

UV-dekontaminaation Fysikaaliset Mekanismit

Pro Gradu
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
LuK Santeri Susi
Tarkastajat:
Prof. Edwin Kukk
FT Sari Granroth

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Susi, Santeri UV-dekontaminaation Fysikaaliset Mekanismit

Pro Gradu, 44 s.

Fysiikka

Huhtikuu 2025

Ultraviolettisäteilyä käytetään laajalti ultravioletti-dekontaminaatiossa mm. terveydenhuollon laitoksissa, vedenpuhdistamoissa ja elintarviketeollisuudessa. Desinfiointin kohteita ovat mm. huoneilma, juomavesi sekä erilaiset pinnat, kuten tasset ja esineet. Ultravioletti-dekontaminaatiolaitteita ovat mm. seinäkiinnitteiset ilmanpuhdistimet, ultravioletti-reaktorit, -desinfiointikaapit, -pöytälamput ja -sauvat. Erilaisia ultraviolettisäteilyn tuottotapoja on lukuisia, joista käsitellään ksenonkaarilamppu, eksimeerilamppu, ultravioletti-LED ja elohopeahöyrylamput. Saman lampputyypin lamput eroavat vain vähän toisistaan, mutta eri lampputyypit eroavat keskenään huomattavasti. Eri lampputyypien erityispiirteitä sekä tyyppilliset säteilyn spektrit esitellään.

UV-säteilyn ominaisuuksista käsitellään heijastuminen, aineen läpäisykyky sekä absorboituminen mikrobiin. On vain muutamia materiaaleja, kuten alumiini, joista ultraviolettisäteily heijastuu hyvin, sekä materiaaleja, kuten kvartsilasi, jotka päästävät ultraviolettisäteilyä hyvin lävitseen. Mikrobit absorboivat hyvin ultraviolettisäteilyn eri aallonpituusalueita, ja näistä parhaiten aallonpituuksia 253–270 nm. Mikrobissa fotonin absorboituminen aiheuttaa vaurioita pääasiassa mikrobien pintarakenteiden proteiineissa ja DNA:ssa. Vauriot ovat pääasiassa DNA:n muutoksia, joissa kaksi peräkkäistä pyrimidiiniä liittyvät yhteen kovalenttisilla sidoksilla. Yleisin valoreaktiotuote on syklobutaani-pyrimidiini-dimeeri, jonka korjaaminen on hidasta. Vaurio DNA:ssa estää mikrobin sisäisiä toimintoja, mikä voi johtaa mikrobin inaktivoitumiseen ja kuolemaan.

Asiasanat: ultraviolettisäteily, UV-säteily, UV-dekontaminaatio, mikrobi, valokemia, mekanismit

Sisällys

Johdanto	1
1 UV-dekontaminaatio	3
1.1 UV-säteilyn käyttö dekontaminaatiossa	4
2 UV-säteily luonnossa ja ihmisen tuottamana	6
2.1 UV-säteilyn aallonpituusalueet	7
2.2 UV-säteilyn tuottotavat	8
2.2.1 Ksenon-kaarilamppu	8
2.2.2 Eksimeerilamppu	10
2.2.3 UV-LED	11
2.2.4 Elohopeahöyrylamppu	11
3 UV-säteilyn vaikutus aineisiin ja eliöihin	14
3.1 Säteilyn intensiteetti	14
3.2 Heijastuminen	15
3.3 Läpäisykyky	16
3.4 Absorptio mikrobissa	18
3.5 Vaurio mikrobissa	19
3.6 DNA:n rakenne	21
3.7 DNA-vaurio	24
3.8 Mikrobien korjausmekanismit	27
4 Tutkimustuloksia eri UV-aallonpituuksilla	31
4.1 VUV 172–193 nm	31
4.2 GUV 207–250 nm	31
4.3 GUV 254–280 nm	33
4.4 UVB 281–313 nm	34

4.5	UVA 320–365 nm	34
5	Sovellusten haasteita	36
6	Yhteenveto	38

Johdanto

Ultraviolettisäteilyn (UV-säteily) ominaisuuksia on tutkittu laajalti 1900-luvulta lähtien ja sen vaikutus materiaaleihin on valokemian tutkituin aihe [1]. UV-säteilyn hyödyntämistä nimenomaan mikrobien (bakteerit, virukset, alkueläimet, yksisoluiset levät ja sienet) puhdistamiseen mm. juomavedestä ja huoneilmasta on vuosien varrella tehty useita tutkimuksia, jotka ovat johtaneet myös käytännön sovelluksiin; lähestyttäessä 2000-luvun vaihdetta UV-säteilylaitteita käytettiin jo laajalti mm. vedenpuhdistamoissa [2–4]. Samalla esimerkiksi lääketieteen kehittyminen lisäsi kiinnostusta UV-säteilyn hyödyntämiseen mm. käytettyjen sairaanhoitovälineiden ja sisäilman desinfioinnissa [5, 6]. Vuoteen 2020 mennessä UV-säteilyn tuottotapoja, kuten UV-LED, oli kehitetty merkittävästi: sekä kehitetty vanhaa että luotu uutta [7]. Vuosina 2020–2023 SARS-CoV-2-pandemian aikana kiinnostus erilaisiin UV-säteilyä hyödyntäviin dekontaminaatiolaitteisiin kasvoi huomattavasti, kun desinfiointiprosessia täytyi tehostaa, tarvittiin uusia tapoja dekontaminoida sairaanhoitovälineitä sekä ehkäistä mikrobien leviämistä ilmassa [7–9]. Tällä hetkellä, vuonna 2025, UV-säteilyä käytetään yleisesti terveydenhuollon laitoksissa, vedenpuhdistamoissa ja elintarviketeollisuudessa sen kätevyuden ja hyötyjen vuoksi: UV-säteily tuhoaa tehokkaasti laajan valikoiman mikrobeja, UV-desinfiointi on tietyissä tilanteissa huomattavasti nopeampaa kuin muut menetelmät, UV-säteilylaitteiden ei tarvitse olla kontaktissa dekontaminoinnin kohteen kanssa, laitteiden käyttö ei vaadi erityistä koulutusta ja automatisoinnin ansiosta dekontaminaatio on tasalaatuista ja käyttäjästä riippumatonta, eivätkä UV-säteilylaitteet tuota jätettä [9].

UV-dekontaminaatio aiheena itsessään on moniulotteinen, mikä tekee aiheen tutkimusten vertailusta haastavaa. Tutkimuksissa on paljon muuttuvia tekijöitä, minkä lisäksi tiettyjä vertailun kannalta kriittisiä yksityiskohtia ei välttämättä mainita [10]. Toisinaan vertailukelpoiset tutkimukset päätyvät myös toistensa kanssa ristiriitaisiin lopputuloksiin. Tällaisia tekijöitä, jotka vaikeuttavat tutkimusten vertailua toisiinsa,

ovat muun muassa: UV-säteilyn tuottotapa (esim. käytetty lamppu tai lampputyyp-
pi), käytetty aallonpituusalue, säteilyn intensiteetti, etäisyys, säteilytyksen kohde
sekä desinfiointin taso [8, 10–12]. Tämä ei sinällään ole yllättävää, sillä vaikka tarve
standardisoidulle tavalle mitata laitteiden tehokkuutta ilmeni jo 2000-luvun alku-
puolella, ei sellaista vaikuttaisi vieläkään olevan [4, 13]. Eivätkä kaupallisessa mark-
kinoinnissa esiintyvät valheelliset ja liioitellut väitteet UV-desinfiointilaitteiden ky-
vyistä myöskään auta asiaa [14].

Fysikaalisten ilmiöiden ymmärtäminen on tärkeää, jotta voi tehdä informoitu-
ja päätöksiä UV-desinfiointilaitteita valitessa, koska yleistä mittausstandardia ei ole
ja tutkimusten vertailu on haastavaa. Ilmiöiden tuntemus edesauttaa myös aiheen
kirjallisuuden ymmärtämistä, mikä tekee tästä työstä hyvän lähtökohdan aiheesta
kiinnostuneille. Tämän työn tavoitteena onkin antaa hyvä yleiskuva fysikaalisista
mekanismeista UV-dekontaminaation taustalla, UV-dekontaminaation eri sovelluk-
sista sekä haasteista aiheen tutkimisen kannalta.

1 UV-dekontaminaatio

Aloitetaan selventämällä ensin dekontaminaation käsitteitä. Tässä työssä sanalla dekontaminaatio tarkoitetaan prosessia, jonka tarkoituksena on vähentää lisääntymiskykyisten mikrobien, kuten bakteerien ja virusten, lukumäärää [15]. Käytännössä dekontaminaatio siis johtaa joko mikrobin, kuten bakteerin, kuolemaan tai sen eloonjäämiseen lisääntymiskyvyttömänä (mikrobi on tehty tehottomaksi eli inaktivoitu). Oleellista dekontaminaation kannalta on, että mikrobit eivät pysty infektoimaan eli lisääntymään ihmisen elimistössä ja ovat näin vaarattomia ihmiselle [15]. Tässä työssä dekontaminaatio käsitteenä kattaa tutkimustarkoituksessa tehtyjen soluviljelmien käsittelyn sekä kaasun, nesteen tai esineiden pinnan puhdistamisen.

Lääketieteessä sterilointi tarkoittaa, että kaikki lisääntymiskykyiset mikrobit ja itiöt (itiöt ovat joidenkin eliöiden, kuten eräiden bakteerien, tuottama lisääntymisrakenne, jolla on suuri vastustuskyky ulkoisia tekijöitä vastaan) joko kuolevat tai inaktivoituvat [16, 17]. Desinfiointi taas tarkoittaa, että lisääntymiskykyiset mikrobit kuolevat tai inaktivoituvat, mutta itiöt eivät [17]. Todellisuudessa steriloinnissa ja desinfioinnissa ei voida varmaksi sanoa, että dekontaminaatio on täydellistä ja merkittävää onkin, että infektoivien mikrobien määrä pienenee riittävästi. Sitä, kuinka paljon infektoivien mikrobien määrä pienentyi dekontaminaatiossa, voidaan kutsua vapaasti käännettynä logaritmiseksi vähentymiseksi. Matemaattisesti logaritminen vähentyminen saadaan kaavalla

$$R = \log_{10}A - \log_{10}B = \log_{10}\left(\frac{A}{B}\right), \quad (1)$$

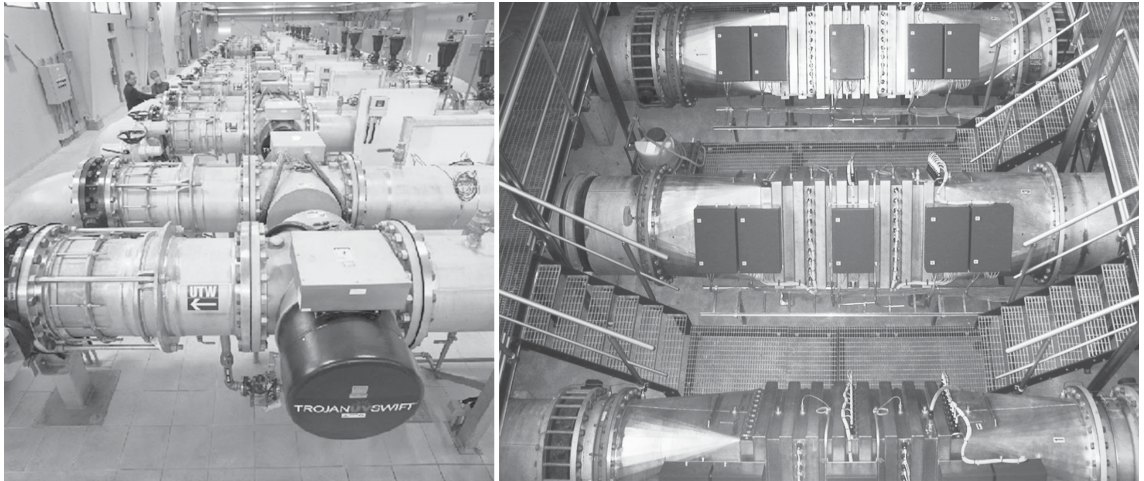
missä R on logaritmissen vähentymisen arvo, A on infektoivien mikrobien määrä ennen dekontaminaatiota ja B on infektoivien mikrobien määrä dekontaminaation jälkeen. Logaritmissen vähentymisen arvo siis kuvaa, kuinka paljon infektoivien mikrobien määrä on pienentynyt; mitä suurempi arvo on, sitä vähemmän on infektoivia mikrobeja dekontaminaation jälkeen. Steriloinnissa määrä pienenee vähintään miljoonasosaan eli $R \geq 6$. Kirjallisuudessa tämä ilmaistaan usein käyttämällä termiä

”log-6”. Vastaavasti desinfiointissa arvo on ”log-3”, eli infektoivien mikrobin määrä vähenee vähintään tuhannesosaan.[17]

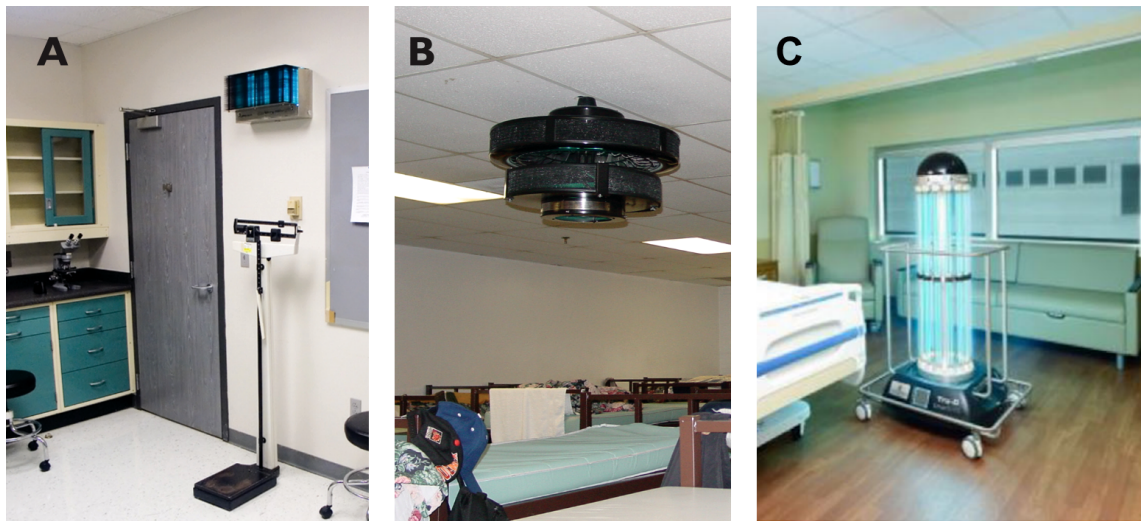
Dekontaminaatiomenetelmiä on lukuisia, ja eri menetelmien mikrobeja tuhoavat vaikutukset perustuvat erilaisiin fysikaalisiin ja kemiallisiin mekanismeihin [18]. Yksi menetelmistä on UV-dekontaminaatio, joka hyödyntää nimensä mukaisesti UV-säteilyä. UV-säteilyn vaikutuksia eliöille onkin tutkittu paljon, ja sen eri aallonpituuksilla tiedetään olevan merkittäviä dekontaminoivia vaikutuksia [19–21].

