

222-UVC-valon käyttö sterilisoinnin välineenä

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Leo Lahtinen
Tarkastaja:
Dos. Matti Murto

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan laitos

LAHTINEN, LEO 222-UVC-valon käyttö sterilisoinnin välineenä

LuK-tutkielma, 15 s.
Fysiikka
Tammikuu 2024

Tutkielmassa perehdytään viime vuosina yleistyneeseen UV-valon aallonpituuteen 222 nm. Aallonpituus on siitä mielenkiintoinen, että sitä voitaisiin hyödyntää sterilisoinnissa aiheuttamatta vahinkoa ihmiselle. Tällä hetkellä sterilisoinnissa käytetään pääasiassa 254-UVC-valoa, joka aiheuttaa turvallisuusriskin. Tutkimukset ovat osoittaneet, että 222-UVC-valon aiheuttamat vauriot ovat minimaalisia, mutta samalla sen sterilisointikyky on kilpailukykyinen. Tutkielma arvioi yksityiskohtaisesti 222-UVC-valon vaikutusta sekä patogeeneihin, että ihmisiin.

Asiasanat: 222-UVC-valo, 254-UVC-valo, KrCl-lamppu, fluenssi, patogeeni

Sisällys

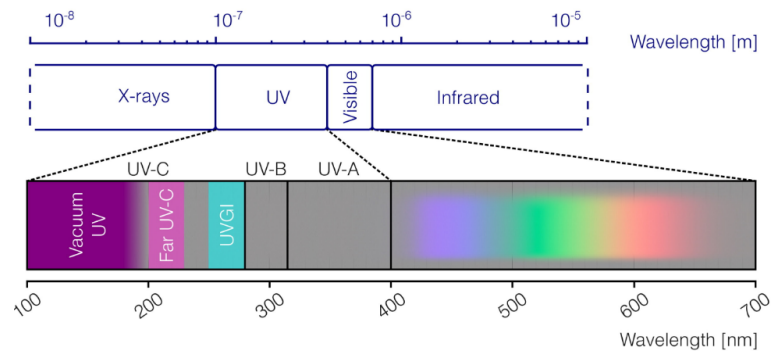
Johdanto	1
1 UV-valo	2
1.1 UV-valon luokittelu	2
1.2 222-UVC-valon tuottaminen	3
2 UVC-valon aiheuttama vaurio patogeeneihin	4
2.1 Eliminointimekanismi	5
2.2 Fluenssin suuruuden evaluointi	7
3 UVC-valon aiheuttama vaurio ihmiselle	9
3.1 Iho	10
3.2 Silmä	11
3.3 Otsoni	13
4 Yhteenveto	14

Johdanto

Tässä tutkielmassa tutustutaan 222-UVC-valoon ja sen käyttöön sterilisoinnin välineenä. UV-valoa on jo pitkään käytetty eri teollisuuden aloilla eliminoimaan patogeeniä, mutta nyt uudet tutkimukset luovat pohjaa sen käytölle jokapäiväiseen ympäristöömme. Idea perustuu siihen, että tutkimuksen kohteena oleva 222-UVC-valo ei aiheuttaisi vahinkoa ihmiselle toisin kuin perinteisesti käytetty UV-valo. Asian tärkeyttä korosti viime vuosina yhteiskuntaa ravistellut covid-19, mihin ratkaisua on etsitty myös 222-UVC-valosta. Tällä keinolla patogeenit pystyttäisiin eliminoimaan jo ilmasta, ennen niiden välittymistä ihmisiin[1].

Tekstissä käydään ensin läpi mitä on 222-UVC-valo ja kerrotaan sen ominaisuuksista. Tekstissä kerrotaan myös, miten tätä valoa tuotetaan, sillä valtaosa tutkimuksista hyödyntää samaa menetelmää. Tämän jälkeen käsitellään 222-UVC-valon vaikutusta patogeeneihin. Teksti pyrkii selvittämään, miten ja mitkä patogeenit tuhoutuvat valon vaikutuksesta. Tämän pitäisi antaa käsitys menetelmän toimivuudesta. Viimeisenä tarkastellaan 222-UVC-valon vaikutusta ihmiseen. Tarkoitus on luoda mahdollisimman laaja käsitys siitä, kuinka turvallinen menetelmä on. Tekstissä on tarkoitus tutkia välittömiä sekä pitkäaikaisia vaikutuksia, vaikkakin näiden tutkimusaineisto on rajallinen. Eläinkokeisiin perustuvan tutkimuksen käyttöä vältetään, sillä teksti ei ota kantaa näiden pätevyyteen ihmiselle. Kuitenkin näitä tutkimuksia käytetään paremman tiedon puutteessa.

Koska tällä hetkellä laajalti sterilisoinnin välineenä käytetty UV-valo on aallonpituudeltaan 254 nm, teksti vertailee laajalti 222-UVC-valoa tähän aallonpituuteen. Vertailu suoritetaan valojen turvallisuudesta sekä tehokkuudesta, ja pohditaan voiko 222-UVC-valo kokonaan korvata nykyään käytetyn UV-valon.



