

Innvirkning av fuktighet på dielektriske tap og risiko for partielle utladninger i innstøpte endeviklinger

Eivind Fosse Bere

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Frank Mauseth, ELKRAFT

Medveileder: Sverre Hvidsten, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteroppgave ved sivilingeniørstudiet Energi og Miljø ved NTNU. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng. Masteroppgaven er utarbeidet som et samarbeid mellom NTNU og Smartmotor/Rolls Royce, og er utført våren 2014.

Gjennom arbeidet med oppgaven har jeg hele tiden møtt nye utfordringer, både teoretiske og praktiske. Blant annet viste fremstilling av prøveobjekter av tilstrekkelig god kvalitet seg å være mer tid- og fantasikrevende enn jeg på forhånd antok. Det samme kan nok også sies om mye av laboratoriearbeidet jeg har beskjeftiget meg med. Halvåret har vært preget av tider med frustrasjon og tider med lykke over å ha fått noe til. Gjerne begge deler flere ganger om dagen.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder Frank Mauseth, samt medveileder Sverre Hvidsten, for god og tett oppfølging gjennom hele oppgaveperioden. Hjelpen har aldri vært langt unna.

Jeg ønsker også å takke Børge Noddeland ved Smartmotor for nyttige og gode faglige samtaler underveis. En stor takk rettes også til Torbjørn Andersen Ve og Hans Helmer Sæternes ved Sintef for god hjelp med laboratoriearbeidet.

Til slutt ønsker jeg å takke min kjære Cathrine for oppmuntring og glede i hverdagen.

Sammendrag

Idag er elektrisk fremdrift på skip der motoren blir forsynt med elektrisitet fra gassturbiner eller dieselmotorer vanlig, og slike system finnes i forskjellige størrelser og konfigurasjoner. En kategori propellsystemer er såkalte fritthengende thrustere, der propellen henger under skipet og kan dreies 360 grader. Dersom motoren monteres direkte på propellens aksling kan dette gi flere tekniske fordeler. Dersom motoren innhyller propellen ved å ha stator og rotor på utsiden av denne, har propellen såkalt integrert motor.

I propellsystemer med integrerte motorer kan motoren blant annet innkapsles i polymermateriale. Dette materialet kan fungere både som beskyttelse mot sjøvann og som elektrisk isolasjon for det systemet. Når propellen er nedsenket i vann vil polymeren ta opp vann, og følgelig kan de elektriske egenskapene til denne endre seg. Blant annet kan økte dielektriske tap føre til større varmgang i isolasjonen og endring i risiko for raskere forringelse av denne.

I denne oppgaven ble det støpt forskjellige prøveobjekter i et polymer-materiale, og disse ble så testet. Først ble det laget små diskler av polymeren, og vannopptaket i disse ble målt som funksjon av temperatur og tid nedsenket i vann. Deretter ble det støpt to typer prøveobjekter som ble utsatt for dielektrisk spektroskopi, med spesielt fokus på dielektrisk tapsfaktor $\tan\delta$.

For å simulere en innstøpt endevikling i polymer-materiale ble en PEX-kabel delvis strippet for ytre halvlederkerpe og en innstøpning i polymer ble laget rundt endeavslutningen. Deretter ble objektet plassert i klimaskap ved 95% luftfuktighet og 70°C. Dielektrisk spektroskopi ble gjennomført jevnlig for å se på endringene i tapsfaktoren etter som materialet tok opp vann.

Resultatene viste at polymeren tok opp relativt mye fuktighet, og at fuktinnholdet i masseprosent stabiliserte seg rundt 5%. Dielektrisk spektroskopi viste at den dielektriske tapsfaktoren økte svært mye når materialet tok opp vann. Tapsfaktoren ble spesielt stor ved lave frekvenser rundt 0.1Hz. Den økte tapsfaktoren kan føre til at risikoen for økt varmgang i isolasjonen blir større.

Permittiviteten til materialet økte også relativt mye, men beregninger viste at den elektriske feltstyrken i eventuelle gassfylte hulrom ikke er tilstrekkelig avhengig av disse endringene til at økningen i permittivitet fører til vesentlig større risiko for partielle utladninger i slike hulrom.

Det ble gjennomført måling av tennspenning for partielle utladninger i den innstøpte endeavslutningen før og etter tiden objektet befant seg i klimaskap. Økt fuktighet medførte ingen vesentlig endring i nivået på tennspenningen.

Summary

Today, electric propulsion of ships where the motor is supplied with electricity from gas turbines or diesel generators is common, and such systems are available in various sizes and configurations. A category of propeller systems is so-called free-hanging thrusters, where the propeller hangs under the ship and can be rotated 360 degrees. To mount the motor directly onto the propeller shaft may provide several technical advantages. If the electric motor is enveloping the propeller by having stator and rotor on the outside of the propeller, the system has integrated motor propeller (IMP).

In propulsion systems with IMP, the motor can be partly encapsulated in polymeric materials. This material may serve both as protection against sea water and as electrical insulation of the system. When the propeller is immersed in water the polymer will absorb water, and accordingly the electrical properties of the material may change. Among other things, increased dielectric losses lead to higher heat dissipation in the insulation and hence a greater risk of faster degradation.

During the work on this thesis, different test objects was casted in a polymer material, and the objects were then tested. First, it was made small disks of polymer, and water absorption was measured as a function of temperature and time immersed in water. Then, two types of test objects was casted, and these were subjected to dielectric spectroscopy with special focus on dielectric loss factor $\tan \delta$.

To simulate an end-winding molded in polymeric material, a PEX cable was partially stripped and embedding polymer was made around the end termination. Then, the object was placed in a climate chamber at 95% humidity and 70°C. Dielectric spectroscopy was conducted regularly to see the changes in the loss factor as the material absorbed water.

The results showed that the polymer absorbed relatively high amount of water, and the moisture content in mass percent stabilized around 5%. Dielectric spectroscopy showed that the dielectric loss factor increased very much when the material absorbed water. The loss factor was especially large at low frequencies around 0.1Hz. The increased loss factor leads to a risk of increased heat generation in the insulation.

The permittivity of the material also increased relatively much, but calculations showed that the electric field strength in any spherical cavity is not sufficiently dependent on the changes of the permittivity. Hence, the risk of partial discharges in air-filled, spherical cavities was not increased very much.

It was conducted measurements to find the spark voltage of partial discharges in the casted end termination before and after the period the object was placed in the climate chamber. Increased moisture resulted in no significant change in the level of spark voltage.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Arbeid	2
2	Teori	4
2.1	Dielektriske polymerer	4
2.1.1	Polarisering av dielektrikum	4
2.1.2	Frekvensavhengighet	6
2.1.3	Dielektriske tapsmekanismer	7
2.1.4	Måling og analyse av dielektriske tapsmekanismer	8
2.2	Partielle utladninger	10
2.3	Vannopptak i polymerer	12
2.3.1	Vanddiffusjon i polymerer	12
2.3.2	Beregning av vanninnhold i prosent	12
3	Tilvirkning av prøveobjekter	14
3.1	Polymer-disker med aluminiumselektroder	14
3.1.1	Støpeprosess	14
3.1.2	Pådamning av elektroder	17
3.2	Innstøpt PEX-kabel	19
3.2.1	Guard-elektrode	21
3.2.2	Innstøpt endeavslutning i polymer-materiale	23
3.2.3	Endeavslutning med feltstyring	26
3.2.4	Prøveobjekt for test av overflatekonduktivitet i PEX-kabel	26
4	Eksperimentell metode	27
4.1	Måling av vannopptak i polymer	27
4.1.1	Utstyr	27
4.1.2	Målemetode	27
4.2	Dielektriske resposmålinger med IDA200/IDAX206	29
4.3	Måling av dielektriske egenskaper i polymer-disk	30
4.4	Måling av dielektrisk tapsefaktor $\tan\delta$ i innstøpt kabel	32
4.5	Måling av overflateresistans på strippet PEX-kabel	35
4.6	Måling av tennspenning for partielle utladninger	36

5	Resultater fra eksperimenter	37
5.1	Vannopptak i polymer	37
5.1.1	Vannopptak i 0.5mm tykk polymer-disk ved 30°C	37
5.1.2	Vannopptak i 0.5mm tykk polymer-disk ved 50°C	37
5.2	Dielektrisk respons i endeavslutning innstøpt i polymer	39
5.3	Måling av tennspenning for partielle utladninger	42
5.4	Overflateresistans på strippet PEX-kabel	43
5.5	Permittivitet ved opptak av vann i polymer-disk	44
6	Beregninger basert på resultater fra eksperimenter	45
6.1	Estimering av diffusjonskoeffisient for polymer ved 30°C og 50°C	45
6.2	Estimering av vanninnhold i 4mm tykk polymer ved 70°C	46
6.3	Beregning av elektrisk felt i sfæriske, gassfylte hulrom ved endring i permittivitet	48
7	Diskusjon og konklusjon	50
7.1	Vannopptak i polymer	50
7.2	Innstøpt endeavslutning	51
7.3	Endring i elektrisk felt i hulrom	52
7.4	Feilkilder	52
7.4.1	Måling av vannopptak	52
7.4.2	Dielektrisk spektroskopi på innstøpt endeavslutning	52
7.5	Fremtidig arbeid	53
A	Resultater	I
A.1	Vannopptak i polymer	I
A.1.1	Vannopptak ved 30 grader	I
A.1.2	Vannopptak ved 50 grader	I
A.2	Beregning av C_0 for polymer-disk	II
A.2.1	måling av tykkelse på polymer-disk	II
A.3	Dielektrisk spektroskopi på polymer-disk	III
A.3.1	Tørket disk	III
A.3.2	Disk etter 2 timer i vann ved 50 grader	IV
A.3.3	Disk etter 5 timer i vann ved 50 grader	IV
A.4	Dielektrisk spektroskopi på innstøpt endeavslutning	V
A.4.1	Tørt objekt, 25 grader	V
A.4.2	Tørt prøveobjekt ved 70 grader	VIII
A.4.3	Prøveobjekt etter 3 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XI
A.4.4	Prøveobjekt etter 4 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XIII
A.4.5	Prøveobjekt etter 4 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XIII
A.4.6	Prøveobjekt etter 5 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XVI
A.4.7	Prøveobjekt etter 7 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XIX
A.4.8	Prøveobjekt etter 8 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XXII
A.4.9	Prøveobjekt etter 9 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XXV
A.4.10	Prøveobjekt etter 10 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XXVII
A.4.11	Prøveobjekt etter 11 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet	XXX

B	Matlab-script	XXXIII
B.1	Beregning av prosentmessig vannopptak i polymer og krympemateriale	XXXIII
B.2	Plotting av prosentmessig vannopptak i 4mm tykk polymer	XXXIV

Figurer

1.1	Propell med integrert motor [14]	1
1.2	Prinsippskisse for utført arbeid	3
2.1	Reell og imaginær del av permittivitet som funksjon av frekvens [9]	6
2.2	Metodesammenhengen mellom tidsdomenet og frekvensdomenet [2]	8
2.3	Paschenkurve for luftfylte hulrom	11
3.1	Prinsippskisse for støpeprosess	15
3.2	Støpt polymerdisk uten elektroder	16
3.3	Pådamplingsmaskin klargjort for pådamping av elektroder	17
3.4	Prinsippskisse for pådampede aluminiumselektroder på polymerdisk	18
3.5	Polymerdisk med pådampede elektroder	18
3.6	Prinsippskisse for prøveobjekt med innstøpt PEX-kabel	20
3.7	Strippet kabel med påmalt konduktiv lakk	20
3.8	Guard innsatt med silikonfett	21
3.9	Guard med krympestrømpe	21
3.10	Guard innkleddt med aluminiumsfolie	22
3.11	Prinsippskisse for støpeprosess ved innstøping av endeavslutning i polymer	23
3.12	Innstøpt endeavslutning	24
3.13	Innstøpt endeavslutning	25
3.14	Prøveobjekt med innstøping, guard og feltstyrt ende	26
3.15	Påmalte måleelektroder for måling av overflatekonduktivitet	26
4.1	Prøveobjekter plassert i kolbe	28
4.2	Oppsett av utstyr for vektmåling	29
4.3	Kretsskjema for måleoppsett [10]	31
4.4	Polymer-disk oppkoblet med elektroder for dielektriske målinger	31
4.5	Prinsippskisse for oppsett for måling av dielektrisk respons på polymer-disk	32
4.6	Prinsippskisse for måling av dielektrisk tapsfaktor på innstøpt kabel	33
4.7	Innstøpt prøveobjekt plassert og tilkoblet i klimaskap	34
4.8	Oppsett med Megger BM21 for måling av overflatekonduktivitet	35
5.1	Prosentmessig vannopptak i 0.5mm tykk polymerdisk ved 30 grader	37
5.2	Prosentmessig vannopptak i 0.5mm tykk polymerdisk ved 50 grader	38
5.3	Dielektrisk tapsfaktor i innstøpt endeavslutning ved 25 grader og tørr tilstand	39
5.4	Dielektrisk tapsfaktor i innstøpt endeavslutning ved 70 grader og tørr tilstand	39
5.5	Imaginær kapasitans i innstøpt endeavslutning ved 25 og 70 grader. Spenning: 2kV	40

5.6	Reell kapasitans i innstøpt endeavslutning ved 25 og 70 grader. Spenning: 2kV . . .	40
5.7	Endring i dielektrisk tapsfaktor i polymer-innstøpning gjennom forsøks tiden	41
5.8	Reell og imaginær kapasitans i innstøpt endeavslutning etter 11 døgn ved 70 grader og 95% luftfuktighet	41
5.9	Partielle utladninger i tørt prøveobjekt ved tennspenning på 5.566kV R.M.S.	42
5.10	Partielle utladninger ved tennspenning på 5.450kV R.M.S i prøveobjekt etter 11 dager i klimaskap	42
5.11	Endring i permittivitet ved vannopptak i polymer-disk	44
6.1	Prosentmessig vanninnhold i 4mm tykk polymer nedsenket i vann med diffusjon fra en side	47
6.2	Endring i reell relativ permittivitet i polymer-disk 1 som funksjon av prosentmessig vannopptak	48
6.3	R.M.S elektrisk felt i sfæriske hulrom som funksjon av prosentmessig fuktopptak ved 2.2kV og 6mm tykk polymer	49
A.1	Prinsippskisse for tykkelsesmåling av PU-disk	II

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Elektrisk fremdrift med generatorer drevet av gassturbiner eller dieselmotorer er idag i bruk i hundrevis av skip av varierende størrelser og konfigurasjoner. Muligheten til å kontrollere elektriske motorer med variabel hastighet med kompakte, pålitelige og kostnadseffektive løsninger førte til at bruken av elektrisk fremdrift dukket opp i flere og nye applikasjoner gjennom 80- og 90-tallet [15]. Introduksjonen av fritthengede thrustere (azimuth thrustere) har gjort det mulig å optimalisere prestasjonene med tanke på blant annet manøvrerbarhet og dynamisk posisjonering. Dersom den elektriske motoren er direkte montert på propellens aksling, kalles dette poddet fremdrift. Disse systemene kan blant annet konstrueres med integrert motor. En propell med integrert motor (IMP) består av en innhyllet propell der rotoren på en elektrisk motor ligger på utsiden av selve rotoren, se figur 1.1



Figur 1.1: Propell med integrert motor [14]

Rotorens kjerne er hermetisk forseglet eller innkapslet i et polymer-materiale. Statoren er innkapslet i statorhuset som vanligvis enten består av sveiset metall eller innkapsling i polymer. IMP-propeller har flere fordeler i forhold til vanlige propellsystemer [13]:

- Dynamisk akseltetning kan elimineres, hvilket betyr at kun statiske tetninger er nødvendig for kraft- og signalkabler.
- Motorens skyvekraftslager behøver ikke motstå dybdetrykket og skyvekraftslasten.
- Motoren utnytter effektivt passiv sjøvannskjøling slik at aktive kjølesystemer og/eller varmevekslere ikke er nødvendig.
- Sjøvann kan benyttes som lagersmøring slik at systemer for oljesmøring ikke er nødvendig.
- Enkelte IMP-propeller har ikke noen sentral aksling, hvilket gjør vannstrømmingene jevnere. Dette er fordelaktig i forhold til effektivitet, støynivå og vibrasjoner.
- Påliteligheten øker og vedlikeholdskostnadene er mindre.

Smartmotor og Rolls-Royce utvikler en thruster-modell som benytter seg av innkapslingsteknologi basert på polymerer. I deler av den elektriske motoren vil innkapslingspolymeren være utsatt for både elektriske og termiske påkjenninger. Polymeren som blir brukt til innkapslingen må fungere både som en del av det elektriske isolasjonssystemet i motoren samt som beskyttelse mot sjøvann. Når polymeren er omgitt av vann vil dette diffundere inn i materialet, noe som kan forandre de elektriske isolasjonsegenskapene. I denne oppgaven er det blitt valgt å fokusere på endringene i de dielektriske egenskapene til polymeren ved vannopptak.

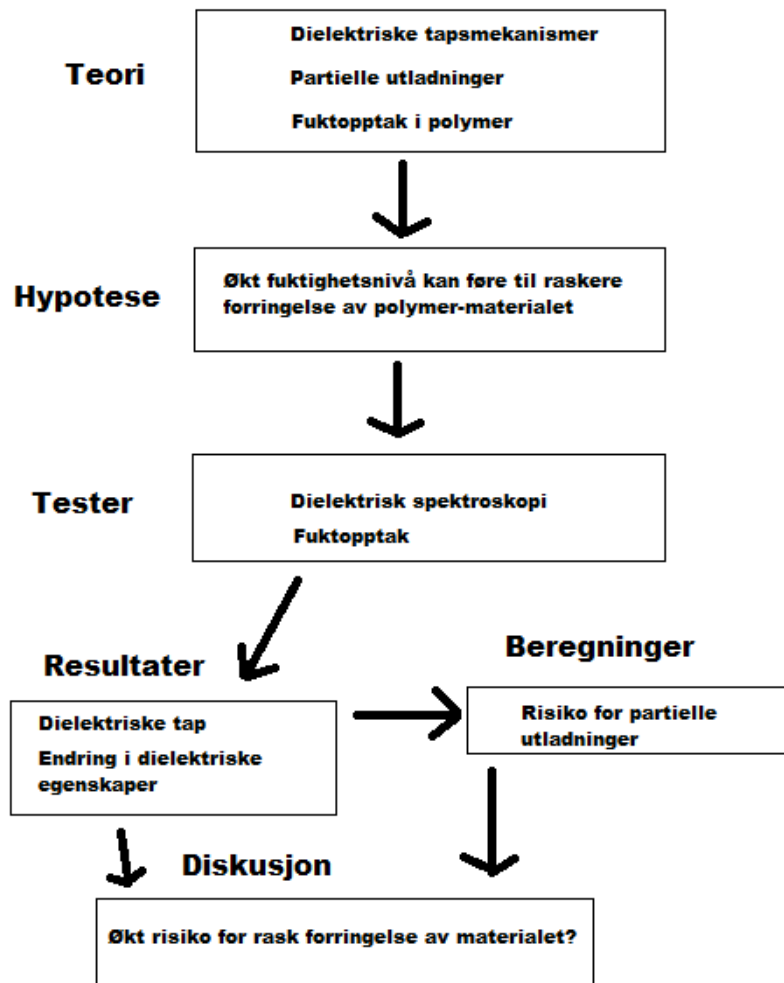
1.2 Arbeid

Arbeidet i denne oppgaven kan deles inn i 6 bolker:

- **Støping av prøveobjekter:** For å få gjennomført de ulike målingene ble det laget to forskjellige prøveobjekter. Først ble det støpt runde, tynne disker av polymeren, og deretter ble en endeavslutning på en PEX-kabel støpt inn i polymer. Det siste ble gjort for å delvis kunne simulere deler av en innstøpt endevikling på en motor.
- **Måling av fuktopptak:** For å kunne bestemme de dielektriske egenskapene til materialet som funksjon av fuktighetsnivå, ble det utført fuktopptaksmålinger der fuktinnhold i masseprosent ble funnet som funksjon av tid nedsenket i vann. Resultatene fra dette arbeidet ble senere benyttet som beregningsmateriale for å estimere fuktighetsnivået over tid ved forskjellige temperaturer og tykkelser av materialet.
- **Dielektrisk spektroskopi av polymer-disker:** For å kvantifisere endringene i de dielektriske egenskapene til materialet etter som det tar opp vann, ble det utført dielektrisk spektroskopi. Deler av dette arbeidet utgjør beregningsgrunnlaget for estimering av spenningsnivåene som vil medføre partielle utladninger i hulrom i polymerene, hvilket er en mekanisme som kan medføre sammenbrudd i isolasjonen.
- **Dielektrisk spektroskopi av innstøpt endeavslutning:** Ble gjennomført for å undersøke i hvilken grad de dielektriske tapene ved høy spenning endrer seg ved økt fuktighetsnivå. Dielektriske tap virkeliggjør seg som varmgang i isolasjonsmaterialet, og dersom tapene er for store kan dette føre til forringelse og ødeleggelse av materialet.

- **Måling av tennspenning for partielle utladninger i innstøpt endeavslutning** ble utført for å sikre at testspenningen ved dielektrisk spektroskopi var lav nok til å unngå at partielle utladninger hadde innvirkning på de målte verdiene. I tillegg ble det gjennomført en måling for å undersøke om tennspenningen ble påvirket av fuktinnhold i polymeren.
- **Beregninger** Det ble utført forskjellige beregninger for å estimere grensespenninger for partielle utladninger i hulrom av ulike størrelser. Dersom permittiviteten til isolasjonsmaterialet endrer seg ved økt fuktighetsnivå vil dette også føre til endringer i hvor stor spenning som skal til for å igangsette utladninger i hulrom. I tillegg ble det utført beregninger for å finne hastigheten til fuktopptaket i polymeren ved ulike temperaturer.

Figur 1.2 viser er prinsippskisse for oppgavens oppbygning:



Figur 1.2: Prinsippskisse for utført arbeid

Kapittel 2

Teori

2.1 Dielektriske polymerer

Tradisjonelt sett ble uorganiske og keramiske materialer benyttet som dielektriske materialer. Fra 1960-tallet ble bruk av polymerer som dielektrisk materiale mer vanlig [6]. Fordeler med å benytte polymerer er høy fleksibilitet, enkel prosessering, god kjemisk stabilitet og lett tilpasselige egenskaper. Hovedulempen er en noe lavere termisk stabilitet [6]. Mekanismen som bidrar til å bestemme materialets dielektriske egenskaper er sammenhengen mellom elektrisk felt og polariseringen i materialet.

2.1.1 Polarisering av dielektrikum

Et dielektrikum er karakterisert ved sin dielektriske konstant ϵ som relaterer den elektriske flukstettheten D til det elektriske feltet E ved ligning (2.1) [9]:

$$D = \epsilon E \quad (2.1)$$

Der ϵ er produktet av permittiviteten til vakum $\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12}$ og dielektrikumets relative dielektriske konstant ϵ_r . Denne sammenhengen er vist i ligning (2.2)

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.2)$$

Permittivitet ϵ uttrykker materialet sin evne til å la seg polarisere når det blir utsatt for et elektrisk felt [6]. Den dielektriske konstanten ϵ_r uttrykker forholdet mellom permittiviteten til et material og permittiviteten til vakum. Dette betyr at jo større grad av polarisering som oppstår når et material blir utsatt for et elektrisk felt, jo større vil den dielektriske konstanten være. Det er fire mekanismer som bidrar til polariseringen av et materiale [9]:

- **Elektronisk polarisering** oppstår når et elektrisk felt får elektronene i elektronskyen rundt atomkjernene til å forskyve seg slik at disse blir mer konsentrert på den ene siden av kjernen. Resultatet er da en midlertidig induert dipol som er proporsjonal med det påsatte elektriske feltet. Elektronisk polarisering er en svært rask reaksjon som forsvinner nesten umiddelbart når det elektriske feltet forsvinner [9].

