippaan voi olla uponneena viruksen koodaamia proteiineja, joilla on tehtäviä mm. isäntäsolun tunnistamisessa tai infektion aloittamisessa (Wagner, Hewlett, Bloom, & Camerini, 2007).

Virus infektoi solun aluksi tarttumalla isäntäsolun pinnalla olevaan reseptoriin kapsidin tai vaipan proteiinien avulla. Bakteriofagit vapauttavat nukleiinihapon isäntäsoluun jättäen kapsidin ulkopuolelle. Kasvi- ja eläinvirukset voivat tunkeutua soluun endosytoosilla sekä joissain tapauksissa viruksien lipidivaippa voi yhdistyä isäntäsolun solukalvon kanssa. Replikaatiomekanismi riippuu virusgenomin muodosta. DNA-virukset käyttävät isäntäsolun proteiineja ja entsyymejä tuottaakseen lisää DNA:ta. DNA muutetaan transkription kautta lähetti-RNA:ksi, jota käytetään proteiinisynteesissä. RNA-virukset käyttävät genomiaan tuottaakseen lähetti-RNA:ta. Virus lähetti-RNA ohjaa isäntäsolua syntetisoimaan virus entsyymejä, kapsidin proteiineja sekä kokoamaan uusia viruspartikkeleita. Poikkeuksena tähän malliin on mm. retrovirukset, joiden RNA genomi täytyy muuttaa käänteiskopioijaentsyymien avulla DNA:ksi, joka sitten yhdistetään isäntäsolun genomiin. Uudet viruspartikkelit vapautetaan isäntäsolusta, jonka jälkeen ne voivat infektoida lisää soluja ja toistaa replikaatiosykliä. Viruspartikkelit vapautuu, kun isäntäsolu kuolee tai ne poistuvat isäntäsolusta eksosytoosin avulla (Sataloff et al., 2013).

### **2.3 Bakteerit**

Bakteerit kuuluvat prokaryooteihin, eli niillä ei ole soluelimiä tai muita sisäisiä rakenteita lukuun ottamatta ribosomeja. Täten niillä ei ole tumaa, vaan perintöaines on yksittäisenä sirkulaarisena kromosomina nukleoidissa. Useilla bakteereilla on myös pienempiä kromosomin ulkopuolisia DNA molekyyliä, plasmideja. Nämä replikoituvat itsenäisesti ja muodostuvat kaksijuosteisesta DNA:sta, joka on usein superkierteisessä muodossa. Jotkin bakteerit pystyvät muodostamaan endosporeja, jotka vastustavat tehokkaasti lämpöä ja kuivuutta ja auttavat organismia selviämään epäsuotuisissa olosuhteissa (Sataloff et al., 2013).

Bakteerin ulkoisiin rakenteisiin kuuluu solukalvo, soluseinä ja joillakin voi esiintyä kapseli, limakerros ja erilaisia liikkumista helpottavia rakenteita. Solukalvo on ohut lipidikaksoiskerros joka koostuu fosfolipideistä, proteiineista ja hiilihydraateista. Se rajaa solun ympäristöstään ja toimii läpäisyesteenä. Sillä on monia tehtäviä soluseinän rakenteiden synteesissä, hengityksessä, ravinteiden sisäännotossa ja toksisten yhdisteiden erityksessä. Solukalvon



ulkopuolella on jäykkä rakenne, soluseinä. Sen tarkoituksena on tukea solua sekä suojata sitä sisäiseltä osmoottiselta paineelta. Soluseinän mukaan bakteerit voidaan jakaa gram-värjäyksen perusteella positiivisiin ja negatiivisiin bakteereihin. Gram-positiivisilla bakteereilla 90 % soluseinästä muodostuu peptidoglykaanista ja loppuosa muodostuu teikkohapoista. Gram-negatiivisilla bakteereilla soluseinä koostuu muutamasta kerroksesta, joista peptidoglykaanin osuus on 10 %. Tämän ympärillä on ulompi kerros, joka sisältää lipopolysakkarideja ja lipoproteiineja. Bakteerin solukalvoon voi olla kiinnittyneenä ulkoisia rakenteita: flagella (käytetään liikkumiseen), pili (käytetään geneettisen materiaalin siirtoon) tai fimbria (käytetään isäntäsoluun kiinnittymiseen) (Sataloff et al., 2013).

Bakteerien lisääntyminen on aseksuaalista ja tapahtuu jakautumisen kautta. Tämä ei kuitenkaan tarjoa mahdollisuutta geneettiselle rekombinaatiolle, joten bakteereilla on kolme mekanismia geenien jakamiseen: transformaatio, transduktio ja konjugaatio. Transformaatiossa bakteeri ottaa DNA:n suoraan ympäristöstä. DNA voi säilyä erillisenä plasmidina tai se voidaan ottaa osaksi genomia. Transduktiossa bakteriofagi siirtää toisen bakteerin DNA:ta injektoimalla sen toiseen. Konjugaatiossa DNA siirtyy bakteerien kesken uloketta pitkin (Sataloff et al., 2013).

## 2.4 Sienet

Sienet kuuluvat eukaryooteihin, joten niillä on tuma ja monia soluelimiä. Ne saavat tarvitsemansa energian hajottamalla kuollutta eloperäistä materiaalia tai ne voivat elää loisina. Niillä on tärkeä merkitys ekosysteemissä hajottajina. Sienissä DNA on kiertynyt histoni proteiinien ympärille. Sienillä ei ole kloroplasteja eikä klorofylliä kuten kasveilla. Niille on tyypillisiä kirkkaat värit, ja pigmentit soluseinässä toimivat suojana UV-säteilylle. Sienillä soluseinä koostuu kitiinistä ja glukaanista, jotka tarjoavat sille kestävyttä. Soluseinän merkitys on myös suojella solua kuivuudelta ja saalistajilta (Sataloff et al., 2013).

Sienten vegetatiivinen rakenne on yksi- tai monisoluihin tallus. Yksisoluisia sieniä kutsutaan hiivoiksi. Suurin osa sienistä on monisoluisia organismeja. Niillä on kaksi morfologista osaa: vegetatiivinen ja lisääntymiskelpoinen. Vegetatiivinen osa koostuu ohuista sienirihmoista, kun taas lisääntymiskelpoinen osa voi olla näkyvämpi. Sienet lisääntyvät seksuaalisesti, aseksuaalisesti tai parhaissa tapauksissa molemmilla tavoilla. Aseksuaalisesti sienet lisääntyvät fragmentaatiolla, kuroutumalla tai muodostamalla itiöitä. Näistä yleisin lisääntymistapa on itiöiden muodostus, jossa mitoosin kautta muodostuu isännälle identtisiä itiöitä. Seksuaalinen lisääntyminen on yleisintä epäsuotuisissa olosuhteissa. Seksuaalinen lisääntyminen jaetaan

kahteen eri lisääntymistyyppiin: homotalliseen, jossa molemmat ovat samassa sienirihmastossa tai heterotalliseen, joka vaatii kaksi sienirihmasto lisääntyäkseen (Sataloff et al., 2013).

Homeilla viitataan kokonaisuuteen sieniä, joiden sienirihmasto muodostaa homemaista kasvustoa. Yleisimmät suvut ovat *Aspergillus* ja *Penicillium*. Nämä lisääntyvät itiöiden tai kuroumaitiöiden avulla, jotka muodostuvat rihmastojen päähän. Kasvaakseen homeet tarvitsevat happea, mutta vettä vain niukasti, mikä mahdollistaa niiden kasvun kuivissakin olosuhteissa. Homeet ovat yleisiä elintarvikkeissa ja rakennuksissa (Sataloff et al., 2013).

### 3. Ultraviolettisäteily

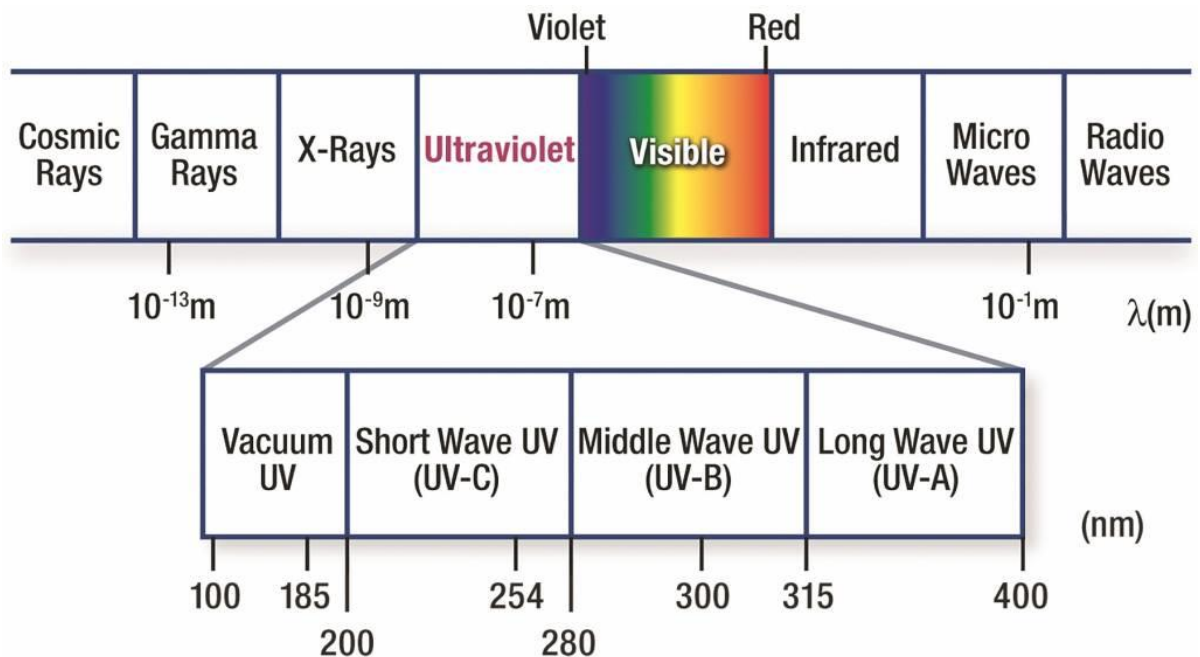
#### 3.1 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettinen säteily on itsestään etenevä aalto avaruudessa tai aineessa. Sillä on sähköisiä sekä magneettisia komponentteja, jotka värähtelevät toisiinsa ja aallon tai energian etenemissuuntaan nähden (Padmanabhan, 2012). Energia etenee pulsseina, joita kutsutaan fotoneiksi. Sähkömagneettinen säteily syntyy, kun atomi absorboi fotoneja ja samalla viritetty. Tämän seurauksena yksi sen elektroneista siirtyy ylemmälle energiatasolle, jonka jälkeen elektroni siirtyy alimmalle tasolle vapauttaen samalla säteilyä fotoneina. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on etäisyys kahden peräkkäisen aallon huippukohtien välillä. Aallonpituuden mukaan sähkömagneettinen säteily jaetaan radioaaltoihin, mikroaaltoihin, infrapunasäteilyyn, näkyvään valoon, ultraviolettisäteilyyn, röntgensäteilyyn ja gammasäteilyyn. Nämä yhdessä muodostavat sähkömagneettisen spektrin. Sähkömagneettisen säteilyn energia riippuu aallonpituudesta: mitä lyhyempi aallonpituus, sitä suurempi energia. Matalaenergisempi säteily ilmaistään taajuuden mukaan ja korkeampienerginen säteily ilmaistään energiana per foton. Näkyvän valon suhteen aallonpituus määrittää värin, violetilla on lyhyin ja punaisella pisin aallonpituus (Ling et al., 2018).