Kuva 1. Valon spektri, jossa näkyvillä UV-valon lajittelu kategorioihin UVA, UVB ja UVC, joka edelleen jakaantuu kolmeen osaan VUV, Far UVC ja UVGI.[2]

1 UV-valo

1.1 UV-valon luokittelu

UV-valo (100-400 nm) luokitellaan kategorioihin UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) ja UVC (100-280 nm). Näiden lisäksi UVC-valo voidaan jakaa alakategorioihin VUV (100-200 nm), Far-UVC (200-230 nm) ja UVGI (250-280 nm). Näitä tietoja havainnollistamaan on esitetty kuva 1. UVGI viittaa aallonpituusalueeseen, jota yleisesti käytetään tällä hetkellä sterilisointiin. On huomattava, että lajittelu vaihtelee lähteen mukaan etenkin UVC-valon alakategorioiden kohdalla. Mainitut aallonpituudet vastaavat pitkälti CIE:n (International Commission on Illumination) suosituksia.[2]

222-UVC-valolla tarkoitetaan valoa, jonka aallonpituus on 222 nm. Se kuuluu UVC-valon alueeseen, mutta nykyään UVC-valon osaa välillä 200-230 nm nimitetään englanninkielisessä kirjallisuudessa usein nimellä "Far-UVC" johtuen sen uniikeista ominaisuuksista[2]. Näistä tärkeimpänä on sen haitattomuus ihmiselle. Kyseessä on epävirallinen nimitys, ja kuvailtu aallonpituusalue saattaa hieman vaihdella lähteen mukaan. Kuitenkin useimmat tutkimukset ovat keskittyneet nimenomaan tälle tietulle aallonpituudelle 222 nm, jota tässäkin tekstissä tarkastellaan. Useita muitakin aallonpituuksia on tutkittu, mutta 222 nm on näihin verrattuna tehokkain[8].

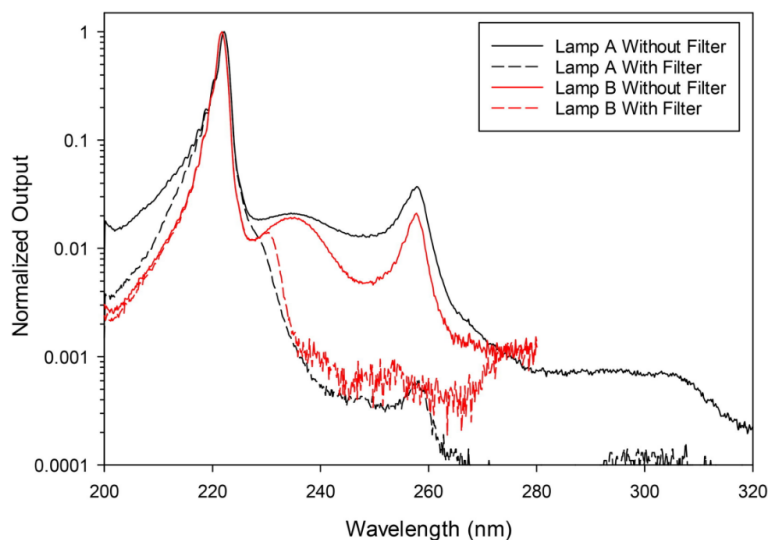
UVGI-valo kattaa aallonpituusalueen 250-280 nm. Tältäkin alueelta on muodostunut käytännöksi käyttää tiettyä aallonpituutta, joka on 254 nm. Tämä aallonpituus saadaan aikaiseksi matalapaineisella elohopealampulla, jonka pääsijainen emissioviiva on kyseisellä aallonpituudella[2]. Kuitenkin viime vuosina näitä lamppeja on alettu korvaamaan UVC-LED-lampuilla, jotka ovat tehokkaampia[3].

1.2 222-UVC-valon tuottaminen

222-UVC-valo tuotetaan useimmiten KrCl-lampulla, jonka pääsijainen emissioviiva on aallonpituudella 222 nm. Muitakin valonlähteitä on, kuten ledejä, lasereita ja metallisia höyrylamppeja, mutta näiden käyttö on toistaiseksi rajallista, ja niiden tuottama aallonpituus on yleensä hieman poikkeava[2]. KrCl-lamppu tuottaa pienissä määrin muitakin aallonpituuksia, kuten ihmiselle haitallisia UVC-valon aallonpituuksia, jotka eliminoidaan käyttämällä suodattimia.

KrCl-lamppu on niin sanottu eksimeerilamppu, jonka toiminta perustuu neutraalin atomin ja virittyneen atomin muodostaman molekyylin hajoamiseen emittoiden fotonin. Tämän mahdollistamiseksi KrCl-seosta sisältävän kammion läpi johdetaan jännite, joka saa kryptonin muuttumaan plasmaksi. Nyt kammioon muodostuu eksimeerejä, jotka ovat siis virittyneitä dimeerejä. Muodostunut eksimeeri purkautuu hyvin nopeasti emittoiden fotonin. Kammioon muodostuu usein erilaisia eksimeerejä, minkä seurauksena eksimeerilamppu tuottaa enemmän kuin yhden spektriviivan. KrCl-lampun tuottama spektri on nähtävissä kuvassa 2. Kuvasta nähdään, että molemmilla lampuilla on ensisijaisen emissiopiikin lisäksi toinen heikko piikki kohdassa 260 nm. [2, 7]

Kun sopiva aallonpituus on valittu, UV-valon altistusta kuvataan fluenssilla[2]. Fluenssi kertoo säteilyenergian määrän pinta-alaa kohden, ja tällä tutkimuksen kohteella arvot ilmoitetaan yksikössä mJ/cm^2 . Fluenssi voidaan myös laskea integroimalla säteilytysvoimakkuus ajan ylitse. Tämä voi olla kätevää, kun halutaan laskea



