

Vernerri Vällilehto

HYDRAULIKÄYTTÖISEN BETONIPUMPUN MALLINNUS JA SIMULOINTI BETONIN 3D-TULOSTAMISESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Pauli Mustalahti
Maaliskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Verneril Valilehto: Hydraulikayttoisen betonipumpun mallinnus ja simulointi betonin 3D-tulostamisessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma
Maaliskuu 2021

Tässä työssä tutkitaan betonin pumppaamista, 3D-tulostamista ja virtauksen mallintamista. Työn ensimmäisenä tarkoituksena on selvittää, millaisia ratkaisuja betonin pumppaamiseen kaytetaan, mitkä ovat niiden erikoispiirteet ja miten ne ovat sovellettavissa betonin 3D-tulostamiseen. Toisena tarkoituksena on selvittää, miten betonin 3D-tulostaminen on sovellettavissa rakennusteollisuuden tarpeisiin, mitä etuja se mahdollistaa perinteisiin rakennusmenetelmiin verrattuna ja mitä huomioitavia seikkoja siinä on. Taman lisäksi tarkoituksena on selvittää, millaisia kaupallisia ratkaisuja siihen on. Kolmantena tarkoituksena on selvittää, miten betonin putkivirtausta voidaan mallintaa ja simuloida.

Työn teoriaosuudessa perehdyttiin eri betonipumpputyyppeihin, niiden erityispiirteisiin ja käyttötarkoituksiin. Taman jälkeen selvitettiin, millaisia pumppuja betonin 3D-tulostamiseen on olemassa, mitkä ovat betonin tulostamisen erityispiirteet, millaisia betoniseoksia tulostamisessa kaytetaan ja millaisia kaupallisia sovelluksia siihen on. Teoriaosuuden lopuksi selvitettiin, kuinka betonin putkivirtausta voidaan mallintaa.

Teoriaosuuden pohjalta mallinnettiin yksinkertaistettu betonille tarkoitettu hydraulikayttoinen sylinteripumppu. Mallinnetulla sylinteripumpulla tutkittiin betonivirtauksen käyttäytymistä 3D-tulostamisen kannalta olennaisissa tapauksissa.

Selvityksen tuloksena varmistui, että betonin 3D-tulostamiseen on olemassa kaupallisia ratkaisuja. Tulostamisessa on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota seoksen ominaisuuksiin, koska ne vaikuttavat merkittävästi tulostamisen onnistumiseen. Simulointituloksista havaittiin, että sylinteripumpun tuottama tilavuusvirta on jaksottaista. Jaksottainen tilavuusvirta vaikeuttaa 3D-tulostamista, joten kaupallisissa ratkaisuissa kaytetaan usein sylinteripumpun sijasta ruuvipumppua.

Avainsanat: Betoni, 3D-tulostaminen, Betonin putkivirtaus, Betonipumppu

Taman julkaisun alkuperaisyyks on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Betonin pumppaus	3
2.1	Sylinteripumppu	3
2.2	Roottoripumppu	4
2.3	Ruuvipumppu	4
2.4	Pumpputyyppien vertailu	5
3.	Betonin käyttäminen 3D-tulostuksessa	6
3.1	Kaupalliset 3D-tulostukseen soveltuvat pumput	7
3.2	Betonin 3D-tulostamisen erityispiirteet	8
3.3	3D-tulostettavat seokset	10
3.4	Kaupalliset sovellukset	11
4.	Virtauksen mallinnus	13
4.1	Betonin pumppaamiseen vaikuttavat tekijät	14
4.2	Virtausyhtälöt newtonilaiselle nesteelle	14
4.3	Virtausyhtälöt betonille	16
5.	Betonin virtauksen simulointi	17
5.1	Sylinteripumpun mallinnus	17
5.1.1	Venttiili	17
5.1.2	Sylinterit	18
5.1.3	Työsylinterin vaihtaminen	18
5.1.4	Betonipumppu	19
5.2	Simulointi	21
6.	Yhteenveto	25
	Lähteet	26
	Liite A: Yleiskuva Simulink-mallista	28
	Liite B: Simuloinnissa käytetyt parametrit	29
	Liite C: Tarkasteltavat tapaukset	31

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D kolmeulotteinen

F voima

m massa

p paine

Q tilavuusvirta

v nopeus

1. JOHDANTO

Ainetta lisäävä valmistus (myöhemmin 3D-tulostaminen) tarkoittaa valmistusmenetelmiä, joissa kappale valmistetaan 3D-mallin perusteella lisäämällä ainetta kerroksittain. 3D-tulostaminen mahdollistaa monimutkaisten esineiden ja rakenteiden valmistamisen, joiden valmistaminen olisi hyvin haastavaa tai jopa mahdotonta perinteisillä valmistusmenetelmillä. Valmistusprosessi 3D-tulostamisessa voidaan jakaa CAD-mallinnukseen, CAD-mallin muuttamiseen STL-malliksi, STL-mallin jälkikäsitteilyyn, 3D-tulostamiseen, kappaleen jälkikäsitteilyyn ja käyttöönottoon.

Nykyiset 3D-tulostuksen sovellukset liittyvät tyypillisesti pienten ja monimutkaisten kappaleiden pienerävalmistukseen [1]. Käytössä olevat ratkaisut kattavat massakustomisoidut tuotteet, prototyypit, varaosat, lääketieteelliset ja hammaslääketieteelliset sovellukset ja pientuotannon ennen massatuotantoon siirtymistä. Tekniikan ja materiaalien kehittymisen ansiosta 3D-tulostamisen hyödyntäminen on tulevaisuudessa mahdollista myös rakennusteollisuudessa ja suurten kappaleiden valmistuksessa.

3D-tulostukseen käytettävät järjestelmät voidaan jakaa neljään kategoriaan käytettävän valmistusmenetelmän perusteella. Ne ovat fotopolymeeripohjaiset järjestelmät, jauhopohjaiset järjestelmät, nestemäistä materiaalia käyttävät järjestelmät ja kalvopohjaiset järjestelmät [2].

Fotopolymeeripohjaisissa järjestelmissä käytettävä materiaali kovetetaan kerroksittain valolla ja laskemalla tulostusalustaa kerroksien välissä. Fotopolymeeripohjaisten järjestelmien etuna on järjestelmän yksinkertaisuus ja lopputuotteen tarkkuus, mutta niiden varjopuolena on lopputuotteiden heikot mekaaniset ominaisuudet ja tukirakenteiden tarve tulostaessa [2].

Jauhohajaisissa järjestelmissä tulostamiseen käytettävää jauhomaista ainetta lisätään ohut kerros, jonka jälkeen kerroksesta kovetetaan halutut kohdat laserilla tai kovetetta suihkuttamalla. Tämän jälkeen prosessi toistetaan, kunnes tulostettava kappale on valmis ja ylimääräinen kovettamaton aine voidaan poistaa kappaleesta. Jauhohajaisien järjestelmien etuna on se, ettei tulostamisen aikaisille tukirakenteille ole tarvetta, koska kovettamaton aine tukee keskeneräistä kappaletta [2].

Nestemäistä materiaalia käyttävissä järjestelmissä tulostettava materiaali muovataan sulassa tai nestemäisessä muodossa, jonka jälkeen se kovettuu tai kovetetaan ennen seu-

raavan kerroksen tulostamista. Tulostimelle syötettävä materiaali voi olla nestemäistä, tai se voidaan sulattaa järjestelmässä ennen pursottamista. Nestemäistä materiaalia käyttävissä järjestelmissä tarvitaan tukirakenteita monimutkaisten kappaleiden valmistuksessa [2].

Kalvopohjaisissa järjestelmissä tulostettava kappale muodostetaan laminoimalla käytettävää materiaalia kerroksittain, jonka jälkeen laminoidusta kalvosta leikataan pois ylimääräinen osuus. Tämän ansiosta kalvopohjaisissa järjestelmissä ei ole tarvetta erillisille tukirakenteille, mutta tulostamisessa on kiinnitettävä huomiota ylimääräisten, pois leikattujen kalvojen poistamiseen valmiista kappaleesta [2].

Rakennusteollisuudessa 3D-tulostamiseen käytetään nestepohjaisia järjestelmiä, koska ne mahdollistavat betonipohjaisten materiaalien tulostamisen pursottamalla ja ne soveltuvat parhaiten suurien kappaleiden tulostamiseen. 3D-tulostamisen mahdollisia etuja rakennusteollisuudessa perinteisten betonirakennusmenetelmien sijasta ovat suurempi geometrinen vapaus, vähentynyt materiaalihukka ja alhaisempi työvoiman tarve.

Rakennusteollisuudelle soveltuvaan 3D-tulostamiseen on olemassa joitain kaupallisia ratkaisuja [3]. Pelkästään työmaalla tapahtuvaa 3D-tulostamista on sovellettu onnistuneesti esimerkiksi Dubaissa [4]. 3D-tulostamisen hyödyntäminen kokonaisten rakennusten valmistamisessa voi olla ongelmallista tulostimien rajallisen koon takia [5], joten kokonaisten talojen valmistamisen sijasta sitä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi valmiiden elementtien valmistamisessa [6]. 3D-tulostamisen mahdollistamia etuja rakennusteollisuudessa ovat esimerkiksi nopeus, alhaisemmat rakennuskustannukset [7], suurempi geometrinen vapaus, alhaisemmat hiilidioksidipäästöt ja alhaisempi rakentamisen aikana syntyvä jätteen määrä [6]. Suurimmat tekniset haasteet 3D-tulostamisen soveltamisessa rakennusteollisuudessa liittyvät käytettäviin betoniseoksiin [6] ja tulostettavien kohteiden koon skaalautuvuuteen [5].

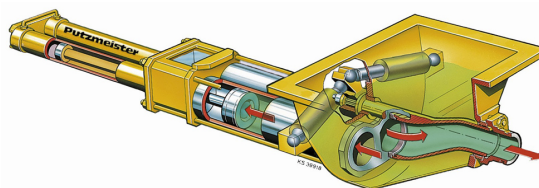
Työn alussa käsitellään 3D-tulostamista, sen nykyisiä käyttösovelluksia, valmistusmenetelmiä ja hyödyntämistä rakennusteollisuudessa. Toisessa luvussa käsitellään betonin pumppaamista ja nykyisin käytössä olevia pumpputyyppejä. Kolmannessa luvussa käsitellään betonin 3D-tulostamista, nykyisin olemassa olevia kaupallisia sovelluksia, huomioon otettavia seikkoja ja siihen soveltuvia betoniseoksia. Neljännessä kappaleessa käsitellään betonin virtausominaisuuksia sekä virtauksen matemaattista mallintamista newtonilaisten ja ei-newtonilaisten nesteiden tapauksessa. Viidennessä kappaleessa käsitellään sylinteripumpun mallintamista ja betonin virtauksen simuloimista.

2. BETONIN PUMPPAUS

Rakennusteollisuudessa betonin siirtämiseen työmaalla käytetään nykyään pääasiassa betonipumppua. Betonipumppu on laite, jolla tuore betoni voidaan pumpata valupaikalle käyttäen putkia ja letkuja [8, s. 3]. Betonin ja sen kaltaisten materiaalien pumppaamisessa on käytössä pääasiassa kolme erilaista pumpputyyppiä, jotka ovat sylinteripumppu, roottoripumppu ja ruuvipumppu [8, s. 4]. Käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvan betonipumpun tyyppi riippuu käytettävän seoksen ominaisuuksista, vaaditusta pumppaustehosta ja siirtoon vaadittavasta paineesta.