#### 3.2 Ultraviolettisäteily

Ultraviolettisäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on lyhyempi kuin näkyvän valon, mutta pidempi kuin röntgensäteilyn (**Kuva 2**). UV-säteilyn suurin lähde on aurinko, mutta sitä voidaan tuottaa myös erilaisten lamppujen avulla. UV-säteily jaetaan neljään alueeseen: UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm), UVC (100-280 nm) ja vakuumi-UV (VUV) (100-200 nm) (Zoschke, Börnick, & Worch, 2014). Auringon tuottamasta UVB- ja

UVC-säteilyä suurin osa absorboituu otsoni (O<sub>3</sub>) molekyyliin ylemmässä ilmakehässä. Lopputuloksena 99 % maapallon pinnalle pääsevistä UV-säteilyä kuuluu UVA alueeseen. UV-säteilyä käytetään erilaisissa teollisissa prosesseissa ja lääketieteessä useisiin tarkoituksiin kuten bakteerien tappamiseen, fluoresoivien vaikutusten luomiseen, musteiden ja hartsien kovettamiseen, valohoitoon ja ruskettumiseen. Eri UV-säteilyn aallonpituuksia ja intensiteettejä käytetään erilaisiin tarkoituksiin (Ling et al., 2018).



**Kuva 2 Ultraviolettisäteilyn sijoittuminen sähkömagneettisella spektrillä.** Lähde: (Construction Specifications Institute, 2018)

UVB-säteilyllä on tärkeä osa ihon 7-dehydrokolesterolin muuttamisessa D-previtamiiniksi, jota edelleen muutetaan D<sub>3</sub>-vitamiiniksi (kolekalsiferoli) (Engelsen, 2010). Liiallinen UV-säteily on mutageenista, johtaen ihon ikääntymiseen ja ihosyöpään. UV-säteilyn vaikutuksen vakavuus riippuu altistuksen aallonpituudesta, intensiteetistä sekä kestosta. Riskialtinta on UVC-säteily aallonpituutensa vuoksi. UVB-säteily aiheuttaa ihon palamista, eryteemaa ja sen tummumista. UVA-säteily pystyy tunkeutumaan syvemmälle ihokerrokseen, vaikuttaen sidekudokseen ja verisuoniin, johtaen enneaikaiseen ihon ikääntymiseen. Tietyt kemikaalit ja lääkkeet voivat toimia valoherkistävinä aineina ja parantavat UV-säteilyn vaikutusta auringonvalosta tai muista lähteistä. Tällaista aineita ovat mm. tiatsididiureetit, korkean verenpaineen hoidossa käytettävät lääkkeet, tietyt antibiootit (tetrasykliinit, sulfonamidit), kosmetiikka ja tiasiinia rauhoittavat aineet (Ling et al., 2018).

Mikrobeja tuhoavalla UV-säteilyllä (ultraviolet germicidal irradiation, UVGI) viitataan UV-säteilyn käyttämistä aallonpituudella 200-320 nm. Tähän aallonpituuteen kuuluu UVB- ja UVC-säteily, sillä niiden tiedetään tappavan mikrobeja tehokkaimmin. UV-säteily alle 320 nm on aktiivista, eli fotokemiallisia reaktioita tuottavaa. Näin ollen UVA-säteilyä ei lasketa mikrobeja tappavaksi säteilyksi. UVGI:ta käytetään laajalti ruoan, ilman, veden ja erilaisten tarvikkeiden puhdistukseen (Kowalski, 2009).

### 3.3 Ultraviolettisäteilyn tuottaminen

Ultraviolettisäteilyn suurin lähde on aurinko. UV-säteilyn laatu ja määrä vaihtelevat auringon korkeuden mukaan. Auringon korkeus riippuu vuorokaudenajasta, vuoden päivästä ja maantieteellisestä sijainnista (leveys- ja pituusaste). UV-indeksi on korkeimmillaan keskipäivällä neljän tunnin ajan ja maantieteellisesti päiväntasaajalla sekä vuoristoissa. Otsoni absorboi UV-säteilyä riippumatta aallonpituudesta ja sillä on suuri vaikutus maapallon pinnalle pääsevään säteilyyn. UV-säteilyn laatu ja määrä muuttuvat, kun auringon säteet kulkevat ilmakehän läpi. Tärkeimmät vaikutukset ovat stratosfäärissä, kun otsoni absorboi UV-säteilyä ja N<sub>2</sub> sekä O<sub>2</sub> molekyylit sirottavat sitä. Troposfäärissä tärkeimmän vaimennuksen aiheuttavat ilmansaasteiden – kuten otsoni, typpioksidi ja rikkioksidi – kyky absorboida säteilyä sekä erilaisten hiukkasten (esim. noki) ja pilvien aiheuttama sironta (Diffey, 2002).

Yleinen tapa tuottaa UV-säteilyä on kaasupurkauslampun avulla, näistä vanhin on elohopeahöyrylamppu. Siinä sähkömagneettista säteilyä tuotetaan johtamalla sähkövirtaa höyrystetyn elohopean läpi. Lamppu toimii siten, että elohopea atomit virittyvät törmäyksistä lampun elektrodien välillä virtaavien elektronien kanssa. Virittetyt elektronit palaavat tietylle energiatasolle elohopea atomissa ja vapauttavat osan absorboidusta energiasta optisen säteilyn muodossa (Diffey, 2002). Normaaleissa loistelampuissa lasi on päällystetty sisäpuolelta fosforilla, joka absorboi UV-säteilyä ja säteilee energiaa näkyvänä valona. UV-lampuissa ei ole fosforia ja lasi on yleensä kvartsiä. Kvartsi päästää suurimmaksi osaksi kaiken UV-säteilyn läpi, jolloin havaitaan UV-säteilyä eri aallonpituuksilla riippuen lampputyypistä. Matalapaineiset elohopealamput tuottavat säteilyä aallonpituudella 254 nm ja hieman myös aallonpituudella 185 nm. Tämä 185 nm säteily tuottaa happea sisältävään ympäristöön otsonia, joka auttaa puhdistuksessa, mutta on myös terveydelle haitallista (Kowalski, 2009).

Ultravioletti LED (light-emitting diode) lampuilla on muutamia etuja normaaleihin UV-lamppuihin nähden. Ne ovat kokonsa myötä todella kompakteja ja eivät tarvitse elektronista

liitäntälaitetta toimiakseen. UV LED:it eivät käytä ollenkaan myrkyllistä elohopeaa niiden toiminnassa. LED sisältää p-n liitoksen, joka säteilee optista valoa, kun sen läpi johdetaan sähkövirta. Liitoskohdassa elektroniaukot ja elektronit yhdistyvät. Tämän seurauksena elektroni siirtyy alemmalle energiatasolle. Lopputuloksena vapautuu energiaa valona sekä lämpönä ympäröivien atomien värähtelystä (Kowalski, 2009).

Pulssi-ksenon-ultravioletti (PX-UV) on vaihtoehtoinen tapa perinteisille menetelmille. Se säteilee lyhyinä voimakkaina pulsseina, mikä vaatii mahdollisesti lyhyemmän ajan tappavien annosten saavuttamiseksi. Sillä voi olla suurempi tehokkuus kuin esimerkiksi kaasupurkauslampulla sen laajan spektrin (200-320 nm) ja suuremman intensiteetin vuoksi (Song et al., 2020).

### 3.4 Ultraviolettisäteilyn teho ja sen mittaaminen

Ultraviolettisäteilyn määrää ilmaistaan käyttämällä radiometristä terminologiaa. Joule (J) kuvaa säteilyenergian yksikköä ja watti (W) tehoa sekä säteilyvirtaa. Säteilylähteen intensiteetin ( $W/m^2$ ) avulla voidaan laskea säteilyannos ( $J/m^2$ ) kaavan 1 avulla:

$$\text{Säteilyannos} \left( \frac{mJ}{cm^2} \right) = \text{intensiteetti} \left( \frac{mW}{cm^2} \right) \times \text{aika} (s) \quad (1)$$

Esimerkiksi  $1000 \text{ mJ/cm}^2$  annoksen saavuttaminen viidessä minuutissa vaatii  $3 \text{ mW/cm}^2$  intensiteetin desinfioitavalle pinnalle.

Ultraviolettisäteilyn mittaamiseen on kaksi pääasiallista syytä: varmistaa oikeansuuruinen säteilyannos eri sovelluksissa sekä mahdollistaa säteilytuloksien verrattavuus eri laboratorioden välillä. Nämä mittaukset vaativat sekä tarkkuutta että toistettavuutta. Radiometriä käytetään monitorina, jotta säteilytykset on toistettavissa paikasta riippumatta (Diffey, 2002). Mittausten luotettavuuden varmistamiseksi tulee radiometrit kalibroida säännöllisesti.

