VEDENKÄYTÖN VÄHENTÄMINEN TEKSTIILIVÄRJÄYSPROSESSISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2023

Aino Länne

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Ritva Tuunila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LENS School of Engineering Science

Kemiantekniikka

Aino Länne

Vedenkäytön vähentäminen tekstiilivärjäysprosessissa

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2023

31 sivua, 5 kuvaa, 4 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Ritva Tuunila

Avainsanat: tekstiilivärjäys, väriaine, vedenkäyttö, veden kierrätys, puuvilla

Tekstiiliteollisuus kuluttaa vuosittain valtavia määriä vettä. Vesi on osana lähes kaikissa tekstiilivalmistuksen prosessivaiheissa. Makean veden ollessa rajallinen luonnonvara, on keinoja vähentää veden määrää tekstiilin valmistusprosessissa tutkittu paljon. Tulevaisuudessa voidaan odottaa veden hinnan nousua, sekä yhä tiukempia rajoitteita makean veden kulutukselle. Tekstiilivärjäys on tärkeä osa tekstiilin valmistusprosessia, ja makean veden lisäksi se kuluttaa suuren määrän väriaineita ja muita kemikaaleja.

Tämä työ on kirjallisuuskatsaus erilaisista tutkitusta keinoista pienentää makean veden kulutusta puuvillan värjäyksessä reaktiivisilla väriaineilla. Työssä arvioitiin sekä veden kokonaismäärän vähentämistä prosessissa uusilla tekniikoilla, että raakaveden käytön vähentämistä prosessiveden kierrätyksellä takaisin prosessiin. Arvioinnissa otettiin huomioon vedenvähennyskeinojen soveltuvuus teollisuuskäyttöön, sekä niillä säästettävän veden määrä. Laboratorio- ja pilottikokeilla on löydetty useita lupaavia keinoja vedenkäytön vähentämiseksi. Näitä ovat esimerkiksi vaahto- ja ultraäänivärjäys, sekä makean veden korvaaminen merivedellä. Työssä havaittiin kuitenkin, että tällä hetkellä monien uusien värjäystekniikoiden teollisuusmittakaavan käyttöönoton esteenä on laitteistojen ja koko prosessin muokkaamisen korkea hinta. Kuitenkin esimerkiksi vesikustannusten määrän laskulla voi olla jo suuri vaikutus käyttökustannuksiin.

Sisällysluettelo

1 Johdanto 4
2 Tekstiilivärjäys 5
2.1 Värjäysprosessit 5
2.2 Väri- ja apuaineet 7
3 Veden käyttö tekstiilivärjäyksessä 10
4 Vedenkäytön vähentäminen 11
4.1 Uudet tekniikat 12
4.1.1 Ultraäänivärjäys 12
4.1.2 Vaahtovärjäys 13
4.1.3 Makean veden korvaaminen täysin 14
4.1.4 Misellit 16
4.2 Värjäysveden kierrätys 17
5 Prosessivedenkierrätys-skenaario 20
6 Yhteenveto ja johtopäätökset 23
Lähteet 26

1 Johdanto

Tekstiiliteollisuus kuluttaa suuria määriä makeaa vettä, keskimäärin 100–200 litraa kiloa tekstiiliä kohti (Bechtold & Pham, 2019). Vesi on osana lähes kaikissa tekstiilinvalmistusvaiheissa. Tekstiilin värjäysprosessissa vesi on yleisimmin käytetty liuotin väriaineille ja se toimii apuaineena esimerkiksi kuitujen kostuttamisessa ja lämmittämisessä värjäyksen aikana. (Burkinshaw, 2015.) Suuren makean veden kulutuksen lisäksi tekstiiliteollisuus on yksi suurimpia vesistöjen saastuttajia, sillä värjäysvaiheen jäteveden mukana kulkeutuu haitallisia kemikaaleja ympäristöön (Bechtold & Pham, 2019). Vaikka kaikki jätevedet puhdistetaan, ei nykyisillä tekstiiliteollisuudessa käytettävillä vedenkäsittelytavoilla saada poistettua kaikkia epäpuhtauksia (Lara, Cabral & Cunha, 2022).

Makea vesi on rajallinen luonnonvara. Arviolta noin 1,1 miljardilla ihmisellä ei ole puhdasta vettä käytettävissä ja makea vesi on jakaantunut epätasaisesti maapallolla. (WWF, 2023.) Tekstiiliteollisuus sekä käyttää makeaa vettä paljon, että pilaa vesistöjä jätevedellään. Vesistöissä jäteveden sisältämät kemikaalit ja värit voivat aiheuttaa esimerkiksi happipitoisuuden laskua ja muutoksia eliöitten kykyyn yhteyttää. (Uddin, 2021.) Puhtaan veden puutteesta ympäristövaatimukset veden käyttöön liittyen ovat kiristyneet ja tulevat kiristymään lisää tulevaisuudessa (Laitinen et al., 2020).

Tapoja vähentää vedenkäyttöä tekstiiliteollisuudessa ja erityisesti värjäysprosessissa on tutkittu paljon, esimerkiksi Parisi et al. (2015) ja Lara, Cabral & Chuna, (2022), mutta käytännön toteutus on ollut vielä harvinaista teollisuusmittakaavassa. Täysin vedettömiä ratkaisuja on käytössä, mutta usein pienemmissä tuotantomittakaavoissa. Värjäysvaihe on tärkeä, sillä tekstiilin värillä on suuri vaikutus kuluttajien ostopäätökseen (Hussain & Wahab, 2018). Tämän työn tarkoituksena on kerätä tietoa tavoista vähentää vedenkäyttöä tekstiilivärjäyksessä ja arvioida niiden soveltuvuutta teollisuuskäyttöön.

Tämän työn tutkimuskysymyksiä ovat: Miten vedenkäyttöä voitaisiin vähentää tekstiilivärjäyksessä? Millaisia uusia laitteistoja tähän on kehitetty ja miten jo käytössä olevia prosesseja voitaisiin tehostaa? Tavoitteena on myös tarkastella keinojen taloudellista kannattavuutta, sillä käytössä olevien prosessien täydellinen muuttaminen voi vaatia paljon pääomaa. Työn lopussa on tehty skenaario prosessiveden kierrätysjärjestelystä ja laskelma sillä säästettävästä veden määrästä.

2 Tekstiilivärjäys

Tekstiilivärjäyksen päätavoitteena on saada aikaan tasainen ja kestävä väri, joka kattaa koko tekstiilin. Värjäys voidaan suorittaa missä tahansa tekstiilin valmistusvaiheessa, riippuen käytössä olevista laitteista. Väri voidaan siis lisätä polymeeriin, kuituun, lankaan tai jo kudottuun tai neulottuun tekstiiliin. Värjäys tapahtuu tekstiiliin kiinnittyvillä väriaineilla. Väriaineiden käyttäytyminen tekstiilikuitujen kanssa riippuu väriainetyypistä ja värjättävästä materiaalista. (Burkinshaw, 2015.) Tämä työ keskittyy puuvillan värjäykseen. Puuvilla on yleisin tekstiilityyppi ja arviolta noin 30 %:a maailman tekstiilituotannosta keskittyy puuvillaan. Puuvillaa saadaan puuvillakasvin siemenistä ja se koostuu suurimmaksi osaksi selluloosasta. (Clark, 2011.) Tässä kappaleessa esitetään tekstiilivärjäyksen teoriaa, sekä yleisimpiä käytänteitä.

2.1 Värjäysprosessit

Värjäysprosessissa väriaine liuotetaan ensin haluttuun liuottimeen, jolloin se muodostaa värinesteen. Värinesteessä väriaine kulkeutuu kuidun rajapinnalle, josta se adsorboituu ensin kuidun pinnalle ja diffuntoituu tästä koko kuituun. Tarkoitus on päätyä tasapinoon, jossa värikonsentraatiot eivät enää juuri muutu kuidun ja värikylvyn välillä. (Clark, 2011.) Tasaisen värjäyslopputuloksen saavuttamiseksi joko värinestettä tai tekstiiliä pidetään jatkuvassa liikkeessä värjäyksen ajan. Diffuusiovaihetta kutsutaan yleisesti sidontavaiheeksi (Bechtold & Pham, 2019).