2.1 Sylinteripumppu

Sylinteripumppu koostuu yhdestä tai kahdesta betonin pumppaamiseen käytettävästä sylinteristä, vaihtimesta, vastaanottotaskusta ja sylinteriä liikuttavasta koneikosta. Pumpaamiseen käytettävät sylinterit koostuvat hydraulisyylinteristä ja betonin kanssa kontaktissa olevasta, männän puolelta avoimesta sylinteristä. Hydraulisyylinterin männänvarsi on kiinnitetty betonille tarkoitetun sylinterin mäntään. Betonin kanssa kontaktissa olevan sylinterin männänvarren puoleinen kammio on vesitäytteinen sylinteriputken voitelemiseksi ja puhdistamiseksi. Kuvassa 2.1 on esitetty kaksisyylinterisen pumpun rakenne.



Kuva 2.1. Hydraulikäyttöinen kaksisyylinterinen sylinteripumppu [9].

Kaksisyylinterisen sylinteripumpun toimintasyklin vaiheet:

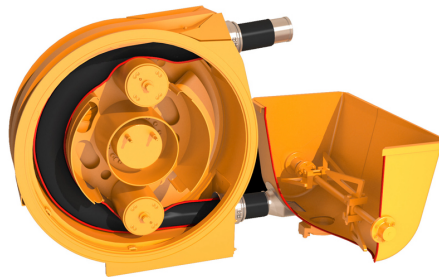
1. Vaihtojärjestelmä vaihtaa vaihtimen minimipituudessaan olevan sylinterin eteen.
2. Hydraulinestettä johdetaan maksimipituudessaan olevan sylinterin varren puolelle.
3. Hydraulinestettä menee maksimipituudessaan olevan sylinterin männän puolelta minimipituudessaan olevan sylinterin männän puolelle.
4. Minimipituudessaan olleen sylinterin männänvarsi työntää mäntää, joka työntää betonia vaihtimen läpi.

5. Samanaikaisesti maksimipituudessaan olleen sylinterin männänvarsi vetää toista mäntää, jolloin toinen sylinteri täyttyy betonilla.
6. Sylinterien saavuttaessa ääriasennon vaihtojärjestelmä vaihtaa vaihtimen toisen sylinterin eteen ja sykli toistuu.

Sylinteripumppu on soveltuva käytettäväksi silloin, kun betonipumpulta vaaditaan suurta pumppauspainetta, pumppaustehoa ja käytettävän seoksen raekoko on suuri. Sylinteripumpun toimintaperiaatteen takia pumpulta ulostuleva materiaalivirta on jaksottaista.

2.2 Roottoripumppu

Roottoripumppu koostuu kammioista, letkusta, roottorista, painajarullista ja vastaanottotaskusta. Kuvassa 2.2 on esitetty roottoripumpun rakenne. Pumpun ollessa toiminnassa roottori pyörii, jolloin roottoriin kiinnitetyt painajarullat painavat letkun kammion seinää vasten. Letkun painaminen kammion seinämää vasten estää betonin virtaamisen vastaanottotaskuun, joten roottorin pyörimisen seurauksena painajarullien letkussa syrjäyttämä betonimassa virtaa pumpun ulostuloon. Syrjäytetty betonimassa korvautuu pumpun vastaanottotaskusta imevällä betonimassalla.

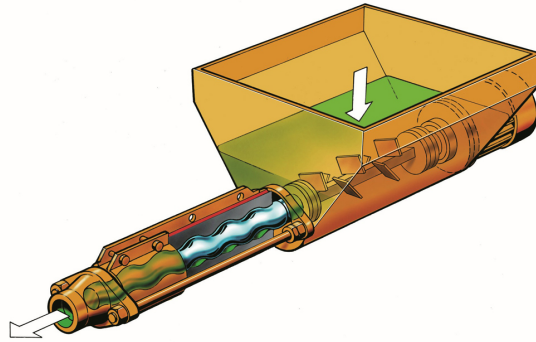


Kuva 2.2. Roottoripumppu [10].

Roottoripumppu ei mahdollista yhtä suurta pumppauspainetta tai pumppaustehoa kuin sylinteripumppu [8, s. 4]. Roottoripumpun puhdistaminen on yksinkertaisempaa kuin sylinteripumpun puhdistaminen, koska roottoripumpussa ainoastaan letku on kosketuksissa betoniseoksen kanssa. Roottoripumpulta ulostuleva materiaalivirta on pumpun toimintaperiaatteen takia jaksottaista.

2.3 Ruuvipumppu

Ruuvipumppu koostuu muotoillusta teräksisestä akselistä, muotoillusta joustavasta kumisesta pesästä ja vastaanottotaskusta. Ruuvipumpun rakenne on esitetty kuvassa 2.3 Pumpun ollessa toiminnassa moottori pyörittää pesässä olevaa akselia, joka syrjäyttää akselin ja pesän välissä olevaa seoksen ja pakottaa seoksen pumpun ulostuloon. Syrjäytetty seos korvautuu pumpun vastaanottotaskusta imevällä seoksella.



Kuva 2.3. Ruuvipumppu [9].

Ruuvipumppu soveltuu pääasiassa laastien ja tasoitteiden pumppaamiseen, kun käytettävän seoksen raekoko on riittävän pieni ja vaadittava pumppauspaine ei ole korkea [8, s. 4]. Ruuvipumpun etuna on tasaisempi materiaalivirta kuin sylinteripumpulla tai roottoripumpulla.

2.4 Pumpputyypien vertailu

Betonin 3D-tulostamisen kannalta olennaisia pumpulta vaadittavia ominaisuuksia ovat mahdollisuus pumpata 3D-tulostettavia betoniseoksia, tasainen materiaalivirta ja materiaalivirran ohjattavuus. Taulukossa 2.1 on esitetty eri pumpputyypien ominaisuuksia ja niille parhaiten soveltuvat käyttötarkoitukset. Arvot kertovat valmistajien ilmoittamien ominaisuuksien suuruusluokasta.

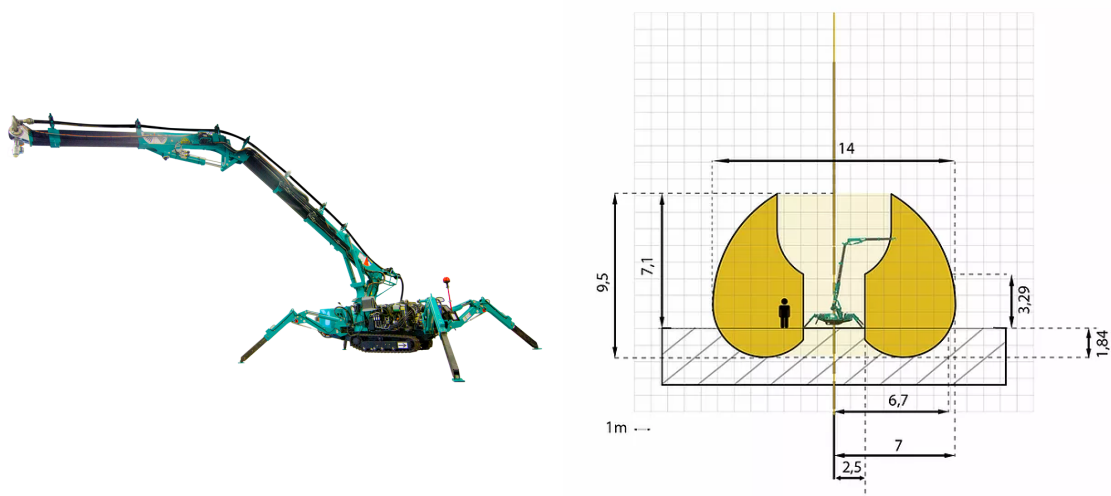
	Ruuvipumppu	Roottoripumppu	Sylinteripumppu
Käyttöalue	Laastit ja tasoitteet	Laastit, tasoitteet ja betoni	Betoni
Seoksen raekoko [mm]	4–12	4–32	25–32
Maksimipaine [bar]	25–35	25–35	40–85
Pumppausteho [m ³ /h]	3,5–18	4–60	5–200
Tilavuusvirran tyyppi	Jatkuva	Jaksottainen	Jaksottainen

Taulukko 2.1. Betonipumppujen ominaisuuksia [8, s. 4].

3. BETONIN KÄYTTÄMINEN 3D-TULOSTUKSESSA

Robotisoitu rakentaminen on tulevaisuuden suuntaus rakennusteollisuudessa [3]. Yksi robotisoidun rakentamisen sovellus on betonin 3D-tulostaminen. Betonin 3D-tulostamisella tarkoitetaan tulostettavan kohteen valmistamista automaattisesti betoniseosta pursottamalla 3D-mallin mukaisesti. 3D-tulostaminen mahdollistaa monimutkaisten muotojen valmistamisen, mutta terävien kulmien tulostaminen on mahdotonta. Rakentaminen 3D-tulostamista hyödyntäen on nopeampaa kuin perinteisillä menetelmillä. Rakentamisen aikana syntyy vähemmän jätettä, mikä osaltaan tekee rakentamisesta ympäristöystävällisempää. Betonin 3D-tulostaminen vähentää työvoiman tarvetta rakentamisen aikana ja parantaa työturvallisuutta. 3D-tulostaminen mahdollistaa rakennuskulujen alentamisen, mutta se asettaa uusia vaatimuksia tulostamiseen käytettävälle seokselle ja tulostimen hankintakustannukset voivat olla suuret.

Yksinkertainen betonille soveltuva 3D-tulostin koostuu tulostamiseen käytettävästä suuttimesta, suutinta liikuttavista toimilaitteista, pumpusta ja ohjausjärjestelmästä. Tulostettava seos pursotetaan suuttimen läpi haluttuun muotoon, samalla kun suutinta liikuttava toimilaitte liikuttaa sitä ohjausjärjestelmän avulla. Toimilaitte voi olla esimerkiksi käsivarsi-, portaali- tai deltarobotti. Pumppu pumpkaa tulostettavaa seosta suuttimelle siirtoletkua pitkin. Ohjausjärjestelmä hallitsee kokonaisuutta ja ohjaa tulostimen eri laitteiden toimintaa. Kuvassa 3.1 on yleiskuva Constructions-3D-tulostimesta ja sen työalueesta.



Kuva 3.1. Constructions 3D-tulostin ja sen työalue [11][12].

3.1 Kaupalliset 3D-tulostukseen soveltuvat pumpput

Betonin 3D-tulostamiseen voidaan käyttää mitä tahansa käytettävän seoksen pumppaamiseen soveltuvaa pumppua. Käytännön sovelluksissa pumppaamiseen on kuitenkin tarkoituksenmukaista käyttää 3D-tulostamiseen tarkoitettua pumppua. 3D-tulostamisessa käytettävältä pumpulta vaaditaan ohjattavuutta, ennustettavaa tilavuusvirtaa ja yhdistettävyyttä tulostimen ohjausjärjestelmään. Joidenkin pumppujen yhdistäminen tulostimen ohjausjärjestelmään mahdollista toteuttaa hyödyntämällä tietoliikennerajapintaa, jolloin pumpun ohjaamisen lisäksi sen toiminnan seuraaminen on mahdollista. Ennustettavan ja helposti ohjattavan tilavuus varmistamiseksi kaupallisissa 3D-tulostimissa käytettävä pumpputyyppejä on usein ruuvipumppu, koska sen tuottama tilavuusvirta on jatkuvaa ja tasaista [13].