### 3.5 Ultraviolettisäteilyn terveydelliset haitat

Tunnetuin liiallisen ultraviolettiaaltistuksen akuutti vaikutus on eryteema (ihon punoitus), jota kutsutaan auringonpolttamaksi. Useimmat ihmiset ruskettuvat ultravioletin tuottamasta melaniinintuotannosta, joka tapahtuu muutaman päivän kuluessa altistuksesta. Toinen vaikutus on ihon uloimpien kerrosten paksuuntuminen, joka vaimentaa UV-säteilyn läpäisyä ihon syvimpiin kerroksiin. Molemmat näistä ovat merkkejä ihovauriosta. Vahva auringonpolttama

voi aiheuttaa iholla rakkulan muodostumisen ja sen kuoriutumisen. Alttius ihovaurioille riippuu ihotyypistä; henkilöt joilla on vaaleampi iho, ovat alttiimpia auringonpolttamille tai punoitukselle, kuin ihmiset joilla on tummempi iho. Kyky sopeutua UV-säteilyn altistukseen riippuu myös ihotyypistä. Krooninen altistuminen UV-säteilylle aiheuttaa useita heikentäviä muutoksia soluissa, kudoksissa ja ihon verisuonissa, näitä ovat mm. pisamat, luomet ja kesakot. UVB-säteily stimuloi solujen lisääntymistä ulkokerroksessa ja UVA-säteily häiritsee sidekudosta, jolloin iho menettää vähitellen joustavuutensa. Rypyt ovat tämän joustavuuden menetyksen yleinen tulos. Osalla ihmisistä on ihosairaus, joka tekee todella alttiiksi UV-säteilylle. Tällaisessa tapauksessa jo pienikin UV-säteily voi aiheuttaa allergisen reaktion ja johtaa ihottumaan tai vakavaan auringonpolttamaan. Tämä liitetään usein erilaisten lääkkeiden käyttöön (World Health Organization, 2017).

Useimmat ihosyövät ovat seurausta liiallisesta altistumisesta UV-säteilylle. Sekä tyvisolusyöpä että okasolusyöpä (ihosyövän yleisimmät tyypit) löytyvät yleensä auringolle altistetuista ruumiinosista. Ne eivät ole yleensä kohtalokkaita, mutta niiden kirurginen hoito voi johtaa arpiin. Pahanlaatuinen melanooma on harvinaisin, mutta vaarallisin ihosyöpä. Melanoomalla on epäsäännöllinen reunus ja laikukas väritys. Lapsuudessa saadun altistuksen ajatellaan olevan suuremmassa osassa melanoomaan sairastumisessa kuin altistuminen myöhemmin elämässä (World Health Organization, 2017).

Ultraviolettisäteily vaikuttaa ihon lisäksi myös silmiin. Lumisokeus on tila, jossa ultraviolettisäteily aiheuttaa sarveiskalvon turvotuksen tai tulehduksen ja tämän seurauksena silmän väliaikaisen näkökyvyttömyyden. Oireet voivat olla silmän punaisuus, vetisyys, turpoaminen ja roskan tunne silmässä (Saarelma, 2020). Pinguecula eli sidekalvokyyhmy voi muodostua silmään ultraviolettisäteilyn seurauksena. Se esiintyy valkoisena tai keltaisena koholla olevana alueena sidekalvossa. Siipikalvo on muutos, jossa silmän sidekalvo kasvaa sarveiskalvolle kolmionmallisena. Jos se jatkaa kasvuaan, tämä voi johtaa sarveiskalvon arpeutumiseen ja siten näön menetykseen tai vääristymiin (Seppänen, 2018b). Ultraviolettisäteilyllä uskotaan myös olevan osuutta kaihin sekä silmänpohjan rappeuman kehittymiseen. Kaihissa silmän mykiö on samentunut ja läpäisee valoa huonosti (Seppänen, 2018a). Silmänpohjan rappeumassa verkkokalvon rakenne vaurioituu (Seppänen, 2018c).

Otsonia muodostuu luonnossa ilmakehän yläosassa, stratosfäärissä. Otsoni ( $O_3$ ) syntyy happimolekyylin ( $O_2$ ) fotolyysillä, jolloin se hajoaa happiatomeiksi ( $O$ ). Nämä happiatomit kiinnittyvät molekulaariseen happeen ja muodostavat otsonia. UV-säteily aallonpituudella 160-

240 nm tuottaa otsonia hapesta. Säteilyn vaimeneminen eli absorptio perustuu UV-säteilyn kykyyn hajottaa otsonia happimolekyyleiksi. Tämä on tärkeää, koska auringosta tulevalla UV-säteilyllä on tarvittava energia DNA:n hajottamiseen (Friedl, 2001). UV-lamppu voi myös tuottaa otsonia aallonpituudella 185 nm samalla tavalla kuin ilmakehässä. UV-säteily 240-315 nm kuitenkin tuhoaa otsonia muuttamalla sitä takaisin hapeksi. Otsonin tuhoutumisen huippukohta on 254 nm, joten UVC-lamput itseasiassa tuhoavat otsonia. Otsonia käytetään ilmanpuhdistukseen ja desinfiointiin, mutta hengitettynä se ärsyttää hengitysteitä, aiheuttaa pahoinvointia sekä pitkäaikaisessa altistumisessa voi johtaa keuhkotulehdukseen (Koren et al., 1989).

### **3.6 Desinfiointimenetelmät**

Haitallisten mikrobin tappamista, poistamista tai toimintakyvyttömäksi tekemistä voidaan kutsua desinfioinniksi. Patogeenisten organismien tuhoaminen johtaa niiden lisääntymisen ja kasvun pysäyttämiseen. Desinfiointiin on sekä kemiallisia että fysikaalisia tapoja. Kasvomaskien puhdistamiseksi on kokeiltu erilaisia tekniikoita, mukaan lukien autoklaavaus, lämpökäsittely, mikroaallot, etanoli, vetyperoksidi, valkaisuaine ja UV-säteily. Kaikilla tekniikoilla on etuja ja haittoja. Lämpö ja höyry voivat sulattaa tai heikentää hengityssuojainta ja vaatia sen kuivaamisen käsittelyn jälkeen. Kemialliset desinfiointiaineet voivat vaatia huuhtelua ja kuivumista sekä jättää maskiin epämiellyttävän hajun tai jäännöksen, joka ärsyttää ihoa. Alkoholien ongelma maskien käytössä on se, että ne poistavat sähköstaattisen varauksen suodatusväliaineesta ja heikentävät sillä tavoin sen suodatuskapasiteettia. Ultraviolettisäteilyn käyttö desinfioinnissa on suhteellisen nopeata sekä helppokäyttöistä, eikä se jätä kemikaalijäämiä tai altista työntekijöitä myrkyllisille kemikaaleille (Lindsley et al., 2015). UV-säteily käsittely voidaan myös tehdä missä vaan, kun sähköä on tarjolla ja samalla kerralla useammalle maskille (Zhao et al., 2020). Tärkeä näkökulma kaikille puhdistusmenetelmille, mukaan lukien UV-säteilylle, on riski siitä, että ne hajottavat hengityssuojaimen ja heikentävät sen kykyä suodattaa mikrobeja (Lindsley et al., 2015). Taulukkoon 1 on koottu UV-desinfioinnin hyötyjä sekä haittoja.

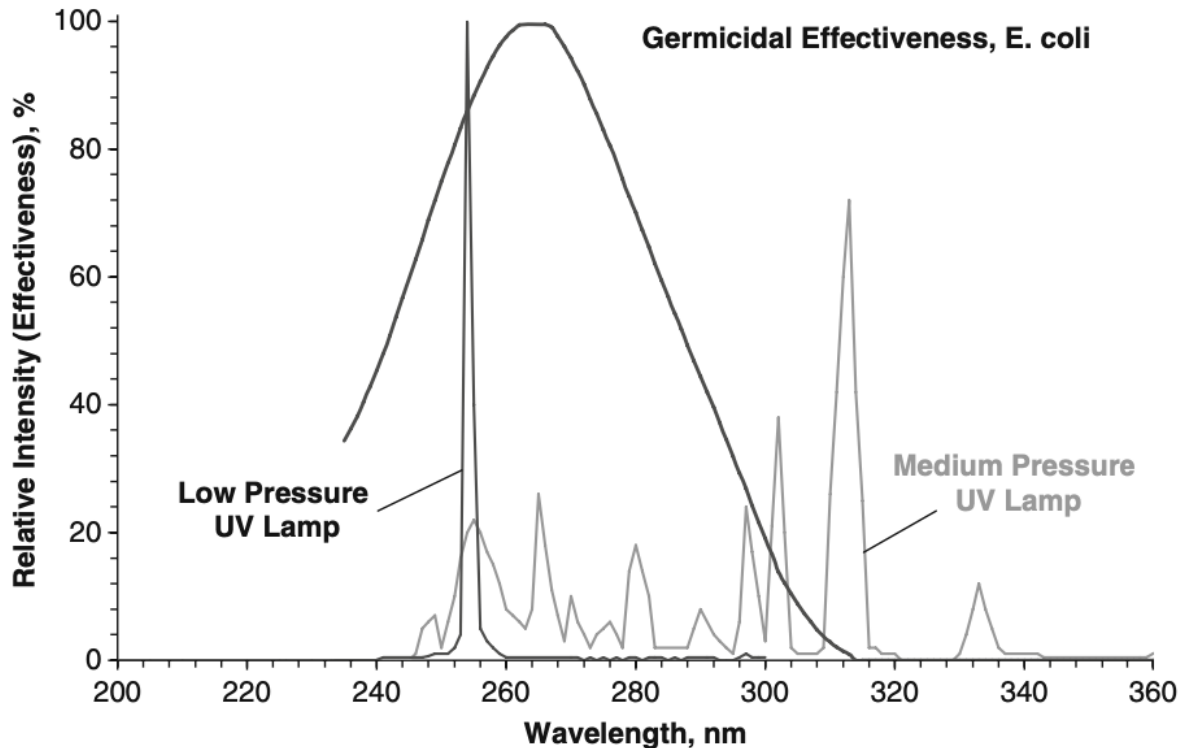
**Taulukko 1 UV-desinfioinnin hyödyt ja haitat.** Koottu lähteistä: Lindsey *et al.* (2015), Zhao *et al.* (2020), Yang *et al.* (2020).