- **Ionisk polarisering** oppstår i ionisk bundne materialer. Disse materialene består av et gitter av positive og negative ioner som på grunn av sin symmetriske plassering totalt sett ikke har noen dipol. Når et elektrisk felt påvirker ionegitteret vil krefter virke på ionene slik at positive og negative ioner blir dratt i hver sin retning. Dette fører til forstyrrelser i gitteret og dannelse av midlertidige dipoler. Effekten av ionisk polarisering forsvinner raskt hvis det elektriske feltet forsvinner.
- **Molekylær polarisering** oppstår i materialer som inneholder molekyler som har en usymmetrisk fordeling av elektroner. Disse kalles permanente dipoler (for eksempel vann) [9]. Dersom det ikke eksisterer noe ytre påtrykt elektrisk felt, vil dipolene stå i tilfeldige retninger. Dersom et elektrisk felt blir påtrykt, vil dipolene rette seg etter dette feltet. Det kan vises teoretisk at den molekylære polariseringen i væsker og gass vil være proporsjonal med det påsatte feltet og omvendt proporsjonal med temperaturen. I faste materialer der dipolene ikke kan bevege seg fritt har denne sammenhengen vist seg vanskeligere å fastslå [9].
- **Grenseflatepolarisering** oppstår i urenheter og hulrom i materialet. Når et elektrisk felt blir påtrykt et materiale kan frie ladninger komme til å bevege seg til grenseflater i materialet og akkumulere opp positiv og negativ ladning på hver side av disse.

Et påtrykt elektrisk felt vil få dipolene i et materiale til å rette seg etter dette feltet. Hvor fort dette skjer, avhenger av hvilken polariseringsmekanisme som dominerer [9]. Elektronisk polarisering og ionisk polarisering kan for alle praktiske formål antas å skje momentant [9]. Disse mekanismene kan sammenfattes i uttrykket for momentan polarisering P_m gitt i ligning (2.3):

$$P_m = P_e + P_i = \epsilon_0 \chi_m E \quad (2.3)$$

Der P_m er den momentane polariseringen, P_e er det elektroniske polariseringsbidraget, P_i er det ioniske polariseringsbidraget og χ_m er den momentane dielektriske susceptibiliteten.

Molekylær polarisering og grenseflatepolarisering er trege mekanismer som kan bidra til tap og variasjoner i relativ permittivitet ϵ_r med frekvens. Mekanismene er også sterkt temperaturavhengige og blir kalt relaksasjonsmekanismer [9]. Dersom et dielektrikum kun har én relaksasjonsmekanisme $P_d(t)$, kan den totale polariseringen $P(t)$ gis ved ligning (2.4) [9]:

$$P(t) = P_m + P_d(t) \quad (2.4)$$

Polariserbarhet kan uttrykkes kvantitativt ved hjelp av Clausius-Mossottis ligning (2.5) [6]:

$$P = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} * \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} \quad (2.5)$$

Der P er molar polariserbarhet, M er molekylær vekt av den gjentakende delen av polymerkjeden, ρ er tetthet, α er polariserbarhet og N_A er Avogrados konstant. Sammenhengen til Clausius-Mossottis ligning viser at den dielektriske konstanten ϵ_r avhenger av av polariserbarhet og fritt volum mellom komponentene tilstede i materialet. Fritt volum er definert som det volumet i materialet som ikke består av av polymer.

Polariserbarhet α er en proporsjonalitetskonstant som er forskjellig fra atom til atom og molekyl til molekyl. Denne angir i hvilken grad det blir dannet dipoler når materialet blir påsatt elektrisk felt [6]. Forholdet mellom dielektrisk konstant og polariserbarhet er gitt ved ligning (2.6):

$$\epsilon_r = 1 + \frac{N\alpha}{\epsilon_0} \quad (2.6)$$

2.1.2 Frekvensavhengighet

Dersom et påsatt elektrisk felt er tidsvarierende, vil dipolene i materialet skifte retning. Ved lave frekvenser vil dipolene ha tid til å følge med det varierende feltet, men ved høyere frekvenser vil ikke dette skje. Effekten av dette er reduksjon i polariseringen og følgelig reduksjon i den relative permittiviteten ved høyere frekvenser [9]. Dersom det elektriske feltet gitt ved ligning (2.7) påtrykkes, og vektoren \underline{E} blir valgt reell, vil den elektriske flukstettheten $D(t)$ være faseforsinket med fasevinkel δ bak det elektriske feltet som vist i ligning (2.8) [9].

$$E(t) = \sqrt{2}E\cos(\omega t) = \text{Re}[\sqrt{2}Ee^{j\omega t}] \quad (2.7)$$

$$D(t) = \sqrt{2}D\cos(\omega t - \delta) = \text{Re}[\sqrt{2}De^{j\omega t}] \quad (2.8)$$

Den elektriske flukstetthetsens vektor \underline{D} er gitt ved ligning (2.9):

$$\underline{D} = D e^{-j\delta} = \epsilon_0 \underline{E} + \underline{P} = \epsilon_r^* \epsilon_0 \underline{E} \quad (2.9)$$

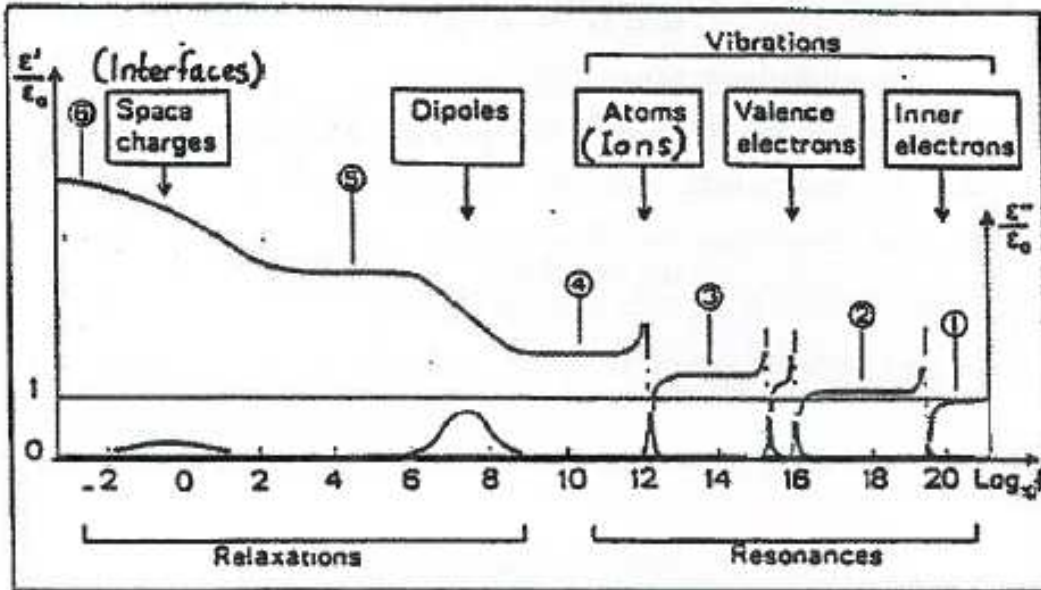
Der ϵ_r^* er den komplekse permittiviteten. Denne kan uttrykkes ved ligning (2.10):

$$\epsilon_r^* = \frac{D\cos\delta}{\epsilon_0 E} - j \frac{D\sin\delta}{\epsilon_0 E} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.10)$$

Den dielektriske tapsfaktoren $\tan\delta$ er dermed gitt ved ligning (2.11):

$$\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sin\delta}{\cos\delta} = \tan\delta \quad (2.11)$$

De fleste dielektriske materialer vil inneha flere polariseringsmekanismer. Disse har forskjellige frekvensresponser, og følgelig vil permittiviteten til et dielektrikum variere med frekvensen til det påtrykte feltet. Når frekvensen øker vil flere polariseringsmekanismer ikke være i stand til å følge feltendringen. Dette medfører et fall i ϵ' og variasjoner i ϵ'' , se figur 2.1 [9].



Figur 2.1: Reell og imaginær del av permittivitet som funksjon av frekvens [9]

2.1.3 Dielektriske tapsmekanismer

Det er flere ulike mekanismer som bidrar til tap i et isolasjonsmateriale. Disse kan være [11]:

- **Konduktive tap** finnes i alle dielektriske materialer. Konduktiviteten fører til at små lekkasjestrømmer går igjennom materialet. Konduktiviteten er blant annet avhengig av fuktighet og temperatur i omgivelsene [11].
- **Molekylære polariseringstap** som beskrevet i avsnitt 2.1.1. Dette oppstår typisk i frekvensområdet $10^6 - 10^{10} Hz$ [9].
- **Tap ved grenseflatepolarisering** som beskrevet i avsnitt 2.1.1. Dette oppstår typisk i frekvensområdet $0 - 10^7 Hz$ [9]. Sammen med de molekylære polariseringstapene kalles disse ofte relaksjonsmekanismer.
- **Partielle utladninger** kan påvirke målingene av den dielektriske tpsfaktoren $\tan\delta$ dersom testspenningen er høyere enn tennspenningen for partielle utladninger i testobjektet. Målte dielektriske tap som stammer fra partielle utladninger er spenningsavhengige og ikke frekvensavhengige slik som de andre nevnte tapsmekanismene [11]. Partielle utladninger er forøvrig videre beskrevet i avsnitt 2.2.

Når dielektriske tap måles ved vekselspanning er det umulig å skille mellom polariseringstap og tap som skyldes dielektrikumets konduktivitet [9]. Det er derfor vanlig praksis å angi alle tap med en resulterende $\tan\delta$. Tapene p som fører til varmgang er gitt ved ligning (2.12) [9]:

$$p = \omega\epsilon'_r\epsilon_0\tan\delta * E^2 \quad (2.12)$$

$\tan\delta$ er her gitt ved ligning (2.13):

$$\tan\delta = \tan\delta_1 + \frac{\sigma}{\omega\epsilon'_r\epsilon_0} \quad (2.13)$$

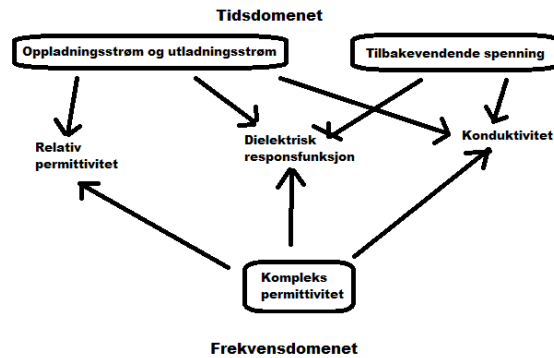
Permittiviteten ϵ_r og tpsfaktoren $\tan\delta$ varierer begge med frekvens og temperatur. Konduktiviteten σ er også svært temperaturavhengig. Dersom $\sigma \neq 0$ vil $\tan\delta \rightarrow \infty$ når $\omega \rightarrow 0$. Følgelig vil deler av tpsfaktoren være omvendt proporsjonal med frekvensen [9].

2.1.4 Måling og analyse av dielektriske tapsmekanismer

Diagnostiserende målinger på dielektriske materialer kan utføres enten i tidsdomenet eller i frekvensdomenet. I tidsdomenet benyttes målinger av oppladningsstrøm og utladningsstrøm samt tilbakevendende spenning, mens i frekvensdomenet blir kapasitans og tpsfaktor målt som funksjon av frekvens [2].

Metoder som benytter målinger i frekvensdomenet påtrykker prøveobjektet et sinusvarierende elektrisk felt. En vesentlig fordel med å benytte denne metoden er at den målte strømmen relativt enkelt kan filtreres for å fjerne eventuell støy [1]. Dette er fordi kun en spesiell frekvens og eventuelt et lite spekter av harmoniske av denne frekvensen trenger å måles. En ulempe ved bruk av målinger i frekvensdomenet sammenlignet med målinger i tidsdomenet er at målinger ved lave frekvenser er relativt tidskrevende. På den annen side vil støyen i målingene være vesentlig redusert ved målinger i frekvensdomenet [1].

Figur 2.2 viser sammenhengen mellom de forskjellige metodene og de karakteriserende parameterene:



Figur 2.2: Metodesammenhengen mellom tidsdomenet og frekvensdomenet [2]

Når et dielektrikum blir polarisert kan det forventes at den elektriske feltintensiteten i materialet er forskjellig fra hva det ville vært i fri luft. På grunn av dette blir den elektriske flukstettheten $D(t)$ definert ved ligning (2.14)

$$D(t) = \epsilon_o E(t) + P(t) \quad (2.14)$$

Der $P(t)$ er den elektriske polariseringen. Denne kan deles i to deler som vist i ligning (2.4). Polariseringsen som stammer fra relaksasjonsmekanismene $P_d(t)$ er her definert ved ligning (2.15) [2]:

$$P_d(t) = \epsilon_o \int_0^t f(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (2.15)$$

Der $f(t)$ er den dielektriske responsfunksjonen som har følgende karakteristikk:

$$f(t) \equiv 0 \forall t < 0 \quad (2.16)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0 \quad (2.17)$$

Gitt ligning (2.4) og (2.15) kan strømtettheten gjennom et dielektrisk materiale defineres ved ligning (2.18) [2]:

$$j(t) = \sigma E(t) + \epsilon_o \frac{d}{dt} \left\{ \epsilon_r E(t) + \int_0^t f(\tau) E(t - \tau) d\tau \right\} \quad (2.18)$$

Ligning (2.18) viser at et dielektrisk materiale kan karakteriseres ved konduktivitet σ , relativ permittivitet ϵ_r og den dielektriske responsfunksjonen $f(t)$ for et vilkårlig elektrisk felt $E(t)$. Denne ligningen beskriver alle målemetoder som baserer seg på tidsdomenet [2].

I frekvensdomenet blir kun tidsharmoniske elektriske felt studert. Dette betyr at ligning (2.18) kan skrives som ligning (2.19):

$$\hat{j}(\omega) = i\omega\epsilon_0 \left\{ \epsilon_r + \hat{\chi}'(\omega) - i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} + \hat{\chi}''(\omega) \right) \right\} \hat{E}(\omega) \quad (2.19)$$

Der $\chi(\omega)$ er den dimensjonsløse frekvensavhengige elektriske susceptibilitet. Ved målinger kan også eventuelle partielle utladninger bidra til strøm gjennom dielektrikumet. Dette kan da legges til ligning (2.19) som vist i ligning (2.20) [11]:

$$\hat{j}(\omega) = i\omega\epsilon_0 \left\{ \epsilon_r + \hat{\chi}'(\omega) - i \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} + \hat{\chi}''(\omega) \right) \right\} \hat{E}(\omega) + \hat{j}_{PD}(U) \quad (2.20)$$

Der $\hat{j}_{PD}(U)$ er den spenningsavhengige strømmen som følger av partielle utladninger. Sammenhengen mellom reell og imaginær del av susceptibiliteten finnes i Kramer-Kronigs relasjon, og denne relasjonen kan benyttes til å kontrollere målte signaler. I frekvensdomenet tilsvarer den elektriske susceptibiliteten den dielektriske responsfunksjonen i tidsdomenet, og denne beskriver hvordan relaksasjonsmekanismene i dielektrikumet oppfører seg i et påtrykt elektrisk felt. Når frekvensen blir så høy at relaksasjonsmekanismene ikke klarer å følge det påtrykte elektriske feltet, blir polariseringen av materialet redusert, og følgelig reduseres også den relative permittiviteten. Dette kan uttrykkes ved faseforskjellen δ gitt i ligning (2.21) når \underline{E} antas reell [9]:

$$\underline{D}(\omega) = D(\omega) * e^{-j\delta} = \epsilon_0 \underline{E}(\omega) + \underline{P}(\omega) = \epsilon_0 \underline{\epsilon}_r \underline{E}(\omega) \quad (2.21)$$

Den relative permittiviteten er uttrykt ved elektrisk susceptibilitet og materialet konduktivitet som vist i ligning (2.22)

$$\underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon'_r(\omega) - j\epsilon''_r(\omega) = \chi'(\omega) - j \left(\chi''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \quad (2.22)$$

Faseforskjellen mellom elektrisk felt og elektrisk flukstetthet fører til at den relative permittiviteten kan sees på som en kompleks størrelse. Den dielektriske tapsfaktoren $\tan\delta$ som er definert i ligning (2.11) som forholdet mellom imaginær og reell permittivitet kan videre defineres ved ligning (2.23):

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} = \frac{\epsilon''_r(\omega)}{\epsilon_r(\omega) + \chi'(\omega)} = \frac{\epsilon''_r(\omega)}{\epsilon_r(\omega) + \Delta\epsilon'(\omega)} \quad (2.23)$$

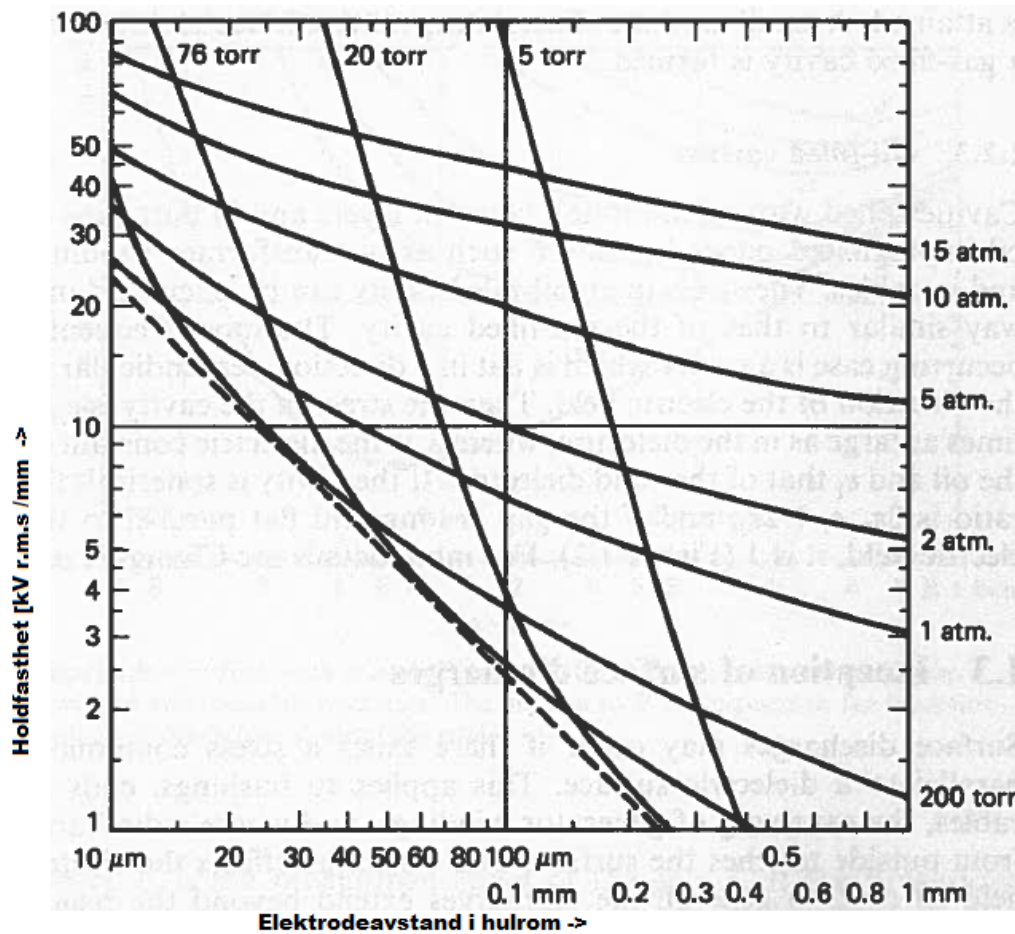
En fysisk beskrivelse av $\tan\delta$ er at den beskriver forholdet mellom tapt og lagret energi per periode med sinusvarierende påtrykt elektrisk felt.

2.2 Partielle utladninger

Elektriske utladninger som ikke danner en fullstendig bro mellom elektrodene kalles partielle utladninger. Størrelsen på slike utladninger er vanligvis små, men de forårsaker gradvis svekkelse og kan til slutt forårsake fullstendig svikt i isolasjonen [12]. Partielle utladninger deles inn i fire hovedkategorier:

- Interne partielle kortslutninger.
- Overflateutladninger.
- Corona-utladninger.
- Utladninger i elektriske tredannelser.

I det følgende behandles kun interne partielle utladninger, da kun disse er gjenstand for beregninger i denne oppgaven. Interne partielle utladninger oppstår i hulrom eller partikler som blir liggende inne i isolasjonsmaterialet. I gassfylte hulrom vil tennspenningen, som er den laveste spenningen der partielle utladninger oppstår, avhenge av det elektriske feltet i hulrommet samt den elektriske holdfastheten til hulrommet [12]. Holdfastheten i et hulrom avhenger av dimensjonene på hulrommet samt gasstypen og gasstrykket i dette. Figur 2.3 viser holdfastheten for luftfylte hulrom:



Figur 2.3: Paschenkurve for luftfylte hulrom

Dersom partikler blir liggende inne i isolasjonsmaterialet og disse har lavere holdfasthet enn isolasjonsmaterialet, kan det forekomme utladninger i disse. Dette kan utvikle gass, som det igjen vil forekomme utladninger i dersom feltstyrken er høy nok.

Dersom diameteren til et gassfylt sfærisk hulrom er vesentlig mye mindre enn avstanden mellom elektrodene, kan den elektriske feltstyrken E_h i boblen beregnes med ligning (2.24) [9]:

$$E_h = \frac{3\epsilon_r}{1 + 2\epsilon_r} E \quad (2.24)$$

Der E er feltstyrken i isolasjonmaterialet uten hulrom og ϵ_r er den relative permittiviteten til isolasjonsmaterialet. Ligning (2.24) viser at den elektriske feltstyrken i boblen vil variere dersom den relative permittiviteten til isolasjonsmaterialet varierer. Sammen med Paschenkurven i figur 2.3 kan dette benyttes til å estimere holdfastheten til et isolasjonsmateriale med en gitt sfærisk boblestørrelse når trykket i boblen er kjent.

