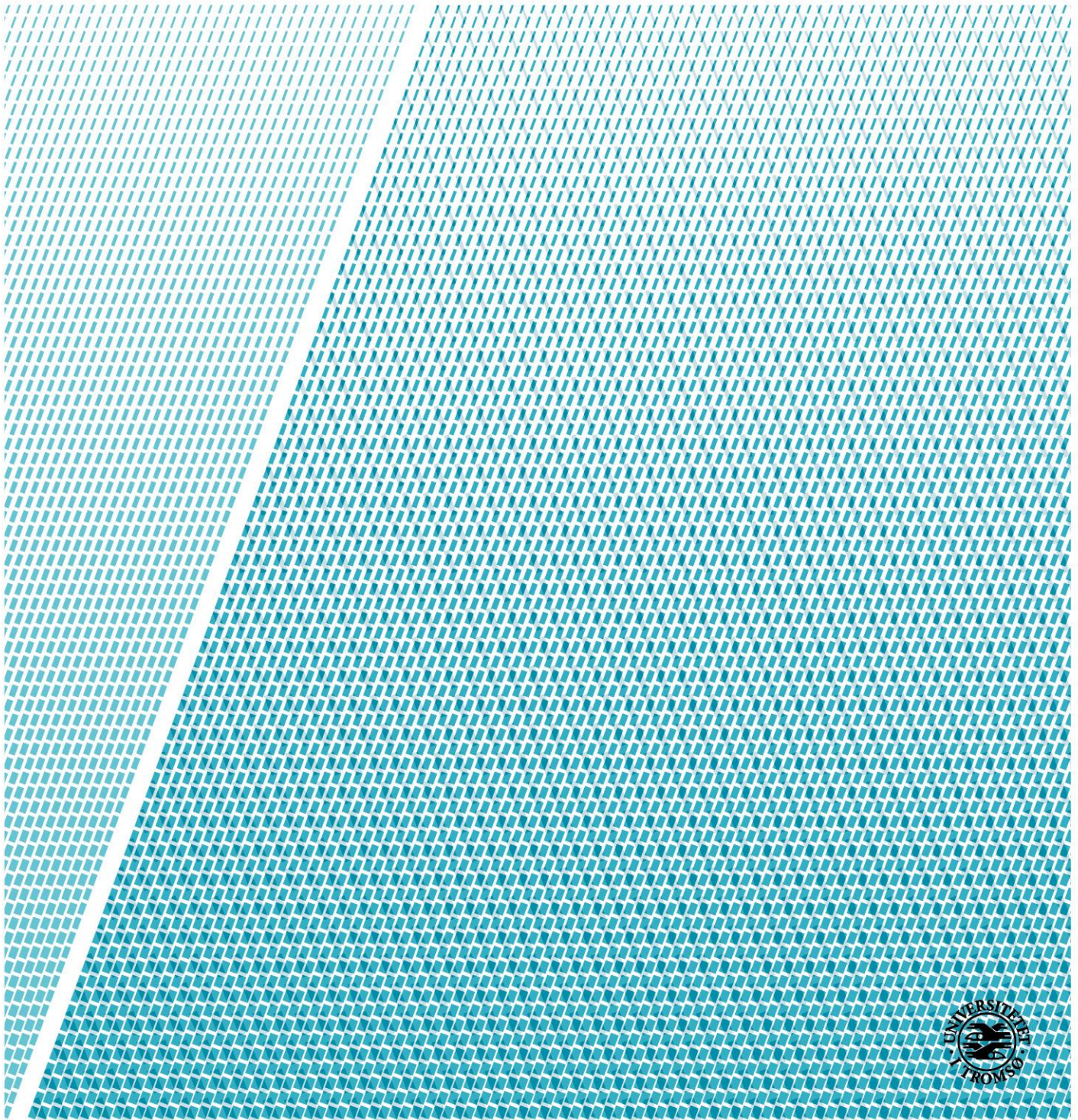


# **Simulering Kapillær vann oppsuging hastighet i betong pore strukturer. Kapillær suging hastighet**

***Jing Liu***

BYG-3900 Master Thesis - M-IB





## Sammendrag

Vann/Klorid oppsuger i betong er et interessant tema i dette studiet. Grunne til det er at betong styrke og holdbarhet er sterk avhengig med vann/klorid innhold i proestruktur. Si på en overfladisk måte: jo mindre vann/klorid innhold jo sterkere og lengre levetid for betongen. Dette fenomenet gjelder generell for både masse og mindre betongkonstruksjoner. Betong er et komplisert materiale. Det har tatt mye tid og ressurser for å oppnå god kunnskap om sammensetningen, egenskapen og bruken av betong, og enda mer tid til å få nok erfaring til å bruke denne kunnskapen på en riktig måte. Vann/Klorid transport i betong porestruktur er et komplisert problem. Frem til i dag er ikke kunnskapen nøyaktig nok rundt dette problemet.. Og, fra praksis-del har det å skaffe mye innsikt i hvordan betong parameter som vann/semnt-tall, semnt kvalitet, tilslag størrelse, betong støpe prosedyre mm, kan påvirker vann oppsuge i betong. Men, dessverre, frem til i dag, vi har fremdeles mange ubesværede spørsmålet om vann oppsug prosess i betongen. For nevnt noe, hvordan kan vi nøyaktig beskrive porestrukturer, Hva slags vann transport mekanisk som virker i forskjellige porestype osv.

Fra teori-delen, anvender vi ofte kvadrat-root-modell. Denne modell er en enklere form. Hvor, det antar at vannstrømmen i betong pore- strukturen, kan betrakte som vann strømming i rø (rø-modell). Basert på kvadrat-root modell vi kan si vann strømming i pores (rø) med en konstant hastighet. Men, betong porestruktur er et komplett poresystem hvor det består forskjellige pore type og pores side range fra micro- macro størrelsen. Og, de pore forbindelse med en random veien. Så derfor, kvadrat-root-Model er for enklere til å se på hvordan betong porestruktur påvirker vann strømming (oppsuging) inn i betong. Porestruktur til betong er veldig komplisert. Det er 'nesten umulig' å beskrive nøyaktig.

Formålet med denne masteroppgaven er å se på effekt av betong porestruktur på vannstrømming (- vannoppsuging) hastighet inn i betong. For å se på effekt av porestruktur på vannstrømmene hastighet. Vi betrakter betong porestruktur som et rø med for forskjellige seksjon, med forskjellige radius og seksjon lengde. Ved å begrense hastighet til vannstrømmen passerer forskjellige rø-seksjon radius, vi kan evaluere effekt av rø-seksjon radius påvirker vann strømming

Litteraturstudiet omfatter betong material teknologi, vann transport mekanisme i betong porestruktur.

## **Forord**

Bygningsmateriale betong har fanget min interesse i løpet av det 2-årigemasterprogrammet i Integrert bygningsteknologi ved UiT- Norges Arktiske Universitet, Institutt Bygg-, energi- og materialteknologi i Narvik. Masteroppgaven regnes som den avsluttende del i masterstudiet og består av 30 studiepoeng.

Masteroppgaven er gjennomført ved UiT som oppdragiver. Hoved fagligveileder for oppgaven er førsteamanuensis Hung T. Nguyen.

For å få oppgaven ferdigstilt, har mye arbeid og tid blitt lagt ned, og sist men ikke minst har jeg fått stor hjelp fra fagveileder, venner, og min Family. Jeg vil spesielt rette en stor takk til Hung T. Nguyen, for hans tålmodige veiledning, interessante diskusjoner og ikke minst det gode humøret til tross for krevende oppgaver.

Narvik 14.05.2021

Jing Liu

# Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
1.1	Historikk .....	1
1.2	Betong .....	2
1.2.1	Sement.....	4
1.2.2	Tilsetningsstoffer.....	5
1.2.3	Tilsetningsmaterialer.....	6
1.2.4	Porestruktur- Porestruktur .....	7
2	Teori- Fysikk/Matamattisk Modell .....	10
2.1	Vannstrømning i et rør .....	11
2.2	Kapillar suging .....	11
3	Modell Geometri.....	16
4	Resultater og diskusjon.....	18
4.1	Effekt av varierende seksjon radier på vann oppsuging hastighet, $u_h$ .....	21
4.2	Effekt av varierende seksjon lengde på vann oppsuging hastighet, $u_h$ .....	31
5	Konklusjon.....	33
6	Videre arbeid .....	34
	Referanseliste .....	35
	Vedlegg .....	36

## Tabbeliste

Tabell 1.1. Klinkermineralene som dannes under brenning .....	4
Tabell 2.1. Variasjon av seksjon lengde for kontraksjon-ekspansjon og ekspansjon-kontraksjon serie17	
Tabell 2.2. Variasjon av seksjon radier for kontraksjon-ekspansjon, serie og model U .....	18
Tabell 3.1. Geometri data for Modell $C_{L2\_N3\_r08}, C_{L2\_N3\_r05}$ og $C_{L2\_N3\_r01}$ , Hvor $L=0.02m$ .....	18
Tabell 3.2. Geometri data for Modell $C_{L10\_N3\_r08}, C_{L10\_N3\_r05}$ og $C_{L10\_N3\_r01}$ , Hvor $L=0.1m$ .....	19
Tabell 3.3. Geometri data for Modell $E_{L2\_N3\_r08}, E_{L2\_N3\_r05}$ og $E_{L2\_N3\_r01}$ , Hvor $L=0.02m$ .....	19
Tabell 3.4. Geometri data for Modell $E_{L2\_N3\_r08}, E_{L2\_N3\_r05}$ og $E_{L2\_N3\_r01}$ , Hvor $L=0.02m$ .....	20

## Figurliste

Figur 1.1 Betongkonstruksjon, Pantheon i Roma fra år 126 e.Kr [1] [2] [3] .....	2
Figur 1.2 Volumfordeling (omtrentlig) av delmaterialer i betong [5].....	2
Figur 1.3 Betong overflaten med faststoff og porene [6] .....	3
Figur 1.4 Sement som har hydratisert i seks d $\varnothing$ gn. N $\ddot{a}$ formede «armer» som strekkes ut. Forst $\ddot{o}$ ret ca. 3000 ganger [7] .....	5
Figur 1.5 Temperaturforl $\ddot{o}$ p etter utst $\ddot{o}$ ping [6] .....	6
Figur 1.6 Relasjon trykkfasthet og v/c-tall for silikast $\ddot{o}$ v [6] .....	7
Figur 1.7 Porestruktur i betong [1].....	8
Figur 1.8 Porestype og poresandel i betong volume [1][2] .....	9
Figur 1.9 Relasjon mellom Porestype - poresandel og v/c-tall [1][2] .....	9
Figur 2.1 Vannstr $\ddot{o}$ mning i en r $\varnothing$ og fordeling trykk i poren [10] .....	13
Figur 2.2 Figur 2.2. Kapillær vannstr $\ddot{o}$ mning i en r $\varnothing$ og kapillærpore med kontaktvinkel mellom vann og porevegg .....	16
Figur 2.3 illustrere Balanse krefter mellom overflaten spenning og vann-bulk-bevegelsen kraften [13] .....	17
Figur 2.4 Vann str $\ddot{o}$ mning i et r $\varnothing$ - modell med N-seksjons ( Hvor $l_i, r_i, i = 1, 2, \dots, N$ er henholdsvis seksjons lengde og radier ).Og, vi antar at vann front passer posisjon $h$ .....	18
Figur 3.1 Geometri- Modell C,E, N=6 seksjon og Modell U med konstant radius [6] .....	20
Figur 4.1 Modell $C_{L2\_N3\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.02 m, N = 3, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.8$ .....	22
Figur 4.2. Modell $C_{L2\_N3\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.02 m, N = 3, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	22
Figur 4.3 Modell $C_{L2\_N3\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.02 m, N = 3, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	25
Figur 4.4 Modell $C_{L2\_N6\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.02 m, N = 3, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.8$ .....	26
Figur 4.5 Modell $C_{L2\_N6\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.02 m, N = 6, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	26
Figur 4.6 Modell $C_{L2\_N6\_r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.02 m, N = 6, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.1$ .....	28
Figur 4.7 Modell $C_{L10\_N3\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1 m, N = 3, l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.8$ .....	29

Figur 4.8 Modell $C_{L10\_N3\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 3$ , $l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	29
Figur 4.9 Modell $C_{L10\_N3\_r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 3$ , $l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.1$ .....	30
Figur 4.10 Modell $C_{L10\_N6\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 6$ , $l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.8$ .....	31
Figur 4.11 Modell $C_{L10\_N6\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 6$ , $l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.8$ .....	32
Figur 4.12 Modell $C_{L10\_N6\_r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 6$ , $l_1 = l_2$ og $r_1:r_2 = 1:0.1$ .....	33
Figur 4.13 Modell $C_{L2\_N6\_l08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 6$ , $l_1:l_2 = 1:0.8$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	34
Figur 4.14 . $C_{L2\_N6\_l05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 6$ , $l_1:l_2 = 1:0.5$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	35
Figur 4.15 Modell $C_{L2\_N6\_l01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for $L = 0.1\text{ m}$ , $N = 6$ , $l_1:l_2 = 1:0.1$ og $r_1:r_2 = 1:0.5$ .....	36

# Forord

Vann transport in betong er en interessert og relevant tema i betong teknologi. Betong mekaniske egenskaper (Fasthet og strekkfasthet), samt holdbarhet er avhengig med vann/klorid innholdet. Derfor, det er helt nødvendig å studere vann transport i betong. Kvadrat-rot modell er en velkjent modell for å forutsi vann strømming hastighet i betong porestrukturen. Denne modell er en enklest modell. Hvor, den betrakter vannstrømming i betong porestrukturen, som vann oppsug i et rø (uniform rø-) med en konstant radius. Vannstrømmen i betong-porestrukturen (et rø), basert på kvadrat-rot modell, med konstant hastighet. I en dimensjon problem, Vannstrømming hastighet er linear funksjon med respekter betong porøs dypt (posisjon). I praksis, mange eksperiment av vann oppsug i pore strukturen, har vist avviker fra linear – lov. Hvorfor det er avviker?

Betong er et kompositt material med en komplett porestruktur. Det er mange betong parameter som tilslagstørrelsen, vann-, sement, tilsetningsmaterial, tilsetningsstoff, samt komplett porestrukturen kan alle påvirker vannstrømming. I denne rapport, vi begrenne til, å se på effekt av porestrukturen på vannstrømming. Vi tror at når vann passer forskjellige pores type, med stor forskjellige størrelsen (forskjellige radius), hastighet å bli redusere, Block fenomenet.

I denne rapport, vi modifisert kvadrat-rot-modell for å predike vannstrømmen hastighet på et rø- med different lengde og radier. Ved å sammenlikningen -vann-opsuging hastighet for rø-uniform (konstant radius) og rø-forskjellige-størrelsen (lengde, og radier), vi kan studere effekt av rø-lengde og radier på vanns oppsug. In deltalje, vi konstruksjon to – serie modell. Den ene er kontraksjon-ekspansjon-kontraksjon serie modell (Modell C), og den annet er ekspansjon-kontraksjon-ekspansjon modell (Modell E). For hvert serie-modell, vi har en uniform-rø modell (Modell U). Vi regner ut vann-opsug hastighet for de tre-modell. Resultater viser klar at rø geometri har stor effekt på vann oppstrømming. Når vann går fra en serie med stor → liten → stor → liten eller liten → stor → liten → stor rø-seksjon, så endre hastighet av de rø-serie-til-kopling, forhold til hastighet av uniform modell. Dessuten, når vann strømming passer en veldig trang-rø, så det ser ut at vannstrømmen stopp up, hastighet faller kraftig i forhold til hastighet av uniform rø. Denne annalistisk av vann oppsuging hastighet i begge modell C og E, samstemme med vannstrømming blokk-fenomenet.

# 1 Innledning

## 1.1 Historikk

Betong er et av det mest brukte bygningsmaterialet i Norge og hele verden. Det produseres mer enn 700 million kubikkmeter betong årlig på verdensbasis, hvorav ca. to millioner kubikkmeter produseres i Norge [2] [3]. Grunnen til at betong er mest brukt som bygningsmateriale, er at den har gode bærende styrke og holdbarhet, god bestandighet, lav-permeabilitet, god brannmotstand og kan støpes ut i alle tenkelige former og dimensjoner.

Betong er et gammelt kjent bygningsmaterialet i verden. Allerede før Kristus' fødsel brukte man et betongliknende materiale hvor hoveddelen av materialet bestod av steinmaterialer som ble bundet fast med et hydraulisk bindemiddel. Følgende velkjente byggverk i betong kom til verden 127 år e.Kr, f.eks. Pantheon (se fig.1). Romernes byggeteknikk ble beskrevet av Vitruvius i ca. år 100 [2] [3].

I allerede 1500 år f. Kr., Egypterne og grekerne kjente til kalkens egenskaper som bindemiddel. Det ble f.eks. benyttet hardbrent gips og kalk ved byggingen av pyramidene.

Med Romerrikets fall var det nesten full stopp i utviklingen av betong. Utviklingstoppet var i en periode på over 1000 år. Det var først på begynnelsen av 1800-tallet at det kom noen vendepunkter som satte fart på betongutviklingen igjen.

