



**TURUN  
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen  
tiedekunta

## Veden puhdistus 2D-MXeeneilla ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ )

Jenny Lindgren

Kemia (kestävän kehityksen materiaalien kemia)

LuK-tutkielma

Laajuus: 6 op

Materiaalikemian tutkimusryhmä

6.5.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

**Pääaine:** Kemia

**Tekijä:** Jenny Lindgren

**Otsikko:** Veden puhdistus 2D-MXeeneilla ( $Ti_3C_2T_x$ )

**Ohjaaja(t):** Pia Damlin ja Roni Hentula

**Sivumäärä:** 19 sivua

**Päivämäärä:** 6.5.2026

---

Puhtaan ja juomakelpoisen veden tarve on kasvanut viime vuosikymmeninä teollistumisen ja väestönkasvun myötä. Pintavesistöihin pääsee saasteita, kuten lääkeainejäämiä, raskasmetalleja ja orgaanisia väriaineita, esimerkiksi jäteveden laskemisen välityksellä. Veden puhdistukseen tarvitaan siksi uusia keinoja ja materiaaleja, joilla näitä kontaminanteja voidaan poistaa. MXeenit ovat epäorgaanisia 2D-materiaaleja, jotka on löydetty vuonna 2011. MXeeneilla on useita suotuisia ominaisuuksia vedenpuhdistuksessa, kuten erinomainen adsorptiokyky, suuri aktiivinen pinta-ala, hydrofiilisyys, materiaalin huokoisuus sekä kemiallinen stabiilius.

MXeenien syntetisoiminen tapahtuu vesiliuoksessa, jossa MAX-rakenteesta poistetaan A-kerrokset etsaamalla. MAX-rakenteen yleinen kaava on  $M_{n+1}AX_n$ , jossa M on siirtymämetalli, A on useimmiten pääryhmän 13 tai 14 alkuaine, X on hiili ja/tai typpi-atomi ja n on kokonaisluku väliltä 1–3. Tutkielmassani on keskitytty  $Ti_3C_2T_x$ -rakenteeseen, joka syntetisoidaan etsaamalla alumiinikerrokset pois  $Ti_3AlC_2$ -lähtöaineesta.  $T_x$  tarkoittaa funktionaalista pintaryhmää, joka synteesin yhteydessä saadaan muodostettua vaihtelevien titaani- ja hiilikerrosten pinnalle.  $T_x$  voi olla etsauksessa käytetyistä kemikaaleista riippuen esimerkiksi fluori, hydroksyyli-ryhmä tai ketonihappi. Etsauksessa käytettävien kemikaalien huolellinen valinta on tärkeää, koska ne vaikuttavat MXeenin funktionaalisten pintaryhmien muodostukseen ja siten saatavan MXeenin ominaisuuksiin.

MXeenien etsauksessa käytetään usein vetyfluoridin (HF) vesiliuosta, mutta sen voimakas myrkyllisyys ja haitallisuus ympäristölle rajoittaa sen käyttöä. Tämän vuoksi turvallisemmille synteesimenetelmille on suuri kysyntä. Etsauksen jälkeen MXeenia pestään, jonka seurauksena se delaminoituu ja siitä voidaan muodostaa kalvomateriaalia tai partikkelimaista materiaalia.  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenien rakenteen ja pintaryhmien hallittu valmistus on tärkeää, jotta voidaan optimoida niiden vedenpuhdistusominaisuudet ja hyödyntää niitä tehokkaasti tulevaisuuden ympäristöteknologiasovelluksissa.

---

**Avainsanat:** MXeeni,  $Ti_3C_2T_x$ , veden puhdistus, etsaus

# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b><i>Johdanto</i></b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>MXeenin synteesi</i></b> .....	<b>3</b>
2.1	Syntetisointi ja etsaus.....	3
2.2	Jälkikäsittely.....	5
<b>3</b>	<b><i>Veden puhdistus MXeeneilla</i></b> .....	<b>7</b>
3.1	MXeeni-kalvot.....	7
3.2	MXeeni-kalvojen valmistus .....	7
3.3	Partikkelit.....	8
3.3.1	MXeeni-dispersio .....	8
3.3.2	Kylmäkuivaus.....	9
3.4	Vedenpuhdistus .....	10
3.4.1	Kalvot.....	10
3.4.2	Adsorptio.....	11
<b>4</b>	<b><i>Muut menetelmät</i></b> .....	<b>14</b>
4.1	Fotokatalyyttinen hajotus.....	14
4.2	Hybridimateriaalit .....	14
<b>5</b>	<b><i>Johtopäätökset</i></b> .....	<b>16</b>
	<b><i>Viiteluettelo</i></b> .....	<b>18</b>

## Lyhenneluettelo

HF = vetyfluoridi

CVD = chemical vapor deposition

HCl = vetykloridi

LiF = litiumfluoridi

NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub> = ammoniumbifluoridi

LiCl = litiumkloridi

PAC = powdered activated carbon

MOF = metalliorganinen runkorakenne

# 1 Johdanto

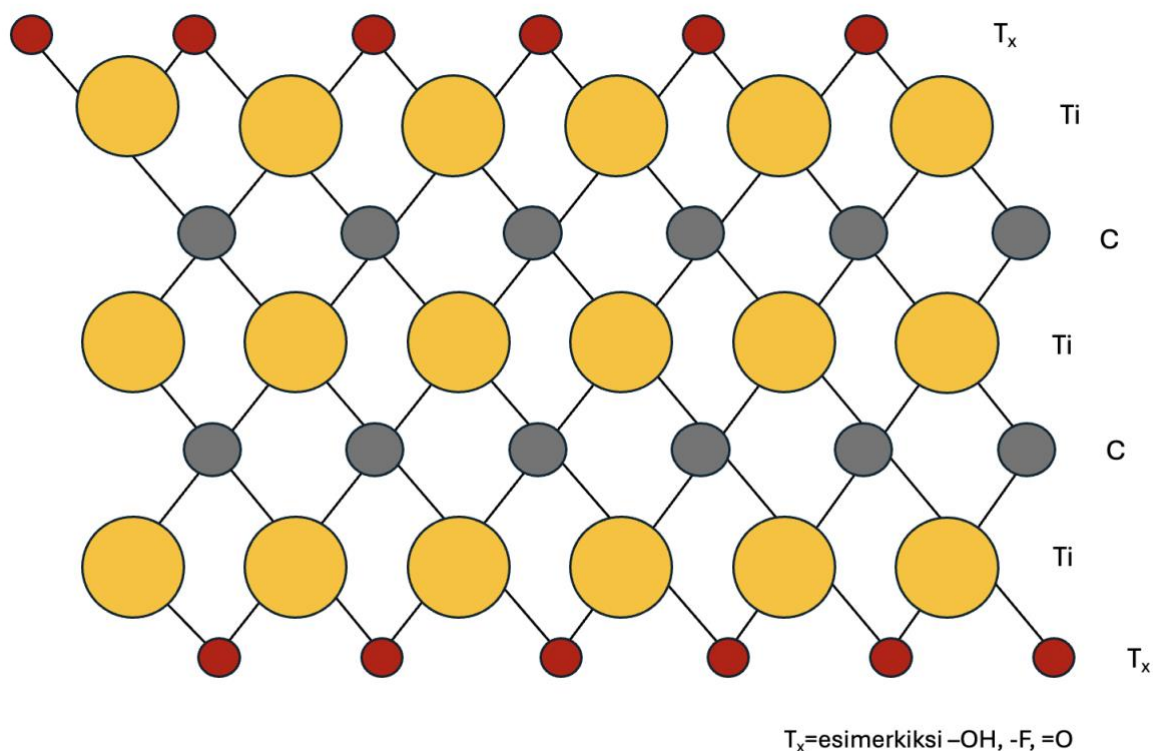
Puhtaan veden tarve on kasvanut teollistumisen ja väestönkasvun myötä. Maapallon resurssit eivät ole pystyneet vastaamaan puhtaan makean veden tarpeeseen, minkä vuoksi on pitänyt kehittää materiaaleja ja menetelmiä, joilla vettä voidaan puhdistaa takaisin käyttöön. [1] Vedenpuhdistukseen käytetään jo monia eri metodeja, kuten käänteisosmoosia, biologisia menetelmiä ja ultrasuodatusta. MXeenien avulla voitaisiin saavuttaa taloudellisempia ja ympäristöystävällisempiä keinoja puhdistaa vettä, kun hyödynnetään MXeenien suotuisia ominaisuuksia, kuten hyvää adsorptiokapasiteettia. [2] Lääkeainejätteet vesistöissä ovat erityisen haitallisia siksi, että niiden vaikutuksista esimerkiksi vesieliöihin ja muuhun ympäristöön tiedetään hyvin vähän. [3] Jätevesissä on lisäksi muitakin kontaminantteja, kuten orgaanisia yhdisteitä, väriaineita ja raskasmetalleja, joita on mahdollista poistaa MXeenien avulla. [4]