2.3 Vannopptak i polymerer

2.3.1 Vanddiffusjon i polymerer

Diffusjon av vann eller andre fluider i et fast material er beskrevet av Ficks to lover [7]. Ficks første lov, gitt i ligning (2.25), sier at ved stabil tilstand vil vannfluksen J [g/mm^2] gjennom materialet være proporsjonalt med gradienten til vannkonsentrasjonen [g/mm^3]:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.25)$$

Der C er vannkonsentrasjonen i materialet og D er en diffusjonskoeffisient. Ficks andre lov er gitt ved ligning (2.26):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.26)$$

Dersom en tynn film av et materiale nedsenkes i vann, og utstrekningen i y og z retning kan ansees å være uendelig mye større enn i x retning, kan grensebetingelsene for en løsning av ligning (2.26) gis ved (2.27) og (2.28) [8]:

$$C(x=0) = C(x=l) = C_1 \quad (2.27)$$

$$C(0 < x < l) = C_0 \quad (2.28)$$

Der l er filmens tykkelse, C_1 er konsentrasjonen på begge sider av filmen og C_0 er initiell konsentrasjon i filmen. Dersom Ficks andre lov løses med hensyn på disse grensebetingelsene er en løsning gitt ved ligning (2.29):

$$\frac{C - C_0}{C_1 - C_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{l}\right) \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right) \quad (2.29)$$

For å finne total mengde vann m_t som har diffundert inn i materialet etter tiden t kan ligning (2.29) integreres over filmens tykkelse [8]. Forholdet mellom m_t og mengden vann m_∞ som etter uendelig tid har diffundert inn i materialet er gitt ved den dimensjonsløse parameteren G , som gitt i ligning (2.30):

$$G = \frac{m_t}{m_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{l^2}\right) \quad (2.30)$$

G kan forenkles til ligning (2.31):

$$G = 1 - \exp\left(-7.3\left(\frac{Dt}{l^2}\right)^{\frac{3}{4}}\right) \quad (2.31)$$

Der D er en diffusjonskoeffisient. Denne ligningen er aproksimasjon for en tynn film med tykkelse l der vannet diffunderer inn fra begge sider.

2.3.2 Beregning av vanninnhold i prosent

Vanninnhold i et materiale i prosent kan beregnes fra ligning (2.32).

$$v\% = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (2.32)$$

Der $v\%$ er vanninnhold i materialet, m_1 er materialets vekt i tørket tilstand, og m_2 er materialets vekt i fuktet tilstand.

Kapittel 3

Tilvirkning av prøveobjekter

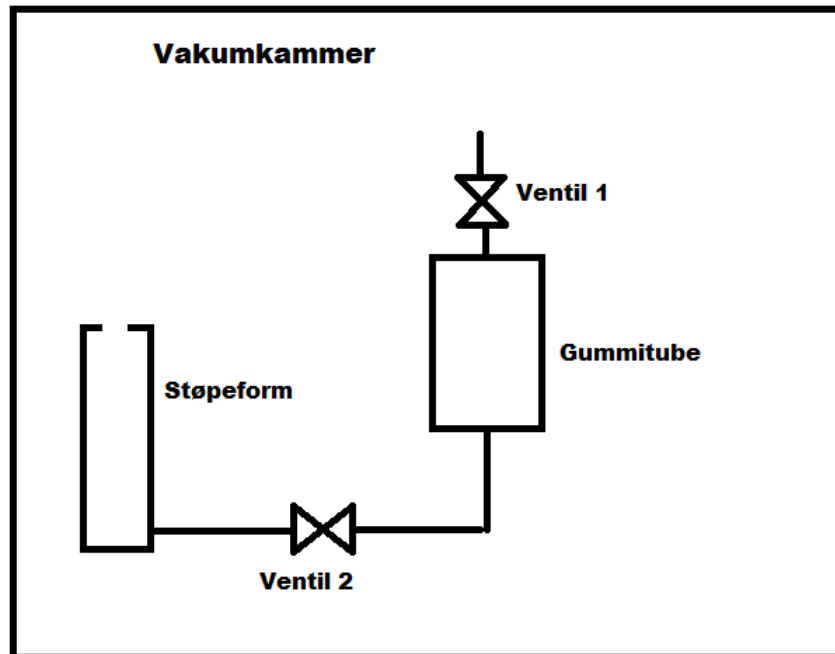
3.1 Polymer-disker med aluminiumselektroder

3.1.1 Støpeprosess

Utstyr

- Resin
- Herder
- Plastbeger
- Gummislanger
- Gummitube
- Støpemaskin: KLM Rapid prototyping systems V1000s
- Støpeform

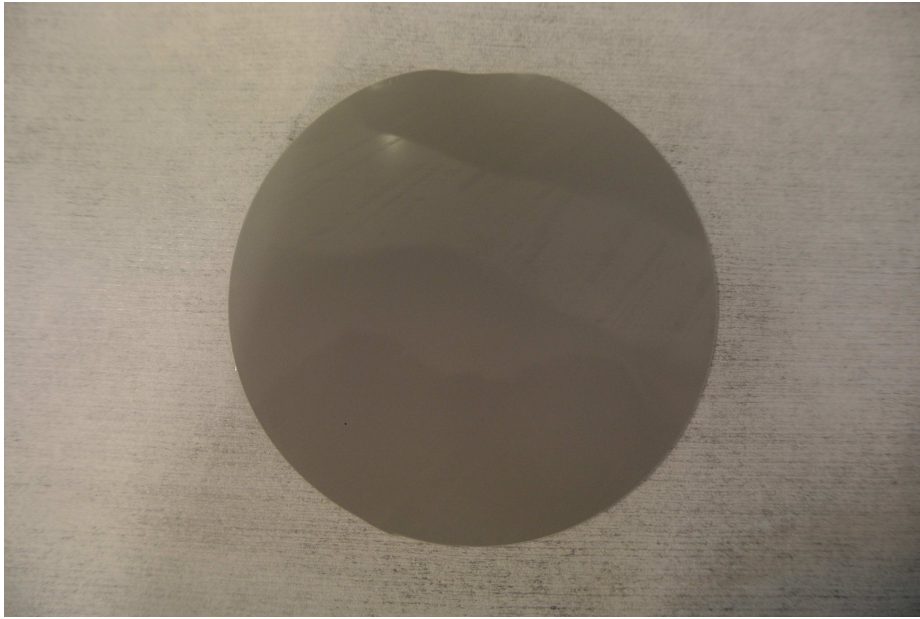
Det ble støpt runde prøveobjekter med diameter på 100mm og tykkelse på 0,5mm. Avgassing og blanding av komponentene ble utført i vakum. Deretter ble overtrykk benyttet til å fylle støpeformen.



Figur 3.1: Prinsippskisse for støpeprosess

Resin og herder ble avgasset, blandet og fylt i gummituben maskinelt i vakum med ventil 1 åpen og ventil 2 lukket. Se figur 3.1. Deretter ble trykket i kammeret økt til 500 mbar. Ventil 1 ble så lukket, før trykket igjen ble senket til vakum. Dette medførte et overtrykk i gummituben, slik at når ventil 2 ble åpnet, ble isolasjonen dyttet ut i støpeformen på grunn av trykkforskjellen. Når støpeformen var full, stengtes ventil 2. Deretter ble formen stående til herding i vakum i 24 timer.

Det viste seg å være krevende å oppnå et godt resultat uten bobledannelser i materialet. Spesielt viste det seg å være veldig viktig å la resin og herder avgasse i vakum i lang nok tid på forhånd før selve støpingen ble igangsatt. I tillegg var det viktig å la eksponeringstiden i luft være så kort som mulig når overtrykket skulle settes i gummituben. Figur 3.2 viser en ferdig støpt polymerdisk.



Figur 3.2: Støpt polymerdisk uten elektroder

3.1.2 Pådamping av elektroder

Utstyr

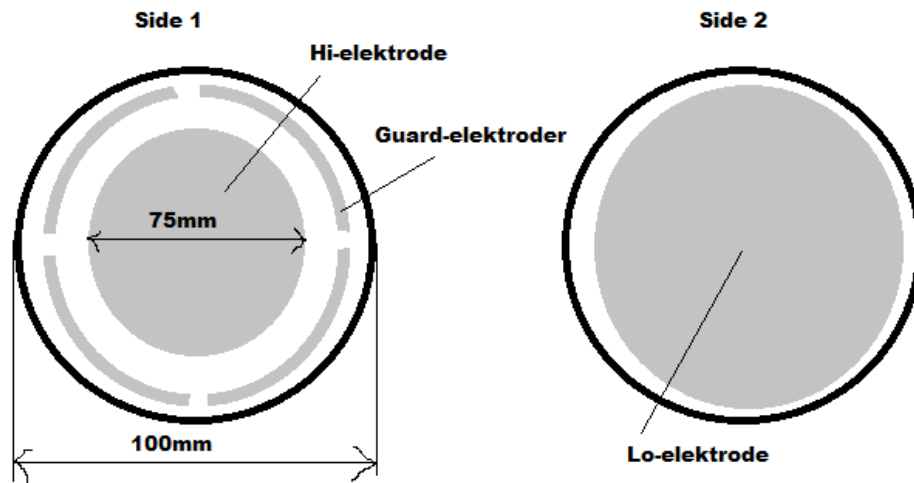
- Pådampingsmaskin: JEOL JEE-4x vacuum evaporator
- Foringer
- aluminiumsbit
- polymerdisk

For å kunne gjennomføre nøyaktige målinger på de støpte polymerdiskene er det nødvendig å legge på tynne elektroder. Dette ble gjort ved hjelp av pådampingsmaskinen vist i figur 3.3.



Figur 3.3: Pådampingsmaskin klargjort for pådamping av elektroder

Det ble dampet på elektroder på polymerdisken som vist i prinsippkisse 3.4:



Figur 3.4: Princippskisse for pådampede aluminiumselektroder på polymerdisk

Figur 3.5 viser side 1 av en ferdig pådampet polymerdisk.



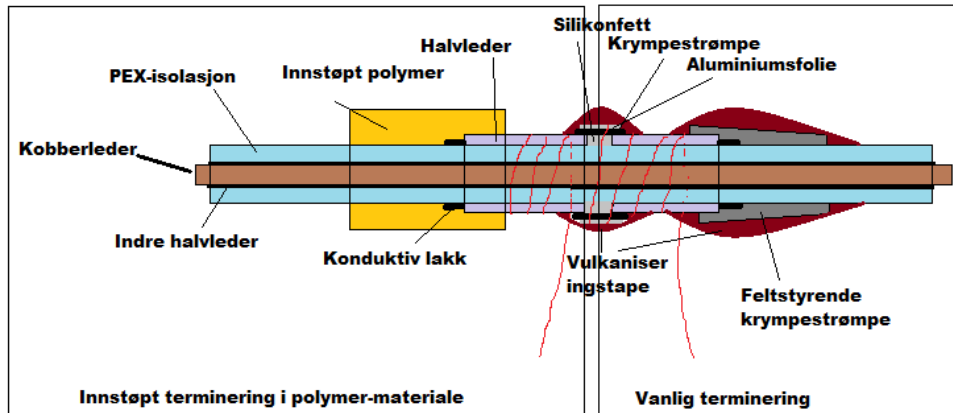
Figur 3.5: Polymerdisk med pådampede elektroder

3.2 Innstøpt PEX-kabel

Utstyr

- 90cm lang 95mm² kobberkabel med PEX-isolasjon og helvulket halvlederlappe.
- Kabelstripper
- Firkantfil
- P800 slipepapir
- Silikonfett
- Krympestrømpe
- Varmepistol
- Aluminiumsfolie
- Metallstreng
- Herder
- Resin
- Plastbeger
- Gummislanger
- Gummitube
- Støpemaskin: KLM Rapid prototyping systems V1000s
- Støpeform
- Feltstyrende duk
- Vulkaniserende tape
- Små spiker

Prinsippskissen for prøveobjektet er vist i figur 3.6:



Figur 3.6: Prinsippskisse for prøveobjekt med innstøpt PEX-kabel

En 90cm lang 95mm² kobberkabel med PEX-isolasjon og helvulket halvlederkappe ble strippet for halvleder fra begge sider slik at det gjenstod 20cm på midten som fremdeles var dekket med halvleder. Overgangene mellom område med halvleder og uten ble påmalt konduktiv lakk fra enden av halvleder og 1cm ut på PEX-materialet, se figur 3.7.



Figur 3.7: Strippet kabel med påmalt konduktiv lakk

3.2.1 Guard-elektrode

For å kun måle effektene i den innstøpte enden som vist på figur 3.6, ble det laget en guard på midten av halvlederområdet som gjør det mulig å utelukke strømmene fra den feltstyrte enden av kablen. Dette ble gjort ved å fjerne halvlederen inn til PEX-isolasjonen i et ca 5mm bredt område og fylle hulrommet med silikonfett som vist på figur 3.8.

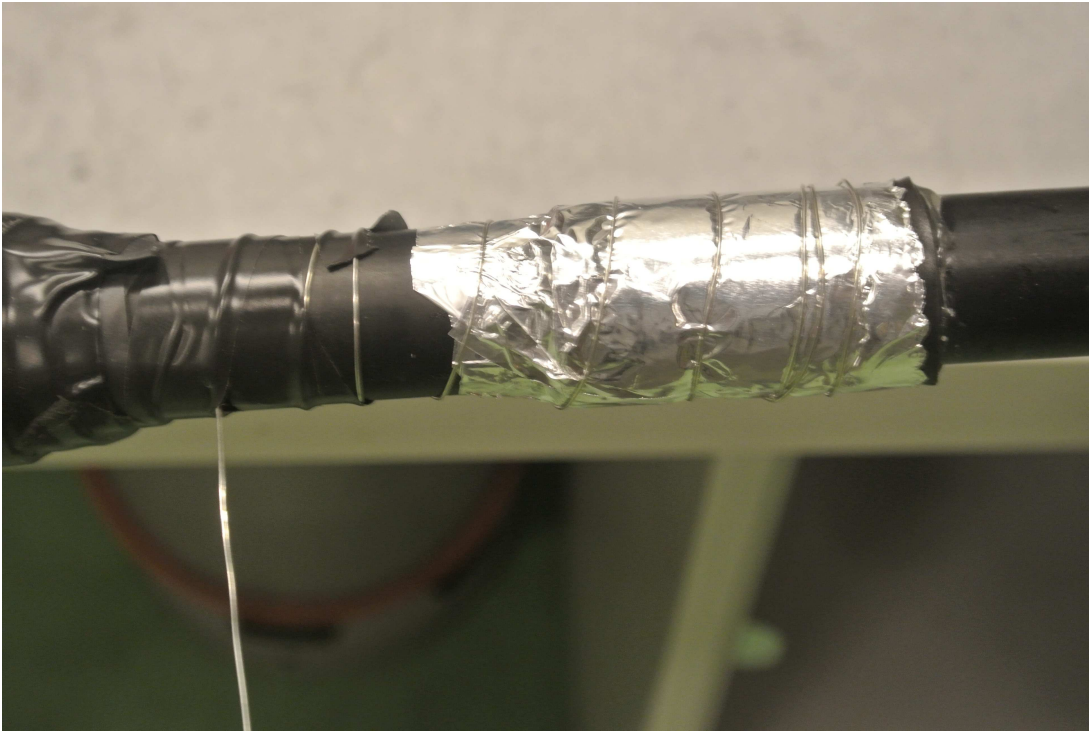


Figur 3.8: Guard innsatt med silikonfett

Deretter ble det lagt en krympestrømpe innkledd med aluminiumsfolie over området som vist på figurene 3.9 og 3.10. Tråd ble surret rundt aluminiumen som en del av guard-elektroden. Til slutt ble det lagt på vulkaniserende tape for å skape trykk mellom overflatene.



Figur 3.9: Guard med krympestrømpe

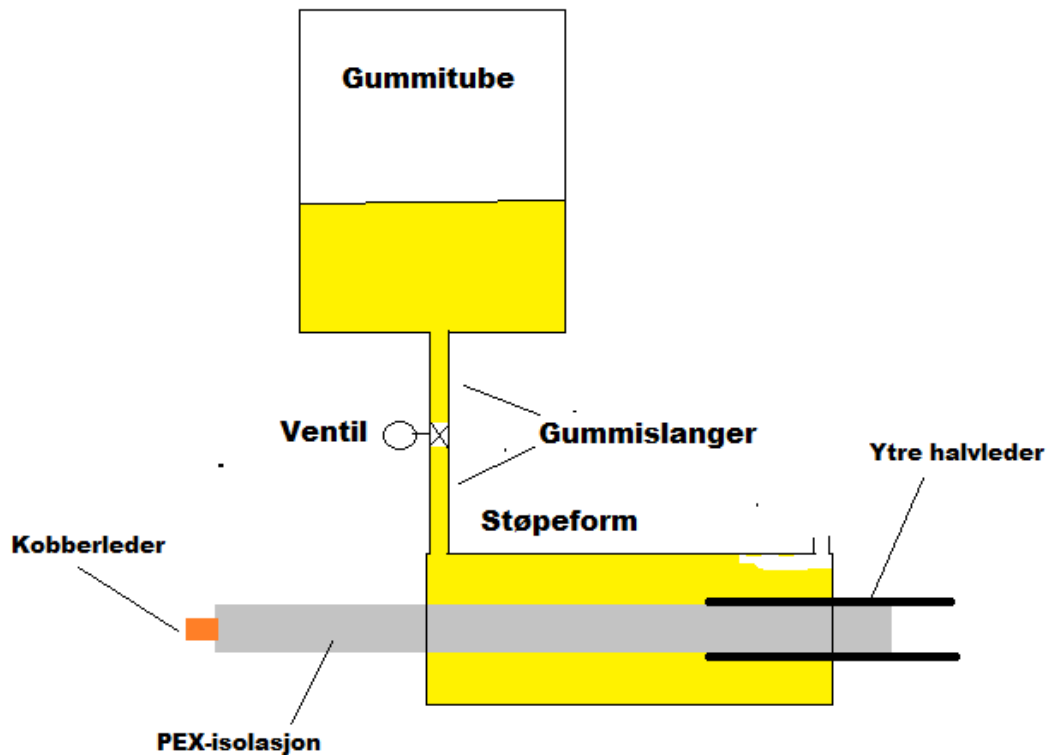


Figur 3.10: Guard innkledd med aluminiumsfolie

3.2.2 Innstøpt endeavslutning i polymer-materiale

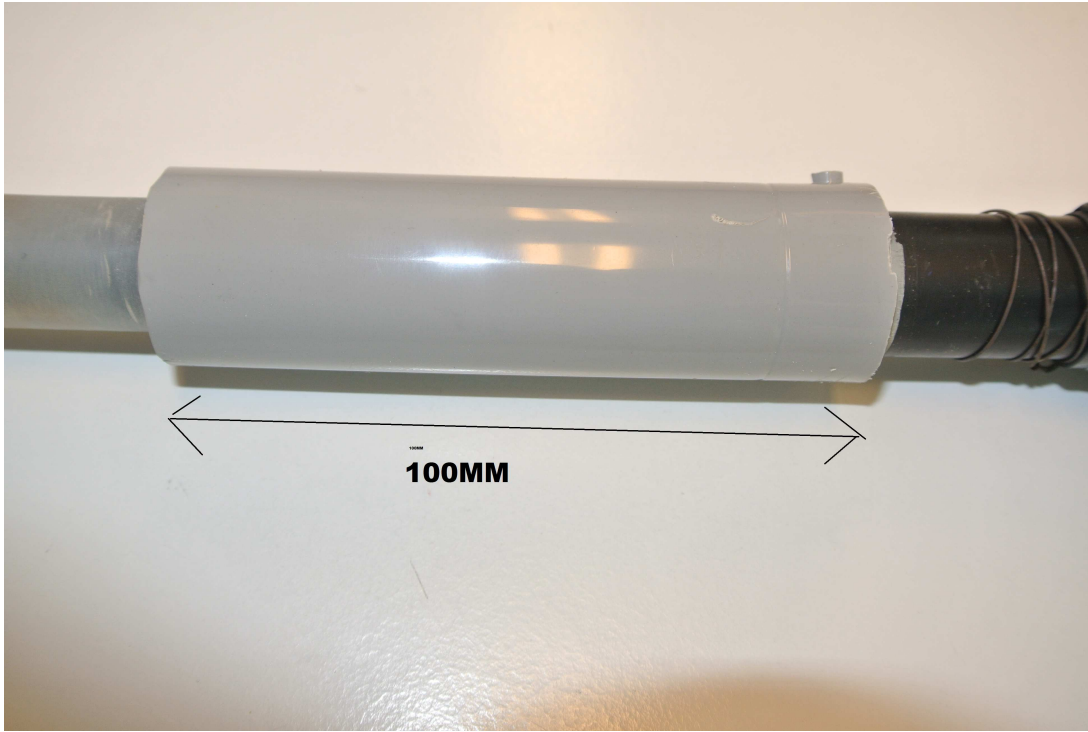
Den ene endeavslutningen ble innstøpt i polymermateriale for å kunne teste de dielektriske tapene i denne ved økt fuktighetsnivå. Støpeprosessen viste seg å bli relativt utfordrende da det var vanskelig å få fylt støpeformen boblefritt raskt nok iløpet av polymerens arbeidstid. Forskjellige dimensjoner på støpeform og gummislanger ble forsøkt før et godt resultat ble oppnådd, noe som ble mer tidkrevende enn forutsett.

Først ble det forsøkt å dytte flytende polymer-masse inn i støpeformen ved hjelp av overtrykk. Dette viste seg å være vanskelig da det ikke var tilgjengelig utstyr av store nok dimensjoner til å beholde nok overtrykk til å få fylt støpeformen skikkelig. Derfor ble det valgt å fylle støpeformen fullstendig omgitt av vakum utelukkende ved hjelp av tyngdekraften, som vist i figur 3.11.



Figur 3.11: Prinsippskisse for støpeprosessen ved innstøping av endeavslutning i polymer

For å få en god støp uten bobledannelse var det viktig at utløpsenden av støpeformen ble det høyeste punktet på formen, slik at fyllingsprosessen fikk den riktige progresjonen. Figur 3.12 og figur 3.13 viser utforming og dimensjoner på støpen. Halvlederen stikker 40mm inn i polymer-støpen.



Figur 3.12: Innstøpt endeavslutning



Figur 3.13: Innstøpt endeavslutning

3.2.3 Endeavslutning med feltstyring

Endeavslutningen på PEX-kabelen som det ikke ble utført dielektrisk spektroskopi på ble laget med feltstyring for å unngå partielle utladninger. Deretter ble duken kledd inn med vulkaniserende tape som vist på figur 3.14.



Figur 3.14: Prøveobjekt med innstøpning, guard og feltstyrt ende

3.2.4 Prøveobjekt for test av overflatekonduktivitet i PEX-kabel

Utstyr

- Strippet PEX-kabel.
- Konduktiv lakk.

To måleelektroder ble laget ved å lakkere med konduktiv lakk med 40mm mellomrom som vist på figur 3.15



Figur 3.15: Påmalte måleelektroder for måling av overflatekonduktivitet

Kapittel 4

Eksperimentell metode

4.1 Måling av vannopptak i polymer

4.1.1 Utstyr

- Digital vekt, Metler Toledo UMX2
- Avioniserer, Metler Toledo
- 2 prøveholdere
- 2 glasskolber
- Aluminiumsfolie
- 2 glass
- Is laget av høyfiltrert vann
- Høyfiltrert vann
- pinsett
- tynne plasthansker

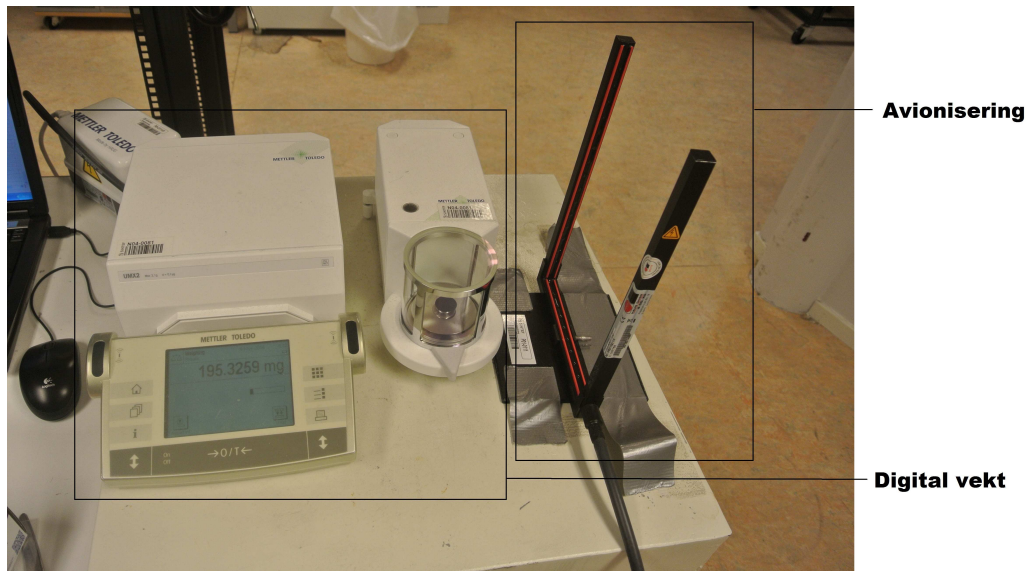
4.1.2 Målemetode

Prøveobjekter i polymer med diameter 24mm og tykkelse 0.5mm ble stensilert ut og lagt til avgassing i 30 °C og vakum i 2 døgn. Deretter ble de tørreid og satt i prøveholdere i glasskolber fylt med høyfiltrert vann, se bilde 4.1.