1.1 UV-säteilyn käyttö dekontaminaatiossa

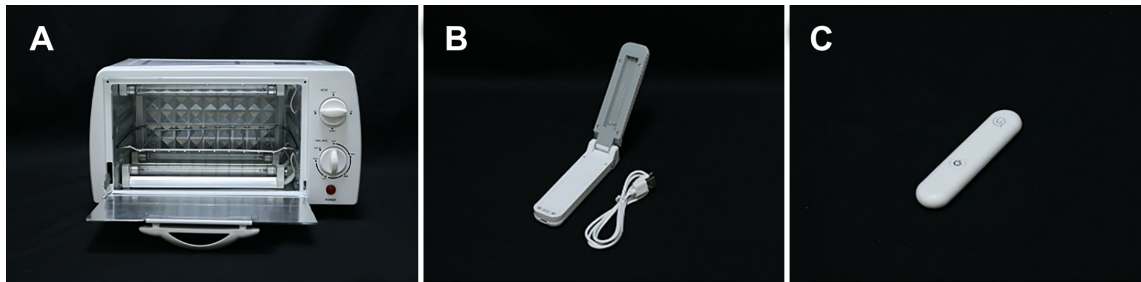
UV-säteilyä on käytetty laajalti vedenpuhdistamoissa, huoneiden ja huoneistojen ilman puhdistamisessa sekä erilaisten pintojen, kuten tasojen ja esineiden puhdistamisessa [3]. Vesi ja ilma voidaan johtaa UV-lamppuja sisältävän vesiputken tai ilmastoinnin osan läpi, jolloin UV-säteily kulkee tasaisesti koko vesi- tai ilmapatsaan läpi. Tällaisia UV-lamppuja sisältäviä osia voidaan kutsua UV-reaktoreiksi (kuva 1) [3, 22]. UV-lamppuja sisältäviä desinfiointilaitteita voidaan sijoittaa liikuteltavina torneina huoneisiin tai kiinteinä huoneiden seinille, jolloin UV-säteily kohdistuu laitteen ympärillä tai läpi kulkevaan huoneilmaan (kuva 2). Sairaaloissa ja laboratorioissa on käytössä erilaisia UV-desinfiointikaappeja, joiden sisään on tarkoitus asettaa desinfioitava esine [5, 23]. Kaappi voi olla myös suunniteltu desinfiomaan vain tietynlaisia laitteita, kuten puhelimia [23, 24]. Lisäksi on olemassa lukuisia erilaisia kotikäyttöisiä UV-desinfiointilaitteita, esimerkiksi UV-LED:eillä varustettuja sauvoja, puikkoja ja laukkuja sekä UV-pöytälamppuja (kuva 3) [25, 26].



Kuva 1. Esimerkkejä vedenpuhdistamoissa käytössä olevista UV-reaktoreista. UV-reaktori on pala vesiputkea, jossa läpi virtaavaan veteen kohdistetaan voimakkaasti UV-säteilyä. Vasemmalla Trojan Technologies UV-desinfiointijärjestelmä, jossa käytetään kahdeksaa 10 kW keskipaineista elohopeahöyrylamppua. Oikealla Wedeco K-series UV-desinfiointijärjestelmä, jossa käytetään 90 kappaletta 150 W pienpaine-elohopeahöyrylamppua. Kuvat ovat Cottonin *et al.* [27] kirjasta.



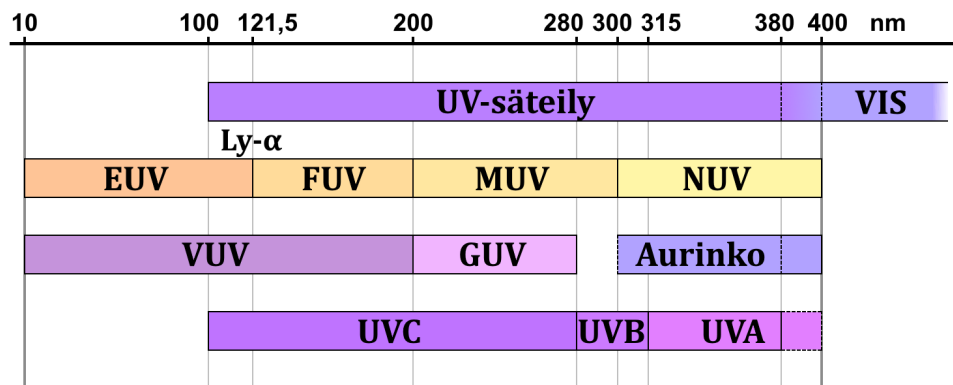
Kuva 2. Esimerkkejä huoneilman UV-desinfiointilaitteista. (A) Kiinteä seinään kiinnitetty ilman UV-desinfiointilaitte. (B) Kiinteä kattoon kiinnitetty desinfiointilaitte, jossa on ilmankiertoa edistävät tuulettimet. (C) Lattialla liikuteltava Tru-D -merkkinen UV-desinfiointilaitte, joka käyttää pienpaine-elohopeahöyrylamppuja. Kuvat A ja B ovat S. Jr:n *et al.* [4] artikkelista ja kuva C Scottin *et al.* [28] artikkelista.



Kuva 3. Esimerkkejä kotikäyttöisistä UV-desinfiointilaitteista. (A) UV-desinfiointikaappi, jossa käytetään pienpaine-elohopeahöyrylamppua. (B) Käsi­käyt­­töinen UV-desinfiointilaite, jossa käytetään myös pienpaine-elohopeahöyrylamppua. (C) Käsi­käyt­­töinen UV-desinfiointisauva, jossa käytetään UV-LED:iä. Kuvat ovat Palakornkittin *et al.* [26] artikkelista.

2 UV-säteily luonnossa ja ihmisen tuottamana

UV-säteily on yksi ihmissilmälle näkymättömistä sähkömagneettisen säteilyn spektrin aallonpituusalueista. Näkyvään valoon verrattuna UV-säteilyllä on pienempi aallonpituus ja suurempi energia. UV-säteilyn aallonpituusalueen rajat vaihtelevat lähteestä riippuen, ja alalajeihin jako voidaan tehdä usealla eri tavalla [29, 30]. Jotta asia olisi helpompi ymmärtää, tässä osassa käsiteltävät UV-säteilyn ja sen alalajien aallonpituusalueet on esitetty koostetusti kuvassa 4.



Kuva 4. UV-säteilyn aallonpituusalueet: (UV-säteily) ISO-standardin mukainen UV-säteily, (VIS) näkyvä valo, (EUV) Extreme UV, (Ly- α) Lymanin sarjan Lyman-alfa, (FUV) Far UV, (MUV) Middle UV, (NUV) Near UV, (VUV) Vacuum UV, (GUV) Germicidal UV, (Aurinko) auringosta maan pinnalle tuleva UV-säteily, UVC, UVB ja UVA [3, 11, 22, 29].

2.1 UV-säteilyn aallonpituusalueet

International Organization for Standardization (ISO) on määritellyt UV-säteilyn rajoiksi 100–400 nm [29]. Näkyvän valon rajoiksi taas ISO on määritellyt 380–760 nm, ja myös joissain lähteissä 380 nm esitetään UV-säteilyn ylärajana [29, 30]. Jaettaessa alaluokkiin rajat ovat kuitenkin 10–400 nm riippuen jakotavasta. ISO:n määritelmän mukaan UV-säteily voidaan jakaa ensinnäkin viiteen osaan: EUV (10–121 nm, engl. Extreme UV), Lymanin sarjan Lyman-alfa (121–122 nm), FUV (122–200 nm, engl. Far UV), MUV (200–300 nm, engl. Middle UV) ja NUV (300–400 nm, engl. Near UV) [29]. Toiseksi UV-säteily voidaan jakaa kolmeen osaan: UVC (100–280 nm), UVB (280–315 nm) ja UVA (315–400 nm) [29]. Näistä jälkimmäinen jakotapa vaikuttaisi olevan yleisempi Suomessa ja kirjallisuudessa, joka käsittelee UV-säteilyn vaikutuksia eliöille.

UV-säteilyn lyhyen pään aallonpituuksille on määritelty vielä erikseen nimi VUV (10–200 nm, engl. Vacuum UV) [29]. Mikrobin dekontaminaation kannalta VUV-aallonpituudet (10–190 nm) eivät usein ole merkityksellisiä, sillä alle 200 nm UV-säteitä käytettäessä ilmenee käytännön ongelmia väliaineen läpäisevyyden ja väliaineeseen muodostuvan otsonin kanssa [11]. Väliin jää 200–280 nm UVC-aallonpituusalue, jota voidaan kutsua nimellä GUV (engl. Germicidal UV) eli ”mikro-organismeja tappava UV” [22]. Lisäksi kaupallisesti on olemassa lukuisia nimityksiä erilaisille lamppumalleille, jotka tuottavat UV-säteilyä tietyillä UV-aallonpituusalueilla, mutta niitä ei ole tarpeen esitellä tässä [31]. Tämän työn ulkopuolelle jäävät myös alle 100 nm UV-aallonpituudet, sillä niiden energia on niin suuri, että ne kykenevät ionisoimaan mikrobin molekyylejä [3].

UV-säteilyn pääasiallinen lähde luonnossa on Aurinko. Auringosta tulevan UV-säteilyn aallonpituudet ovat välillä 100–400 nm, mutta 300 nm pienemmät aallonpituudet absorboituvat täysin maan ilmakehän otsonimolekyyleihin [21, 32]. Luonnossa esiintyy siis vain aallonpituuksia, jotka ovat välillä 300–400 nm (kuva 4) eli

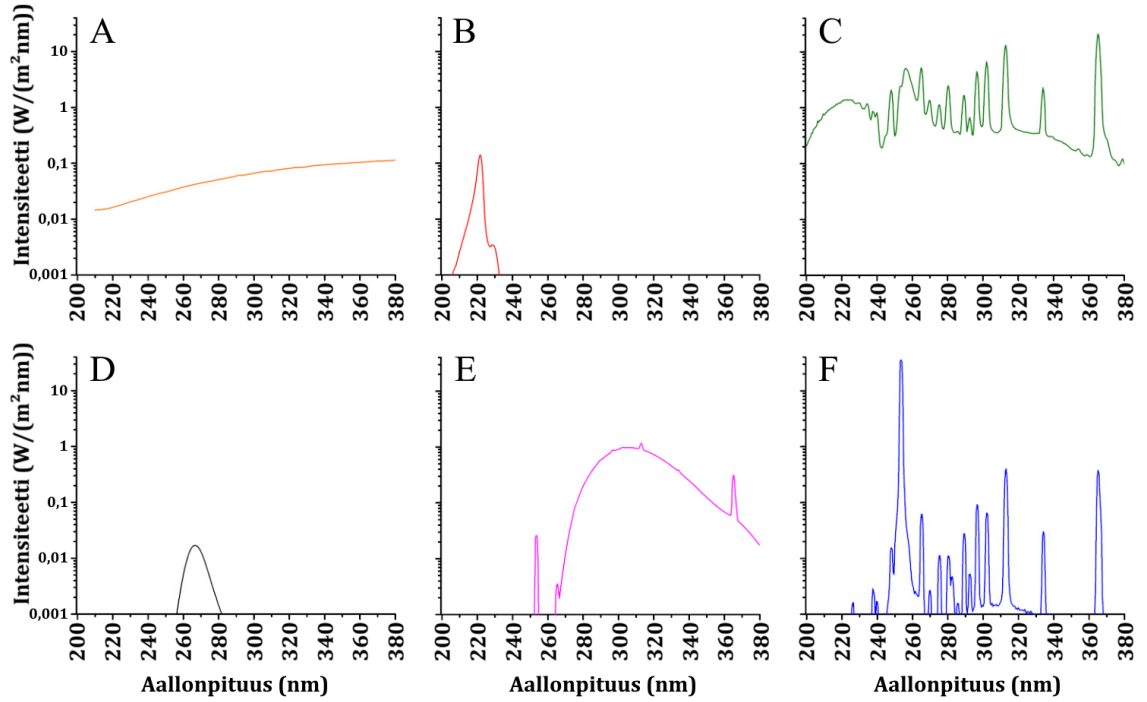
aallonpituusalueilla UVA ja UVB. Kaikkia UV-aallonpituuksia pystytään kuitenkin tuottamaan erilaisilla keinotekoisilla UV-säteilyn tuottotavoilla.

2.2 UV-säteilyn tuottotavat

Tähän päivään mennessä on kehitetty lukuisia laitteita (lamppuja), jotka hyödyntävät lukuisia menetelmiä UV-säteilyn tuottamiseksi. Tällaisia ovat mm. ksenonkaarilamppu, eksimeerilamppu, UV-LED ja elohopeahöyrylamput. Tyypillisesti valmistajat valmistavat lamppunsa omilla menetelmillään, jolloin eri valmistajien saman lampputyypin lamppujen välillä esiintyy pieniä eroja esimerkiksi laitteiden rakenteessa [21, 22, 33]. Tämän vuoksi ei ole syytä mennä yksityiskohtiin lamppujen rakenteen kannalta ja pysytäänkin yleisellä tasolla. Eri lampputyypien tuottamien säteilyn spektrien välillä on suuria eroja, minkä vuoksi kaikkia lampputyyppejä ei voida käyttää kaikissa käyttötarkoituksissa [22]. Lampputyypien erityispiirteet tulevat esille kuvasta 5, jossa on esitetty tässä työssä käsiteltävien lampputyypien spektrit. Kuvaajat on piirretty datasta, joka on saatu UV-säteilyn mittaukseen erikoistuneen Opsytec Dr. Groebel -osakeyhtiön [34] sivustolta. Lisäksi mainittakoon, että lampputyypien suosio on vaihdellut vuosien mittaan ja esimerkiksi kautta aikain laajalti suosituille pienipaine-elohopealamputille on elohopean ekologisten ongelmien vuoksi esitetty useita korvaajia, kuten eksimeerilamput ja UV-LED [7, 22, 35, 36].