Kuva 2. KrCl-lampun spektri suodattimella ja ilman suodatinta. Kuvassa esitetty kaksi lamppua, jotka ovat saatavilla kaupallisesti.[2]

spektristä fluenssia (engl. spectral fluence). Fluenssi voidaan siis laskea kaavasta

$$H = \frac{\partial Q}{\partial A} = \int_{t=0} E(t) dt, \quad (1)$$

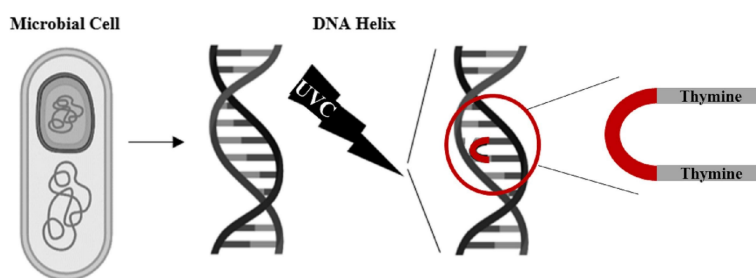
missä H on laskettava fluenssi, Q on säteilyenergia, A on pinta-ala, t on aika ja $E(t)$ on säteilyvoimakkuuden funktio[6]. Säteilyenergian voidaan ajatella olevan fotonien energiaa, joka voidaan laskea kaavasta

$$Q = hf, \quad (2)$$

missä h on Planckin vakio ja f on taajuus. Esimerkki fluenssin laskemisesta todellisessa tilanteessa esitetty kappaleen 2.2 lopussa.

2 UVC-valon aiheuttama vaurio patogeeneihin

Patogeenien itiöt ovat vastuussa monista vakavista sairauksista. Itiöt aiheuttavat myös ruokien pilaantumista. Näiden eliminointi ei kuitenkaan ole helppoa, sillä itiöt ovat resistenttejä monille eri sterilisoinnin keinoille. Yleisesti käytetty 254-UVC-valo on kuitenkin tehokas väline itiöiden eliminoinnissa. Tutkimukset osoittavat,



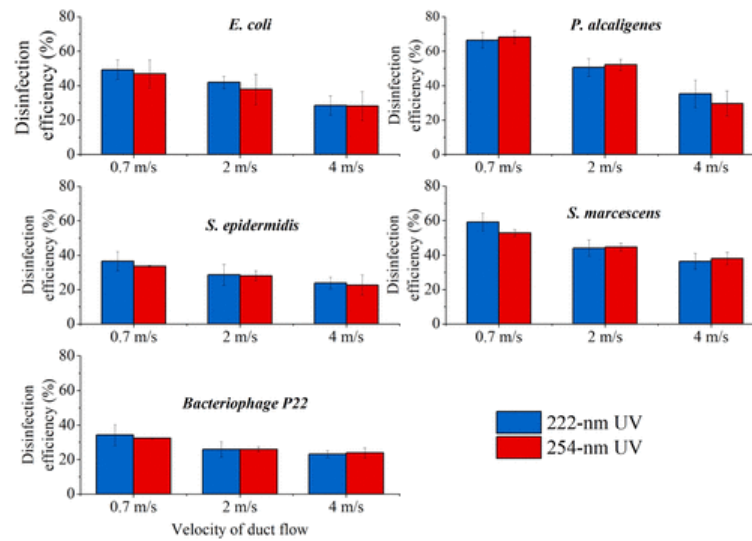
Kuva 3. UV-valon aiheuttama fotodimerisaatio, jossa pyrimidiinien välinen sidos katkeaa, minkä jälkeen viereiset pyrimidiinit yhdistyvät.[11]

että myös 222-UVC-valo eliminoi itiöitä ja jopa pienemmällä fluenssilla kuin 254-UVC-valo.[4]

2.1 Eliminointimekanismi

Bakteerien eliminointi 254-UVC-valolla perustuu solujen ja itiöiden dna-vaurioon. Kasvavissa tai stationaarifaasisoluissa luotu vaurio on pääasiassa pyrimidiinidimeerien ja eräiden pyrimidiini(6-4) fototuotteiden (6-4PP) syntyminen. Pyrimidiinidimeerien muodostumista on havainnollistettu kuvassa 3. Esimerkki syntyneistä pyrimidiinidimeereistä on syklobutaanipyrimidiinidimeerit (CPD), jotka sijaitsevat pyrimidiinien välillä. Resistentimpien itiöiden kohdalla 254-UVC-valo tuottaa kuitenkin hyvin vähän mainittuja CPD:tä tai 6-4PP:tä. Sen sijaan 254-UVC-valo tuottaa itiöspesifistä valotuotetta -tyminyyl-5,6-dihydrotymiiniä. Jotkin 254-UVC-valon aiheuttamista vaurioista voivat olla mutageenisia, mistä johtuen valo aiheuttaa terveyteen liittyviä huolia.[4]

222-UVC-valon eliminointimekanismi on vähemmän tunnettu, ja se vaikuttaa patogeeneihin laajemmalla tavalla. Dna:n lisäksi 222-UVC-valo vaikuttaa rna:han sekä muihin solukomponentteihin, kuten proteiineihin ja lipideihin. Rna:han syntynyt vahinko on samankaltainen kuin dna:n, joka esitettiin kuvassa 3. Rna:ssa erona on tosin se, että pyrimidiinit ovat jo valmiiksi erillään, jolloin UV-fotonin täytyy ainoastaan yhdistää viereiset pyrimidiinit[3]. Proteiinien pääketjun peptidisidosten