I 1824 ble sementkvaliteten kraftig forbedret da den engelske mureren, Joseph Aspdin oppfant det som vi i dag kaller portlandsement. Denne sementtypen ble fremstilt av kalkstein og leire som ble blandet sammen og deretter brent og pulverisert. Navnet fikk den fordi den i herdet tilstand lignet bygningsstein fra Portland i sør-England. De første portlandsementene var ganske dårlige i forhold til dagens portlandsement. Styrken på betongen var lav som medførte at bygningskonstruksjonene ble store og tunge [2] [3] [4] [5].

I 1850- og 1860-årene kom de moderne portlandsementene til det europeiske markedet. Grunnlaget for norsk sementproduksjon ble opprettet ved Christiania sementfabrikk på Slemmestad i 1892. Dagens to norske sementfabrikker i Kjøpsvik og Brevik ble grunnlagt i 1918 og 1919 [2] [3] [4]. Det er verdig å merke at

Da man fant ut at betongen kunne armeres med stålstenger, fikk betongen virkelig sitt gjennomslag som bygningsmateriale. Grunnen til det er at armeringsstålet har en evne til å motstå strekk. Betong i seg selv tåler store trykklaster, derimot strekk er betongen dårlig rustet mot. Det var den franske gartneren Monier med sine patenter som regnes som grunnleggeren av armert betong [4].

Det er stadig flere bruksområder for betong, som medfører at betong må tilfredsstille mange ulike krav, f.eks. med norsk natur kreves det at betongkonstruksjonene må stå imot miljøpåvirkninger. Store anleggskonstruksjoner som bruer, oljeplattformer, tunneller, dammer og kaier er utfordrende oppgaver for betong. Det kreves at betong skal tåle store påvirkninger og ha en god bestandighet. Med disse problemstillingene i bakgrunn er det naturlig å skjønne at betongen må ha noe hjelp for å forbedre sine egenskaper og for å takle alle kravene som er stilt.

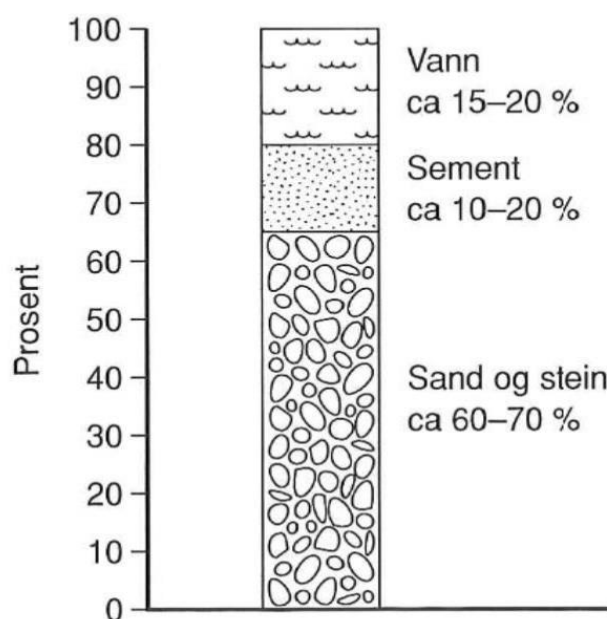




Figur 1.1. Betongkonstruksjon, Pantheon i Roma fra år 126 e.Kr [1][2][3]

## 1.2 Betong

Betong består av steinmaterialer med varierende kornstørrelser fra tilslaget, bunnet sammen av bindemiddelet sementpasta. Typisk sammensetning av normal betong:



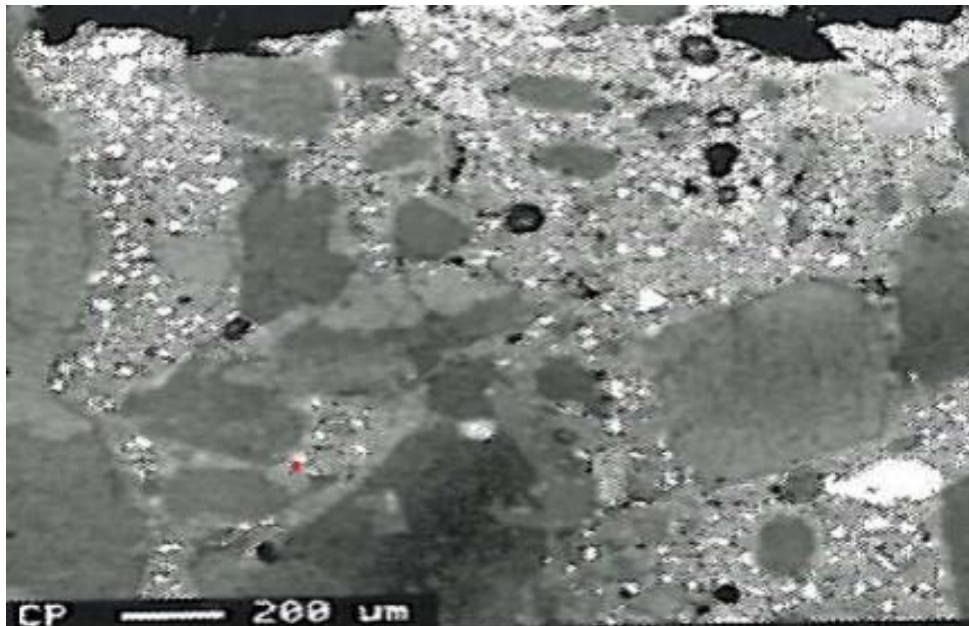
Figur 1.2. Volumfordeling (omtrentlig) av delmaterialer i betong [5]

Eller:

≈ 30 % volume av cement pasta

≈ 70 % volume av cement pasta

≈ 1 – 6 % volumer av p  r



Figur 1.3. Betong overflaten med faststoff og porene [6]

Betong i seg selv er et veldig enkelt materiale. Med en enkel forklaring kan vi beskrive at betong består av omtrent to deler sement og en del vann for   lage lim som binder steinmaterialene sammen.

Går man inn i dybden er det straks mer komplisert. Det er faktisk så komplisert at helt frem til i dag har man fremdeles ubesvarte problemstillinger. Eksempler på ubesvarte problemstillinger:

## 1.2.1 Sement

Sement er hovedbestanddelen i betongens bindemiddel. Sement er et finkornet pulver som omdannes til et slags lim når vi tilsetter vann (kjemisk hydratiseringsprosess). Dette kaller vi sement lim. Den kjemiske sammensetning av portlandsement er [4][5] [7] [8] [9]:

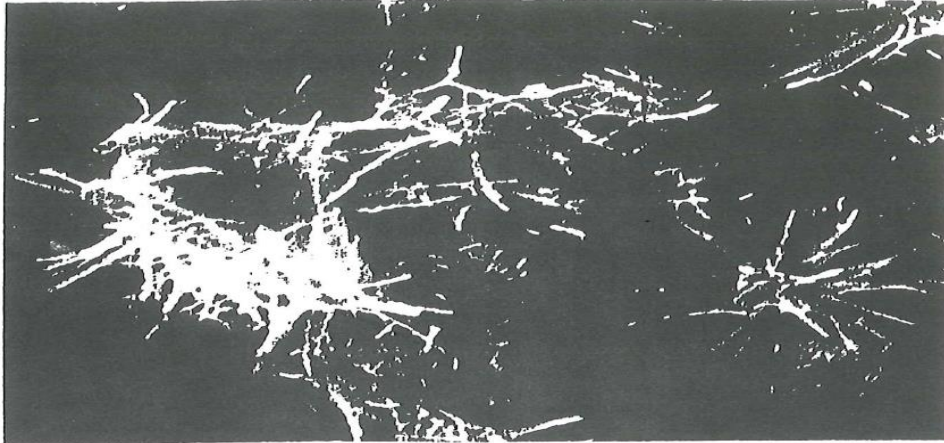
- $CaO$  60-67 %
- $SiO_2$  17-24%
- $Al_2O_3$  4-7%
- $Fe_2O_3$  1,5-5%
- $MgO$  1,5-5%
- $SO_3$  1.5-3%
- $K_2O + Na_2O$  0,2-1,5%

Klinkemineralene som dannes under brenningen og som hvert sementkorn består av beskrives sementkjemisk med følgende forenklede terminologi fra oksidene:

Tabell 11. Klinkermineralene som dannes under brenning

Navn	Kjemisk formel	Symbol
Trikalsium silikat	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Dikalsium silikat	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Trikalsium aluminat	$3CaOAl_2O_3$	$C_3A$
Tetrakalsium aluminat-ferrit	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

Sement hydratiseres ved at den reagerer kjemisk med vann og danner hydrasjonsprodukter. Resultatet av den kjemiske reaksjonen kan ses gjennom elektronmikroskop, hvor sementkorn «vokser armer» for å holde hverandre (se fig.1.4).



Figur 1.4. Sement som har hydratisert i seks døgn. Nålførmede «armer» som strekkes ut. Forstørret ca. 3000 ganger [7]

## 1.2.2 Tilsetningsstoffer

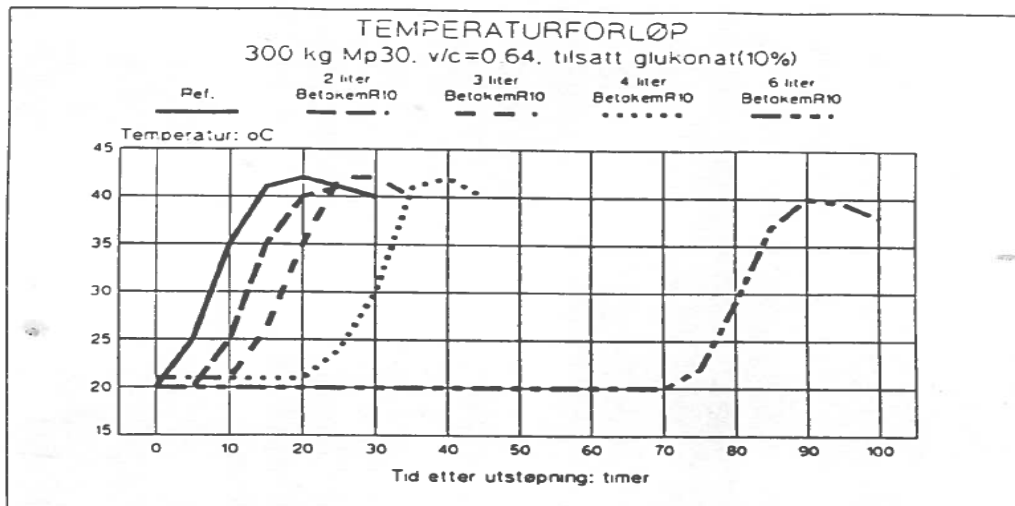
Tilsetningsstoffer er en stor gruppe av stoffer som tilsettes i små mengder i betong under behandlingen i den hensikt om å oppnå eller forbedre betongens egenskaper. Stoffene innvirker på forskjellige aspekter av betongstøpningen. Noen eksempler på tilsetningsstoffer [3] [4] [5]:

- Retarderende stoffer som virker på størkingen og herdingen
- Luftinnførende stoffer innvirker på poretype- og struktur
- P- og SP- stoffer innvirker på vannmengden som brukes i hydratiseringa osv.

R-stoffer brukes ofte i forskjellige aktuelle situasjoner, som kan være:

- Forlenge betongens bearbejdede form (åpen tid)
- Lang transport
- Ved pumping
- Ved glidestøp
- Å unngå uønskede støpekjøler

R-stoff vil normalt gi en raskere fasthetsutvikling etter at størkingstiden er over. Det kan medføre høyere temperatur. Ved retardering utover 1 døgn er det normalt vanskelig å styre retardering nøyaktig med tanke på glukonat (se Fig.1.5).



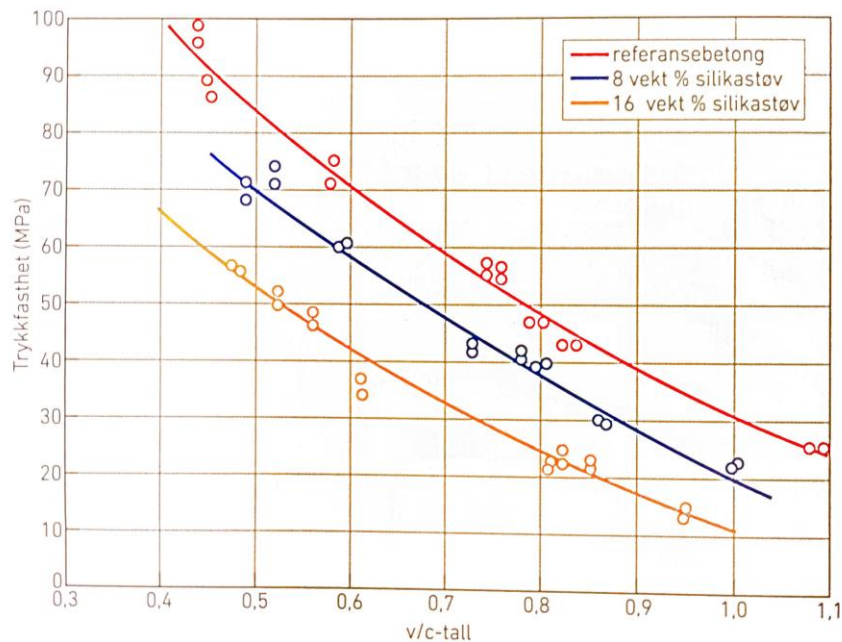
Figur 1.5. Temperaturforløp etter utstøping [6]

### 1.2.3 Tilsetningsmaterialer

I dag, ved raskt utvikling av verden, folk har satt strengere krav på betong slik som at betong må ha lang levetid, være vennlig miljø og redusere kostnad osv. Derfor forsøker man nye materialer eller tilsetningsmaterialer for å tilfredsstille de kravene. «Tilsetningsmaterialer er et finfordelt materiale som tilsettes betong for å forbedre visse egenskaper eller for å oppnå spesielle egenskaper» [4]. Nedenfor viser noen vanlige tilsetningsmaterialer:

**Silikastøv:** Det kom i bruk som tilsetningsmateriale i Norge på slutten av 1970-tallet. Det utgjør 5% av sementvekt på grunn av at det blir dyrere enn før. Silikastøvet er svært finkornig. Partikler er i størrelse 1/1000 av sementpartikler, dvs. 1-5/1000mm. Reaksjonsprodukt av hydratisering mellom vann og sement er  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (kalsiumhydroksid) og den utgjør 20-30% av sementmengde. Silikastøvet består av 85-98%  $\text{SiO}_2$  (silisiumdioksid). Når silikastøv blir brukt, oppstår det en kjemisk reaksjon mellom  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  og  $\text{SiO}_2$ . Den reaksjonen danner C-S-H eller såkalt limpasta som gir betongen mer gode egenskaper med hensyn til fasthet, tetthet og bestandighet.



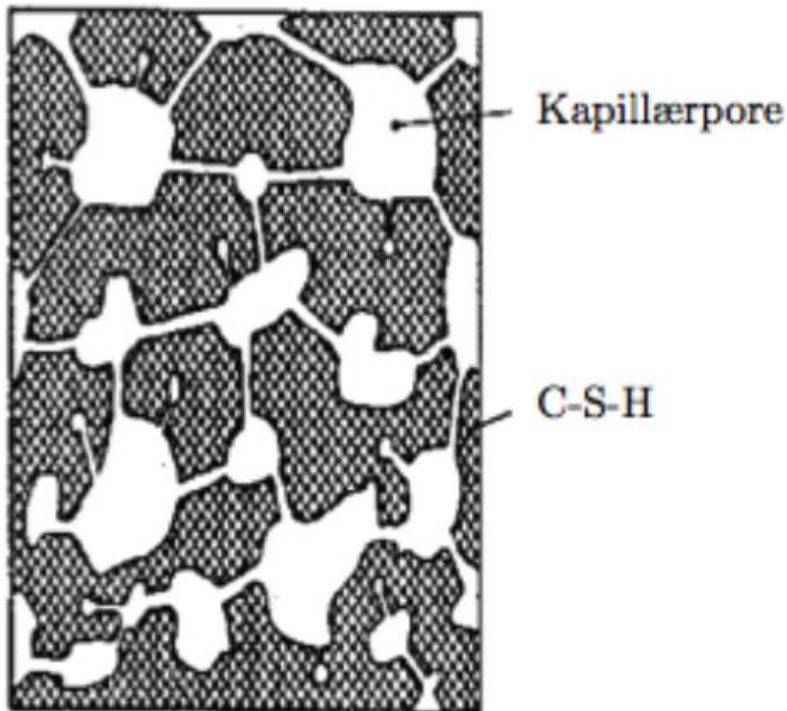


Figur 1.6. Relasjon trykkfasthet og v/c-tall for silikastøv [6]

**Flygeaske:** Den ble produsert i Norge 1982, men etter 10-15 år ble den vanlig i bruk. Partikler i flygeaske har omtrent samme størrelse som sementpartikler. Flygeaske inneholder  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  og  $\text{SiO}_2$ , men innhold av  $\text{SiO}_2$  består bare 40-70 %. Derfor den kjemiske effekt av flygeaske er mindre enn silikastøv. Med hensyn til fasthet og bestandighet å bidra flygeaske liten effekt. Men ved bruk av 20 % flygeaske i sement, kan det redusere varmeutvikling med omtrent 15 % i forhold til sement

#### 1.2.4 Porestørrelsen- Porestrukture

Betong er et kompositt materialet. Den består av fastmateriale-del og pore-del. Porestype og Porestruktur er de viktigste parameteren i betong. De påvirker sterkt på betongens egenskaper, for eksempel trykkfasthet, strekkfasthet og holdbarhet. Porestruktur består av ulike poretyper, og de knyttes sammen til et komplisert nettverk (se Fig 1.7).