Markkinoilla on joitain betonin 3D-tulostamiseen tarkoitettuja pumppuja ja sekoituspumppuja. Sekoituspumppu toimii kuten betonipumppu, mutta sekoituspumpulle syötetään valmiin massan sijasta vesi ja massan kuiva-aineet. Sekoituspumppu sekoittaa jatkuvatoimisesti vettä ja kuiva-aineita massaksi, jonka jälkeen valmis massa pumpataan käyttökohteeseen. Kuvassa 3.2 on esitetty betonin 3D-tulostamiseen tarkoitettu Mai Pictor 3D-pumppu ja m-tec duo-mix connect-sekoituspumppu.



Kuva 3.2. Mai Pictor 3D ja m-tec duo-mix connect [14][15].

Taulukossa 3.1 on esitetty kolmen 3D-tulostamiseen tarkoitettujen laitteen ominaisuuksia, jotka ovat olennaisia betonin 3D-tulostamisessa. Taulukossa esiteltyjen laitteiden valmistajilla on valikoimassaan myös esiteltyjen laitteiden perusmallit, joissa yhdistettävyyden ja ohjattavuuden rajoitukset ovat rajoitetumpia.

Taulukossa 3.1 esitellyissä laitteissa on useita yhdistäviä tekijöitä. Kaikkien laitteiden toi-

Valmistaja	MAI	MAI	m-tec
Tuotenimi	2PUMP PICTOR-3D	MULTIMIX-3D	duo-mix connect
Suurin tilavuusvirta [l/min]	15	8	22
Maksimipaine [bar]	15	15	30
Pumpputyyppi	Ruuvipumppu	Ruuvipumppu	Ruuvipumppu
Tilavuusvirran ohjaus	Lisävaruste	Vakiovaruste	Vakiovaruste
Pumpun toiminnan ohjaus	Kauko-ohjaus, hallintapaneeli	Kauko-ohjaus, hallintapaneeli	Kauko-ohjaus, hallintapaneeli, OPC UA

Taulukko 3.1. Pumppujen ja sekoituspumppujen ominaisuuksia [14][15][16].

mintaa voidaan ohjata laitteen hallintapaneelin lisäksi 3D-tulostimen ohjausjärjestelmän kautta. M-tec duo-mix connect-sekoituspumppussa tämä on toteutettu OPC-UA-rajapinnalla. Pumppujen toiminnan ohjaamisen lisäksi niiden tilavuusvirran suuruuden ohjaaminen on mahdollista, mikä on tärkeää betonin 3D-tulostamisessa. Tulostamiseen soveltuva tulostusnopeus voi vaihdella kesken tulostamisen, joten tulostimen ohjausjärjestelmän tulee kyetä ohjaamaan tilavuusvirran suuruutta. Taulukossa 3.1 esitetyt pumput ovat ruuvipumppuja, joten ulostuleva tilavuusvirta on jatkuvaa. Kaikkien laitteiden suurin tilavuusvirta ja maksimipaine ovat verrattain pieniä taulukossa 2.1 esitelyihin pumppuihin verrattuna, koska 3D-tulostamisessa niille ei ole yhtä suuria vaatimuksia.

3D-tulostamisessa suurelle tilavuusvirralle ei ole tarvetta, koska tulostamiseen käytettävät suuttimet ja tulostusnopeudet ovat verrattain pieniä. Tulostusnopeuden tai suuttimen koon kasvattaminen voi aiheuttaa ongelmia tulostettaessa. Suurelle maksimipaineelle ei ole tarvetta, jos tulostimen ja suuttimen väliset korkeuserot ovat pieniä ja siirtomatkat lyhyitä. Tällöin myös letkussa tapahtuvat painehäviöt ovat pieniä. Lyhyet siirtomatkat ovat eduksi betonin 3D-tulostamisessa, koska pumpun ja suuttimen välinen siirtoletku joustaa paineen vaikutuksesta. Suurempi jousto vaikeuttaa tilavuusvirran ohjaamista, mikä vaikeuttaa tulostamisen onnistumista. Siirtoletkun jouston aiheuttamia ongelmia voidaan kompensoida aktiivisella suuttimella [13] tai suuttimen yhteyteen asennettavalla sulkuventtiilillä [12].

3.2 Betonin 3D-tulostamisen erityispiirteet

Betonin 3D-tulostamisessa on otettava huomioon useita asioita, joista osa ei koske perinteisiä betonirakennusmenetelmiä. Erityisesti huomioon otettavia asioita ovat rakenteen vahvistaminen, talotekniikan asettamat vaatimukset, tulostimen fyysisen koon aiheuttamat rajoitukset ja betoniseokselta vaadittavat ominaisuudet. 3D-tulostettavat seokset asettavat omat vaatimuksensa käytettävälle pumpulle.

Betonin puristuslujuus on suuri, mutta vetolujuus suhteessa puristuslujuuteen on pieni [17]. Tämän takia perinteisillä menetelmillä rakennettavissa kohteissa käytetään betoniraudoitusta lisäämään betonin vetolujuutta. Raudoituksen lisäämiseen tai betonirakenteen vahvistamiseen 3D-tulostamisessa on olemassa erilaisia menetelmiä. Raudoituksen lisäämiseksi tulostettua rakennetta voidaan käyttää valumuottina, jonka sisään rauditus asennetaan. Rauditus voidaan lisätä tulostettavien kerrosten väliin, seinä voidaan tulostaa valmiin raudoituksen ympärille tai vahvistamiseen voidaan käyttää tulostamisen yhteydessä automaattisesti asetettavaa teräskäapelia. Betonirakennetta voidaan vahvistaa käyttämällä seosta, joka sisältää lyhyitä kuituja [18].

Etenkin kantavissa rakenteissa joihin kohdistuu suuri kuormitus, 3D-tulostamisen yhdistäminen perinteisiin betonirakennusmenetelmiin voi olla kannattavaa. 3D-tulostamisen ansiosta erillisten muottien rakentamiselle ja purkamiselle ei ole tarvetta, joten manuaalisen työn ja muotteihin vaadittavien materiaalien tarve on vähäisempi. Tämän seurauksena rakentamisen aikana syntyy vähemmän jätettä ja päästöjä. 3D-tulostamisen yhdistäminen perinteisiin rakennusmenetelmiin mahdollistaa suuremman geometrisen vapauden myös kantaviin rakenteisiin. Tämän lisäksi kantavissa rakenteissa voidaan käyttää sellaisia seoksia, joiden tulostaminen olisi mahdotonta. Kuvassa 3.3 näkyy kantaviin pylväisiin manuaalisesti lisätty rauditus. Tulostamisen jälkeen pylväät täytetään betonilla.



Kuva 3.3. Tulostettava rakennus Dubaissa [19].

3D-tulostamiseen pohjautuvassa rakentamisessa voi olla useita käytännön haasteita. Talotekniikan integroiminen rakenteisiin voi olla vaikeaa ja vaatia ylimääräistä työtä, jos talo tulostetaan pelkän rakennesuunnitelman pohjalta [6]. Jälkiasennettava talotekniikka saattaa aiheuttaa ongelmia rakenteen kestävyudessa. Rakennusteollisuuden tarpeisiin sovelletusta tuotetiedon hallinnasta, rakennuksen tietomallista (BIM, Building Information Model) on mahdollisesti hyötyä myös 3D-tulostamisessa. BIM-mallin tarkoituksena on kerätä kaikki rakennuksen elinkaaren suunnitelmat ja tiedot samaan tietokantaan ja malliin [20]. Tällöin suunnitelman eri osa-alueiden keskinäinen tarkastelu on mahdollista, ja esimerkiksi talotekniikka voidaan huomioida rakennesuunnitelmassa.

3D-tulostimen tulostusalueen koko asettaa rajoituksia tulostettavan kohteen suurimmalle

mahdolliselle koolle. Tulostusalueetta suurempien kohteiden tulostaminen on joissain tapauksissa mahdollista eri menetelmillä. Tulostettava rakennus voidaan tulostaa elementeissä, jotka kootaan työmaalla kuten elementtirakentamisessa. Tällöin 3D-tulostamisen etuna verrattuna perinteiseen elementtirakentamiseen on tulostettavien elementtien suurempi geometrinen vapaus. Tulostusalueetta suurempien kokonaisuuksien tulostaminen on mahdollista myös siten, että tulostettava rakennus tulostetaan pienemmissä kokonaisuuksissa [4]. Elementtirakentamisessa tai osissa tulostaessa on kuitenkin otettava huomioon osakokonaisuuksien väliset liitokset.

Tulostusalueen koko ei ole ainoa tulostettavan rakenteen kokoa rajoittava tekijä. Tulostettavien kerroksien välillä kuluva aika vaikuttaa merkittävästi kerrosten välisen sidoksen ja siten koko rakenteen lujuuteen [21]. Tämän seurauksena yhden kerroksen tulostamiseen käytettävissä oleva aika on rajallinen.

3.3 3D-tulostettavat seokset

Perinteisillä rakennusmenetelmillä nestemäisen betonin olennaisin tekijä rakentamisen onnistumiseksi on työstettävyys. Työstettävyys koostuu kolmesta eri osa-alueesta, jotka ovat notkeus, kyky vastustaa liian nopeaa kuivumista ja kyky vastustaa erottumista [22]. Työstettävyyden eri osa-alueet muuttuvat betonin koostumuksen muuttuessa. Seoksen reologisten ominaisuuksien lisäksi betonin työstettävyyteen voidaan vaikuttaa lisäaineilla.

Tulostamiseen käytettävälle seokselle kohdistuu uusia vaatimuksia perinteisin menetelmin käytettäviin seoksiin verrattuna. Tulostamiseen käytettävän seoksen tulee olla tarpeeksi notkeaa, että sen työstäminen on mahdollista. Tätä ominaisuutta kuvataan tulostettavuudella. Pursotettavuus kuvaa sitä, onnistuuko seoksen pursottaminen suuttimen läpi ilman ongelmia. Näiden lisäksi seoksen tulee jähmettyä tarpeeksi nopeasti, että edelliset kerrokset kestävät niiden päälle tulostettavien kerroksien aiheuttaman rasituksen ilman muodonmuutoksia. Tätä ominaisuutta kuvataan rakennettavuudella.

Tulostettavan seoksen optimaalinen koostumus riippuu myös tulostamiseen käytettävästä suuttimesta ja tulostettavan kerroksen paksuudesta [23]. Käytettäessä suurempaa suuttinta tulostetun kerroksen jähmettyminen on hitaampaa, jolloin seoksen tulee olla jähmeämpää säilyttääkseen muotonsa ja kestääkseen seuraavien kerroksien sille aiheuttaman kuormituksen.

Taulukossa 3.2 on esitetty kolme 3D-tulostamiseen soveltuvaa seosta, missä seoksien ominaisuuksien muokkaamiseen on käytetty kolmea erilaista lisäainetta. Käytetyt lisäaineet ovat mikrosilika (silica fume), nanosavi (nanoclay) ja notkistin (viscosity modifying admixture). Seosten hienojakoinen aines on jaettu kolmeen kategoriaan raekoon perusteella.