Kuva 4. 222-UVC- ja 254-UVC-valojen vertailu eri patogeenejä vastaan. Tutkimuksessa käytettiin erisuuruisia ilmavirtauksia simuloimaan paremmin todellista tilannetta. Käytetyt patogeenit ovat tyypillisiä patogeenejä, joita esiintyy sairaaloissa. [5]

absorptiopiikki sijoittuu alueelle 180-230 nm. Lipidikomponenttien absorptiopiikki on puolestaan välillä 198-209 nm ja absorptio vähenee aina arvoon 250 nm saakka. Näiden lisäksi 222-UVC-valo voi luoda reaktiivisia happilajeja, jotka vahingoittavat eri solumateriaaleja. Virusten kohdalla eliminointimekanismi riippuu viruksen rakenteesta. Jos viruksella on suojaava vaippa, viruksen lipidikalvot ovat eliminoinnin kohteena. Jos viruksella ei ole vaippaa, 222-UVC-valo eliminoi viruksen denaturoimalla proteiineja.[5]

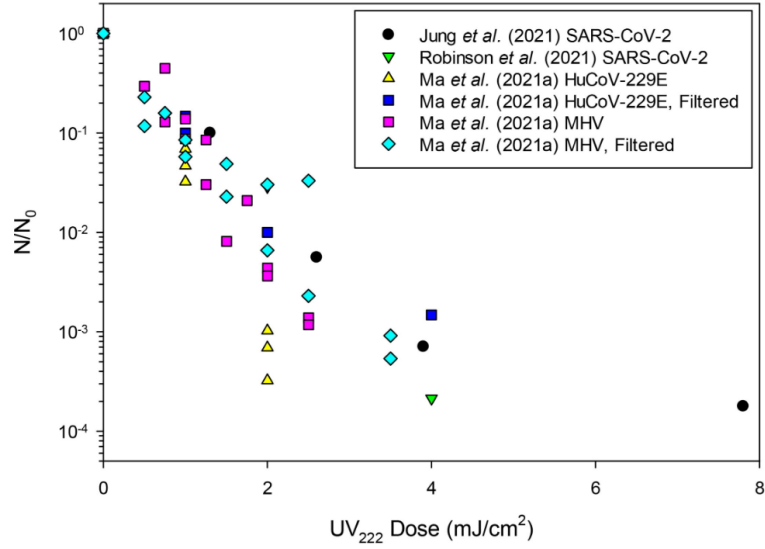
222-UVC-valon monipuolinen vaikuttaminen patogeeniin ei kuitenkaan suoraan tarkoita sitä, että 222-UVC-valo olisi 254-UVC-valoa parempi eliminoimaan patogeeneja. Esimerkiksi dna absorboi valoa parhaiten aallonpituuksilla 260-270 nm, jota kautta 254-UVC-valo eliminoi patogeenejä. Kuvasta 4 nähdään, että kyseiset aallonpituudet ovat lähes yhtä tehokkaita patogeeneiden eliminoinnissa. On huomattava, että kuvaan perustuvassa tutkimuksessa ei optimoitu valojen tehokkuutta, minkä seurauksena desinfiontitehokkuus (engl. disinfection efficiency) on alhainen.[5]

2.2 Fluenssin suuruuden evaluointi

Patogeeniä voidaan eliminoida ilmasta, nesteestä tai pinnoilta. Nesteiden osalta on tutkittu esimerkiksi omenamehua ja maitoa, joista 222-UVC-valo kykeni eliminoidaan bakteereja[10]. Ilmasta patogeeniä on helpoin eliminoida, kun puolestaan nesteessä ja pinnoilla olevien patogeenien eliminointi on huomattavasti vaikeampaa. Jotkin tutkimukset taas osoittavat, että nesteestä patogeenien eliminointi on haastavinta, ja ilmasta sekä pinnoilta eliminointi on vähintään yhtä helppoa. Aineiden välinen vertailu on vaikeaa, koska fluenssin määrään vaikuttaa väliaineen optiset ominaisuudet. Absorbanssi, heijastuminen ja taittuminen ovat kaikki vaikuttavia tekijöitä, jotka lopulta vaikuttavat todelliseen fluenssiin. Tämän ongelman ratkaisemiseksi kehitettyjä tapoja esitetty myöhemmin kappaleessa 2.2. Noin 70 % kaikista tutkituista patogeeneista voidaan eliminoida 90 % tehokkuudella 10 mJ/cm² fluenssilla. Jo 100 mJ/cm² fluenssilla voidaan eliminoida kaikki toistaiseksi tutkitut patogeenit käytännössä 100 % tehokkuudella.[2, 8]

Koronavirukset ovat tutkituimpia viruksia, ja ainakin veden suspensioissa 222-UVC-valo on tehokkaampi niiden eliminoinnissa kuin 254-UVC-valo. 222-UVC-valo vaatii vain noin 1 mJ/cm² fluenssin, kun taas 254-UVC-valo vaatii noin 2 mJ/cm² fluenssin eliminoidakseen 90 % viruksista. 222-UVC-valon eliminointikyky koronaviruksia vastaan on esitetty kuvassa 5. On huomattava, että 254-UVC-valolla tutkitut muut virukset, kuten poliovirus ja rotavirus, vaativat paljon suuremman noin 8-10 mJ/cm² fluenssin.[2]