MXeenit ovat kaksiulotteisia epäorgaanisia nanomateriaaleja, jotka löydettiin ensimmäisen kerran vuonna 2011 Yury Gogotsin ryhmän toimesta Drexelin yliopistossa Philadelphiassa. [5] MXeenit ovat siirtymämetallikarbideja, -nitridejä sekä -karbonitridejä, joissa muutaman atomin paksuiset kerrokset metallia ja hiiltä tai tyypeä vuorottelevat. MXeenien monipuoliset ominaisuudet tekevät niistä suotuisia materiaaleja esimerkiksi ympäristöongelmien ratkaisuihin, sillä ne koostuvat maapallolla yleisistä ei-myrkyllisistä alkuaineista eivätkä ne hajoamisensa yhteydessä tuota haitallisia hajoamistuotteita. [6] MXeeneja on olemassa niin jauhemaisina, levymäisinä kuin kolloidisina liuoksinakin. [7]

MXeenit voivat adsorboida niin kiinteitä kuin kaasumaisia kontaminantteja, kuten raskasmetalleja, lääkeaineita tai orgaanisia väriaineita, mikä perustuu niiden laajaan aktiiviseen pinta-alaan sekä hydrofiilisyyteen. [6] MXeenit ovat hyviä materiaaleja veden puhdistukseen, sillä ne ovat helppokäyttöisiä, tehokkaita, suhteellisen halpoja ja niitä on olemassa monia erilaisia eri käyttökohteisiin. Veden puhdistuksessa tärkeitä ominaisuuksia ovat myös kemiallinen stabiilius, huokoisuus ja mahdollisuus tuottaa suuria määriä materiaalia teollisuusolosuhteissa. [8]

$Ti_3C_2T_x$ -rakenteen MXeenien rakenne on esitetty kuvassa 1. Tämänkaltainen MXeeni koostuu siis titaanista, hiilestä sekä funktionaalisesta pintaryhmästä  $T_x$ , joka voi olla esimerkiksi hydroksyyli-ryhmä, fluori tai ketonihappi. Kyseessä on tällöin titaanikarbidi. [9]  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenien pintaryhmät ovat poolisia, mikä tekee niistä hydrofiilisiä ja siten sopivia tutkimukseen veden kanssa sekä veden puhdistukseen. [10] Funktionaaliset pintaryhmät vaikuttavat siis merkittävästi MXeenin synteesiin ja ominaisuuksiin, ja esimerkiksi fluori pintaryhmässä aiheuttaa parempaa lämmönjohtavuutta verrattuna vastaavaan rakenteeseen, jossa pintaryhmänä toimii happi. Pintaryhmää muokkaamalla voidaan näin ollen muokata ja optimoida MXeenin rakennetta, ominaisuuksia ja toimivuutta. [11]

Tässä tutkielmassa keskitytään MXeenien morfologisten eroavaisuuksien tarkasteluun. MXeenit voidaan jakaa kalvoihin, dispersioihin ja partikkeleihin, millä kaikilla on erilaisia ominaisuuksia ja käyttökohteita. Lisäksi tutkielmassa tutustutaan siihen mitä kontaminantteja MXeeneilla voidaan poistaa vedestä ja millaisilla erilaisilla menetelmillä. Lopuksi käsitellään  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenien ongelmakohtia ja tulevaisuuden näkymiä.



Kuva 1:  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenin rakenne

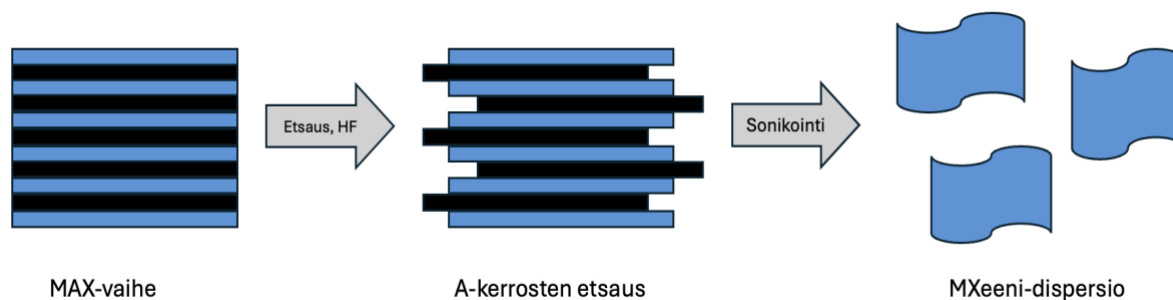
## 2 MXeenin synteesi

### 2.1 Syntetisointi ja etsaus

MXeenit syntetisoidaan vesiliuoksessa etsaamalla eli happokäsittelmällä A-kerrokset pois kolmiulotteisesta MAX-rakenteesta, tässä tapauksessa  $Ti_3AlC_2$ -rakenteesta. [12] MAX-rakenteet ovat termodynaamisesti stabiileja ja niillä on merkittävät metalliset ja keraamiset ominaisuudet. [7] MAX-rakenteen yleinen kaava on  $M_{n+1}AX_n$ , jossa M on siirtymämetalli (Ti), A on useimmiten jokin alkuaine jaksollisen järjestelmän pääryhmästä 13 tai 14 (Al) ja X edustaa hiiltä tai typpiä, joka erittelee, onko kyseinen MXeeni karbidi, nitridi vai karbonitridi ja n on kokonaisluku 1–3. [7]

MAX-rakenteilla on usein metallimaisia ominaisuuksia eli ne johtavat hyvin lämpöä ja sähköä, ovat helposti muokattavissa ja termodynaamisesti stabiileja. [14] MAX-rakenteesta rikotaan M:n ja A:n välinen heikompi metallisidos, jonka jälkeen A-kerrokset poistuvat rakenteesta. Näin etsauksesta jäävät jäljelle kolmiulotteisen MAX-vaiheen jälkeen kaksiulotteiset MXene-liuskat, jotka pesemällä delaminoidaan. Tämä prosessi on esitetty kuvassa 2. Tämän jälkeen MXeenin vesiliuosta voidaan jatkokäsitellä ja muodostaa jauhemateriaaleja ja MXeeni-kalvoja. [15]