Figur 4.1: Prøveobjekter plassert i kolbe

Kolbene ble deretter plassert i varmeskap i 50 °C. Ved videre veiing ble kolbe tatt ut av varmeskapet før prøveobjektet ble tatt opp av vannet og plassert i høyfiltrert isvann i 5 sekunder. I det prøveobjektet ble tatt ut av kolben ble klokken på vekten startet slik at veiing ble gjennomført nøyaktig 1 minutt etter at prøveobjektet forlot kolben. Dette ble gjort for å sikre at alle målinger ble gjennomført identisk. Deretter ble prøveobjektet lagt i temperert vann i 5 sekunder. Objektet ble så tørket med rent, tørt papir og deretter avionisert. Prøveobjektet ble plassert på vekten og veiing ble gjennomført nøyaktig 60 sekunder etter at det forlot kolben. Se bilde 4.2. Deretter ble objektet plassert tilbake i prøveholder og kolbe og satt tilbake i varmeskapet ved 50 °C.



Figur 4.2: Oppsett av utstyr for vektmåling

4.2 Dielektriske responsmålinger med IDA200/IDAX206

IDA200 og IDAX206 er systemer som ved hjelp av dielektrisk spektroskopi kan diagnostisere dielektriske materialer. Dielektrisk spektroskopi går ut på å som funksjon av frekvens og/eller spenning måle de dielektriske egenskapene til et materiale. Ved å undersøke responsen ved ulike frekvenser kan ulike tapsmekanismer skilles fra hverandre. Ved å måle spenningen parallelt med et prøveobjekt og samtidig måle strømmen i serie med objektet utgjør disse målesignalene grunnlaget for beregninger som systemet gjør for å analysere prøveobjektet. Systemet påtrykker prøveobjektet en sinusvarierende spenning med bestemte frekvenser. Spenningen over prøveobjektet samt lekkstrøm gjennom objektet måles og dermed kan objektets impedanse bestemmes. Prøveobjektet kan modelleres på forskjellige måter etter hvilke parametre som det ønskes å bestemme. I denne oppgaven benyttes dielektrisk modell (ϵ' , $\Delta\epsilon'$ og ϵ'') og kompleks kapasitansmodell (C' , C'' og $\Delta C'$).

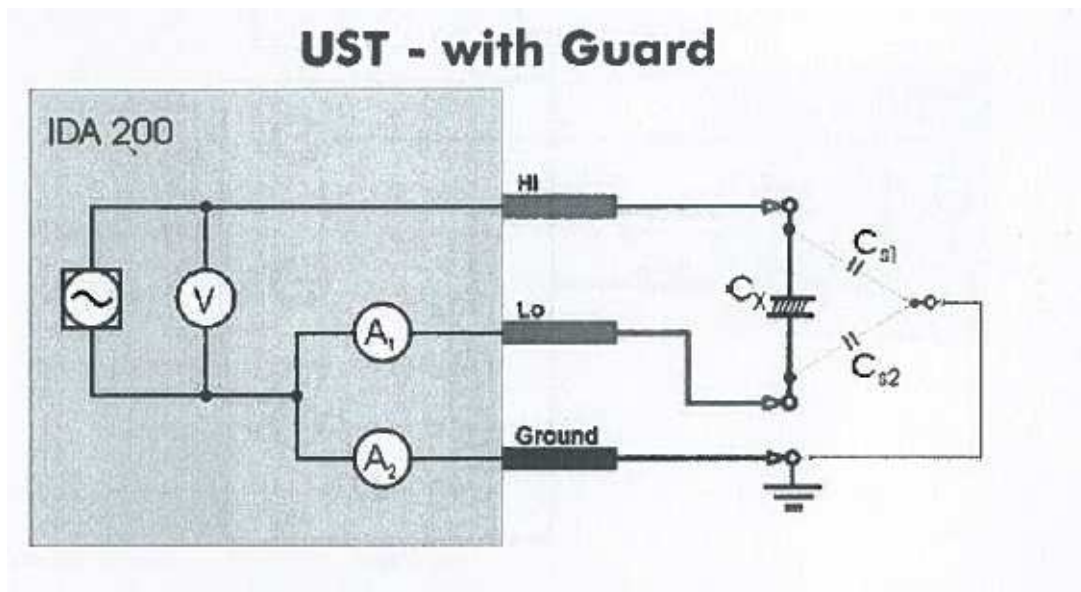
4.3 Måling av dielektriske egenskaper i polymer-disk

Utstyr

- IDAX206 Insulation Diagnostics System.
- Termineringsboks for IDAX206.
- Multikabel for IDAX206
- Ledende underplate for Lo-elektode
- Ledende hul sylinder for ground-elektroder
- Ledende sylinder for Hi-elektrode
- Glasskolbe
- Polymer-disk
- Varmeskap

Målinger av dielektriske egenskaper for polymer ved ulike fuktighetsinnhold ble utført ved å benytte IDAX 206 diagnostiseringssystem, som baserer seg på dielektrisk spektroskopi. Dielektriske egenskaper ble målt som funksjon av vanninnhold og frekvens. Målinger ble først gjennomført i tørr tilstand ved romtemperatur. Deretter ble prøveobjektet lagt i vann ved 50°C . Målinger ble deretter gjennomført ved jevne mellomrom ved at prøveobjektet ble tatt ut av vannet og tørket rent for vann før det ble tilkoblet elektrodene. Målemetoden baserer seg på at testobjektet påsettes en sinusvarierende spenning som genererer en strøm i testobjektet. Ved hjelp av nøyaktige målinger av strøm og spenning blir testobjektets impedanse beregnet, og forskjellige parametre kan beregnes ut ifra denne.

Målingene i denne oppgaven ble utført som 'Ungrounded Specimen Test (UST) with guard'. Se figur 4.3

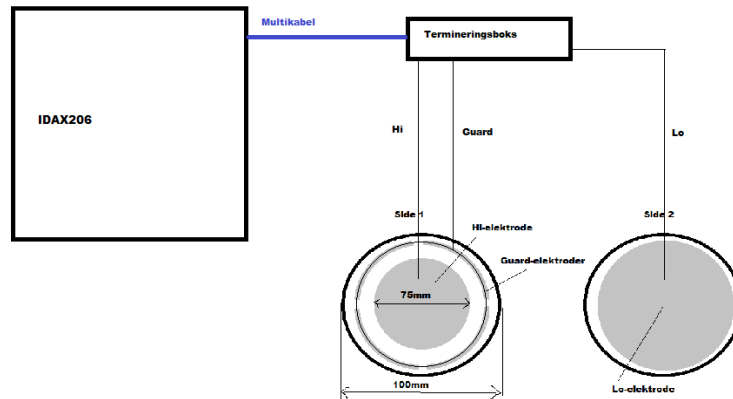


Figur 4.3: Kretsskjema for måleoppsett [10]

Figur 4.4 viser prøveobjekt oppkoblet med elektroder, mens figur 4.5 viser prinsippkisse for oppkobling av målinger.



Figur 4.4: Polymer-disk oppkoblet med elektroder for dielektriske målinger



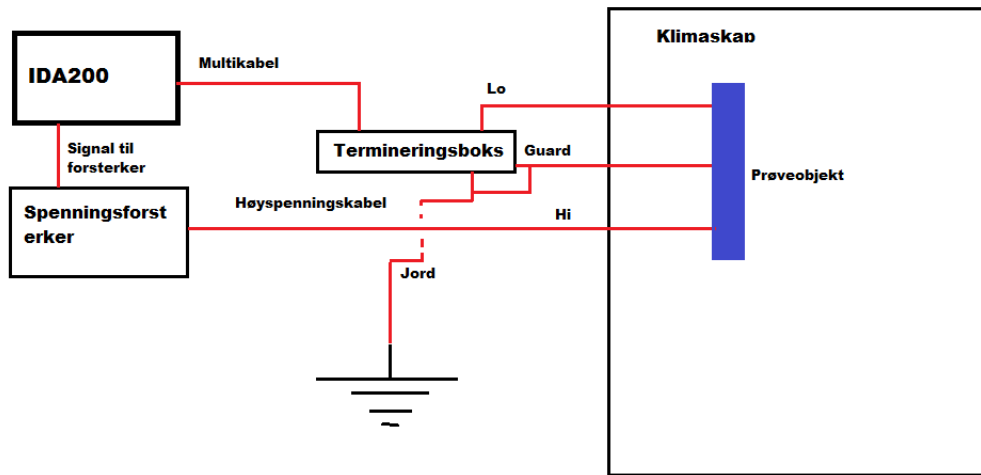
Figur 4.5: Prinsippkisse for oppsett for måling av dielektrisk respons på polymer-disk

4.4 Måling av dielektrisk tapsfaktor $\tan\delta$ i innstøpt kabel

Utstyr

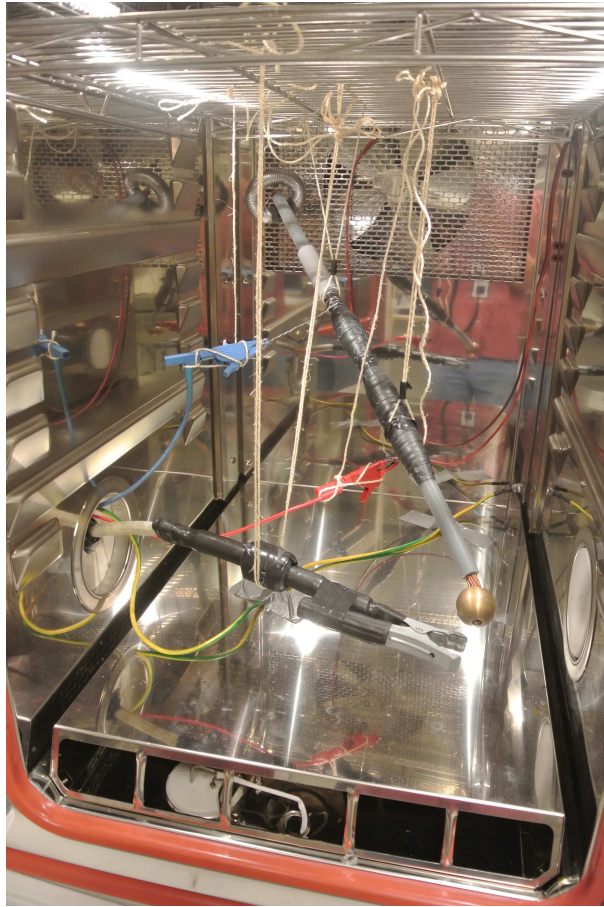
- IDA200 Insulation Diagnostics System.
- Termineringsboks for IDA200.
- Trek Model 30/20 Spenningsforsterker.
- Votsch VC 4034 Klimaskap.
- Multikabel til IDA200.
- Kabel med bananplugg i begge ender.
- Kabel med bananplugg og krokodilleklemme.
- Skjernet målekabel med krokodilleklemme til termineringsboks.
- Høyspenningskabel med krokodilleklemme.
- Tau til oppheng av prøveobjekt

Figur 4.6 Viser en prinsippkisse for oppsettet av utstyret.



Figur 4.6: Prinsippskisse for måling av dielektrisk tapsfaktor på innstøpt kabel

Prøveobjektet ble hengt opp i klimaskapet som vist på figur 4.7.



Figur 4.7: Innstøpt prøveobjekt plassert og tilkoblet i klimaskap

For at vann skulle trenge inn i polymeren raskest mulig, ble klimaskapet stilt inn på 70°C og 95% luftfuktighet. Dette medførte dannelse av kondens i klimaskapet. For å redusere problemene dette kan medføre ved gjennomføring av målinger, ble luftfuktigheten senket til 70% under målingene.

Målingene ble utført med guard-elektroden jordet, som vist i figur 4.6. Målingene ble gjort som "Ungrounded Specimen Test with guard" i henhold til brukermanualen til IDA-200 [10]. Det ble valgt å gjennomføre målingene med spenninger mellom 0.5kV og 4kV i frekvensspekteret 0.1-100Hz. Høyere spenninger ble ikke benyttet for å unngå å gå over tennspenningen for partielle utladninger funnet i kapittel 5.3. Grunnen til at lavere frekvenser ikke ble målt er at måletiden da blir svært lang, noe som kan påvirke resultatene vesentlig når luftfuktigheten senkes i klimaskapet i måleperioden.

4.5 Måling av overflateresistans på strippet PEX-kabel

Utstyr

- Megger BM21
- Votsch VC 4034 Klimaskap.

Målingene ble utført i to omganger for å gi indikasjoner på hvordan overflateresistansen på PEX endrer seg med temperatur og fuktighet i omgivelsene. Oppsettet er som vist i figur 4.8. Figuren viser oppsettet ved måling i tørre omgivelser ved romtemperatur. Målingene ved høy temperatur og luftfuktighet ble foretatt i klimaskapet.

- **Måling 1:** Romtemperatur og tørre omgivelser.
- **Måling 2:** 70°C, 95% luftfuktighet.



Figur 4.8: Oppsett med Megger BM21 for måling av overflatekonduktivitet

4.6 Måling av tennspenning for partielle utladninger

For å unngå at partielle utladninger førte til vesentlige feilmålinger når dielektrisk spektroskopi ble utført, ble tennspenningen for partielle utladninger i innstøpt ende av PEX-kabel funnet slik at testspenningene ved dielektrisk spektroskopi kunne legges under tennspenningen. Etter at dielektrisk spektroskopi var utført i klimaskapet ble tennspenningen igjen målt etter nedkjøling for å sikre at eventuelle endringer i prøveobjektet ikke hadde ført til at tennspenningen hadde falt under testspenningene iløpet av tiden prøveobjektet befant seg i klimaskapet.

Målingene ble utført ved å benytte Omicron MDP600 analysessystem for partielle utladninger. Målingene ble utført ved å starte ved en testspenning på 3kV, og denne ble så økt med 0.25kV for hvert 5. minutt til partielle utladninger inntraff. Tennspenningen er den laveste spenningen der partielle utladninger finner sted.

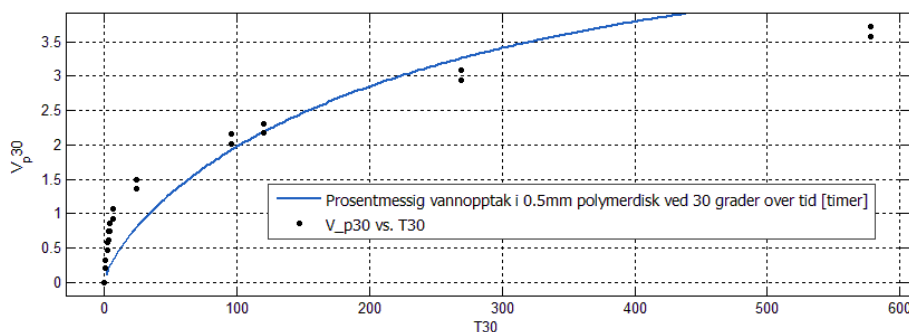
Kapittel 5

Resultater fra eksperimenter

5.1 Vannopptak i polymer

5.1.1 Vannopptak i 0.5mm tykk polymer-disk ved 30°C

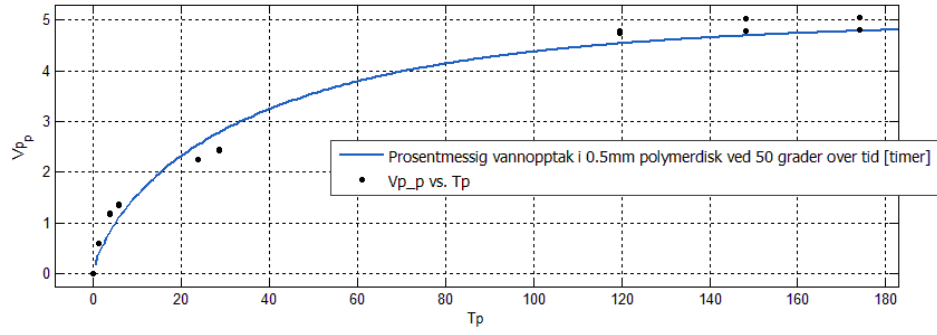
Figur 5.1 er lagd ved hjelp av Curve Fitting Tool i Matlab. Blå kurve representerer en tilpasning til ligning (2.31), mens svarte prikker representerer reelle målinger.



Figur 5.1: Prosentmessig vannopptak i 0.5mm tykk polymerdisk ved 30 grader

5.1.2 Vannopptak i 0.5mm tykk polymer-disk ved 50°C

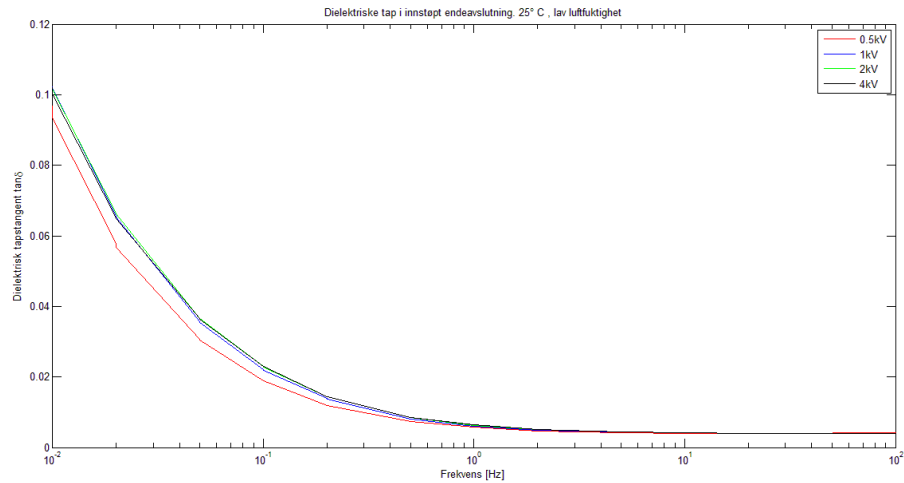
Figur 5.2 er lagd ved hjelp av Curve Fitting Tool i Matlab. Blå kurve representerer en tilpasning til ligning (2.31), mens svarte prikker representerer reelle målinger.



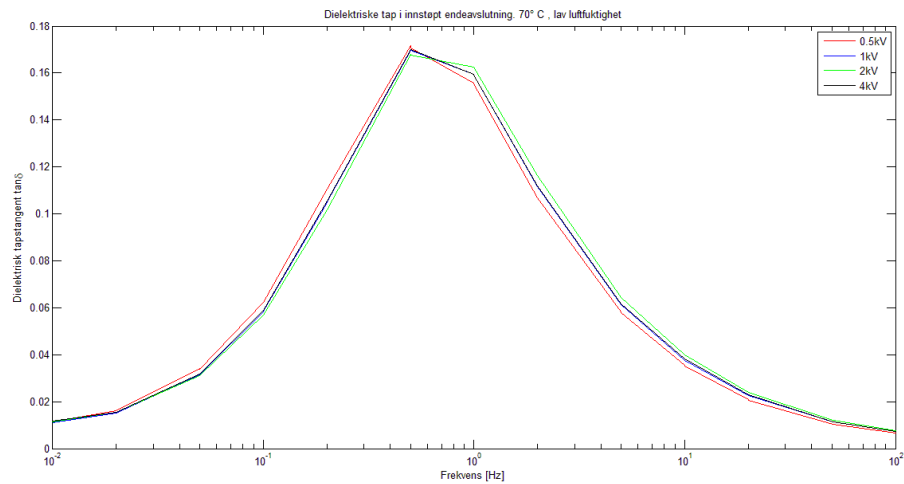
Figur 5.2: Prosentmessig vannopptak i 0.5mm tykk polymerdisk ved 50 grader

5.2 Dielektrisk respons i endeavslutning innstøpt i polymer

Dielektrisk tapsfaktor ble målt i endeavslutning innstøpt i polymer ved 25°C , tørr tilstand, og deretter ved 70°C . Resultatene er gjengitt i figur 5.3 og figur 5.4.

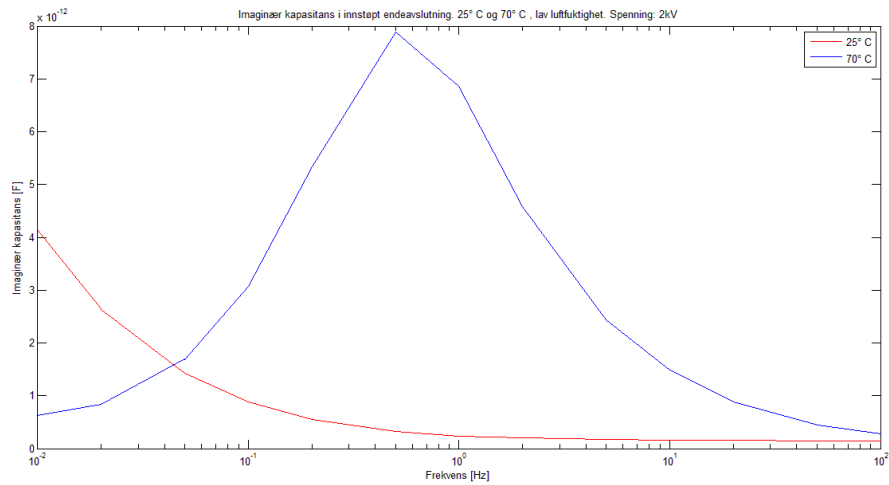


Figur 5.3: Dielektrisk tapsfaktor i innstøpt endeavslutning ved 25 grader og tørr tilstand



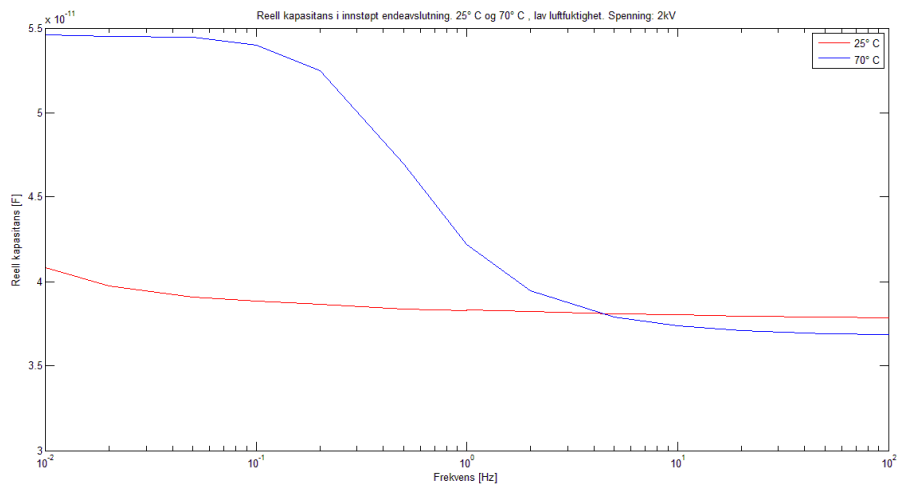
Figur 5.4: Dielektrisk tapsfaktor i innstøpt endeavslutning ved 70 grader og tørr tilstand

Figur 5.5 fremstiller endringen i imaginær kapasitans C'' ved temperaturøkning fra 25°C til 70°C .