Tarvittavaa fluenssia voidaan arvioida kvalitatiivisesti genomien koolla. Suurempi genomien koko tarkoittaa, että UVC-valolla on laajempi vaikutusala, mikä johtaa viruksen nopeampaan eliminointiin. Koronavirusten genomien koko kuuluu suurimpiin kaikista RNA-viruksista, minkä seurauksena sen eliminointi on nopeaa. Tarvittavaa fluenssia voidaan arvioida myös kvantitatiivisesti. Kuten kuvasta 5 nähdään, kuvaajan suureilla on lineaarinen riippuvuus. Tämä johtuu siitä, että 222-UVC-valo



Kuva 5. 222-UVC-valon eliminointikyky kolmen eri tutkitun koronaviruksen kohdalla. Mittaukset on suoritettu koronaviruksille veden suspensiossa.[2]

noudattaa muidenkin sterilisoinnin keinojen tapaan niin kutsuttua Chick-Watson mallia. Soveltamalla tätä mallia kyseiseen käyttökohteeseen, voidaan tilannetta kuvata yhtälöllä

$$\text{Log} \left(\frac{N}{N_0} \right) = k \cdot H, \quad (3)$$

missä $\frac{N}{N_0}$ kuvaa selviytyneiden virusten määrää suhteessa alkuperäiseen määrään, k on vakio (cm^2/mJ) ja H on fluenssi.[2, 3]

Ilmasta koronaviruksista voidaan eliminoida 99,9 % vain $1,2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ fluenssilla. Riippuen tutkitusta koronaviruksesta tämä arvo vaihtelee hieman, mutta arvioilta kaikkien vaatima fluenssi on välillä $1\text{-}2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Tämä on saman verran kuin esimerkiksi H1N1-viruksen eliminointiin tarvittava määrä. Tämän hetkisen arvion mukaan 222-UVC-valo on tehokkain valo ilmassa olevien virusten eliminointiin kaikista UVC-valoista.[1, 3]

Jäljellä on vielä arvioida 222-UVC-valon sterilisointikyky pinnoilla. Toistaiseksi tämä tutkimuskohde on vielä hyvin vaiheessa. Yleistä kokeellista käytäntöä, jonka avulla saataisiin hallitusti ja yhdenmukaisesti mitattua 222-UVC-valon fluenssi, ei ole vielä toistaiseksi kehitetty. Tosin joitakin ohjeita ja kokeellisia laitteita on ke-

hitetty ja ehdotettu. Nesteen mittaussuomenetelmiä varten esimerkiksi hyödynnettiin laskennallista nestedynamiikkaa ja kenttämalleja liittyen fluenssin määrään. Samantyyppisiä malleja käytettiin arvioimaan sterilisointia ilmassa ja näitä voidaan myös hyödyntää arvioimaan pintojen sterilisointia. Kuitenkin, koska kyse on laskennallisista malleista, ensin tulee tehdä riittävän laajasti mittauksia, joiden pohjalta mallit voidaan rakentaa.[2]

Tässä kappaleessa selitetään, miten patogeenien vastaanottamaa keskimääräistä fluenssia voidaan arvioida vedessä. Tarkastellaan yksinkertaista tilannetta, jossa UV-lamppu on ympäröity vedellä kuvan 6 mukaisesti. Näiden kammioiden lävitse johdetaan vettä kammioiden päässä olevista aukoista. Osoittautuu, että fluenssi vastaa likimain tuloa

$$H \approx P \cdot t, \quad (4)$$

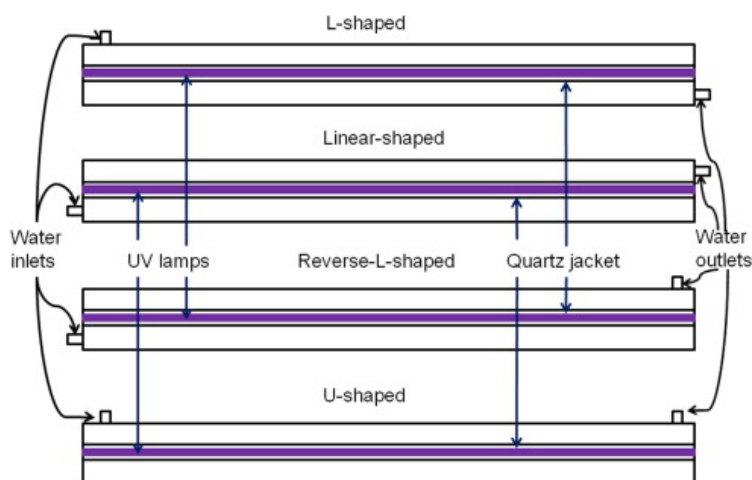
missä P on keskimääräinen UV-valon kokonaisvuon tiheys ja t on veden keskimääräinen viipymäaika. Viipymäaika kuvaa aikaa, jonka nestealkio viettää kammiossa. Tämä voidaan laskea kaavasta

$$t = \frac{V}{Q}, \quad (5)$$

missä V on kammion tilavuus ja Q on veden tilavuusvirta. UV-valon kokonaisvuon tiheyden laskemiseksi on monia käytäntötapoja, jotka hyödyntävät erilaisia laskenta- ja simulaatiomenetelmiä. Näitä ovat esimerkiksi MPSS-malli (Multiple-Point Source Summation) ja TURF-malli (Three-step UV fluence Rate and Fluid dynamics).[9]