MXeeneilla on grafeenin kaltainen kiteinen rakenne, jonka ne yleensä saavat MAX-vaiheen prekursoreiltaan. M-siirtymämetalliatomit muodostavat heksagonaalisen hilan, ja X-atomit täyttävät välitilan. MXeeni-partikkelien morfologia etsauksen jälkeen on usein laskostunut monikerroksinen rakenne, mutta vedellisissä olosuhteissa voi syntyä myös rullamaisia nanorakenteita. [16]



Kuva 2: MAX-vaiheen etsaus vetyfluoridilla, josta sonikoinnin jälkeen saadaan MXeenidispersio

Etsauksessa yleisimmin käytettyjä kemikaaleja ovat HF, HCl+LiF,  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  sekä HF+LiCl. HCl+LiF -käsittelyä kutsutaan myös in-situ HF-etsaukseksi. In-situ HF-etsauksessa voidaan käyttää myös muita fluoridisuoloja, kuten natriumfluoridia NaF. [7], [14] Etsauksessa käytetyt kemikaalit vaikuttavat suoraan materiaalin syntetisointiin sekä sen lopullisiin ominaisuuksiin. Eri kemikaaleja käyttämällä voidaan siten valmistaa erilaisia MXeenimateriaaleja, joilla on keskenään erityyppiset ominaisuudet. [18] Etsauksessa käytetyt kemikaalit vaikuttavat MXeenin funktionalisiin pintaryhmiin, ja esimerkiksi negatiivisesti varautuneet pintaryhmän molekyylit parantavat ionien sitoutumiskykyä ja adsorptiota MXeenin pinnalle. [19]

Etuna HF-liuoksen käyttämisessä etsauksessa on se, että materiaalin liuskamainen rakenne säilyy hyvin ja sitä voidaan käyttää edelleen substraattina. HF-liuoksen haitat on kuitenkin myös otettava huomioon etsauksessa, sillä HF on voimakkaasti syövyttävää ja ihmiselle haitallista ja se voi etsauksessa yhtä aikaan vahingoittaa valmistettua MXene-rakennetta, mikä rajoittaa sen käyttöä liuottimena. [15] In-situ HF-käsittelyä pidetään puolestaan miedompana HF-käsittelyyn verrattuna ja tämän käsittelyn on huomattu parantavan MXeenin mekaanista stabiiliutta sekä pinnan hyvää laatua. [20] Lisäksi in-situ HF-käsittelyssä voidaan tehdä pieniäkin muutoksia, joilla vaikutetaan tiettyihin MXeenin ominaisuuksiin, kuten paksuuteen ja interkalaatioon. MXeenikerrosten etäisyyden lisääminen tällä tavoin suurentaa sen aktiivista pinta-alaa, mikä mahdollistaa suuremman molekyylien ja ionien välisen vuorovaikutuksen veden puhdistuksessa. [17] Ihmiselle ja ympäristölle vaarallinen HF voidaan korvata käyttämällä myös verrattaen miedompaa ja turvallisempaa  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ -liuosta, jolla saadaan suurempi etäisyys MXeenin kerrosten välille, mikä mahdollistaa suuremman tilan ioneille liikkua rakenteessa ja siten paremman sähkönjohtavuuden. [15]

Muita etsauksessa käytettäviä metodeja ovat esimerkiksi emäksen käyttö sekä sähkökemialliset menetelmät. Näillä tavoilla etsaus voidaan suorittaa ilman fluorideja, ja samalla laajentaa MXeenien valmistusmahdollisuuksia ja vähentää fluoridien käytöstä aiheutuvia huolenaiheita. Etsauksesta voidaan näin tehdä kestävämpää ja prosesseista saadaan monipuolisempia. Fluoridivapaat etsausmetodit näin ollen laajentavat MXeenien mahdollisuuksia ja mahdollistavat entistä suuremman määrän sovelluksia yhtäaikaaisesti ympäristöystävällisemmän etsauksen tulevaisuuden kanssa. [17]

MAX-rakenteita voidaan valmistaa kemiallisen kaasupinnoitusetsauksen (chemical vapor deposition etching, CVD-etsaus) kautta ilman fluoria reagoivana aineena. CVD-etsaus on monipuolinen tekniikka, jonka avulla voidaan vaikuttaa rakenteeseen lämpötilaa muokkaamalla. Korkeassa lämpötilassa rakenteen paksuus kasvaa ja matalissa lämpötiloissa levyjen lateraalinen eli sivuttaissuuntainen koko kasvaa. [21]

## 2.2 Jälkikäsittely

Etsauksen jälkeen MXeeneja pestään, jotta saavutetut liuskamaiset rakenteet saadaan ikään kuin avattua ja niistä voidaan muodostaa MXeeni-materiaaleja. Pesua ja sen myötä tapahtuvaa liuskamaisen rakenteen avautumista kutsutaan delaminoinniksi. [3] MXeeneja pestään paljon tislattulla vedellä ja myös esimerkiksi etanolin käyttöä pesussa on tutkittu. Tutkimuksissa on huomattu, että sekä pesussa käytetyllä kemikaalilla että lämpötilalla on merkitystä ja parhaat tulokset pesussa on saatu käyttämällä etanolia ja 35 °C lämpötilaa. Näissä olosuhteissa delaminaation on todettu onnistuvan parhaiten, jolloin lopputuloksena on saatu maksimaalinen prosenttiosuus delaminoitua MXeenia, jota voidaan kutsua myös dispersioksi. Lämpötilan vaikutus on myös huomattava pesuvaiheessa, sillä delaminoitumisprosentti kasvaa aina 35 °C asti, ja sen jälkeen se lähtee laskemaan, kun lämpötilaa kasvatetaan. Pesuvaihe voidaan suorittaa sekoittamalla MXeeni-liuosta tai sonikaatiolla eli ultraäänellä. Etanolilla pestyn MXeenin on havaittu delaminoituvan jopa pelkällä sekoituksella, kun etsaus on suoritettu 35°C lämpötilassa. On havaittu myös, että molemmilla pesumeکانismeilla lämpötilan nostaminen etsauksessa johtaa todennäköisemmin monikerroksisen MXeenin muodostumiseen. [22]

Sonikaatiossa käytetään mekaanisia aaltoja ultraäänikylvyssä. Sen tarkoitus on estää MXeenia aggregoitumasta. Sonikaation on havaittu vaikuttavan MXeenin rakenteeseen tekemällä siitä paremmin dispergoitunutta ja sen partikkelikoosta pienemmän. Tämä puolestaan johtaa parempaan adsorptiokapasiteettiin, sillä MXeenin monipuoliset ominaisuudet ja laaja ominaispinta-ala säilyvät muuttuvissakin vedellisissä olosuhteissa. Myös sonikaatiossa käytetty ultraäänen taajuus vaikuttaa saatavaan MXeeniin, sillä eri taajuuksilla suoritettu sonikointi vaikuttaa esimerkiksi MXeenin pintaryhmien negatiiviseen varaukseen, mikä puolestaan voi johtaa parempaan adsorptioon positiivisesti varautuneiden molekyylien kanssa. [23] Pesun ja sonikoinnin jälkeen saadaan MXeeni-dispersio, jota voidaan jatkojalostaa seuraavaksi esiteltäviksi morfologioiksi.