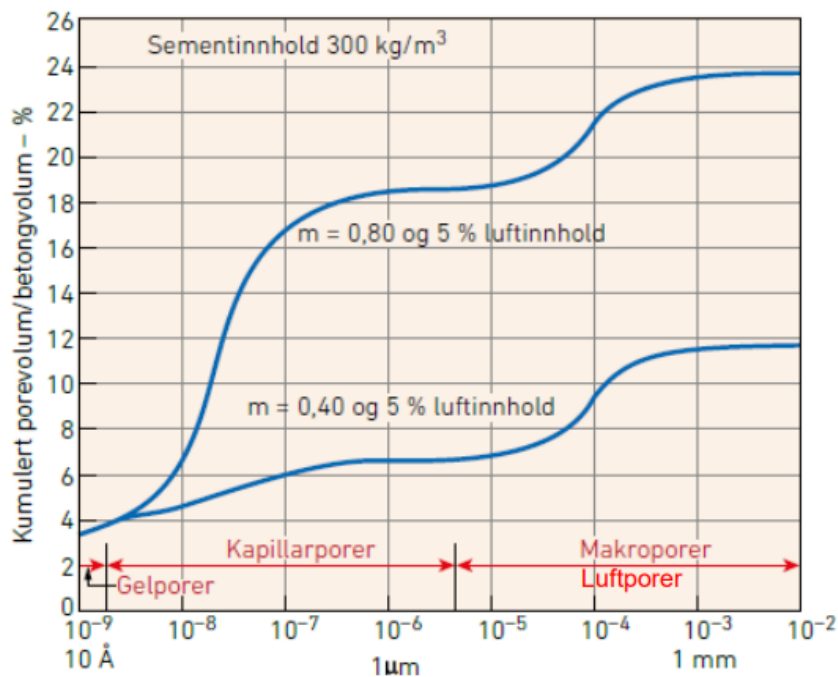


Figur 1.7. Porestruktur i betong [1]

Poretyper i betong er delt inn i 3 klasser [1]:

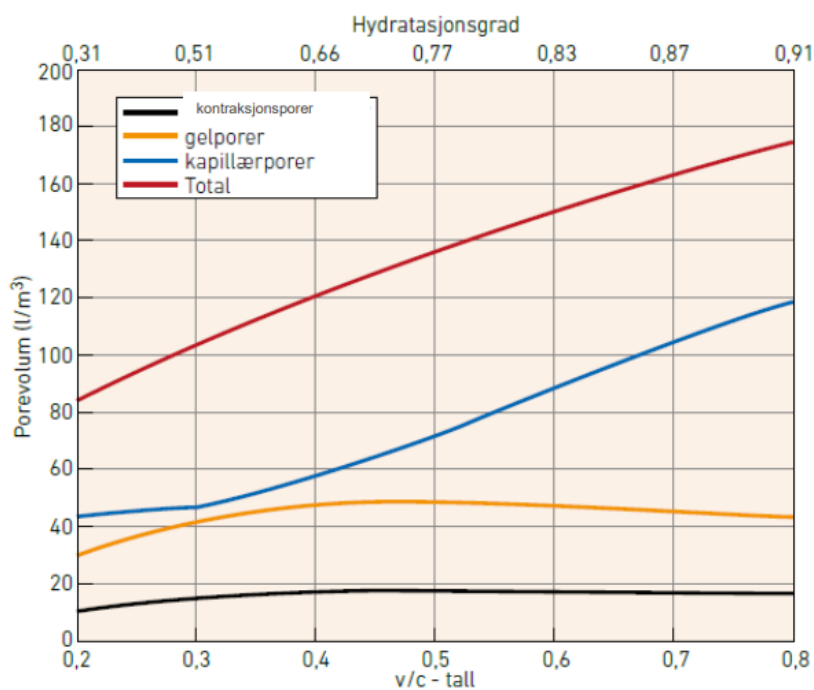
- Gelporer: er veldig små og har størrelse på  $[10^{-9} - 10^{-10} \text{ m}]$ . Den poretypen kan betrakte som en fast stoff og påvirker ikke mye til vanntransport i betong. Derfor legges den ikke vekt i denne oppgaven.
- Kapillærporer: har størrelse på  $[10^{-5} - 10^{-7} \text{ m}]$ . Den er avhengig av v/c tallet til betong og utgjør en stor del av poremengde. Derfor påvirker den mye til betongs fasthet og skal fokuseres hovedsakelig i oppgaven.
- Luftporer: har størrelse på  $[10^{-4} - 10^{-2} \text{ m}]$ , og kan ses med det blotte øye.

Fig. 1.8 illustrerer porestype og poresandel i forhold til betong volumer.



Figur 1.8. Porestype og poresandel i betong volume [1][2]

Poreandel i betong er hovedsakelig avhengig av forhold mellom vann og sement i betong, såkalt v/c-tall eller masseforhold. Fig.1.9 viser fordelingen av poremengde med v/c-tallet. Det kan man se at jo høyere v/c-tall, desto mer er total-porevolum i betong, og dette er mest tydelig i kapillærpore. Kapillærporer har en sterk økning tendens når v/c-tall er høyere enn 0,4.



Figur 1.9. Relasjon mellom Porestype - poresandel og v/c-tall [1][2]

I rest av rapport vi fokus p å vannoppsugg-hastighet p å rø-system med forskjellige radier. Vi start med presenter Fysikk/ Matematikk modell (kvadrat-rot-modell) i seksjon-2, deretter i seksjon-3 definere vi rø-geometri- modell for testing. Vi begrenns vann oppsug hastighet av kvadrat-rot-modell i rø-system ved Numerisk metode. Vi anvender Matlap-program for å regne ut vannoppsugg hastighet. Vi presenter resultater og diskusjon i seksjon-4. Vi ender rapport, i seksjon-5, ved skisse konklusjon om porestruktruter har stor/eller liten effekt p å vannstrømmen hastighet.

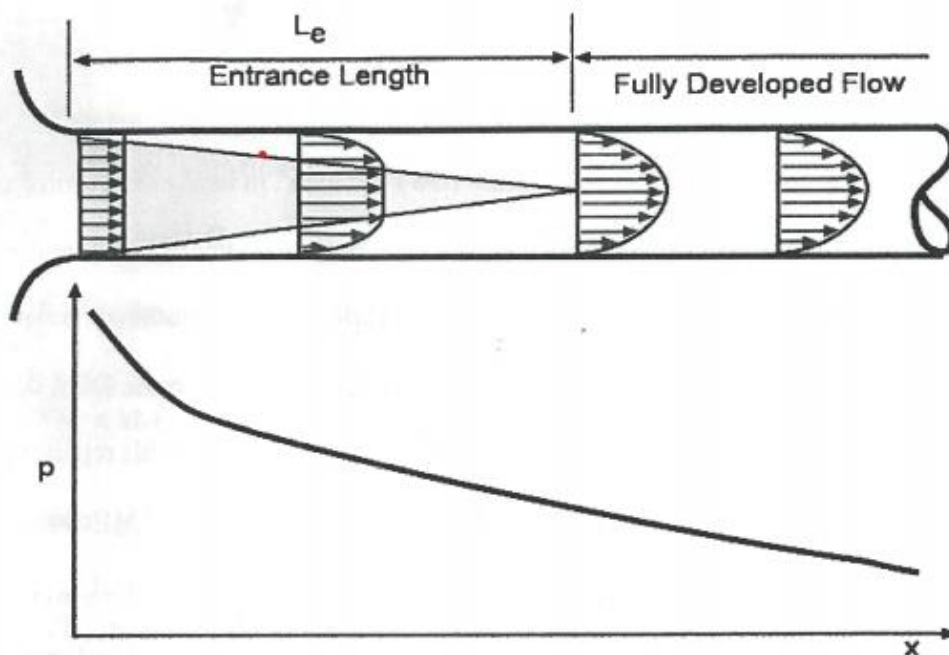
## 2 Teori- Fysikk/Matematikk Modell

I denne seksjon vi skal se p å væsketransport (vann) i betong poresystem. Betong sugge inn vann ved kapillær kreft (overflate spenning kapillær suging). Kapillar kreft er en velkjent driver kraft som sugge opp vann inn i pores. Den overflate spenning oppst år i et rø med 2-forskjellige media, for eks. vann- og luft media. P å Interface mellom vann og luft, oppst år en overflaten spenning, p å grunn tiltrekker krefter mellom vann- og – luft molekyl. Den kraften suger opp vann opp i rø [11]. Dette fenomenet, kaller vi kapillar oppsug. Og, kapillær suging foreg år n år en betong som ikke er fullstendig mettet med vann er i kontakt med vann. N år betong herder og ikke er i kontakt med vann vil det oppst år tilstrekkelig mengde åpen porer til at kapillær suging kan foreg år.

Vi start med presenter vann-hastighet formen i røsystem, hvor trykk different er drive kraft som årsaken til vann bevegelsen. Nest, vi la kapillær kreft er driver kraft, å f å frem formen for vann oppsuging

### 2.1 Vannstrømming i et rø

Vi start med å fokus p å vann-strømming hastighet p å en uniform (kontant-) rø systemet. Vi utregner vann strømhastighet i et rø med radius  $r$  og lengde  $L$ .



Figur 2.1. Vannstrømning i en rør og fordeling trykk i poren [10]

Gjennomsnitt hastighet av vann-strømning i et rør, kan bestemmes ved følgende likning [10]

$$u_m = \left(\frac{r^2}{8\mu}\right) \left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (2.1)$$

Hvor:  $dp$  er trykkfall

$dx$  er vann-front lengde

$\mu$  er vann-dynamiske viskositet, (Pa.s)

$u_m$  er vannstrømning gjennomsnitt hastighet

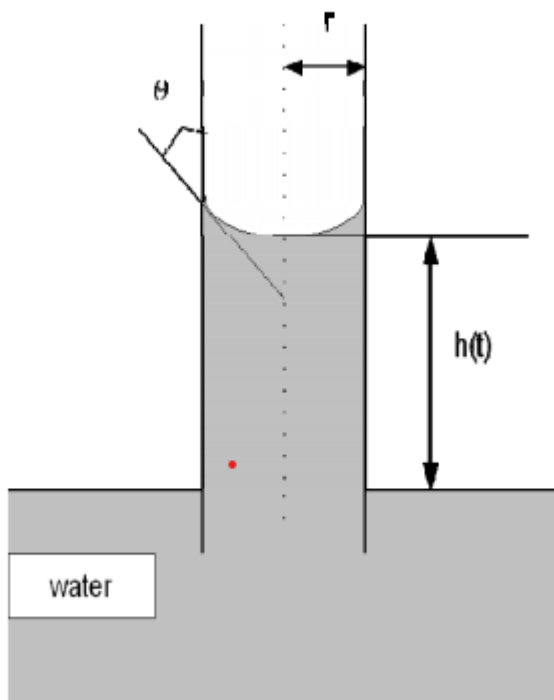
$r$  er rørradius

Likningen basert på laminær vannstrømning. Hvor det er trykkfall og friksjonskrefter som påvirker vannstrømning i et rør. Likning (2.1) sier at vannstrømning hastighet avhengig med forhold mellom trykkfall og vannviskositet (friksjon mellom vannstrømning og rørvæggen).

## 2.2 Kapillar Suging

I denne seksjonen skal vi se på væsketransport (vann) i betong poresystem. Betong suger inn vann ved kapillær kraft (overflate spenning kapillær suging). Kapillær kraft er en velkjent driverkraft som suger opp vann inn i pores. Den overflate spenning oppstår i et rør med 2-forskjellige media, for eksempel vann og luft media. På interface mellom vann og luft, oppstår en overflate spenning, på grunn tiltrekker krefter mellom vann- og – luft molekyl. Den kraften suger opp vann opp i rør [6][11][12]. Dette fenomenet, kaller vi kapillær oppsug. Og, kapillær suging foregår når en betong som ikke er fullstendig mettet med vann er i kontakt med vann. Når betong herder og ikke er i kontakt med vann vil det oppstå tilstrekkelig mengde åpne porer til at kapillær suging kan foregå. Denne overflatekraften i vannet og det faktum at kontaktvinkel mellom vann og betong-porer er mindre enn  $90^\circ$ , som fører til kapillærkrefter oppstår. Dette er illustrert i Fig.2.2





Figur 2.2. Kapillær vannstrømning i en rør og kapillærpore med kontaktvinkel mellom vann og porevegg [12]

Her driving kraft i vann front, årsak til undertrykk, og den kan beregne i følgende Laplace likningen [6]

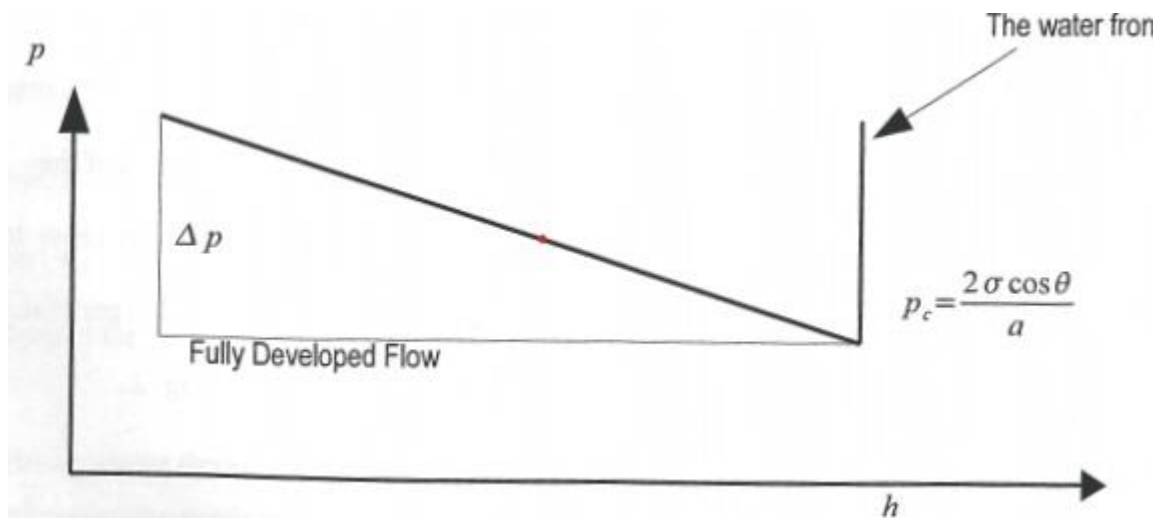
$$p_c = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{r} \quad (2.2)$$

Hvor:

$\sigma$  er overflate kreften,  $N/m$

$\theta$  er kontaktvinkel mellom vann og betong veggen

For laminær strømning, trykk fall er linear forhold til pore-lengde. Og den vil balanse med kapillær-kreften som akt i vann-front, som illustrert i Fig. 2.3.



Figur 2.3. Illustrere Balanse krefter mellom overflaten spenning og vann-bulk-bevegelsen kraften [13]

Innseting likning. (2.2) inn i likning. (2.1), vi kommer fram

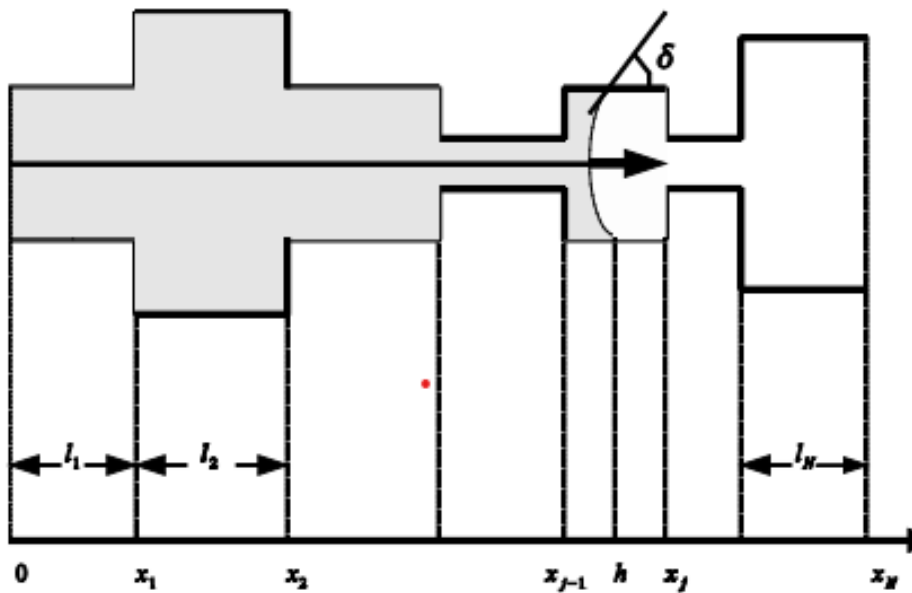
$$u_m = \frac{kr}{l} \quad (2.3)$$

Hvor:

$$k = \frac{\sigma \cos(\theta)}{4\mu} \quad (2.3a)$$

Likning. (2.3) Beskrive vann oppsugning i et rør med konstant radius (uniform-rør)

Vi utvider likning. (2.3) for å gjelde rør-system med forskjellige seksjon lengde og radier. Vi deler rør i  $N$  – seksjon. Dette illustrert i Figur.(), hvor  $r_i, l_i, i = 1, \dots, N$ , er henholdsvis seksjon lengde og radius.