2.2.1 Ksenon-kaarilamppu

Ksenon-kaarilamppu koostuu ksenon-kaasulla täytetystä lasikuoresta, jonka sisällä on elektrodit. UV-lampuissa kuoren materiaali on yleisimmin kirkasta sulatettua luonnonkvartsia (engl. clear fused quartz), johon on voitu ”doupata” esimerkiksi titaanioksidgeja (engl. titanium doped quartz), tai synteettistä kvartsilasia (engl. synthetic quartz). Elektrodien pääasiallinen materiaali on volframi. Anodi on tyypillisesti suurempimassainen, ja siihen on voitu lisätä lantanoideja. Kun lampun elektro-



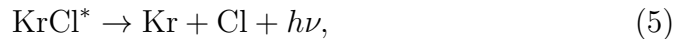
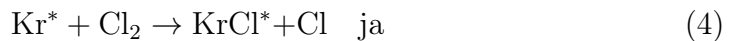
Kuva 5. Esiteltyjen lampujen esimerkkispektrit intensiteetti/aallonpituuskuvaajassa (intensiteetti logaritmisella asteikolla). Spektrit eivät vastaa mitään tiettyjä lamppu-merkkejä vaan ovat tyypillisiä kyseisille lampputyypeille. (A) ksenonkaarilamppu (jatkuva jännite), (B) eksimeerilamppu (suodatettu), (C) keskipaineinen elohopeahöyrylamppu, (D) 265 nm UV-LED, (E) UVB-loisteputki ja (F) pienpaine-elohopeahöyrylamppu [34].

dien välille johdetaan jännitepiikki, syntyy kipinä, joka ionisoi ksenon-kaasun. Näin syntyy kuuma plasmasta koostuva valokaari, jota voidaan ylläpitää korkeajännitteellä. Plasmassa ksenon-ioneja ja -atomeja virittyy, ja viritystilojen purkautuessa vapautuu sähkömagneettista säteilyä, joka on UV-säteilyn, näkyvän valon ja infrapunasäteilyn aallonpituusalueella. UV-säteilyn aallonpituuden alaraja rajautuu kuoren materiaalin perusteella. Mm. kirkas sulatettu luonnonkvartsi päästää lävitseen aallonpituudet, joiden aallonpituus on pitempi kuin noin 220 nm. Jännitettä voidaan ylläpitää jatkuvasti (engl. continuous operating arc lamp) tai se voidaan jaksottaa (engl. pulsed arc lamp), jolloin aallonpituuksien intensiteetti voi hetkellisesti olla moninkertainen jatkuvan jännitteen lampun spektriin verrattuna. Koska ksenon-kaarilampun spektri on jatkuva UV-säteilyn aallonpituusalueella (kuva 5),

säteilyä voidaan rajata monokromaattorilla, jolloin voidaan tutkia vaikutuksia kapeilla UV-säteilyn aallonpituusalueilla.[21, 22, 33]

2.2.2 Eksimeerilamppu

Eksimeerilamput koostuvat samaan tapaan kvartsilasikuoresta, jonka sisällä on 0,05-0,5 % halogeeni-komponenttia (esim. kloori), 3-10 % jalokaasu-komponenttia (esim. krypton) sekä puskurikaasua (engl. buffer gas, esim. argon), joka edesauttaa säteilyn muodostumista. Elektrodit on sijoitettu dielektrisen kvartsilasikuoren ulkopuolelle ja niiden materiaali on esimerkiksi volframi. Kun lampun elektrodien välille johdetaan jännite, aiheutuu kvartsilasikuoren sisälle sähköpurkaus. Kyseessä on niin sanottu ”kaasupurkaus dielektrisen väliaineen läpi” (engl. dielectric barrier discharge). Syntyy plasmaa, jossa on ioneja ja vapaita elektroneja. Vapaat elektronit törmäävät jalokaasu-atomeihin virittäen ne (kaava 2). Positiivinen jalokaasu-ioni ja negatiivinen halogeeni-ioni yhdistyvät (ioniparin rekombinaatio, vaatii puskurikaasun)(kaava 3) tai vaihtoehtoisesti virittynyt jalokaasu-atomi ja halogeeni-molekyyli yhdistyvät (engl. harpooning reaction)(kaava 4) ja muodostuu siis jalokaasusta ja halogeenista koostuva eksimeeri (engl. excimer). Kun eksimeeri hajoaa ja atomit palautuvat erilleen, vapautuu sähkömagneettista säteilyä (kaava 5), joka on riippuvainen lampussa käytetyistä kaasuista. KrCl-eksimeerilampun tapauksessa reaktiot ovat



missä Kr on jalokaasu, Cl on halogeeni, M on puskurikaasu, h on Planckin vakio ja ν on säteilyn taajuus. KrCl-eksimeerilampun tapauksessa syntyy GUV:n alueella oleva hyvin kapea, lähes monokromaattinen aallonpituuspiikki (kuva 5), jonka keskus on 222 nm kohdalla, sekä suhteessa pieni ”häntä” (engl. tail), joka koostuu hie-

man pidemmistä aallonpituuksista. Hännän voimakkuutta voidaan vielä pienentää entisestään monikerroksisella suodattimella.[22, 36, 37][38, s. 47-73]

2.2.3 UV-LED

UV-valodiodi eli lyhyemmin UV-LED (engl. Light Emitting Diode) koostuu LED-sirusta, joka on asetettu esimerkiksi metallikuoreen, jossa on kvartsilasilinssi, ja jonka läpi elektrodit kulkevat. Kuoren sisällä on joko tyhjiö tai se on täytetty jalokaasulla. Normaalisti LED-sirut on upotettu polymeerikapseliin, jossa on silikoni- tai epoksilinssi. UV-LED-sirujen kanssa tämä tuottaa kuitenkin haasteita, koska UV-aallonpituudet absorboituvat polymeerimateriaaleihin saaden ne ajan myötä menettämään läpinäkyvyytensä [7]. Itse LED-siru koostuu p-tyypin puolijohteen ja n-tyypin puolijohteen pn-liitoksesta. Puolijohdeet voivat olla esimerkiksi alumiinigalliumnitridiä (AlGaN), johon on dopattu esimerkiksi magnesiumia (p-tyyppi) tai piitä (n-tyyppi) [7, 39]. Karkeasti sanottuna, kun LED-siruun johdetaan jännite, n-puolijohteen vapaat elektronit rekombinoituvat p-puolijohteen aukkojen (engl. electron deficient hole) kanssa, mikä siirtää elektronit alemmalle energiatasolle. Ylimääräinen energia vapautuu sähkömagneettisena säteilynä, joka on riippuvainen elektronien energiatasojen erosta. Käytännössä emittoituva aallonpituus riippuu siis täysin LED-sirussa käytetyistä puolijohdeista [7, 39, 40]. Tämä tarkoittaa, että yksittäinen UV-LED tuottaa vain sille ominaisen, kapean spektrin aallonpituuksia (kuva 5) [7, 34, 41]. Lisäksi hiljattain osoitettiin, että AlGaN-perusteisia puolijohdeita muuntelemalla on mahdollista valmistaa kaikille 200–400 nm aallonpituuksille ominaiset UV-LEDit [42].

2.2.4 Elohopeahöyrylamppu

Elohopeahöyrylamput koostuvat elohopealla (nestemäisessä olomuodossa huoneenlämmössä) ja inertillä kaasulla (esim. argon) täytetystä kvartsilasiputkesta, jonka

päihin on upotettu esimerkiksi volframista valmistetut kaksi pääelektrodiä sekä katodin lähelle kolmas lisäelektrodi. Kun lampun katodin ja lisäelektrodin välille johdetaan jännitepiikki, syntyy kipinä, joka ionisoi inertin kaasun kuumaksi plasmaksi. Plasma höyrystää elohopean kaasuksi, jolloin virta pystyy kulkemaan pääelektrodien välillä elohopeakaasun läpi virittäen elohopea-atomeja. Viritystilojen purkautuessa vapautuu sähkömagneettista säteilyä, joka on UV-säteilyn, näkyvän valon ja infrapunasäteilyn aallonpituusalueella. Säteilyn spektri ei välttämättä ole jatkuva kuten ksenon-kaarilampuissa, ja spektristä erottuu hyvin yksittäiset energiatilojen energiaeroja vastaavat aallonpituuspiikit.[22, 27, 43, 44]

Elohopeahöyrylamput voidaan jakaa muutamaaan alaluokkaan, joiden välillä mm. elohopean määrä, elohopeakaasun paine ja käyttölämpötila, sekä näistä riippuva tuotetun säteilyn spektri vaihtelevat. Tämän työn kannalta alaluokista on oleellista esitellä vain pienpaine-elohopealamppu eli LP-lamppu (engl. Low-Pressure mercury lamp), keskipaineinen elohopeahöyrylamppu eli MP-lamppu (engl. Medium-Pressure mercury lamp) ja loisteputki (engl. fluorescent lamp).[27]

LP-lampussa on tyypillisesti vain muutamia milligrammoja elohopeaa ja elohopeahöyry on nimensä mukaisesti pienessä 0,1-10 Pa paineessa lampun käyttölämpötilassa 20-40 °C. Alhaisessa paineessa ja lämpötilassa säteilyä emittoituu pääasiassa elohopea-atomien viritysten purkautuessa. Näin lamppu tuottaa vain kapeita ja erillisiä aallonpituuspiikkejä, joista vallitsevat ovat 253,7 nm (82 % kokonaisuudesta) ja 184,9 nm (6,6 % kokonaisuudesta) kohdilla. Käytännössä kvartsilasin läpi säteilee siis lähes monokromaattinen aallonpituuspiikki, jonka keskus on GUV:n alueella 253,7 nm kohdalla (kuva 5).[22, 27, 44, 45]

MP-lampussa elohopeaa on muutamia grammoja ja elohopeahöyryn paine on huomattavasti korkeampi, 50-300 kPa. Paineen ansiosta lamppuun voidaan johtaa suurempi jännite, mikä johtaa korkeaan 600-900 °C käyttölämpötilaan. Korkean paineen ja lämpötilan vuoksi elohopea-atomit ovat lähempänä toisiaan ja yksittäiset

atomit absorboivat osan viereisten atomien emittoimasta säteilystä muuttaen niiden aallonpituutta. Lampussa olevat kaasut myös ionisoituvat, jolloin myös ionien virittyminen ja viritysten purkautuminen sekä rekombinaatioprosessit emittoivat säteilyä eri aallonpituusalueilla. Tämän seurauksena lamppu tuottaa kapeiden aallonpituuspiikkien lisäksi pienemmän intensiteetin jatkuvan spektrin koko UV-säteilyn alueella (kuva 5).[27, 45]

Loisteputket ovat rakenteeltaan ja UV-säteilyn tuottotavaltaan käytännössä LP-lamppuja. Loisteputkissa kvartsilasin sisäpinta on kuitenkin pinnoitettu fluoresoivala materiaalilla eli loisteaineella (engl. phosphor). Pinnoitus absorboi 253,7 nm säteilyn ja emittoi sen pidempiaallonpituuisena säteilynä, jonka spektri on jatkuva tietyllä aallonpituusvälillä (kuva 5). Pinnoitteen koostumuksesta riippuen voidaan valmistaa erilaisia loisteputkia, jotka tuottavat UV-säteilyä UVB- ja UVA-aallonpituusalueilla. [27, 44, 46]

3 UV-säteilyn vaikutus aineisiin ja eliöihin

UV-säteily voi käyttäytyä laajan aallonpituusalueensa takia hyvin eri tavalla eri tilanteissa. UV-dekontaminaatiossa on kuitenkin oleellista, että UV-säteily ylipäätään pääsee vaikuttamaan dekontaminaation kohteeseen. Sen vuoksi on hyvä käydä hie- man läpi, miten UV-säteily käyttäytyy mm. materiaalien pinnoilla ja väliaineessa, jotta saadaan kontekstia siitä, millaisessa tilanteessa säteily ylipäätään voi vaikut- taa mikrobiin. Tämän jälkeen siirrytään itse mikrobiin ja käsitellään, miten säteily vaikuttaa mikrobeissa.

3.1 Säteilyn intensiteetti

Intensiteetti on fysiikassa yleisesti käytetty termi, joka kuvaa säteilytehoa pinta-alaa kohti. Jos säteily jakautuu tasaisesti

$$I_A = \frac{P}{A}, \quad (6)$$

missä I_A [W/m²] on intensiteetti, P [W] on säteilyteho ja A [m²] on pinta-ala, jol- le säteily jakautuu. Eri aloilla tätä termiä kuitenkin sovelletaan alalle ominaisissa erikoistilanteissa, mikä aiheuttaa epäselvyyksiä.[1, 47]. Esimerkiksi kun käsitellään intensiteettiä UV-dekontaminaation kohteen pinnalla, käytetään vastaavaa termiä irradianssi tai säteilytysvoimakkuus, jota kirjallisuudessa merkitään yleisesti sym- bolilla E [W/m²] [31]. UV-lampusta lähtöisin olevan säteilyn intensiteetti taas ku- vaa, kuinka suuri säteilyteho (engl. radiant flux tai radiant power) tiettyyn suuntaan kulkevalla säteilyllä on avaruuskulmaa kohden:

$$I_\Omega = \frac{dP}{d\Omega}, \quad (7)$$

missä I_Ω [W/sr] on avaruuskulmaan kohdistuva säteilyn intensiteetti ja Ω [sr] on avaruuskulma steradiaaneina [48]. Mitä kauempana kohde on pistemäisestä sätei- lylähteestä, sitä pienempi osa säteilystä osuu kohteeseen [31]. Pistemäisen säteily- lähteen intensiteetti siis pienenee etäisyyden kasvaessa ja on käytännössä kääntäen

verrannollinen etäisyyden neliöön,

$$I_A \sim \frac{1}{r^2}, \quad (8)$$

missä I_r [W/m²] on säteilyn intensiteetti ja r on etäisyys säteilylähteestä [31, 49].

3.2 Heijastuminen

Säteilyn osuessa aineen (materiaalin tai mikrobin) pintaan se joko heijastuu pois päin tai tunkeutuu siihen [31]. Aineen heijastuskyky kuvaa, kuinka suuri osa siihen osuvasta säteilystä heijastuu pois aineesta [50].

UV-säteily heijastuu hyvin vain muutamista materiaaleista, eikä näkyvää valoa hyvin heijastavat materiaalit välttämättä heijasta UV-säteilyä juurikaan [4]. Metallit ovat yleisesti hyviä heijastimia, ja kirjallisuudesta parhaimpana esiin nousi alumiini. Navntoftin *et al.* [51] tutkimuksessa saavutettiin anodisoidulla alumiinilevyllä (320G ALANOD anodized aluminium) 82 % UV-heijastuskyky, mutta alumiinin kanssa parhaisiin tuloksiin päästään Bergmannin *et al.* [38, s. 122] kirjan mukaan, kun alumiini pinnoitetaan ohuella kerroksella magnesiumfluoridia (MgF₂), joka estää alumiinin pinnan hapettumisen. Heijastuskyvyksi saadaan tällöin 84–86 % ja 88–90 % UVC-aallonpituuksilla 157 nm ja 193 nm. Kontrastina ruostumattomalle teräkselle on määritetty 28 % heijastuskyky 254 nm GUV-aallonpituudella, sinkittyille materiaaleille on määritetty heijastuskyvyksi noin 55 % ja näkyvää valoa hyvin heijastavan kiillotetun messingin heijastuskyvyksi vain 10 % UVC-säteilystä [4, 52]. Dubey [53] taas esittelee artikkelissaan heijastimen, joka koostuu vaihtelevista titaanioksiidi- ja piidioksiidi-kerroksista (TiO₂/SiO₂). Artikkelin mukaan TiO₂/SiO₂-heijastimella voidaan saavuttaa jopa 100 % heijastuskyky UVA-aallonpituuksilla 358 nm ja 367 nm, ja yli 55 % heijastuskyky yleisesti UVB:n ja UVA:n alueella 300–400 nm välillä. Kun kyseessä ei ole edellä mainittu heijastava materiaali, voidaan siis yleisesti todeta, ettei UV-säteily juuri heijastu materiaalien tai mikrobin pinnasta [31].

3.3 Lämpäisykyky

Aineeseen tunkeutunut säteily vaimenee, koska se absorboituu aineessa. Säteilyn intensiteetin muutosta aineessa voidaan kuvata differentiaaliyhtälöllä

$$dI = -I(x) \cdot a \, dx \quad \Rightarrow \quad \frac{dI}{dx} = -I(x) \cdot a, \quad (9)$$

missä dI [W/m²] on infinitesimaalisen pieni muutos intensiteetissä, $I(x)$ [W/m²] on intensiteetin suuruus tietyllä etäisyydellä x , a [1/m] on lineaarinen absorptiokerroin ja dx [m] on infinitesimaalisen pieni muutos tunkeutumissyvyydessä. Yhtälön yleinen ratkaisu on

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-ax} \quad (10)$$

missä I_0 [W/m²] on intensiteetti aineen pinnalla. Käytännössä kun määritetään lineaarista absorptiokerrointa jollekin aineelle, sovelletaan yleistä kaavaa

$$I(l) = I_0 \cdot e^{-al} \quad \Rightarrow \quad \ln\left(\frac{I_0}{I(l)}\right) = al, \quad (11)$$

missä $I(l)$ [W/m²] on intensiteetin suuruus säteilyn aineessa kulkeman matkan l [m] päässä. Käytännössä l on esimerkiksi kvartsilasin tai mitattavan vesipatsaan paksuus.