Betonin pumppaamisen mallintamiseksi seoksen olennaisimmat parametrit ovat dynaa-

Aine	Määrä [kg/m ³]		
	Seos SF	Seos NC	Seos VM
Sementti	573,6	663,0	663,0
Lentotuhka	164,0	165,7	165,7
Kvartsijauhe	491,7	497,2	497,2
Kvartsihiekkä 1	368,7	372,9	372,9
Kvartsihiekkä 2	368,7	372,9	372,9
Vesi	262,2	265,2	265,2
Polypropyleenikuitu	1,8	1,8	1,8
Nesteytin	1,39	1,08	1,49
Lisäaineen tyyppi	Mikrosilika	Nanosavi	Notkistin
Lisäaineen annostus	81,9	2,47	0,82

Taulukko 3.2. Kolmen 3D-tulostettavan seoksen ominaisuudet [23].

minen viskositeetti, myötöraja, plastinen viskositeetti ja rajakerroksen myötöraja. Betonin virtausparametrit on mahdollista määrittellä kokeellisesti tribometrillä [24]. 3D-tulostettavia seoksia käsittelevissä tutkimuksissa pumpattavuus ja pursotettavuus on kuitenkin määritetty binäärisesti, eikä virtausparametreihin ole otettu kantaa. Toisin kuin perinteisillä betonirakennusmenetelmillä, betonin 3D-tulostaminen asettaa vaatimuksia myös betonivirtauksen koostumukselle. Seos on pursotettava, jos yksikerroksinen, 30 cm pitkä ja suora tulostettu kappale poikkeaa 10 cm välein mitattuna enintään 0,5 mm suuttimen mitoista, eikä tulostetun kappaleen pinnassa ole huokosia tai epäjatkuvuuksia [23].

3.4 Kaupalliset sovellukset

Betonin 3D-tulostamiseen on saatavilla kaupallisia ratkaisuja [3], mutta niiden hyödyntäminen rakennusteollisuudessa ei ole vielä laajamittaista. Kaupallisten ratkaisujen ominaisuudet ja mekaaniset toteutukset poikkeavat toisistaan, mutta tulostimien toimintaperiaate on sama. Tulostamiseen käytettävä betonimassa pumpataan suutinyksikölle ja pursotetaan suuttimen läpi. Suutinta liikutetaan 3D-mallin pohjalta luodun ohjelman mukaisesti käsivarsirobotilla, deltarobotilla tai portaalirobotilla. Tulostusalueen laajentamista ja tulostamisen nopeuttamista rinnakkaista tulostamista ja mobiilirobotteja hyödyntämällä on tutkittu [5], mutta sitä ei ole vielä hyödynnetty kaupallisesti. Kaupallisten ratkaisujen mahdollistama rakennuksen koko poikkeaa toisistaan merkittävästi. Suurimpien kaupallisten ratkaisujen laaja tulostusala mahdollistaa jopa useiden rakennusten tulostamisen samalle tulostusalueelle. Kuvassa 3.4 on esitetty Dubaissa sijaitseva paikallishallinnon käyttöön tarkoitettu 3D-tulostettu rakennus keskeneräisenä ja valmiina. Rakennuksen tulostaneen yrityksen mukaan kyseessä on maailman suurin työmaalla 3D-tulostettu rakennus.



Kuva 3.4. 3D-tulostettu rakennus keskeneräisenä ja valmiina [19].

Kaksikerroksinen rakennus 9,5 m korkea ja sen pinta-ala on 640 m². Tulostimen rajallisen tulostusalueen takia tulostinta siirrettiin tarvittaessa nosturilla.

4. VIRTAUKSEN MALLINNUS

Nesteitä tarkastellessa ne voidaan jakaa kahteen eri pääluokkaan sen perusteella, miten ne käyttäytyvät leikkausjännityksen vaikutuksesta. Newtonilaiset nesteet käyttäytyvät lineaarisesti leikkausjännityksen funktiona, mutta ei-newtonilaisten nesteiden käyttäytyminen poikkeaa siitä jollain kolmesta eri tavasta.

Leikkausjännityksen ollessa kriittistä leikkausjännitystä pienempi Bingham-plastien neste käyttäytyy kuten kiinteä aine, mutta leikkausjännityksen ylittäessä kriittisen leikkausjännityksen se käyttäytyy kuten newtonilainen neste. Tällöin siihen kohdistuu todellisen leikkausjännityksen ja kriittisen leikkausjännityksen erotuksen suuruinen leikkausjännitys. Pseudoplastisen nesteen viskositeetti muuttuu pienemmäksi leikkausjännityksen kasvaessa, kun taas dilatanttityyppisen nesteen viskositeetti kasvaa leikkausjännityksen kasvaessa.

Putkivirtausta tarkastellessa ollaan yleensä kiinnostuneita putkessa virtaavan nesteen massavirrasta ja putkessa tapahtuvasta painehäviöstä. Tarkasteltavan kontrollitulavuuden läpäisevä massavirta ei muutu. Siten kontrollitulavuudessa massaa ei synny eikä sitä katoa. Yksiulotteisen virtauksen tapauksessa massavirta \dot{m} voidaan siten kirjoittaa muodossa

$$\dot{m} = \rho Av \quad (4.1)$$

missä ρ nesteen tiheys, A virtauksen poikkipinta-ala ja v virtauksen keskimääräinen nopeus. Kokoonpuristumattomalle nesteelle kaavasta 4.1 voidaan ratkaista tilavuusvirta Q jakamalla kaavan molemmat puolet tiheydellä ρ , jolloin tilavuusvirralle saadaan lauseke

$$Q = Av. \quad (4.2)$$

Koska ympyrän pinta-ala A on

$$A = \pi \frac{D^2}{4}, \quad (4.3)$$

kaava 4.2 voidaan kirjoittaa putkivirtaukselle muotoon

$$Q = \pi \frac{D^2}{4} v. \quad (4.4)$$

Kaavasta 4.4 ratkaisemalla tunnetun putkivirtauksen tilavuusvirran keskimääräiselle vir-

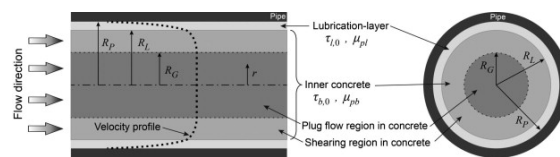
tausnopeudelle saadaan kaava

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}. \quad (4.5)$$

4.1 Betonin pumppamiseen vaikuttavat tekijät

Betonimassaa voidaan pitää Bingham-plastisena nesteenä [24]. Betonin pumppamiseen vaadittava paine riippuu virtauksen takia syntyvästä painehäviöstä sekä pumpun ja kohteen välisestä korkeuserosta aiheutuvasta hydrostaattisesta paineesta. Hydrostaattinen paine riippuu nesteen tiheydestä, putoamiskiihtyvyydestä ja korkeuserosta.

Alhaisilla virtausnopeuksilla betoni virtaa liukumalla putkessa, jolloin betonin ja putken seinämän väliin muodostuu voiteleva rajakerros [24]. Virtausnopeuden kasvaessa myös rajakerrokseen kohdistuvat voimat kasvavat. Virtausnopeuden ylittäessä kriittisen virtausnopeuden betonivirtauksen muoto muuttuu, jolloin virtaus tapahtuu liukumalla ja murtumalla. Betonimassan putkivirtauksen muoto ja virtauksen eri osat on esitetty kuvassa 4.1. Kriittisellä virtausnopeudella rajakerroksen leikkausjännitys ja putkessa virtaavan betoni-seoksen myötöraja ovat yhtä suuret.



Kuva 4.1. Betonin virtaus putkessa [25].

Betonin käyttäytymiseen putkivirtauksessa paineen funktiona vaikuttaa leikkausjännitys rajakerroksessa, kiinteiden partikkeleiden ja putken seinämän välinen kitka ja murtumalla virtaavan betonimassan partikkeleiden sisäiset vuorovaikutukset [26]. Betoniseoksen raekoon kasvaessa betoniseoksen ja rajakerroksen plastinen viskositeetti kasvaa ja myötöraja pienenee [25]. Tämän seurauksena kriittinen virtausnopeus laskee ja putkivirtauksessa syntyvä painehäviö kasvaa, joten pumppamiseen vaadittava paine kasvaa. Näiden lisäksi putkistossa tapahtuvaan painehäviöön vaikuttaa käytettävän putkiston kokonaispituus.

4.2 Virtausyhtälöt newtonilaiselle nesteelle

Newtonilaisessa nesteessä dynaaminen viskositeetti η kuvaa nesteen leikkausjännitystä kahden yhtäsuuntaisen tason välissä, joista toinen taso liikkuu suhteessa toiseen tasoon nopeudella v [27, s. 24]. Leikkausjännityksen takia paikallaan olevasta tasosta etäisyydellä y olevan tason, jonka pinta-ala on A , liikuttaminen nopeudella v vaatii voiman F .

Voiman F suuruus saadaan laskettua kaavalla

$$F = \eta A \frac{dv}{dy}, \quad (4.6)$$

missä η on nesteen dynaaminen viskositeetti, A on liikkuvan tason pinta-ala ja v osittaisderivaatta y suhteen. Dynaamisen viskositeetin η suuruus riippuu tarkasteltavasta nesteestä ja sen lämpötilasta, mutta newtonilaisessa nesteessä nopeus ei vaikuta sen suuruuteen. Jakamalla kaavan 4.6 molemmat puolet pinta-alalla A kaava saadaan muotoon

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy}. \quad (4.7)$$

Koska leikkausjännitys τ on määritelmän mukaisesti voiman F ja pinta-alan A suhde, sijoittamalla kaavaan 4.7 leikkausjännityksen ja dynaamisen viskositeetin suhteelle saadaan yleinen lauseke

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}. \quad (4.8)$$

Putkivirtausta tarkastellessa virtauksen muoto vaikuttaa sen käyttäytymiseen. Virtauksen ominaisuuksia dimensioton suhdeluku, Reynoldsin luku Re . Reynoldsin luku määritellään putkivirtauksessa yhtälöllä [27, s. 29]

$$Re = \frac{D_H v \rho}{\eta}, \quad (4.9)$$

missä D_H on hydraulinen halkaisija, v virtauksen nopeus, ρ nesteen tiheys ja η nesteen dynaaminen viskositeetti. Hydraulinen halkaisija voidaan laskea kaavalla

$$D_H = \frac{4A}{L_A}, \quad (4.10)$$

missä A on virtauksen poikkileikkauksen pinta-ala ja L_A virtauksen poikkileikkauksen piiri. Ympyrän muotoisen putken hydraulinen halkaisija D_H on siten sama kuin putken sisähalkaisija [27, s. 29]. Putkivirtauksen tapauksessa Reynoldsin luvun avulla virtausta voidaan tulkita seuraavasti [28, s. 268]:

- Alle 2300: laminaarinen virtaus
- 2300 - 4000: siirtymäalue
- Yli 4000: Turbulenttinen virtaus

Putkivirtauksessa newtonilaisen nesteen painehäviö voidaan laskea Darcy-Weisbachin yhtälöllä [27, s. 58][28, s. 270]

$$\Delta p = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{\rho v^2}{2} \right), \quad (4.11)$$

missä Δp on painehäviö, λ kitkavastuskerroin, L putken pituus, D putken sisähalkaisija, ρ nesteen tiheys ja V nesteen keskimääräinen virtausnopeus. Darcy-Weisbachin yhtälö toimii laminaaristen ja turbulenttisten virtauksien tapauksessa, mutta kitkavastuskertoimen λ muoto riippuu virtauksen ominaisuuksista. Laminaariselle virtaukselle kitkavastuskerroin λ voidaan määrittää kaavalla [27, s. 58]

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (4.12)$$

missä Re on Reynoldsin luku.

Turbulenttisen virtauksen tapauksessa kun $Re < 10^5$, hydraulisesti sileille putkille voidaan käyttää kitkavastuskertoimena Blasiusuksen kitkakerrointa [27, s. 60], joka määritellään kaavalla

$$\lambda = 0,3164Re^{-1/4}. \quad (4.13)$$

Turbulenttisten virtauksien kitkavastuskertoimet on määritelty kokeellisesti, koska niiden johtaminen ei ole mahdollista [27, s. 59]. Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimien suuruuteen vaikuttaa myös putkiston karheus ja putkiston koko.