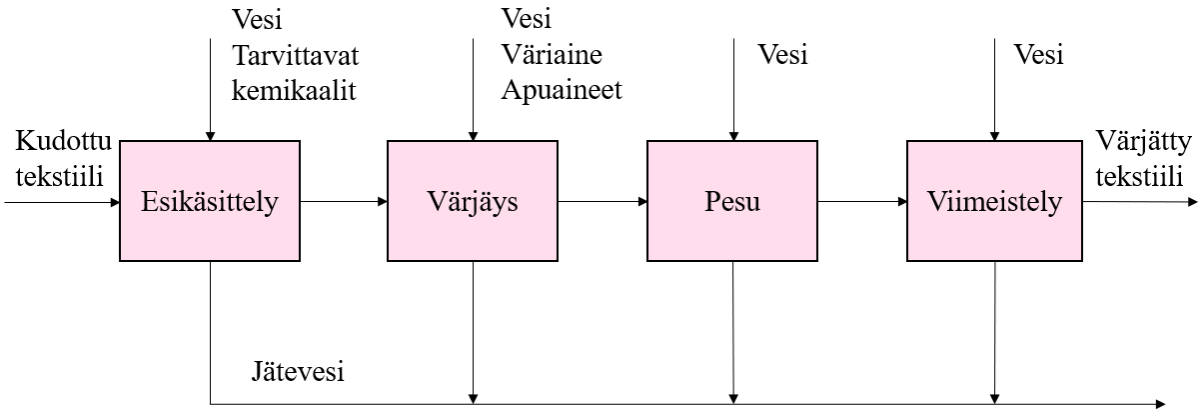
Tekstiilien värjäys voidaan toteuttaa erä- tai jatkuvatoimisella prosessilla. Näistä kahdesta käytetyin tekstiiliteollisuudessa on erävärjäys (Varadarajan & Venkatachalam, 2016). Yleisin erävärjäysprosessi on uuvutusvärjäys (exhaust dyeing), jossa väriaineen halutaan siirtyvän värinesteestä tekstiiliin. Yleisimpiä laitteistoja tähän ovat puomivärjäys, suihkuvärjäys, sekä erilaiset jigger- ja vinssivärjäyskoneet. (Clark, 2011.)

Pad-värjäys on jatkuvavärjäysprosessi, jossa värjäys tapahtuu linjastossa. Tekstiili kulkee ensin upotettuna värinesteeseen ja tästä puristavien rullien välistä poistaen ylimääräisen värinesteen. Kun ylimääräinen neste on saatu poistettua, tapahtuu sidontavaihe, jossa värimolekyylit kiinnittyvät kunnolla tekstiiliin. Pad-värjäyksessä kangas kulkee laitteistossa levitettynä. (Clark, 2011.) Pad-värjäyksessä halutaan välttää nesteen värikonsentraation muutosta toisin kuin erävärjäyksessä. Värin kuluminen värinesteestä aiheuttaa värjäystuloksen heikkenemistä tekstiilin loppua kohden mennessä. (Bechtold & Pham, 2019.) Tekstiiliä ei siis saada värjättyä tasaisesti, vaan loppupää jää haaleammaksi. Taulukossa 1 on esitetty uuvutus- ja pad-värjäysprosessien eroja.

Taulukko 1. Uuvutus- ja pad-värjäyksen eroja

	Uuvutusvärjäys	Pad-värjäys
Nestesuhde	1:8–1:30	1:0.75
Tekstiili	Kuitu, lanka, kangas	Kangas
Apuaineet	Suola, alkali	Alkali
Tyyppi	Erävärjäys	Jatkuva
Värjäykseen kuluva aika	2–3 hr	2–12 hr
Laitteisto	Puomit, suihku, vinssit ja jiggerit	Cold-pad-batch

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu esimerkkikaavio puuvillan märkä- ja värjäysprosessille. Värjäysprosessin prosessikaaviot vaihtelevat värjättävän tekstiilin ja laitteiston mukaan. Pad-värjäyksessä värjäys, pesu ja viimeistely tapahtuvat kaikki yhdessä linjastossa, toisin kuin erävärjäyksessä. Esikäsittelyyn voi kuulua esimerkiksi tekstiilin valkaisu, merserointi, jossa puuvilla turvotetaan värin parempaan sitoutumista varten, ja neutralointi (Varadarajan & Venkatachalam, 2015; Ozturk et al., 2016). Viimeistelyllä halutaan parantaa jotain tekstiilin piirteitä, kuten pehmeyttä tai pesunkestoa (Bechtold & Pham, 2019). Pesuvaiheessa kaikki kulumatta jäänyt ja mahdollisesti hydrolysoitunut väriaine huuhdellaan pois runsaalla vesimäärällä yleensä useita kertoja. Jäteveden mukana lähtee joka vaiheessa käyttämättä jääneet kemikaalit, sekä muut epäpuhtaudet, joita tekstiilistä voi vielä irrota. Jätevedet johdetaan veden puhdistukseen (Burkinshaw & Salihu, 2019.)



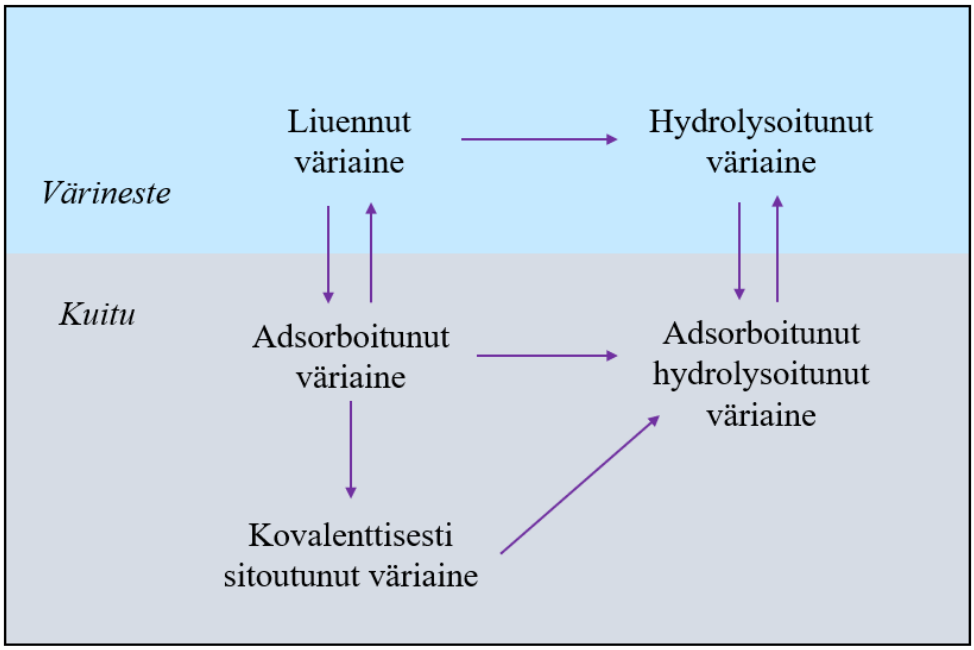
Kuva 1. Tekstiilivärjäysprosessin esimerkkiprosessiskaavio

2.2 Väri- ja apuaineet

Tekstiiliteollisuudessa on käytössä suuri määrä erityyppisiä väriaineita. Tietyssä värjäysprosessissa käytettävät värit riippuvat värjättävästä tekstiilistä, halutusta lopputuloksesta, sekä käytettävistä laitteista. Yleisimpiä väriainetyyppejä puuvillan värjäykseen ovat niiden käyttötapojen mukaan jaettuina suoraväri, reaktiiviset väriaineet, kyyppivärit, rikkivärit ja

atsoiniset värit. (Clark, 2011.). Teollisuudessa käytetään eniten reaktiivisia värejä: niiden osuus on noin 55 %:a puuvillan värjäykseen käytettävien väriaineiden kokonaiskulutuksesta (Burkinshaw & Salihu, 2017). Tämä johtuu siitä, että niiden avulla saadaan kirkas ja kestävä värjäyslopputulos (Varadarajan & Venkatachalam, 2016). Reaktiivisten väriaineiden yleisyyden takia tämä työ keskittyy pääasiallisesti niihin liittyviin värjäysprosesseihin.

Reaktiivisten väriaineiden erikoispiirteenä on niiden kyky luoda kovalenttinen sidos kuitusubstraattiin värin diffundoitumisen jälkeen (Bechtold & Pham, 2019). Väriainemolekyylit koostuvat kromogeeniosasta, reagoivasta osasta, näitten välisestä siltarakenteesta, sekä liukoisuusosasta. Värjäyksessä puuvillan hydroksyyliryhmä toimii nukleofiilinä, johon väriaineen osa liittyy joko additiolla tai substituutiolla. Ongelmana reaktiivisissa väriaineissa on niiden pyrkimys hydrolysoitua veden kanssa. Hydrolysoituneet molekyylit eivät pysty enää kiinnittymään kuituun, joten tätä pyritään välttämään esimerkiksi käyttämällä erilaisia apuaineita. (Clark, 2011.) Kuvassa 2 on esitetty kaavio reaktiivisen väriaineen käyttäytymisestä värjäyksessä.