Intensiteetti on siis aineen pinnalla I_0 , ja kuljettuaan aineen läpi, se on pienentynyt intensiteettiin I . Näiden intensiteettien arvojen suhdetta kutsutaan läpäisevyydeksi

$$T = \frac{I}{I_0}, \quad (12)$$

missä T on läpäisevyys. Läpäisevyydellä voidaan laskea myös kirjallisuudessa usein esiintyvä absorbanssi, joka kuvaa kuinka tehokkaasti aine vaimentaa säteilyä

$$A = -\log_{10}(T) = \log_{10}\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (13)$$

missä A on absorbanssi [1, 54]. Liuosten absorbanssi on yleisesti määritelty 1 cm matkalle [52, 55–58].

Jos UV-säteily kulkee aineen läpi, voidaan puhua joko tilannekohtaisesti läpäisykyvystä, eli kuinka suuri osa säteilystä ylipäättään läpäisi aineen (esimerkiksi kuinka suuri osa säteilystä läpäisee lampun kuoren kvartsilasin), tai yleisellä tasolla, kuinka suuri osa säteilystä läpäisi aineen pituusyksikköä kohden. UV-säteilystä puhuttaessa aineen (varsinkin nesteen) kykyä päästää lävitseen UV-säteilyä kuvataan yleisesti läpäisevyysprosentilla, joka on määritelty 1 cm matkalle

$$%T = 100T = 100 \cdot 10^{-A}, \quad (14)$$

missä $%T$ on läpäisevyysprosentti. Tämä yleisesti käytetty matkan pituus vaikuttaa tulevan suoraan läpäisevyysprosentin määrittämiseen yleisesti käytetyn spektrofotometrin kyvetin läpimitasta (1 cm) [52, 55–58].

UV-säteily ei läpäise materiaaleja kovin hyvin, ja on vain muutamia materiaaleja, jotka päästävät UV-säteilyä hyvin lävitseen [31]. Näistä jo aikaisemmin mainitulle kvartsilasilille on mitattu GUV- ja UVB-aallonpituuksilla noin 80–90 % läpäisykyky 1 mm paksulla näytteellä ja tutkimustarkoitukseen valmistetulle 10 mm paksulle synteettiselle kvartsilasinäytteelle saatiin jopa 99,9 % läpäisykyky [58–60]. Tämän, sekä kvartsilasin hyvän lämmön ja kemiallisen kestävyuden vuoksi kvartsilasia käytetäänkin yleisesti lamppujen kuorien ja UV-reaktorien lampunsuojuksien materiaalina [22, 27, 60]. Muita läpinäkyviä aineita ovat mm. polyeteenitereftalaatti ja boorilasi, joiden UVA-säteilyn läpäisevyys 1,8 mm kulkumatalla on 85–90 % [51].

Kun UV-lampun vaikutusalueella on ilmaa, voi ilman happi absorboida UV-säteilyä, jonka aallonpituus on alle 200 nm, tuottaen otsonia [13]. Tällä ei siis ole vaikutusta dekontaminaation kannalta, kun pysytään GUV-, UVB- ja UVA-aallonpituusalueilla. UV-säteilylähteiden spektriä pystytään myös rajoittamaan doupatulla kvartsilasilla, jolloin pienimmät lampusta ulos säteilevät aallonpituudet ovat noin 220–240 nm [22, 60, 61]. Vedessä olevan UV-lampun kohteet ovat vedessä, ja vesi itsessään vähentää UV-säteilyn intensiteettiä kohteen pinnalla. Puhtaan juomaveden absorbanssi 10 mm kulkuetäisyydellä ja 230–300 nm aallonpituusalueella on

noin 0,1 (läpäisevyysprosentti noin 80 %), mutta siirryttäessä 230 nm lyhyempiin aallonpituuksiin, absorbanssi lisääntyy huomattavasti, ja esimerkiksi 200 nm kohdalla absorbanssi on jo 0,8 (läpäisevyysprosentti noin 16 %) [55]. Voidaan todeta, että ilma ei vaikuta UV-säteilyn voimakkuuteen dekontaminaatiossa, kun pysytään GUV-, UVB- ja UVA-aallonpituusalueilla, kuten myös että veden absorbanssi vaikeuttaa UV-aallonpituuksien dekontaminoivien vaikutusten tutkimista.

3.4 Absorptio mikrobissa

Irradianssi, eli säteilyn intensiteetti mikrobin pinnalla, saadaan siis kaavasta

$$I_E = \frac{P}{A}, \quad (15)$$

missä I_E [W/m²] on säteilyn intensiteetti mikrobin pinnalla, P [W] on säteilyteho ja A [m²] pinta-ala, jolle säteily osuu [1, 47]. Dekontaminaatiossa kohteena ovat pienet pallomaiset mikrobit, joten kirjallisuudessa käytetään myös käsitettä ”palloirradianssi” (engl. ”spherical irradiance” tai ”fluence rate”), jossa otetaan huomioon säteily kaikista suunnista pallopinnalle:

$$E_o = \int_{4\pi} L d\Omega, \quad (16)$$

missä E_o [W/m²] on palloirradianssi, L [$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$] on säteilyteho pinta-ala ja avaruuskulmaa kohti ja Ω on avaruuskulma pinnalle saapuvalla säteelle [1, 47, 49, 54]. Kun kohteeseen osuu säteilyä tietyn mittainen aika, voidaan määrittää UV-säteilyannos eli säteilytys (engl. radiant exposure tai fluence):

$$F = \int E_o dt, \quad (17)$$

missä F [J/m²] on UV-säteilyannos ja t [s] on säteilytysaika [1, 47, 54]. UV-säteilyannos on siis kaikista suunnista mikrobiin osuvan säteilyn kokonaisenergia [47, 54]. Koska mikrobit ovat pieniä ja kulkuetäisyydet ovat yhden mikrometrin kokoluokkaa, niiden

absorbanssit ovat hyvin pieniä (0,02 luokkaa tai vähemmän), ja kokonaisenergiasta absorboituu käytännössä vain pieni osa [1, 54].

Mikrobin sisällä UV-fotoni voi siis osua johonkin mikrobin molekyyliin ja absorboitua siihen, jolloin molekyyli virittyy [1]. Tätä voi seurata Cottonin *et al.* [1] kirjan mukaan yksi neljästä seurauksesta:

1. viritys purkautuu ja emittoituu fotoni (fluoresenssi)
2. viritystila vaihtuu viritystilasta toiseen pitkäikäisempään viritystilaan (engl. intersystem crossing) ja emittoituu fotoni (fosforesenssi)
3. viritystila purkautuu sisäsiirtymän (engl. internal conversion) kautta
4. molekyyli muuttuu (uudelleenjärjestyy tai jakautuu).

Solun toiminnan kannalta merkittävää on nimenomaan molekyylin muuttuminen ja molekyylin sidosten katkeaminen [1].

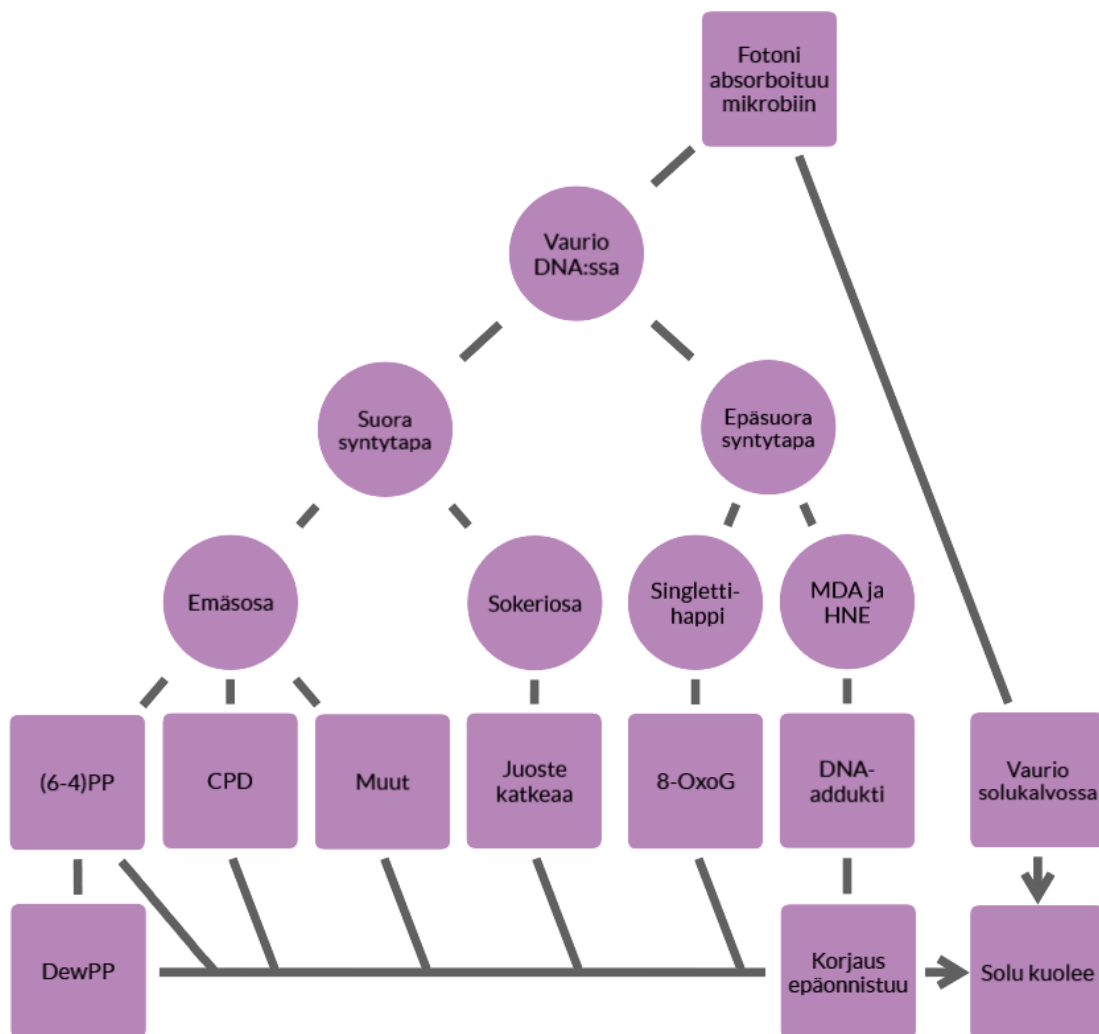
Jotta sidos voi katketa, täytyy fotonilla olla riittävästi energiaa. Esimerkiksi UV-säteilyä pienempienerginen näkyvä valo voi absorboitua ilman molekyyliin, mutta koska fotonien energia ei riitä katkaisemaan sidoksia, ne eivät kykene muuttamaan molekyyliä, ja energia vapautuu muilla edellä mainituilla tavoilla [1]. Sen sijaan esimerkiksi GUV-aallonpituuksilla energiaa on riittävästi, jolloin yksittäinen fotoni voi aiheuttaa aina yhden muutoksen mikrobin rakenteessa [15]. Käytännössä siis mitä enemmän säteilyä on, eli mitä suurempi on UV-säteilyannos, eli mitä suurempi on UV-säteilyn intensiteetti tai mitä pidempi on säteilytysaika, sitä enemmän tapahtuu muutoksia [1].

3.5 Vaurio mikrobissa

Kuva 6 auttaa hahmottamaan, missä kohdissa mikrobia seuraavissa kappaleissa käsiteltävät mikrobin vauriot muodostuvat. Mikrobissa UV-säteily erityisesti GUV-alueella voi absorboitua useisiin eri molekyyliin [15]. Valokemiallisen reaktion

eli fotonin absorboitumisen aiheuttaman kemiallisen reaktion tuloksena syntyviä vaurioita eli muuttuneita molekyyliä kutsutaan valoreaktiotuotteiksi (engl. photoproduct) [20]. UVB- ja GUV-aallonpituusalueilla valtaosa valoreaktiotuotteista syntyy UV-säteilyn absorboituessa proteiineihin (lähinnä ulommassa solukalvossa) ja DNA:n (deoksiribonukleiinihappo) emäksiin. Alle 230 nm aallonpituuksilla UV-säteily absorboituu pääasiassa proteiineihin ja 230 nm pidemmällä aallonpituuksilla pääasiassa DNA:n emäksiin (kuva 7) [15]. 260 nm aallonpituuden absorptioon verrattuna UVA-aallonpituudet taas absorboituvat DNA:han vain hyvin vähän. UVA reagoikin mm. mikrobin happimolekyylien kanssa tuottaen absorboituessaan valoreaktiotuotteita, jotka aiheuttavat mikrobissa oksidatiivista stressiä [20].

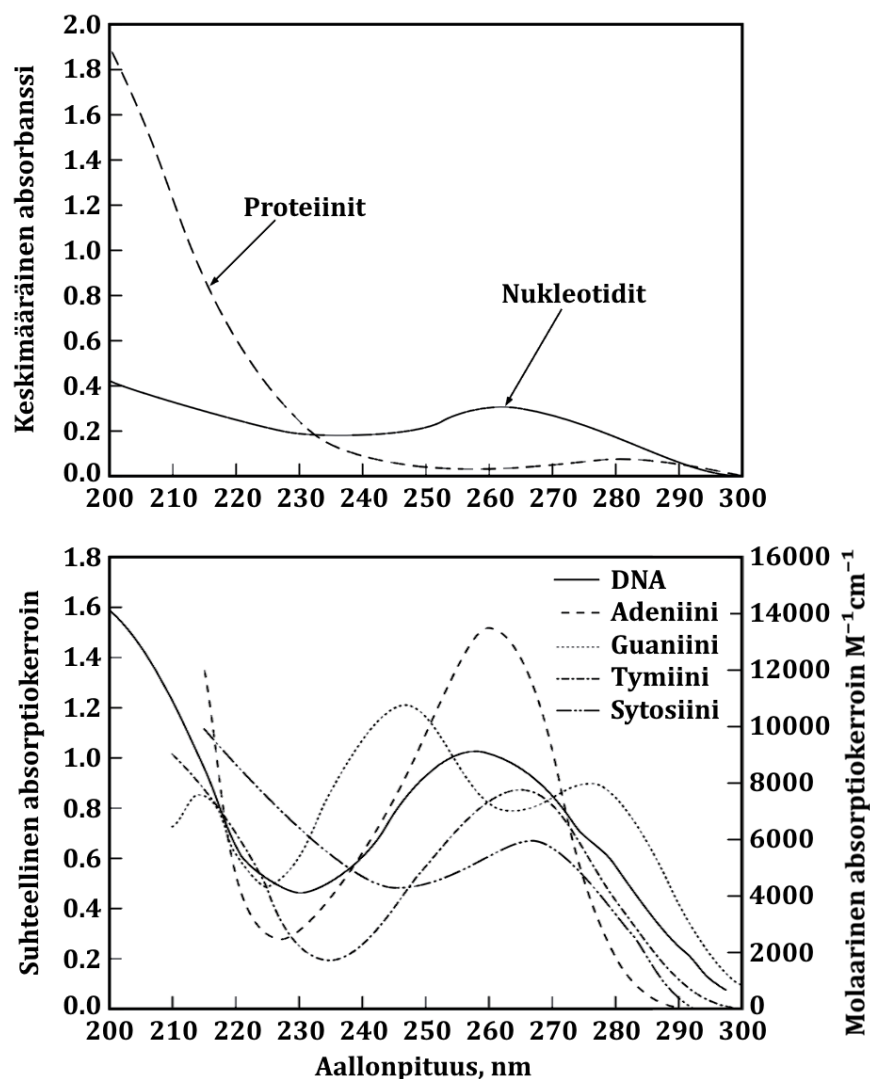
Ulomman solukalvon proteiineihin absorboituessaan UV-säteily voi johtaa solukalvon vaurioon (kuva 6), joka rikkoo solukalvon pinnan niin, että solulima pääsee ”vuotamaan” solukalvon ulkopuolelle, jolloin solu kuolee [15]. Tämä vaikutustapa ei päde viruksiin, koska viruksilla ei ole solukalvoa [66]. Kaikilla mikrobeilla sen sijaan on joko DNA:ta tai RNA:ta (ribonukleiinihappo) ja näiden emäkset muuttuvat proteiineja herkemmin (pienemmällä UV-säteilyannoksella) [15]. Kuvasta 7 voidaan arvioida, että DNA absorboi UV-säteilyä parhaiten 260 nm aallonpituudella. Tätä tukee myös Chenin *et al.* [7] artikkeli, jossa kerrotaan useiden bakteerien, virusten ja alkueliöiden absorptiospektrien huippujen olevan välillä 253–270 nm. Ravanatin *et al.* [62] artikkelissa tarkennetaan lisäksi, että absorptiot UVB-aallonpituusalueen 280 nm, 290 nm ja 300 nm aallonpituuksilla ovat noin 50 %, 20 % ja 4 % 260 nm aallonpituuden absorptioon verrattuna. On myös hyvä muistaa, että alle 230 nm aallonpituuksilla säteily absorboituu hyvin myös veteen, joka kattaa 80 % elävien solujen sisällöstä [55, 67]. Käsitellään seuraavaksi, mitä valoreaktiotuotteita DNA:han voi syntyä.