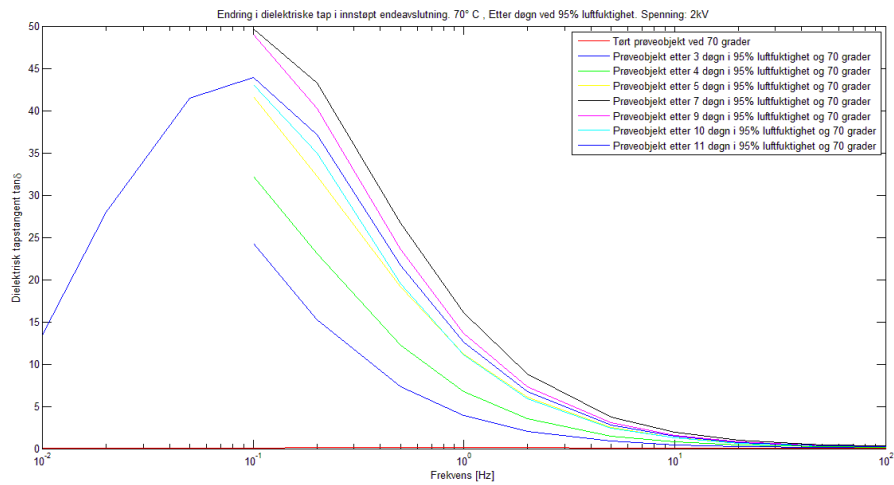
Figur 5.5: Imaginær kapasitans i innstøpt endeavslutning ved 25 og 70 grader. Spenning: 2kV

Endringen i reell kapasitans C' er fremstilt i figur 5.6.



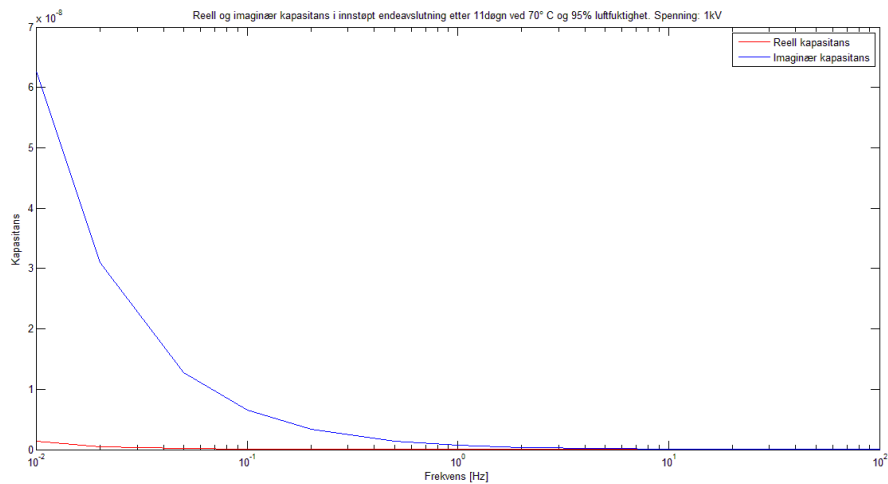
Figur 5.6: Reell kapasitans i innstøpt endeavslutning ved 25 og 70 grader. Spenning: 2kV

Endringene i dielektrisk tapsfaktor $\tan\delta$ gjennom forsøks tiden er fremstilt i figur 5.7



Figur 5.7: Endring i dielektrisk tapsfaktor i polymer-innstøping gjennom forsøksstiden

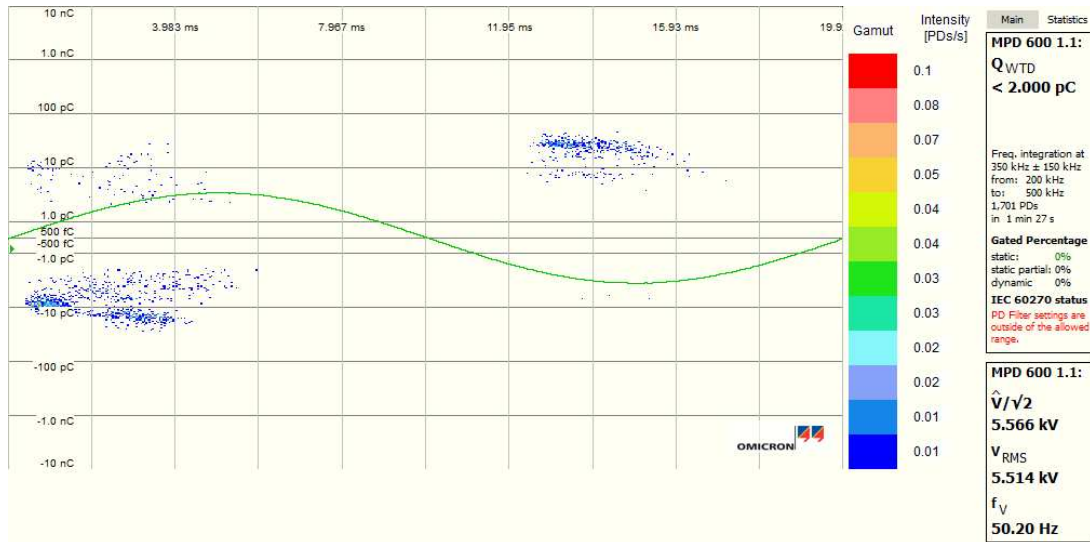
Reell og imaginær kapasitans i endeavslutning med polymer-innstøping etter 11 døgn 70°C og 95% luftfuktigheter fremstilt i figur 5.8.



Figur 5.8: Reell og imaginær kapasitans i innstøpt endeavslutning etter 11 døgn ved 70 grader og 95% luftfuktighet

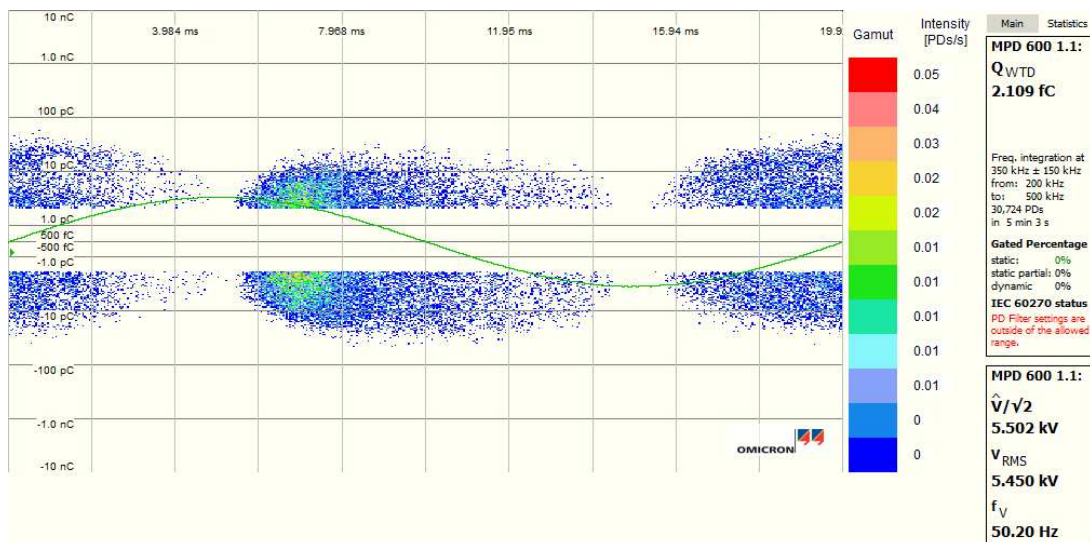
5.3 Måling av tennspenning for partielle utladninger

Figur 5.9 viser partielle utladninger ved tennspenning i innstøpt endeavslutning før prøveobjektet ble satt i klimaskap.



Figur 5.9: Partielle utladninger i tørt prøveobjekt ved tennspenning på 5.566kV R.M.S.

Partielle utladninger ved tennspenning i innstøpt endeavslutning etter 11 dager i klimaskap er fremstilt i figur 5.10:



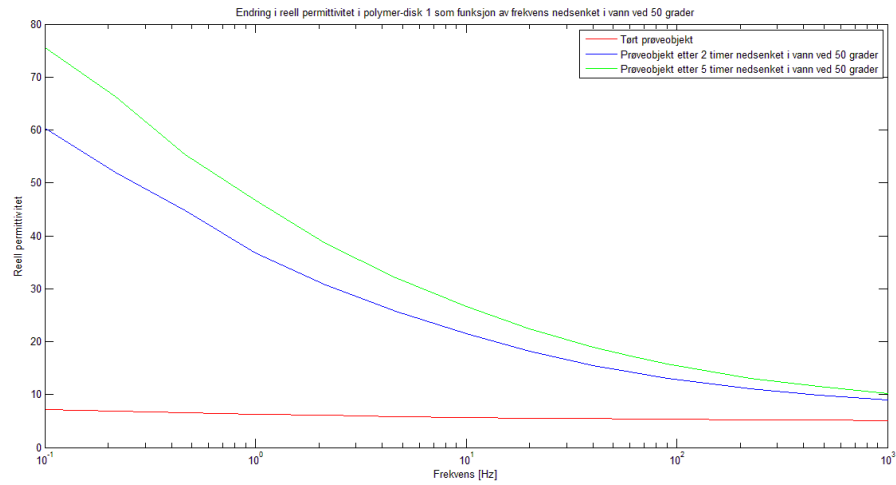
Figur 5.10: Partielle utladninger ved tennspenning på 5.450kV R.M.S i prøveobjekt etter 11 dager i klimaskap

5.4 Overflateresistans på strippet PEX-kabel

Elektrisk motstand ved tørre omgivelser ved 25 grader ble målt til $315000 \text{ M}\Omega/\text{mm}$.
Etter 1 time ved 70 grader og 95% luftfuktighet ble den målt til $5.35 \text{ M}\Omega/\text{mm}$.

5.5 Permittivitet ved opptak av vann i polymer-disk

Figur 5.11 viser endringen i målte reell relativ permittivitet ϵ'_r som funksjon av frekvens når polymeren tar opp vann. Målingene lot seg ikke gjennomføre over lengre tid da det viste seg at de pådampede aluminiumselektrodenes relativt raskt ble oppløst i vannet.



Figur 5.11: Endring i permittivitet ved vannopptak i polymer-disk

Kapittel 6

Beregninger basert på resultater fra eksperimenter

6.1 Estimering av diffusjonskoeffisient for polymer ved 30°C og 50°C

For å estimere diffusjonskoeffisienter til polymeren ble Curve Fitting Toolbox i Matlab benyttet. Det ble her utført kurvetilpasninger som vist i figur 5.1 og 5.2 med funksjonen gitt ved ligning (2.31) basert på resultatene gitt i tillegg A.1. Ut ifra måleresultatene ble det antatt at materialet når metning ved omlag 5%, så m_∞ ble satt til 5. Følgelig ble diffusjonskoeffisienten D ved hjelp av Curve Fitting Toolbox estimert til å være 0.0001407 ved 30°C og 0.0004701 ved 50°C. For polymerprøven nedsenket i vann ved 50°C på begge sider der arealet er vesentlig større enn tykkelsen, kan dermed inndiffundert mengde vann m_t etter tiden t beregnes ved ligning (6.1):

$$m_t = 5\left(1 - \exp\left(-7.3\left(\frac{0.0004701t}{l^2}\right)^{\frac{3}{4}}\right)\right) \quad (6.1)$$

Ved hjelp av ligning (6.1) ble det prosentmessige vanninnholdet i en 0.5mm tykk polymerdisk nedsenket i vann på begge sider ved 50°C estimert til å være 0.5254% og 0.9903% etter henholdsvis 2 og 5 timer.

6.2 Estimering av vanninnhold i 4mm tykk polymer ved 70°C

Da det i denne oppgaven ikke er blitt gjort vannopptaksmålinger i 4mm tykk polymer ved 70°C, er vanninnholdet blitt estimert ved å estimere en diffusjonskoeffisient for temperaturen ved hjelp av Arrhenius ligning og benytte denne sammen med ligning (2.31).

Ligning (2.31) gjelder når prøveobjektet er utsatt for vann fra begge sider. Ved diffusjon fra kun én side av materialet kan denne tilpasses slik at vanninnholdet estimeres ved ligning (6.2) [7]:

$$m_t = m_\infty \left(1 - \exp\left(-7.3 \left(\frac{Dt}{(2l)^2}\right)^{\frac{3}{4}}\right)\right) \quad (6.2)$$

Arrhenius ligning gir sammenhengen mellom reaksjonshastigheter og temperatur, og kan uttrykkes ved ligning (6.3):

$$D = A e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (6.3)$$

Der D er reaksjonshastigheten, A er en pre-eksponentiell faktor, E_a er aktiveringsenergien, R er Boltzmanns konstant ($R = 1.38 * 10^{-23}$ og T er temperaturen i Kelvin. Uttrykket for diffusjonskoeffisienten ved 70°C er dermed gitt ved ligning (6.4), som har E_{apoly} og A_{poly} som ukjente:

$$D_{70} = A_{poly} e^{\frac{-E_{apoly}}{R * 343.15}} \quad (6.4)$$

Logmed at diffusjonskoeffisientene D_{30} og D_{50} er estimert i avsnitt 6.1, kan verdier for A_{poly} og E_{apoly} finnes ved følgende ligningssett:

$$D_{30} = A_{poly} e^{\frac{-E_{apoly}}{R * 303.15}} \quad (6.5)$$

$$D_{50} = A_{poly} e^{\frac{-E_{apoly}}{R * 323.15}} \quad (6.6)$$

$$D_{30} = 0.3 D_{50} \quad (6.7)$$

Følgelig:

$$E_{apoly} = \frac{\ln(0.3)}{\frac{1}{R * 323.15} - \frac{1}{R * 303.15}} = 8.138 * 10^{-20} \quad (6.8)$$

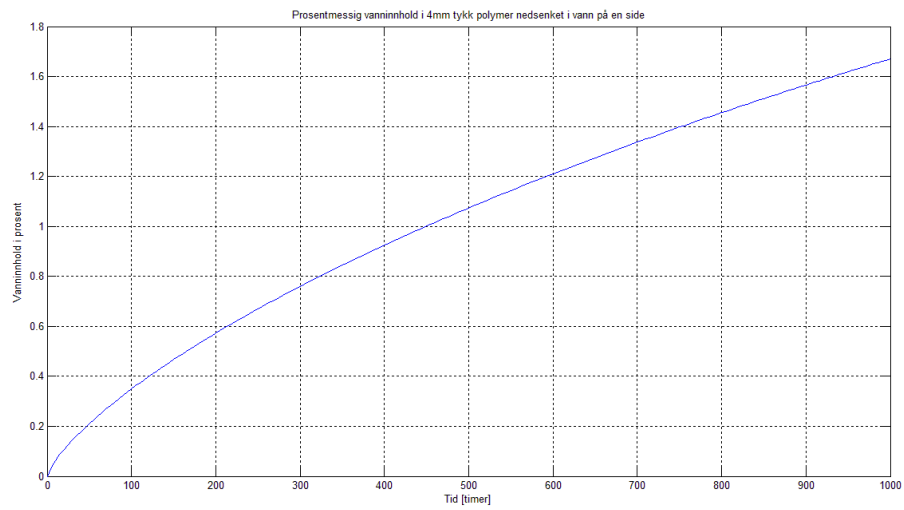
$$A_{poly} = \frac{D_{50}}{e^{E_{apoly}/R * 323.15}} = 39586.37 \quad (6.9)$$

Ved å sette inn i ligning (6.4) gir dette følgende diffusjonskoeffisient for polymeren ved 70°C:

$$D_{70} = A_{poly} e^{\frac{-E_{apoly}}{R * 343.15}} = 0.0013617 \quad (6.10)$$

Videre kan dermed vannopptaket etter t timer i en 4mm tykk polymer-støp nedsenket i vann ved 70°C estimeres ved hjelp av ligning (6.2). Dersom det antas at polymeren mettes ved ca 5% vanninnhold gir dette funksjonen i ligning (6.11) som er plottet i figur 6.1:

$$m_t = 5 \left(1 - \exp\left(-7.3 \left(\frac{0.0013617 * t}{(2 * 4)^2}\right)^{\frac{3}{4}}\right)\right) \quad (6.11)$$



Figur 6.1: Prosentmessig vanninnhold i 4mm tykk polymer nedsenket i vann med diffusjon fra en side

Etter 11 dager i vann og ble det prosentmessige vanninnholdet i 4mm tykk polymer beregnet ved ligning (6.11) til å være 0.6955%.

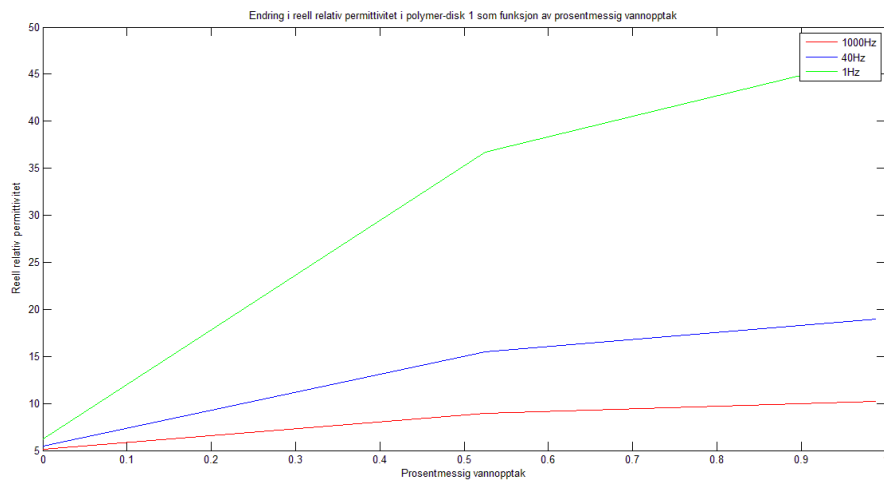
6.3 Beregning av elektrisk felt i sfæriske, gassfylte hulrom ved endring i permittivitet

Figur 5.11 viser at den reelle relative permittiveten ϵ'_r i polymeren øker vesentlig når denne tar opp vann. Ved å benytte ligning eqrefeq:estimertdiff kan prosentmessig vannopptak ved henholdsvis 2 og 5 timer når polymerdisken er nedsenket i vann beregnes:

$$m_t(2) = 5(1 - \exp(-7.3(\frac{0.0004701 * 2}{0.5^2})^{\frac{3}{4}})) = 0.5247\% \quad (6.12)$$

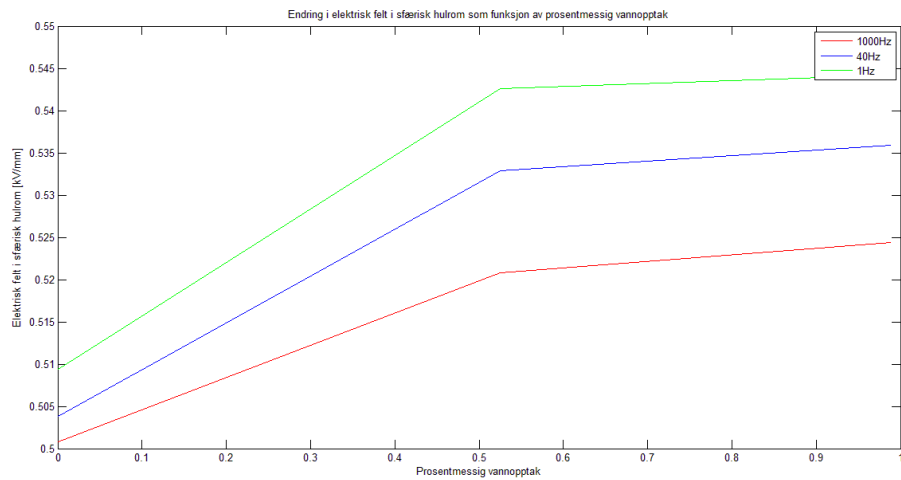
$$m_t(5) = 5(1 - \exp(-7.3(\frac{0.0004701 * 5}{0.5^2})^{\frac{3}{4}})) = 0.9891\% \quad (6.13)$$

Figur 6.2 viser da relativ reell permittivitet ϵ'_r som funksjon av estimert vannopptak i polymer-disken:



Figur 6.2: Endring i reell relativ permittivitet i polymer-disk 1 som funksjon av prosentmessig vannopptak

Ved hjelp av ligning (2.24) kan dermed det elektriske feltet i et innkapslet sfærisk hulrom beregnes. Figur 6.3 viser beregnet elektrisk felt som funksjon av prosentmessig vannopptak.



Figur 6.3: R.M.S elektrisk felt i sfæriske hulrom som funksjon av prosentmessig fuktopptak ved 2.2kV og 6mm tykk polymer

Kapittel 7

Diskusjon og konklusjon

7.1 Vannopptak i polymer

Vannopptaksmålingene viste at det prosentmessige vanninnholdet i polymeren stabiliserte seg rundt 5% etter lang tid i vann. De elektriske målingene som er blitt gjort i denne oppgaven er gjennomført ved lavere totalt prosentmessig vanninnhold enn dette. For de elektriske målingene var det høyeste prosentmessige vanninnholdet 0.6955% og 0.9903% for henholdsvis 4mm tykk polymerinnstøpning og 0.5mm tykk polymerdisk. Likevel må det taes med i betraktningen at selv om det totalt er relativt lavt prosentmessig vanninnhold i prøveobjektene, er ikke vannmolekylene jevnt fordelt i hele prøven. Konsentrasjonen vil være høy i de områdene av objektene som ligger tett på overflatene som grenser til vann eller luft med høy luftfuktighet, og synke gradvis innover i materialet. Målingene av dielektrisk respons som ble utført ved å benytte klimaskap i stedet for nedsenking av prøveobjekt i vann vil sannsynligvis ha en vannopptakskurve som ligger tett på de målte og beregnede verdiene, da luftfuktigheten ble satt meget tett på metning (95%). Dette medførte også at en del kondens ble dannet i skapet. Den relativt høye temperaturen i klimaskapet på 70°C ble valgt da teori, målinger og beregninger viste at hastigheten på vannopptaket er svært avhengig av temperatur.

Da det ikke viste seg mulig å få mettet prøveobjektene benyttet i denne oppgaven fullstendig med vann i løpet av tiden som var til rådighet, må resultatene fra eksperimentene sees i lys av dette. Prøveobjektene har kun vært mettet med fuktighet i de ytre sjiktene, og graden av metning har blitt lavere jo lengre inn i materialet en kommer.