Kuva 2. Reaktiivisen väriaineen käyttäytyminen värjäyksessä (Bechtold & Phan, 2019) (muokattu)

Värjäyksessä apuaineet tukevat ja avustavat värjäysprosessia. Niitä käytetään esimerkiksi parantamaan värin kiinnittyvyyttä kuituun ja väriaineen kulumista värinesteestä. Apuaineina käytetään sekä yksinkertaisia yhdisteitä, kuten suoloja, että erilaisia polymeerejä. Reaktiiviset väriaineet tarvitsevat elektrolyytin, sekä korkean pH:n reagoidakseen (Ahmed, 2005.) Apuaineiden määrä värjäyksessä on arviolta noin 60—70 %:a käytettävien väriaineiden määrästä, mutta tämä luku voi vaihdella huomattavasti eri värjäysprosessien välillä (Burkinshaw & Salihu, 2017). Uuvutusvärjäys vaatii suolaa hydrolysoitumisen rajoittamiseksi ja yleisin käytetty suola on natriumkloridi. Prosessi vaati myös alkalin sidontavaiheen alkamiseksi eli se aloittaa reaktion väriaineen ja puuvillan selluloosapolymeerin OH-ryhmän kanssa. Yleisimmät tähän käytetyt emäkset ovat NaOH ja Na_2CH_3. (Bechtold & Pham, 2019.) Muita apuaineita ovat esimerkiksi kostutus-, ilmanpoisto-, kirkastus- ja kantoaineet (Burkinshaw & Salihu, 2019a). Apuaineet voivat olla erittäin tarkat eri prosesseille, mutta on myös yleisiä, sekä erä- että pad-värjäyksessä käytettäviä aineita, esimerkiksi alkalit (Burkinshaw & Salihu, 2017).

Värjäyksen lopputulosta voidaan mitata useilla eri arvoilla, mutta yleisimmät tutkimuksissa esiintyvät suureet ovat värjäystuloksen syvyys K/S ja väriaineen kulumisprosentti. K/S arvo saadaan Kubelka-Munk yhtälöllä (1). Absorptiokerroin kuvaa aallonpituudesta riippuvaista valon absorptiota, sirontakerroin valon sirontaa ja reflektanssi valon heijastumista. Absorptiokerroin riippuu suurimmaksi osaksi väriaineesta ja sirontakerroin tekstiilin ominaisuuksista.

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \tag{1}$$

jossa	K	absorptiokerroin
	S	tekstiilin sirontakerroin
	R	tekstiilin reflektanssi

Värien kulumisella värjäysnesteestä tarkoitetaan sitä prosentuaalista määrää väriaineesta, joka kiinnittyy tekstiiliin värjäyksen aikana verrattuna koko väriaineen määrään värjäysnesteessä. Kulumisprosentti on erityisen tärkeä uuvutusvärjäyksessä, jossa se kuvaa väriaineen käytön hyötysuhdetta: mitä enemmän väriainetta kuluu, sitä vähemmän sitä joutuu jäteveden mukana hukkaan. Perinteisillä värjäystekniikoilla reaktiivisten väriaineiden kulumisprosentti on usein huono, arviolta noin 50—70 %. Nestesuhde (liquor ratio) kuvaa värjättävän tekstiilin massaa suhteessa värjäämiseen käytettävän nesteen tilavuuteen. (Bechtold & Pham, 2019; Yu et al., 2014.)

3 Veden käyttö tekstiiliväriäyksessä

Suuri osa teollisuudessa käytettävistä väriaineista on vesiliukoisia. Väriaineet toimivat yleisesti ioni- tai molekyyliliuoksina, ja vesi on yleisin käytetty liuotin. Vettä on tällä hetkellä helposti saatavilla, se on verrattain halpaa ja sen kanssa toimiminen on helppoa. Vesi toimii värjäyksessä myös apuaineena esimerkiksi kuitujen kostuttamisessa ja turvottamisessa. Kostutuksella saadaan poistettua kuituihin jäänyttä ilmaa ja paisutus heikentää kuitujen makromolekyylien välisiä vetysidoksia niin, että väriaine pääsee kuitujen pinnalle. Lisäksi veden mukana väriaine saadaan kuljetettua kuidulle ja vesi toimii väliaineena lämmittämisessä. (Burkinshaw, 2015.)

Värjäyksen aikana pieni osa vedestä on sitoutuneena kuituun, ja loput vedestä on värinesteessä (Burkinshaw & Salihu, 2019b). Huokoisen kuiturakenteen ulkopuolella oleva vesi on niin sanottua vapaata vettä, joka pääsee liikkumaan vapaasti kuidun pinnalla ja kuljettamaan värjäyksessä tarvittavia kemikaaleja. Sidottu vesi on adsorboitunut kuituun, jonka liikettä rajoittaa huokosten seinämät. (Mao et al., 2014.) Upotettuna puuvilla absorboi noin 200 % omasta painostaan vettä. Värjäys tapahtuukin siis yleensä ylimäärässä vettä, mitä puuvillan kostuttaminen vaatisi. (Burkinshaw, 2015.)

Ongelmana veden käytössä on saada väriaine siirtymään kuituun, sillä vesiliukoiset väriainemolekyylit suosivat vesipitoista liuosfaasia kiinteän kuitufaasin sijaan. Siirtymistä tehostetaan esimerkiksi apuaineilla, pH muutoksilla sekä sopivalla lämpötilalla. Burkinshaw, 2015.) Koska väriaineiden on liuottava veteen, estää veden käytön minimoimista värien liukoisuus (Bian et al., 2022). Tiettyä värikonsentraatiota vedessä ei siis voida ylittää.

Kuvassa 1 esitetystä prosessikaaviosta huomataan, että itse värjäysvaiheen lisäksi vettä käytetään myös kaikissa muissa märkäprosessin vaiheissa. On arvioitu, että tekstiiliyrityksillä kuluu vettä yhteensä keskimäärin noin 500000 m^3 vuodessa (Vajnhandl & Valh, 2014). Koska vettä käytettään suuria määriä värjäysprosessissa, syntyy siitä myös suuri määrä jätevettä. Tekstiiliteollisuuden jätevettä pidetäänkin sen suurimpana ongelmana. Jäteveden puhdistuskeinoja käydään läpi prosessiveden kierrätyksen yhteydessä.

4 Vedenkäytön vähentäminen

Koska perinteisissä värjäysprosesseissa kuluu suuria määriä vettä, on vedenkäytön vähentämiseen kehitetty useita tekniikoita. Värjäyksessä veden käyttöä voidaan vähentää joko laskemalla värjäykseen kokonaisuudessaan kuluvan veden määrää uusilla tekniikoilla tai prosessiveden kierrätyksellä, jolloin raakavettä vaaditaan vähemmän. Tässä kappaleessa esitetään tekniikoita ja metodeja vedenkäytön vähentämiseksi, ja arvioidaan niiden soveltumista teollisuuskäyttöön. Keinot keskittyvät puuvillan märkävärjäykseen reaktiivisilla väriaineilla.

4.1 Uudet tekniikat

Tutkimusta uusista tavoista kehittää tekstiilivärjäystä ympäristöystävällisemmäksi on tehty laajasti ja pitkään. Kuitenkin vain harvoja näistä on otettu käyttöön tekstiiliteollisuudessa pääasiallisesti korkeiden kustannuksien takia. Tavoitteena käytettävän prosessiveden vähentämisessä on saada laskettua nestesuhdetta värjäysprosessissa Hussain & Wahab, 2018). Nestesuhteen laskeminen vaikeuttaa värinesteen tasaista imeytymistä tekstiiliin. Lisäksi tämä aiheuttaa väriainemolekyylien kasautumista, joka taas aiheuttaa epätasaisen värjäyslopputuloksen. Toisaalta pienempi vesimäärä johtaa vähäisempään väriainemolekyylien hydrolysoitumiseen. Nestesuhteen lasku vaatii usein täysin uuden laitteiston parantamaan värin imeytymistä kuituun ja dispersiota värinesteeseen, sekä värin tasaista levittymistä tekstiilin pinnalle. (Yu et al. 2014.)

4.1.1 Ultraäänivärjäys

Ultraäänen käyttöä osana uupumisvärjäystä on tutkittu jo pitkään. Tekstiilivärjäyksessä ultraääniaallot aiheuttavat akustista kavitaatiota, jonka avulla saadaan poistettua kuituun jäänyttä kaasua ja parannettua väriaineen diffuusiota kuitujen sisällä (Ma et al., 2020; Vajnhandl & Majcen Le Marechal, 2005). Lisäksi ultraääniaallot rikkovat molekyylikasaantumia, joka parantaa väriaineen dispersiota (Vajnhandl & Majcen Le Marechal, 2005). Ultraäänen avulla voidaan saavuttaa sama värjäystulos nopeammin ja pienemmillä lämpötiloilla sekä kemikaalikonsentraatioilla, perinteisiin tekniikoihin verrattuna (Shanker & Vankar, 2008).