## 3 Veden puhdistus MXeeneilla

### 3.1 MXeeni-kalvot

Yleisesti kalvot ovat puoliläpäiseviä, eli ne estävät tiettyjen molekyylien kulkeutumisen lävitseen, samaan aikaan kun esimerkiksi vesimolekyylit pääsevät läpi. MXeeni-kalvot voidaan valmistaa kahdella tavalla. Kalvo voidaan valmistaa täysin MXeenin vesiliuoksesta, jossa on delaminoituja MXeeni-dispersioita. Toisena vaihtoehtona MXeenia voidaan lisätä jo olemassa olevan kalvomateriaalin, tyypillisesti polymeerin, pinnalle. [24] Kalvoja käytetään monilla eri aloilla, ja ne ovat erityisesti veden puhdistuksessa tärkeitä, sillä kalvojen ja kalvoihin perustuvien prosessien avulla voidaan puhdistaa saastunutta vettä. Kalvon ominaisuuksia säätämällä voidaan määrittää, mitä vedestä halutaan poistaa. [24] MXeeni-kalvoilla on havaittu olevan erittäin hyvä kyky päästää vettä lävitsensä. Myös MXeenien stabiiliuden ansiosta ne ovat hyviä kalvomateriaaleja veden puhdistuksessa. [25] Lisäksi kalvoihin perustuva veden puhdistus on ympäristöystävällisempää, helppokäyttöistä, toiminnaltaan varmaa eikä siinä tapahdu toissijaista saastumista, sillä vedestä puhdistettavat saasteet jäävät kalvon pinnalle. [24] Tässä tutkielmassa keskitytään nimenomaan MXeeni-materiaalista valmistettuihin kalvoihin, joita hyödynnetään veden puhdistuksessa.

### 3.2 MXeeni-kalvojen valmistus

MXeeni-kalvot valmistetaan top-down -mekanismilla, jossa suuri määrä kiteisiä ja yksikerroksisia MXeeni-nanorakenteita saadaan etsauksen jälkeen muunnettua yhdeksi kalvomaiseksi rakenteeksi esimerkiksi vakuumsuodattamalla. [7], [17] MXeenien liuskamainen rakenne mahdollistaa niiden kerrostamisen päällekkäin, minkä avulla voidaan saavuttaa parempi erottelukyky. Kalvoilla on tällöin parempi mekaaninen kestävyys, hyvä sähkönjohtavuus sekä ne ovat hydrofiilisiä. Hydrofiilisyyden lisäksi tärkeitä tekijöitä kalvojen erottelukyvyyssä ovat MXeenin pintaryhmän sähköinen varaus sekä rakenteen kerrosten välinen etäisyys. Kerrosten välisen etäisyyden muokkaamisella voidaan optimoida esimerkiksi MXeenin huokoista rakennetta, mikä puolestaan on tärkeä tekijä suodatuksessa ja molekyylien

ja ionien kuljetuksessa kalvon läpi. [17] Lisäksi kerrosten välinen etäisyys vaikuttaa veden virtausnopeuteen kalvon läpi sekä erottelun tehokkuuteen ja selektiivisyyteen. Toisaalta MXeeni-kalvojen kerrostamisella niiden adsorptiokyky pienenee, sillä aktiivista pinta-alaa adsorptiolle ei ole yhtä paljoa. [27]

### 3.3 Partikkelit

Nanomateriaaleja voidaan käyttää veden puhdistuksessa esimerkiksi katalyyttinä, adsorbentteina tai antibakteerisina aineina. MXeeneja voidaankin käyttää partikkelimaisina nanolevyinä, joilla on korkea suorituskyky veden puhdistukseen liittyvien materiaalien sovelluksissa. Partikkelimaisissa MXeeneissa erityisesti niiden suuresta aktiivisesta ominaispinta-alasta seuraava hyvä adsorptiokapasiteetti on osoittautunut tärkeäksi ominaisuudeksi saasteiden poistamiseen liittyen. [28]

Esimerkiksi lääkeaineiden poistoon vedestä käytetään usein partikkelimaisia tai jauhemaisia adsorbantteja, kuten kaupallista jauhemaista aktiivihientä (powdered activated carbon, PAC). Partikkelimaisen MXeenin ja PAC:n väliset vertailut ovat kuitenkin osoittaneet MXeenien olevan hyvä vaihtoehto PAC:lle lääkeaineiden puhdistukseen vedestä niiden korkean adsorptiokapasiteetin, uudelleenkäytettävyyden ja selektiivisyyden ansiosta. [23]

#### 3.3.1 MXeeni-dispersio

MXeeni-dispersiolla tarkoitetaan etsauksen, sonikoinnin ja sentrifugoinnin jälkeisiä vesiliuokseen jääviä MXeeni-nanorakenteita, jotka ovat yhden tai kahden kerroksen paksuisia. Niiden valmistus tapahtuu jo edellä mainituilla tavoilla kappaleen 2 mukaisesti. MXeeni-dispersio voidaan edelleen vakuumisuodattaa kalvomaiseksi rakenteeksi, tai sitä voidaan kylmäkuivattaa partikkelimaisiksi rakenteiksi. [10] Kylmäkuivauksen tekniikkaa esitellään tarkemmin kappaleessa 3.2.2. Etsauksessa käytettyjen kemikaalien on esitetty vaikuttavan saatavien MXeeni-dispersioiden kokoon muiden ominaisuuksien ohella. Suurempikokoisilla dispersioilla on havaittu olevan korkeampi kapasitanssi. [9]

MXeeni-dispersioissa ongelmaksi nousee niiden hapettuminen. [10] Hapettumisen mekanismia on tutkittu ja yksi syy sille on MXeenin rakenteesta löytyvät atomitaso virheet ja epäkohdat, jotka tarjoavat hapettumiselle otollisia paikkoja MXeenin rakenteessa. Hapettuminen voi vaikuttaa MXeenin koostumukseen ja sen myötä kemiallisiin ominaisuuksiin. Kemiallisten ominaisuuksien muuttuminen voi puolestaan johtaa materiaalin huonompaan suorituskykyyn ja lyhyempään käyttöikä. [29]

Dispersioita voidaan kuitenkin käyttää adsorbentteina sellaisenaan. Niiden kerrosten välinen etäisyys on pieni ja aktiivinen pinta-ala suuri, mikä on eduksi adsorptiota käytettäessä kontaminanttien poistossa. Dispersiota käytettäessä eräässä tutkimuksessa huomattiin, että parhaat poistotehokkuudet saavutettiin pH:ssa 6, kun vedestä puhdistettiin ciprofloksasiini nimistä lääkeainetta. Kinetiikaltaan adsorptio on myös nopeaa dispersioilla suuren aktiivisen pinta-alan ansiosta. [30]

### 3.3.2 Kylmäkuivaus

Partikkelimaisten MXeenien valmistaminen on rajallista MXeeni-nanolevyjen uudelleenpinoutumisen takia. Kaksiulotteisissa materiaaleissa kerrosten lukumäärän on havaittu olevan avainasemassa siinä, millaiset ominaisuudet materiaali saa. [31] Partikkelimaisia MXeeneja voidaan valmistaa esimerkiksi kylmäkuivaamalla (engl. freeze drying). Kylmäkuivauksessa hyödynnetään MXeenin syntetisointia akvaattisissa olosuhteissa eli vesiliuoksessa, sillä kylmäkuivauksessa MXeeni-kerrosten väliin jäävät vesimolekyylit uudelleenjärjestäytyvät, mikä suurentaa MXeeni-kerrosten välistä etäisyyttä ja näin suurentaa sen tilavuutta. Tällä tavoin saadaan syntetisoitua muutaman kerroksen paksuinen MXeeni, sillä kylmäkuivaus mahdollistaa materiaalin delaminoitumisen muutaman kerroksen paksuiseksi. Eräässä tutkimuksessa monikerroksinen MXeeni-materiaali valmistettiin jäädyttämällä se nopeasti nestetyppellä  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilaan kahdeksaksi tunniksi ja sitten kuivatettiin. Kylmäkuivauksen osoitettiin johtavan ohuempiin MXeeni-kerroksiin, joilla säilyi kuitenkin MXeeneille ominainen haitarimainen rakenne. [32]