Dette medfører at materialeegenskapene ikke har vært homogene i hele prøveobjektet. Spesielt polymerinnstøpningen av PEX-kabelen kan med stor sikkerhet sies å ha befunnet seg langt unna metning, da denne var hele 4mm tykk og kun var utsatt for fukt fra én side. De beregnede verdiene for vannopptaket i den 4mm tykke støpen må sees i lys av at tilnærmingen gjort i kapittel 6.2 er en svært grov tilnærming da overflatearealet ikke kan ansees å være ”uendeligstort i forhold til tykkelsen for dette prøveobjektet. De indre sjiktene av støpen, nærmest PEX-kabelen, kan antas å ha vært tilnærmet tørre gjennom eksperimentet. Likevel viste det seg at det forekom vesentlige endringer i støpens totale egenskaper med økt fuktinnhold.

7.2 Innstøpt endeavslutning

Målingene av den dielektriske responsen i endeavslutningen innstøpt i polymer viste at ved frekvenser over 1Hz var de dielektriske tapene relativt frekvensuavhengige ved romtemperatur, se figur 5.3. Den dielektriske tapsfaktor $\tan\delta$ var høyest ved den lavest målte frekvensen. $\tan\delta$ var her omlag 0.1. Årsaken til den høyere tapsfaktor ved lav frekvens var hovedsaklig at den imaginære kapasitansen C'' økte ved når frekvensen ble lav, se figur 5.5. Reell kapasitans forble grovt sett uforandret med endret frekvens, se figur 5.6.

$\tan\delta$ varierer med frekvens og temperatur, og konduktiviteten σ som er en del av uttrykket for $\tan\delta$ er svært temperaturavhengig [9]. Figur 5.3 viser at den dielektriske tapsfaktoren økte sterkt når frekvensene ble veldig lave, noe som kan tyde på at det også i tørr tilstand ved romtemperatur var en noterbar konduktivitet i materialet. Når temperaturen ble økt fra $25^{\circ}C$ til $70^{\circ}C$ endret kurven for $\tan\delta$ seg vesentlig.

Temperaturendringen førte til at tapsfaktoren sank med en faktor på omlag 10 ved 0.01Hz, og fikk en tydelig topp på 0.17 ved ca 1Hz, se figur 5.4. Tapsfaktoren ved veldig lave frekvenser sank mye, og dersom dette har sammenheng med endret konduktivitet, stemmer dette overens med at konduktiviteten er svært temperaturavhengig. Økt temperatur medførte at tapsfaktoren ble mer frekvensavhengig i hele frekvensspekteret mellom 0.01Hz og 100Hz. Figur 5.5 og 5.6 viser at det var endring i imaginær kapasitans C'' som medførte størst bidrag til endringen i tapsfaktor. Dersom resultatene sees i lys av figur 2.1 kan dette tyde på at temperaturøkningen førte til økte tap ved grenseflatepolarisering, hvilket for eksempel kan ha oppstått i overgangen mellom PEX og polymeren eller i hulrom og urenheter i polymeren. Temperaturendringer kan medføre fysiske endringer i materialet som endrer tennspenningen for partielle utladninger, men da det ikke ble observert noen vesentlig spenningsavhengighet i de dielektriske tapene mellom testspenninger på 0.5kV og 4kV (se tillegg A.4.1 og A.4.2) kan det antas at partielle utladninger ikke var noen vesentlig bidragsyter til de dielektriske tapene hverken ved $25^{\circ}C$ eller $70^{\circ}C$.

Når polymeren tok opp vann viste det seg at tapsfaktoren økte svært mye og ble mer frekvensavhengig også ved frekvenser over 10Hz, se figur 5.7. Den dielektriske tapsfaktoren hadde fremdeles en tydelig topp ved 0.1Hz. I hvilken grad de store endringene var resultat av økning i grenseflatepolarisering eller økte konduktive tap er vanskelig å fastslå. Effekttapet per volumenhet i form av varmeutvikling i isolasjonsmaterialet er direkte proporsjonalt med tapsfaktoren og kvadratet av det elektriske feltet. Dette betyr at dersom resultatene fra de utførte målingene er riktige, vil varmeutviklingen i isolasjonen være i størrelsesorden $20 * 10^3$ ganger høyere når polymeren er svært fuktig enn når den er tørr. Ved vurdering av dette resultatet bør dog eventuelle feilkilder taes i betraktning. Når effektutviklingen i isolasjonsmaterialet er vesentlig, vil god kjøling være viktig for å unngå at materialet tar skade. Dersom materialet er i bruk i en propell med integrert motor, kan det antas at kjølingen av materialet vil være relativt god iogmed at det vil være en konstant flyt av vann på overflaten av polymeren.

Resultatene fra målingen av tennspenning viste at påkjenningene prøveobjektet var blitt utsatt for med tanke på fukt og temperatursvingning ikke medførte at tennspenningen ble vesentlig lavere. Slike svingninger kan føre til kondensasjon og økt hulromsdannelse. Ut ifra resultatene kan det konkluderes med at dette muligens ikke har skjedd, eller at de mekanismene som gav partielle utladninger har en lavere tennspenning enn de hulromsdannelsene som eventuelt kan ha oppstått. Da videre lokalisering av de partielle utladningene ikke er foretatt i denne oppgaven, består dette

spørsmålet ubesvart.

7.3 Endring i elektrisk felt i hulrom

Figur 6.2 viser at den relative reelle permittiviteten til polymer-disken endret seg vesentlig med økt prosentmessig vannopptak. Vannmolekyler er permanente dipoler, og lar seg dermed lett polarisere. Dette fører til en høy relativ permittivitet i rent vann på ca 80 ved $20^{\circ}C$, se ligning (2.6).

Figur 6.3 viser at selv om permittiviteten til materialet endres vesentlig vil ikke det elektriske feltet i eventuelle sfæriske hulrom i materialet øke veldig mye. Dersom Paschen-kurven i figur 2.3 taes i betraktning, er det hulrom med svært lavt trykk og en diameter på over 0.25mm som vil gi partielle utladninger ved lavest spenning. I hvilken grad slike hulrom kan oppstå ved støping ved lavt trykk eller vakum er ikke videre undersøkt i denne oppgaven. Det konkluderes med at selv store endringer i reell permittivitet ikke påvirker størrelsen på de elektriske feltene i eventuelle sfæriske, luftfylte hulrom veldig mye.

Figur 5.11 viser at den relative permittiviteten synker med økt frekvens, noe som tyder på redusert polarisering ved høyere frekvenser. I frekvensspekteret som her ble testet, er det nærliggende å tenke seg at hoveddelen av reduksjonen i polarisering ved økt frekvens stammet fra at grenseflatepolariseringen ikke klarte følge frekvensendringene. Introduksjonen av fukt i polymeren førte til at permittiviteten ble mer frekvensavhengig. Dette kan tyde på at fukten førte til en større mengde grenseflatepolarisering i materialet.

7.4 Feilkilder

7.4.1 Måling av vannopptak

Ved vannopptaksmålingene gjennomgikk prøveobjektene først en tørkeprosess i vakum i 2 døgn. Dersom det etter tørkeprosessen fremdeles var tilstede vann i prøvene, vil det virkelige vanninnholdet avvike noe fra de målte resultatene. Ved målingene var prøvene utsatt for fri luft i 1 minutt før de ble veid, og følgelig utdiffunderte noe vann i løpet av denne tiden. Eventuelle vannrester på overflaten som utilsiktet ikke ble tørket av før veiing, kan også ha gitt utslag på målingene.

7.4.2 Dielektrisk spektroskopi på innstøpt endeavslutning

Potensielle feilkilder:

- **Partielle utladninger** kan medføre for store målte strømmer og følgelig feil i målingene. Før dielektrisk spektroskopi ble utført, ble tennspenningen for partielle utladninger i prøveobjektet funnet, og testspenningene ble lagt under dette nivået. Iogmed at prøveobjektet gjennomgikk en endringsprosess med høy fukt og temperatur, kan likevel ikke partielle utladninger utelukkes som feilkilde.
- **Krypstrømmer** langs den strippede PEX-kabelen kan ha medført bidrag til feilmålinger. Målinger av resistansen på overflaten av PEX-materialet i tørr og fuktig tilstand viste at overflateresistansen sank drastisk med økt fuktighetsnivå i omgivelsene.

7.5 Fremtidig arbeid

Fremtidig arbeid som kan ta utgangspunkt i problemstillinger og resultater fra denne oppgaven kan være:

- Hvordan vil de dielektriske egenskapene til mpolymeren være endret etter at denne har ligget i vann over lang tid slik at den er fullstendig mettet med vann?
- Hvordan er varmetransporten i polymeren? Vil polymeren være i stand til å transportere vekk den utviklede varmen som oppstår lengst unna vannkjølingen, eller vil dette føre til ødeleggelse av materialet?
- Hvordan vil benyttelse av feltstyrende duk i innstøpningen påvirke dielektriske tap og spenningsnivåer for partielle utladninger?
- Hvordan påvirkes materialet av aldring forårsaket av elektriske, termiske og fukt-relaterte påkjenninger?
- Når polymeren benyttes som isolasjon for en motor, vil den bli utsatt for et varierende spekter av frekvenser og spenninger. Er det mulig å kunne gi føringer for hvilke frekvenser som bør unngås å kjøre motoren på i lengre tidsperioder for å minimere termisk stress polymeren som følge av dielektriske tap i denne?

Litteraturreferanser

- [1] Taylor, Nathaniel, *Diagnostics of stator insulation by dielectric response and variable frequency partial discharge measurements*, Licenciate Thesis, KTH Electrical Engineering, 2006
- [2] Helgeson, Anders, Gafvert, Uno *Dielectric response measurements in time and frequency domain on high voltage insulation with different response* KTH, ABB, 1998
- [3] Duncan, Bruce, Urquhart, Jeannie, Roberts, Simon, *Review of measurement and modelling of permeation and diffusion in polymers* NPL Report DEPC MPR 012 National Physics Laboratory, Division of Engineering and Process Control, 2005.
- [4] Klopffer, M.H, Flaconneche, B., *Transport Properties of Gases in Polymers* Bibliographic review, Institut français du pétrole, Division Chimie et Physico-Chimie appliquées
- [5] Nordås, Ståle *Water transport properties in polymeric cable materials; influence of processing* Masteroppgave NTNU, 2007
- [6] Ahmad, Zulkifli, *Polymeric Dielectric Materials* University Sains Malaysia, Malaysia, 2012
- [7] Dutta, Saikat Swapa, *Water absorption and dielectric properties of Epoxy insulation* Masteroppgave NTNU, 2008
- [8] Ve, Torbjørn Andersen *Verifisering av numeriske beregninger av diffusjon av vatn* Masteroppgave NTNU, 2008
- [9] Ildstad, Erling, *High Voltage Insulation Materials* NTNU, 2012
- [10] PAX Diagnostics, *IDAX-206 User's Manual* PAX Diagnostics, 2006
- [11] Hammervoll, Knut Dahle *Ikke-destruktiv tilstandskontroll av kabelskjøter i distribusjonsnett* Masteroppgave NTNU, 2010
- [12] Kreuger, Professor Dr Ir F.H *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment* Butterworths, 1989
- [13] Gieras, Jacek R. *Advancements in Electric Machines* Springer, 2008
- [14] <http://www.vdvelden.com/products/product/rim-drive-thruster-srt.html> Lesedato:30.05.2014
- [15] Ådnanes, Alf Kåre *Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion* ABB, 2003

Tillegg A

Resultater

A.1 Vannopptak i polymer

A.1.1 Vannopptak ved 30 grader

```
t1[timer]=[0.001 0.9919 2.4044 3.4230 4.5386 7.0153 24.6092 96.2731 120.6261  
269.3130 577.9694];  
v1[gram]=[394.5522 395.807 396.8915 397.5078 397.98 398.7748 400.4429 403.0539  
403.6624 406.7627 409.2363];
```

```
t2[timer]=[0.001 0.9839 2.3792 3.3928 4.5219 6.9914 24.5914 96.26222 120.6003  
269.2794 577.9389];  
v2[gram]=[420.0074 419.8751 420.9023 421.5209 422.0634 422.8887 424.7436 427.5209  
428.1727 431.5279 434.174];
```

```
t3[timer]=[0.001 0.9631 2.3392 3.3556 4.4797 6.7947 24.5453 96.225 120.5403 269.2297  
577.8853];  
v3[gram]=[419.1438 420.05 421.146 421.763 422.3042 423.0381 424.8861 427.5728 428.239  
431.4799 434.1077];
```

A.1.2 Vannopptak ved 50 grader

```
t1[timer]=[0.001 1.3914 3.7411 5.7944 23.814 28.7194 119.5667 148.1631 174.1028];  
v1[gram]=[394.4653 396.7835 399.0654 399.8084 403.3838 404.14 413.1931 413.3592 413.4121];
```

```
t2[timer]=[0.001 1.3911 3.7408 5.7933 23.8111 28.7481 119.5644 148.1608 174.1019];  
v2[gram]=[400.4567 402.8717 405.2211 405.9107 409.5005 410.1783 419.6325 420.611 420.7009];
```

A.2 Beregning av C_0 for polymer-disk

Kapasitansen for en sirkulær parallell platekondensator kan beregnes ved hjelp av ligningene (A.1) og (A.2) [9]:

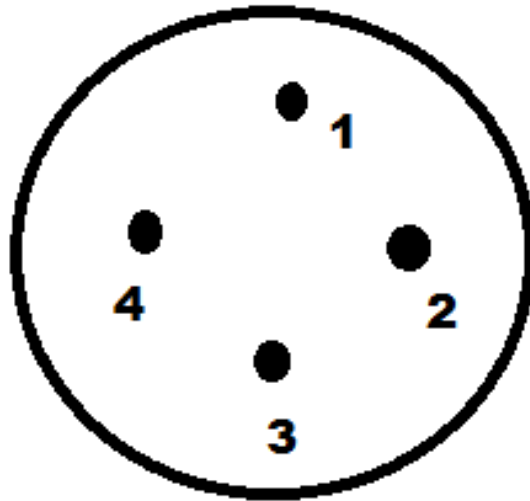
$$A = \pi * r^2 \quad (\text{A.1})$$

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{A.2})$$

Der A er kondensatorens areal, d er avstanden mellom elektrodene, ϵ_r er den relative permittiviteten til mediet mellom elektrodene og ϵ_0 er permittiviteten til luft.

A.2.1 måling av tykkelse på polymer-disk

For å gjøre beregningen av C_0 så nøyaktig som mulig, ble det gjennomført en måling av tykkelsen på polymer-diskene. Hver prøve ble målt på 4 forskjellige steder (se figur A.1), og gjennomsnittet ble deretter funnet for den aktuelle prøven.



Figur A.1: Prinsippkisse for tykkelsesmåling av PU-disk

Tabell A.2.1 viser resultatene fra målingen av tykkelsen på disken. Disken hadde en gjennomsnittlig tykkelse på 0.539mm og disk 2 hadde en gjennomsnittstykkelse på 0.54225mm.

Objekt 1	
1	0,53
2	0,532
3	0,548
4	0,546
Sum	2,156
Gj.snitt	0,539

Tabell A.1: Resultater fra tykkelsesmåling av prøvedisk

C_0 er beregnet med følgende parametre:

$$r = 37.5mm \tag{A.3}$$

$$d1 = 0.5390mm \tag{A.4}$$

$$d2 = 0.5425mm \tag{A.5}$$

$$\epsilon_r = 1 \tag{A.6}$$

$$\epsilon_0 = 8.8541878 * 10^{-12} \tag{A.7}$$

Følgelig:

$$A = \pi * (0.0375m)^2 = 0.0044m^2 \tag{A.8}$$

$$C_{01} = 1 * 8.8541878 * 10^{-12}m \frac{0.0044m}{0.000539m} = 7.2573 * 10^{-11}[F] \tag{A.9}$$

A.3 Dielektrisk spektroskopi på polymer-disk

A.3.1 Tørket disk

Configuration	Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (80Hz, 140V (RMS))
UST	0.00088 uA	-0.0012 nA	388.88 pF
GST-Guard	0.0032 uA	-	13.629 pF
GST-Ground	-	-	402.52 pF

#1:Amplitude = 140 V (RMS)

#1:C12 5nF

#1:Config: UST

#1:Frequency:	e'	e''	Tan-Delta	C
1000	5.0949	0.14168	0.027809	3.6975E-10
470.59	5.1639	0.15834	0.030663	3.7476E-10
222.22	5.241	0.17883	0.034122	3.8036E-10
90.395	5.3478	0.20934	0.039145	3.8811E-10
60.15	5.4021	0.22558	0.041759	3.9205E-10
40	5.4607	0.24331	0.044557	3.963E-10
20	5.5713	0.27745	0.049801	4.0432E-10

10	5.6971	0.31737	0.055708	4.1346E-10
4.6417	5.8581	0.3693	0.06304	4.2514E-10
2.1546	6.0453	0.43096	0.071289	4.3872E-10
1	6.2634	0.50414	0.08049	4.5455E-10
0.46417	6.5219	0.5904	0.090526	4.7332E-10
0.21544	6.8316	0.69128	0.10119	4.9579E-10
0.1	7.1863	0.81247	0.11306	

A.3.2 Disk etter 2 timer i vann ved 50 grader

Configuration	Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (80Hz, 140V (RMS))
UST	0.00019 uA	0.12 nA	969.89 pF
GST-Guard	0.0031 uA	-	14.613 pF
GST-Ground	-	-	984.53 pF

#1:Amplitude = 140 V (RMS)

#1:C12 5nF

#1:Config: UST

#1:Frequency:	e'	e''	Tan-Delta	Tan-Delta	C
1000	8.913	1.9251	0.21599	0.21599	6.4685E-10
470.59	9.834	2.5239	0.25665	0.25665	7.1369E-10
222.22	11.049	3.3266	0.30107	0.30107	8.0186E-10
90.395	13.041	4.6185	0.35415	0.35415	9.4644E-10
60.15	14.193	5.3492	0.37689	0.37689	1.03E-9
40	15.525	6.1704	0.39745	0.39745	1.1267E-9
20	18.242	7.8544	0.43056	0.43056	1.3239E-9
10	21.489	10.084	0.46924	0.46924	1.5595E-9
4.6417	25.711	13.842	0.53836	0.53836	1.8659E-9
2.1546	30.674	20.395	0.6649	0.6649	2.2261E-9
1	36.693	32.744	0.89236	0.89236	2.6629E-9
0.46417	44.795	56.693	1.2656	1.2656	3.2509E-9
0.21544	52.069	106.09	2.0375	2.0375	3.7788E-9
0.1	60.274	214.36	3.5565		

A.3.3 Disk etter 5 timer i vann ved 50 grader

Configuration	Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (80Hz, 140V (RMS))
UST	0.00022 uA	0.14 nA	1174.8 pF
GST-Guard	0.0032 uA	-	13.711 pF
GST-Ground	-	-	1188.1 pF

#1:Amplitude = 140 V (RMS)

#1:C12 5nF
 #1:Config: UST

#1:Frequency:	e'	e''	Tan-Delta	Tan-Delta	C
1000	10.244	2.6053	0.25432	0.25432	7.4344E-10
470.59	11.483	3.4252	0.29827	0.29827	8.3339E-10
222.22	13.11	4.5328	0.34574	0.34574	9.5146E-10
90.395	15.754	6.364	0.40395	0.40395	1.1434E-9
60.15	17.268	7.4529	0.4316	0.4316	1.2532E-9
40	19.002	8.7476	0.46036	0.46036	1.379E-9
20	22.486	11.677	0.51932	0.51932	1.6319E-9
10	26.658	16.188	0.60724	0.60724	1.9346E-9
4.6417	32.055	24.591	0.76715	0.76715	2.3263E-9
2.1546	38.618	41.599	1.0772	1.0772	2.8026E-9
1	46.782	76.16	1.628	1.628	3.3951E-9
0.46417	55.373	143.81	2.5972	2.5972	4.0186E-9
0.21544	66.308	297.42	4.4855	4.4855	4.8121E-9
0.1	75.477	640.97	8.4922		

A.4 Dielektrisk spektroskopi på innstøpt endeavslutning

A.4.1 Tørt objekt, 25 grader

Configuration Hum (50Hz) Offset Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
 UST 0.0039 uA -0.0045 nA 38.509 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
 #1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.783E-11	1.561E-13	0.004126
100	3.783E-11	1.561E-13	0.004126
50.31	3.789E-11	1.553E-13	0.0041
50.31	3.789E-11	1.484E-13	0.003917
20	3.798E-11	1.483E-13	0.003906
20	3.798E-11	1.482E-13	0.003904
10	3.808E-11	1.547E-13	0.004063
10	3.808E-11	1.545E-13	0.004058
5	3.814E-11	1.619E-13	0.004245
5	3.814E-11	1.618E-13	0.004243
2	3.823E-11	1.795E-13	0.004696
2	3.823E-11	1.8E-13	0.004708
1	3.844E-11	2.183E-13	0.005679

1	3.844E-11	2.184E-13	0.005683
0.5	3.851E-11	2.826E-13	0.007338
0.5	3.851E-11	2.829E-13	0.007346
0.2	3.86E-11	4.58E-13	0.01186
0.2	3.86E-11	4.593E-13	0.0119
0.1	3.864E-11	7.264E-13	0.0188
0.1	3.865E-11	7.303E-13	0.0189
0.05	3.889E-11	1.184E-12	0.03045
0.05	3.89E-11	1.193E-12	0.03068
0.02	3.961E-11	2.251E-12	0.05683
0.02	3.963E-11	2.296E-12	0.05794
0.01	4.04E-11	3.775E-12	0.09344
0.01	4.049E-11	3.926E-12	0.09697

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.785E-11	1.53E-13	0.004041
100	3.785E-11	1.528E-13	0.004038
50.31	3.789E-11	1.507E-13	0.003977
50.31	3.789E-11	1.542E-13	0.004069
20	3.798E-11	1.503E-13	0.003958
20	3.798E-11	1.503E-13	0.003957
10	3.804E-11	1.551E-13	0.004078
10	3.804E-11	1.552E-13	0.004079
5	3.814E-11	1.656E-13	0.004342
5	3.814E-11	1.658E-13	0.004346
2	3.823E-11	1.884E-13	0.004927
2	3.823E-11	1.885E-13	0.004931
1	3.83E-11	2.307E-13	0.006022
1	3.83E-11	2.311E-13	0.006033
0.5	3.851E-11	3.129E-13	0.008123
0.5	3.851E-11	3.135E-13	0.00814
0.2	3.865E-11	5.332E-13	0.0138
0.2	3.865E-11	5.34E-13	0.01382
0.1	3.878E-11	8.501E-13	0.02192
0.1	3.878E-11	8.528E-13	0.02199
0.05	3.897E-11	1.384E-12	0.03552
0.05	3.897E-11	1.389E-12	0.03565
0.02	3.971E-11	2.589E-12	0.06521
0.02	3.972E-11	2.613E-12	0.06579
0.01	4.09E-11	4.164E-12	0.1018
0.01	4.091E-11	4.187E-12	0.1024