Bian et.al (2022) tutkivat puuvillahahtuvan (cotton sliver) värjäystä ultraäänen avulla. Työssä tutkittiin eri parametrien vaikutusta väriaineen kulumiseen ja väriloppputulokseen. Verrattuna perinteisiin värjäystekniikoihin värikulutus parani noin 33 %:a esikäsittelemättömällä ultraäänivärjäyksellä ja nestesuhdetta saatiin laskettua perinteisistä uuvutusvärjäyssuhteista suhteeseen 1:6. Ultraäänellä saatiin alennettua myös värjäysaikaa, eikä värjäys vaatinut tekstiilin esikäsittelyä. Yli 450 W teholla värjäys onnistui tasaisesti, mutta tehon nosto

tästä arvosta ei parantanut värikulutusta tai K/S arvoa. 1:6:ta pienemmillä suhteilla saatiin suurempi värikulutus, mutta värjäystulos jäi epätasaiseksi. Värimolekyylit alkoivat kasaantua ja värinesteen tasainen kulkeutuminen heikkeni.

Värjäyskokeita ultraäänellä on tähän mennessä suoritettu pienemmissä mittakaavoissa: esimerkiksi Bian et al. (2022) suorittivat kokeensa 5 g puuvillanäytteillä. Kokeet on yleisesti suoritettu ultraäänipesurilla (Ma et al., 2020; Sun, Guo & Liu, 2010) tai -generaattorilla (Bian et al., 2022). Vaikka ultraääntä on tutkittu värjäyksessä paljon, ja sen hyödyt huomattu perinteisiin värjäysmenetelmiin verrattuna, ei sitä olla vielä saatu skaalattua suuremmille tuotantokoneille. Ultraäänen tasaista intensiteettiä, joka vaaditaan tasaisen värjäystulokseen, on vaikea saavuttaa suuremmissa astioissa. Lisäksi ultraäänen integrointi nykyisiin laitteisiin olisi erittäin kallista ja kavitaatioilmiö saattaisi aiheuttaa eroosiota laitteistossa (Hussain & Wahab, 2018.) Eroosion estämiseksi tulisi laitteisto esimerkiksi pinnoittaa titaaninitridillä (Kohli & Mittal, 2010). Ultraääntä kuitenkin hyödynnetään jo laajasti muissa teollisuuskohteissa. Vaikkei laitteistoa saataisikaan skaalattua täysin samoihin mittoihin, kuin perinteiset värjäyslaitteistot, voisi esimerkiksi juuri ultraäänipesureiden kaltaista laitteistoa käyttää pienempien tekstiilierien värjäykseen.

4.1.2 Vaahtovärjäys

Vaahtovärjäyksessä väriaine levitetään värjättävään tekstiiliin vaahdon avulla, eli osa vedestä korvataan ilmalla. Tekniikka on sinällään vanhaa ja sitä on tutkittu ensimmäistä kertaa jo vuonna 1906, mutta sen aikaisella laitteistolla ei saatu aikaan tasaista värjäystulosta. Tekniikan kehityttyä vaahtovärjäyksen käyttöä on alettu taas tutkia tehokkaana vedenvähennyskeinona tekstiilivärjäyksessä. Tämä värjäystekniikka vaatii tosin muiden kemikaalien lisäksi myös vaahdotus- ja vaahdon stabilointiainetta. (Yu et al., 2014.) Vaahdon stabiilisuutta mitataan sen puoliintumisajalla, eli sillä ajalla, jossa vaahdon tilavuus puolittuu (Bhavsar et al., 2017). Vaahdon ominaisuuksien ei pitäisi vaikuttaa värjäyksen suorituskykyyn, koska vaahto toimii vain väriliuoksena ja kuplat rikkoutuvat tullessaan kosketukseen tekstiilin

kanssa (Yu et al., 2014). Vaahtovärjäyksellä saadaan siis pienennettyä nestesuhdetta uhraamatta tasaista lopputulosta.

Mohsin ja Sardar (2019) vertasivat puuvillan vaahtovärjäystä reaktiivisilla väreillä perinteiseen pad-värjäykseen. Tutkimukset suoritettiin laboratoriolaitteilla ja 9 gramman tekstiilinäytteillä. Vaahtovärjäys kulutti vain noin 14,3 %:a pad-värjäyksen kuluttamasta vedestä. Saman värisyvyyden saavuttamiseksi vaahtovärjäys vaati hieman korkeamman väriainekonsentraation, mutta sillä saatiin parempi värin kesto ja K/S-arvot, ja vaahtovärjäyksen energiankulutus oli noin 60 % pienempi. Koska tekstiili oli imenyt vähemmän vettä värjäyksen aikana kuin perinteisessä pad-värjäyksessä, oli värjäysprosessin kesto yli kaksi kertaa nopeampi ja näin tuotantokapasiteetti suurempi. Toista täysin uutta vaahtovärjäyksen kaltaista, nanokuplilla värjäystä, tutkivat Mohsin et al. (2020). Tämä tekniikka muistuttaa tosin enemmän uuvutusvärjäystä, eikä kuplien muodostaminen vaadi erillistä apuainetta. Moshin et al. kokeissa saavutettiin 1:1 nestesuhde. Tämä tekniikan tutkiminen on tosin vielä erittäin varhaisessa vaiheessa.

Vaateyritys Wrangler on alkanut käyttää vaahtovärjäystä farkkukankaan värjäämiseen pienissä tuotantoerissä. Prosessin kehitti Teksasin Fiber and Biopolymer Research Instituutti ja kaupallisti Indigo Mills Desingin. Wranglerin mukaan prosessilla saadaan laskettua vedenkäyttö jopa alle 1 %:iin perinteisestä värjäyksestä. (Wrangler, 2018.) Tekniikkaa pidetään erittäin lupaavana vaihtoehtona perinteiseen pad-värjäykseen, mutta laitteistolle tarvitaan vielä jatkokehittelyä laajempaa teollisuuskäyttöä varten. Ympäristöystävällisyyden lisäksi siirtyminen perinteisistä pad-värjäysmenetelmistä vaahtovärjäykseen olisi kannattavaa myös energiankulutuksen ja tuotantomäärän suhteen.

4.1.3 Makean veden korvaaminen täysin

Vedenkäytön vähentämisen lisäksi makea vesi voidaan yrittää korvata ainakin jossain prosessivaiheissa täysin. Ylikriittinen hiilidioksidi on jo käytössä tekstiilivärjäyksessä ja meriveden käyttöä on alettu tutkia viimeisen viiden vuoden sisällä (Banchero, 2013; de Souza

Ferreira et al., 2021). Vaikka makeaa vettä kuluisikin muissa tekstiilivalmistusvaiheissa, yhdenkin prosessivaiheen muuttamisella voi olla suuri vaikutus veden kokonaiskulutukseen.

Ylikriittistä hiilidioksidia ($scCO_2$) käytetään jo tekstiiliteollisuudessa veden korvikkeena värjäyksessä, mutta käyttö on kohdistunut synteettisiin tekstiileihin ja niiden värjäyksessä käytettäviin dispersioväreihin (Banchero, 2013; Banchero, 2020). Ylikriittisessä nesteessä neste- ja kaasufaasin raja on mahdotonta erottaa (Marcus, 2019). Hiilidioksidin käyttö on suosittua, sillä sen kriittinen piste on matala, ja se on myrkytön, halpa sekä syttymätön kemikaali. Laitteisto on kalliimpi kuin perinteiset laitteistot, mutta käyttökustannukset ovat matalammat**.** Arvion mukaan tällä voidaan säästää 50 %:a kokonaiskustannuksista. Ongelmana puuvillan värjäyksessä on sen kuitujen ja väriaineiden polaarisuus. (Banchero, 2013.)

$ScCO_2$ matala polaarisuus vaikeuttaa väriaineiden liukenemista ja diffuusiota kuituun. Tämän lisäksi emäksinen olosuhde ylikriittisessä nesteessä saattaa häiritä reaktioita väriaineen ja kuidun välillä. Tähän mennessä kirjallisuudessa on tutkittu erilaisten väriaineiden toimivuutta $ScCO_2$ -värjäyksessä ja parhaat tulokset on saatu reaktiivisten ryhmien additiolla dispersioväreihin. Erityisesti triatsiinilla on saatu hyviä värjäystuloksia. Puuvillan värjäys $ScCO_2$:lla on kuitenkin aina vaatinut turvotusainetta kuiduille, joten tekniikan paremmuutta ympäristönäkökulmasta on kyseenalaistettu. (Banchero, 2020.)