Figur 2.4. Vann strømming i et rør- modell med  $N$ -seksjons ( Hvor  $l_i, r_i, i = 1, 2, \dots, N$  er henholdsvis seksjons lengde og radier) .Og, vi antar at vann front passer posisjon  $h$

For å beregne vann oppsug hastighet for vannstrømming gjennom forskjellige pore-seksjon, trenger vi følgende mass- balanse kontinuerlig likning

$$u_x A_x = u_h A_h \quad (2.4)$$

Hvor:

$u_x, u_h$  er henholdsvis vann-hastighet i posisjon  $x$ , og i vann front, ( $m$ )

$A_x, A_h$  er henholdsvis seksjon areal i seksjon  $x$ , og i vann front seksjon, ( $m^2$ )

Innsetting likning.(2.4) in likning.(2.3), og Integrated fra  $x = 0$  til  $x = h$ , vi har

$$\int_{x=0}^h u_x \frac{dx}{r_x^2} = \frac{1}{8\mu} \left( \int_{p(x=0)}^{p(x=h)} dp_x \right) \quad (2.5)$$

Innseting kapillær kreften (likning. (2.2)) og mass-likning. (2.4) inn i likning. (2.5), arranger og vi oppnår følgende hastighet likningen [6] [13]:

$$u_h = \frac{k}{\beta_1/\alpha_1 + \beta_2/\alpha_2 + \dots + \beta_{j-1}/\alpha_{j-1} + \beta_j/\Delta\alpha_j} \quad (2.6)$$

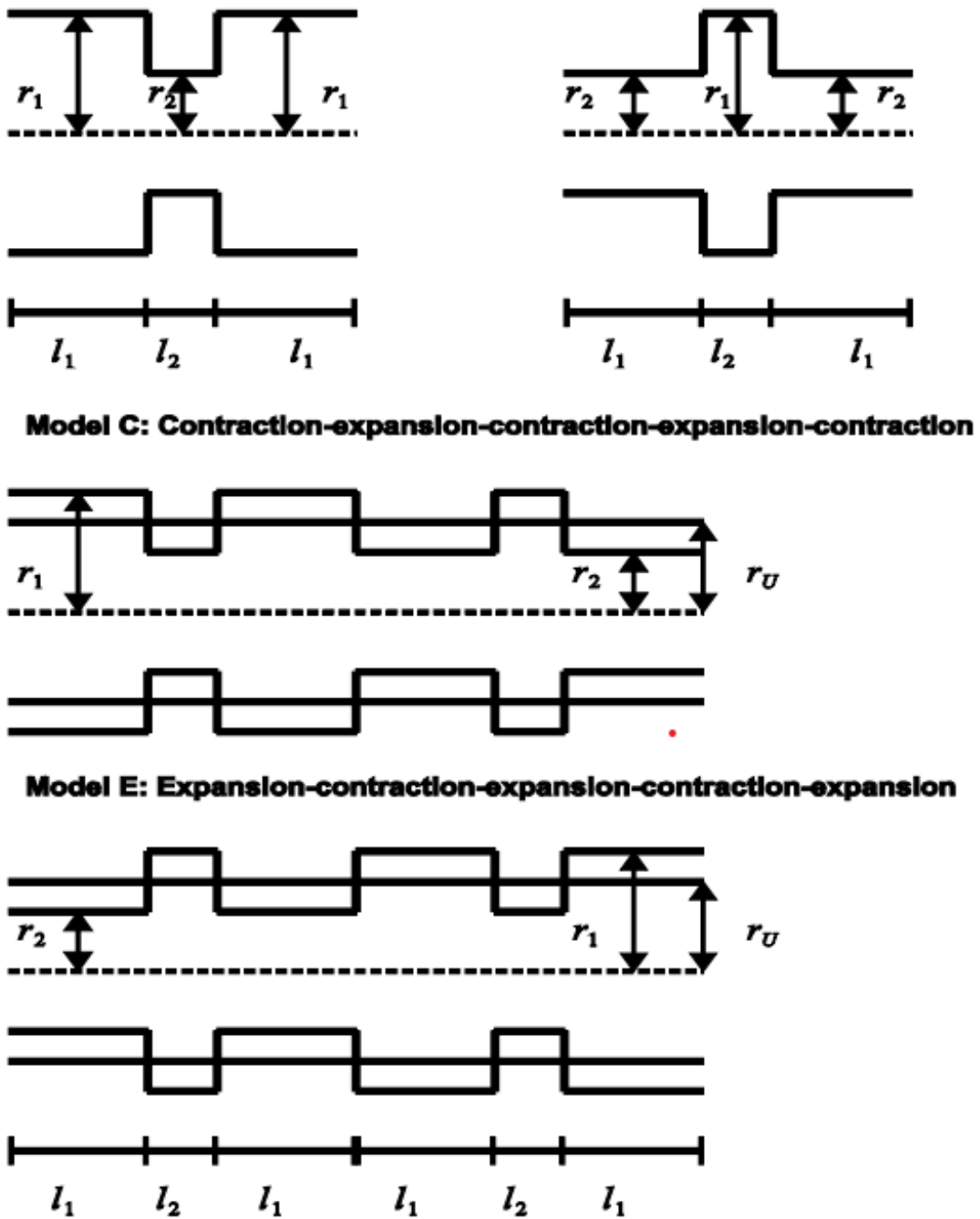
Hvor:

$$\beta_i = \left(\frac{r_j}{r_i}\right)^3, \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2.6a)$$

$$\alpha_i = \frac{r_i}{l_i}, \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, j-1, \quad \text{og } \Delta\alpha_j = \frac{r_j}{h-x_{j-1}} \quad (2.6b)$$

Likning. (2.6) Regne ut vannstrømnings hastighet for rørsystem med forskjellige seksjon lengde og radier. Hastighet  $u_h$  er avhengig med de rør dimensjon  $\beta_i$  og  $\alpha_i$ . Og, de to parameter  $\alpha_i$  og  $\beta_i$  beskriver rør-geometri størrelsen. Hvor,  $\alpha_i$  er forhold (ratio) mellom radius og seksjon lengde. Mens  $\beta_i$  er forhold mellom front-seksjon radius og passing-seksjon radius. Ved å regne ut hastighet i forskjellige verdier av  $\alpha_i$  og, vi kan studere effekt av rør-dimensjon på vannstrømmen.

### 3. Modell Geometri



Figur 3.1. Geometri- Modell C, E, N=6 seksjon og Modell U med konstant radius [6]



I order å studere effekt av rø-geometri på vann oppsuging, vi konstruerer 2-serie av rø-system. Den ene er Kontraksjon-ekspansjon (modell C)- og Ekspansjon-kontraksjon (modell E) modell som er vist i henholdsvis Fig. 3.1 og Fig 3.1 viser kombinasjon av to-serie seksjon som gir strukturer av modell C og E. Hvert kombinasjon har N-seksjons.

For hver modell C og E, vi konstruere en tilsvarende uniform- modell U (rø med konstant radius). For å sammenlikne modell C og E med modell U, vi må ha de tre- modell ha sammen volumer. Det vi si, den radius av modell U, skal bestemme ved følgende likningen [6]

$$V_C = V_E = V_U \rightarrow \frac{1}{2}\pi(r_1^2 + r_2^2) = \pi r_U^2$$

Eller

$$r_U = \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}} \quad (3.1)$$

Hvor

$V_C, V_E$  og  $V_U$  er henholdsvis volumer av modell C. E og U, ( $m^3$ )

$r_U$  er konstant-radius av modell U

$r_1, r_2$  er seksjon radius for modell C og E

Tabell. (3.1) og Tabell. (3.2) viser seksjon lengde og radius. Tabell (3.2) viser verdi av radius  $r_U$ , i forhold til verdier radier  $r_1$  og  $r_2$

Tabell 3.1: Variasjon av seksjon lengde for kontraksjon-ekspansjon og ekspansjon-kontraksjon serie

N	L(m)	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$l_1:l_2$
3	0,02	0,0067	0,0067	1:1
3	0,02	0,0071	0,0057	1:0.8
3	0,02	0,008	0,004	1:0.5
3	0,02	0,0095	$9.5 \times 10^{-4}$	1:0.1
6	0,1	0,033	0,033	1:1
6	0,1	0,04	0,02	1:0.5
6	0,1	0,0357	0,0286	1:0.8
6	0,1	0,0476	0,0048	1:0.1

Tabell 3.2: Variasjon av seksjon radier for kontraksjon-ekspansjon, ekspansjon-kontraksjon serie og modell U

$r_1(m)$	$r_2(m)$	$r_U(m)$	$r_1:r_2$
$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:1
$1 \times 10^{-6}$	$0.8 \times 10^{-6}$	$9.055 \times 10^{-7}$	1:0.8
$1 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	$7.905 \times 10^{-7}$	1:0.5
$1 \times 10^{-6}$	$0.1 \times 10^{-6}$	$7.106 \times 10^{-7}$	1:0.1

#### 4 Resultater og diskusjon

I denne seksjon, vi presentere resultater av vannsuging hastighet for modell C, modell E og modell U. hastighet  $u_h$  bli regne ut ved Likning. (2.6). De verdier av  $u_h$ , er basert på vann tetthet  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , overflate spenning mellom luft og vann  $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$ , vann viskositet  $\mu = 0.001 \text{ kg/ms}$  og kontakt vinkel mellom betong- og luft-vann overflate. Vi beregner hastighet i vann front passer ender hver seksjon og  $r\alpha$  – lengde  $L$ . In order med testing effekt av geometri- $r\alpha$  på vannstrømning hastighet, vi definer geometri data for de tre modell C, modell E og modell U, i den Tabell. (4.1),(4.2)(4.3) og (4.4). Hvor vi identifiserer forskjellige geometri-modell med følgende order:

Modell  $C_{L2\_N3\_r08}$  er kontraksjon-ekspansjon- kontraksjon serie (se Fig.), antall seksjon  $N = 3$ , radier forhold  $r_1:r_2 = 1: 0.8$

Modell  $E_{L2\_N3\_r08}$  er ekspansjon- kontraksjon- ekspansjon serie (se Fig.), antall seksjon  $N = 3$ , radier forhold  $r_1:r_2 = 1: 0.8$

Tabell 4.1: Geometri data for Modell  $C_{L2\_N3\_r08}$ ,  $C_{L2\_N3\_r05}$  og  $C_{L2\_N3\_r01}$ , Hvor  $L=0.02m$

Iden.	L (m)	N	$r_1$	$r_2$	$r_1:r_2$	$l_1 = l_2$
$C_{L2\_N3\_r08}$	0,02	3	$1 \times 10^{-6}$	$0.8 \times 10^{-6}$	1:0.8	0,0067
$C_{L2\_N3\_r05}$	0,02	3	$1 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	1:0.5	0,0067
$C_{L2\_N3\_r01}$	0,02	3	$1 \times 10^{-6}$	$0.1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0,0067
$C_{L2\_N6\_r08}$	0,02	6	$1 \times 10^{-6}$	$0.8 \times 10^{-6}$	1:0.8	0,0033
$C_{L2\_N6\_r05}$	0,02	6	$1 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	1:0.5	0,0033
$C_{L2\_N6\_r01}$	0,02	6	$1 \times 10^{-6}$	$0.1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0,0033

Tabell 4.2: Geometri data for Modell  $C_{L10\_N3\_r08}$ ,  $C_{L10\_N3\_r05}$  og  $C_{L10\_N3\_r01}$ , Hvor  $L=0.1m$

Iden.	L (m)	N	$r_1$	$r_2$	$r_1:r_2$	$l_1 = l_2$
$C_{L10\_N3\_r08}$	0.1	3	$1 \times 10^{-6}$	$0.8 \times 10^{-6}$	1:0.8	0.0333
$C_{L10\_N3\_r05}$	0.1	3	$1 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	1:0.5	0.0333
$C_{L10\_N3\_r01}$	0.1	3	$1 \times 10^{-6}$	$0.1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0.0333
$C_{L10\_N6\_r08}$	0.1	6	$1 \times 10^{-6}$	$0.8 \times 10^{-6}$	1:0.8	0.0167
$C_{L10\_N6\_r05}$	0.1	6	$1 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	1:0.5	0.0167
$C_{L10\_N6\_r01}$	0.1	6	$1 \times 10^{-6}$	$0.1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0.0167

Tilsvarende Ekstensjon-kontraksjon serie modell

Tabell 4.3: Geometri data for Modell  $E_{L2\_N3\_r08}$ ,  $E_{L2\_N3\_r05}$  og  $E_{L2\_N3\_r01}$ , Hvor  $L=0.02m$

Iden.	L (m)	N	$r_1$	$r_2$	$r_1:r_2$	$l_1 = l_2$
$E_{L2\_N3\_r08}$	0,02	3	$0.8 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.8	0,0067
$E_{L2\_N3\_r05}$	0,02	3	$0.5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.5	0,0067
$E_{L2\_N3\_r01}$	0,02	3	$0.1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0,0067
$E_{L2\_N6\_r08}$	0,02	6	$0.8 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.8	0,0033
$E_{L2\_N6\_r05}$	0,02	6	$0.5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.5	0,0033
$E_{L2\_N6\_r01}$	0,02	6	$0.1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0,0033

Tabell 4.4: Geometri data for Modell  $E_{L10\_N3\_r08}$ ,  $E_{L10\_N3\_r05}$  og  $E_{L10\_N3\_r01}$ , Hvor  $L=0.1m$

Iden.	L (m)	N	$r_1$	$r_2$	$r_1:r_2$	$l_1 = l_2$
$E_{L10\_N3\_r08}$	0,1	3	$0.8 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.8	0,0333
$E_{L10\_N3\_r05}$	0,1	3	$0.5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.5	0,0333
$E_{L10\_N3\_r01}$	0,1	3	$0.1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0,0333
$E_{L10\_N6\_r08}$	0,1	6	$0.8 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.8	0,0167
$E_{L10\_N6\_r05}$	0,1	6	$0.5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.5	0,0167
$E_{L10\_N6\_r01}$	0,1	6	$0.1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	1:0.1	0,0167

Vi evaluerer hvordan rø-geometri påvirker vann oppsuging hastighet. Mer presis, vi ser på effekt av variasjon av rø- radier og rø- seksjon lengde på vann oppsuging hastighet. Eller,

- Effekt av seksjon radier, holder seksjon lengde konstant, dvs. ( $l_1 = l_2$ ),  
For  $N = 3,6$ , og  $L = 0.02$  og  $0.1 m$

$$r_1 = 10^{-6}m, \text{ og } r_2 = 0.8 \times 10^{-6} m, \text{ eller } r_1:r_2 = 1:0.8$$

$$r_1 = 10^{-6}m, \text{ og } r_2 = 0.5 \times 10^{-6} m, \text{ eller } r_1:r_2 = 1:0.5$$

$$r_1 = 10^{-6}m, \text{ og } r_2 = 0.1 \times 10^{-6} m, \text{ eller } r_1:r_2 = 1:0.1$$

- Effekt av seksjon lengde, holder seksjon radier konstant, dvs. ( $r_1:r_2 = 1:0.5$ ),  
For  $N = 3,6$ , og  $L = 0.02$  og  $0,1 m$

$$l_1:l_2 = 1:0.8$$

$$l_1:l_2 = 1:0.5$$

$$l_1:l_2 = 1:0.1$$

Resultater av vann oppsuging hastighet blir presentere i følgende figurer

- Effekt av seksjon radier, og ( $l_1 = l_2$ ),

For  $N = 3,6$

Fig.  $C_{L2\_N3\_r08}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ , og  $r_1:r_2 = 1:0.8$

Fig.  $C_{L2\_N3\_r05}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ , og  $r_1:r_2 = 1:0.5$

Fig.  $C_{L2\_N3\_r01}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ , og  $r_1:r_2 = 1:0.1$

Fig.  $C_{L2\_N6\_r08}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ , og  $r_1:r_2 = 1:0.8$

Fig.  $C_{L2\_N6\_r05}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ , og  $r_1:r_2 = 1:0.5$

Fig.  $C_{L2\_N6\_r01}$  viser C- E-og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ , og  $r_1:r_2 = 1:0.1$

Tilsvarende åen fremstiller de figurer som illustrerer hastighet for rø med lengde  $L = 0.1 m$ , og de er Fig.  $C_{L10\_N3\_r08}$ ,  $C_{L10\_N3\_r05}$ ,  $C_{L10\_N6\_r08}$ ,  $C_{L10\_N6\_r01}$