## 3.4 Vedenpuhdistus

### 3.4.1 Kalvot

Kalvoihin perustuvaa veden puhdistusta voidaan suorittaa monilla keinoilla, kuten mikro-suodatuksella, ultrasuodatuksella, nanosuodatuksella tai käänteisosmoosilla. MXeeni-kalvoja on tutkittu veden puhdistuksessa sen kemiallisen stabiiliuden, hydrofiilisyyden, lämmönjohtavuuden ja suuren ominaispinta-alan vuoksi. Nämä ominaisuudet tekevät niistä lupaavia materiaaleja kalvoprosesseihin. Esimerkiksi ultrasuodatuksessa MXeeneilla on korkea erotuskyky. [24] Seuraavaksi tarkastellaan erilaisia suodatuskeinoja MXeeni-materiaaleilla.

Ultrasuodatus on tehokas ja yksinkertainen tapa vedenpuhdistukseen, minkä vuoksi sille löytyy paljon erilaisia sovelluksia. Tällä tekniikalla kalvon likaantuminen on kuitenkin suuri ongelma. Ultrasuodatuksessa kalvo toimii matalassa paineessa, minkä vuoksi se on kustannustehokasta ja toimivaa erityisesti hienojakoisten aineiden poistoon vedestä. Ultrasuodatuksessa MXeeneja käytetään esimerkiksi komposiitteina, kuten saostamalla  $Ti_3C_2T_x$ -nanolevyjä polyvinylideeni-difluoridi -substraatin pinnalle.  $Ti_3C_2T_x$ -nanolevyjen hydrofiilisyyden on keskeisessä roolissa veden kulkeutumisen parantamisessa: vetysidoksia muodostuu enemmän, mikä puolestaan kiihdyttää faasi-inversiota, pienentää pintakerroksen paksuutta sekä edistää makrohuokosten muodostumista kalvorakenteeseen. Faasi-inversiossa veden ja orgaanisen liuottimen välinen rajapinta sekoittuu. [24]

Nanosuodatusta käytetään esimerkiksi suurien ionien ja väriaineiden poistamiseen vedestä, koska se on tehokasta, energiankulutukseltaan alhaista ja ympäristöystävällistä. Kerroksellisilla materiaaleilla voidaan saavuttaa tehokkaampaa ja selektiivisempää veden kuljetusta, koska niiden kerrosten väliset kanavat ja nanohuokosten suuri määrä ovat suotuisia ominaisuuksia veden puhdistukseen kalvomaisilla materiaaleilla. [24]

Käänteisosmoosi on menetelmänä tehokas ja helppokäyttöinen. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi suolojen poistoon vedestä. [24] Käänteisosmoosi perustuu diffuusion. [33]

MXeenia voidaan yhdistää käänteisosmoosissa käytettävään polyamidiohukalvoon, mikä lisää kalvon suorituskykyä. [24]

Kalvojen käyttöön vedenpuhdistuksessa liittyy kuitenkin myös haasteita. Isoksi haasteeksi nousee MXeenien hapettuminen sekä kalvojen kestävyys ja suorituskyvyn parantamisen tarve. Kalvojen valmistuksessa niiden rakennetta ja kestävyyttä voitaisiin optimoida rakentamalla ne kerros kerrokselta. Kalvojen perusteellisempi karakterisointi voisi auttaa ymmärtämään niiden ominaisuuksia paremmin.

### 3.4.2 Adsorptio

Lääkeainejäämien poistamiseen vedestä on tutkittu monia tapoja, mutta adsorptiota pidetään lupaavana teknologiana sen helppokäyttöisyyden, muokattavuuden, alhaisen energiankulutuksen ja vähäisen haitallisten sivutuotteiden muodostumisen ansiosta. Lisäksi on tutkittu sonikoinnin vaikutusta MXeeni-materiaalien adsorptiokapasiteettiin. [23] Adsorptio voidaan jakaa kahteen kategoriaan riippuen adsorbantista ja adsorboitavasta aineesta ja niiden välisistä vuorovaikutuksista. Fysikaalisessa adsorptiossa vuorovaikutukset ovat heikkoja molekyylien välisiä voimia, kuten van der Waalsin voimia, adsorbantin ja kontaminantin välillä. Kemiaalisessa adsorptiossa puolestaan adsorptio tapahtuu kovalenttisten sidosten syntymisen johdosta. Kovalenttiset sidokset syntyvät tällöin adsorbantin pinnan ja kontaminantin välille. [1] MXeenin pinnan funktionaaliset pintaryhmät, kuten fluori, kloori ja hydroksyyli-ryhmä tekevät materiaalin pinnalle negatiivisen varauksen, mikä edistää elektrostaattisia vuorovaikutuksia ja siten siihen perustuvaa adsorptiota. Tämä mekanismi johtaa erityisesti positiivisesti varautuneiden metalli-ionien tehokkaampaan adsorboitumiseen. [17] Adsorboinnin tehokkuuteen vaikuttaa monet tekijät, kuten MXeenin pinnan ominaispinta-ala, adsorbantin konsentraatio, liuoksen pH-arvo, lämpötila ja reaktioaika.  $Ti_3C_2T_x$ -MXeeneja ja niistä tehtyjä komposiitteja on käytetty veden puhdistuksessa adsorboinnin lisäksi myös kalvoina ja fotokatalyyttisinä elektrodeina. [1]

Kuten jo aiemminkin on mainittu, MXeenien kerroksellinen rakenne, laaja ominaispinta-ala ja hydrofiilisyytensä ja pinnan erilaiset funktionalisoinnit mahdollistavat niiden hyvät ominaisuudet adsorptioon. Lisäksi MXeeneilla on ainutlaatuinen ominaisuus pelkistää kontaminantteja

liuoksessa yhtä aikaa adsorption kanssa. [1] Taulukossa 1 on esitetty  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenien poistotehokkuuksia (removal rate, mg/g) erilaisille kontaminanteille. Taulukosta 1 havaitaan, että MXeenien adsorptiokapasiteetti vaihtelee. Tämä johtuu esimerkiksi erilaisista pintaryhmistä, pH:sta, lämpötilasta ja käytetyn materiaalin pinta-alasta sekä morfologiasta. Epäorgaanisilla aineilla myös ionin koko vaikuttaa adsorboitumiseen.