Yksi vaihtoehto makealle vedelle on merivesi. Merivesi sisältää suoloja, joita reaktiiviset värit vaativat reagoidakseen puuvillan kanssa ja merivettä on laajemmin saatavilla kuin makeaa vettä. (Solaiman et al., 2019.) De Souza Ferreira et al. (2021) tutkivat kolmen eri reaktiivisen väriaineen suoriutumista verrattuna värjäykseen tislatulla vedellä. Kaikilla väreillä saatiin hyväksyttävät värjäystulokset, mutta antrakinonipohjaisella väriaineella saatiin parhaat tulokset, kun taas atsopohjaisilla väreillä K/S arvot jäivät hieman pienemmäksi verrattuna tislattuun veteen (kuva 3). Koska väriaineita oli vain kolme, de Souza Ferreira et al. uskovat että tutkimusta on jatkettava laajemmalla määrällä väriaineita, ennen kuin yhteyttä reaktiivisten ryhmien ja värjäystuloksen välille voidaan vetää. Ainoana haittapuolena merivedessä on mahdolliset kalsium ja magnesium, sillä ne lisäävät veden kovuutta ja täten aiheuttaa saostumista.

Kuva 3. Vertailu punaisen reaktiivisen värin suoriutumisesta meriveden ja tislatun veden välillä (de Souza Ferreira et al., 2021)

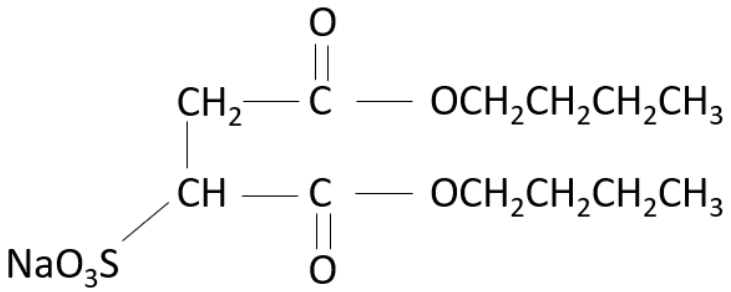
Meriveden käyttö on verrattain uusi metodi, joten sitä on tutkittu vasta pienellä määrällä väriaineita. Jatkotutkimusta tulisi siis suorittaa laajemmalla määrällä väriaineita, mutta merivesi vaikuttaa erittäin lupaavalta ratkaisulta makean veden käytön vähentämiseen. Makean veden lisäksi säästyttäisiin myös suolojen käytössä, eikä merivesi vaadi täysin uuden laitteiston kehittämistä, joten sen käyttöönotto tulisi verrattain halvaksi. (de Souza Ferreira, et al., 2021.)

4.1.4 Misellit

Prosessiveden kierrätyksen yhteydessä tullaan käsittelemään biohajoavien suolojen käyttöä tekstiiliväriäyksessä ja niiden hyötyjä. Veden vähennystä varten on kuitenkin kehitetty muitakin apuaineita esimerkiksi parantamaan väriaineiden imeytymistä, kulumista ja dispersiota. Yksi laajimmin tutkittu apuaine on misellit, joita voidaan hyödyntää värjäyksessä liukoisuuden parantamisessa.

Misellit ovat yleensä vedessä tensideistä muodostuvia molekyylirakennelma, jossa tensidien hydrofobiset päät ovat suuntautuneet rakenteessa sisäänpäin (Rosen, Kunjappu 2012). Xie et al. (2011) tutkivat misellien käyttöä reaktiivisten väriaineiden liukoisuuden

parantamiseksi. Kokeessa käytettiin dibutyylimaleiinihappoesterinatriumsulfaatti-tensidejä (kuva 4), jotka muodostivat väriaineiden kanssastabiileja pinta-aktiivisia misellisysteemejä.



Kuva 4. Dibutyylimaleiinihappoesterinatriumsulfaatti-tensidin rakennekaava

Xie et al. (2011) saivat pienennettyä nestesuhdetta 1:15sta 1:5een ilman väriainemolekyylien paakkuuntumista. Nestesuhteen pienentäminen ei myöskään vaikuttanut negatiivisesti väriaineiden kulumiseen, sitoutumiseen tai reaktiivisuuteen perinteiseen värjäykseen verrattuna. Vaikka kemikaalia tarvittaisiin teollisuusmittakaavassa paljon, noin 50 kg tekstiili tonnia kohti, sen käyttö säästäisi veden lisäksi myös muiden apuaineiden käyttöä. Xie et al. (2011) arvioivat misellien käytön liuottimena säästävän 60 %:a vettä ja 60 %:a elektrolyyttejä värjäysprosessissa.

4.2 Värjäysveden kierrätys

Vaikka täysin uudet tekniikat tulevat luultavasti olemaan välttämättömiä tulevaisuuden kannalta, tulee niiden suunnittelu ja kehittely teollisuuskäyttöä varten kestämään todennäköisesti vielä pitkään, kuten edellisestä kappaleessa todettiin. Tästä syystä jo käytössä olevien tekniikoiden optimointi olisi tärkeää siihen asti, kunnes uudet teknologiat saadaan markkinoille. Tässä kappaleessa esitellään prosessiveden kierrätystä ja sitä varten suunniteltuja vedenpuhdistustapoja.

Veden kierrätyksellä tarkoitetaan värjäysprosessista ulostulevan prosessiveden johtamista takaisin prosessiin puhdistuksen jälkeen. Vaikka prosessiveden kierrätys on käytössä useilla teollisuuden aloilla, esimerkiksi paperin valmistuksessa, ei sitä vielä ole juuri käytössä tekstiiliteollisuudessa. Syynä tähän on se, etteivät käytössä olevat tekstiiliteollisuuden jäteveden puhdistusprosessit pysty puhdistamaan prosessivettä tarpeeksi puhtaaksi veden uudelleenkäyttöä varten. (Buscio et al., 2015; Vainhandl & Valh, 2014.) Värinesteen pH ja vaihtelevat lämpötilat, sekä ylijääneet väri- ja apuaineet tekisivät kierrätyksestä kalliin ja monimutkaisen prosessin (Hussain & Wahab, 2018). Perinteiset väriaineet ovat biohajoamattomia ja varsinkin tummemmat värjäystulokset aiheuttavat myös jäteveden voimakasta värjääntymistä (Yin et al., 2019). Yleinen käytäntö on myös sekoittaa jokaisen prosessivaiheen jätevedet keskenään, joka lisää puhdistamisen vaikeutta (Vajnhandl & Valh, 2014).

Yleisimmät tekniikat värjäyksen jäteveden puhdistukseen ovat otsonointi, membraanitekniikat, biologiset prosessit, sähkökemialliset käsittelyt ja adsorbenttien käyttö (Riera-Torres et al., 2011). Useat tutkimukset prosessiveden kierrätysmahdollisuuksista kohdistuvat edellä mainittujen menetelmien yhdistelmiin. Riera-Torres et al. (2010) tutkivat nanosuodatuksen ja koagulointi-flokkuloinnin yhdistelmää viiden eri reaktiivisen väriaineen poistamiseksi. Kokeet suoritettiin lisäämällä puhdistettuun veteen natriumhydroksidia ja 0,1 g/L väriainetta, sekä 40 g/L natriumsulfaattia. Tällä tekniikalla saatiin puhdistettua 98,5–99,9 %:a vedessä olleesta väriaineesta. Tutkimuksessa ei kuitenkaan puhuttu tekniikan hinnasta tai teollisuusskaalauksesta, eikä puhdistetun veden käyttökelpoisuutta värjäysprosessissa kokeiltu tai arvioitu. Yang et al. (2021) taas tutkivat liikkuvan petibiofilmireaktorin ja kalvobioreaktorin yhdistelmää. Jäteveden puhdistuksen jälkeen suoritettiin uudelleenvärjäyskokeet: toinen 70 % kierrätetyllä vedellä ja toinen 100 % kierrätetyllä vedellä. Molemmissa kokeissa saavutettiin riittävä värjäyslopputulos, mutta sopivuutta teollisuuskäyttöön ei mainittu.

Vaikka tekniikoiden yhdistelemisellä saadaan hyviä puhdistustuloksia, taloudellisesta näkökulmasta nämä prosessit eivät välttämättä ole kannattavia: jokainen uusi puhdistusvaihe vaatii lisäinvestointeja. Lykidou et al. (2019) tutkivat ultrasuodatetun veden uudelleenkäyttömahdollisuuksia tekstiilivärjäyksessä. Kokeet suoritettiin 2 g puuvillakangasta, nestesuhteella 1:20 ja kahdella erityyppisellä reaktiivisella väriaineella. Kierrätetyllä vedellä päästiin

jopa korkeampiin väriaineen kulumisarvoihin, kuin puhtaalla vedellä. Toisella reaktiivisella värillä saatiin kierrätetyllä vedellä jopa paremmat K/S arvot. Ultrasuodatuksen todettiin siis sopivan veden kierrätykseen ainakin laboratorioskaalassa. Pillay et al. (2015) tutkivat pelkän nanosuodatuksen käyttöä. Myös tällä päästiin kierrätykseen vaadittaviin veden puhtausarvoihin, mutta ongelmana on suodattimen nopea likaantuminen. Vaikka membraanitekniikat kuuluvat tehokkaimpiin vedenpuhdistusmetodeihin, kuuluvat ne myös kalleimpiin puhdistusmetodeihin. Nanosuodatuksella on korkeat käyttökustannukset juuri likaantumisen, sekä tarvittavan korkeapainepumpun takia. (Marszałek & Żyłła, 2021.)