4.3 Virtausyhtälöt betonille

Betonin putkivirtauksen mallintaminen ei ole mahdollista newtonilaisen nesteen virtausyhtälöillä, koska betoni on Bingham-plastinen neste. Bingham-plastisen nesteen käyttäytyminen riippuu siitä, miten suuri leikkausjännitys siihen kohdistuu. Betonin virtausta tarkastellaan tutkimuksissa tilavuusvirtana. Kriittisen tilavuusvirran Q_1 [24][25] suuruus voidaan laskea kaavalla

$$Q_1 = 3600 \frac{\tau_0 - \tau_{0t}}{\eta} \pi R^2 k_r, \quad (4.14)$$

missä τ_0 on betoniseoksen myötöraja, τ_{0t} rajakerroksen myötöraja, η seoksen viskositeettivakio, R putken halkaisija ja k_r käytettävästä pumpputyypistä riippuva täyttökerroin. Kun tilavuusvirta Q on pienempi kuin kriittinen tilavuusvirta Q_1 , putkessa liukumalla tapahtuvan betonin tilavuusvirran pumppaamiseen vaadittu paine P voidaan laskea kaavalla

$$P = \frac{2L}{R} \left(\frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} \eta + \tau_{0t} \right), \quad (4.15)$$

missä L on putken kokonaispituus ja Q tilavuusvirta. Jos tilavuusvirta Q on suurempi kuin kriittinen tilavuusvirta Q_1 , niin pumppaamiseen vaadittu paine voidaan laskea kaavalla

$$P = \frac{2L}{R} \left[\frac{\frac{Q}{3600\pi R^2 k_r} - \left(\frac{R}{4\mu}\right)\tau_{0t} + \left(\frac{R}{3\mu}\right)\tau_0}{1 + \frac{R}{4\mu}} \eta + \tau_{0t} \right], \quad (4.16)$$

missä μ on betoniseoksen plastinen viskositeetti.

5. BETONIN VIRTAUKSEN SIMULOINTI

Betonin virtauksen simuloimiseksi kaksisylinterisestä hydraulikäyttöisestä betonipumpusta tehtiin Simulink-malli. Mallilla voidaan simuloida betonivirtauksen käyttäytymistä suhteessa betonipumpulta haluttuun betonin tilavuusvirtaan. Pumpun ulostulon säätäminen tapahtuu P-säätimellä. Pumpun mallilla tarkasteltiin betonivirtauksen käyttäytymistä eri tapauksissa, jotka ovat olennaisia betonin 3D-tulostamisen kannalta.

5.1 Sylinteripumpun mallinnus

Työn laajuuden takia pumpun mallinnuksessa tehtiin joitain yksinkertaistuksia. Pumpun mallissa ei ole huomioitu esimerkiksi hydrauliletkuissa tapahtuvaa painehäviötä tai hydrauliletkujen ja betoniletkun joustamista. Betonin siirtämisen betonipumpulta käyttökohteeseen katsotaan tapahtuvan suoraa putkea pitkin, eikä betonin siirtämisessä ole korkeuseroa. Hydraulisylinterien männänpuolien neste on oletettu tässä tapauksessa koonpuristumattomaksi. Tämän seurauksena kaksi yksipuolista hydraulisylinteriä on voitu redusoida yhdeksi kaksipuoliseksi hydraulisylinteriksi. Tämän lisäksi järjestelmä on oletettu vakio painejärjestelmäksi.

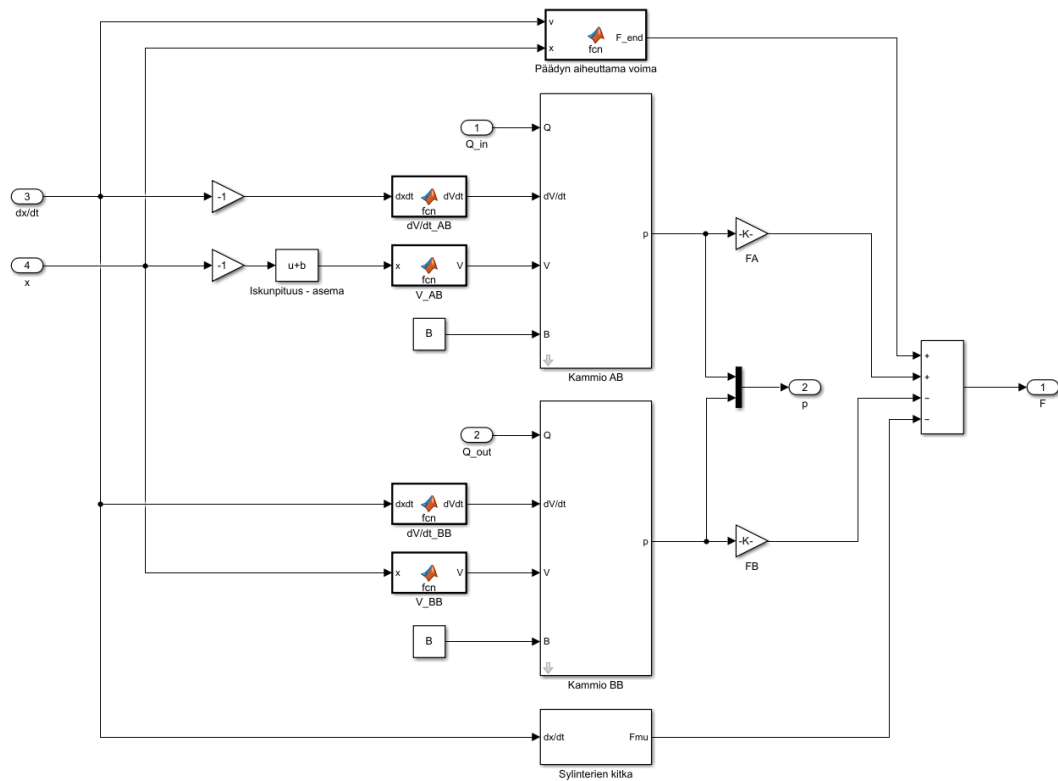
Sylinteripumpun malli koostuu yhteen liitetystä alijärjestelmästä. Tässä työssä mallinnetut pumpun alijärjestelmät ovat venttiilin dynamiikka, venttiili, sylinterit, työsylinterin vaihtaminen ja betonipumppu.

5.1.1 Venttiili

Venttiili on mallinnettu 4/3 servoventtiilinä venttiilin kuristusmallilla. Venttiili koostuu neljästä kuristuksesta. Kuristuksen läpäisevä tilavuusvirta riippuu venttiilin nimelliskoosta, ohjauksen suuruudesta ja venttiilin yli olevasta paine-erosta. Servoventtiilin sisääntuloina ovat järjestelmän syöttöpaine, hydraulisylinterien kammioiden paineet, tankkilinjan paine ja ohjaus. Servoventtiilin ulostuloina ovat tilavuusvirrat A- ja B-kanaviin, tankkilinjaan ja pumpulta venttiilille. Venttiilin dynamiikan mallintamisessa on käytetty ensimmäisen kertaluokan siirtofunktiota. Venttiilin ulostulon arvo on rajoitettu välille $[-1, 1]$.

5.1.2 Sylinterit

Betonipumpun hydraulisyylinterit on mallinnettu yhtenä kaksipuoleisena sylinterinä, jossa on kaksi männänvartta. Sylinterin ollessa päätyasennossa sen aiheuttama nettovoima on nolla. Sylinterimalli koostuu kahdesta kammiosta, sylinterin päädyn aiheuttamasta voimasta ja sylinterien sisäisestä kitkasta. Sylinterimalli on esitetty kuvassa 5.1.



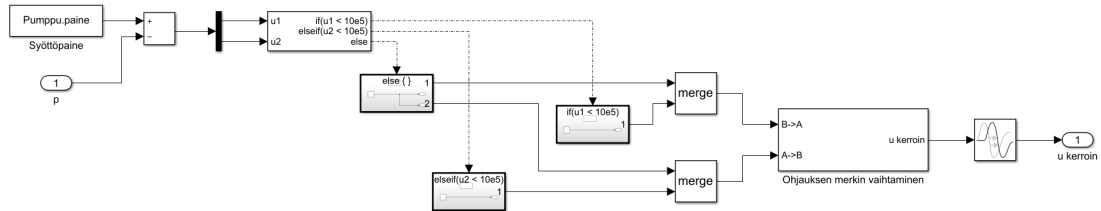
Kuva 5.1. Sylinterikammiot ja sisäinen kitka.

Sylinterien kammioiden paineiden muutosnopeus ratkaistaan kammioiden sisään- tai ulos-tulevan tilavuusvirran, kammioiden tilavuuden, kammioiden tilavuuden muutosnopeuden ja hydraulinesteen kokoonpuristumisen avulla. Kammioiden paineet saadaan integroimalla kammioiden paineiden muutosnopeutta. Sylinterin tuottama voima lasketaan sylinterin kammioiden paineiden aiheuttamien voimien, päädyn aiheuttamien voimien ja sylinterien kitkavoimien perusteella.

5.1.3 Työsylinterin vaihtaminen

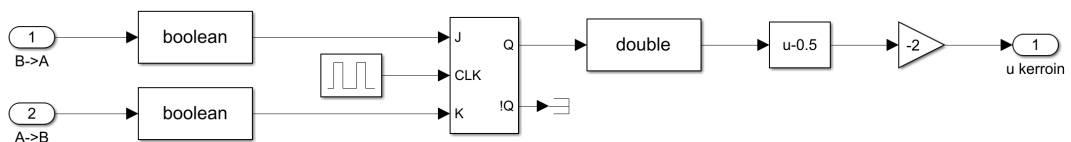
Sylinteripumppu koostuu kahdesta vastakkaiseen suuntaan liikkuvasta sylinteristä, joista toinen toimii betonin tilavuusvirtaa tuottavana työsylinterinä. Samanaikaisesti toinen sylinteri vetäytyy ja täytty betoniseoksella. Kun sylinteri B on työsylinteri, hydraulioöljyä pumpataan sylinterin A männänvarren puolelle. Työsylinterin saavuttaessa maksimipituutensa tapahtuu työsylinterin vaihtaminen, jolloin vaihtojärjestelmä vaihtaa minimipituudessaan

olevan sylinterin työsylinteriksi. Työsylinterin vaihtaminen tapahtuu vaihtamalla venttiilin ohjauksen merkki, kun sylinteri saavuttaa päätyaseman. Päätyaseman saavuttaminen tunnistetaan tarkkailemalla hydraulisyliinterien kammioiden painetta. Työsylinterin vaihtamisen malli on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Työsylinterin vaihtaminen.

Alijärjestelmän sisääntulona on hydraulisyliinterien männänvarren puolen paineet. Järjestelmän syöttöpaineesta ja hydraulisyliinterien kammioiden paineista lasketaan erotus. Jos toisen kammion paineen ja syöttöpaineen erotus on määrättyä rajaa pienempi, katsotaan sylinterin olevan päätyasennossa. Kun sylinteri on päätyasennossa, siitä lähetetään tieto alijärjestelmälle "Ohjauksen merkin vaihtaminen" siten, että alijärjestelmän kyseisen sylinterin päätyasennossa olemista kuvaavan sisääntulon arvo on 1. Jos sylinteri ei ole päätyasennossa, alijärjestelmän "Ohjauksen merkin vaihtaminen" molempien sisääntulujen arvo on 0. Alijärjestelmä "Ohjauksen merkin vaihtaminen" on esitetty kuvassa 5.3.