Hyödyt	Haitat
Ei altista työntekijää vaarallisille kemikaaleille	Vaatii oikean aallonpituuden, intensiteetin ja annoksen ollakseen tehokas
Ei jätä kemikaalijäämiä desinfioitavaan tuotteeseen	Jotkin mikrobit voivat korjata itse UV-säteilyn aiheuttamia vaurioita
Nopea ja helppo desinfiointitapa	UV-säteily ei poista mikrobia desinfioitavasta tuotteesta, ainoastaan tekee sen toimintakyvyttömäksi
Matalat kustannukset	UV-säteily on työntekijän terveydelle haitallista ilman suojavälineitä
Pystyy inaktivoimaan monia erilaisia mikrobeja	Ei juurikaan tunkeudu materiaalien läpi
Ympäristöystävällinen	Kaasupurkauslamppu tuottaa terveydelle haitallista otsonia

#### 4. UV-säteilyn vaikutusmekanismit mikrobeihin

Mikrobeja tuhoava ultraviolettisäteily estää mikrobien lisääntymisen aiheuttamalla nukleiinihapoissa fotokemiallisia muutoksia. Vaikka kaikki UV-aallonpituudet aiheuttavat solussa muutoksia, UVC alueen aallonpituudet ovat erityisen haitallisia solulle, sillä proteiinit, DNA ja RNA absorboivat ne. UVC-säteilyn tappava vaikutus on huipussaan 260-265 nm, joka vastaa bakteerien DNA:n absorboinnin huippukohtaa (**Kuva 3**). UVC-säteilyn vaikutus voi vaihdella lajien välillä ja UVB-säteilyllä on myös pieni vaikutus tuhoamiseen. Esimerkiksi optimaalinen aallonpituus *Escherichia colin* inaktivointiin on 265 nm ja *Cryptosporidium parvumin* 271 nm (Kowalski, 2009).





**Kuva 3** UV-aallonpituuksien tehokkuus verrattaessa UV-lamppuja *E.coliin*. Lähde: (Kowalski, 2009)

#### 4.1 UV-säteilyn vaikutus DNA/RNA:han

Nukleiinihappoja on kahta tyyppiä: ribonukleiinihappo (RNA) ja deoksiribonukleiinihappo (DNA). Virukset sisältävät DNA:ta tai RNA:ta, mutta eivät molempia. UV-säteilyn aikana mikrobeilla herkin kohde on joko DNA tai RNA. UV-säteily aiheuttaa kahden tymiiniemäksen välille silloituksen, joka on vakaampi kuin niiden välillä oleva vetysidos. DNA ja RNA ovat vastuussa mikrobien replikaatiosta ja proteiinisynteesistä, joten näiden nukleiinihappojen vaurioituminen johtaa inaktivaatioon tai lisääntymisen epäonnistumiseen. Tymiinidimeerit muodostuvat yhden pikosekunnin sisällä UV-säteilystä edellyttäen, että emäkset ovat oikein suunnattuina säteilyn absorptiohetkellä. Kuitenkin todellisuudessa vain muutama prosentti tymiiniemäksistä on suotuisasti sijoitettuna reaktion ja dimerisoitumisen kannalta. Tymiinidimeerien muodostuminen voi tapahtua myös vierekkäisten DNA/RNA-juosteiden välillä tai virusten tapauksessa DNA:n/RNA:n ja kapsidin proteiinien välillä vahingoittaen virusten kapsidia. Aminohapot, jotka voivat vaikuttaa fotoreaktiivisuuteen ja dimeerien muodostumiseen ovat kysteiini, tyrosiini, seriini, metioniini, lysiini, arginiini, histidiini, tryptofaani ja fenyyialaniini. Muut biologiset molekyylit, joissa on tyydyttämättömiä sidoksia,

kuten koentsyymit, hormonit ja elektroninkuljettajat voivat olla myös alttiita UV-vaurioille (Kowalski, 2009).

UV-säteilyn absorptio voi johtaa sisäisten syklobutyylipyrimidiinidimeerien muodostumiseen DNA:ssa. Tämä voi johtaa mutaatioihin tai solukuolemaan. Pyrimidiinit ovat molekulaarisia komponentteja biosynteesiprosesseissa ja ne sisältävät tyymiinin ja sytosiinin. Primääriset dimeerit, joita muodostuu DNA:ssa tunnetaan tymiinidimeereinä. UV-säteilyn tappava vaikutus johtuu pääasiassa näiden muodostumisesta johtuvista rakenteellisista virheistä. Sytosiinidimeerit voivat aiheuttaa sekundaarisia vaikutuksia. UV-säteilyn vaikutuksesta muodostuu myös muita tuotteita, jotka vaikuttavat solukuolemaan. Fotohydraatioreaktiot voivat esiintyä UV-säteilyn absorptiossa, näissä pyrimidiinien sytosiini ja urasiili sitoutuvat vesimolekyylien kanssa. Tätä reaktiota ei kuitenkaan tapahdu tyymiinin kanssa. Fotohydraation tuotto on riippumaton aallonpituudesta (Kowalski, 2009).

Kaksijuosteisella RNA:lla on suurempi vastustuskyky UV-säteilyä vastaan kuin yksijuosteisella RNA:lla. Tämä voi johtua useista eri tekijöistä, joista rakenteen vakaus on yksi. RNA:ssa riippumatta onko kyseessä prokaryoottisolun, eukaryoottisolun tai viruksen, urasiili korvaa tyymiinin. RNA-virusten inaktivointi edellyttää silloitusta urasiilien välillä luomalla urasiilidimeerejä. Urasiilidimeerit voivat vahingoittaa RNA-virusten kapsidia (Kowalski, 2009). Miller ja Plageman (1947) osoittivat, että ultraviolettisäteily aiheutti Mengovirukseen urasiilidimeerien muodostumisen. Ne olivat ensisijainen syy viruksen inaktivaatioon. Enintään 9 % virus-DNA:n kaikista urasiiliemäksistä muodosti dimeerejä 10 minuutin kuluessa ultraviolettisäteilytyksestä. Tulokset osoittivat myös, että virus-RNA liittyi kovalenttisesti virusproteiiniin säteilytyksen seurauksena. Tämän lisäksi myös kapsidissa tapahtui tuhoa, jossa sen proteiineja muokattiin (Miller & Plagemann, 1974).

Bakteriofageja on käytetty arvioimaan UV-säteilyn tehoa viruspatogeeneihin, koska ne ovat vaarattomia ja mahdollistavat nopean ja taloudellisen seulonnan patogeenisille nisäkäsviruksille. Tämän lisäksi bakteriofagit voivat kasvaa korkeampaan konsentraatioon kuin nisäkäsvirukset. Bakteriofageista MS2 on ehdotettu riittäväksi indikaattoriksi sen koon, muodon ja nukleiinihappotyypin perusteella (Tseng & Li, 2005). Bakteriofagit ovat lisäksi muita patogeenisiä viruksia vastustuskykyisempiä UV-säteilylle (Tseng & Li, 2007).

## 4.2 DNA:n sekvenssin ja konformaation vaikutus

Emästen tarkat sekvenssit DNA:ssa vaikuttavat suoraan dimerisaation todennäköisyyteen. Vierekkäin olevat pyrimidiinit ovat huomattavasti fotoreaktiivisempia kuin vierekkäiset puriinit. Silloitusta voi esiintyä myös sytosiinissa, mutta siihen tarvittava energia on korkeampi kolmen sytosiini-guaaniini vetysidoksen takia. Adeniini-tyymiini sidoksessa on kaksi vetysidosta, joten tämän vuoksi tyymiinidimeerit ovat hallitsevia (Kowalski, 2009).

Molekyyliset suuntaukset voivat vaihdella DNA:n A ja B konformaatioiden tai muiden liikkeiden myötä. Keskimääräinen kiertokulma peräkkäisten emäsparien välillä vaihtelee konformaatioiden välillä muutaman asteen verran. Pienempi konformaatiovariaation määrä A-DNA:ssa selittää sen suuremman vastustuskyvyn syklobutaanipyrimidiinidimeerien muodostumiselle. Toisin sanoen tiheämpi emästen pakkaus ja alhaisempi joustavuus B-DNA:ssa varmistaa suuremman todennäköisyyden, että tyymiinit ovat käytettävissä dimerisaatiota varten. Veden läsnäolo DNA:n konformaatioissa vaikuttaa elektrostaattisten ja van der Waalsin voimien vuorovaikutukseen. B-konformaatio on täysin hydratoitunut ja A-konformaatiota pidetään yleisesti dehydratoituneena. A-DNA kutistuu pituudeltaan B-DNA:han verrattuna. Yleisesti mikrobeilla, jotka ovat vedessä tai korkeassa suhteellisessa kosteudessa (RH), on suurempi vastustuskyky UV-säteilyä vastaan. Mikrobien DNA:n rakenne muuttuu A:sta B:hen, kun kosteus lisääntyy ja on mahdollista, että veden läsnäolo lisää vastustuskykyä tai paranneltuja korjausmekanismeja. Konformaatiomuutos tapahtuu RH:n noustessa 55 %:sta 75 %:n. Alemmalla RH:lla, emäkset eivät ole pinottu toistensa päälle, vaan kulmittain kierteeseen nähden. RH:n muutos 75 % ja 100 % välillä ei osoita konformaatiomuutoksia, ja DNA:n oletetaan pysyvän B-DNA muodossa. Emäksillä on erilaiset affiniteetit veteen ja kykyyn vangita vesimolekyylejä. Puriinilla on kaksi hydraatiokohtaa isommassa ja pienemmässä DNA:n uurteessa, kun taas pyrimidiinillä on vain yksi kohta. Emästen yksittäiset hydraatiokohdat ovat samanlaiset. Konformaatioiden välillä ero on se, että B-DNA:ssa vettä löytyy molemmista uurteista yhtä paljon, kun taas A-DNA:ssa vettä on enemmän suuremmissa uurteissa (Kowalski, 2009).