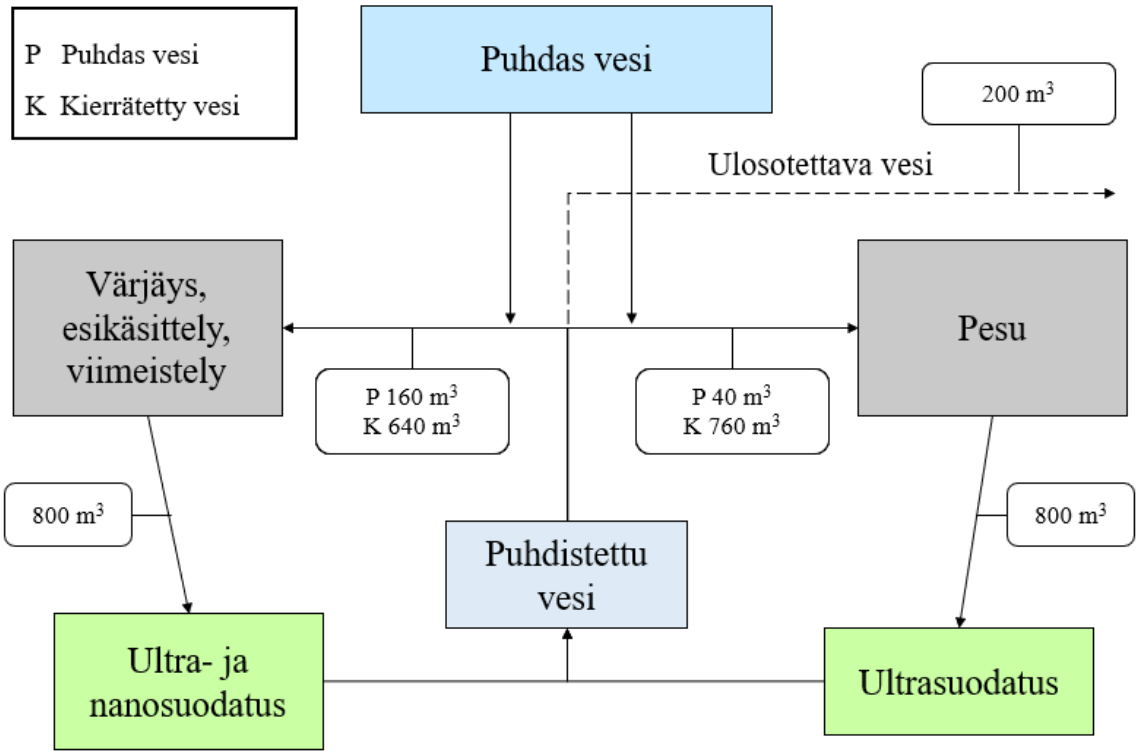
Uusien vedenpuhdistuskeinojen lisäksi veden puhdistamista voidaan parantaa esimerkiksi väri- ja apuaineiden uudistamisella. Uuvutusvärjäyksessä yleisimmin käytetään biohajoamattomia suoloja, kuten natriumkloridia tai natriumsulfidia (Ahmed, 2005). Tämä tuottaa hankaluuksia jäteveden puhdistuksessa, joten niiden korvaamista ympäristöystävällisimmillä biohajoavilla suoloilla olisi perusteltua. Varadarajan ja Venkatachalam (2016) tutkivat kestävämpää tekstiilivärjäystä, jossa yhtenä tutkimuksen osana olivat ympäristöystävälliset suolat. Magnesiumasetaatin ja etyleenidiamiinitetraetikkahappon (EDTA) todettiin olevan helposti vedestä poistettavia. Trinatriumsitraatilla saadaan taas parempi värin kulumisprosentti, kuin perinteisillä suoloilla, eli värjäyksestä tulevan jäteveden väriainepitoisuus on pienempi.

Eri värjäysprosessien jätevesien määrät, kemikaalipitoisuudet ja muut ominaisuudet vaihtelevat suuresti ja esimerkiksi tummien väriainenesteiden kierrättäminen on huomattavasti helpompaa kuin vaaleiden, sillä pienet erot nesteen puhtaudessa erottuvat selkeämmin vaaleiksi värjätyissä tekstiileissä. Veden puhdistusprosessit tulisi siis suunnitella jokaiselle prosessille erikseen. Vaikka tämä voi hidastaa prosessiveden kierrätyksen omaksumista tekstiiliyrityksissä, voidaan veden kierrättämistä pitää tulevaisuuden kannalta hyvänä ja mahdollisesti vaadittavana käytäntönä vedenkäytön vähentämisessä tekstiiliteollisuudessa. (Vainhandl & Valh, 2014.)

5 Prosessivedenkierrätys-skenaario

Tässä kappaleessa esitetään mahdollinen skenaario prosessiveden kierrätyksestä, ja arvioidaan sen avulla säästettävän veden ja kustannusten määrää. Värjäys-, esikäsittely- ja viimeistelyvaiheen jätevesissä on huomattavasti korkeampi kemikaalikonsentraatio kuin tekstiilin pesusta tulevalla vedellä. Eri prosessivaiheissa käytettävän veden laatuvaatimukset poikkeavat myös toisistaan. Vajnhandl & Valh (2014) määrittelevät artikkelissaan kolme eri vesilaatua eri prosessivaiheille: Värjäys, esikäsittely ja viimeistely tarvitsevat korkean vedenlaadun, tekstiilin pesuvesi kohtalaisen (moderate) ja esimerkiksi laitteiden pesu matalan veden laadun. Eri prosessivaiheista tulevien jätevesivirtojen yhdistäminen helpottaa puhdistusprosessia, mikäli veden laatuvaatimukset eivät ole korkeat. Koska prosessiveden kierrätys vaatii kuitenkin paremman vedenpuhtauslaadun, voisi jätevesivirrat jakaa laatuvaatimusten perusteella eri puhdistusyksikköihin.

Yksi mahdollinen prosessiveden puhdistus- ja kierrätysjärjestely voisi olla johtaa korkean kemikaalipitoisuuden omaavat jätevedet erilleen pesuvaiheen jätevesistä. Puhdistetut vedet voidaan joko johtaa puhdistuksen jälkeen taas yhteen tai pitää ne erillään. Epäpuhtauksien konsentroitumisen estämiseksi ei kierrätystä voida tehdä sataprosenttisesti, vaan prosessista on otettava sivuvirtana ulos hieman puhdistettua vettä, ja korvattava se raakavedellä. Koska pesuun käytettävän veden ei kuitenkaan tarvitse olla yhtä puhdasta kuin esimerkiksi värjäykseen käytettävän veden, voidaan raakaveden suhdetta kierrätettyyn veteen pitää pienempänä pesuvaiheelle. Skenaario on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kaavio mahdollisesta prosessiveden kierrätysjärjestelyistä

Keskimääräinen tekstiiliyritys valmistaa noin 8000 kiloa tuotetta päivässä ja koko märkäprosessiin kuluu vettä yhteensä noin 200 m^3:ä tonnia tuotetta kohti (Paris et al. 2015; Bechtold & Phan, 2019). Yhteensä prosessi vaatisi siis noin 1600 m^3:ä vettä päivässä. Ilman kierrätystä tämä olisi kokonaan raakavettä. Jos jätevedet jaetaan Vajnhandl & Valh (2014) määrittelemien laatuvaatimusten mukaan, ohjautuu värjäyksen, esikäsittelyn sekä viimeistelyn jätevedet eri puhdistukseen, kuin pesuvedet. Värjäykseen kuluisi 1:20:n nestesuhteella 160 m^3:ä vettä ja pesuun kuluu Vajnhandl & Valh:n mukaan noin puolet koko prosessin vedestä eli tässä tapauksessa noin 800 m^3:ä. Loput vedet, eli noin 320 m^3:ä oletetaan tässä tapauksessa tulevan esikäsittelystä ja viimeistelystä.