- Effekt av seksjon lengde, og ( $r_1 = r_2 = 1:0.5$ ),

For  $N=6$

Fig.  $C_{L2\_N6\_l08}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 6$ , og  $l_1:l_2 = 1:0.8$

Fig.  $C_{L2\_N6\_l05}$  viser C- E- og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 6$ , og  $l_1:l_2 = 1:0.5$

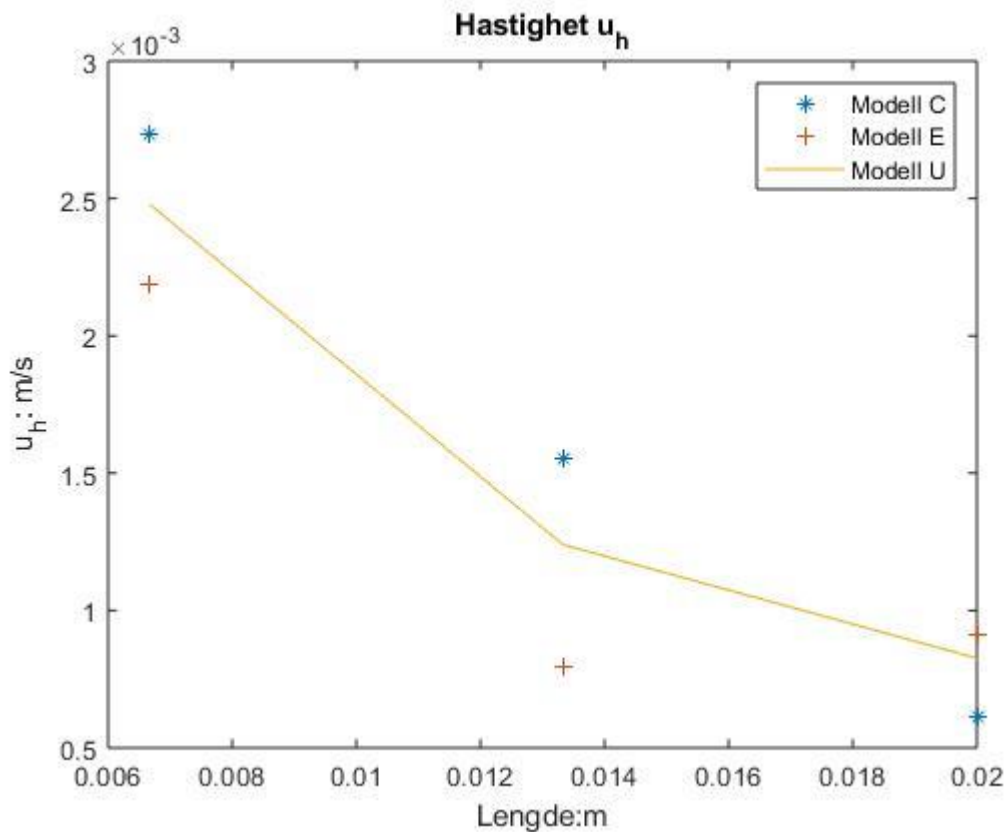
Fig.  $C_{L2\_N6\_l01}$  viser C- E-og U- modell, hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 6$ , og  $l_1:l_2 = 1:0.1$

Vi merker at vann oppsuging hastighet i uniform fø (modell U) er en linear forhold til rø posisjon ( $u_{x \rightarrow h, x}$ ). Ved sammenlikningen hastighet modell C og Modell E med denne linear ( $u_{x \rightarrow h, x}$ ), we kan se hvor stor effekt av rø-geometri p å vann oppsuging hastighet.

#### 4.1 Effekt av variering seksjon radier p å vann oppsuging hastighet, $u_h$

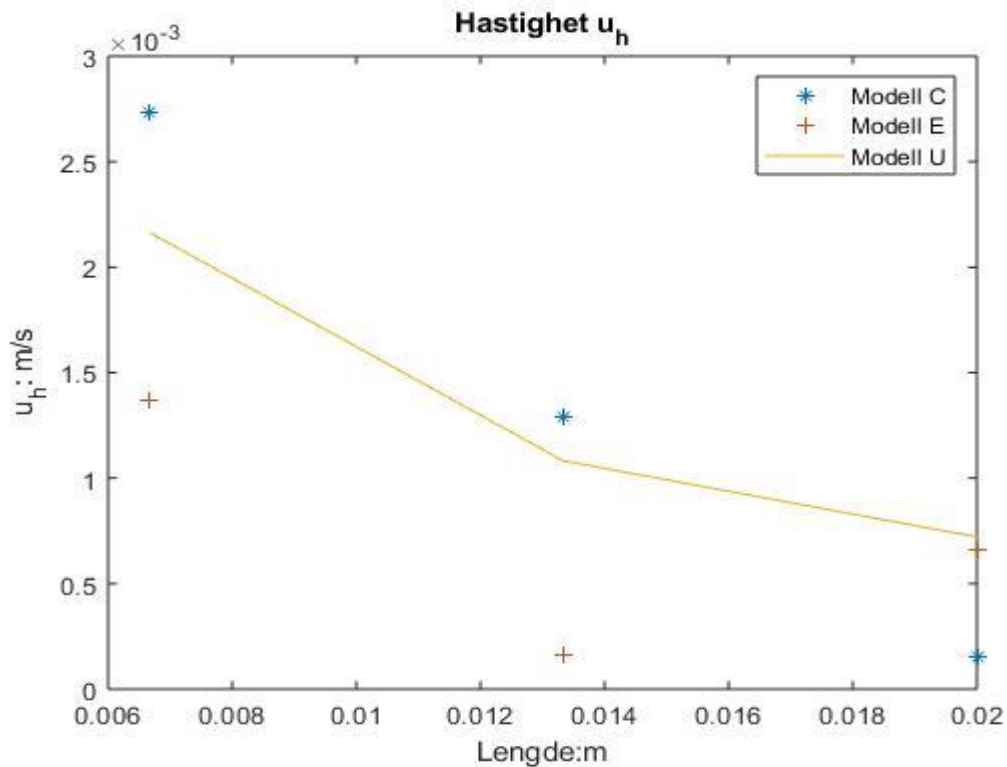
Vi evaluerer effekt av rø-geometri p å vann oppsuging hastighet. Vi ser p å hvor mye forskjellige hastighet  $u_h$  av Modell C, E og Modell-U, i forskjellige rø-geometri dimensjon. For å test effekt av variasjon av radier p å vann oppsuging hastighet, vi holder seksjon lengde konstant, mens variere seksjon radier. Resultater illustrerer i følgende Fig. (4.1) -(4.2)- ... (4.12). Tilsvarende verdier av vann oppsuging hastighet for de tre-modell C, E og U er gjengitt i følgende Vedlegg. (1)(2)(3) og (4). For å test effekt av seksjon lengde p å hastighet, vi holder ratio av seksjon radier konstant  $r_1:r_2 = 1:0.5$ . Mens variere seksjon lengde, og de resultater hastighet illustratø i følgende Fig. (4.13) -(4.14) og (4.15). Tilsvarende hastighet verdier er all gjengitt i Vedlegg. (5)





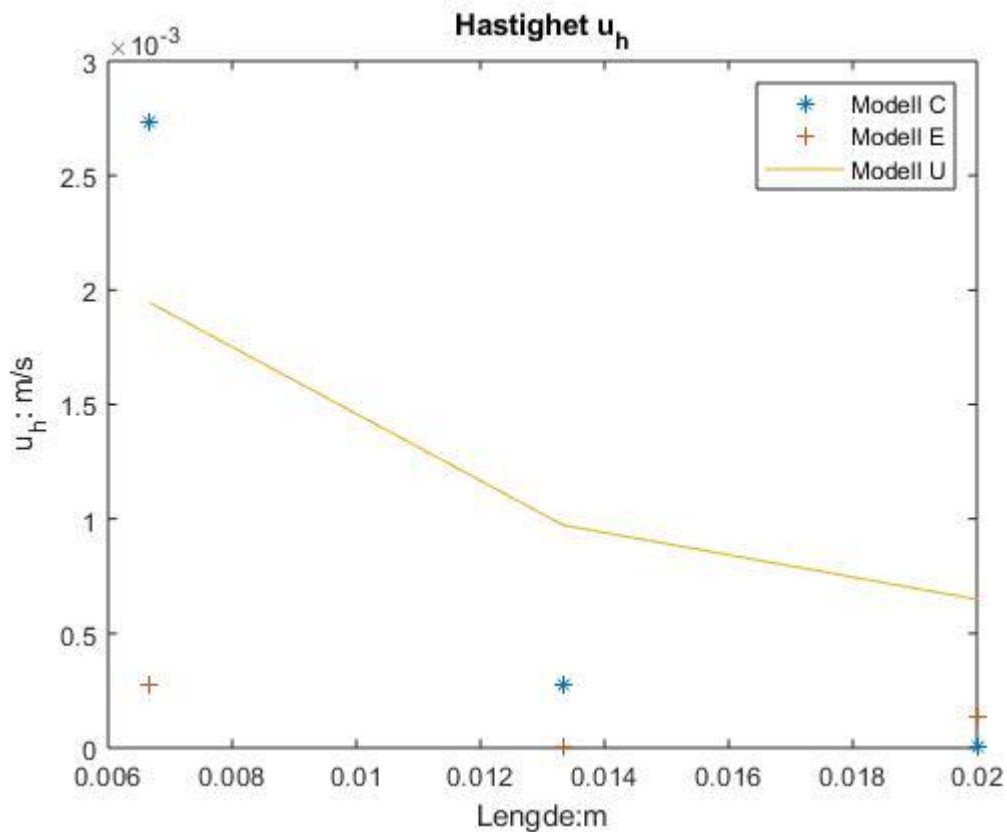
Figur 4.1. Modell  $C_{L2\_N3\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.02 \text{ m}$ ,  $N = 3$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.8$

Fig. 4.1 viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor rørlengde er  $L = 2 \text{ cm}$ , vi deler rørlengde i 3-seksjon. Vi varierer seksjon radier med order  $r_1:r_2 = 1:0.8$ , mens holder seksjon lengde konstant ( $l_1 = l_2$ ) for de tre modell. Hastighet til modell C, og modell E er begge forskjellige med hastighet til modell U i forskjellige seksjon lengde, in detaljer for  $L = 0.0067, 0.0133 \text{ m}$ , og  $0.02 \text{ m}$ , hastighet for Modell-C er:  $u_h = 0.0027, 0.0016$  og  $6.1636e^{-4} \text{ m/s}$  (hvor  $e^{-4} = 10^{-4}$ ), hastighet for Modell-E er:  $u_h = 0.0022, 7.9546e^{-4}$  og  $9.0886e^{-4} \text{ m/s}$ , og hastighet for modell-U er:  $u_h = 0.0025, 0.0012$  og  $8.2630e^{-4} \text{ m/s}$ . Hastighet til modell C og modell E er veksler med modell U. I ender av rørlengde, hastighet til modell E er større enn hastighet til modell U, og hastighet modell U er større enn modell E. Variasjon av radier med order  $r_1:r_2 = 1:0.5$ , gir effekt av hastighet av vann oppsuging.



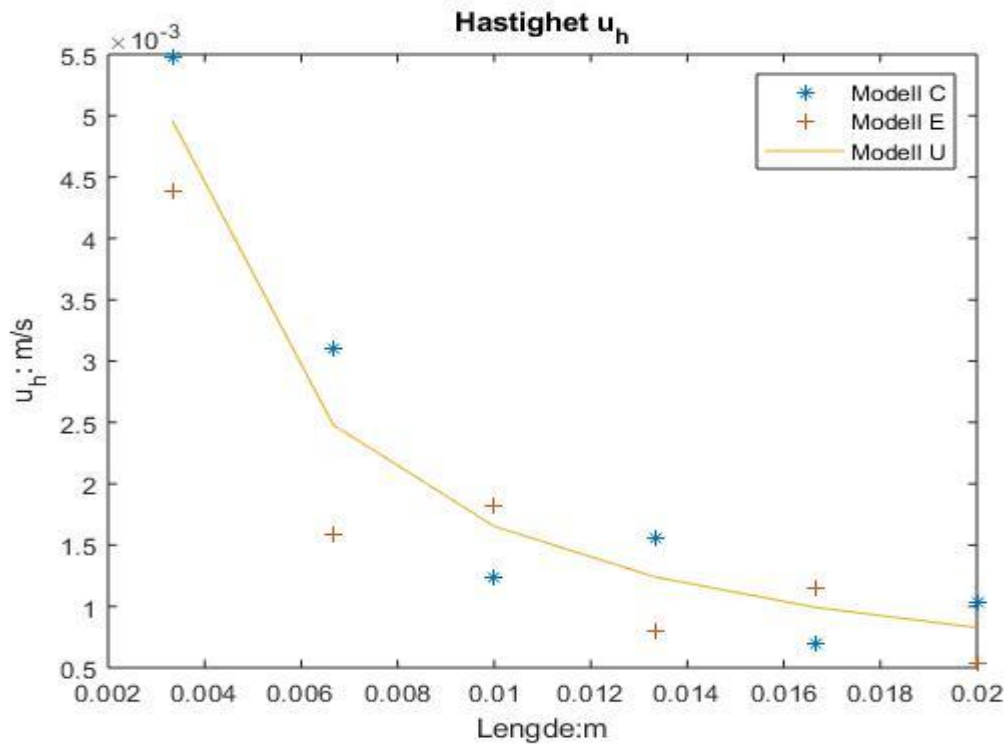
Figur 4,2. Modell  $C_{L2\_N3\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.02\text{ m}$ ,  $N = 3$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$

Fig. 4.2 viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor rørlengde er  $L = 2\text{ cm}$ , vi deler rørlengde i 3-seksjon. Vi varierer seksjon radier med orden  $r_1:r_2 = 1:0.5$ , mens holder seksjon lengde konstant ( $l_1 = l_2$ ) for de tre modeller. Det ser ut at det jo større variasjon av seksjon radier, jo større effekt på hastighet av vann oppsuging. Det ser ut hastighet til både modell C og E blir mer langsommere enn hastighet av modell U. In detaljer, i ende av rørlengde  $L = 0.02\text{ m}$ , hvor hastighet Modell-C er:  $u_h = 1.5208e^{-4}\text{ m/s}$ , hastighet Modell-E er:  $u_h = 6.6364e^{-4}\text{ m/s}$ , og hastighet Modell-U er  $u_h = 7.2319e^{-4}\text{ m/s}$ . Hastighet til både Modell-C, og Modell-E er mindre enn hastighet Modell-U i ender av rørlengde,  $L = 2\text{ cm}$ .



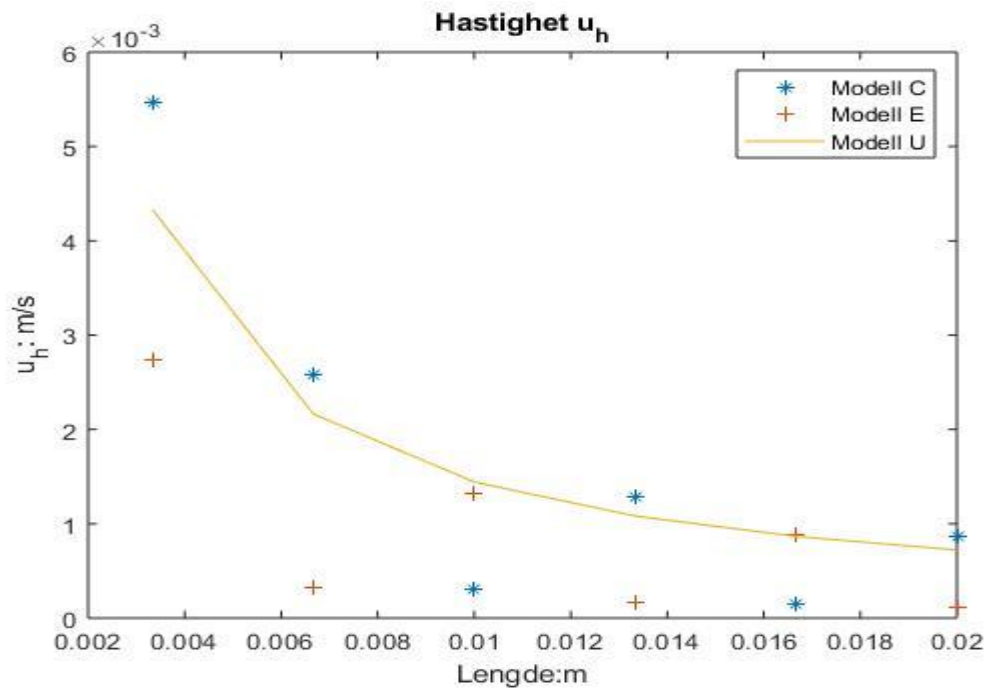
Figur 4.3. Modell  $C_{L2\_N3\_r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.02 \text{ m}$ ,  $N = 3$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.1$

Fig. 4.3 viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor rørlengde er  $L = 2 \text{ cm}$ , vi deler rørlengde i 3-seksjon. Vi varierer seksjon radier med orden  $r_1:r_2 = 1:0.1$ , mens holder seksjon lengde konstant ( $l_1 = l_2$ ) for de tre modell. Fig. viser klar at ved stor-variasjon av radier, gir stor effekt av vann oppsuging hastighet. Det ser ut at når vann strømming passer en smal pore  $r_1 = 10e^{-6} \rightarrow r_2 = 0.1 \times 10e^{-6} \text{ m}$ , så bremser vann strømming-hastighet kraftig ned. Dette medfører at hastighet til både Modell-C og Modell-E er mye langsommere enn Modell U i ender av rørlengde. In detaljer, i ender av rørlengde  $L = 0.02 \text{ m}$ , hvor hastighet Modell-C er:  $u_h = 2.737e^{-7} \text{ m/s}$ , hastighet Modell-E er:  $u_h = 1.3687e^{-4} \text{ m/s}$ , og hastighet Modell-U er  $u_h = 6.4845e^{-4} \text{ m/s}$ . Ved å sammenlikne hastighet for 3-modell- C.-E og -U, som illustrerer i følgende Fig. (), (), og (), ser vi klar at vann strømming hastighet blir stor påvirker av variasjon av radier. Effekt blir jo forsterket med større variasjon av radier. Og, det ser ut til at når vannstrømmen passer en veldig liten pores, så hastighet stopp opp, blokk fenomenet.