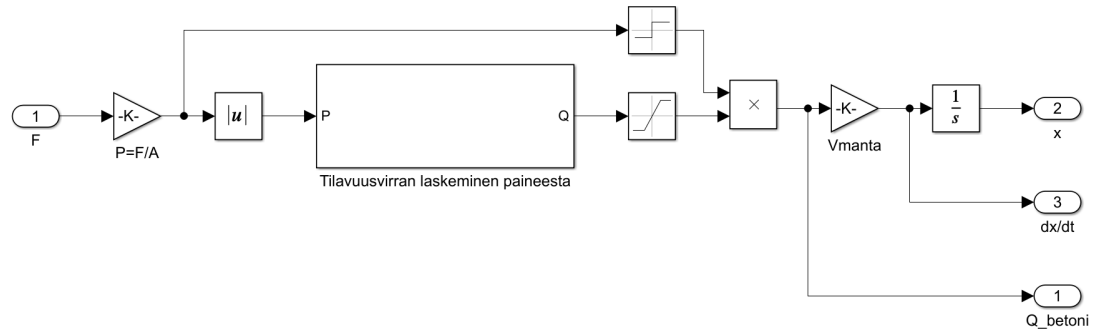


Kuva 5.3. Ohjauksen merkin vaihtaminen.

Ohjauksen merkin vaihtava kerroin muodostetaan alijärjestelmässä. Sylinterin A saavuttaessa maksimipituutensa alijärjestelmän ulostuloksi vaihtuu 1, jolloin sylinteri B vaihtuu työsylinteriksi. Sylinterin B saavuttaessa maksimipituutensa alijärjestelmän ulostuloksi vaihtuu -1, jolloin sylinteri A vaihtuu työsylinteriksi. Työsylinterin vaihtamiseen kuluva aika on huomioitu viiveellä merkin vaihtamisessa.

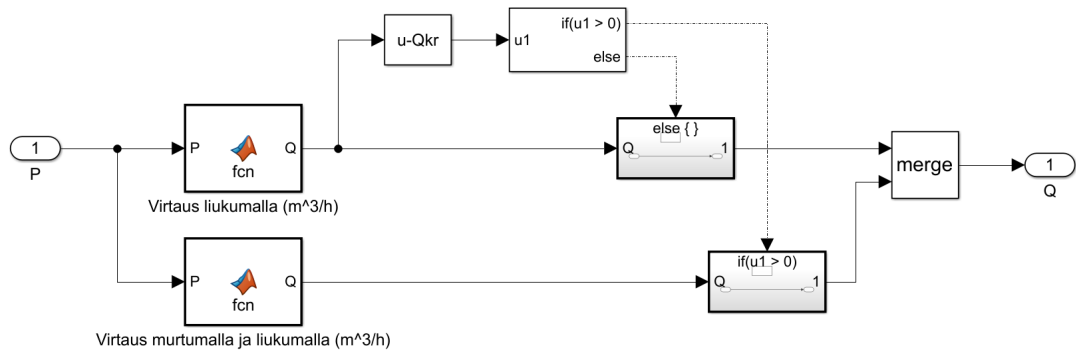
5.1.4 Betonipumppu

Betonipumppu on mallinnettu hydraulisyliinteriin kytkettynä kuormana. Alijärjestelmän sisääntulona on työsylinterin aiheuttama voima. Alijärjestelmän ulostulona on sylinterin B asema, nopeus ja sylinterin B tuottama betonin tilavuusvirta. Alijärjestelmä on esitetty kuvassa 5.4.



Kuva 5.4. Betonipumppu.

Kun sylinteri B on työsylinteri, sisään tulona oleva voima on positiivinen. Kun sylinteri A on työsylinteri, sisään tulona oleva voima on negatiivinen. Työsylinterin aiheuttama voima muutetaan betonin paineeksi jakamalla se betonipumpun sylinterin pinta-alalla. Tämän jälkeen siitä otetaan itseisarvo ja se syötetään sisään tulona alijärjestelmälle “Tilavuusvirran laskeminen paineesta”. Alijärjestelmän sisään tulona on betonin paine ja ulostulona betonin tilavuusvirta. Alijärjestelmä on esitetty kuvassa 5.5.



Kuva 5.5. Tilavuusvirran laskeminen paineesta.

Betonin putkivirtauksen mallintamiseen tarvittavia yhtälöitä on käsitelty kappaleessa 4.3. Betonin virtauksen tyyppi riippuu kriittisen tilavuusvirran suuruuden määrittävistä järjestelmän parametreista ja betonin tilavuusvirrasta. Kriittisen tilavuusvirran suuruus lasketaan parametritiedostossa kaavalla 4.14. Liukumalla tapahtuvan virtauksen suuruus lasketaan ratkaisemalla tilavuusvirta kaavasta 4.15. Liukumalla ja murtumalla tapahtuvan virtauksen suuruus lasketaan ratkaisemalla tilavuusvirta kaavasta 4.16. Jos betonin virtausnopeus on pienempi kuin kriittinen virtausnopeus, alijärjestelmän ulostulo lasketaan liukumalla tapahtuvan virtaamisen perusteella. Jos betonin virtausnopeus on suurempi kuin kriittinen virtausnopeus, alijärjestelmän ulostulo lasketaan liukumalla ja murtumalla tapahtuvan virtauksen perusteella.

Paineesta ratkaistun tilavuusvirran suuruus rajoitetaan positiiviseksi, jonka jälkeen se ker-

rotaan pumpun sisääntulona olleen voiman merkillä. Tällöin saadaan ulostulona sylinterin B tuottama tilavuusvirta. Sylinterin B nopeus ratkaistaan jakamalla sylinterin B tuottama betonin tilavuusvirta betonipumpun sylinterin pinta-alalla. Sylinterin B asema lasketaan integroimalla sylinterin B nopeutta.

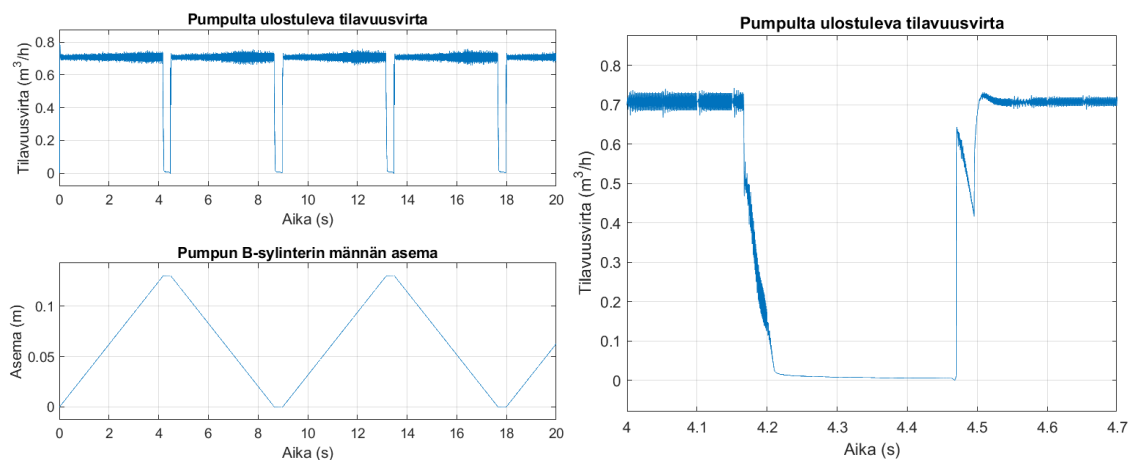
5.2 Simulointi

3D-tulostettavien betoniseosten virtausparametreja ei ole käsitelty aiheeseen liittyvissä tutkimuksissa. Tämän takia simulointi suoritettiin seoksella, jota on tarkasteltu betonin putkivirtausta käsittelevissä tutkimuksissa. Simuloinnissa käytetty seos C+/52/TP valittiin Kaplanin [29] käyttämistä seoksista. Valitun seoksen virtausominaisuudet olivat lähimpänä 3D-tulostamiseen soveltuvia seoksia. Simuloinnissa käytetyn seoksen virtausparametrit on esitetty taulukossa 5.1.

Seos	C+/52/TP
Seoksen myötölujuus τ_0 [Pa*s]	1314
Rajakerroksen myötölujuus τ_{0t} [Pa*s]	150
Viskositeettivakio η [Pa*s/m]	455
Plastinen viskositeetti μ [Pa*s/m]	94

Taulukko 5.1. Simuloinnissa käytetyn seoksen virtausparametrit.

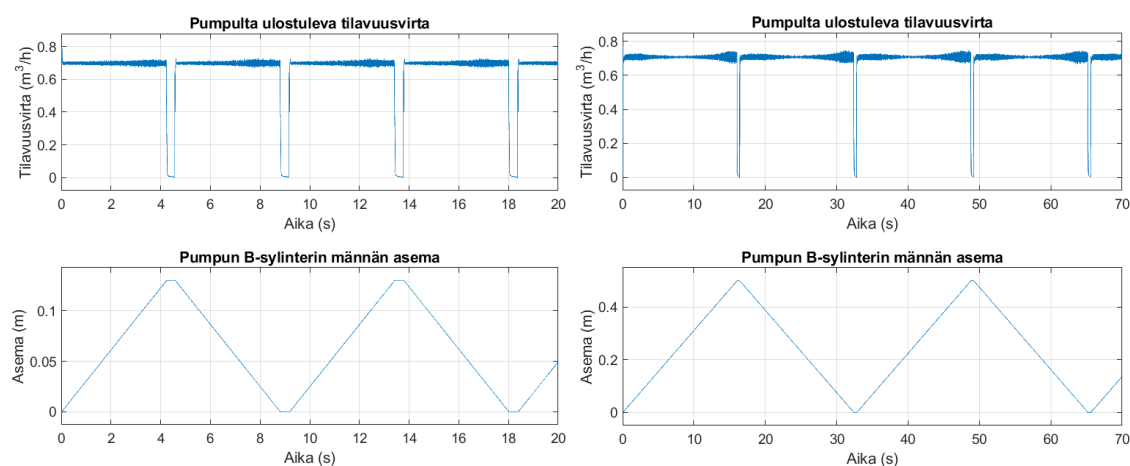
Betonivirtauksen käyttäytymistä tarkasteltiin seitsemässä eri tapauksessa. Valituilla tapauksilla saa yleiskuvan betonipumpun toiminnasta 3D-tulostamisen kannalta olennaisissa tilanteissa. Ensimmäisessä tapauksessa tarkasteltiin betonipumpun toimintaa, kun betonipumpulta halutun tilavuusvirran suuruus oli 1 m³/h. Tämän lisäksi ensimmäisessä tapauksessa tarkasteltiin tilavuusvirran käyttäytymistä työsylinterin vaihtamisen yhteydessä. Ensimmäisen tapauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.6.



Kuva 5.6. Yleiskuva pumpun toiminnasta ja työsylinterin vaihtaminen.

Kuvasta 5.6 nähdään, että pumpulta ulostuleva virtaus on jaksottaista työsylinterin vaihtamiseen kuluvan ajan takia. Tämän lisäksi työsylinteriä vaihtaessa tilavuusvirtaan vaikuttaa muita järjestelmästä johtuvia häiriöitä. Tilavuusvirta laskee viiveellä työsylinterin saavuttaessa päätyaseman. Viive aiheutuu hydraulijärjestelmän joustosta ja siitä, että sylinterin päätyasema tunnustetaan sylinterin kammioiden paineiden perusteella. Tilavuusvirran nousemisessa esiintyvät häiriöt johtuvat P-säätimestä ja mallintamisessa tehdyistä yksinkertaistuksista. Koska työssä ei ole mallinnettu hydraulijärjestelmässä tapahtuvia painehäviöitä ja hydrauliletkujen joustoa, mallinnetun järjestelmän vaimennus on todellista pienempi. Tämän lisäksi pumpun ulostuloon jää pysyvän tilan virhe, joka johtuu P-säätimen käytöstä.