Koska pesuveden laatuvaatimukset ovat matalammat, voi puhtaanveden suhdetta kierrätettyyn veteen pitää pienempänä. Tässä esimerkissä suhteeksi on valittu 0,95 pesuvedelle ja 0,80 värjäykseen, esikäsittelyyn ja viimeistelyyn menevälle vedelle. Pesusta tulevalle jätevedelle ei tarvita yhtä tehokasta puhdistusprosessia kuin konsentroituneemmalle jätevedelle. Enemmän epäpuhtauksia sisältävälle prosessivedelle voitaisiin käyttää esimerkiksi

edellisessä kappaleessa esiteltyä ultra- ja nanosuodatuksen yhdistelmää, kun taas pesuvedelle riittäisi esimerkiksi pelkkä ultrasuodatus. Jakamalla jätevesivirrat saadaan laskettua myös nanosuodatuksen käyttökustannuksia, kun sillä puhdistettavan veden määrä on pienempi. Tässä skenaariossa raakavettä kuluisi päivässä n. 200 m^3:ä eli vettä saataisiin säästettyä 88 %: a. Ylimääräinen puhdistettu vesi voidaan käyttää esimerkiksi laitteiden puhdistukseen. Jätevedet voitaisiin jakaa vielä useampaan eri puhdistusyksikköön, mutta jokainen uusi prosessi nostaisi puhdistuksen hintaa. Taulukossa 2 on esitetty skenaarion eri vaiheisiin menevät vesimäärät ilman kierrätystä ja kierrätyksen kanssa.

Taulukko 2. Vesimäärät eri vaiheisiin

	Puhdasta vettä, m^3	Kierrätettyä vettä, m^3
Ilman kierrätystä		
Värjäys, viimeistely, esikäsittely	800	-
Pesu	800	-
Yht.	1600	-
Kierrätyksellä		
Värjäys, viimeistely, esikäsittely	160	640
Pesu	40	760
Yht.	200	1400

Skenaarion kustannussäästöt riippuvat paljon tehtaan sijainnista, sillä veden hinta voi vaihdella paljon maantieteellisen sijainnin mukaan. Lappeenrannassa puhtaan veden hinta on 2,11 €/m^3 ja jäteveden 3,09 €/m^3 (Lappeenrannan Energia Oy, 2021). Ilman kierrätystä vuorokaudessa puhtaaseen veteen kuluisi noin 3300 € ja jäteveteen 5000 €. Jos skenaariossa oletetaan, että ylijäänyt 200 m^3:ä menisi jätevedeksi, niin puhtaaseen veteen kuluisi noin 400 €:a ja jäteveteen 600 €: a. Vuorokaudessa säästettäisiin siis yli 7000 €: a. Vuodessa tämä tarkoittaisi 2,6 miljoonan euron säästöä. Kustannukset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Skenaarion vesikustannukset päivässä

	Ennen, €	Jälkeen, €
Puhdasvesi	3376	422
Jätevesi	4944	618
Yht.	8320	1040

Ilmastokriisin noustessa yhä enemmän ja enemmän päättäjien huomioon, voidaan veden hinnan odottaa nousevan. Raakavedenkäytön vähentämisen suhteen tämä tarkoittaisi siis tulevaisuudessa yhä suurempien käyttökustannussäästöjä. Vaikka prosessien muuttaminen ja investointi uusiin puhdistusmetodeihin vaatii paljon pääomaa, voi muutoksen odottaa alkaa kannattaa tulevaisuudessa. Yritysten olisi tärkeää ymmärtää ekotehokkuuden arvo pitkällä aikavälillä. Toinen hyöty ympäristöystävällisemmästä prosessista on mahdollinen kilpailukyvyn parantuminen nyt ja tulevaisuudessa (Ozturk et al., 2016). Päättäjien lisäksi myös kuluttajat ovat alkaneet arvostaa ympäristöystävällisiä tuotteita.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä työssä selvitettiin erilaisia tapoja vedenkäytön vähentämiseksi tekstiilivärjäysprosessissa ja niiden soveltuvuutta teollisuuskäyttöön. Työssä keskityttiin puuvillan värjäykseen reaktiivisilla väriaineilla. Yhteenveto tässä työssä käsitellyistä tekniikoista on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Vertailu eri vedensäästö menetelmistä

	Veden säästö värjäyksessä (arvio)	Jo käytössä	Hinta (arvio)	Soveltuvuus teollisuuteen
Ultraääniväriäys	70 %	Ei	Suuri	Ei vielä näyttöä. Vaatii laajaa jatkotutkimusta. Haasteina suuri hinta ja tasaisen intensiteetin saavuttaminen suuremmissa astioissa
Vaahtoväriäys	80—99 %	Kyllä	Suuri	Laitteistoa jo olemassa ja käytössä pienemmässä mittakaavassa, mutta laajamittaiseen teollisuuskäyttöön vielä matkaa
Makean veden korvaaminen: $scCO_2$ ja merivesi	$scCO_2$: 100 % Merivesi: 100 %	$scCO_2$: Ei puuvillalle Merivesi: Ei	$scCO_2$: Suuri Merivesi: Matala	$scCO_2$: Teollisuuskäytössä muille tekstiileille, mutta puuvillan väriäys vaatii vielä jatkotutkimusta kannattavuuden saavuttamiseksi Merivesi: Tutkimus erittäin alkuvaiheissa
Misellit	60 %	Ei	Matala	Ei näyttöä, mutta lupaavia laboratoriokokeita
Kierrätys	70—100 %	Kyllä	Suuri	Jätevettä täytyy jo puhdistaa ja veden kierrätys on jo käytössä joillain yrityksillä

Tekniikoista, jotka pienentävät tarvittavan veden määrää prosessissa, vaahtoväriäyksellä on tähän mennessä saatu erittäin lupaavia tuloksia jo markkinoilla olevien tuotteiden pienimääräisestä väriäyksestä. Muita käsiteltyjä tekniikoita on tutkittu vasta laboratorioskaalassa, joten seuraava vaihe on selvittää niiden soveltuvuutta teollisuusmittakaavan prosesseihin. Vaikka meriveden hyödyntämisen tutkiminen on erittäin alkuvaiheilla, voisi se olla yksi pienempikustanteisista vaihtoehdoista, sillä tämänhetkisten tutkimusten perusteella se ei tarvitsisi täysin uuden laitteiston kehittämistä. Samasta syystä myös misellien käyttö olisi kustannustehokas ratkaisu. Vaikka ultraääni- ja $scCO_2$ -väriäyksillä on päästy laboratorioissa hyviin veden- ja energiansäästöarvoihin, vaativat ne vielä eniten jatkotutkimusta. Prosessiveden kierrätyksellä takaisin prosessiin on etuna se, että sitä voitaisiin hyödyntää muissakin prosessivaiheissa. Kierrätystä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää myös uusien

vedensäästötekniikoiden kanssa. Vaikka erilaisia puhdistusprosesseja on useita, kierrätystä on tähän mennessä pidetty liian kalliina investointina puhdistuksen monimutkaisuuden takia.

Tekniikoiden käyttöönottoa hidastaa yleisesti niiden korkea hinta, mutta kuten kierrätysskenaariosta huomattiin, raakavedenkäytön vähentämisellä voidaan säästää huomattava määrä kustannuksissa. Uusilla tekniikoilla on myös muita hyötyjä, kuten energiatehokkuus, säästöt kemikaalimäärissä, sekä lyhyemmät värjäysajat. Prosessien muuttaminen ympäristöystävällisemmiksi ajoissa voisi mahdollisesti jopa turvata yrityksen toiminnan tulevaisuudessa. Ilmastokriisin noustessa yhä enemmän ja enemmän sekä päättäjien, että kuluttajien tietoisuuteen, ympäristösäädösten ja -lakien voidaan olettaa kiristyvän ja veden hinnan nousevan. Jos yritys ei ennakoi tai ehdi reagoida näihin muutoksiin, voi esimerkiksi valmistuskustannukset nousta liian korkeiksi tuotannon jatkamiseksi. Tällä hetkellä tarkemmasta kustannushyötyselvityksestä eri veden säästömenetelmille olisi hyötyä tekstiiliyrityksille.

Vedenkäytön vähentämiselle on käytössä ja kehitteillä useita lupaavia tekniikoita. Skaalaus laboratoriosta teollisuuteen vaatii vielä useiden esiteltyjen tekniikoiden kohdalla lisätutkimusta, mutta ympäristön kannalta tämä on erittäin kannattavaa. Kuten alussa todettiin, makea vesi on rajallinen luonnonvara, eikä sitä näin ollen voida käyttää loputtomiin. Siirtyminen kauemmas perinteisesti erittäin vesi-intensiivisestä prosessista vaatii tekstiiliyrityksiltä paljon työtä, mutta muutoksesta hyötyisi sekä itse yritykset, että ympäristö.

Lähteet

Ahmed, NSE. 2005. The use of sodium edate in the dyeing of cotton with reactive dyes. *Dyes and Pigments* 65(3): 221-225.