3 UVC-valon aiheuttama vaurio ihmiselle

Kun ajatellaan UVC-valon vahinkoa ihmiselle, täytyy huomioida pari tärkeää seikkaa. Ihoon kohdistuneen vahingon lisäksi täytyy huomioida valon vaikutus silmään. 222-UVC-valo on suhteellisen turvallinen molemmissa tapauksissa jo pelkästään sen takia, että tällä aallonpituudella valo ei tunkeudu syvälle aineeseen. Tämä on loogi-



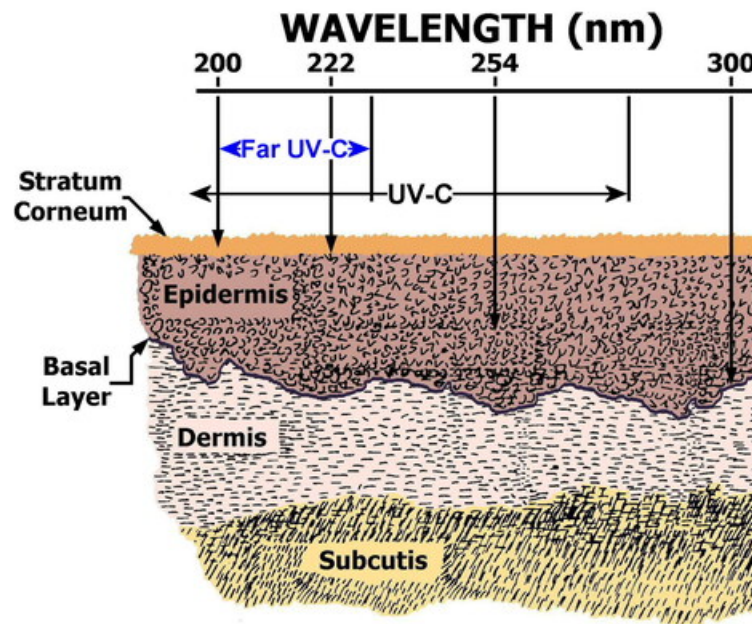
Kuva 6. Neljä erilaista kammiota, joiden avulla voidaan säteilyttää UV-valoa vedessä oleviin organismeihin. Kammiot rakentuvat eristetyistä UV-lampuista, joiden ympärille voidaan johtaa vettä. UV-lamppu on eristetty vedestä kvartsiseinällä.[9]

nen seuraus siitä, että monet solukomponentit absorboivat 222-UVC-valoa. Ihmiseen kohdistuneen suoran vahingon lisäksi täytyy huomioida 222-UVC-valon tuottamiseen käytetyn KrCl-lampun epäsuora vahinko. KrCl-lamppu tuottaa ilmaan otsonia, jonka on todettu vaikuttavan ihmisen hengityselimiin, sydämeen ja verisuonistoon sekä keskushermostoon.[2]

3.1 Iho

222-UVC-valo pysähtyy pääasiallisesti jo ihon uloimman osan, epidermiksen, uloimpaan osaan nimeltä marraskesi. Marraskesi rakentuu kuolleista soluista ja sen syvyys on vain noin 0,02 mm[12]. Marraskeden syvyys ei merkittävästi muutu esimerkiksi iän, sukupuolen tai ihosairauksien vaikutuksesta. UV-valon tunkeutumissyvyys ihoon on esitetty kuvassa 7. On huomattava, että vaikka osa 222-UVC-valosta tunkeutuisi täysin marraskeden lävitse, tästä ei aiheudu erillistä vahinkoa ihoon. Tämä johtuu siitä, että marraskeden lähellä oleva iho ei enää kykene jakautumaan, ja siitä on tulossa osa marraskettä.[2]