Toisessa ja kolmannessa tapauksessa tarkasteltiin järjestelmän parametrien muuttamisen vaikutusta betonin virtaukseen. Toisessa tapauksessa tarkasteltiin betonin pumppaamiseen käytettävän putken pituuden kasvattamisen vaikutusta ulostuloon. Kolmannessa tapauksessa tarkasteltiin pumpun hydraulisyylinterin pituuden kasvattamisen vaikutusta ulostuloon. Toisen ja kolmannen tapauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.7.

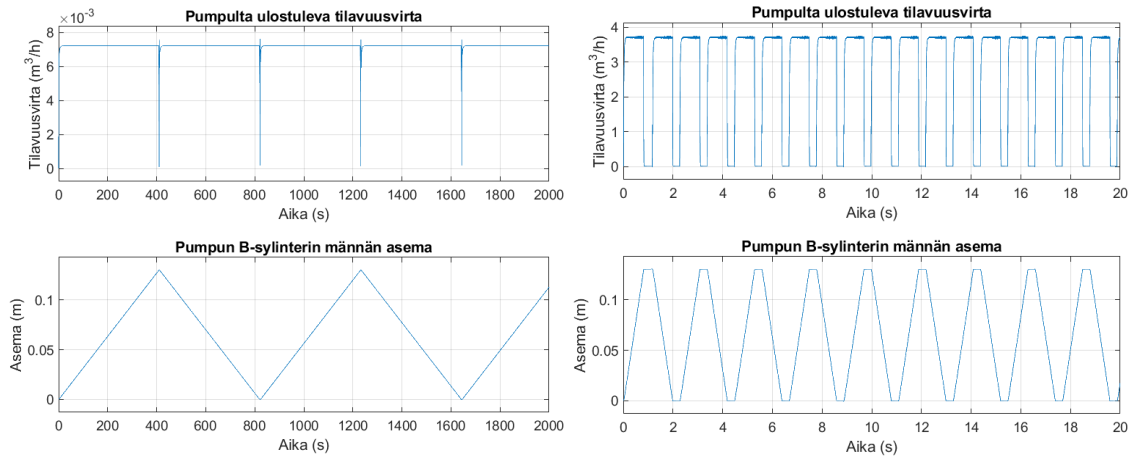


Kuva 5.7. Pumpun putken ja sylinterin pituuden vaikutus pumpun toimintaan.

Kuvasta 5.7 nähdään, että pumppaamiseen käytettävän putken pituuden lisäämisellä ei ole suurta vaikutusta pumpulta ulostulevaan tilavuusvirtaan. Pumppaamiseen käytettävän putken pituuden merkitys kasvaa halutun tilavuusvirran kasvaessa, koska tällöin virtauksen aiheuttama painehäviö kasvaa. Pumppaamiseen käytettävän sylinterin iskunpituuden lisääminen mahdollistaa pidempään jatkuvan työsyklin ja siten tasaisemman tilavuusvirran. Pidempi sylinteri ei kuitenkaan poista työsylinterin vaihtamisesta aiheutuvaa katkosta ja häiriöitä tilavuusvirtaan.

Neljännessä ja viidennessä tapauksessa tarkasteltiin pumpun toimintaa, kun haluttu tilavuusvirta on hyvin pieni tai hyvin suuri. Neljännen ja viidennen tapauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.8.

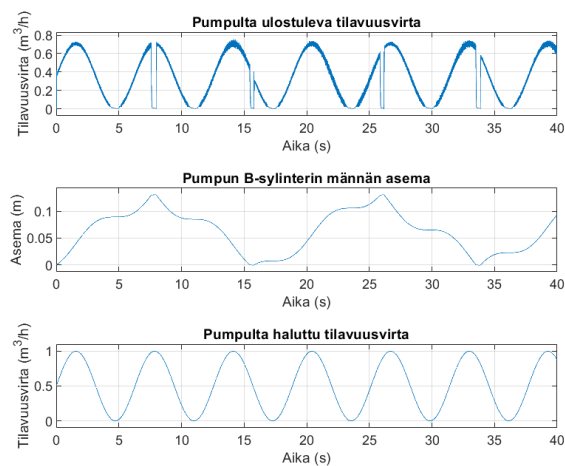
Pumpun pienintä mahdollista tilavuusvirtaa rajoittaa säätöjärjestelmän ominaisuudet se-



Kuva 5.8. Pienin ja suurin mahdollinen tilavuusvirta.

kä pumpun mekaaniset ominaisuudet. Halutun tilavuuvirran ollessa hyvin pieni betonin virtauksen sylinteriltä vaatima voima on hyvin pieni. Siten sylinterien kitkavoimien merkitys korostuu ja säätöjärjestelmän vaatimukset kasvavat. Pumpun suurinta mahdollista tilavuusvirtaa rajoittavat järjestelmän hydrauliset ja mekaaniset ominaisuudet. Pumpun ohjaamiseen käytettävän servoventtiilin läpäisemä tilavuusvirta on rajallinen, joten se asettaa äärimmäisen ylärajan suurimmalle tilavuusvirralle. Tämän lisäksi kaavojen 4.15 ja 4.16 mukaan pumppaamiseen käytettävän putken halkaisija ja pituus vaikuttavat pumppaamiseen vaadittavaan paineeseen ja siten myös tilavuusvirran suuruuteen.

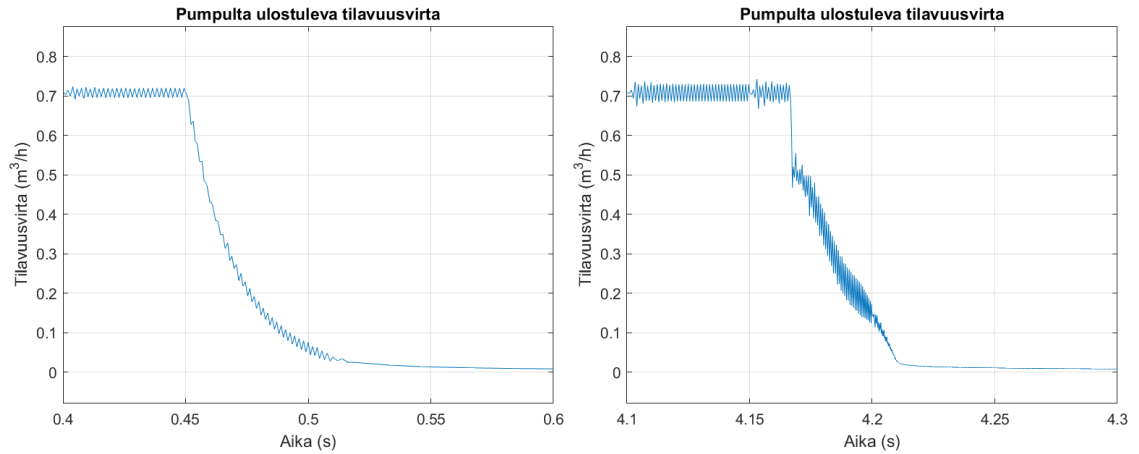
Kuudennessa tapauksessa tarkasteltiin pumpun toimintaa, kun haluttu tilavuusvirta ei ole vakio. Kuudennen tapauksen tulokset on esitetty kuvassa 5.9.



Kuva 5.9. Pumpun toiminta muuttuvalla ohjauksella.

Kuvasta 5.9 nähdään, että pumpulta ulostuleva tilavuusvirta seuraa haluttua tilavuusvirtaa verrattain hyvin, jos P-säätimestä aiheutuvaa pysyvän tilan virhettä ei huomioida. Pumpun työsylinterin vaihto aiheuttaa kuitenkin merkittäviä häiriöitä ulostulevaan tilavuusvirtaan. Tämän takia työsylinterin vaihtamiseen kuluvaan aikaan ja sen aiheuttamiin häiriöihin tulee kiinnittää erityistä huomiota tulostimen ohjauksessa.

Seitsemännessä tapauksessa tarkasteltiin pumpulta ulostulevan tilavuusvirran käyttäytymistä, kun haluttu tilavuusvirta muutettiin yhdestä kuutiometristä tunnissa nolnaan askelmaisesti. Tilavuusvirran muuttuminen seitsemännessä tapauksessa ja tilavuusvirran muuttuminen ensimmäisessä tapauksessa sylinterin saavuttaessa päätyasennon on esitetty kuvassa 5.10.



Kuva 5.10. Askelmainen ohjauksen muutos ja luonnollinen muutos.

Kuvasta 5.10 nähdään, että pumpulta ulostuleva tilavuusvirta muuttuu eri tavalla riippuen siitä, johtuuko se halutun tilavuusvirran askelmaisesta muuttamisesta vai sylinterin päätyaseman saavuttamisesta. Tämä tulee ottaa huomioon käytännön sovelluksissa.

6. YHTEENVETO

Tämän työn ensimmäisenä tarkoituksena oli selvittää, millaisia ratkaisuja betonin pumpaamiseen käytetään. Betonipumpulta vaaditaan eri ominaisuuksia perinteisillä rakennusmenetelmillä ja betonin 3D-tulostamisessa. Perinteisillä rakennusmenetelmillä sylinteripumppu on yleisin ratkaisu. Sylinteripumpun tuottama tilavuusvirta on jaksottaista, mikä takia sylinteripumppu soveltuu heikosti 3D-tulostamiseen. Tämän takia betonin 3D-tulostamisessa käytetään yleensä sylinteripumpun sijasta ruuvipumppua.

Työn toisena tarkoituksena oli selvittää, miten betonin 3D-tulostaminen on sovellettavissa rakennusteollisuuden tarpeisiin ja millaisia kaupallisia ratkaisuja siihen on olemassa. Betonin 3D-tulostaminen mahdollistaa etuja perinteisiin rakennusmenetelmiin verrattuna, mutta se asettaa uusia vaatimuksia rakennuksen suunnittelulle ja tulostamiseen käytettävälle seokselle. Betonin 3D-tulostamisen yhdistäminen perinteisiin rakennusmenetelmiin mahdollistaa molempien rakennusmenetelmien etujen hyödyntämisen. Betonin 3D-tulostamiseen soveltuviin järjestelmiin ja järjestelmän komponentteihin on kaupallisia ratkaisuja.

Työn kolmantena tarkoituksena oli selvittää, miten betonin putkivirtausta voidaan mallintaa ja simuloida. Betonin putkivirtauksen mallintamista on tutkittu perinteisten rakennusmenetelmien näkökulmasta. Betonin putkivirtauksen mallintaminen on mahdollista, mutta se vaatii seoksen virtausparametrien kokeellisen määrittämisen.

Simulointituloksista varmistui, ettei sylinteripumppu välttämättä sovellu betonin 3D-tulostamiseen. Sylinteripumpun tuottama jaksottainen tilavuusvirta vaikeuttaa järjestelmän ohjaamista ja asettaa ylärajan tulostussyklin pituudelle.