Kuva 6. Yksinkertaistettu kooste erilaisista vaurioista mikrobissa [11, 15, 20, 62–65]. Alaluvuissa 3.5, 3.7 ja 3.8 käsitellään tarkemmin kuvassa esitellyt vauriot ja niiden syntymekanismit.

3.6 DNA:n rakenne

DNA (useimmilla viruksilla RNA) on mikrobin toiminnan ja lisääntymiskyvyn kannalta keskeisin rakenne [20]. Jotta mikrobi pystyy ylläpitämään omia toimintojaan ja/tai lisääntymään, sen DNA:n geneettistä tietoa täytyy pystyä lukemaan ja kopiaimaan. Jos DNA:n fyysinen muoto tai koostumus muuttuu, nämä toiminnot häiriintyvät tai estyvät [68]. Jos vauriota ei saada korjattua, seurauksena voi olla lisääntymiskyvyn menetys tai ohjelmoitu solukuolema [65]. Käsitelen myöhemmin, millaisia keinoja DNA-vaurion korjaamiseen solulla ylipäätään on ja mitkä tekijät

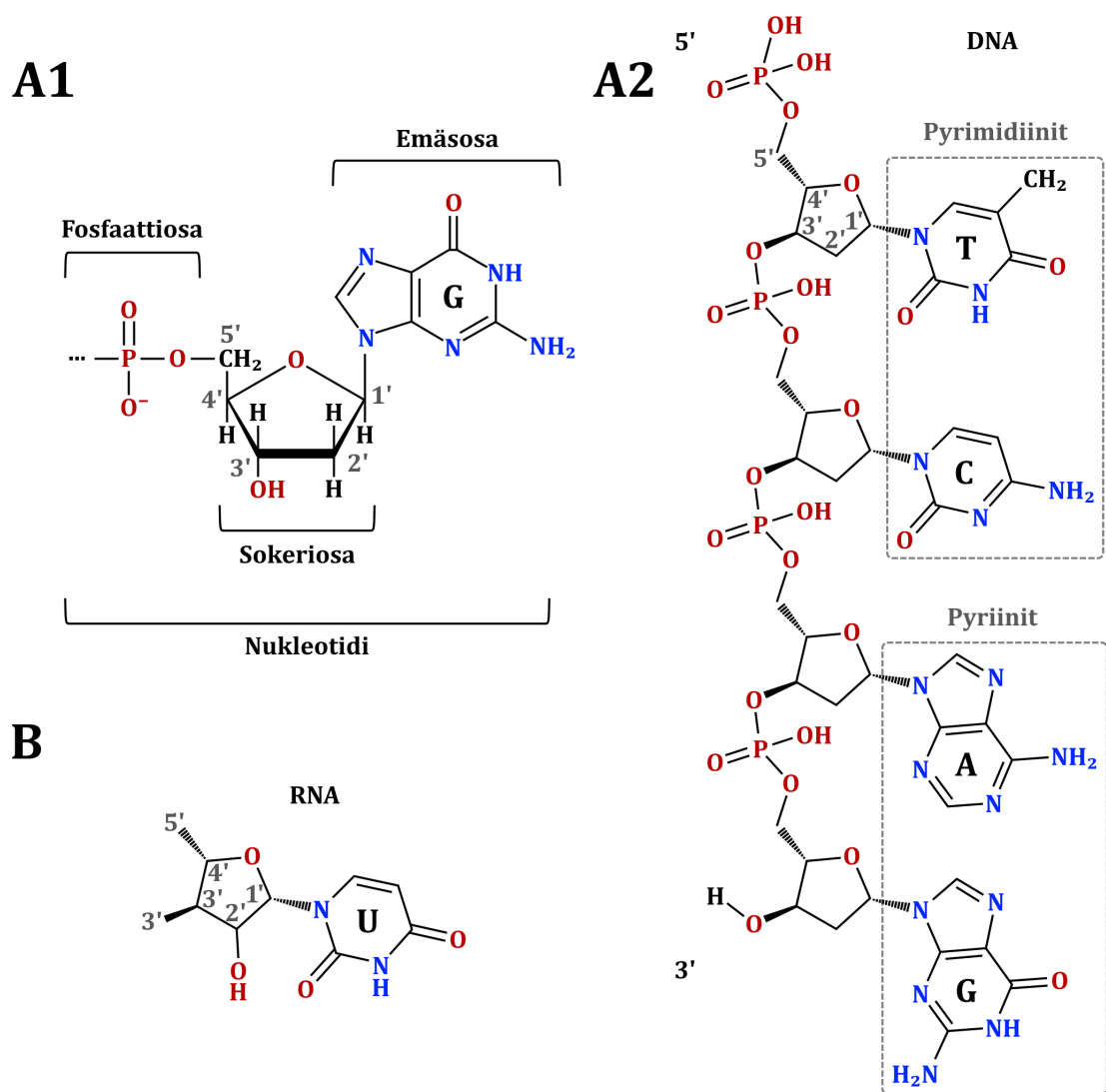


Kuva 7. Ylhäällä proteiinien ja DNA:n nukleotidien suhteellinen absorbanssi. Alhaalla DNA:n ja eri nukleotidien absorptiospektrit. Kuvat Cotton et al. [15] kirjasta (muokattuna).

vaikuttavat ohjelmoituun solukuolemaan.

Kuvassa 8 on esitelty tässä kappaleessa käsiteltävät rakenteet. DNA (mm. bakteereilla ja alkueläimillä) koostuu kahdesta juosteesta, jotka koostuvat ketjuuntuneista nukleotideista, jotka taas koostuvat fosfaatti-, sokeri- ja emäsosasta [68]. Emäsosa on joko pyrimidiini, eli sytosiini (C) ja tymiini (T) (urasiili (U)) tai puriini, eli adeniini (A) ja guaniini (G) [68]. DNA:n emästen absorptiospektrit on esitetty kuvassa 7. Juosteissa nukleotidit muodostavat emäspareja, joiden välillä on heikko vetysidos

[68]. Koostumus on tarkka, sillä DNA:ssa voi esiintyä vain tietyt pyrimidiini-puriini-emäsparit: A-T (adeniini-tymiini) ja G-C (guaniini-sytosiini) [68]. Viruksilla RNA koostuu samoista osista pienin poikkeuksin: Virus-RNA voi olla joko kaksi- tai yksijuosteinen, ja emäsparien tyymiinin tilalla on U (urasiili)(kuva 8) [15]. Molemmassa (DNA ja RNA) geneettinen tieto on siis säilötty nukleotidiketjuihin, joissa jokainen yksittäinen nukleotidi on altis UV-säteilyn absorptioon seurauksena syntyville vaurioille.



Kuva 8. (A1) nukleotidin rakenne, (B) RNA-nukleotidi, jonka emäsosana on (U) urasiili, (A2) DNA:n toinen juoste, jossa on kaikki DNA:n emäkset. (T) tyymiini, (C) sytosiini, (A) adeniini ja (G) guaniini. Kuva on Amshaween *et al.* [68] artikkelista (muokattuna).

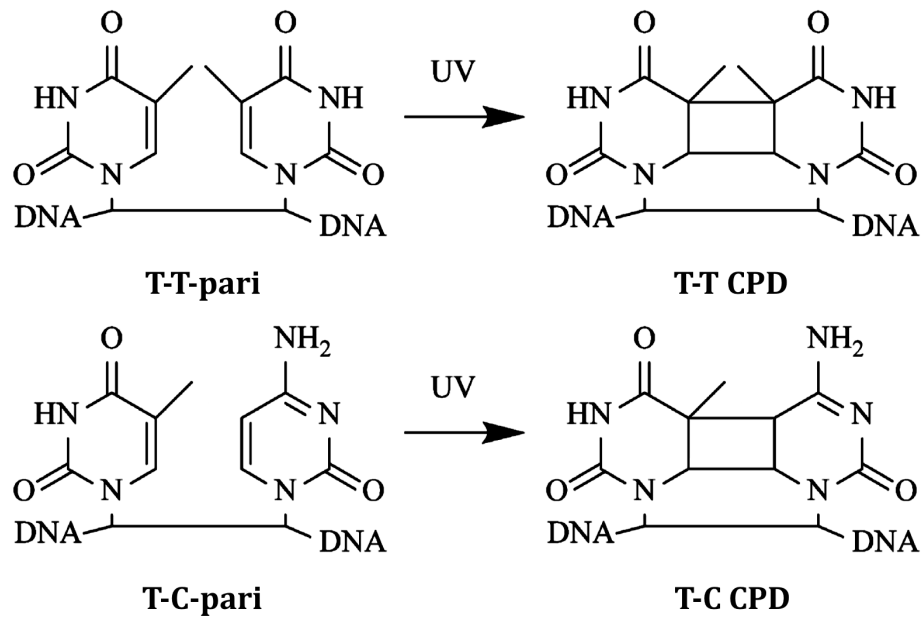
3.7 DNA-vaurio

DNA-vaurio voi syntyä kahdella tavalla: suoraan, jolloin nukleotidin emäs- tai sokeriosan molekyyli virittyy absorboidessaan fotonin ja virityksen purkautuessa rakenne muuttuu, tai epäsuoraan, jolloin fotoni absorboituu muualle ja sitä kautta aiheuttaa oksidatiivista stressiä, joka voi aiheuttaa muutoksia DNA:han [20, 62]. UV-säteilyn aallonpituusalueista UVA aiheuttaa vaurioita sekä suoraan että epäsuoraan, kun taas UVB ja GUV/UVC aiheuttavat vaurioita lähes pelkästään suoraa reittiä [62, 69].

Suorasta syntyvästä kirjallisuudessa esiintyvät lähinnä tilanteet, joissa fotoni absorboituu joko sokeriosaan tai emäsosaan. Sokeriosaan absorboitumisesta syntyneet muutokset johtavat pääasiassa yhden juosteen katkeamiseen (kuva 6), minkä solun korjausmekanismit korjaavat helposti. Sokeriosan muutokset ovat myös suunnilleen yhtä yleisiä kuin emäsosan muutokset, eikä molempien juosteiden katkeamista tapahdu UV-säteilyn vaikutuksesta käytännössä koskaan.[62]

Emäsosassa molekyyli virittyy absorboidessaan fotonin ja virityksen purkautuessa syntyy valoreaktiotuote, jossa on yhdistyneenä kaksi peräkkäistä saman juosteen pyrimidiiniä (tymiini/urasiili ja sytosiini) [20, 68]. Mahdollisia pyrimidiinipareja on neljä: T-T, T-C, C-T ja C-C. DNA:ssa yleisin valoreaktiotuote on syklobutaani-pyrimidiini-dimeeri (CPD, engl. cyclobutane pyrimidine dimer)(kuva 6), joka muodostuu, kun vierekkäisten pyrimidiinien 5- ja 6-hiilten välille syntyy kovalenttiset sidokset (muodostaen syklobutaanin)(kuva 9) [62]. Todennäköisin pyrimidiinipari, joka muodostaa CPD:n, on T-T (noin 56 %), jota seuraa T-C (noin 28 %), C-T (noin 11 %) ja C-C (noin 6 %). UVA, UVB ja GUV/UVC voivat kaikki aiheuttaa CPD:n muodostumisen, mutta UVA tuottaa muita pyrimidiiniparimuotoja huomattavasti todennäköisemmin T-T-muodon [62]. RNA-viruksilla esiintyy luonnollisesti T-T-muodon sijaan U-U-muoto [8].

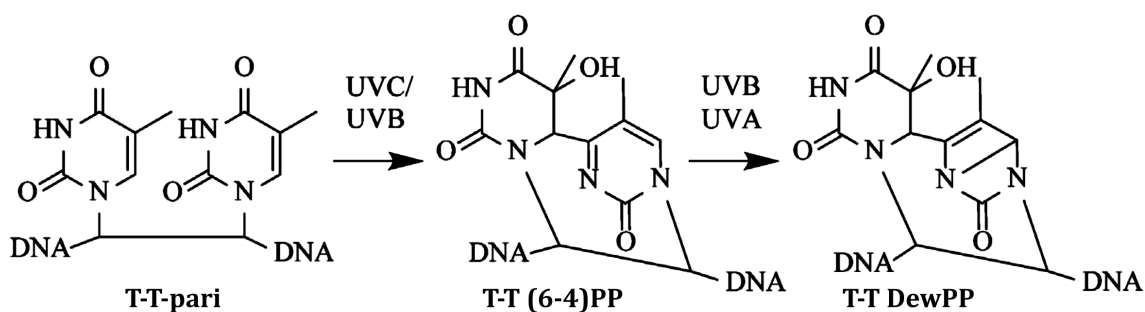
Toinen yleinen valoreaktiotuote on (6-4)PP (engl. (6-4) pyrimidine-pyrimidone



Kuva 9. CDP:n muodostuminen T-T- ja T-C- pareista: pyrimidiinien 5- ja 6-hiilen välille syntyy kovalenttiset sidokset. Kuva on Ravanatin *et al.* [62] artikkelista (muokattuna).