Tärkein huolenaihe liittyen UV-valon käyttöön on sen aiheuttama ihosyöpä. Tut-

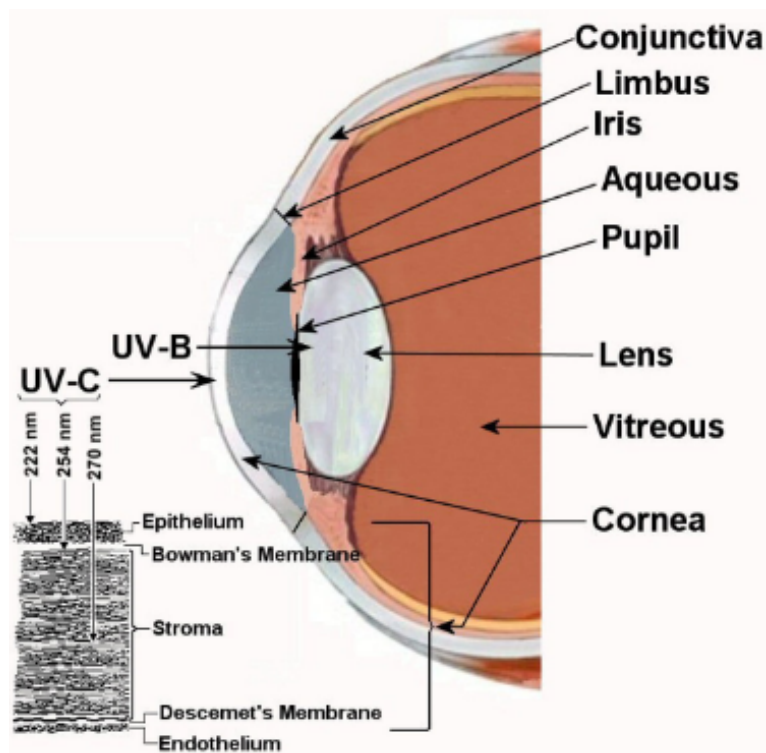


Kuva 7. UV-valon tunkeutuminen ihoon neljällä eri aallonpituudella. Nuolien kärki osoittaa kohtaa, jossa 90% valosta on absorboitunut. Marraskesi on kuvassa ihon ylin kerros Stratum Corneum ja tyvisolukerros on nimellä Basal Layer. Marraskesi absorboi 222-UVC-valon lähes kokonaan, mutta 254-UVC-valo tunkeutuu syvälle epidermikseen.[2]

kimukset osoittavat, että 222-UVC-valo ei aiheuta laisinkaan ihosyöpää. Tätä väitettä tukee monta eri asiaa. Ensinnäkin, syöpää aiheuttavat aallonpituudet ovat lähinnä UVB-valon alueella. Toiseksi, UV-valon tulee tunkeutua tyvisolukerrokseen, joka sijaitsee epidermiksessä alimpana dermoksen rajalla, aiheuttaakseen syöpää. Tutkimuksissa on hyödynnetty ihmisihon mallia ja hiiriä tutkimaan 222-UVC-valon mahdollisesti aiheuttamaa ihosyöpää. Osoittautuu, että 500 mJ/cm² suuruinen fluenssi ei merkittävästi lisää ihosyövän riskiä. Tämä on paljon suurempi, jopa 400-kertainen fluenssi kuin mitä tarvitaan patogeeneiden eliminointiin.[2]

3.2 Silmä

222-UVC-valon vaikutus silmään on toistaiseksi vähän tutkittu aihe, mutta tutkimukset osoittavat valon käyttäytymisen olevan hyvin samanlaista silmään kuin iholle. Valo ei tunkeudu syvälle silmään, jolloin sen aiheuttama vahinko on vähäistä ja



Kuva 8. UV-valon tunkeutuminen silmään. Kuvassa suurennos sarveiskalvon viidestä eri kerroksesta, joihin UVC-valo pysähtyy. Tärkeimpinä kohtina ovat 222-UVC-valon pysähtyminen epiteelikerrokseen ja 254-UVC-valon tunkeutuminen stroomaan.[2]

pinnallista. 222-UVC-valo ei läpäise silmän ulointa osaa, sarveiskalvon epiteelikerrosta, kuten kuvasta 8 nähdään. 222-UVC-valon on todettu voivan aiheuttaa DNA-vahinkoa epiteelikerroksen pinnalle, mutta tämä osa silmästä uusiutuu päivässä epiteelikerroksen elinkaaren mukaisesti. Lisäksi on tutkittu fotokeratiitin, ihon palamisen kaltaisen vahingon esiintyvyyttä silmässä. Tätä varten säteiltiin 222-UVC- ja 254-UVC-valoa jyrsijän silmään. Osoittautui, että tarvitaan vähintään 5000 mJ/cm^2 suuruinen fluenssi 254-UVC-valon tapauksessa ja $15\,000 \text{ mJ/cm}^2$ suuruinen fluenssi 222-UVC-valon tapauksessa. Nämä ovat hyvin suuria määriä verrattuna sterilisoinnin vaatimiin määriin. Kuten ihon tapauksessa, 222-UVC-valon vahinkoa on arvioitu yksilöille, jotka voisivat olla alttiimpia valolle esimerkiksi eri sairauksien johdosta. Arvion mukaan ryhmiä, jotka olisivat merkittävästi alttiimpia 222-UVC-valolle ei ole olemassa.[2]

3.3 Otsoni

Otsoni on voimakkaasti hapettava kaasu. Otsonin määrän seuraaminen on tärkeää, sillä jo yli 0,1 mg/cm³ suuruisella konsentraatiolla voi olla vaikutusta ihmisen terveyteen. Lisäksi otsoni reagoi ilman molekyyliden kanssa sekä rakennusten pintojen kanssa muodostaen haitallisia yhdisteitä, kuten dikarbonyylejä ja C1-C13 karbonyylejä.[13]

Otsonia voi muodostua valokemiallisesti tai koronapurkauksesta. KrCl-lampun tapauksessa otsonin tuotto perustuu pääasiallisesti koronapurkaukseen. Tällöin otsonin muodostumista voidaan yksinkertaisesti kuvata alla olevilla yhtälöillä



missä e kuvaa elektronia ja B on joko O_2 molekyyli tai N_2 molekyyli. [2, 13]

KrCl-lampun tuottaman otsonin määrää voidaan arvioida kaavasta

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{E}{V} + P \cdot \lambda \cdot C_{out} - \lambda \cdot C_{in} - kC_{in}, \quad (8)$$

missä C_{in} on otsonin konsentraatio tarkasteltavan huoneen sisällä (mg/m³), t on aika (h), E on lampun otsonin päästövuoto (mg/h), V on huoneen tilavuus (m³), P on otsonin tunkeutumista kuvaava kerroin (λ on ilman vaihtuvuus (h⁻¹), C_{out} on otsonin konsentraatio huoneen ulkopuolella ja k on kerroin, joka kuvaa otsonin poistumista muilla keinoin (h⁻¹). Jos kyseessä on kammio, jossa ei ole ilmanvaihtoa, yhtälö redusoituu muotoon