LÄHTEET

- [1] B. Berman. 3-D printing: The new industrial revolution. eng. *Business Horizons* 55.2 (2012), s. 155–162. ISSN: 0007-6813.
- [2] I. Gibson, D. Rosen ja B. Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer New York, 2015.
- [3] *The 13 best construction 3D printers in 2020. 13 house construction 3D printers*. URL: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/house-3d-printer-construction> (viitattu 27. 11. 2020).
- [4] *World's Biggest 3D Printed Building Opens in Dubai. 27. tammikuuta 2020*. URL: <https://singularityhub.com/2020/01/27/worlds-biggest-3d-printed-building-opens-in-dubai> (viitattu 27. 11. 2020).
- [5] X. Zhang, M. Li, J. H. Lim, Y. Weng, Y. W. D. Tay, H. Pham ja Q.-C. Pham. Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. eng. *Automation in construction* 95 (2018), s. 98–106. ISSN: 0926-5805.
- [6] P. Wu, J. Wang ja X. Wang. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. eng. *Automation in construction* 68 (2016), s. 21–31. ISSN: 0926-5805.
- [7] *China: Firm 3D prints 10 full-sized houses in a day. 25. huhtikuuta 2014*. URL: <https://www.bbc.com/news/blogs-news-from-elsewhere-27156775> (viitattu 27. 11. 2020).
- [8] *Betonin pumppauksen ympäristö- ja turvallisuusopas*. Saatavissa: <https://betoni.com/wp-content/uploads/2020/06/Betonin-pumppauksen-ymparisto-ja-turvallisuusopas.pdf>. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, 2010.
- [9] *Pumps for mortar*. URL: <https://portal.putzmeister.com/web/european-union/pumps-for-mortar> (viitattu 31. 12. 2020).
- [10] *Pumps for concrete*. URL: <https://portal.putzmeister.com/web/european-union/pumps-for-concrete> (viitattu 01. 01. 2021).
- [11] *A TURNKEY SOLUTION, MAXI PRINTER*. URL: <https://en.constructions-3d.com/la-maxi-printer> (viitattu 25. 02. 2021).
- [12] *DOCUMENTATIONS TECHNIQUES*. URL: <https://en.constructions-3d.com/documentation-technique> (viitattu 25. 02. 2021).
- [13] *3D Concrete Printing - from material design to extrusion*. eng. Saatavissa: https://www.teknologisk.dk/_/media/68699_3DCP_DanishTechnologicalInstitute_ACEWORKSHOP_2017.pdf. 2017.

- [14] *MAI@2PUMP PICTOR-3D*. URL: <https://www.mai.at/3d-printing/mair2pump-pictor-3d/> (viitattu 28.01.2021).
- [15] *building 4.0: duo-mix connect*. URL: <https://m-tec.com/construction-site-equipment/machines/mixing-pumps/duo-mix-connect/> (viitattu 28.01.2021).
- [16] *MAI@MULTIMIX-3D*. URL: <https://www.mai.at/3d-printing/mairmultimix-3d/> (viitattu 28.01.2021).
- [17] *Betoni*. URL: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/> (viitattu 15.01.2021).
- [18] M. T. Souza, I. M. Ferreira, E. Guzi de Moraes, L. Senff ja A. P. Novaes de Oliveira. 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. eng. *Journal of Building Engineering* 32 (2020). ISSN: 2352-7102.
- [19] N. Cheniuntai. *GROUNDBREAKING PROJECT*. 25. lokakuuta 2019. URL: <https://www.apis-cor.com/dubai-project> (viitattu 25.02.2021).
- [20] *Tuotemallitieto rakennusprosessissa*. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/proit/tiedotteita/proit_esite_no1.pdf. Rakennusteollisuus RT ry.
- [21] R. Wolfs, F. Bos ja T. Salet. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. eng. *Cement and concrete research* 119 (2019), s. 132–140. ISSN: 0008-8846.
- [22] H. Xie, F. Liu, Y. Fan, H. Yang, J. Chen, J. Zhang ja C. Zuo. Workability and proportion design of pumping concrete based on rheological parameters. eng. *Construction & building materials* 44 (2013), s. 267–275. ISSN: 0950-0618.
- [23] A. Rahul, M. Santhanam, H. Meena ja Z. Ghani. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. eng. *Cement & concrete composites* 97 (2019), s. 13–23. ISSN: 0958-9465.
- [24] T. Kaplan Denis; François de Larrard; Sedran. Design of Concrete Pumping Circuit. eng. *ACI materials journal* 102.2 (2005). ISSN: 0889-325X.
- [25] M. S. Choi, Y. J. Kim, K. P. Jang ja S. H. Kwon. Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete. eng. *Construction & building materials* 66 (2014), s. 723–730. ISSN: 0950-0618.
- [26] E. Secrieru, W. Mohamed, S. Fataei ja V. Mechtcherine. Assessment and prediction of concrete flow and pumping pressure in pipeline. eng. *Cement & concrete composites* 107 (2020), s. 103495–. ISSN: 0958-9465.
- [27] H. Kauranne. *Hydraulitekniikka*. fin. 2. uud. p. Helsinki: Sanoma Pro. ISBN: 978-952-63-0707-7.
- [28] M. K. Khan. *Fluid Mechanics and Machinery*. Oxford University Press, 2015.
- [29] D. Kaplan. *Pompage des bétons*. Tohtorinväitöskirja. École nationale des ponts et chaussées, 2000.

LIITE B: SIMULOINNISSA KÄYTETYT PARAMETRIT

```

1 %% Simuloinnissa käytettävät oletusparametrit
2
3 %% Simuloinnin parametrit
4 % Simulointiaika
5 Malli.tsim = 20; % s
6 % Ohjauksen generointiin käytettävien näytteiden lukumäärä
7 Malli.nsamples = 1e5;
8 % P-säätimen vahvistus
9 Malli.Kp = 0.6;
10
11 %% Betonipumpun parametrit
12 % Pumpun työsylinterin halkaisija
13 Pumppu.D = 0.100; % m
14 % Pumpun työsylinterin männän pinta-ala
15 Pumppu.A = (Pumppu.D/2)^2*pi; % m^2
16 % Sylinterin iskunpituus
17 Pumppu.stroke = 0.13; % m
18 % Pumpun hydraulisyylinterin männän halkaisija
19 Pumppu.Dmanta = 0.050; % m
20 % Männänvarren halkaisija
21 Pumppu.Dmannanvarsi = 0.025; % m
22 % Männän puolen ja varren puolen pinta-alat
23 Pumppu.Amanta = (Pumppu.Dmanta/2)^2*pi; % m^2
24 Pumppu.Avarrenpuoli = Pumppu.Amanta - ...
    (Pumppu.Dmannanvarsi/2)^2*pi; % m^2
25 % Letkujen ja sylinterin päädyn tilavuus
26 Pumppu.V0B = Pumppu.Avarrenpuoli*0.02; %m^3
27 % Työsylinterin vaihtamiseen kuluva viive
28 Pumppu.vaihto = 0.2; % s
29 % Syöttöpaine
30 Pumppu.paine = 21.5e6; % Pa
31 % Tankkilinjan paine
32 Pumppu.tankkipaine = 0; % Pa
33 % Staattinen ja dynaaminen kitka
34 Pumppu.Fs = 0.1*(Pumppu.paine*Pumppu.Amanta); % N
35 Pumppu.b = Pumppu.Fs; % N*s/m
36

```

```

37 %% Venttiili
38 % Nimellinen virtausnopeus
39 Venttiili.QN = 35/1000/60; % m^3/s
40 % Nimellinen paine-ero
41 Venttiili.dpN = 35*10e5; % Pa
42 % Paine, missä virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi
43 Venttiili.ptr = 0.05e6; % Pa
44 % Venttiilin aikavakio
45 Venttiili.aikavakio = 20e-3; % s
46
47 %% Hydraulinesteen parametrit
48 % Nesteen kokoonpuristumiskerroin
49 Neste.B = 1300e6; % Pa
50
51 %% Betoniputken parametrit
52 % Betoniputken pituus
53 Putki.l = 15; % m
54 % Betoniputken halkaisija
55 Putki.D = 0.05; % m
56
57 %% Betoniseoksen parametrit
58 % Betoniseoksen viskositeettivakio
59 Betoni.viskositeettivakio = 455; % Pa*s/m
60 % Betoniseoksen plastinen viskositeetti
61 Betoni.plastinenViskositeetti = 94; % Pa*s/m
62 % Betoniseoksen myötölujuus
63 Betoni.myotolujuus = 1314; % Pa
64 % Betonin rajakerroksen myötölujuus
65 Betoni.rajaMyotolujuus = 150; % Pa
66 % Dimensioton täyttökerroin
67 Betoni.kr = 0.8;
68 % Betoniseoksen kriittinen virtausnopeus
69 Betoni.Qkr = 3600*(Betoni.myotolujuus - ...
    Betoni.rajaMyotolujuus)/Betoni.viskositeettivakio * pi * ...
    (Putki.D/2)^2 * Betoni.kr; % m^3/h

```

LIITE C: TARKASTELTAVAT TAPAUKSET

```

1 %% Simuloidut tapaukset
2
3 %% Tapaus 1
4 % Simulointi oletusparametreilla
5 clearvars;
6 parametrit;
7
8 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
9 yksikkovektori = ones(1,Malli.nsamples);
10 tilavuusvirta = 1; % m3/h
11 simin = transpose([aika; yksikkovektori*tilavuusvirta]);
12
13 %% Tapaus 2
14 % Kasvatetaan putken pituutta
15 clearvars;
16 parametrit;
17
18 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
19 yksikkovektori = ones(1,Malli.nsamples);
20 Putki.l = 30; % m
21 tilavuusvirta = 1; % m3/h
22 simin = transpose([aika; yksikkovektori*tilavuusvirta]);
23
24 %% Tapaus 3
25 % Kasvatetaan pumpun iskunpituutta
26 clearvars;
27 parametrit;
28
29 Malli.tsim = 70;
30 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
31 yksikkovektori = ones(1,Malli.nsamples);
32 Pumppu.stroke = 0.5;
33 tilavuusvirta = 1; % m3/h
34 simin = transpose([aika; yksikkovektori*tilavuusvirta]);
35
36 %% Tapaus 4
37 % Määritellään haluttu tilavuusvirta hyvin pieneksi

```

```
38 clearvars;
39 parametrit;
40
41 Malli.tsim = 2000; % s
42 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
43 yksikkovektori = ones(1,Malli.nsamples);
44 tilavuusvirta = 0.01; % m^3/h
45 simin = transpose([aika; yksikkovektori*tilavuusvirta]);
46
47 %% Tapaus 5
48 % Määritellään haluttu tilavuusvirta hyvin suureksi
49 clearvars;
50 parametrit;
51
52 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
53 yksikkovektori = ones(1,Malli.nsamples);
54 tilavuusvirta = 10; % m^3/h
55 simin = transpose([aika; yksikkovektori*tilavuusvirta]);
56
57 %% Tapaus 6
58 % Haluttu tilavuusvirta on sinimuotoista
59 clearvars;
60 parametrit;
61
62 fSin = 1; % rad/s
63 tilavuusvirta = 1; % m^3/h
64 Malli.tsim = 40;
65 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
66 siniarvot = 0.5*sin(aika*fSin)+0.5;
67 simin = transpose([aika; siniarvot*tilavuusvirta]);
68
69 %% Tapaus 7
70 % Ohjaus muutetaan arvoon 0 askelmaisesti
71 clearvars;
72 parametrit;
73
74 Malli.tsim = 0.9;
75 aika = linspace(0,Malli.tsim, Malli.nsamples);
76 yksikkovektori = ones(1,Malli.nsamples);
77 askelvektori = yksikkovektori;
78 askelvektori(Malli.nsamples/2:end) = 0;
79 tilavuusvirta = 1; % m^3/h
80 simin = transpose([aika; askelvektori*tilavuusvirta]);
```