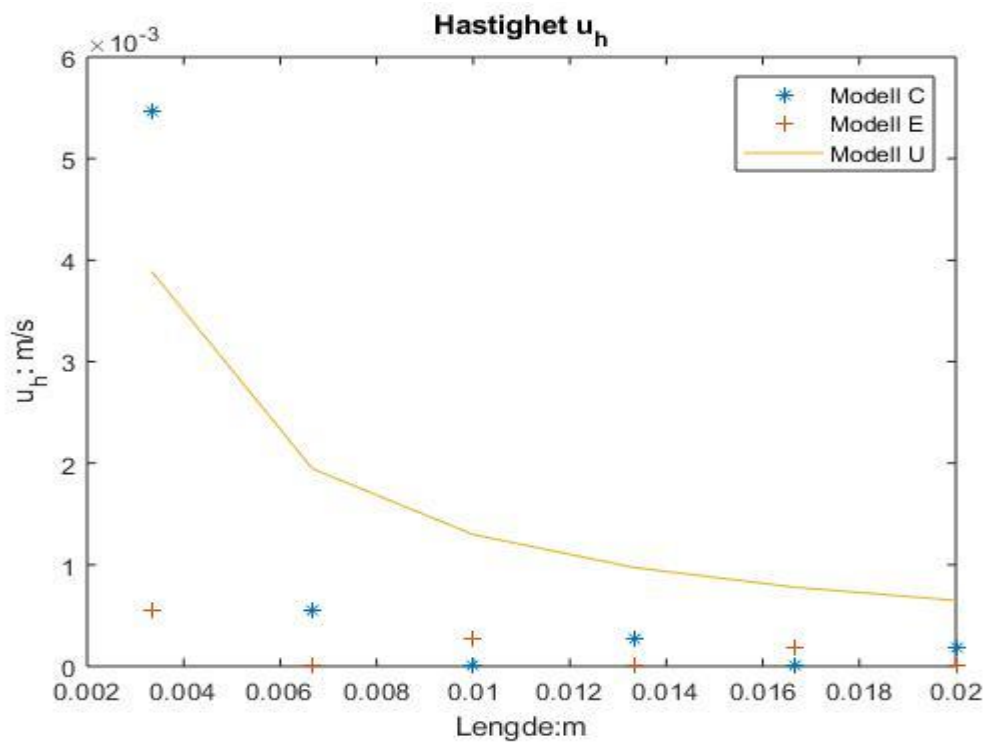


Figur 4.4. Modell  $C_{L2\_N6\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.02$  m,  $N = 3$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.8$

Fig. 4.4 viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor  $r$  lengde er  $L = 2$  cm, vi deler  $r$  i 6-seksjon,  $N = 6$ . Vi varierer seksjon radier med order  $r_1:r_2 = 1:0.8$ , mens holder seksjon lengde konstant ( $l_1 = l_2$ ) for de tre-modell. Merker at de tre-figurer  $C_{L2\_N3\_r08}$ ,  $C_{L2\_N3\_r08}$ ,  $C_{L2\_N3\_r08}$  (i forrige avsnitt), har neste sammen  $r$ -geometri med de nest følgende figurer  $C_{L2\_N6\_r08}$ ,  $C_{L2\_N6\_r08}$ ,  $C_{L2\_N6\_r08}$ , hvor det er forskjellige mellom de alle figurene, at antall seksjon er  $N = 3$ , og  $N = 6$  i henholdsvis til to-Figure-grupper. Ved å sammenlikner hastighet til de to grupper-geometri, vi kan se om vannstrømmen blir påvirket av  $r$ -antall seksjoner. Fig.() viser tydelig at hastighet til både Modell C og Modell E veksler med hastighet Modell-U. I ender av  $r$ -lengde hastighet av Modell C er  $u_h = 0.001$ , hastighet av Modell E er  $u_h = 5.3031e^{-4}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 8.2630e^{-4}$  m/s, eller  $u_h(\text{Modell C}) > u_h(\text{Modell E}) > u_h(\text{Modell U})$ . Mens, tilsvarende situasjon, hvor  $N = 3$  (Fig.()) har vi hastighet av Modell C er  $u_h = 6.1636e^{-4}$ , hastighet av Modell E er  $u_h = 9.0886e^{-4}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 8.2630e^{-4}$  m/s. Det vil si at antall-seksjon har effekt på vannstrømning hastighet.

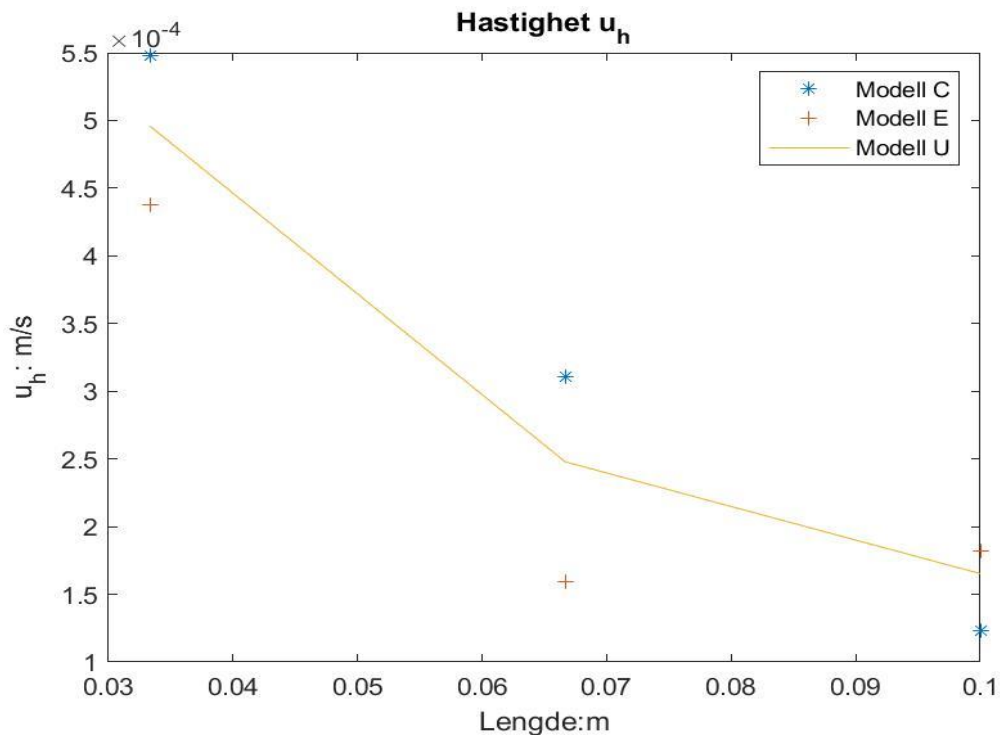


Figur 4.5. Modell  $C_{L2\_N6\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.02$  m,  $N = 6$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$

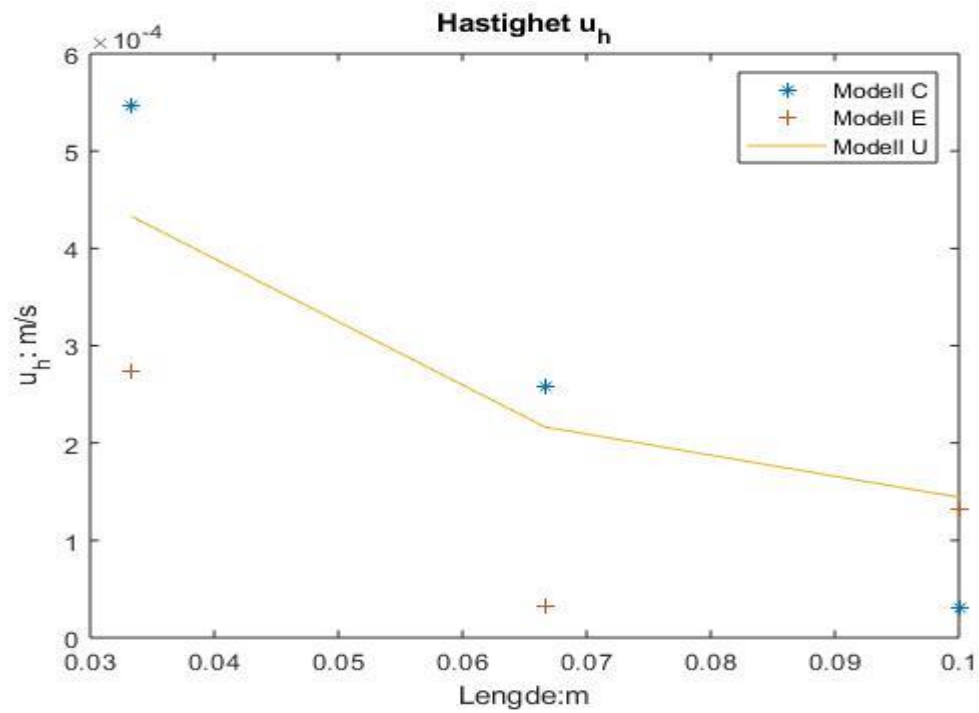


Figur 4.6. Modell  $C_{L2\_N6\_r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.02$  m,  $N = 6$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.1$

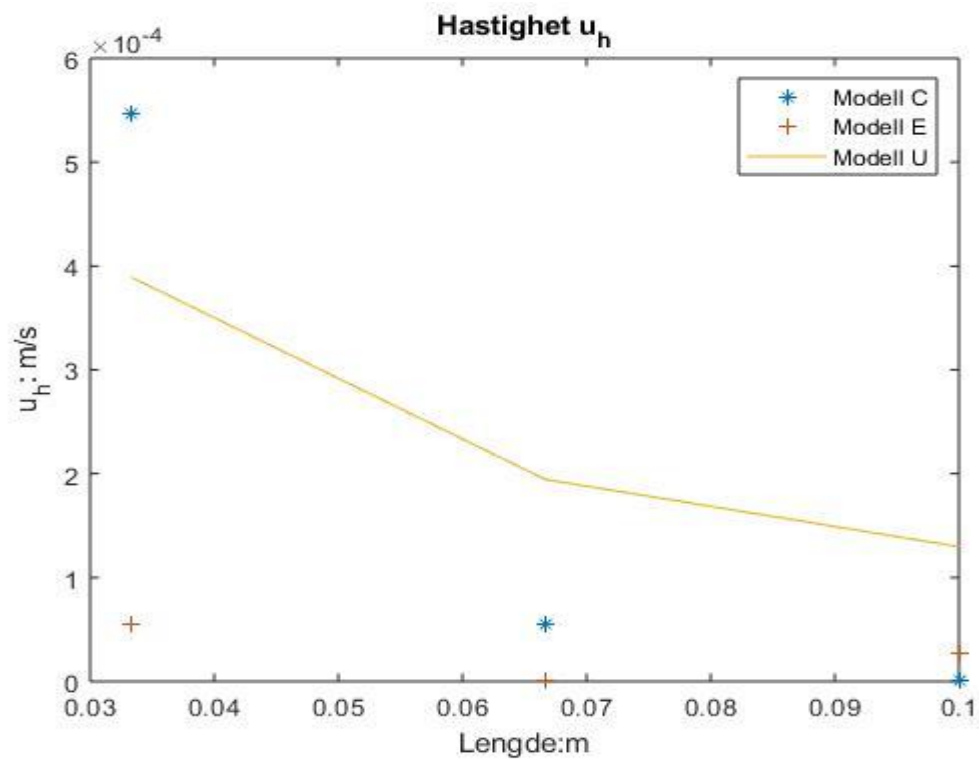
Fig. (4.5) og (4.6) Illustrere tydelig at vannstrømning hastighet er sterk påvirket av variasjon av seksjon areal. Den trenden vi har observert i sett tidligere, er at vanns strømning hastighet blir påvirket av seksjon-areal, gjelder fortsatt med situasjon hvor  $r\alpha$ - har flere mange antall seksjon,  $N = 6$ . Blokk fenomenet er observert, og det er når vannstrømning hastighet bremses ned når strømning passer en liten pore. In deltailje, hvor  $r_1:r_2 = 1:0.1$ , i enden av  $r\alpha$  lengde  $L = 0.02m$ , hastighet av Modell C er  $u_h = 1.8248e^{-4}$ , , hastighet av Modell E er  $u_h = 1.8248e^{-7}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 6.4845e^{-4}m/s$ , eller  $u_h (Modell U) > u_h (Modell C) > u_h (Modell E)$ . Det ser ut til at når vannstrømning passer en-eller/og- flere liten porer,  $1e^{-7}$ , så hastighet til både Modell-C og Modell-E er kraftig redusere og hastighet til begge modell er mindre enn hastighet til Modell-U



Figur 4.7. Modell  $C_{L10\_N3\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1 m, N = 3, l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.8$



Figur 4.8. Modell  $C_{L10,N3,r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 3$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$

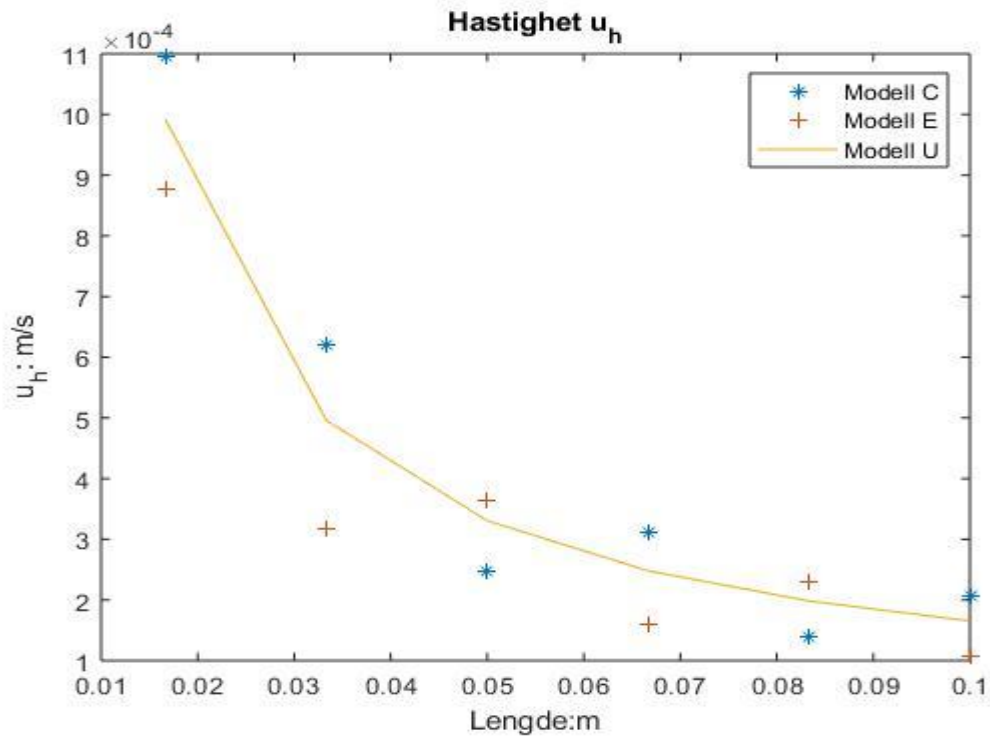


Figur 4.9. Modell  $C_{L10,N3,r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 3$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.1$