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{E}{V} - kC_{in}, \quad (9)$$

mistä voidaan kokeellisesti ensin ratkaista k , minkä jälkeen yhtälöllä voidaan laskea lampun otsonin tuotto. KrCl-lamppu tuottaa otsonia karkeasti ottaen 10-100 µg/h, mutta määrää voidaan pienentää yli kolmenkertaisesti suodattimilla. Täten otsonin määrä voitaisiin pitää riittävän pienenä ilmanvaihdon avulla.[5, 13]

4 Yhteenveto

222-UVC-valoon liittyen on vielä paljon tutkittavaa, mutta tulokset ovat toistaiseksi lupaavia. Nykyään sterilisointiin käytetty 254-UVC-valo tuotetaan pääosin elohopealampulla, joka tuottaa ongelmia jo elohopean myrkyllisyyden ja tarkan kierrätyksen takia. 254-UVC-valon rinnalla 222-UVC-valon tehokkuus on samaa luokkaa tai jopa parempaa. Sen eliminointimekanismi on vielä hieman tuntematonta, mutta tiedetään, että se vaikuttaa soluihin monipuolisesti. 254-UVC-valosta poiketen 222-UVC-valo absorboituu hyvin esimerkiksi proteiineihin ja lipideihin. Patogeenien eliminointiin voi riittää jo 1 mJ/cm^2 suuruinen fluenssi, mutta 100 mJ/cm^2 suuruisella fluenssilla voidaan jo eliminoida kaikki toistaiseksi tutkitut patogeenit käytännössä kokonaan. Tarvittavaan fluenssiin vaikuttaa patogeenin lajin lisäksi mistä sitä yritetään eliminoida. Nesteestä eliminointi on hitainta, kun taas pinnoilta fluenssin suuruutta on vielä vaikea arvioida.

Ihmisille 222-UVC-valosta aiheutuvat haittavaikutukset ovat minimaalisia kunhan huolehditaan oikeanlaisista ehkäisytöimenpiteistä. KrCl-lamppua käytettäessä tulee huomioida sen tuottama otsoni ja spektri kokonaisuudessaan. Näitä voidaan hallita asentamalla lamppuun oikeanlaiset suodattimet sekä pitämällä käyttökohteen ilmanvaihdon riittävänä. Tarvittava fluenssin suuruus, jolla ihmiseen saataisiin aiheutettua vahinkoa, voi olla useita tuhansia kertaa suurempi kuin patogeenien eliminointiin vaadittava määrä. Riittävän laajaa tutkimustietoa ei vielä tosin ole. Toistaiseksi mittauksissa on käytetty hyväksi pitkälti jyrksijöitä ja ihmismalleja sekä pitkäaikaisen altistumisen tulokset vielä puuttuvat. Joten 222-UVC-valon käyttöön-ottoon ei tule kiirehtiä, mutta sen kehitystä kannattaa pitää silmällä. Kymmenen vuoden päästä 222-UVC-valonlähde voi löytyä jo joka paikasta.

Viitteet

- [1] Manuela B, Welch D, Igor S, Brenner DJ. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Scientific Reports*, 10, 10285, (Nature Publisher Group). (2020)
- [2] Ernest R. Blatchley III et al. Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53:6, 733-753 (2023)
- [3] Sanjeev K. Bhardwaj et al. UVC-based photoinactivation as an efficient tool to control the transmission of coronaviruses, *Science of The Total Environment*, Volume 792, (2021)
- [4] Taylor Willie et al. "DNA Damage Kills Bacterial Spores and Cells Exposed to 222-Nanometer UV Radiation." *Applied and environmental microbiology* 86.8 (2020)
- [5] Y.H. Lu et al. Synergistic disinfection of aerosolized bacteria and bacteriophage by far-UVC (222-nm) and negative air ions, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 441, (2023)
- [6] IUPAC, *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the "Gold Book"), Blackwell Scientific Publications, (1997)
- [7] Bergman, Rolf S. Germicidal UV Sources and Systems. *Photochemistry and photobiology* 97.3, 466–470, (2021)
- [8] Hessling, Martin, et al. The impact of far-UVC radiation (200–230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes—a collection and analysis of a hundred years of data. *GMS hygiene and infection control* 16 (2021)
- [9] Chen Xu, X.S. Zhao, G.P. Rangaiah, Performance analysis of ultraviolet water disinfection reactors using computational fluid dynamics simulation, *Chemical Engineering Journal*, Volume 221, 398-406, (2013)
- [10] Harpreet Singh et al. UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products, *Chemical Engineering Journal*, Volume 417, 128084, (2021)
- [11] Ana Rita Pereira et al. Ultraviolet C irradiation: A promising approach for the disinfection of public spaces?, *Science of The Total Environment*, Volume 879, 163007-163007, (2023)
- [12] Finlayson, L. et al. Depth Penetration of Light into Skin as a Function of Wavelength from 200 to 1000 nm. *Photochem Photobiol*, 98: 974-981, (2022)
- [13] Chao Guo, Zhi Gao, Jialei Shen, Emission rates of indoor ozone emission devices: A literature review, *Building and Environment*, Volume 158, 302-318, (2019)