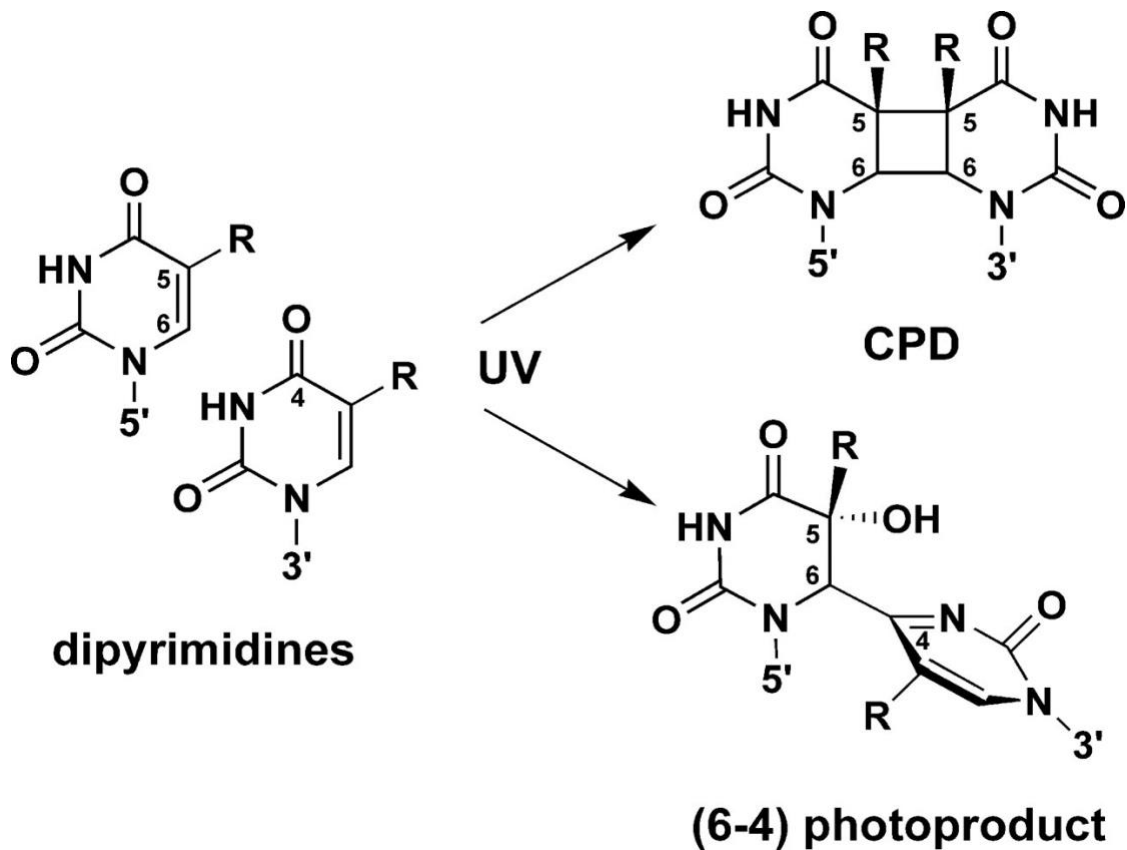
## 4.3 Syklobutaanipyrimidiinidimeerien muodostuminen

Suurimmat UV-säteilystä aiheutuvat vauriot DNA:ssa ovat syklobutaanipyrimidiinidimeerit (CPD) ja 6-4-pyrimidiinipyrimidonivalotuotteet (**Kuva 4**). UV-säteilytyksen jälkeen CPD:itä on enemmän ja ne aiheuttavat useimmat sytotoksiset vauriot, mutta 6-4PP:llä voi olla vakavampia, mahdollisesti tappavia mutageenisia vaikutuksia. UV-säteilyn kyky vahingoittaa

tiettyä emästä määräytyy DNA:n joustavuuden perusteella; emästen ominaisuuksilla on siis suuri rooli, sillä dimeeristen valotuotteiden jakautuminen riippuu DNA:n pyrimidiiniemäksistä. Vauriot muodostuvat suotuisimmin sekvenssin kohtiin, joissa taipuminen ja purkautuminen on helppoa. Esimerkiksi CPD:t muodostuvat useimmiten yksijuosteisessa DNA:ssa poly(dA)-(dT)-alueen joustavissa päissä, mutta eivät niiden jäykässä keskiosassa. CPD:n muodostuminen on epätodennäköisempää DNA:n pienemmissä urissa. TATA-alueeseen sitoutuva proteiini (TBP, TATA-box binding protein) on yksi transkriptiotekijöistä, jolla on suora vaikutus DNA-vaurioiden muodostumiseen ja korjaamiseen. TBP indusoi 6-4PP:n muodostumisen TATA-alueessa, jossa DNA on taipunut, mutta CPD:t muodostuu TATA-alueen reunoille ja alueen ulkopuolelle missä DNA ei ole taipunut. CPD:n vaikutuksia on tutkittu laajalti mikrobeilla ja nisäkkäillä, ja niiden on raportoitu estävän DNA-polymeraasien etenemistä. Nisäkkään RNA-polymeraasi II:n on raportoitu pysähtyvän CPD:n ja 6-4PP:n kohdalla. Jokainen CPD toimii esteenä transkriptiolle ja replikaatiolle. Korjaamattomana nämä DNA vauriot voivat johtaa geneettisen koodin väärinluentaan ja aiheuttaa mutaatioita sekä solukuolemaa (Sinha & Häder, 2002).

NMR tutkimukset ja sulamislämpötilan mittaukset ovat paljastaneet, että cis-syn stereoisomeeri – UV-säteilytyksessä DNA:ssa esiintyvä isomeeri – aiheuttaa erittäin lokalisoitunutta mutkan DNA-juosteeseen ja osoittaa myös epäsuhtaisen vetyjen sitoutumisen komplementaariseen juosteeseen, pääasiassa vaurion 5'-päissä. Vaikka pyrimidiinidimeerien vaikutukset DNA:han ovat melko hyvin ymmärrettävissä, niiden muodostumiseen johtuvasta tarkasta mekanismista ei ole tietoa. Kahden emäksen välistä reaktiota voidaan kuvata [2 + 2] -sykloadditiolla tai pyrimidiiniradikaalin välittämänä prosessina. [2 + 2] -sykloadditiot ovat yhteen sovitettuja reaktioita, jotka etenevät syklistä siirtymätilan kautta. Kaikki sidoksien rikkoutuminen ja muodostuminen tapahtuu samanaikaisesti, eikä välituotteita ole mukana. Pyrimidiinidimeerin muodostuessa [2 + 2] -sykloadditio johtaa kahden C5 – C6  $\pi$ -sidoksen muuttumiseen kahdeksi sidokseksi (C5 – C5 ja C6 – C6). Fotokemiallisessa [2 + 2] -sykloadditiossa kaksi alkeenia reagoivat keskenään muodostaen tuotteen, jossa on neljän hiilen muodostama rengas. Fotonin energia virittää yhden elektroneista, joka sijaitsee toisen alkeenin sitovalla  $\pi$ -orbitaalilla, korkeammalle energiatasolla sijaitsevalle hajottavalle  $\pi^*$ -orbitaalille. Näin alkeenit voivat reagoida ja muodostaa sykloadditiotuotteen. Reaktio tapahtuu Woodward-Hoffmannin sääntöjen mukaisesti. Yleisin pyrimidiinien muodostama dimeeri DNA:ssa on tymiinidimeeri. Tymiinidimeerit voivat muodostua epäsuorasti UV-säteilystä myös radikaaliadditioreaktioista.

Näiden reaktioiden kemia eroaa suuresti sykloadditiosta. Tyymiiniradikaalien tapauksessa ei ole C<sub>5</sub>=C<sub>6</sub> kaksoissidosta ja näin syntyy useampi lopputuote (Durbeej & Eriksson, 2002).



**Kuva 4 CPD:n ja 6-4-PP:n muodostuminen pyrimidiineistä.** Lähde: (Li, Uchida, Todo, & Kitagawa, 2006)

#### 4.4 DNA:n korjausmekanismit

Solut ovat kehittäneet useita korjaus- tai vastustuskykymekanismeja UV-säteilyä ja muita vaurioittavia tekijöitä vastaan. Valoreaktiointi fotolyaasientsyymien avulla on yksi tärkeimmistä ja useimmin esiintyvistä korjausmekanismeista eri organismeissa. Bakteerit ja DNA-virukset käyttävät valoreaktiointia, kun taas RNA-viruksilla tätä ei ole havaittu (Kowalski, 2009). Vaurio voidaan korjata myös emäksenpoistokorjauksella (BER, base excision repair) tai nukleotidinpoistokorjauksella (NER, nucleotide excision repair). Näillä on tärkeä rooli DNA:n korjaamisessa useissa organismeissa glykosylaasien ja polymeraasien avulla. Toisin kuin valoreaktiointi, valosta riippumattomat korjausreitit ovat paljon monimutkaisempia eivätkä suoranaisesti käänne DNA-vauriota vaan korvaavat vaurioituneen DNA:n uusilla vahingoittumattomilla emäksillä/nukleotideilla. Lisäksi mekanismit, kuten

mutageeninen korjaus tai dimeerien ohitus, rekombinaatiokorjaus, solusyklin tarkistuspisteet, apoptoosi ja vaihtoehtoiset korjausreitit ovat toiminnassa eri organismeissa (Sinha & Häder, 2002).

#### **4.4.1 Valoreaktiointi**

Valoreaktiointi on yksi yksinkertaisimmista ja vanhimmista korjausjärjestelmistä. Se koostuu yhdestä entsyymistä: fotolyaasista. Fotolyaasi sitoutuu spesifisesti CPD:iin tai 6-4PP:iin ja korjaa vauriot käyttämällä valon energiaa. CPD-fotolyaasia on raportoitu bakteereissa, sienissä, kasveissa, selkärangattomissa ja selkärangattomissa eliöissä. 6-4PP-fotolyaasia on löydetty *Drosophila*:ssa, silkkiäistoukissa, *Xenopus laevis*:ssa sekä kalkkarokäärmeissä. Fotolyaseja ei näytä olevat ihmisillä tai ne eivät ole toiminnassa. DNA fotolyaasit ovat monomeerisiä flaviinista riippuvaisia korjausentsyymejä, joiden molekyylipaino on 50-65 kDa. Kymmenestä kahteenkymmeneen entsyymiin uskotaan skannaavan perimää UV-vaurioiden varalta jokaisessa solun tumassa. Jokainen niistä sitoutuu tiukasti kohdattuun CPD:hen. DNA fotolyaaseilla on kaksi kromoforia. Toinen kromoforeista (joko 5,10-metenyyli-tetrahydrofolaatti tai 8-hydroksi-5-deatsariboflaviini, absorptiomaksimilla 380-440 nm) on valoa keräävä antenni, joka absorboi sinisen valon fotonin ja siirtää virityksen aktiiviseen kofaktoriin, joka on aina kaksi elektronia pelkistynyt flaviinadieniinidinukleotidi (FADH<sup>-</sup>). Virittyessään flaviini siirtää elektronin CPD:lle jolloin syklobutaanirengas halkeaa ja samalla elektroni siirtyy takaisin flaviinille tuottaen renkaasta kaksi emästä (Sinha & Häder, 2002). *E. coli* ja *A. nidulansin* kiderakenteet viittaavat siihen, että sitoutuessaan DNA:han entsyymit kääntävät pyrimidiinidimeerin ulos dupleksista reikään, joka sisältää katalyyttisen kofaktorin (Park, Kim, Sancar, & Deisenhofer, 1995). CPD fotolyaasit tunnistavat CPD:t selektiivisyydellä, joka on samanlainen kuin sekvenssispesifisten DNA:ta sitovien proteiinien. Tämä viittaa siihen, että ne voisivat kilpailla histonien kanssa DNA:n saatavuudesta samalla tavalla kuin transkriptiotekijät. Kun fotolyaasi on sitoutunut CPD:hen, valoreaktiointin hyötysuhde on erittäin korkea: jokaisesta absorboidusta fotonista yksi dimeeri halkaistaan (Sinha & Häder, 2002).