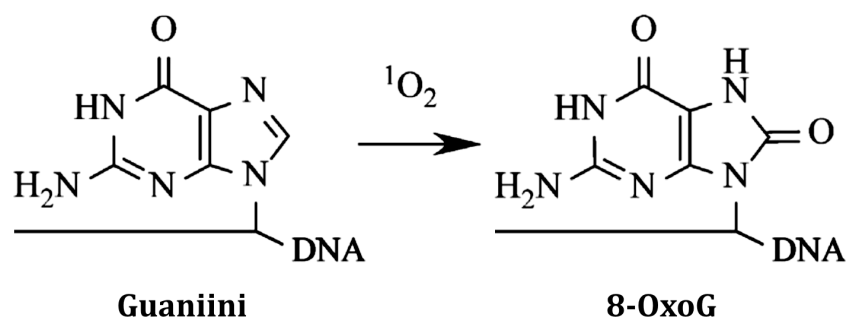
photoproduct)(kuva 6), joka muodostuu, kun 5'-pyrimidiinin 5- ja 6-hiilen välinen kaksoissidos katkeaa, jonka jälkeen sen 6-hiilen ja 3'-pyrimidiinin 4-hiilen välille muodostuu kovalenttinen sidos (kuva 10). Todennäköisin pyrimidiinipari, joka muodostaa (6-4)PP:n, on T-C, kun taas C-T-muotoa ei juuri esiinny. DNA:ssa (6-4)PP:tä syntyy CPD:hen verrattuna 2-8 kertaa vähemmän riippuen mittaustavasta, ja sen voi aiheuttaa ainoastaan UVB- ja GUV/UVC-aallonpituusalueet. (6-4)PP:stä voi seurata valoisomerisaatioreaktiossa (engl. photo-isomeration) kolmas valoreaktiotuote, jos 325 nm foton absorboituu T-T- tai C-T-muotoon, tai jos 315 nm foton absorboituu T-C- tai C-C-muotoon: "Dewar-valenssi-isomeeri" (engl. Dewar valence isomer) eli DewPP (kuva 6), jossa 3'-pyrimidiinin 3- ja 6-hiilen välille muodostuu sidos [20, 63]. Näiden kolmen lisäksi on myös muita mahdollisia valoreaktiotuotteita, kuten adeniinia sisältävät dimeerit (kuten A-T) ja pyrimidiinihydraatit, mutta ne ovat huomattavasti harvinaisempia.[62]

Epäsuorassa syntyvässä UVA-säteily, kuten myös näkyvä valo 670 nm saakka, tuottaa mikrobissa reaktiivisiä happiradikaaleja, kuten singlettihapetta (virittynyt

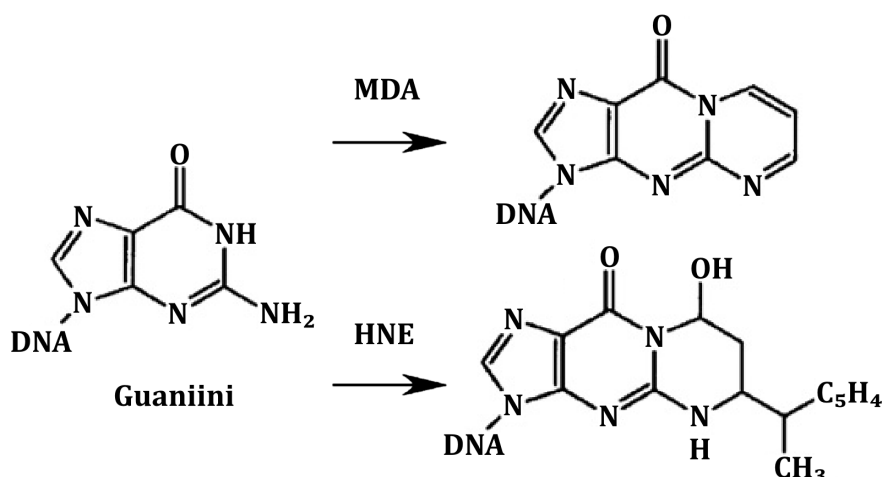


Kuva 10. (6-4)PP:n muodostuminen T-T-parista: 5'-pyrimidiinin 5- ja 6-hiilen välinen kaksoissidos katkeaa, jonka jälkeen sen 6-hiilen ja 3'-pyrimidiinin 4-hiilen välille muodostuu kovalenttinen sidos. DewPP:n muodostuminen valoisomerisaatioreaktion seurauksena: 3'-pyrimidiinin 3- ja 6-hiilen välille muodostuu kovalenttinen sidos. Kuva on Ravanatin *et al.* [62] artikkelista (muokattuna).

happimolekyyli, $^1\text{O}_2$) fotonien absorboituessa mikrobin happimolekyyliin (kuva 6) [20, 63]. Syntyneet reaktiiviset happiradikaalit reagoivat herkästi DNA:n kanssa, eli aiheuttavat DNA:han oksidatiivista stressiä. DNA-vaurio syntyy näin epäsuorasti, kun syntynyt singlettihappi hapettaa tiettyjen nukleotidien emäsosaa, guaniinia, muodostaen 8-Oksoguaaniini- eli 8-OxoG-molekyylin (engl. 8-oxo-7,8-dihydro-2'-deoxyguanosine) (kuvat 11 ja 6) [20, 64]. DNA vaurioituu myös toista epäsuoraa reittiä, jos UVA aiheuttaa solukalvossa lipidiperoksidaation muodostaen malondialdehydin (MDA) tai 4-hydroksinonenaalin (HNE) (kuva 6), jotka sitten kiinnittyvät nukleotideihin (kuva 12). Tällaisia aineita kutsutaan "DNA-addukteiksi" (engl. DNA adduct)(kuva 6) [20].



Kuva 11. Singlettihappi hapettaa guaniinin ja muodostaa 8-OxoG-molekyylin. Kuva on Ravanatin *et al.* [62] artikkelista (muokattuna).



Kuva 12. DNA-adduktit: Malondialdehydin (MDA) ja 4-hydroksinonenaalin (HNE) kiinnittyminen guaniiniin. Kuva on Nairin *et al.* [70] artikkelista (muokattuna).

DNA:n muoto muuttuu näiden DNA-vaurioiden seurauksena ja solun normaali toiminnat, kuten DNA:n kahdentuminen ja proteiinisynteesi, eivät fyysisesti voi enää tapahtua [20, 63]. Solu on siis toistaiseksi elossa, mutta lisääntymiskyvyn [15]. Tämä on lopputilanne ennen kuin mahdolliset korjausmekanismit ja/tai ohjelmoituun solukuolemaan johtavat signaaliketjut alkavat vaikuttaa.

3.8 Mikrobin korjausmekanismit

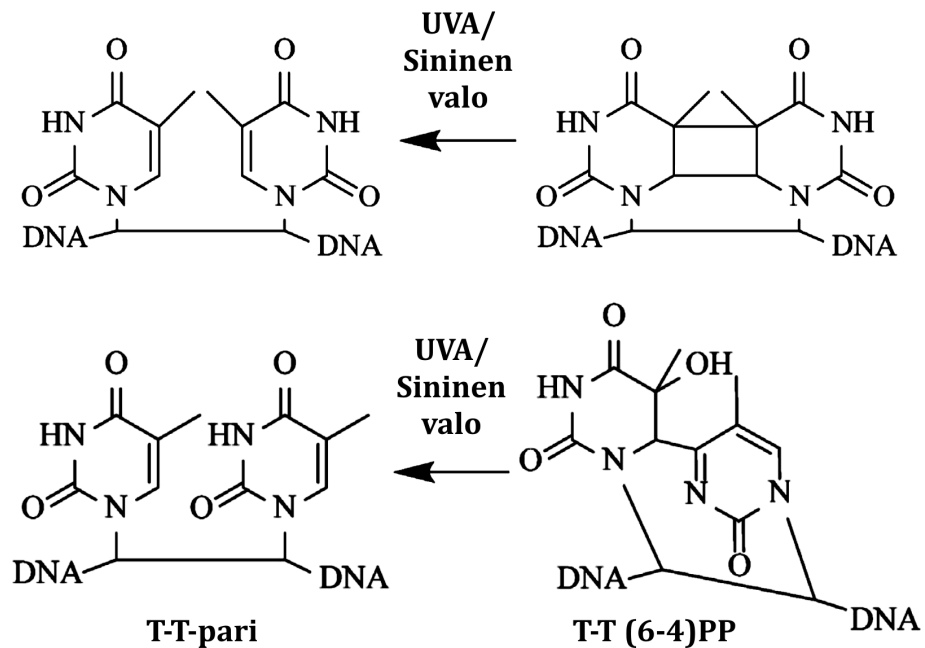
Mikrobit ovat viruksia lukuun ottamatta solullisia, ja ne kykenevät siksi korjaamaan UV-säteilyn aiheuttamia vaurioita. Viruksilla ei ole omia korjausmekanismeja, mutta ne voivat sen sijaan hyödyntää isäntäsolun mekanismeja [15, 66]. Erikoistuneet proteiinit skannaavat jatkuvasti DNA:ta, ja törmätessään vaurioon ne käynnistävät korjausmekanismit [65]. Nämä korjausmekanismit voidaan jakaa kahteen luokkaan: pimeä- (engl. dark) ja valomekanismit (engl. light mechanisms), joista nimensä mukaisesti jälkimmäinen tarvitsee tietynlaista sähkömagneettista säteilyä toimiakseen [15]. Käydään seuraavaksi läpi lyhyesti muutaman eri korjausmekanismin periaatteita sekä arvioidaan edellä mainittujen virheiden korjaamisen helppoutta.

Pimeämekanismeja ovat mm. leikkauskorjaus (engl. excision repair), rekombinaa-

tiokorjaus (engl. recombinational repair) ja SOS-vaste (engl. SOS response). Monivaiheisessa leikkauskorjauksessa useiden solun entsyymien avulla leikataan vaurion sisältävä pala juostetta irti DNA:sta ja aukko paikataan uusilla nukleotideilla. Koska vain tietyt emäsparit ovat mahdollisia, käyttää solu ehjää juostetta mallina viallisen juosteen korjaamiseen [11, 69]. Leikkauskorjaus ja varsinkin sen alalaji nukleotidin leikkauskorjaus (engl. nucleotide excision repair, NER) kykenevät korjaamaan monia vaurioita, kuten CPD- ja (6-4)PP -valoreaktiotuotteet, DNA-adduktit ja jotkin oksidatiivisen stressin aiheuttamat vauriot. Rekombinaatiokorjaus on tehokas ja virhevapaa mekanismi, joka tunnistaa ja korjaa useita proteiineja hyödyntäen sekä yhden juosteen että kahden juosteen katkokset. SOS-vaste taas aktivoituu, kun DNA:ssa on merkittävä määrä virheitä, joita muut korjausmekanismit eivät kykene korjaamaan vaaditussa ajassa, kun mikrobin elossa pysymisen kannalta tärkeiden toimintojen täytyy välttämättä jatkua. Karkeasti sanottuna SOS-vaste saa aikaan useita mekanismeja, jotka korjaavat ”väkisin” tiettyjä vaurioita ja toisaalta saavat solun toiminnot ohittamaan vauriot ja jatkaamaan toimintaansa. Tämän seurauksena sekä korjauskohtiin että toimintojen tuotoksiin syntyy virheitä. SOS-vaste onkin nimensä mukaisesti keino pelastaa solu ”keinolla millä hyvänsä”.[65]

Valomekanismina bakteereilla on valoregenerointi (engl. photoreactivation), jossa fotolyaasi-entsyymi (engl. photolyase enzyme) yksinkertaisesti peruuttaa dimeerin muodostumisen ja erottaa pyrimidiinit taas erilleen katkaisemalla pyrimidiinien väliset kovalenttiset sidokset (kuva 13) [15, 20, 64]. Energia sidosten katkaisemiseen tulee absorboidulta UVA- tai sinisen valon fotonilta, joka yksinään riittää yhden dimeerin erottamiseen. Korjausmekanismi toimii ainoastaan CPD- ja (6-4)PP-valoreaktiotuotteisiin [65].

Eri vaurioiden korjaamisen helppoutta/nopeutta on vaikea verrata toisiinsa, koska moni tekijä vaikuttaa niihin. Tässä kuitenkin muutama maininta kirjallisuudesta. Yhden juosteen katkeamiset tunnistetaan ja korjataan nopeasti [62]. Dimeereistä



Kuva 13. Fotolyaasi-entsyymin valoregenerointireaktio, jossa UVA- tai sinisen valon fotonin energia katkaisee pyrimidiinien väliset kovalenttiset sidokset. Kuva on Nairin *et al.* [70] artikkelista (muokattuna).

myös (6-4)PP korjataan solussa nopeasti ja se on helpompi korjata kuin CPD [20]. Rastogi *et al.* [65] ehdottaa perusteluksi, että (6-4)PP on helpompi havaita, koska se muuttaa DNA:n muotoa enemmän. Ravanant *et al.* [62] taas kertoo, että DewPP on yhtä helppo korjata kuin (6-4)PP ja mainitsee erityisesti, että CPD:iden korjaaminen on hidasta.

Perusidea ohjelmoidussa solukuolemassa on, että mutatoitunutta geeniä vaurioituneessa DNA:ssa ei kopioida ja epänormaalisti toimivia soluja ei synny lisää. Kun tietyt tekijät siis tunnistavat, että solun vauriot eivät korjaannu tai on olemassa muuten riski, että mutatoituneita genejä kopioidaan, aiheutuu reaktioketjuja, jotka johtavat ohjelmoituun solukuolemaan. Ja vaikka yksisoluisilla eliöillä tämä tarkoittaa koko eliön kuolemaa, samat periaatteet pätevät [20, 71]. Kaikista mahdollisista mikrobin vaurioista nimenomaan DNA-vauriot johtavatkin kaikkein todennäköisimmin ohjelmoituun solukuolemaan, ja kaikista mahdollisista DNA-vaurioista syyppää on todennäköisimmin CPD:n korjaamattomuus [20]. Batista *et al.* [20] mainitsee

myös tutkimuksesta, jonka mukaan soluilla olisi 8 tunnin aikaikkuna korjata DNA-vauriot. Jos vaurioita ei korjata aikaikkunassa, käynnistyvät ohjelmoidun solukuoleman reaktioketjut, jolloin vaurioiden korjaamisella ei ole enää väliä solun kuolemisesta kannalta (kuva 6).

Voidaan siis todeta, että on hyvin vaikea johtaa yhtä tiettyä tapaa, jolla mikrobi varmasti kuolee tai edes muuttuu lisääntymiskyvyttömäksi, mutta CPD:iden muodostaminen suurissa määrin on ainakin hyvä lähtökohta. Koska T-T-muodon CPD:tä muodostui eniten ja kuvan 7 mukaan tyymiinin absorptiospektrin huippu on 265 nm kohdilla, voinee olettaa, että 265 nm GUV-lampulla ja suurella UV-säteilyannoksella pitäisi päästä parhaisiin tuloksiin. Katsotaan seuraavaksi, millaisia tutkimustuloksia eri aallonpituuksilla on saatu.