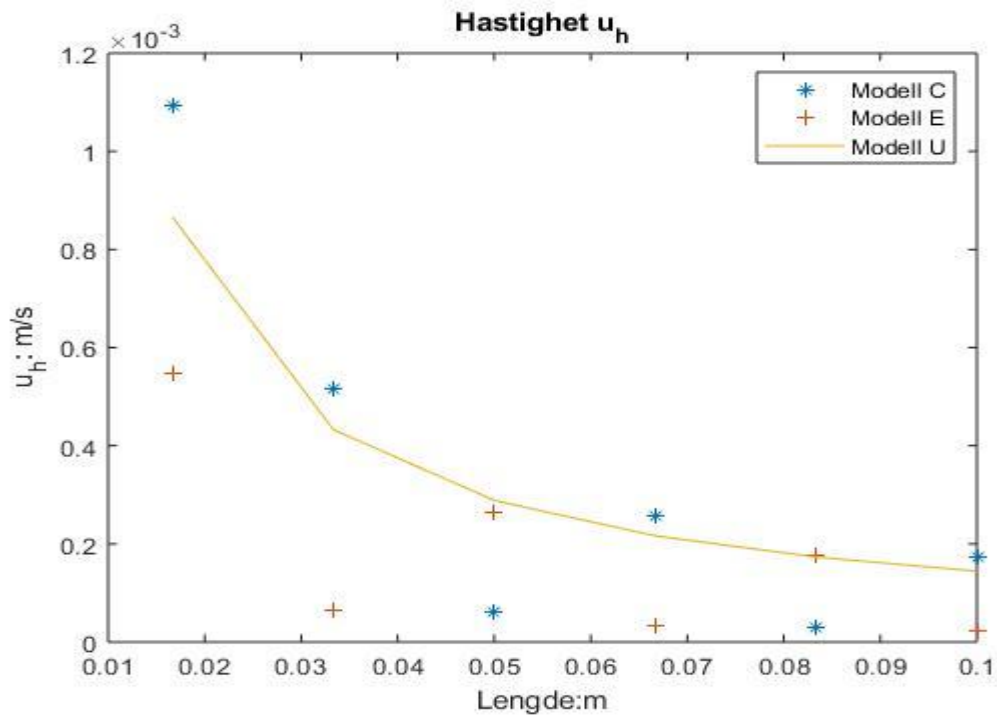
De tre-Fig. (4.7) (4.8) og (4.9), viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor rør lengde er  $L = 10\text{cm}$ , vi deler rør i 3-seksjon. Vi varierer seksjon radier med følgende ordre  $r_1:r_2 = 1:0.8, 1:0.5$  og  $1:0.1$ , mens holder seksjon lengde konstant ( $l_1 = l_2$ ) for de tre modell. De resultater trender som vi har observert i rør-lengde  $L = 0.02\text{ m}$  er samsvar med når rør-lengde  $L = 0.1\text{ m}$ . De trender er

- For små variasjon av seksjon raider,  $r_1:r_2 = 1:0.8$ . hastighet til Modell- C og E er veksler i forhold til hastighet Modell-U, når vannstrømning passer de rør-seksjonene
- Når variasjon av radier øker til  $r_1:r_2 = 1:0.5$ , så hastighet til både Modell C og E er fremdeles veksler i forhold til hastighet Modell-U, mens hastighet til både Modell-C og E er redusere i forhold til Modell-U. In detaljer, in ende av rør-lengde,  $L = 0.1$ , er hastighet av Modell C er  $u_h = 3.4017e^{-5}$ , , hastighet av Modell E er  $u_h = 1.3273e^{-4}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 1.4428e^{-4}\text{ m/s}$ , eller  $u_h(\text{Modell U}) > u_h(\text{Modell E}) > u_h(\text{Modell C})$ .
- Når variasjon av radier øker til  $r_1:r_2 = 1:0.1$ , så hastighet til både Modell-C og E er kraftig redusere i forhold til Modell-U. In detaljer, in ende av rør-lengde,  $L = 0.1$ , er hastighet av Modell C er  $u_h = 5.4739e^{-8}$ , , hastighet av Modell E er  $u_h = 2.7374e^{-5}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 1.2969e^{-4}\text{ m/s}$ , eller  $u_h(\text{Modell U}) > u_h(\text{Modell E}) > u_h(\text{Modell C})$ .

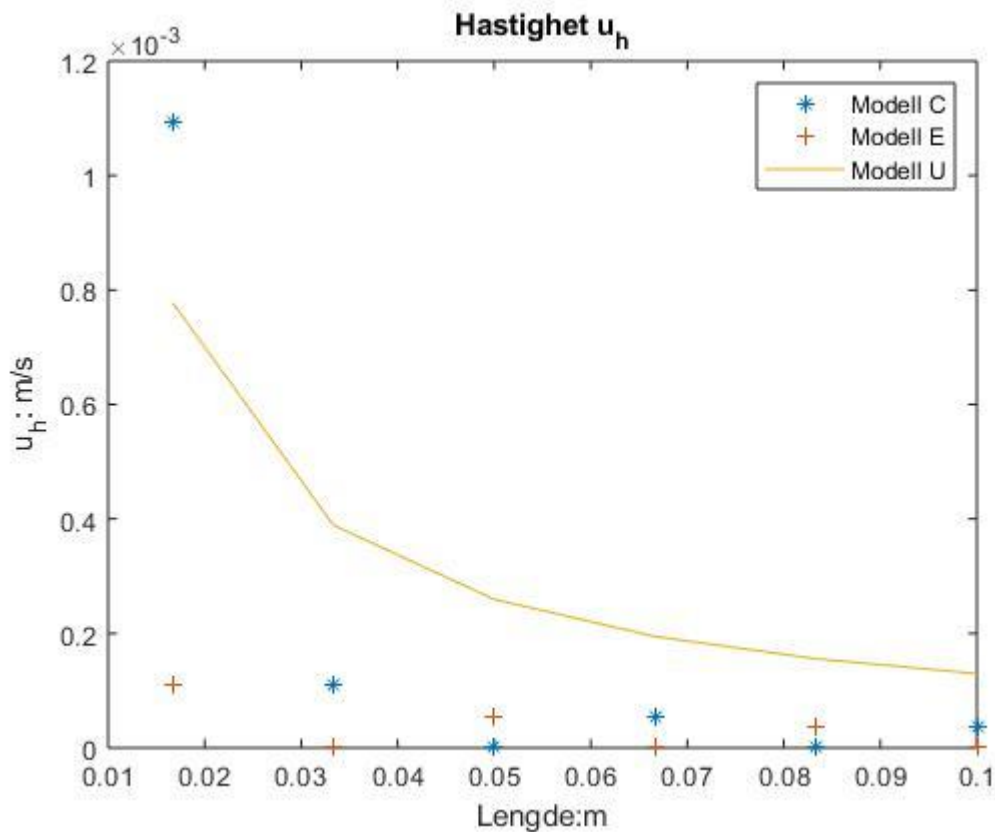




Figur 4.10. Modell  $C_{L10\_N6\_r08}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 6$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.8$



Figur 4.11. Modell  $C_{L10\_N6\_r05}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 6$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$



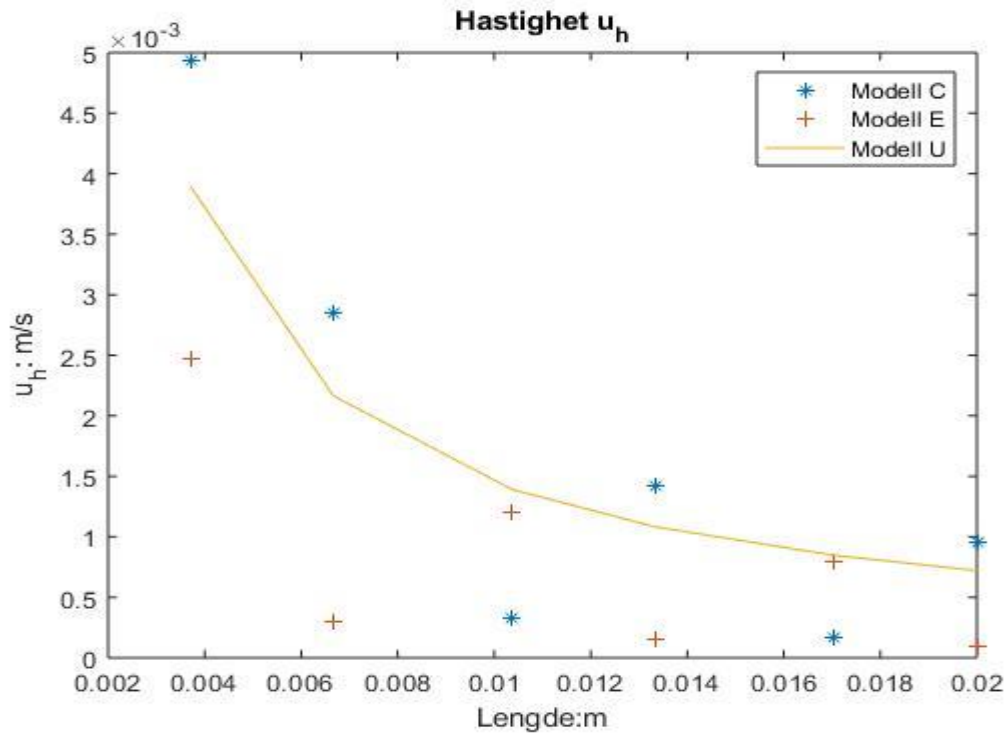
Figur 4.12. Modell  $C_{L10,N6,r01}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1 \text{ m}$ ,  $N = 6$ ,  $l_1 = l_2$  og  $r_1:r_2 = 1:0.1$

De tre-Fig. (4.10) (4.11) og (4.12), viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor rørlengde er  $L = 10 \text{ cm}$ , vi deler rørlengde i 6-seksjon. Vi varierer seksjon radier med følgende ordre  $r_1:r_2 = 1:0.8, 1:0.5$  og  $1:0.1$ , mens holder seksjon lengde konstant ( $l_1 = l_2$ ) for de tre modell. De resultater trender som vi har observert i rørlengde  $L = 0.02 \text{ m}$  er samsvar med når rørlengde  $L = 0.1 \text{ m}$ . De trender er

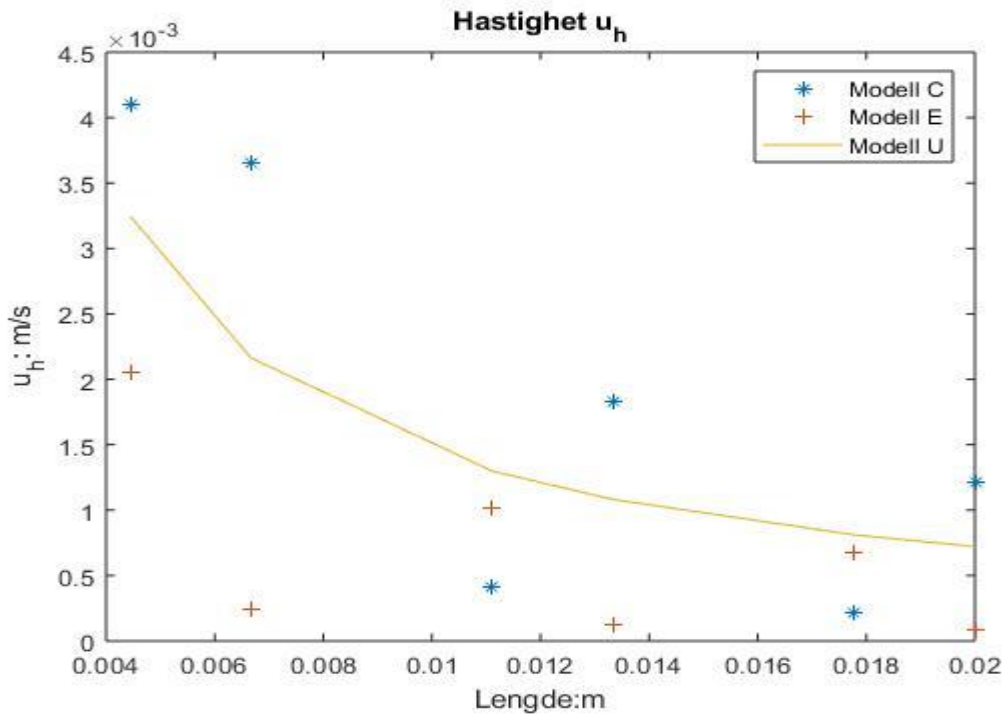
- For små variasjon av seksjon raider,  $r_1:r_2 = 1:0.8$ . hastighet til Modell- C og E er veksler i forhold til hastighet Modell-U, når vannstrømning passer de rør-seksjonene
- Når variasjon av radier øker til  $r_1:r_2 = 1:0.5$ , så hastighet til både Modell C og E er fremdeles veksler i forhold til hastighet Modell-U, mens hastighet til både Modell-C og E er redusere i forhold til Modell-U. In detaljer, in ende av rør-lengde,  $L = 0.1$ , er hastighet av Modell C er  $= 1.7176e^{-4}$ , , hastighet av Modell E er  $u_h = 2.1471e^{-5}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 1.4428e^{-4} \text{ m/s}$ , eller  $u_h (\text{Modell C}) > u_h (\text{Modell U}) > u_h (\text{Modell E})$ .
- Når variasjon av radier øker til  $r_1:r_2 = 1:0.1$ , så hastighet til både Modell-C og E er kraftig redusere i forhold til Modell-U. In detaljer, in ende av rør-lengde,  $L = 0.1$ , er hastighet av Modell C er  $u_h = 53.6496e^{-5}$ , hastighet av Modell E er  $u_h = 3.6496e^{-8}$ , hastighet av Modell U er  $u_h = 1.2969e^{-4} \text{ m/s}$ , eller  $u_h (\text{Modell U}) > u_h (\text{Modell C}) > u_h (\text{Modell E})$ .

## 4.2 Effekt av variering seksjon lengde på vann oppsuging hastighet, $u_h$

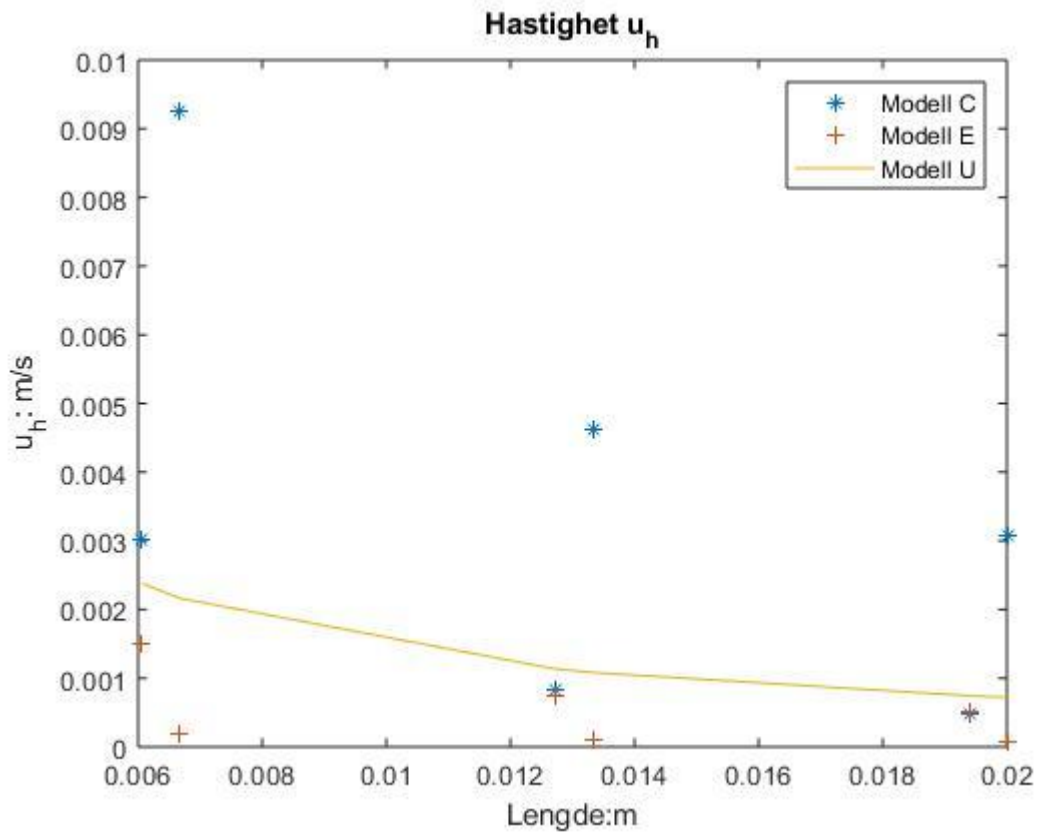
In order testing vann oppsuging hastighet påvirker av  $r$ -seksjon lengde. Vi holder forhold mellom radier konstant,  $r_1:r_2 = 1:0:5$ , mens vi varierer seksjons i følgende order  $l_1:l_2 = 1:0.8, 1:0.5$  og  $1:0.1$ . Resultater av hastighet i de tre-case, har illustrere i følgende Fig.(4.13)-(4.14)-(4.15). Og, Verdier til hastighet er gjengitt i Vedlegg 5.