#### **4.4.2 Emäksenpoistokorjaus (BER)**

Emäksenpoistokorjaus on kehittynyt suojaamaan soluja hydrolyysin, reaktiivisten happilajien tai muiden solunsisäisten metaboliittien aiheuttamien DNA-vaurioiden varalta. BER on lisäksi tärkeä ionisoivan säteilyn ja voimakkaiden alkyloivien aineiden aiheuttamia vaurioita vastaan.

Näiden tuottamat vauriot ovat samankaltaisia kuin sisäisten tekijöiden aiheuttamat (Sinha & Häder, 2002).

Keskeiset BER:ään osallistuvat entsyymit ovat DNA-glykosylaasit, jotka poistavat erityyppiset modifioituneet tai vaurioituneet emäkset katkaisemalla N-glykosididoksen emäksen ja nukleotiditähteiden 2-deoksiriboosiosien välillä. Erilaiset glykosylaasit poistavat erilaiset vauriot ja korjausreitit spesifisyys määräytyy glykosylaasin tyyppin mukaan. Kun emäs on poistettu, apuriini/apyrimidiinikohta poistetaan AP-endonukleaasilla tai AP-lyyaasilla, joka kiinnittää vastaavasti DNA juosteen 5'- tai 3'-pään AP-kohtaan. Jäljelle jäävä deoksiriboosifosfaattitähde irrotetaan fosfodiesteriäasilla. Jäljelle jäävä aukko täytetään DNA-korjauspolymeraasilla ja juoste suljetaan DNA-ligaasilla. On ehdotettu, että korjausentsyymillä (pol $\beta$ ) olisi kyky irrottaa 5'-deoksiriboosifosfaattitähde, joka tuotetaan DNA-glykosylaasien ja AP-endonukleaasien vaikutuksesta (Sinha & Häder, 2002).

Useiden DNA-glykosylaasien lisäksi tietyt organismit sisältävät entsyymejä, jotka tunnetaan UV-endonukleaaseina, koska ne tuottavat juosteiden katkoksia pyrimidiinidimeerien kohdalla. UV-endonukleaasit pilkkovat dimeerin 5'-pyrimidiinin N-glykosididoksen, jota seuraa AP-lyyaasivälitteinen juosteen katkaisu. Näitä entsyymejä esiintyy normaalisti vain UV-säteilyn kestävässä organismeissa, kuten *Micrococcus luteus*:ssa (Sinha & Häder, 2002).

#### **4.4.3 Nukleotidinpoistokorjaus (NER)**

NER poistaa laajan alueen DNA:ta vääristäviä vaurioita, mukaan lukien CPD:t ja 6-4PP:t. Se on erittäin konservoitunut eukaryooteissa ja on läsnä useimmissa organismeissa. NER käyttää n. 30 geenin tuottamaa tuotetta poistamaan vauriota sisältävän oligonukleotidin DNA:sta. Vaikka NER ei ole välttämätön elinkelpoisuuden kannalta, puutteet korjausgeeneissä voivat johtaa ihmisillä geneettisiin häiriöihin. NER puutteellisilla yksilöillä on 1000 kertaa suurempi riski ihosyöpään verrattuna normaaleihin yksilöihin. NER jaetaan kahteen alatyypin: transkriptiokytketty korjaus (TC-NER) ja globaali genomikorjaus (GG-NER). TC-NER korjaa transkriptioituja juosteita aktiivisissa geeneissä ja GG-NER korjaa ei-transkriptioituja osia, sisältäen transkriptoitujen geenien transkriptiomattomat juosteet (Sinha & Häder, 2002).

Kuusi tekijää, jotka käsittävät 15-18 polypeptidiä, vaaditaan vaurioiden kaksoisleikkaukseen ja noin tusina polypeptidiä tarvitaan korjaussynteesivaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa XPC-hHR23B (Rad4-Rad23 kompleksi hiivassa) toimii vahingonilmaisimena, jotka sitoutuvat DNA vääristymiin ja aloittavat NER:n. Toisessa vaiheessa XPA (Rad14), RPA (Rfa) ja yleinen transkriptiotekijä TFIIH tulevat reaktioon muodostaen avoimen kompleksin. Tämän jälkeen

XPB:n (Rad25/Ss12) ja XPD:n (Rad3) DNA-helikaasiaktiivisuudet TFIIH:ssa auttavat purkamaan DNA:n. Seuraavassa vaiheessa vaaditaan nukleaasiaktiivisuutta. 3'-viillon suorittaa XPG (Rad2) ja 5'-viillon tekee XPF-ERCC1 (Rad1-Rad10). Viimeisessä vaiheessa aukko täytetään DNA-synteesillä (polymeraasi: pol $\delta$  tai  $\epsilon$  holoentsyymi) ja se suljetaan DNA-ligaasilla (LIG1) (Sinha & Häder, 2002).

#### 4.5 Mikrobien rakenteelliset puolustusmekanismit

Mikrobien rakenne on muodostunut siten, että ne voivat suojella itseään UV-säteilyä vastaan. Tällaisia rakenteita ovat mm. nukleokapsidi ja sytoplasma, joka voi sisältää UV-säteilyä absorboivia proteiineja. Viruksilla UV-säteilyä absorboituu vaippaan, nukleokapsidiin tai muihin proteiineihin. Bakteereilla sytoplasma voi tarjota suojausta UV-säteilyltä absorboivuutensa kautta. Sieni-itiöt ovat vastustuskykyisimpien mikrobien joukossa, niillä on usein melaniinia sisältäviä tummia pigmentoituneita konidioita. Suojana toimiva melaniini lisää sieni-itiöiden eloonjäämistä ja pitkäikäisyyttä (Kowalski, 2009).

Kromoforit ovat kemiallisia ryhmiä molekyyliissä, jotka kykenevät absorboimaan fotoneja. Näihin luetaan mm. aromaattiset ryhmät, hiili-happi kaksoissidos ja typpi-typpi kaksoissidos. Proteiineissa aminohapot nostavat absorptiohuippukohdan 280 nm, kun taas nukleiinihapoissa kromoforit, jotka ovat vastuussa 265 nm absorptiohuipusta ovat emäksiä; puriinit ja pyrimidiinit. Kromoforit, jotka antavat todennäköisesti suojan näille emäksille, ovat bakteerien sytoplasmassa tai soluseinässä, viruksen kapsidissa tai proteiinkerroksessa sekä itiöiden itiökerroksessa ja -kuoressa. Jotkin aminohapot ovat optisesti läpinäkyviä yli 240 nm aallonpituuksilla, kun taas toisilla kromoforeilla on korkeampi absorptiokyky lähellä 253,7 nm. Mikrobit, joilla on suurempi määrä kromoforeja absorboivat todennäköisemmin UV-säteilyä, joka muuten aiheuttaisi dimerisaatiota DNA:ssa (Kowalski, 2009).

Entsyymit ovat kemiallisten reaktioiden katalysaattoreita ja tämän takia niitä ei kuluteta normaaleissa biologisissa prosesseissa ja niitä on suhteellisen vähän. Tämän vuoksi, ne vaikuttavat vain vähän mikrobien suojaaviin vaikutuksiin. Entsyymien tuhoutuminen kuitenkin estää korjausprosesseja UV-altistuksen aikana tai sen jälkeen. Niiden inaktivaatio voi olla suurempaa muilla aallonpituuksilla kuin 253,7 nm ja laajemman aallonpituusalueen on raportoitu olevan tehokkaampaa eliminoimaan korjausentsyymejä, kuin kapeamman aallonpituuden (Kowalski, 2009).



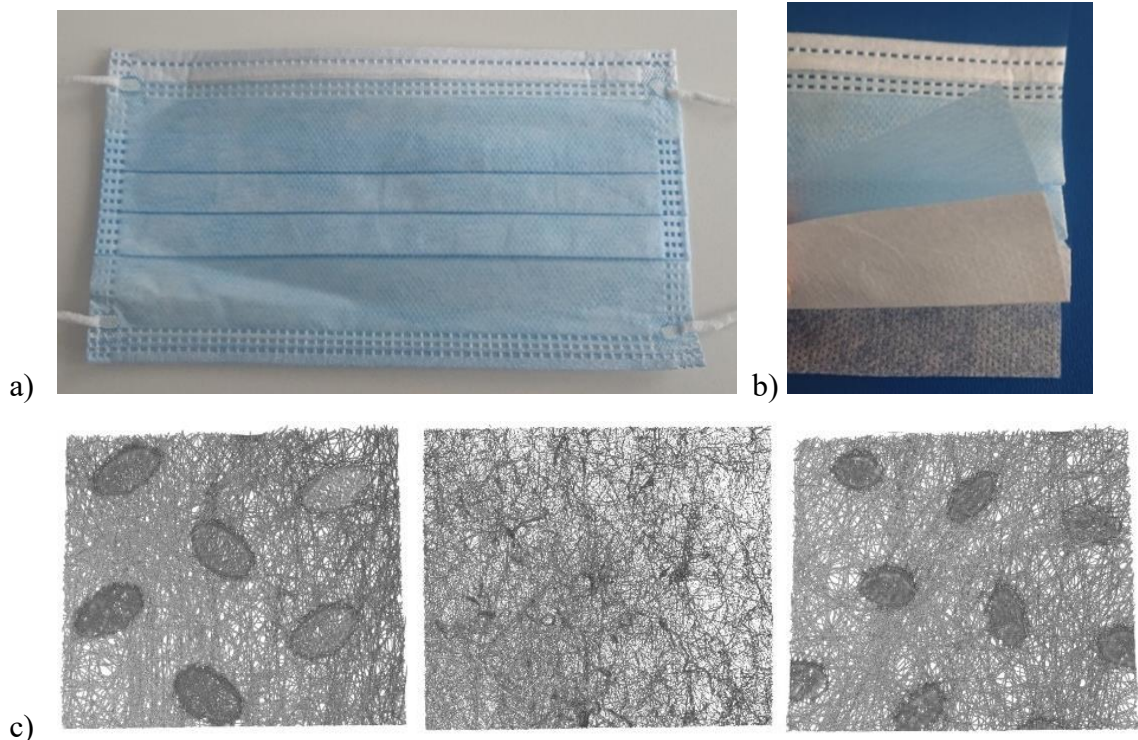
Mikrobien puolustusmekanismina toimii myös UV-säteilyn sironta mikrobin rakenteesta. UV-säteilyn sironta mikrobeista on ilmiö, jota havaitaan mittaamalla liuoksessa olevien mikrobien optinen tiheys absorptiospektrien saamiseksi. Sironta voi aiheuttaa häviötä säteilyn määrässä silloin, kun mikrobien mitat ovat verrattavissa UV-säteilyn aallonpituuksiin. Sironnan vaikutus vähenee, kun mikrobin taitekerroin lähestyy väliaineen (ilma, vesi tms.) taitekerrointa. Sironnan vaikutus kuitenkin lisääntyy, kun halkaisijan funktio lähestyy UV-säteilyn aallonpituutta. Mie-sironta on vallitseva sironnan muoto virusten ja bakteerien suhteen. Sillä voi olla suuri vaikutus UV-säteilyn määrään, joka todellisesti saavuttaa mikrobin. Sironnan vaikutus ei ole riippuvainen nukleokapsidin tai soluseinän proteiinipitoisuudesta. UV-säteily, joka ei imeydy mikrobiin voi siroutua virusten ja bakteerien kokoalueella (0,02-20  $\mu\text{m}$ ) kolmella eri mekanismilla: 1) fotonien heijastuminen hiukkasesta 2) imeytymättömien fotonien taittuminen hiukkasesta ja 3) hiukkasten läpi tai läheltä kulkevien fotonien diffraktio. Diffraktio voi muuttaa fotonien suuntaa, vaikka ne eivät menisi suoraan hiukkasten läpi (Kowalski, 2009).