Banchero, M. 2020. Recent advances in supercritical fluid dyeing. *Coloration Technology* 136(4): 317-335.

Banchero, M. 2013. Supercritical fluid dyeing of synthetic and natural textiles - a review. *Coloration Technology; Coloration Technol* 129(1): 2-17.

Bechtold, T. Pham, T. 2019 *Textile Chemistry.* Berlin: De Gruyter.

Bhavsar, PS. Zoccola, M. Patrucco, A. Montarsolo, A. Mossotti, R. Giansetti, M. Rovero, G. Maier, SS. Muresan, A. Tonin, C. 2017. Superheated Water Hydrolyzed Keratin: A New Application as a Foaming Agent in Foam Dyeing of Cotton and Wool Fabrics. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering; ACS Sustainable Chem.Eng* 5(10): 9150-9159.

Bian, X. Fan, S. Xia, G. Chae, Y. Yu, H. Xin, JH. 2022 Sustainable ultrasonic dyeing of unscoured and unbleached cotton sliver using low liquor ratio. *Journal of Cleaner Production* 379: 134853.

Burkinshaw, SM. 2015 *Physico-Chemical Aspects of Textile Coloration.* : Wiley.

Burkinshaw, SM. Salihu, G. 2019a. The role of auxiliaries in the immersion dyeing of textile fibres: Part 1 an overview. *Dyes and Pigments* 161: 519-530.

Burkinshaw, SM. Salihu, G. 2019b. The role of auxiliaries in the immersion dyeing of textile fibres: Part 8 practical aspects of the role of inorganic electrolytes in dyeing cellulosic fibres with commercial reactive dyes. *Dyes and Pigments* 161: 614-627.

Clark, M. 2011. *Handbook of Textile and Industrial Dyeing, Volume 1 - Principles, Processes and Types of Dyes.* : Woodhead Publishing.

de Souza Ferreira, IL. de Medeiros, JI. Steffens, F. Oliveira, FR. 2021. Seawater as an alternative to dye cotton fiber with reactive dyes. *Textile Research Journal* 91(9-10): 1184-1193.

Hussain, T. Wahab, A. 2018. A critical review of the current water conservation practices in textile wet processing. *Journal of Cleaner Production* 198: 806-819.

Kohli, R. Mittal, KL. 2010. *Developments in Surface Contamination and Cleaning Fundamentals and Applied Aspects. Volume 2, Particle Deposition, Control and Removal.* Amsterdam: Elsevier.

Laitinen, J. Antikainen, R. Hukka, JJ. Katko, TS. 2020. Water Supply and Sanitation in a Green Economy Society: The Case of Finland. *Public Works Management & Policy* 25(1): 33-50.

Lappeenrannan Energia Oy. 2021.Vesi- ja jätevesihinnasto. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.4.2023]. Saatavissa: https://www.lappeenrannanenergia.fi/hinnastot-ja-ehdot/vesi-ja-jatevesihinnasto-0?_gl=1*1wloor5*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjw_r6hBhDdARIsAMIDhV-ZErUzFdxOi2dHVI3Z737QQRLEXN0gZPafX0Qsy8dwz2cGiqc4uBQaAplhEALw_wcB

Lara, L. Cabral, I. Cunha, J. 2022. Ecological Approaches to Textile Dyeing: A Review. *Sustainability (Basel, Switzerland)* 14(14): 8353.

Lykidou, S. Karanikas, E. Anagnostopoulou, C. Nikolaidis, N. Tsatsaroni, E. 2019. Reuse of Effluent Water Obtained in Ultrafiltration of Reactive Dyes. *Fibers and Polymers* 20(6): 1236-1242.

Ma, X. Wei, Y. Wang, S. Zuo, X. Shen, B. 2020. Sustainable ultrasound-assisted ultralow liquor ratio dyeing of cotton fabric with natural turmeric dye. *Textile Research Journal* 90(5-6): 685-694.

Mao, Z. Yu, H. Wang, Y. Zhang, L. Zhong, Y. Xu, H. 2014. States of Water and Pore Size Distribution of Cotton Fibers with Different Moisture Ratios. *Industrial & Engineering Chemistry Research; Ind.Eng.Chem.Res* 53(21): 8927-8934.

Marcus, Y. 2019. *Supercritical Carbon Dioxide.* New York: Nova Science Publishers.

Marszałek, J. Żyłła, R. 2021. Recovery of Water from Textile Dyeing Using Membrane Filtration Processes. *Processes* 9(10): 1833.

Mohsin, M. Sardar, S. 2019. Multi-criteria decision analysis for textile pad-dyeing and foam-dyeing based on cost, performance, productivity and sustainability. *Cellulose (London)* 26(6): 4143-4157.

Mohsin, M. Sardar, S. Hassan, M. Akhtar, N. Hassan, A. Sufyan, M. 2020. Novel, sustainable and water efficient nano bubble dyeing of cotton fabric. *Cellulose (London)* 27(10): 6055-6064.

Ozturk, E. Koseoglu, H. Karaboyacı, M. Yigit, NO. Yetis, U. Kitis, M. 2016. Minimization of water and chemical use in a cotton/polyester fabric dyeing textile mill. *Journal of Cleaner Production* 130: 92-102.

Parisi, ML. Fatarella, E. Spinelli, D. Pogni, R. Basosi, R. 2015. Environmental impact assessment of an eco-efficient production for coloured textiles. *Journal of Cleaner Production* 108: 514-524.

Pillay, VL. Chollom, MN. Alfa, D. Rathilal, S. 2015. The applicability of nanofiltration for the treatment and reuse of textile reactive dye effluent. *Water S. A.* 41(3): 398-405.

Solaiman, MD. Surid, SM. Patwary, MAS. 2019. et al. Dyeing of cotton fabric with ground water and sea water: comparison of their fastness properties. *J Textile Eng Fashion Technol*. 2019;5(6):276-282.

Riera-Torres, M. Gutiérrez-Bouzán, C. Crespi, M. 2010. Combination of coagulation–flocculation and nanofiltration techniques for dye removal and water reuse in textile effluents. *Desalination* 252(1): 53-59.

Riera-Torres, M. Gutierrez-Bouzan, M. Valldeperas Morell, J. Jose Lis, M. Crespi, M. 2011. Influence of electrochemical pre-treatment in dyeing wastewater reuse for five reactive dyes. *Textile Research Journal* 81(18): 1926-1939.

Rosen, MJ. Kunjappu, JT. 2012. *Surfactants and Interfacial Phenomena.* Hoboken, N.J: Wiley.

Sun, D. Guo, Q. Liu, X. 2010. Investigation into dyeing acceleration efficiency of ultrasound energy. *Ultrasonics; Ultrasonics* 50(4): 441-446.

Uddin, F. 2021. Environmental hazard in textile dyeing wastewater from local textile industry. *Cellulose (London)* 28(17): 10715-10739.

Vajnhandl, S. Majcen Le Marechal, A. 2005. Ultrasound in textile dyeing and the decolouration/mineralization of textile dyes. *Dyes and Pigments* 65(2): 89-101.

Vajnhandl, S. Valh, JV. 2014. The status of water reuse in European textile sector. *Journal of Environmental Management; J Environ Manage* 141: 29-35.

Vankar, PS. Shanker, R. 2008. Ecofriendly ultrasonic natural dyeing of cotton fabric with enzyme pretreatments. *Desalination* 230(1): 62-69.

Varadarajan, G. Venkatachalam, P. 2016. Sustainable textile dyeing processes. *Environmental Chemistry Letters* 14(1): 113-122.

Wrangler. 2018. Foam-dyed denim [verkkoaineisto]. [viitattu 11.2.2023]. Saatavissa: https://www.wrangler.com/sustainability/industry/foam-dyed-denim.html

WWF. Water-scarsity. [verkkoaineisto]. [viitattu 14.2.2023]. Saatavissa: https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity

Xie, K. Cheng, F. Zhao, W. Xu, L. 2011. Micelle dyeing with low liquor ratio for reactive dyes using dialkyl maleic acid ester surfactants. *Journal of Cleaner Production* 19(4): 332-336.

Yang, X. López-Grimau, V. Vilaseca, M. Crespi, M. Ribera-Pi, J. Calderer, M. Martínez-Lladó, X. 2021. Reuse of textile wastewater treated by moving bed biofilm reactor coupled with membrane bioreactor. *Coloration Technology* 137(5): 484-492.

Yin, H. Qiu, P. Qian, Y. Kong, Z. Zheng, X. Tang, Z. Guo, H. 2019. Textile Wastewater Treatment for Water Reuse: A Case Study. *Processes* 7(1): 34.

Yu, H. Wang, Y. Zhong, Y. Mao, Z. Tan, S. 2014. Foam properties and application in dyeing cotton fabrics with reactive dyes. *Coloration Technology; Coloration Technol* 130(4): 266-272.