Figur 4.13. Modell  $C_{L2\_N6\_108}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 6$ ,  $l_1:l_2 = 1:0.8$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$



Figur 4.14.  $C_{L2\_N6\_105}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 6$ ,  $l_1:l_2 = 1:0.5$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$



Figur 4.15. Modell  $C_{L2\_N6\_101}$ , hastighet for modeller C, E og U, for  $L = 0.1$  m,  $N = 6$ ,  $l_1:l_2 = 1:0.1$  og  $r_1:r_2 = 1:0.5$

Fig. (4.13) (4.14) og (4.15) viser hastighet for modell C, modell E og modell U. Hvor rørlengde er  $L = 2 \text{ cm}$ , rørl har 6-seksjon. Vi varierer seksjon lengde med følgende order  $l_1:l_2 = 1:0.8, 1:0.5$  og  $1:0.1$ , mens holder forhold mellom radier konstant ( $r_1:r_2 = 1:0.5$ ). Disse tre-Fig. Viser tydelig at seksjon lengde gir en effekt på vann oppsuging hastighet. Hastighet til de to Modell C og E er forskjellige i situasjon hvor  $l_1:l_2 = 1:0.8, 1:0.5$  og  $1:0.1$ . Inndeltalje, i ende av rørlengde  $L = 0.02 \text{ m}$ , er hastighet av Modell C:  $u_h = 9.5217e^{-4} \text{ m/s}$  for  $l_1:l_2 = 1:0.8$ , mens  $u_h = 0.0012 \text{ m/s}$  for  $l_1:l_2 = 1:0.5$ , og  $u_h = 0.0031 \text{ m/s}$  for  $l_1:l_2 = 1:0.1$ . Tilsvarende, hastighet av Modell E:  $u_h = 9.7768e^{-4} \text{ m/s}$  for  $l_1:l_2 = 1:0.8$ , mens  $u_h = 8.2955e^{-5} \text{ m/s}$  for  $l_1:l_2 = 1:0.5$ , og  $u_h = 6.2345e^{-5} \text{ m/s}$  for  $l_1:l_2 = 1:0.1$ . Og, hastighet av Modell U:  $u_h = 7.2139e^{-4}$ . Det er helt klar at variasjon av seksjon lengde påvirker på hastighet, som gjør hastighet av modell C og E veksler med forhold til hastighet av modell U.

## 5 Konklusjon

I denne masteroppgaven studerer vi kapillar vann oppsug i betong. Vi studerer effekt av forskjellige porestruktur på hastighet av vannstrømning. Vi anvender rørlmodell for å illustrere vannstrømning i porestrukturen i betong. Rørlmodell med forskjellige seksjons med forskjellige radius og seksjon lengde. Det er helt klar en enkelt modell for å beskrive betong porestrukturen. Det er velkjent at betong porestrukturer er et komplisert pore Networks, hvor de forskjellige pores type som henge sammen i flere random veier. Vi vil evaluere en påstand i betong vann oppsug problemstilling, er at vann oppsuging i betong porestrukturen er ikke konstant hastighet, og hastighet bli bremses ned på grunn av vann passere forskjellige pores type (pores radius). Med dette som en studie case, så konstruktene vi 3-modell og de er kontraksjon-ekspansjon- (Modell C), ekspansjon-kontraksjon (Modell E, og uniform modell (Modell U). Ved å sammenlikning vann oppsug av modell C og Modell E med Modell U, kan vi se om hvor stor/liten effekt av forskjellige porestruktur som påvirker kapillar vannstrømningen.

Basert på resultater av hastighet som basert på likninger, kommer vi frem med følgende konklusjon:

- For ratio- radier, For små variasjon av seksjon radier,  $r_1:r_2 = 1:0.8$ . hastighet til Modell- C og E er veksler i forhold til hastighet Modell-U, når vannstrømning passer de rørl-seksjonene
- For ratio- radier,  $r_1:r_2 = 1:0.5$ . hastighet til Modell- C og E er veksler i forhold til hastighet Modell-U, når vannstrømning passer de rørl-seksjonene. Hastighet til både modell C, og E er reduserer til forhold hastighet modell U
- For ratio- radier,  $r_1:r_2 = 1:0.1$ . Hastighet til begge modell C og E er redusere kraftig i forhold til modell U.
- For rørl lengde  $L = 2 \text{ cm}$ , og  $4 \text{ cm}$ , så det ser ut til at hastighet til begge modell C og E redusere proporsjonal med økning-ratio-radier. Når vann strømning en/ eller flere trang pores, ( i vårt studiet  $r_2 = 10^{-7} \text{ m}$ , så redusere vann strømning hastighet kraftig. Det ser ut vann oppsuging stopp opp (Blokk fenomenet)

## 6. Videre arbeid

Det er velkjent kunnskap i betong teknologi, er at kapillær oppsug er en signifikant driv kraften som trekker vann/klorid inn i betong strukturer. Poststrukturen er en komplett geometri. Det er forskjellige pores type, med størrelsen som ranger fra micro- til macro størrelsen, og den forbindelsen med random veien. For å konstruere en Fysikk/Matematikk modell (rør-modell) som beskriver nøyaktig vann oppsuging porestrukturen, så det er helt nødvendig arbeid med geometri modell som er i stand å beskrive presis de pore type- poretype andel- i random- veien. Det er en av de nødvendige tema vi kanskje fokus på arbeid i fremover. Den annet ting vi burde fokus på er at Fysikk/matematikk modell burde inkludere flere transport mekanisme som kapillær og Diffusjon [14][15]. Denne transport virker, for eks. i kapillær porene og luft porene.

## Referanseliste

- [1] Roy Kristian Tingvoll Hansen (2017): Effekt av å bruke superplastiserende (SP-stoff) i herdingsprosess i store betongkonstruksjoner i kaldt klima, UiT/IVT – faktisk
- [2] Norcem, Gyldendal Norsk Forlag(2004): Betong boka, Gyldendal Undervisning, Oslo
- [3] Eyvind Ødegård (1969): Betong lære 1, Universitetsforlaget 4.utgaver
- [4] Magne Maage (2015): Betong, regelverk, teknologi og utførelse, Byggenæringens Forslag
- [5] Arne Hilerborg (1983): Allman Kurs i Byggnadsmateriallæra, Del I Kapitel 1-11, Kompendium Byggnadsmateriallæra, Tekniska Högskolen i Lund
- [6] Hung T. Nguyen (Fe.2011): Water and heat transfer in cement based materials, PhD-thesis, UiT Norges arktiske universitet
- [7] Aage D. Herholdt; Chr. F. Justesen; Palle Nepper- Christensen; Ander Nielsen (1979): Beton-Bogen, Aalborg Portland
- [8] Rolf Andre Bohne; Arne Aalberg (2011): TBA4122- Bygningsmaterialer, Kompendium H-2011, NTNU Inst. For Bygg, anlegg og transport
- [9] Magne Maage; Selmer AS og NTH: Sementer, LBA Støpe lederkurset, p:\dok\nif-kurs\betekn.sem
- [10] Frank P. Incropera; David P. Dewitt (2002): Fundament of Heat and Mass Transfer, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Magne Maage (2015): Betong Regelverk, teknologi og utførelse; 1.utgave, Byggenæringens Forslag AS
- [12] Erik J. Sellevold (2004): Porevanns Termodynamikk, 37986 Betongstruktur, Dr. Ing.-kurs, Høst 2004
- [13] Hung T. Nguyen (2006): Capillary suction in pores with multiple sizes, kompenium, UiT Norges arktiske universitet
- [14] E.C. Zachmanoglou; Dale W. Thoe (1986): Introduction to partial differential equations with applications; Dover Publications
- [15] R. Byron Bird; Warren E. Stewart Edwin N. Lightfoot (2002): Transport phenomena, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.

**Vedlegg 1** Hastighet  $u_h$ , hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 3$ ,  $r_1:r_2 = 1:0.8, 1:0.5, 1:0.1$ , og seksjon lengde holde konstant  $l_1 = l_2$

Id.	$u_{h=0.0067m}$ (m/s)	$u_{h=0.0133m}$ (m/s)	$u_{h=0.02m}$ (m/s)
$C_{L2\_N3\_r08}$	0,0027	0,0016	6.1636e-04
$E_{L2\_N3\_r08}$	0,0022	7.9546e-04	9.0886e-04
$U_{L2}$	0,0025	0,0012	8.2630e-04

Id.	$u_{h=0.0067m}$ (m/s)	$u_{h=0.0133m}$ (m/s)	$u_{h=0.02m}$ (m/s)
$C_{L2\_N3\_r05}$	0,0027	0,0013	1.5208e-04
$E_{L2\_N3\_r05}$	0,0014	1.6103e-04	6.6364e-04
$U_{L2}$	0,0022	0,0011	7.2139e-04

Id.	$u_{h=0.0067m}$ (m/s)	$u_{h=0.0133m}$ (m/s)	$u_{h=0.02m}$ (m/s)
$C_{L2\_N3\_r01}$	0,0027	2.7372e-04	2.7370e-07
$E_{L2\_N3\_r01}$	2.7375e-04	2.7372e-07	1.3687e-04
$U_{L2}$	0,0019	9.7268e-04	6.4845e-04



**Vedlegg 2** Hastighet  $u_h$ , hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 6$ ,  $r_1:r_2 = 1:0.8, 1:0.5, 1:0.1$ , og seksjon lengde holde konstant  $l_1 = l_2$

Id	$u_h=0.0033m$ (m/s)	$u_h=0.0067m$ (m/s)	$u_h=0.01m$ (m/s)	$u_h=0.0133m$ (m/s)	$u_h=0.0167m$ (m/s)	$u_h=0.02m$ (m/s)
$C_{L2\_N6\_r08}$	0.0055	0.0031	0.0012	0.0016	6.9455e-04	0.001
$E_{L2\_N6\_r08}$	0.0044	0.0016	0.0018	7.9546e-04	0.0011	5.3031e-04
$U_{L2}$	0.005	0.0025	0.0017	0.0012	0.001	8.2630e-04

Id	$u_h=0.0033m$ (m/s)	$u_h=0.0067m$ (m/s)	$u_h=0.01m$ (m/s)	$u_h=0.0133m$ (m/s)	$u_h=0.0167m$ (m/s)	$u_h=0.02m$ (m/s)
$C_{L2\_N6\_r05}$	0.0055	0.0026	3.0417e-04	0.0013	1.5643e-04	8.5882e-04
$E_{L2\_N6\_r05}$	0.0027	3.2206e-04	0.0013	1.6103e-04	8.7600e-04	1.0735e-04
$U_{L2}$	0.0043	0.0022	0.0014	0.0011	8.6567e-04	7.2139e-04

Id	$u_h=0.0033m$ (m/s)	$u_h=0.0067m$ (m/s)	$u_h=0.01m$ (m/s)	$u_h=0.0133m$ (m/s)	$u_h=0.0167m$ (m/s)	$u_h=0.02m$ (m/s)
$C_{L2\_N6\_r01}$	0.0055	5.4745e-04	5.4739e-07	2.7372e-04	2.7371e-07	1.8248e-04
$E_{L2\_N6\_r01}$	5.4750e-04	5.4745e-07	2.7374e-04	2.7372e-07	1.8249e-04	1.8248e-07
$U_{L2}$	0.0039	0.0019	0.0013	9.7268e-04	7.7814e-04	6.4845e-04

**Vedlegg 3** Hastighet  $u_h$ , hvor  $L = 0.1m$ ,  $N = 3$ ,  $r_1:r_2 = 1:0.8, 1:0.5, 1:0.1$ , og seksjon lengde holde konstant  $l_1 = l_2$

Id.	$u_{h=0.033m}$ (m/s)	$u_{h=0.0667m}$ (m/s)	$u_{h=0.1m}$ (m/s)
$C_{L10\_N3\_r08}$	5.4750e-04	3.1073e-04	1.2327e-04
$E_{L10\_N3\_r08}$	4.3800e-04	1.5909e-04	1.8177e-04
$U_{L10}$	4.9578e-04	2.4789e-04	1.6526e-04

Id.	$u_{h=0.033m}$ (m/s)	$u_{h=0.0667m}$ (m/s)	$u_{h=0.1m}$ (m/s)
$C_{L10\_N3\_r05}$	5.4750e-04	2.5765e-04	3.0417e-05
$E_{L10\_N3\_r05}$	2.7375e-04	3.2206e-05	1.3273e-04
$U_{L10}$	4.3284e-04	2.1642e-04	1.4428e-04

Id.	$u_{h=0.033m}$ (m/s)	$u_{h=0.0667m}$ (m/s)	$u_{h=0.1m}$ (m/s)
$C_{L10\_N3\_r01}$	5.4750e-04	5.4745e-05	5.4739e-08
$E_{L10\_N3\_r01}$	5.4750e-05	5.4745e-08	2.7374e-05
$U_{L10}$	3.8907e-04	1.9454e-04	1.2969e-04

**Vedlegg 4.** Hastighet  $u_h$ , hvor  $L = 0.1m$ ,  $N = 6$ ,  $r_1:r_2 = 1:0.8, 1:0.5, 1:0.1$ , og seksjon lengde holde konstant  $l_1 = l_2$

Id	$u_h=0.0167m$ (m/s)	$u_h=0.0333m$ (m/s)	$u_h=0.050m$ (m/s)	$u_h=0.0667m$ (m/s)	$u_h=0.0833m$ (m/s)	$u_h=0.1m$ (m/s)
$C_{L10\_N6\_r08}$	0.0011	6.2145e-04	2.4654e-04	3.1073e-04	1.389e-04	2.0715e-04
$E_{L10\_N6\_r08}$	8.7600e-04	3.1818e-04	3.6355e-04	1.5909e-04	2.2937e-04	1.0606e-04
$U_{L2}$	9.9156e-04	4.9578e-04	3.3052e-04	2.4789e-04	1.9831e-04	1.6526e-04

Id	$u_h=0.0167m$ (m/s)	$u_h=0.0333m$ (m/s)	$u_h=0.050m$ (m/s)	$u_h=0.0667m$ (m/s)	$u_h=0.0833m$ (m/s)	$u_h=0.1m$ (m/s)
$C_{L10\_N6\_r05}$	0.0011	5.1529e-04	6.0833e-05	2.5765e-04	3.1286e-05	1.7176e-04
$E_{L10\_N6\_r05}$	5.4750e-04	6.4412e-05	2.6545e-04	3.2206e-05	1.7520e-04	2.1471e-05
$U_{L2}$	8.6567e-04	4.3284e-04	2.8856e-04	2.1642e-04	1.7313e-04	1.4428e-04

Id	$u_h=0.0167m$ (m/s)	$u_h=0.0333m$ (m/s)	$u_h=0.050m$ (m/s)	$u_h=0.0667m$ (m/s)	$u_h=0.0833m$ (m/s)	$u_h=0.1m$ (m/s)
$C_{L10\_N6\_r01}$	0.0011	1.0949e-04	1.0948e-07	5.4745e-05	5.4742e-08	3.6496e-05
$E_{L10\_N6\_r01}$	1.0950e-04	1.0949e-07	5.4747e-05	5.4745e-08	3.6498e-05	3.6496e-08
$U_{L10}$	7.7814e-04	3.8907e-04	2.5938e-04	1.9454e-04	1.5563e-04	1.2969e-04

**Vedlegg 5.** Hastighet  $u_h$ , hvor  $L = 0.02m$ ,  $N = 6$ ,  $l_1:l_2 = 1:0.8, 1:0.5, 1:0.1$ , og ratio radier konstant  $r_1:r = 1:0.5$

Table: variasjon seksjon lengde  $l_1:l_2 = 1:0.8$ , og holder forhold mellom radier konstant  $r_1:r_2 = 1:0.5$

Id	$u_{h=0.0037m}$ (m/s)	$u_{h=0.0067m}$ (m/s)	$u_{h=0.0104m}$ (m/s)	$u_{h=0.0133m}$ (m/s)	$u_{h=0.0170m}$ (m/s)	$u_{h=0.02m}$ (m/s)
$C_{L2\_N6\_l08}$	0.0049	0.0029	3.3294e-04	0.0014	1.7229e-04	9.5217e-04
$E_{L2\_N6\_l08}$	0.0025	2.9330e-04	0.0012	1.4665e-04	7.9476e-04	9.7768e-05
$U_{L2}$	0.0039	0.0022	0.0014	0.0011	8.4685e-04	7.2139e-04

Id	$u_{h=0.044m}$ (m/s)	$u_{h=0.0067m}$ (m/s)	$u_{h=0.0111m}$ (m/s)	$u_{h=0.0133m}$ (m/s)	$u_{h=0.0178m}$ (m/s)	$u_{h=0.02m}$ (m/s)
$C_{L2\_N6\_l05}$	0.0041	0.0037	4.1062e-04	0.0018	2.1612e-04	0.0012
$E_{L2\_N6\_l05}$	0.0021	2.4886e-04	0.0010	1.2443e-04	6.7041e-04	8.2955e-05
$U_{L2}$	0.0032	0.0022	0.0013	0.0011	8.1157e-04	7.2139e-04

Id	$u_{h=0.0061m}$ (m/s)	$u_{h=0.0067m}$ (m/s)	$u_{h=0.0127m}$ (m/s)	$u_{h=0.0133m}$ (m/s)	$u_{h=0.0194m}$ (m/s)	$u_{h=0.02m}$ (m/s)
$C_{L2\_N6\_l01}$	0.0030	0.0093	8.3646e-04	0.0046	4.8569e-04	0.0031
$E_{L2\_N6\_l01}$	0.0015	1.8703e-04	7.5047e-04	9.3517e-05	4.9979e-04	6.2345e-05
$U_{L2}$	0.0024	0.0022	0.0011	0.0011	7.4394e-04	7.2139e-04