#### **4.6 Vaadittava UV-säteilyn määrä**

CDC (Centers of Disease Control and Prevention) on suositellut maskien desinfiointiin käytettäväksi annokseksi  $1 \text{ J/cm}^2$  ja mahdollisesti useampia desinfiointikertoja. Tämä suositeltu annos on kohtalaisen suuri ja esimerkiksi koronavirusta on inaktivoitu vedessä paljon pienemmillä annoksilla (Zhao et al., 2020). On lisäksi suositeltu, että kyseinen annos tulisi antaa molemmille puolille maskia, mikä takaisi maskin molemminpuolisen desinfioinnin (Derraik, Anderson, Connelly, & Anderson, 2020). Tarvittavan annoksen määrä kuitenkin riippuu todella laajalti mikrobin tyypistä, UV-lampun tehosta ja aallonpituudesta, desinfioitavan esineen asennosta ja etäisyydestä, ajasta, tilan suhteellisesta kosteudesta sekä desinfioitavan pinnan koostumuksesta. Edellä mainittua annosta voidaan siis käyttää teoriana desinfioimiselle, mutta käytännössä on monta muuttujaa, jotka täytyy ottaa huomioon. Esimerkiksi  $1 \text{ J/cm}^2$  annoksen saavuttaminen viidessä minuutissa vaatii  $3 \text{ mW/cm}^2$  intensiteetin desinfioitavalle pinnalle. Intensiteetin kasvaessa desinfiointi on mahdollista suorittaa lyhyemmällä ajalla. Mikrobien tuhoutumista voidaan kuvata UV-nopeusvakioilla, joiden avulla voidaan laskea niiden inaktivoimiseen tarvittava aika. Mikrobien tuhoutumisen määrä ja desinfioinnin tehokkuus ilmaistaan logaritmisesti. Log-1 vähennys vastaa 90 % mikrobien tuhoutumista ja vastaavasti log-6 vähennys 99,9999 % tuhoutumista.

## 5. UV-valon absorboituminen materiaaleissa

Ultraviolettisäteilyn kykyä inaktivoida tartuttavia hiukkasia kuituverkostoissa, kuten kasvomaskeissa on tutkittu varsin vähän. Ultraviolettisäteilyn tehokkuuteen puhdistusmenetelmänä vaikuttavat useat parametrit, mukaan lukien saastuneen pinnan topografia ja mikrobien sijainti substraatissa. Ultraviolettisäteilyä on käytetty pääasiassa koville, huokosettomille alustoille. Näille mikrobikontaminaatio kerrostuu pinnan ulkopuolelle, jolloin mikrobien dekontaminaation on osoitettu olevan erittäin tehokas. Epäsäännöllisiä ja huokoisia pintoja pidetään ongelmallisena ultraviolettisäteilyn tunkeutumisen puutteen vuoksi. UV-säteily ei tunkeudu helposti kiinteisiin pintoihin, koska substraattimateriaali absorboi tai heijastaa valoa. Dekontaminaation tehokkuus heikkenee, jos UV-säteily ei pääse tehokkaasti tunkeutumaan suojattuihin alueisiin. UV-säteilyn läpäisy materiaalissa on mahdollista huokoisten pintojen, kuten tekstiilien pienien rakojen ja kuitujen kautta (Fisher & Shaffer, 2011). Kuvassa 5 esitetty kaupallisen kasvomaskin rakennetta.



**Kuva 5 Kaupallisen kasvomaskin (Suavel® Protec – Meditrade) rakenne.** Maskin rakenne (a), maskin kerrokset eroteltuna (b) ja röntgenmikrotomografiakuvat kasvomaskin eri kerroksista, vasemmalta oikealle: sininen kerros, keskikerros ja valkoinen kerros (c). Lähde: (H. Kiiskinen et al., 2020)

## 5.1 UV-säteilyä aktivoivia ja inaktivoivia tekijöitä

UV-säteilyn desinfiointitehoa voidaan parantaa erilaisilla katalyyteillä ja toisaalta teho voi heikentyä erilaisten syiden, kuten lian vuoksi. Titaanidioksidi ( $\text{TiO}_2$ ) on myrkytön, ympäristöystävällinen ja halpa yhdiste, joka voi toimia valokatalysaattorina. Sillä on kolme kristallirakennetta: anataasi, rutiili ja brookiitti, joista anataasilla on korkein fotoaktiivisuus ja sitä voidaan käyttää toistuvasti ilman merkittävää katalyyttisen aktiivisuuden menetystä. UV-avusteinen  $\text{TiO}_2$ -fotokatalyyysi (TUV) on tekniikka, joka on osoittautunut inaktivoivan tehokkaasti patogeenejä. Tämän tekniikan perustoimintaperiaate on reaktiivisten happilajien (ROS) fotokatalyyttinen tuotanto, joka edistää pelkistysreaktioita titaanidioksidipinnalle absorboituneiden mikrobien kanssa. Tutkimukset ovat vahvistaneet, että vakavia soluvaurioita, mukaan lukien sytoplasmisen membraanin, superkierteisen plasmidi-DNA:n, genomisen DNA:n ja sisäisten organellien tuhoutuminen tapahtui, kun mikrobit altistettiin TUV:lle (Ramesh, Nayak, Amirbahman, Tripp, & Mukhopadhyay, 2016).

Kupari (Cu) on alkuaine, joka kuuluu metalleihin. Kuparin on osoitettu toimivan valokatalysaattorina. Valon aiheuttama elektroninsiirto ( $\text{Cu I} \rightarrow \text{Cu II}$ ), hapettava additio ( $\text{Cu I} \rightarrow \text{Cu III}$ ) tai kuparialkeeni- tai alkyyniyhdisteiden aktivaatio tarjoavat mahdollisuuksia orgaanisille synteeseille, joihin luetaan mukaan  $[2 + 2]$ -sykloadditio (Paria & Reiser, 2014).

Lika voi tarjota mikrobeille suojaa UV-säteilyä vastaan ja vaikeuttaa desinfiointia. Esimerkiksi erilaiset meikkituotteet ja aurinkorasva toimivat fyysisenä esteenä UV-säteilylle. Desinfiointaessa tämä on otettava huomioon, sillä lika muuttaa huomattavasti desinfiointiin tarvittavaa aikaa. Tämän vuoksi, kun maskeja desinfioidaan UV-säteilyllä, ei suositella käytettäväksi kosmetiikkaa, joka voisi kerääntyä maskin pinnalle ja vaikeuttaa prosessia (Schnell et al., 2020).

## 5.2 UV-säteilyn eteneminen kuituverkostoissa ja kankaissa

Kasvomaskeihin kohdistettu UVC-säteily absorboituu tai heijastuu monikerroksisen substraatin kuiduilla muiden tekstiilien tapaan. UVC-säteilyn läpäisykyky maskin kerrosten läpi tapahtuu suurelta osin materiaalikuitujen välisten aukkojen ja huokosten kautta. Monikerroksisessa N95 maskissa sisä- ja ulkokerrosten materiaalit ovat huokoisempia kuin välissä oleva suodattava kerros. Tämä on nähtävissä ilmavirran läpäisyn laskussa aerosolin tunkeutumistestissä. Sisä- ja ulkokerrokset mahdollistavat UVC-säteilyn pääsyn suodattavaan kerrokseen. UV-säteilyn heijastuminen ja absorptio riippuvat myös muista

tekstiiliominaisuuksista esimerkiksi painosta, paksuudesta, kuitujen kemiallisesta koostumuksesta ja väriaineista (Fisher & Shaffer, 2011).

Kankaan kuitukoostumus vaikuttaa UV-säteilyn absorptioon. Polyesteri estää UV-säteilyn läpäisyn tehokkaasti, sillä se sisältää fenyyliesteriryhmiä, joiden tiedetään osoittavan voimakasta absorptiota alle 310 nm. Synteettiset kuidut kuten nailon, akryyli ja polypropeeni estävät vain vähän UV-säteilyä, ellei niitä ole käsitelty tai värjätty. Kankaan paino, tiheys ja väri vaikuttavat myös UV-säteilyn läpäisyyn. Mitä painavampi, tiheämpi ja tummempi kangas sitä vähemmän UV-säteilyä pääsee kankaasta läpi. Puuvilla absorboi huomattavasti UV-säteilyä silloin, kun se on valkaistu. Värjäyksen tiedetään lisäävän kankaan absorptiokykyä varsinkin tummilla väreillä. Titaanidioksidiä käytetään vähentämään synteettisten kuitukankaiden kiiltoa. Synteettiset kuidut kuten nailon, ovat normaalisti erittäin kiiltäviä ja läpinäkyviä puristettaessa. Jauhetun titaanidioksidin lisääminen aiheuttaa kuitujen pinnan muuttumisen karkeammaksi, samalla vähentäen sen kiiltoa ja läpinäkyvyyttä. Titaanidioksidi kankaissa lisää UV-säteilyn absorptiota, se absorboi noin 90 % säteilystä alueelta 280-380 nm (Kerr, Capjack, & Fedosejevs, 2000).