Taulukko 1: MXeenien adsorptiokapasiteetteja eri kontaminanteille

Kontaminantti	MXeeni	Kohde	Olosuhteet	Max. adsorptiokapasiteetti (mg/g)	Ref.
Orgaaniset aineet	$Ti_3C_2T_x$ dispersio	Metyleeninsininen, MB	pH: 6-9 25 °C	99,9	[34]
Epäorgaaniset aineet	$Ti_3C_2T_x$ dispersio	Lyijyionit, Pb(II)	pH: 2-6 20 °C 2 h	36,6	[35]
	$Ti_3C_2T_x$ dispersio	Kupari-ionit, Cu(II)	pH: 2-6 20-45 °C	86,5	[36]
	$Ti_3C_2T_x$ kalvo	Kromi-ionit, Cr(VI)	pH: 5,14 huoneenlämpö 0-3000 min	84	[37]
Lääkeaineet	Sonikoitu $Ti_3C_2T_x$ dispersio	Amitriptyliini	pH: 7,0	241	[23]

MXeenien adsorptiokapasiteetteja voidaan laskea kaavalla (1). Kaavassa kontaminantin alkukonsentraatio ( $C_{alku}$ ) ja loppukonsentraatio ( $C_{loppu}$ ) vähennetään toisistaan, ja erotus jaetaan adsorbantin massalla ( $m$ ). Osamäärä kerrotaan vielä liuoksen tilavuudella ( $V$ ).

$$(1) Q = \frac{(C_{alku} - C_{loppu})}{m} * V$$

## 4 Muut menetelmät

### 4.1 Fotokatalyyttinen hajotus

Fotokatalyysissä yhdistetään valo ja puolijohdemateriaali. Fotokatalyysissä muodostuu valon vaikutuksesta hydroksyyli- ( $\cdot\text{OH}$ ) ja happiradikaaleja ( $\cdot\text{O}_2^-$ ). Näistä erityisesti hydroksyyli- ja happiradikaalit ovat tehokkaita hapettimia, mutta myös happiradikaalit osallistuvat esimerkiksi orgaanisten yhdisteiden hajottamiseen. [38] Fotokatalyyttinen materiaali absorboi valoa ja nousee siten korkeammalle energiatasolle. Sitten se luovuttaa virittyneen tilan energian toiselle yhdisteelle. Tämä johtaa kemialliseen reaktioon, jossa itse katalyytti ei kuitenkaan kulu. MXeenien sähkönjohtavuus ja kyky siirtää elektroneja ovat tarpeellisia ominaisuuksia fotokatalyysissä. [19] MXeeneja voidaan käyttää itsessään fotokatalyyttinä, tai ne voidaan yhdistää jonkin muun fotokatalyyttisen materiaalin kanssa ominaisuuksien optimoimiseksi. MXeenit muodostavat reaktiivisia happiradikaaleja, jotka hajottavat tehokkaasti erityisesti orgaanisia molekyyliä ja siten myös lääkkeitä. Fotokatalyyttinen hapettuminen tapahtuu vesiliuoksessa vaiheittain: ensin tapahtuu kontaminanttien diffuusio liuokseen ja sitä myötä adsorptio katalyytin eli MXeenin pinnalle, sitten fotokatalyysi tapahtuu materiaalin pinnalla ja lopuksi reaktiotuotteet hajoavat ja hapettumistuotteet diffusoituvat jälleen. [17]

Näkyvälle valolle altistumisen johdosta MXeenit absorboivat fotoneja, mikä aiheuttaa elektronien virittymisen valenssivyöltä johtavuusvyölle. Virittymisestä seuraa vakansseja eli puuttuvia elektroneja ja siten syntyy positiivisesti varautuneita aukkoja valenssivyölle. Valon myötä virittyneet elektronit ja aukot osallistuvat hapetus-pelkistysreaktioihin MXeenin pinnalla. Absorboituneella fotonilla on riittävästi energiaa siirtämään elektroneja valenssivyöltä johtavuusvyölle. Tämän tapahtuminen happiradikaalien syntymisen rinnalla mahdollistaa MXeenien hyvät fotokatalyyttiset valmiudet erilaisissa sovelluksissa. [17]

### 4.2 Hybridimateriaalit

MXeeneja on mahdollista yhdistää myös muiden materiaalien kanssa, jolloin niitä voidaan käyttää hybridimateriaaleina myös veden puhdistuksessa. MXeeni-pohjaiset hybridimateriaalit

ovat osoittautuneet hyviksi materiaaleiksi esimerkiksi raskasmetalli-ionien poistoon niiden suuren ominaispinta-alan, monipuolisen pintamodifikoinnin ja hyvien ioninvaiht ominaisuuksien ansiosta. MXeenien negatiivisesti varautuneet pintaryhmät tarjoavat otollisen ympäristön kationisille raskasmetalli-ioneille. Sähköstaattiset vuorovaikutukset tarjoavat esimerkiksi lyijylle, kadmiumille ja kromille kiinnittymispaikkoja materiaalin pinnalle. MXeeni-materiaalin yhdistäminen esimerkiksi metalliorganisten runkorakenteiden (MOF) kanssa lisää niiden mahdollisia sovelluksia mahdollistamalla erottelukyvyn sekä parantamalla niiden mekaanista pisyvyyttä. [39]

Myös kalvomaisia MXeeneja voidaan käyttää erilaisina hybridimateriaaleina. Ultrasuodatukseen käytettyjä kalvoja on muokattu  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenilla, mikä on parantanut niiden hydrofiilisyyttä, tuottanut negatiivisesti varautuneen pinnan ja osoittanut hyvää erotuskykyä orgaanisille molekyyille. Orgaanisia kontaminantteja ovat olleet esimerkiksi tanniinihappo ja humiinihappo. Humiinihapon tapauksessa MXeenin lisäys kalvon pinnalle esti merkittävästi enemmän hapon läpipääsyä, johtuen kokoeksklusiivisuudesta ja hydrofobisten vuorovaikutusten vähenemisestä. [39]

Lisäksi eräässä tutkimuksessa  $Ti_3C_2T_x$ -MXeenin kerrosten väliin polymerisoitiin polypyrroli-johdepolymeeriä (PPy). Tutkimuksessa polypyrroli polymerisoitiin MXeenin rakenteeseen. Tutkimuksessa osoitettiin  $Ti_3C_2T_x$ -elektrodin kapasitanssin kaksinkertaistuvan rakenteen muokkauksen ansiosta. Tämän kaltaista hybridimateriaalia voidaan käyttää esimerkiksi superkondensaattorimateriaalina, koska sillä on korkea syklinen stabiilius ja hyvä sähkönjohtavuuskyky. [40]

## 5 Johtopäätökset

MAX-rakenteisiin ja MXeeneihin liittyvä tutkimus ovat lisääntyneet ja kehittyneet viime vuosina. [41] Vaikka MXeenit ovat käyttökelpoisia ja hyvillä ominaisuuksilla varustettuja materiaaleja, on niillä silti myös rajoitteita ja haasteita, jotka rajoittavat niiden käyttöä suuremmissa skaalautuvuudessa. Eräs suurimmista haasteista onkin MXeenien synteessin vaikeudet ja siihen liittyvät ongelmat: synteessissä käytetään paljon haitallisia ja myrkyllisiä kemikaaleja, kuten aiemmin mainittua vetyfluoridia HF, sekä synteeseihin vaadittavat olosuhteet ovat äärimmäisiä ja täten terveydelle ja ympäristölle haitallisia. [1] Lisäksi suureksi hankaluudeksi on noussut MXeenien valmistukseen liittyvät korkeat kustannukset ja niihin nähden alhainen saanto sekä voimakas taipumus hapettumiseen. [10], [37] Tällä hetkellä aktiivihiihi on kaikkein taloudellisin materiaali veden puhdistuksessa, ja siihen verrattuna MXeenit ovat kalliita ja niiden valmistusprosessit vaikeita. [28] Jotta MXeeneihin liittyvää tutkimusta voitaisiin edistää, olisi löydettävä kustannustehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä tapoja suuremman skaalan valmistuksen saavuttamiseksi. Suuremman mittakaavan valmistuksessa kulujenkin voidaan olettaa toki pienenevän. [37]