4 Tutkimustuloksia eri UV-aallonpituuksilla

Tähän osaan on kerätty joitakin saatavilla olevia tutkimuksia, jotka käsittelevät UV-dekontaminaatiota, ja joissa on todettu merkittäviä mikrobeja dekontaminoivia vaikutuksia. Tutkimusten lähteet on eritelty aallonpituuksittain taulukossa I, ja ne käsitellään kappaleissa seuraaviin aallonpituusalueisiin jaoteltuina: FUV 172–193 nm, GUV 207–250 nm, GUV 254–280 nm, UVB 281–313 nm ja UVA 320–365 nm. Kappaleissa käytetään vertailukohteena 254 nm GUV-säteilyä aina kun mahdollista, koska sitä tuottava LP-lamppu on ollut kautta aikain yleisin UV-dekontaminaatiossa käytetty lampputyypä. [22]

4.1 VUV 172–193 nm

Xe₂* -eksimeerilampun tuottama 172 nm säteily, LP-lampun tuottama 185 nm säteily ja ArF -eksimeerilampun tuottama 193 nm säteily absorboituvat hyvin väliaineeseen, kuten veteen ja ilmaan, mikä tekee niistä hyödyllisiä lähinnä veden desinfiointissa. Esimerkiksi 185 nm kohdalla säteilyn määrä pienenee 90 %:lla vain puolen senttimetrin matkalla. Vedessä VUV-aallonpituudet muodostavat absorboituessaan kymmeniä erilaisia yhdisteitä, kuten hydroksyyliiradikaaleja (•OH), ja desinfiioiva vaikutus koostuukin pääasiassa mikrobin ulkopuolisten hapetusprosessien kautta mikrobin soluseinässä muodostuvista vaurioista. Suoriin vaikutuksiin esimerkiksi 172 nm säteily on varsin tehoton, ja vaaditaankin moninkymmenkertainen UV-säteilyannos 254 nm säteilyyn verrattuna, jotta saadaan vastaava desinfiioiva tulos (*B. subtilis* -bakteerin itiöt, 870 mJ/cm² vastaan 40,4 mJ/cm²).[72, 74, 77]

4.2 GUV 207–250 nm

Kuten aikaisemmin on mainittu, mikrobien proteiinit absorboivat hyvin GUV-aallonpituuksia [15]. GUV-aallonpituusalueella proteiinien absorbanssi on pienimmillään

Taulukko I. Kooste tässä osassa käsiteltävistä lähteistä, joissa käsitellään kyseisten aallonpituuksien dekontaminoivia vaikutuksia eri mikrobeissa.

Aallonpituus [nm]	Lähde	Aallonpituus [nm]	Lähde
172	[72]	268	[12, 73]
185	[74]	270	[75, 76]
193	[77, 78]	275	[12, 76]
207	[79]	279	[12, 76]
210	[75]	280	[12, 41, 75]
213	[77]	281	[80]
220	[75]	282	[81]
222	[72, 73, 82, 83]	290	[75]
230	[75]	298	[73]
233	[12, 84, 85]	307	[86]
240	[75]	308	[87, 88]
250	[75]	310	[89]
254	[41, 72, 73, 75, 82]	311	[73]
255	[12, 80]	313	[90]
260	[12, 41, 75]	320	[91]
265	[12, 92, 93]	355	[78]
266	[12, 76, 94]	365	[73, 95, 96]

noin 250 nm kohdilla ja kasvaa merkittävästi siirryttäessä pienempiin aallonpituuksiin [79]. Esimerkiksi KrBr*-eksimeerilampun tuottaman 207 nm kohdalla absorptanssi on moninkymmenkertainen 250 nm verrattuna [79]. Tämän ansiosta mm. 207 nm, 222 nm tai 233 nm säteily eivät tunkeudu juurikaan ihoon, eivätkä aiheuta kudoksessa merkittävästi DNA-vaurioita, mikä tekee niistä 254 nm säteilyä paremmat vaihtoehdot tilanteissa, joissa ei haluta vahingoittaa elävää kudosta [82–85]. 207 nm säteilyä vaaditaan myös noin nelinkertainen UV-säteilyannos 254 nm verrattu-

na, jotta saadaan vastaava desinfiioiva tulos (MRSA-bakteeri, 135 mJ/cm² vastaan 35 mJ/cm²) [79].

Nd:YAG-laserilla ja optisella parametrioskillaattorilla tuotetut 210 nm, 220 nm ja 230 nm säteilyt inaktivoivat tyypin 2 adenoviruksen huomattavasti pienemmällä UV-säteilyannoksella kuin 254 nm säteily (6,4 mJ/cm², 10,0 mJ/cm² ja 19,1 mJ/cm² vastaan 100 mJ/cm²) ja 240 nm säteilyllä UV-säteilyannos oli lähes sama (103 mJ/cm²) [75]. Lisäksi *E. coli* -bakteerin kohdalla samankaltaisella järjestelyllä tuotetun 213 nm säteilyn kanssa riittää moninkertaisesti pienempi UV-säteilyannos kuin 254 nm säteilyllä, jotta saadaan vastaava desinfiioiva tulos (0,8 mJ/cm² vastaan n. 5-8 mJ/cm²) [77, 97].

KrCl-eksimeerilampun tuottamaa 222 nm säteilyä on tutkittu usean mikrobin kanssa, ja desinfiioivan UV-säteilyannoksen suuruus vaihtelee paljon riippuen mikrobia. Yleisesti virusten sekä *E. coli* -bakteerin inaktivointiin vaadittava UV-säteilyannoksen suuruus on samaa luokkaa kuin 254 nm säteilyllä.[72, 73, 82, 97]

4.3 GUV 254-280 nm

Kuten sanottu, useiden bakteerien, virusten ja alkueliöiden absorptiospektrien huiput ovat 253–270 nm aallonpituusalueella [7]. Tarkastellaan siis muutaman mikrobin näkökulmasta, miten UV-säteilyannokset eroavat eri aallonpituuksien välillä. Esimerkiksi poliovirus PV-1 vaatii 254 nm säteilyä hieman suuremman UV-säteilyannoksen kuin UV-LED:in tuottamat 260 nm ja 280 nm säteilyt, jotta saadaan vastaava desinfiioiva tulos (28 mJ/cm² vastaan 17 mJ/cm² ja 20 mJ/cm²) [41]. Tyypin 2 adenoviruksen kanssa taas inaktivaatioon vaadittava UV-säteilyannos on 254 nm säteilyllä samaa luokkaa kuin 260 nm, 270 nm ja 280 nm säteilyillä [75].

E. coli - ja *S. Typhimurium* -bakteerin kohdalla 266 nm säteilyllä riittää moninkertaisesti pienempi UV-säteilyannos kuin 254 nm säteilyllä, jotta saadaan vastaava desinfiioiva tulos (n. 5 mJ/cm² vastaan n. 1 mJ/cm²) [94]. UV-LED:in tuottamilla

266 nm, 270 nm, 275 nm ja 279 nm säteilyillä ei ole keskenään suurta eroa deaktiivoinnin kannalta tiettyjen bakteerien, kuten *E. coli*, ja sienten kohdalla [76]. Näiden lisäksi ainakin 265 nm ja 268 nm säteilyillä on dekontaminoivia vaikutuksia, mutta tutkimukset eivät olleet vertailtavissa 254 nm säteilyyn [12, 92, 93].

4.4 UVB 281–313 nm

UVB-aallonpituusalueella dekontaminaation vaatima UV-säteilyannoksen suuruus vaikuttaa kasvavan, kun siirrytään pitempiin aallonpituuksiin. *E. coli* -bakteerin kohdalla UV-LED:in tuottamalla 281 nm säteilyllä tarvitaan huomattavasti suurempi UV-säteilyannos kuin 255 nm säteilyllä (12,6 mJ/cm² vastaan 5,0 mJ/cm²) ja toisaalta 311 nm säteilyllä tarvitaan suurempi UV-säteilyannos kuin 298 nm säteilyllä, jotta saadaan vastaava desinfiioiva tulos [73, 80]. Sama päti myös 310 nm säteilyyn ja 265 nm säteilyyn välillä (56,9 mJ/cm² vastaan n. 3 mJ/cm²) [89]. LP-lampun tuottamalla 313 nm säteilyllä propionibakteerin kohdalla ei myöskään saavutettu desinfiointin (log-3) tasoa edes 3000 mJ/cm² UV-säteilyannoksella, johon päästään 254 nm säteilyllä tyypillisesti alle 50 mJ/cm² UV-säteilyannoksella bakteereilla [90, 97].

XeBr-eksimeerilampun tuottamalla 282 nm sekä LP-lampun tuottamalla 307 nm säteilyillä on todettu olevan dekontaminoivia vaikutuksia, mutta tutkimukset eivät olleet vertailtavissa 254 nm säteilyyn [81, 86]. Sama päti XeCl-eksimeerilampun tuottamaan 308 nm säteilyyn, jonka todettiin deaktivoivan bakteereja, kuten *E. coli* [87, 88].

4.5 UVA 320–365 nm

UVA-aallonpituusaluetta hyödyntäviä tutkimuksia, jotka olisivat havainneet merkittäviä mikrobeja dekontaminoivia vaikutuksia, oli saatavilla huomattavasti vähemmän ja osassa käytettiin apuna valolle herkistäviä aineita, kuten S-59:ää (amotosa-

leenihydrokloridi) [91]. *E. coli* -bakteerin kohdalla Nd:YAG-laserin tuottama 355 nm säteily vaatii useita satoja kertoja suuremman säteilyannoksen kuin 266 nm säteily, jotta saadaan vastaava desinfiiva tulos (n. 15000 mJ/cm² vastaan n. 20 mJ/cm²) [98]. UV-LED:in tuottamaa 365 nm säteilyä käsittelevissä tutkimuksissa tarvittiin myös hyvin korkeita UV-säteilyannoksia [95, 96].

5 Sovellusten haasteita

Pinnalla, jolla mikrobi on, on merkittävä vaikutus dekontaminoinnin tehokkuuteen. Jos pinta on esimerkiksi epätasainen tai huokoinen, syntyy varjostusta, joka vähentää UV-säteilyn intensiteettiä mikrobin pinnalla [11, 12]. Mikrobi voi olla esimerkiksi naarmun suojissa tai sisällä huokoisessa hengityssuojassa [11, 12]. Toisaalta myös mikrobit itsessään varjostavat toisiaan, koska ne absorboivat osan niihin tunkeutuvasta säteilystä [1, 11]. Jos mikrobeja on esimerkiksi tason päällä kerrostuneena ja UV-säteily tulee vain yhdestä suunnasta, varjostavat päälikerroksen mikrobit alla olevia mikrobeja [11]. Tutkimuksissa nämä varjostavat vaikutukset voidaan välttää käyttämällä suspensiota eli seosta, jossa tutkittavat mikrobit on sekoitettu hyvän läpäisykyvyn omaavaan nesteeseen, jota sekoitetaan aktiivisesti [11]. Esimerkiksi Liun *et al.* [99] artikkelissa todettiin, että 222 nm ja 254 nm säteilyllä suspension mikrobien omalla varjostuksella ei ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Lisäksi on tutkittu HEPA-suodattimelle vaihtoehtoista 3d-suodatinmateriaalia, jossa läpäisyprosentilla ja suodattimen paksuudella on lineaarinen yhteys [100]. Toisin kuin HEPA-suodattimessa, UV-säteily pääsee tunkeutumaan 3d-suodatinmateriaalin pintakerroksen lisäksi syvälle suodattimen sisälle [100].

Yksittäisen UV-säteilylähteen kanssa muodostuu myös herkästi varjoalueita, jos dekontaminoitava kohde on esimerkiksi jokin esine, koska UV-säteily ei luonnollisesti pysty vaikuttamaan kulmien taakse, tai jos esimerkiksi ilmastointikanavan seinämissä on fyysinen este, kuten kertynyttä likaa [12, 13]. Ratkaisu näihin käytännön ongelmiin on useampien UV-säteilylähteiden käyttö, jolloin kohdetta voi säteilyttää useammasta suunnasta, sekä heijastavat pintamateriaalit, joilla saa ohjattua kohteen ohittavan sekä kohteen läpäisevän UV-säteilyn takaisin kohteeseen [13]. Pinnat tulisi myös puhdistaa näkyvästä liasta ennen UV-dekontaminaatiota [13]. Lisäksi vedenpuhdistamoissa täytyy ottaa huomioon virtausnopeus, koska mitä nopeammin vesi virtaa UV-reaktorin läpi, sitä pienempi on jokaisen veden mukana kulkevan mikro-

bin UV-säteilyannos [27]. Tässä tapauksessa joko suurempitehoisten UV-lamppujen käyttö tai useampien pienitehoisten UV-lamppujen käyttö sallii suuremman virtausnopeuden [27].

Heijastavia materiaaleja käytetään esimerkiksi UV-LED:eissä suuntaamaan UV-säteilyä. Näin mahdollisimman suuri osa tuotetusta säteilystä saadaan kohdistettua esimerkiksi dekontaminoinnin kohteeseen [44]. Ksenon-kaarilamput, LP-lamput sekä jotkin eksimeerilamput säteilevät niiden rakenteen vuoksi UV-säteilyä joka suuntaan, jolloin suuntaamiseen voidaan käyttää ulkoisia heijastimia [36]. Säteilyn intensiteettiä kohteen pinnalla voidaan lisätä näin huomattavasti [36]. Desinfiioivissa kaapeissa ja ilmastointikanavissa käytetään heijastavia materiaaleja, jotta mahdollisimman suuri osa säteilystä absorboituu mikrobeihin [8]. Tarkoitus on, että kaikki UV-fotonit, jotka ohittavat tai läpäisevät mikrobin, heijastuvat seinistä takaisin niin monta kertaa, että ne absorboituvat [8, 101]. Lopuksi mainittakoon vielä huoneilmaa desinfiioivat laitteet, joissa heijastavia materiaaleja käytetään UV-säteilyn suuntaamiseen pois ihmisistä ja kohti esimerkiksi kattoa [4].

6 Yhteenveto

UV-säteilyä käytetään siis laajalti UV-desinfointiin ja sille on kehitetty lukuisia sovelluksia eri käyttötarkoituksiin. UV-dekontaminaatio itsessään perustuu pohjimmiltaan fysikaalisiin mekanismeihin, joissa UV-säteily saa aikaan muutoksia mikrobissa, johtaen mikrobin toiminnan häiriintymiseen ja jopa mikrobin kuolemaan. Lukuisien eri UV-allonpituuksien dekontaminoivia vaikutuksia on tutkittu, mutta tuloksia on vaikea vertailla keskenään, koska tutkimuksissa on paljon muuttuvia tekijöitä eikä kriittisiä yksityiskohtia välttämättä mainita. Tähän lienee syynä standardisoidun mittaustavan puuttuminen.

Tämä työ antaa hyvän yleiskuvan fysikaalisista mekanismeista UV-dekontaminaation taustalla, UV-dekontaminaation eri sovelluksista sekä haasteista aiheen tutkimisen kannalta, mutta on silti vain pintaraapaisu käsitellyistä aiheista. UV-LED:ien kehitystä kannattaa pitää erityisesti silmällä, sillä se tulee varmasti tulevaisuudessa avaamaan uusia mahdollisuuksia sekä tutkimuksille että uudentlaisille UV-sovelluksille.