Muutoksia kuitukankaan rakenteessa voidaan tutkia reflektanssi-infrapunaspektrosopian (ATR-FTIR) avulla. Kaczmarek *et. al* (2004) osoittivat, että 10 tunnin aikana selluloosan ATR-spektreissä ei havaittu mitään muutoksia, sillä selluloosassa ei ole ryhmiä, jotka absorboivat UVC-säteilyä. Selluloosan mahdollinen hajoaminen voi siis johtua epäpuhtauksista. Polypropeenilla on havaittu pieniä pintamuutoksia 10 tunnin säteilytyksessä. Kaupallinen polypropeeni sisältää pienen määrän tyydyttämättömiä karbonyylejä, joiden virityksellä, pilkkomisella ja vapaiden radikaalien muodostumisella on rooli muutoksissa (Kaczmarek, Ołdak, Malanowski, & Chaberska, 2005).

### **5.3 Veden, ilman ja pintojen desinfiointi**

Veden desinfiointiin tarkoitettut UV-järjestelmät eroavat ilman ja pintojen järjestelmistä. UV-säteet vaimentuvat vedessä, joten tällä järjestelmällä ei ole yhtäläisyyksiä ilman desinfiointiin. UV-säteilyn vaimennus vedessä tapahtuu noin 15 cm sisällä, mikä edellyttää käytettävältä järjestelmältä suurempaa tehoa ja lähekkäin asetettuja UV-lamppuja. Veden desinfiointiin tarvittavat UV-annosten arviot ovat kymmenen kertaa suurempia kuin ilman desinfiointiin tarvittavat. Lisäksi vedestä löytyvät mikrobit eroavat huomattavasti ilmasta löytyvistä. Vaikka ilmassa oleva UV-säteilyannos on yksinkertainen ilmapirran ja altistusajan funktio, ilmassa olevien mikrobien alttius on monimutkainen suhteellisen kosteuden ja lajien vaihtelevuuden

takia. Usein on ajateltu, että 100 % RH vastaisi mikrobien herkkyyttä vedessä, mutta tämä on osoittautunut liian yksinkertaiseksi ajattelutavaksi (Kowalski, 2009).

Pintojen desinfiointijärjestelmän suunnittelulla ja toiminnalla on enemmän yhteistä ilman desinfioinnin kanssa kuin vesijärjestelmillä. Ilmassa olevat mikrobit ovat yleensä lähteenä saastuneille pinnoille ja aiheuttavat niissä kontaminaatiota. Yksi tärkeimmistä eroista ilman ja pintojen desinfioinnin välillä on se, että UV-nopeusvakiot eroavat näiden kahden välillä. Mikrobit ovat siis alttiimpia ilmassa, kun taas pintojen mikrobeilla näyttää olevan tietty luontainen suoja pinnan rakenteesta riippuen (Kowalski, 2009).

## Kirjallisuusviitteet

- Construction Specifications Institute. (2018). Understanding the Basics of UV-C: What are the benefits for commercial HVAC/R applications? Retrieved 21 April 2021, from <https://www.constructionspecifier.com/wp-content/uploads/2018/06/Figure-1.jpg>
- Derraik, J. G. B., Anderson, W. A., Connelly, E. A., & Anderson, Y. C. (2020). Rapid evidence summary on SARS-CoV-2 survivorship and disinfection, and a reusable PPE protocol using a double-hit process. *MedRxiv*. Retrieved from <https://doi.org/10.1101/2020.04.02.20051409>
- Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)
- Downes, A., & Blunt, T. P. (1877). The Influence of Light upon the Development of Bacteria 1. *Nature*. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/016218a0>
- Durbeej, B., & Eriksson, L. A. (2002). Reaction mechanism of thymine dimer formation in DNA induced by UV light. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(02\)00180-6](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(02)00180-6)
- Engelsen, O. (2010). The relationship between ultraviolet radiation exposure and vitamin D status. *Nutrients*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/nu2050482>
- Fisher, E. M., & Shaffer, R. E. (2011). A method to determine the available UV-C dose for the decontamination of filtering facepiece respirators. *Journal of Applied Microbiology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04881.x>
- Fiedl, R. R. (2001). The chemistry and physics of stratospheric ozone. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/01eo00293>
- Kaczmarek, H., Ołdak, D., Malanowski, P., & Chaberska, H. (2005). Effect of short wavelength UV-irradiation on ageing of polypropylene/ cellulose compositions. *Polymer Degradation and Stability*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.04.017>
- Kerr, N., Capjack, L., & Fedosejevs, R. (2000). Ability of textile covers to protect artifacts from ultraviolet radiation. *Journal of the American Institute for Conservation*. Retrieved from <https://doi.org/10.1179/019713600806113220>
- Kiiskinen, H., Lehmonen, J., Seppänen, T., Rantanen, T., Turpeinen, T., Viitala, J., ... Jetsu,

- P. (2020). VTT unpublished, (VTT tutkimusraportti: VTT-R-00969-20).
- Kiiskinen, T. (2021). *VTT unpublished*.
- Konda, A., Prakash, A., Moss, G. A., Schmoldt, M., Grant, G. D., & Guha, S. (2020). Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks. *ACS Nano*. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03252>
- Koren, H. S., Devlin, R. B., Graham, D. E., Mann, R., McGee, M. P., Horstman, D. H., ... Bromberg, P. A. (1989). Ozone-induced inflammation in the lower airways of human subjects. *American Review of Respiratory Disease*. Retrieved from <https://doi.org/10.1164/ajrccm/139.2.407>
- Kowalski, W. (2009). *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook: UVGI for Air and Surface Disinfection*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
- Li, J., Uchida, T., Todo, T., & Kitagawa, T. (2006). Similarities and differences between cyclobutane pyrimidine dimer photolyase and (6-4) photolyase as revealed by resonance raman spectroscopy: Electron transfer from the FAD cofactor to ultraviolet-damaged DNA. *Journal of Biological Chemistry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1074/jbc.M604483200>
- Lindsley, W. G., Martin, S. B., Thewlis, R. E., Sarkisian, K., Nwoko, J. O., Mead, K. R., & Noti, J. D. (2015). Effects of Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) on N95 Respirator Filtration Performance and Structural Integrity. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1018518>
- Ling, S. J., Sanny, J., & Moebs, W. (2018). *University Physics Volume 1*.
- Miller, R. L., & Plagemann, P. G. W. (1974). Effect of Ultraviolet Light on Mengovirus: Formation of Uracil Dimers, Instability and Degradation of Capsid, and Covalent Linkage of Protein to Viral RNA. *Journal of Virology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1128/jvi.13.3.729-739.1974>
- Padmanabhan, T. (2012). Basics of Electromagnetic Radiation. In *Theoretical Astrophysics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/cbo9781139171083.005>
- Paria, S., & Reiser, O. (2014). Copper in photocatalysis. *ChemCatChem*. Retrieved from

<https://doi.org/10.1002/cctc.201402237>

Park, H. W., Kim, S. T., Sancar, A., & Deisenhofer, J. (1995). Crystal structure of DNA photolyase from *Escherichia coli*. *Science*. Retrieved from <https://doi.org/10.1126/science.7604260>

Ramesh, T., Nayak, B., Amirbahman, A., Tripp, C. P., & Mukhopadhyay, S. (2016). Application of ultraviolet light assisted titanium dioxide photocatalysis for food safety: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.015>

Reed, N. G. (2010). The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Reports*. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/003335491012500105>

Saarelma, O. (2020). Silmävammat. *Lääkärikirja Duodecim*. Retrieved from <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00329>

Sataloff, R. T., Johns, M. M., & Kost, K. M. (2013). *Biology*.

Schnell, E., Harriff, M. J., Yates, J. E., Karamooz, E., Pfeiffer, C. D., McCarthy, J. F., ... Smith, S. M. (2020). Homegrown Ultraviolet Germicidal Irradiation for Hospital-Based N95 Decontamination during the COVID-19 Pandemic. *MedRxiv*. Retrieved from <https://doi.org/10.1101/2020.04.29.20085456>

Seppänen, M. (2018a). Kaihi (harmaakaihi, katarakta). Retrieved 25 March 2021, from <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00921>

Seppänen, M. (2018b). Silmän siipikalvo (pterygium). Retrieved 25 March 2021, from <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00999>

Seppänen, M. (2018c). Silmänpohjan ikärappeuma (makuladegeneraatio). Retrieved 25 March 2021, from <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk00922>

Sinha, R. P., & Häder, D. P. (2002). UV-induced DNA damage and repair: A review. *Photochemical and Photobiological Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.1039/b201230h>

Snustad, P., & Simmons, M. J. (2012). *Principles of Genetics* (Sixth Edit).

Song, L., Li, W., He, J., Li, L., Li, T., Gu, D., & Tang, H. (2020). Development of a Pulsed Xenon Ultraviolet Disinfection Device for Real-Time Air Disinfection in Ambulances.



- Journal of Healthcare Engineering*. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2020/6053065>
- Tseng, C. C., & Li, C. S. (2005). Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Science and Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/02786820500428575>
- Tseng, C. C., & Li, C. S. (2007). Inactivation of viruses on surfaces by ultraviolet germicidal irradiation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15459620701329012>
- Wagner, E. K., Hewlett, M. J., Bloom, D. C., & Camerini, D. (2007). *Basic Virology* (Third Edit).
- World Health Organization. (2017). Radiation: The known health effects of ultraviolet radiation. Retrieved 25 March 2021, from <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-the-known-health-effects-of-ultraviolet-radiation>
- Zhao, Z., Zhang, Z., Lanzarini-Lopes, M., Sinha, S., Rho, H., Herckes, P., & Westerhoff, P. (2020). Germicidal Ultraviolet Light Does Not Damage or Impede Performance of N95 Masks upon Multiple Uses. *Environmental Science and Technology Letters*. Retrieved from <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00416>
- Zoschke, K., Börnick, H., & Worch, E. (2014). Vacuum-UV radiation at 185nm in water treatment - A review. *Water Research*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.12.034>