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.785E-11	1.497E-13	0.003954
100	3.785E-11	1.495E-13	0.003951
50.31	3.791E-11	1.487E-13	0.003922
50.31	3.791E-11	1.496E-13	0.003945
20	3.797E-11	1.533E-13	0.004036
20	3.797E-11	1.533E-13	0.004038
10	3.804E-11	1.562E-13	0.004107
10	3.804E-11	1.563E-13	0.00411
5	3.811E-11	1.663E-13	0.004365
5	3.811E-11	1.664E-13	0.004367
2	3.823E-11	1.966E-13	0.005143
2	3.823E-11	1.968E-13	0.005147
1	3.831E-11	2.383E-13	0.006222
1	3.83E-11	2.386E-13	0.00623
0.5	3.838E-11	3.228E-13	0.008411
0.5	3.838E-11	3.23E-13	0.008417
0.2	3.865E-11	5.556E-13	0.01437
0.2	3.866E-11	5.58E-13	0.01444
0.1	3.883E-11	8.877E-13	0.02286
0.1	3.883E-11	8.885E-13	0.02288
0.05	3.91E-11	1.427E-12	0.0365
0.05	3.91E-11	1.431E-12	0.03661
0.02	3.976E-11	2.633E-12	0.06623
0.02	3.976E-11	2.643E-12	0.06647
0.01	4.084E-11	4.149E-12	0.1016
0.01	4.084E-11	4.149E-12	0.1016

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.785E-11	1.463E-13	0.003864
100	3.785E-11	1.46E-13	0.003858
50.31	3.792E-11	1.467E-13	0.003869
50.31	3.792E-11	1.466E-13	0.003867
20	3.8E-11	1.505E-13	0.003961
20	3.8E-11	1.507E-13	0.003965
10	3.804E-11	1.576E-13	0.004144
10	3.804E-11	1.577E-13	0.004146
5	3.811E-11	1.676E-13	0.004399
5	3.811E-11	1.676E-13	0.004399

2	3.82E-11	1.971E-13	0.00516
2	3.82E-11	1.968E-13	0.005152
1	3.83E-11	2.437E-13	0.006361
1	3.83E-11	2.435E-13	0.006356
0.5	3.839E-11	3.269E-13	0.008515
0.5	3.839E-11	3.276E-13	0.008533
0.2	3.853E-11	5.575E-13	0.01447
0.2	3.853E-11	5.58E-13	0.01448
0.1	3.884E-11	8.898E-13	0.02291
0.1	3.884E-11	8.909E-13	0.02294
0.05	3.915E-11	1.427E-12	0.03645
0.05	3.915E-11	1.43E-12	0.03651
0.02	3.988E-11	2.588E-12	0.0649
0.02	3.988E-11	2.593E-12	0.06502
0.01	4.083E-11	4.086E-12	0.1001
0.01	4.089E-11	4.178E-12	0.1022

A.4.2 Tørt prøveobjekt ved 70 grader

Configuration Hum (50Hz) Offset Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
UST 0.0032 uA -0.0079 nA 45.258 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
#1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.692E-11	2.428E-13	0.006575
100	3.692E-11	2.442E-13	0.006615
50.31	3.697E-11	3.782E-13	0.01023
50.31	3.697E-11	3.808E-13	0.0103
20	3.712E-11	7.677E-13	0.02068
20	3.712E-11	7.726E-13	0.02081
10	3.741E-11	1.317E-12	0.0352
10	3.741E-11	1.324E-12	0.0354
5	3.788E-11	2.194E-12	0.05792
5	3.788E-11	2.202E-12	0.05813
2	3.919E-11	4.181E-12	0.1067
2	3.92E-11	4.191E-12	0.1069
1	4.172E-11	6.484E-12	0.1554
1	4.174E-11	6.494E-12	0.1556
0.5	4.625E-11	7.898E-12	0.1708
0.5	4.631E-11	7.949E-12	0.1716
0.2	5.207E-11	5.748E-12	0.1104
0.2	5.208E-11	5.748E-12	0.1104
0.1	5.373E-11	3.354E-12	0.06243

0.1	5.373E-11	3.356E-12	0.06247
0.05	5.432E-11	1.842E-12	0.03392
0.05	5.432E-11	1.846E-12	0.03398
0.02	5.467E-11	8.873E-13	0.01623
0.02	5.467E-11	8.851E-13	0.01619
0.01	5.443E-11	6.223E-13	0.01143
0.01	5.442E-11	6.208E-13	0.01141

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.69E-11	2.649E-13	0.007178
100	3.69E-11	2.65E-13	0.007181
50.31	3.694E-11	4.151E-13	0.01124
50.31	3.694E-11	4.155E-13	0.01125
20	3.711E-11	8.334E-13	0.02246
20	3.711E-11	8.345E-13	0.02249
10	3.738E-11	1.405E-12	0.03759
10	3.738E-11	1.407E-12	0.03764
5	3.792E-11	2.32E-12	0.06118
5	3.792E-11	2.323E-12	0.06126
2	3.933E-11	4.384E-12	0.1115
2	3.933E-11	4.39E-12	0.1116
1	4.189E-11	6.668E-12	0.1592
1	4.19E-11	6.675E-12	0.1593
0.5	4.678E-11	7.938E-12	0.1697
0.5	4.679E-11	7.94E-12	0.1697
0.2	5.235E-11	5.499E-12	0.105
0.2	5.236E-11	5.494E-12	0.1049
0.1	5.393E-11	3.153E-12	0.05846
0.1	5.394E-11	3.147E-12	0.05834
0.05	5.432E-11	1.708E-12	0.03145
0.05	5.432E-11	1.705E-12	0.03138
0.02	5.452E-11	8.296E-13	0.01522
0.02	5.452E-11	8.267E-13	0.01516
0.01	5.469E-11	6.115E-13	0.01118
0.01	5.469E-11	6.126E-13	0.0112

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.687E-11	2.819E-13	0.007644

100	3.687E-11	2.82E-13	0.007648
50.31	3.693E-11	4.419E-13	0.01196
50.31	3.693E-11	4.431E-13	0.012
20	3.709E-11	8.892E-13	0.02397
20	3.709E-11	8.894E-13	0.02398
10	3.739E-11	1.486E-12	0.03974
10	3.739E-11	1.486E-12	0.03975
5	3.792E-11	2.436E-12	0.06424
5	3.792E-11	2.437E-12	0.06425
2	3.945E-11	4.584E-12	0.1162
2	3.945E-11	4.585E-12	0.1162
1	4.219E-11	6.858E-12	0.1625
1	4.219E-11	6.855E-12	0.1625
0.5	4.698E-11	7.88E-12	0.1677
0.5	4.698E-11	7.883E-12	0.1678
0.2	5.248E-11	5.332E-12	0.1016
0.2	5.248E-11	5.337E-12	0.1017
0.1	5.399E-11	3.07E-12	0.05687
0.1	5.399E-11	3.075E-12	0.05696
0.05	5.444E-11	1.687E-12	0.031
0.05	5.444E-11	1.694E-12	0.03111
0.02	5.451E-11	8.405E-13	0.01542
0.02	5.452E-11	8.445E-13	0.01549
0.01	5.459E-11	6.283E-13	0.01151
0.01	5.46E-11	6.311E-13	0.01156

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.688E-11	2.745E-13	0.007443
100	3.688E-11	2.745E-13	0.007443
50.31	3.694E-11	4.253E-13	0.01151
50.31	3.694E-11	4.262E-13	0.01154
20	3.712E-11	8.522E-13	0.02296
20	3.712E-11	8.52E-13	0.02295
10	3.737E-11	1.427E-12	0.03819
10	3.737E-11	1.427E-12	0.03818
5	3.789E-11	2.338E-12	0.06172
5	3.788E-11	2.337E-12	0.0617
2	3.929E-11	4.397E-12	0.1119
2	3.929E-11	4.396E-12	0.1119
1	4.187E-11	6.667E-12	0.1592
1	4.188E-11	6.67E-12	0.1593
0.5	4.658E-11	7.912E-12	0.1699
0.5	4.659E-11	7.914E-12	0.1699

0.2	5.214E-11	5.496E-12	0.1054
0.2	5.215E-11	5.494E-12	0.1053
0.1	5.397E-11	3.178E-12	0.0589
0.1	5.397E-11	3.174E-12	0.05882
0.05	5.45E-11	1.73E-12	0.03175
0.05	5.45E-11	1.726E-12	0.03167
0.02	5.465E-11	8.481E-13	0.01552
0.02	5.465E-11	8.437E-13	0.01544
0.01	5.458E-11	6.436E-13	0.01179
0.01	5.457E-11	6.461E-13	0.01184

A.4.3 Prøveobjekt etter 3 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))	
UST	0.004 uA	13 nA	44.799 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
#1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.9551E-11	4.8249E-12	0.12199
100	3.955E-11	4.8226E-12	0.12194
50.314	4.1077E-11	6.7035E-12	0.1632
50.314	4.1082E-11	6.7032E-12	0.16316
20	4.2953E-11	1.1465E-11	0.26692
20	4.2963E-11	1.1441E-11	0.2663
10	4.3617E-11	2.0017E-11	0.45893
10	4.3624E-11	1.9958E-11	0.45751
5	4.395E-11	3.7944E-11	0.86336
5	4.3985E-11	3.7729E-11	0.85778
2	4.4534E-11	9.1934E-11	2.0644
2	4.4545E-11	9.1243E-11	2.0483
1	4.5535E-11	1.8013E-10	3.9558
1	4.562E-11	1.7915E-10	3.9269
0.5	4.7429E-11	3.529E-10	7.4405
0.5	4.722E-11	3.5308E-10	7.4774
0.2	5.087E-11	8.6125E-10	16.93
0.2	5.0634E-11	8.5763E-10	16.938
0.1	5.2158E-11	1.6551E-9	31.734
0.1	5.2756E-11	1.6452E-9	31.185

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.9493E-11	4.798E-12	0.12149
100	3.9494E-11	4.7987E-12	0.1215
50.314	4.1019E-11	6.6075E-12	0.16108
50.314	4.1017E-11	6.5985E-12	0.16087
20	4.3005E-11	1.1068E-11	0.25738
20	4.2989E-11	1.1068E-11	0.25745
10	4.3681E-11	1.9065E-11	0.43645
10	4.3698E-11	1.8985E-11	0.43445
5	4.4134E-11	3.5767E-11	0.81042
5	4.4114E-11	3.5771E-11	0.81086
2	4.4777E-11	8.7119E-11	1.9456
2	4.4744E-11	8.704E-11	1.9453
1	4.5902E-11	1.7173E-10	3.7412
1	4.5858E-11	1.715E-10	3.7399
0.5	4.825E-11	3.3949E-10	7.0362
0.5	4.8373E-11	3.3943E-10	7.0169
0.2	5.4917E-11	8.3178E-10	15.146
0.2	5.4824E-11	8.3238E-10	15.183
0.1	6.278E-11	1.6344E-9	26.034
0.1	6.3093E-11	1.6277E-9	25.798

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.941E-11	4.7542E-12	0.12063
100	3.9411E-11	4.7548E-12	0.12065
50.314	4.0898E-11	6.5258E-12	0.15956
50.314	4.0901E-11	6.5244E-12	0.15952
20	4.269E-11	1.1139E-11	0.26094
20	4.2689E-11	1.1135E-11	0.26085
10	4.3295E-11	1.9507E-11	0.45056
10	4.3288E-11	1.9509E-11	0.45068
5	4.3628E-11	3.7338E-11	0.85582
5	4.3617E-11	3.7341E-11	0.85611
2	4.437E-11	9.173E-11	2.0674
2	4.4342E-11	9.1823E-11	2.0708
1	4.5733E-11	1.8076E-10	3.9525
1	4.5723E-11	1.8016E-10	3.9403
0.5	4.8618E-11	3.5328E-10	7.2665
0.5	4.8554E-11	3.5347E-10	7.2799
0.2	5.7744E-11	8.6426E-10	14.967
0.2	5.6893E-11	8.6699E-10	15.239

0.1	7.0542E-11	1.6896E-9	23.952
0.1	6.94E-11	1.684E-9	24.266

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	3.9357E-11	4.7315E-12	0.12022
100	3.9362E-11	4.737E-12	0.12034
50.314	4.0784E-11	6.4964E-12	0.15929
50.314	4.0778E-11	6.4982E-12	0.15936
20	4.2458E-11	1.1297E-11	0.26609
20	4.2462E-11	1.128E-11	0.26566
10	4.3028E-11	1.9929E-11	0.46317
10	4.3005E-11	1.9917E-11	0.46312
5	4.3407E-11	3.8047E-11	0.87652
5	4.3385E-11	3.8041E-11	0.87684
2	4.4266E-11	9.341E-11	2.1102
2	4.4217E-11	9.3673E-11	2.1185
1	4.5927E-11	1.8535E-10	4.0357
1	4.5874E-11	1.8498E-10	4.0322
0.5	4.9672E-11	3.6408E-10	7.3297
0.5	4.954E-11	3.6494E-10	7.3667
0.2	6.2413E-11	8.9812E-10	14.39
0.2	6.2042E-11	9.01E-10	14.522
0.1	8.6782E-11	1.7822E-9	20.536
0.1	8.5768E-11	1.7929E-9	20.904

A.4.4 Prøveobjekt etter 4 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

A.4.5 Prøveobjekt etter 4 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
UST	0.0047 uA	8.6 nA
		51.118 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
 #1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
=====			

100	4.0695E-11	6.65E-12	0.16341
100	4.0625E-11	6.7811E-12	0.16692
50.314	4.1655E-11	1.0455E-11	0.251
50.314	4.1715E-11	1.0469E-11	0.25095
20	4.2522E-11	2.2443E-11	0.52779
20	4.2704E-11	2.204E-11	0.51612
10	4.3307E-11	4.1115E-11	0.94939
10	4.3508E-11	4.0042E-11	0.92033
5	4.4223E-11	7.5232E-11	1.7012
5	4.4381E-11	7.3489E-11	1.6559
2	4.5709E-11	1.746E-10	3.8198
2	4.5841E-11	1.7012E-10	3.7111
1	4.8207E-11	3.2658E-10	6.7746
1	4.8204E-11	3.1996E-10	6.6376
0.5	5.2549E-11	6.1667E-10	11.735
0.5	5.2466E-11	6.116E-10	11.657
0.2	6.5146E-11	1.4783E-9	22.692
0.2	6.5328E-11	1.475E-9	22.579
0.1	8.3939E-11	2.849E-9	33.942
0.1	8.2964E-11	2.8453E-9	34.295

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.1259E-11	7.1241E-12	0.17267
100	4.1266E-11	7.1285E-12	0.17274
50.314	4.3243E-11	9.4852E-12	0.21935
50.314	4.323E-11	9.4963E-12	0.21967
20	4.4549E-11	1.7646E-11	0.39611
20	4.4538E-11	1.7663E-11	0.39657
10	4.4849E-11	3.3171E-11	0.73962
10	4.483E-11	3.3232E-11	0.74128
5	4.5185E-11	6.5167E-11	1.4422
5	4.518E-11	6.5071E-11	1.4403
2	4.6148E-11	1.6117E-10	3.4925
2	4.614E-11	1.605E-10	3.4786
1	4.8035E-11	3.1795E-10	6.6192
1	4.8045E-11	3.1718E-10	6.6016
0.5	5.2421E-11	6.2527E-10	11.928
0.5	5.2512E-11	6.2582E-10	11.918
0.2	6.6001E-11	1.541E-9	23.347
0.2	6.563E-11	1.5464E-9	23.562
0.1	8.7374E-11	3.027E-9	34.645
0.1	8.68E-11	3.0348E-9	34.963

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.1148E-11	7.1758E-12	0.17439
100	4.1165E-11	7.177E-12	0.17435
50.314	4.3096E-11	9.6079E-12	0.22294
50.314	4.3095E-11	9.6083E-12	0.22296
20	4.4262E-11	1.8195E-11	0.41107
20	4.4261E-11	1.8187E-11	0.41091
10	4.4583E-11	3.4201E-11	0.76712
10	4.4594E-11	3.4123E-11	0.76521
5	4.4951E-11	6.6747E-11	1.4849
5	4.4949E-11	6.6464E-11	1.4787
2	4.6148E-11	1.6437E-10	3.5617
2	4.6105E-11	1.641E-10	3.5594
1	4.84E-11	3.2577E-10	6.7309
1	4.8369E-11	3.2584E-10	6.7365
0.5	5.3244E-11	6.4487E-10	12.112
0.5	5.3112E-11	6.468E-10	12.178
0.2	6.9535E-11	1.6041E-9	23.068
0.2	6.91E-11	1.6052E-9	23.23
0.1	9.7197E-11	3.1348E-9	32.252
0.1	9.697E-11	3.1206E-9	32.181

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.1085E-11	7.1786E-12	0.17473
100	4.1113E-11	7.1844E-12	0.17475
50.314	4.3025E-11	9.6386E-12	0.22402
50.314	4.3057E-11	9.6146E-12	0.2233
20	4.4359E-11	1.8024E-11	0.40633
20	4.4426E-11	1.7865E-11	0.40212
10	4.4825E-11	3.3311E-11	0.74314
10	4.4865E-11	3.3098E-11	0.73773
5	4.5379E-11	6.4692E-11	1.4256
5	4.5384E-11	6.4478E-11	1.4207
2	4.7133E-11	1.5921E-10	3.3779
2	4.7013E-11	1.5952E-10	3.3931
1	5.0321E-11	3.1681E-10	6.2959
1	5.0302E-11	3.1622E-10	6.2865
0.5	5.7932E-11	6.2662E-10	10.817

0.5	5.7428E-11	6.2809E-10	10.937
0.2	8.4271E-11	1.5449E-9	18.333
0.2	8.3991E-11	1.5481E-9	18.432
0.1	1.3487E-10	3.0671E-9	22.741
0.1	1.3401E-10	3.0796E-9	22.98

A.4.6 Prøveobjekt etter 5 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration Hum (50Hz) Offset Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
UST 0.00069 uA 7 nA 56.973 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
#1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.1743E-11	9.1152E-12	0.21836
100	4.1767E-11	9.1062E-12	0.21802
50.314	4.2931E-11	1.378E-11	0.32099
50.314	4.2974E-11	1.3728E-11	0.31946
20	4.3611E-11	3.0079E-11	0.68971
20	4.3661E-11	2.988E-11	0.68438
10	4.4021E-11	5.7876E-11	1.3148
10	4.4068E-11	5.7474E-11	1.3042
5	4.4582E-11	1.1289E-10	2.5322
5	4.4598E-11	1.1256E-10	2.5239
2	4.6202E-11	2.7817E-10	6.0206
2	4.6191E-11	2.7723E-10	6.0019
1	4.924E-11	5.5066E-10	11.183
1	4.9308E-11	5.4807E-10	11.115
0.5	5.584E-11	1.0835E-9	19.404
0.5	5.5785E-11	1.0818E-9	19.393
0.2	7.6748E-11	2.6732E-9	34.831
0.2	7.6592E-11	2.6672E-9	34.824
0.1	1.1133E-10	5.2656E-9	47.296
0.1	1.0997E-10	5.2526E-9	47.762

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
---------------	----	-----	-----------

100	4.203E-11	9.0606E-12	0.21558
100	4.2049E-11	9.0534E-12	0.21531
50.314	4.3343E-11	1.3293E-11	0.3067
50.314	4.3348E-11	1.3283E-11	0.30643
20	4.3974E-11	2.8834E-11	0.6557
20	4.3963E-11	2.8877E-11	0.65685
10	4.4225E-11	5.6322E-11	1.2735
10	4.4228E-11	5.6271E-11	1.2723
5	4.4731E-11	1.119E-10	2.5016
5	4.4733E-11	1.1178E-10	2.4988
2	4.6375E-11	2.777E-10	5.9881
2	4.6375E-11	2.777E-10	5.9881
1	4.9553E-11	5.5208E-10	11.141
1	4.9469E-11	5.5288E-10	11.176
0.5	5.6436E-11	1.1034E-9	19.552
0.5	5.5493E-11	1.1037E-9	19.89
0.2	7.5633E-11	2.7311E-9	36.109
0.2	7.8804E-11	2.7368E-9	34.73
0.1	1.1364E-10	5.4087E-9	47.597
0.1	1.1078E-10	5.4122E-9	48.854

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.1962E-11	9.1732E-12	0.21861
100	4.1991E-11	9.1612E-12	0.21817
50.314	4.3281E-11	1.3533E-11	0.31268
50.314	4.3305E-11	1.3502E-11	0.31178
20	4.3906E-11	2.9445E-11	0.67064
20	4.3898E-11	2.9427E-11	0.67034
10	4.4188E-11	5.7429E-11	1.2996
10	4.4198E-11	5.7341E-11	1.2974
5	4.4779E-11	1.1366E-10	2.5382
5	4.4796E-11	1.1352E-10	2.5342
2	4.6768E-11	2.8255E-10	6.0416
2	4.6732E-11	2.8237E-10	6.0422
1	5.0375E-11	5.6173E-10	11.151
1	5.032E-11	5.6216E-10	11.172
0.5	5.8709E-11	1.1168E-9	19.022
0.5	5.8543E-11	1.118E-9	19.097
0.2	8.6415E-11	2.7704E-9	32.06
0.2	8.611E-11	2.772E-9	32.191
0.1	1.3251E-10	5.497E-9	41.484
0.1	1.3207E-10	5.5003E-9	41.645

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.2022E-11	9.2173E-12	0.21934
100	4.2058E-11	9.2045E-12	0.21885
50.314	4.3435E-11	1.3448E-11	0.30961
50.314	4.3469E-11	1.3403E-11	0.30835
20	4.4125E-11	2.9077E-11	0.65898
20	4.4153E-11	2.8964E-11	0.656
10	4.4472E-11	5.65E-11	1.2705
10	4.4483E-11	5.6298E-11	1.2656
5	4.5215E-11	1.1139E-10	2.4636
5	4.5179E-11	1.1154E-10	2.4688
2	4.7808E-11	2.7703E-10	5.7947
2	4.7707E-11	2.774E-10	5.8146
1	5.3059E-11	5.5177E-10	10.399
1	5.3072E-11	5.4953E-10	10.354
0.5	6.6157E-11	1.08E-9	16.325
0.5	6.6006E-11	1.0817E-9	16.388
0.2	1.2064E-10	2.6324E-9	21.82
0.2	1.1559E-10	2.651E-9	22.934
0.1	2.1979E-10	5.1889E-9	23.608
0.1	2.1243E-10	5.1989E-9	24.473

#5:Amplitude = 1 kV (RMS)

#5:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.216E-11	9.183E-12	0.21781
100	4.2122E-11	9.2043E-12	0.21852
50.314	4.3445E-11	1.3407E-11	0.3086
50.314	4.343E-11	1.3433E-11	0.3093
20	4.4023E-11	2.9202E-11	0.66332
20	4.4001E-11	2.9283E-11	0.66551
10	4.4235E-11	5.7219E-11	1.2935
10	4.4248E-11	5.7125E-11	1.291
5	4.4732E-11	1.1308E-10	2.5279
5	4.4753E-11	1.1266E-10	2.5174
2	4.63E-11	2.7798E-10	6.0039
2	4.6317E-11	2.7653E-10	5.9704
1	4.9171E-11	5.4719E-10	11.128
1	4.9189E-11	5.4469E-10	11.073
0.5	5.6006E-11	1.0798E-9	19.281

0.5	5.5754E-11	1.0798E-9	19.368
0.2	7.6941E-11	2.6637E-9	34.62
0.2	7.6432E-11	2.6622E-9	34.83
0.1	1.1195E-10	5.2364E-9	46.775
0.1	1.0998E-10	5.2202E-9	47.465