MXeenien pinnalle syntetisoitavien funktionaalisten pintaryhmien synteisiä tulisi myös parantaa ja tehostaa. Funktionaaliset pintaryhmät vaikuttavat suoraan MXeenin ominaisuuksiin ja esimerkiksi sen kykyyn varastoida energiaa, minkä vuoksi on tärkeää kehittää tehokkaita tapoja synteessille ja optimoida sitä. [41] Pintaryhmien funktionalisoinnin lisäksi MXeenien kemiallista sitoutumista ja asymmetriaa on tutkittava lisää, jotta kokeellinen ja teoreettinen puoli voidaan yhdistää toimivaksi kokonaisuudeksi. [7]

Kun työskennellään vesiliuoksissa, MXeenien haasteiksi nousevat niiden termodynaaminen sekä oksidatiivinen tasapaino. Vedellisissä olosuhteissa hapettuminen tapahtuu herkemmin ja  $Ti_3C_2T_x$ -rakenne hapettuu helposti  $TiO_2$ -rakenteeksi, koska se ei ole resistenssi happea vastaan. Lisäksi jauhemaiset MXeenit voivat hajota hiilidioksidiksi ja titaanioksidiksi yli  $20^\circ C$ :n lämpötiloissa ja hapellisissa olosuhteissa. Vaikka MXeenit ovatkin materiaaleina suhteellisen stabiileja, niiden käyttöä erilaisissa liuottimissa tulee tutkia lisää. MXeeni-kerrosten välisen etäisyyden muokkaamisella niiden stabiiliutta voidaan muokata ja parantaa. [1] MXeenien pinnalle voidaan lisätä pinta-aktiivisuusaineita, joilla niiden stabiiliutta voidaan parantaa, sillä

ne estävät materiaalin reagoimista hapen kanssa. MXeenin valmistusta ja synteesiä optimoimalla voidaan siis valmistaa rakenteita, jotka ovat stabiilimpia ja siten käyttökelpoisempia veden puhdistuksessa. [28]

Tulevaisuudessa MXeenien synteesin ympäristöystävällisempiin kemikaaleihin ja menetelmiin panostaminen on tärkeää, jotta voidaan minimoida haitallisten ja myrkyllisten kemikaalien käyttö. MXeenien valmistuksen skaalautuvuutta tulisi myös kehittää suuremmaksi, jotta uusien vedenpuhdistusmateriaalien kasvavaan tarpeeseen voitaisiin paremmin vastata ja samalla tehdä valmistuksesta taloudellisempaa ja tehokkaampaa. [24]

Jo käytössä olevien menetelmien, kuten adsorption, lisäksi MXeenien käyttöä voidaan tutkia lisää muissakin veden puhdistukseen käytettävissä sovelluksissa, kuten kapasitiivisessa deionisaatiossa, antimikrobisina aineina ja biosorbentteina. MXeeni-nanomateriaalit ovat veden puhdistukseen otollisia materiaaleja, joilla on suuri potentiaali erilaisten kontaminanttien poistoon vedestä. [37] Myös MXeeni-hybridimateriaaleilla on paljon potentiaalia veden puhdistuksen tulevaisuudessa, koska niillä on useita hyviä ominaisuuksia muihin 2D-materiaaleihin verrattuna. [2] Vaikka MXeenien valmistukseen ja käyttöön liittyy haasteita, niiden odotetaan kehittyvän tulevaisuudessa kohti uutta aikakautta veden ja ympäristön puhdistuksessa.

MXeenit ovat uudehko ja potentiaalinen ryhmä 2D-materiaaleja, ja niihin liittyvä tutkimus on mielenkiintoista ja innovatiivista. MXeeneihin liittyy muiden materiaalien tavoin haasteita, mutta menetelmien kehittyessä nekin haasteet ovat varmasti ratkaistavissa. Veden puhdistuksen tarpeen kasvaminen johtaa varmasti MXeenien laajempaan tutkimukseen ja siten uusien menetelmien, MXeenien ja hybridimateriaalien kehittymiseen. MXeenien ominaisuuksista tärkeimmäksi nousee niiden erinomainen adsorptiokyky, joka mahdollistaa sovellukset erilaisissa materiaaleissa.

## Viiteluettelo

- [1] M. Tawalbeh, S. Mohammed, A. Al-Othman, M. Yusuf, M. Mofijur, ja H. Kamyab, "MXenes and MXene-based materials for removal of pharmaceutical compounds from wastewater: Critical review", *Environ. Res.*, vol. 228, s. 115919, heinä 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.115919.
- [2] M. Berkani, A. Smaali, F. Almomani, ja Y. Vasseghian, "Recent advances in MXene-based nanomaterials for desalination at water interfaces", *Environ. Res.*, vol. 203, s. 111845, tammi 2022, doi: 10.1016/j.envres.2021.111845.
- [3] M. Tawalbeh, S. Mohammed, A. Al-Othman, M. Yusuf, M. Mofijur, ja H. Kamyab, "MXenes and MXene-based materials for removal of pharmaceutical compounds from wastewater: Critical review", *Environ. Res.*, vol. 228, s. 115919, heinä 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.115919.
- [4] S. Raj, D. Bajpai Tripathy, L. Prasad, ja A. Kumar, "Novel 2D MXenes biocomposite for the removal of emerging organic contaminants from wastewater", *J. Appl. Biomater. Funct. Mater.*, vol. 23, s. 22808000251360553, joulu 2025, doi: 10.1177/22808000251360553.
- [5] M. Naguib *ym.*, "Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>", *Adv. Mater. Deerfield Beach Fla*, vol. 23, s. 4248–53, loka 2011, doi: 10.1002/adma.201102306.
- [6] A. Nashim ja K. Parida, "A Glimpse on the plethora of applications of prodigious material MXene", *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 32, s. e00439, heinä 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00439.
- [7] K. Deshmukh, A. Muzaffar, T. Kovářik, M. B. Ahamed, ja S. K. K. Pasha, "Introduction to 2D MXenes: fundamental aspects, MAX phases and MXene derivatives, current challenges, and future prospects", teoksessa *Mxenes and their Composites*, Elsevier, 2022, s. 1–47. doi: 10.1016/B978-0-12-823361-0.00009-5.
- [8] K. Rasool, R. P. Pandey, P. A. Rasheed, S. Buczek, Y. Gogotsi, ja K. A. Mahmoud, "Water treatment and environmental remediation applications of two-dimensional metal carbides (MXenes)", *Mater. Today*, vol. 30, s. 80–102, marras 2019, doi: 10.1016/j.mattod.2019.05.017.
- [9] M. Benchakar *ym.*, "One MAX phase, different MXenes: A guideline to understand the crucial role of etching conditions on Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> surface chemistry", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 530, s. 147209, marras 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147209.
- [10] T. Habib *ym.*, "Oxidation stability of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene nanosheets in solvents and composite films", *Npj 2D Mater. Appl.*, vol. 3, nro 1, s. 8, helmi 2019, doi: 10.1038/s41699-019-0089-3.
- [11] R. K. Mishra, J. Sarkar, K. Verma, I. Chianella, S. Goel, ja H. Y. Nezhad, "Exploring transformative and multifunctional potential of MXenes in 2D materials for next-generation technology", *Open Ceram.*, vol. 18, s. 100596, kesä 2024, doi: 10.1016/j.oceram.2024.100596.
- [12] Y. Wu *ym.*, "Recent advances in transition metal carbides and nitrides (MXenes): Characteristics, environmental remediation and challenges", *Chem. Eng. J.*, vol. 418, s. 129296, elo 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129296.
- [13] M. Benchakar *ym.*, "One MAX phase, different MXenes: A guideline to understand the crucial role of etching conditions on Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> surface chemistry", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 530, s. 147209, marras 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147209.
- [14] K. Deshmukh, T. Kovářik, ja S. K. Khadheer Pasha, "State of the art recent progress in two dimensional MXenes based gas sensors and biosensors: A comprehensive review", *Coord. Chem. Rev.*, vol. 424, s. 213514, joulu 2020, doi: 10.1016/j.ccr.2020.213514.
- [15] C. Zhou *ym.*, "A review of etching methods of MXene and applications of MXene conductive hydrogels", *Eur. Polym. J.*, vol. 167, s. 111063, maaliskuu 2022, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111063.
- [16] X. Jiang *ym.*, "Two-dimensional MXenes: From morphological to optical, electric, and magnetic properties and applications", *Phys. Rep.*, vol. 848, s. 1–58, maaliskuu 2020, doi: 10.1016/j.physrep.2019.12.006.
- [17] H. Alyasi, S. Wahib, T. A. Gomez, K. Rasool, ja K. A. Mahmoud, "The power of MXene-based materials for emerging contaminant removal from water - A review", *Desalination*, vol. 586, s. 117913, loka 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.117913.