Viitteet

- [1] AWWA Staff ja C. A. Cotton, *The Ultraviolet Disinfection Handbook*, 1 ed. (American Water Works Association, 2008), luku 2, pp. 11–24.
- [2] Zion National Park, National park service U.S.Department of Interior 1 (2014).
- [3] AWWA Staff ja C. A. Cotton, *The Ultraviolet Disinfection Handbook*, 1 ed. (American Water Works Association, 2008), luku 1, pp. 1–10.
- [4] S. Jr, C. Dunn, J. Frainhaut, W. Bahnfleth, J. Lau ja A. Nedeljkovic-Davidovic, *ASHRAE Journal* **50**, 28 (2008).
- [5] C. F. Green ja P. V. Scarpino, *Environmental Engineering and Policy* **3**, 101 (2001).
- [6] K. G. Linden ja J. L. Darby, *Journal of Environmental Engineering* **123**, 1142 (1997).
- [7] J. Chen, S. Loeb ja J. H. Kim, *Environmental Science: Water Research and Technology* **3**, 188 (2017).
- [8] F. Cattai, A. D’Orazio ja G. Sbardella, *Energies* **16**, (2023).
- [9] D. T. Weaver, B. D. McElvany, V. Gopalakrishnan, K. J. Card, D. Crozier, A. Dhawan, M. N. Dinh, E. Dolson, N. Farrokhian, M. Hitomi, E. Ho, T. Jagdish, E. S. King, J. L. Cadnum, C. J. Donskey, N. Krishnan, G. Kuzmin, J. Li, J. Maltas, J. Mo, J. Pelesko, J. A. Scarborough, G. Sedor, E. Tian, G. C. An, S. A. Diehl ja J. G. Scott, *PLoS ONE* **16**, 1 (2021).
- [10] T. Singh, T. Duba, L. Muleba, D. O. Matuka, D. Glaser, E. Ratshikhopha, Z. Kirsten, T. van Reenen, Z. Masuku, D. Singo, L. Ntlailane, T. Nthoke, D. Jones, M. Ross ja P. du Toit, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **20**, 40 (2023).
- [11] T. P. Coohill ja J. L. Sagripanti, *Photochemistry and Photobiology* **84**, 1084 (2008).
- [12] T. Nicolau, N. Gomes Filho, J. Padrão ja A. Zille, *Materials* **15**, 2854 (2022).
- [13] C. Baudart ja T. Briot, *Pharmacy* **13**, 9 (2025).
- [14] M. Raeiszadeh ja B. Adeli, *ACS Photonics* **7**, 2941 (2020).
- [15] AWWA Staff ja C. A. Cotton, *The Ultraviolet Disinfection Handbook*, 1 ed. (American Water Works Association, 2008), luku 3, pp. 25–40.
- [16] W. A. Wolken, J. Tramper ja M. J. Van Der Werf, *Trends in Biotechnology* **21**, 338 (2003).

- [17] S. Mohapatra, kirjassa *Essentials of Neuroanesthesia*, 1 ed., toimittanut H. Prabhakar (Academic Press, 2017), luku 59, pp. 929–944.
- [18] G. McDonnell ja D. Sheard, *A Practical Guide to Decontamination in Healthcare*, 1 ed. (John Wiley & Sons, Incorporated, 2012), pp. 1–17.
- [19] E. A. Sosnin, E. Stoffels, M. V. Erofeev, I. E. Kieft ja S. E. Kunts, IEEE Transactions on Plasma Science **32**, 1544 (2004).
- [20] L. F. Batista, B. Kaina, R. Meneghini ja C. F. Menck, Mutation Research - Reviews in Mutation Research **681**, 197 (2009).
- [21] S. I. Ahmad, L. , Christensen ja E. , Baron, kirjassa *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment*, toimittanut S. I. Ahmad (Springer International PublishingCham, 2017), luku 1, pp. 3–11.
- [22] R. S. Bergman, Photochemistry and Photobiology **97**, 466 (2021).
- [23] S. Cremers-Pijpers, C. van Rossum, M. Dautzenberg, H. Wertheim, A. Tostmann ja J. Hopman, Infection Prevention in Practice **3**, 100133 (2021).
- [24] J. I. Mathew, J. L. Cadnum, T. Sankar, A. L. Jencson, S. Kundrapu ja C. J. Donskey, American Journal of Infection Control **44**, 724 (2016).
- [25] O. J. Khazova M, Johnstone L, Naldzhiev D, Photochem Photobiol. **97**, 560 (2021).
- [26] P. Palakornkitti, P. Pinyowiwat, S. Tanrattanakorn, N. Rajatanavin ja P. Rattanakorn, Scientific Reports **11**, 1 (2021).
- [27] AWWA Staff ja C. A. Cotton, *The Ultraviolet Disinfection Handbook*, 1 ed. (American Water Works Association, 2008), luku 5, pp. 49–62.
- [28] R. Scott, L. T. Joshi ja C. McGinn, Healthcare Technology Letters **9**, 25 (2022).
- [29] International Organization for Standardization, ISO 21348 Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories, 2007.
- [30] T. P. Coohill, Advances in Space Research **18**, 27 (1996).
- [31] S. Simmons, C. Dale, J. Holt, K. Velasquez ja M. Stibich, kirjassa *Ultraviolet Light in Human Health, Diseases and Environment*, toimittanut S. I. Ahmad (Springer International PublishingCham, 2017), luku 21, pp. 255–266.
- [32] H. Horvath, Atmospheric Environment Part A, General Topics **27**, 293 (1993).
- [33] PerkinElmer Inc., High Performance Flash and Arc Lamps Lighting, 2001.

- [34] P. Mark ja Opsytec Dr. Groebel, Spectra of UV lamps and UV LEDs, <https://web.archive.org/web/20250323235027/https://www.opsytec.com/uv-applications-knowledge/spectral-database-for-uv-lamps-and-uv-leds>, 2025, (vierailtu 25.5.2025).
- [35] K. Ahlawat, R. Jangra ja R. Prakash, ACS Omega **9**, 15615 (2024).
- [36] M. Lomaev, E. Sosnin ja V. Tarasenko, Progress in Quantum Electronics **36**, 51 (2012).
- [37] M. I. Lomaev, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, V. F. Tarasenko, D. V. Shitts ja M. V. Erofeev, Physics-Uspekhi **46**, 193 (2003).
- [38] H. von Bergmann, U. Rebhan ja U. Stamm, kirjassa *Excimer Laser Technology*, 1 ed., toimittanut D. Basting ja G. Marowsky (Springer Berlin Heidelberg Berlin, Heidelberg, 2005), luku 4, p. 433.
- [39] T. Kumabe, A. Yoshikawa, S. Kawasaki, M. Kushimoto, Y. Honda, M. Arai, J. Suda ja H. Amano, IEEE Transactions on Electron Devices **71**, 3396 (2024).
- [40] A. Kitai, *Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The role of the PN junction*, 1 ed. (John Wiley & Sons, Ltd, 2011), luku 3, pp. 123–158.
- [41] N. Augsburg, A. T. Rachmadi, N. Zaouri, Y. Lee ja P. Y. Hong, Environmental Science and Technology **55**, 16283 (2021).
- [42] P. Tian, X. Shan, S. Zhu, E. Xie, J. J. McKendry, E. Gu ja M. D. Dawson, IEEE Journal of Quantum Electronics **58**, 1 (2022).
- [43] M. B. Rubin, Bulletin for the History of Chemistry **35**, 105 (2010).
- [44] L. P. Singh ja G. Katal, Journal of Engineering Research and Applications **3**, 401 (2013).
- [45] W. Heering, IUVA News **6**, 7 (2004).
- [46] Q-Lab Corporation, A Choice of Lamps for the QUV Accelerated Weathering Tester: TECHNICAL BULLETIN LU-8160, 2019.
- [47] J. R. Bolton ja K. G. Linden, Journal of Environmental Engineering **129**, 209 (2003).
- [48] F. E. Nicodemus, American Journal of Physics **31**, 368 (1963).
- [49] S. E. Braslavsky, Pure and Applied Chemistry **79**, 293 (2007).
- [50] A. Wiśniewski, K. Skarżyński, P. Pracki, R. Krupiński, A. Wolska, M. Wiselka ja A. Pawlak, LEUKOS **21**, 125 (2025).
- [51] C. Navntoft, E. Ubomba-Jaswa, K. McGuigan ja P. Fernández-Ibáñez, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology **93**, 155 (2008).

- [52] Q. Yang, S. O. Pehkonen ja M. B. Ray, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **44**, 3471 (2005).
- [53] R. S. Dubey, *Kuwait Journal of Science* **49**, 1 (2022).
- [54] J. R. Bolton, M. I. Stefan, R. S. Cushing ja E. Mackey, *Proc. First International Congress on Ultraviolet Technologies* (2001).
- [55] AWWA Staff ja C. A. Cotton, *The Ultraviolet Disinfection Handbook*, 1 ed. (American Water Works Association, 2008), luku 7, pp. 219–238.
- [56] Y. Hatano, M. Wang, Z. Guo ja C. Yoshimura, *Journal of Water Process Engineering* **51**, 103383 (2023).
- [57] H. Mamane-Gravetz ja K. G. Linden, *Proceedings of the Water Environment Federation* **2005**, 13 (2012).
- [58] Y. Qian, Y. Shen, F. Sun, J. Chen, M. Tang, F. Chen, Y. Chen, Y. Sun ja H. Shen, *Journal of Non-Crystalline Solids* **635**, 123019 (2024).
- [59] S. Franke, H. Lange, H. Schoepp ja H.-D. Witzke, *Journal of Physics D: Applied Physics* **39**, 3042 (2006).
- [60] S. Schalk, V. Adam, E. Arnold, K. Brieden, A. Voronov ja H.-d. Witzke, **8**, 32 (2005).
- [61] M. Pirnie, K. G. Linden ja J. P. J. Malley, *Environmental Protection* **2**, 1 (2006).
- [62] J. L. Ravanat ja T. Douki, *Radiation Physics and Chemistry* **128**, 92 (2016).
- [63] R. P. Sinha ja D. P. Häder, *Photochemical and Photobiological Sciences* **1**, 225 (2002).
- [64] R. Morita, S. Nakane, A. Shimada, M. Inoue, H. Iino, T. Wakamatsu, K. Fukui, N. Nakagawa, R. Masui ja S. Kuramitsu, *Journal of Nucleic Acids* **2010**, (2010).
- [65] R. P. Rastogi, Richa, A. Kumar, M. B. Tyagi ja R. P. Sinha, *Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair*, 2010.
- [66] P. Thomas, *Bacteria and Viruses* (Lucent Books, 2004), luku 1, pp. 10–25.
- [67] A. Mathys ja D. Knorr, *Food Biophysics* **4**, 77 (2009).
- [68] A. M. Amshawee, M. A. Hussain, S. T. M. A. Muhtaser ja A. A. Al-Faham, *International Journal of Health & Medical Research* **03**, 464 (2024).
- [69] J. D’Orazio, S. Jarrett, A. Amaro-Ortiz ja T. Scott, *International Journal of Molecular Sciences* **14**, 12222 (2013).

- [70] U. Nair, H. Bartsch ja J. Nair, *Free Radical Biology and Medicine* **43**, 1109 (2007).
- [71] G. Häcker, *Microbes and Infection* **15**, 640 (2013).
- [72] D. Wang, T. Oppenländer, M. G. El-Din ja J. R. Bolton, *Photochemistry and Photobiology* **86**, 176 (2010).
- [73] Y. H. Lu, R. X. Wang, H. L. Liu ja A. C. Lai, *Environmental Science and Technology* **58**, 6868 (2024).
- [74] K. Zoschke, H. Börnick ja E. Worch, *Water Research* **52**, 131 (2014).
- [75] S. E. Beck, R. A. Rodriguez, K. G. Linden, T. M. Hargy, T. C. Larason ja H. B. Wright, *Environmental Science and Technology* **48**, 591 (2014).
- [76] D. K. Kim, S. J. Kim ja D. H. Kang, *Food Research International* **97**, 280 (2017).
- [77] M. N. Ediger, G. H. Pettit ja L. S. Matchette, *Lasers in Surgery and Medicine* **21**, 88 (1997).
- [78] G. G. Gurzadyan, H. Gorner ja D. Schulte-Frohlinde, Ultraviolet (193, 216 and 254 nm) photoinactivation of *Escherichia coli* strains with different repair deficiencies, 1995.
- [79] M. Buonanno, G. Randers-Pehrson, A. W. Bigelow, S. Trivedi, F. D. Lowy, H. M. Spotnitz, S. M. Hammer ja D. J. Brenner, *PLoS ONE* **8**, 1 (2013).
- [80] V. Popovic, J. Reman ja T. Koutchma, *Journal of Food Engineering* **357**, (2023).
- [81] I. Tsenter, N. Garkusheva, G. Matafonova ja V. Batoev, *Journal of Environmental Chemical Engineering* **10**, 107537 (2022).
- [82] E. R. Blatchley, D. J. Brenner, H. Claus, T. E. Cowan, K. G. Linden, Y. Liu, T. Mao, S.-J. Park, P. J. Piper, R. M. Simons ja D. H. Sliney, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **53**, 733 (2023).
- [83] D. Welch, M. Buonanno, V. Grilj, I. Shuryak, C. Crickmore, A. W. Bigelow, G. Randers-Pehrson, G. W. Johnson ja D. J. Brenner, *Scientific Reports* **8**, 1 (2018).
- [84] P. Zwicker, J. Schleusener, S. B. Lohan, L. Busch, C. Sicher, S. Einfeldt, M. Kneissl, A. A. Kühn, C. M. Keck, C. Witzel, A. Kramer ja M. C. Meinke, *Scientific Reports* **12**, 2587 (2022).
- [85] C. Sicher, N. Opitz, P. E. Becker, N. Lobo Ploch, J. Schleusener, M. Kneissl, A. Kramer ja P. Zwicker, *Microbes and Infection* **26**, 105320 (2024).
- [86] Y. H. Im ja J. W. Ha, *Food Microbiology* **122**, 104552 (2024).

- [87] M. Folwaczny, T. Liesenhoff, N. Lehn ja H.-H. Horch, *Journal of Endodontics* **24**, 781 (1998).
- [88] H. Deppe, H. H. Horch, V. Schrödl, C. Haczek ja T. Miethke, *Lasers in Medical Science* **22**, 223 (2007).
- [89] K. Oguma, R. Kita, H. Sakai, M. Murakami ja S. Takizawa, *Desalination* **328**, 24 (2013).
- [90] J. W. Fluhr ja M. Gloor, *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine* **13**, 197 (1997).
- [91] L. Lin, D. N. Cook, G. P. Wiesehahn, R. Alfonso, B. Behrman, G. D. Cimino, L. Corten, P. B. Damonte, R. Dikeman, K. Dupuis, Y. M. Fang, C. V. Hanson, J. E. Hearst, C. Y. Lin, H. F. Londe, K. Metchette, A. T. Nerio, J. T. Pu, A. A. Reames, M. Rheinschmidt, J. Tessman, S. T. Isaacs, S. Wollowitz ja L. Corash, *Transfusion* **37**, 423 (1997).
- [92] Y. W. Lee, H. D. Yoon, J. H. Park ja U. C. Ryu, *Journal of the Korean Physical Society* **72**, 1174 (2018).
- [93] T. Hayashi, K. Oguma, Y. Fujimura, R. A. Furuta, M. Tanaka, M. Masaki, Y. Shinbata, T. Kimura, Y. Tani, F. Hirayama, Y. Takihara ja K. Takahashi, *PLoS ONE* **16**, 1 (2021).
- [94] S. J. Kim, D. K. Kim ja D. H. Kang, *Applied and Environmental Microbiology* **82**, 11 (2016).
- [95] M. Mori, A. Hamamoto, A. Takahashi, M. Nakano, N. Wakikawa, S. Tachibana, T. Ikehara, Y. Nakaya, M. Akutagawa ja Y. Kinouchi, *Medical and Biological Engineering and Computing* **45**, 1237 (2007).
- [96] J. Xiao ja H. Zhang, *Food Research International* **199**, 115352 (2025).
- [97] M. Masjoudi, M. Mohseni ja J. R. Bolton, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* **126**, 1 (2021).
- [98] M. K. Azar Daryany, R. Massudi ja M. Hosseini, *Current Microbiology* **56**, 423 (2008).
- [99] W. Taylor, E. Camilleri, D. L. Craft, G. Korza, M. R. Granados, J. Peterson, R. Szczpaniak, S. K. Weller, R. Moeller, T. Douki, W. W. Mok ja P. Setlow, *Applied and Environmental Microbiology* **86**, (2020).
- [100] J. Liu, J. Liu, Y. Fan ja P. Wang, *E3S Web of Conferences* **356**, 1 (2022).
- [101] S. O. de Souza, A. A. Cardoso, A. S. C. Sarmiento ja F. D'Errico, *European Physical Journal Plus* **137**, (2022).