- [18]N. Albayati, Z. A. Naser, H. A. Baqi Ahmed, M. Kadhom, ja P. Olusakin Oladoye, "A comprehensive review on the use of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene in membrane-based water treatment", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 345, s. 127448, loka 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2024.127448.
- [19]L. Song *ym.*, "Recent progress in MXene-based materials for water treatment application: A review", *J. Water Process Eng.*, vol. 72, s. 107640, huhti 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107640.
- [20]A. A. AL-Zahrani ja H. Kochkar, "Advancements in MXene synthesis: Novel methods and emerging applications", *J. Alloys Compd.*, vol. 1039, s. 183247, syys 2025, doi: 10.1016/j.jallcom.2025.183247.
- [21]C. Zhou *ym.*, "A review of etching methods of MXene and applications of MXene conductive hydrogels", *Eur. Polym. J.*, vol. 167, s. 111063, maaliskuu 2022, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111063.
- [22]T. Zhang *ym.*, "Synthesis of two-dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene using HCl+LiF etchant: Enhanced exfoliation and delamination", *J. Alloys Compd.*, vol. 695, s. 818–826, helmikuu 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.10.127.
- [23]S. Kim *ym.*, "Enhanced adsorption performance for selected pharmaceutical compounds by sonicated Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene", *Chem. Eng. J.*, vol. 406, s. 126789, helmikuu 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126789.
- [24]N. Albayati, Z. A. Naser, H. A. Baqi Ahmed, M. Kadhom, ja P. Olusakin Oladoye, "A comprehensive review on the use of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene in membrane-based water treatment", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 345, s. 127448, loka 2024, doi: 10.1016/j.seppur.2024.127448.
- [25]L. Ding, Y. Wei, Y. Wang, H. Chen, J. Caro, ja H. Wang, "A Two-Dimensional Lamellar Membrane: MXene Nanosheet Stacks", *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 56, nro 7, s. 1825–1829, 2017, doi: 10.1002/anie.201609306.
- [26]J. A. Kumar *ym.*, "Methods of synthesis, characteristics, and environmental applications of MXene: A comprehensive review", *Chemosphere*, vol. 286, s. 131607, tammi 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131607.
- [27]Y. Wu *ym.*, "Recent advances in transition metal carbides and nitrides (MXenes): Characteristics, environmental remediation and challenges", *Chem. Eng. J.*, vol. 418, s. 129296, elokuu 2021, doi: 10.1016/j.cej.2021.129296.
- [28]S. Yu *ym.*, "MXenes as emerging nanomaterials in water purification and environmental remediation", *Sci. Total Environ.*, vol. 811, s. 152280, maaliskuu 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152280.
- [29]W. Cao *ym.*, "A review of how to improve Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene stability", *Chem. Eng. J.*, vol. 496, s. 154097, syys 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.154097.
- [30]A. A. Ghani *ym.*, "Adsorption and electrochemical regeneration of intercalated Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene for the removal of ciprofloxacin from wastewater", *Chem. Eng. J.*, vol. 421, s. 127780, loka 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127780.
- [31]S. Zhang, P. Huang, J. Wang, Z. Zhuang, Z. Zhang, ja W.-Q. Han, "Fast and Universal Solution-Phase Flocculation Strategy for Scalable Synthesis of Various Few-Layered MXene Powders", *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 11, nro 4, s. 1247–1254, helmikuu 2020, doi: 10.1021/acs.jpcclett.9b03682.
- [32]X. Wang *ym.*, "Few-layer Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene delaminated via flash freezing for high-rate electrochemical capacitive energy storage", *J. Energy Chem.*, vol. 48, s. 233–240, syys 2020, doi: 10.1016/j.jechem.2020.01.006.
- [33]L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, ja P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges", *Water Res.*, vol. 43, nro 9, s. 2317–2348, touko 2009, doi: 10.1016/j.watres.2009.03.010.
- [34]Z. Wei, Z. Peigen, T. Wubian, Q. Xia, Z. Yamei, ja S. ZhengMing, "Alkali treated Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXenes and their dye adsorption performance", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 206, s. 270–276, helmikuu 2018, doi: 10.1016/j.matchemphys.2017.12.034.
- [35]B.-M. Jun, N. Her, C. M. Park, ja Y. Yoon, "Effective removal of Pb(II) from synthetic wastewater using Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene", *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 6, nro 1, s. 173–180, joulukuu 2019, doi: 10.1039/C9EW00625G.

- [36] A. Shahzad *ym.*, "Two-Dimensional Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene Nanosheets for Efficient Copper Removal from Water", *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 5, nro 12, s. 11481–11488, joulu 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b02695.
- [37] I. Ihsanullah, "MXenes (two-dimensional metal carbides) as emerging nanomaterials for water purification: Progress, challenges and prospects", *Chem. Eng. J.*, vol. 388, s. 124340, touko 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.124340.
- [38] R. S. Pedanekar, S. K. Shaikh, ja K. Y. Rajpure, "Thin film photocatalysis for environmental remediation: A status review", *Curr. Appl. Phys.*, vol. 20, nro 8, s. 931–952, elo 2020, doi: 10.1016/j.cap.2020.04.006.
- [39] N. Rabiee, "MXene-based composites for environmental applications: Recent advances", *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, nro 6, s. 119521, joulu 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.119521.
- [40] B. Ronnasi, M. Mahmoodian, S. Mohammadi, M. Yasoubi, ja Z. Sanaee, "α-NSA doped PPy @ Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> hybrid material as a high-performance supercapacitor electrode", *J. Mater. Res.*, vol. 37, maaliskuu 2022, doi: 10.1557/s43578-022-00527-z.
- [41] N. Kumar *ym.*, "Progress in synthesis of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene-based nanostructures for energy harvesting and storage: A review", *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, vol. 10, nro 4, s. 101034, joulu 2025, doi: 10.1016/j.jsamd.2025.101034.