A.4.7 Prøveobjekt etter 7 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration	Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
UST	0.0039 uA	91 nA	61.853 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
 #1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.285E-11	1.3376E-11	0.31216
100	4.2821E-11	1.3425E-11	0.3135
50.314	4.3523E-11	2.2795E-11	0.52373
50.314	4.3476E-11	2.2943E-11	0.52773
20	4.3801E-11	5.5003E-11	1.2557
20	4.3769E-11	5.5338E-11	1.2643
10	4.411E-11	1.1073E-10	2.5102
10	4.4086E-11	1.1129E-10	2.5244
5	4.4824E-11	2.2268E-10	4.968
5	4.482E-11	2.2289E-10	4.9731
2	4.728E-11	5.531E-10	11.698
2	4.728E-11	5.5138E-10	11.662
1	5.149E-11	1.0897E-9	21.163
1	5.1518E-11	1.0788E-9	20.941
0.5	5.9046E-11	2.1181E-9	35.872
0.5	5.8879E-11	2.1038E-9	35.73
0.2	7.3849E-11	5.1431E-9	69.644
0.2	7.4864E-11	5.085E-9	67.923
0.1	8.5209E-11	9.7892E-9	114.89
0.1	8.9522E-11	9.5995E-9	107.23

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
---------------	----	-----	-----------

100	4.3377E-11	1.3002E-11	0.29974
100	4.3412E-11	1.2965E-11	0.29866
50.314	4.4318E-11	2.1102E-11	0.47615
50.314	4.4356E-11	2.1008E-11	0.47363
20	4.4945E-11	4.7846E-11	1.0646
20	4.5137E-11	4.6578E-11	1.0319
10	4.5691E-11	8.8294E-11	1.9324
10	4.5826E-11	8.6535E-11	1.8883
5	4.655E-11	1.6874E-10	3.625
5	4.6566E-11	1.6815E-10	3.611
2	4.8466E-11	4.1848E-10	8.6344
2	4.8444E-11	4.2067E-10	8.6836
1	5.2007E-11	8.437E-10	16.223
1	5.2002E-11	8.4698E-10	16.287
0.5	5.9921E-11	1.7015E-9	28.396
0.5	6.0206E-11	1.7069E-9	28.351
0.2	8.4201E-11	4.2457E-9	50.424
0.2	8.4069E-11	4.2498E-9	50.552
0.1	1.2038E-10	8.4556E-9	70.239
0.1	1.1997E-10	8.455E-9	70.477

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.4101E-11	1.2504E-11	0.28354
100	4.4134E-11	1.2475E-11	0.28266
50.314	4.5225E-11	1.9574E-11	0.43281
50.314	4.5246E-11	1.9542E-11	0.43191
20	4.568E-11	4.478E-11	0.98031
20	4.5714E-11	4.4597E-11	0.97557
10	4.6031E-11	8.7697E-11	1.9052
10	4.6039E-11	8.7688E-11	1.9046
5	4.6685E-11	1.7434E-10	3.7343
5	4.6674E-11	1.7436E-10	3.7357
2	4.8999E-11	4.3442E-10	8.866
2	4.8953E-11	4.3284E-10	8.842
1	5.3354E-11	8.5786E-10	16.079
1	5.3333E-11	8.5508E-10	16.033
0.5	6.3371E-11	1.6899E-9	26.666
0.5	6.3192E-11	1.6885E-9	26.72
0.2	9.6355E-11	4.1651E-9	43.227
0.2	9.5567E-11	4.1494E-9	43.419
0.1	1.625E-10	8.0935E-9	49.805
0.1	1.6116E-10	8.0007E-9	49.644

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.4736E-11	1.2121E-11	0.27094
100	4.4941E-11	1.1895E-11	0.26467
50.314	4.6498E-11	1.7132E-11	0.36845
50.314	4.6604E-11	1.6881E-11	0.36222
20	4.7347E-11	3.6775E-11	0.77671
20	4.7469E-11	3.6061E-11	0.75968
10	4.7997E-11	7.0079E-11	1.4601
10	4.8089E-11	6.8843E-11	1.4316
5	4.9397E-11	1.3528E-10	2.7387
5	4.9387E-11	1.3419E-10	2.7172
2	5.4184E-11	3.3098E-10	6.1086
2	5.4085E-11	3.2737E-10	6.053
1	6.3704E-11	6.4786E-10	10.17
1	6.331E-11	6.4385E-10	10.17
0.5	8.6405E-11	1.2664E-9	14.657
0.5	8.5741E-11	1.2698E-9	14.81
0.2	1.7226E-10	3.1073E-9	18.039
0.2	1.7016E-10	3.0885E-9	18.151
0.1	3.2621E-10	6.0307E-9	18.487
0.1	3.1428E-10	6.0174E-9	19.147

#5:Amplitude = 1 kV (RMS)

#5:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.5574E-11	1.1331E-11	0.24863
100	4.5497E-11	1.1419E-11	0.25097
50.314	4.6926E-11	1.6239E-11	0.34606
50.314	4.6914E-11	1.629E-11	0.34724
20	4.7488E-11	3.5322E-11	0.7438
20	4.7482E-11	3.5368E-11	0.74488
10	4.7674E-11	6.9242E-11	1.4524
10	4.7671E-11	6.9288E-11	1.4535
5	4.8079E-11	1.3792E-10	2.8686
5	4.8072E-11	1.3803E-10	2.8714
2	4.9452E-11	3.4332E-10	6.9423
2	4.9447E-11	3.4313E-10	6.9393
1	5.2132E-11	6.8213E-10	13.085
1	5.2101E-11	6.8068E-10	13.064
0.5	5.8309E-11	1.3561E-9	23.257

0.5	5.8455E-11	1.3565E-9	23.207
0.2	7.9295E-11	3.359E-9	42.36
0.2	7.9805E-11	3.3569E-9	42.064
0.1	1.1667E-10	6.6173E-9	56.72
0.1	1.1605E-10	6.5832E-9	56.727

A.4.8 Prøveobjekt etter 8 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration	Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
UST	0.00094 uA	6 nA	10.931 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
 #1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	5.2459E-12	4.2565E-12	0.81139
100	5.3244E-12	4.6042E-12	0.86472
50.314	6.2179E-12	7.7452E-12	1.2456
50.314	6.1495E-12	7.7529E-12	1.2607
20	7.4692E-12	1.5405E-11	2.0625
20	7.4851E-12	1.5581E-11	2.0817
10	7.9546E-12	2.7999E-11	3.5199
10	7.9499E-12	2.8073E-11	3.5312
5	8.4067E-12	5.4155E-11	6.4419
5	7.8638E-12	5.2909E-11	6.7282
2	9.0679E-12	1.3473E-10	14.858
2	8.4158E-12	1.2977E-10	15.419
1	9.8003E-12	2.5003E-10	25.512
1	9.0536E-12	2.4412E-10	26.964
0.5	1.196E-11	4.8607E-10	40.642
0.5	9.3194E-12	4.7625E-10	51.103
0.2	-9.5578E-12	1.1691E-9	-122.32
0.2	-1.1734E-11	1.1731E-9	-99.976
0.1	-1.8339E-12	2.4073E-9	-1312.6
0.1	-2.5373E-11	2.3646E-9	-93.192

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	7.1621E-12	9.6673E-12	1.3498
100	6.9633E-12	9.1896E-12	1.3197
50.314	8.2965E-12	1.2572E-11	1.5153
50.314	8.2377E-12	1.2481E-11	1.5151
20	9.5151E-12	2.0495E-11	2.154
20	9.4505E-12	2.0379E-11	2.1564
10	9.7088E-12	3.4347E-11	3.5377
10	9.7243E-12	3.4242E-11	3.5213
5	9.78E-12	6.5987E-11	6.7471
5	9.5064E-12	6.4954E-11	6.8327
2	9.6255E-12	1.6038E-10	16.662
2	9.1891E-12	1.5885E-10	17.287
1	9.8242E-12	3.2094E-10	32.669
1	9.4321E-12	3.1256E-10	33.138
0.5	1.005E-11	6.2341E-10	62.029
0.5	9.6494E-12	6.1693E-10	63.934
0.2	1.1839E-11	1.5274E-9	129.01
0.2	1.2359E-11	1.5154E-9	122.61
0.1	3.1612E-11	2.9856E-9	94.445
0.1	2.9015E-11	2.9458E-9	101.53

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	1.2447E-11	1.3964E-11	1.1219
100	1.1939E-11	1.2656E-11	1.06
50.314	1.6185E-11	2.0226E-11	1.2497
50.314	1.6208E-11	2.024E-11	1.2488
20	1.7519E-11	2.9613E-11	1.6903
20	1.7448E-11	2.9614E-11	1.6973
10	1.7242E-11	4.8091E-11	2.7893
10	1.7213E-11	4.8183E-11	2.7993
5	1.7149E-11	8.9671E-11	5.2288
5	1.7098E-11	8.9409E-11	5.2293
2	1.7576E-11	2.1944E-10	12.485
2	1.7455E-11	2.1871E-10	12.53
1	1.816E-11	4.359E-10	24.003
1	1.7979E-11	4.3528E-10	24.21
0.5	1.9216E-11	8.6657E-10	45.097
0.5	1.9342E-11	8.6465E-10	44.704
0.2	3.0583E-11	2.1471E-9	70.207
0.2	3.0895E-11	2.1486E-9	69.544
0.1	6.5631E-11	4.2915E-9	65.388

0.1 6.307E-11 4.2859E-9 67.955

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	1.1618E-11	7.5211E-12	0.64739
100	1.1504E-11	7.5236E-12	0.65401
50.314	1.575E-11	1.3622E-11	0.86491
50.314	1.5576E-11	1.3484E-11	0.86568
20	2.4589E-11	3.4311E-11	1.3954
20	2.4239E-11	3.3894E-11	1.3983
10	2.475E-11	5.8076E-11	2.3465
10	2.4864E-11	5.7862E-11	2.3271
5	2.5099E-11	1.0809E-10	4.3063
5	2.5163E-11	1.075E-10	4.2722
2	2.6617E-11	2.6127E-10	9.8159
2	2.6621E-11	2.6009E-10	9.7702
1	3.0112E-11	5.1557E-10	17.122
1	3.0063E-11	5.1342E-10	17.078
0.5	3.9833E-11	1.0137E-9	25.448
0.5	3.9571E-11	1.0096E-9	25.515
0.2	7.9721E-11	2.4449E-9	30.668
0.2	7.9007E-11	2.4434E-9	30.926
0.1	1.7311E-10	4.7194E-9	27.263
0.1	1.7686E-10	4.6902E-9	26.519

#5:Amplitude = 1 kV (RMS)

#5:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	6.5491E-12	8.6638E-12	1.3229
100	6.5395E-12	8.6534E-12	1.3232
50.314	8.2746E-12	1.2746E-11	1.5404
50.314	8.2783E-12	1.2759E-11	1.5413
20	1.064E-11	2.2037E-11	2.0711
20	1.0514E-11	2.1961E-11	2.0887
10	1.1085E-11	3.6588E-11	3.3008
10	1.1059E-11	3.6622E-11	3.3115
5	1.1377E-11	6.9608E-11	6.118
5	1.146E-11	6.9958E-11	6.1046
2	1.1871E-11	1.705E-10	14.363
2	1.1613E-11	1.6982E-10	14.624
1	1.2506E-11	3.3668E-10	26.922

1	1.2291E-11	3.3504E-10	27.258
0.5	1.5134E-11	6.6725E-10	44.089
0.5	1.4645E-11	6.6205E-10	45.207
0.2	1.9337E-11	1.6335E-9	84.472
0.2	1.6733E-11	1.6218E-9	96.925
0.1	2.6674E-11	3.2201E-9	120.72
0.1	2.6323E-11	3.1895E-9	121.17

A.4.9 Prøveobjekt etter 9 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration Hum (50Hz) Offset Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
UST 0.0011 uA 62 nA 61.495 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
#1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.6961E-11	1.2379E-11	0.26359
100	4.6997E-11	1.2328E-11	0.26232
50.314	4.8486E-11	1.7451E-11	0.35992
50.314	4.8518E-11	1.7371E-11	0.35802
20	4.9119E-11	3.7468E-11	0.7628
20	4.9144E-11	3.7288E-11	0.75875
10	4.9426E-11	7.2327E-11	1.4633
10	4.9445E-11	7.2066E-11	1.4575
5	4.9812E-11	1.4256E-10	2.8619
5	4.9819E-11	1.4217E-10	2.8538
2	5.1023E-11	3.5229E-10	6.9045
2	5.1039E-11	3.5114E-10	6.8798
1	5.3496E-11	6.9781E-10	13.044
1	5.35E-11	6.9368E-10	12.966
0.5	5.8413E-11	1.3716E-9	23.481
0.5	5.8332E-11	1.3691E-9	23.472
0.2	1.1072E-10	3.5065E-9	31.671
0.2	7.2693E-11	3.3619E-9	46.249
0.1	9.1473E-10	1.7608E-8	19.249
0.1	1.1115E-10	6.5513E-9	58.941

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency: c' c'' Tan-Delta

```

=====
100          4.709E-11      1.2078E-11      0.25648
100          4.7102E-11      1.2058E-11      0.256
50.314       4.8631E-11      1.6721E-11      0.34384
50.314       4.8617E-11      1.6746E-11      0.34445
20           4.9223E-11      3.59E-11         0.72934
20           4.9215E-11      3.5923E-11      0.72992
10           4.9437E-11      6.9993E-11      1.4158
10           4.9427E-11      7.007E-11       1.4176
5            4.9856E-11      1.3951E-10      2.7983
5            4.9857E-11      1.3935E-10      2.7949
2            5.1287E-11      3.4754E-10      6.7763
2            5.1253E-11      3.4826E-10      6.795
1            5.4204E-11      6.9498E-10      12.822
1            5.4224E-11      6.9612E-10      12.838
0.5          6.1003E-11      1.394E-9         22.851
0.5          6.111E-11       1.3971E-9        22.862
0.2          8.4317E-11      3.4762E-9        41.228
0.2          8.4016E-11      3.4779E-9        41.395
0.1          1.2535E-10      6.972E-9         55.619
0.1          1.2503E-10      6.9951E-9        55.946

```

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

```

#3:Frequency:  c'          c''          Tan-Delta
=====
100          4.683E-11      1.2429E-11      0.2654
100          4.684E-11      1.2409E-11      0.26491
50.314       4.8321E-11      1.7692E-11      0.36614
50.314       4.8334E-11      1.7646E-11      0.36509
20           4.8862E-11      3.8586E-11      0.78969
20           4.8863E-11      3.8562E-11      0.78919
10           4.9103E-11      7.5434E-11      1.5362
10           4.909E-11       7.5573E-11      1.5395
5            4.9582E-11      1.4974E-10      3.0201
5            4.9561E-11      1.4998E-10      3.0263
2            5.1383E-11      3.7514E-10      7.3008
2            5.1352E-11      3.7496E-10      7.3018
1            5.5016E-11      7.4861E-10      13.607
1            5.4916E-11      7.4929E-10      13.644
0.5          6.3779E-11      1.4986E-9        23.497
0.5          6.3669E-11      1.5001E-9        23.561
0.2          9.4001E-11      3.7436E-9        39.825
0.2          9.3459E-11      3.7575E-9        40.205
0.1          1.536E-10       7.4477E-9        48.488
0.1          1.522E-10       7.4541E-9        48.977

```

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.6688E-11	1.2646E-11	0.27087
100	4.6774E-11	1.2508E-11	0.26741
50.314	4.8274E-11	1.7785E-11	0.36841
50.314	4.8313E-11	1.7642E-11	0.36516
20	4.8937E-11	3.8331E-11	0.78327
20	4.8981E-11	3.793E-11	0.77439
10	4.9305E-11	7.3627E-11	1.4933
10	4.9371E-11	7.2519E-11	1.4689
5	5.0223E-11	1.4221E-10	2.8317
5	5.0261E-11	1.4114E-10	2.8082
2	5.3796E-11	3.4576E-10	6.4272
2	5.3891E-11	3.4255E-10	6.3565
1	6.2015E-11	6.7309E-10	10.854
1	6.2087E-11	6.6421E-10	10.698
0.5	8.353E-11	1.2937E-9	15.487
0.5	8.3405E-11	1.2871E-9	15.432
0.2	1.6652E-10	3.1344E-9	18.824
0.2	1.6564E-10	3.1247E-9	18.864
0.1	3.3141E-10	6.0937E-9	18.387
0.1	3.2425E-10	6.0455E-9	18.644

A.4.10 Prøveobjekt etter 10 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration Hum (50Hz)	Offset	Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))	
UST	0.0039 uA	1.3E3 nA	59.966 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)

#1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.8185E-11	1.0937E-11	0.22699
100	4.8192E-11	1.0929E-11	0.22677
50.314	4.9834E-11	1.3865E-11	0.27823
50.314	4.9836E-11	1.3867E-11	0.27825
20	5.0444E-11	2.8247E-11	0.55997
20	5.0438E-11	2.8274E-11	0.56056
10	5.0662E-11	5.4702E-11	1.0797
10	5.0651E-11	5.4811E-11	1.0821

5	5.014E-11	1.0744E-10	2.1428
5	4.9961E-11	1.0746E-10	2.1509
2	5.0684E-11	2.6775E-10	5.2828
2	5.059E-11	2.6809E-10	5.2992
1	5.2362E-11	5.3655E-10	10.247
1	5.243E-11	5.3689E-10	10.24
0.5	5.6139E-11	1.0697E-9	19.054
0.5	5.6655E-11	1.0741E-9	18.958
0.2	7.374E-11	2.672E-9	36.236
0.2	3.0447E-11	2.7088E-9	88.967
0.1	9.6574E-11	5.3512E-9	55.41
0.1	9.644E-11	5.3561E-9	55.538

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.7985E-11	1.1257E-11	0.2346
100	4.8003E-11	1.1231E-11	0.23396
50.314	4.9587E-11	1.4603E-11	0.2945
50.314	4.9589E-11	1.4598E-11	0.29438
20	5.0191E-11	3.021E-11	0.6019
20	5.0182E-11	3.0249E-11	0.60279
10	5.0377E-11	5.8643E-11	1.1641
10	5.037E-11	5.8654E-11	1.1645
5	5.074E-11	1.1647E-10	2.2955
5	5.0731E-11	1.1656E-10	2.2976
2	5.1903E-11	2.9048E-10	5.5966
2	5.1845E-11	2.9074E-10	5.6079
1	5.4204E-11	5.7997E-10	10.7
1	5.4132E-11	5.8066E-10	10.727
0.5	5.9821E-11	1.1603E-9	19.396
0.5	5.9652E-11	1.1631E-9	19.498
0.2	7.716E-11	2.8894E-9	37.447
0.2	7.7536E-11	2.8954E-9	37.343
0.1	1.0858E-10	5.7428E-9	52.889
0.1	1.0739E-10	5.7439E-9	53.485

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.7799E-11	1.1529E-11	0.2412
100	4.7829E-11	1.1486E-11	0.24014

50.314	4.9425E-11	1.5226E-11	0.30807
50.314	4.9436E-11	1.5195E-11	0.30737
20	5.0001E-11	3.1828E-11	0.63655
20	5.0002E-11	3.1786E-11	0.63568
10	5.022E-11	6.171E-11	1.2288
10	5.0214E-11	6.1693E-11	1.2286
5	5.0605E-11	1.2239E-10	2.4185
5	5.0588E-11	1.2243E-10	2.4202
2	5.207E-11	3.0565E-10	5.87
2	5.2032E-11	3.0537E-10	5.8689
1	5.4986E-11	6.0732E-10	11.045
1	5.4909E-11	6.0627E-10	11.041
0.5	6.1858E-11	1.2035E-9	19.456
0.5	6.1784E-11	1.2044E-9	19.493
0.2	8.611E-11	2.9909E-9	34.733
0.2	8.5591E-11	2.993E-9	34.968
0.1	1.3741E-10	5.9091E-9	43.002
0.1	1.3725E-10	5.907E-9	43.038

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.7758E-11	1.1597E-11	0.24284
100	4.7862E-11	1.1444E-11	0.23909
50.314	4.9495E-11	1.4993E-11	0.30292
50.314	4.9531E-11	1.4871E-11	0.30024
20	5.0156E-11	3.0965E-11	0.61738
20	5.0192E-11	3.0638E-11	0.61043
10	5.0453E-11	5.9077E-11	1.1709
10	5.0493E-11	5.8334E-11	1.1553
5	5.1098E-11	1.1453E-10	2.2414
5	5.1108E-11	1.1369E-10	2.2246
2	5.3424E-11	2.815E-10	5.2691
2	5.3401E-11	2.8043E-10	5.2515
1	5.868E-11	5.5907E-10	9.5275
1	5.8645E-11	5.5477E-10	9.4598
0.5	7.2656E-11	1.0912E-9	15.019
0.5	7.2502E-11	1.0921E-9	15.062
0.2	1.2878E-10	2.669E-9	20.726
0.2	1.2762E-10	2.6681E-9	20.907
0.1	2.3994E-10	5.2273E-9	21.786
0.1	2.3782E-10	5.2299E-9	21.991

A.4.11 Prøveobjekt etter 11 dager ved 70 grader og 95% luftfuktighet

Configuration Hum (50Hz) Offset Capacitance (0.5Hz, 1.5E3V (RMS))
 UST 0.0043 uA 77 nA 62.507 pF

#1:Amplitude = 500 V (RMS)
 #1:Config: off

#1:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.7034E-11	1.343E-11	0.28553
100	4.7041E-11	1.3417E-11	0.28522
50.314	4.84E-11	1.982E-11	0.4095
50.314	4.8432E-11	1.9698E-11	0.40673
20	4.9034E-11	4.3412E-11	0.88534
20	4.907E-11	4.3122E-11	0.87878
10	4.9404E-11	8.3819E-11	1.6966
10	4.943E-11	8.3344E-11	1.6861
5	4.9902E-11	1.64E-10	3.2865
5	4.9921E-11	1.6322E-10	3.2696
2	5.1412E-11	4.0351E-10	7.8485
2	5.1431E-11	3.998E-10	7.7735
1	5.4454E-11	7.9306E-10	14.564
1	5.4359E-11	7.8679E-10	14.474
0.5	6.0581E-11	1.5413E-9	25.442
0.5	6.0372E-11	1.5388E-9	25.489
0.2	7.9508E-11	3.8016E-9	47.814
0.2	7.9666E-11	3.7963E-9	47.653
0.1	1.0924E-10	7.4206E-9	67.933
0.1	1.0813E-10	7.3803E-9	68.251
0.05	1.5031E-10	1.447E-8	96.267
0.05	1.5981E-10	1.4383E-8	90.002
0.02	2.6654E-10	3.4928E-8	131.04
0.02	2.7609E-10	3.4523E-8	125.04
0.0099999	7.5294E-10	6.4873E-8	86.16
0.0099999	7.6976E-10	6.291E-8	81.726

#2:Amplitude = 1 kV (RMS)

#2:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
---------------	----	-----	-----------

100	4.787E-11	1.2128E-11	0.25336
100	4.7859E-11	1.2147E-11	0.25382
50.314	4.9392E-11	1.6678E-11	0.33768
50.314	4.9405E-11	1.6632E-11	0.33665
20	5.0042E-11	3.5406E-11	0.70753
20	5.0035E-11	3.5415E-11	0.70779
10	5.03E-11	6.8814E-11	1.3681
10	5.029E-11	6.8821E-11	1.3685
5	5.0755E-11	1.3691E-10	2.6975
5	5.0744E-11	1.3672E-10	2.6943
2	5.2238E-11	3.4045E-10	6.5172
2	5.222E-11	3.4009E-10	6.5125
1	5.5093E-11	6.7483E-10	12.249
1	5.505E-11	6.7499E-10	12.261
0.5	6.2105E-11	1.3429E-9	21.623
0.5	6.1937E-11	1.3435E-9	21.692
0.2	8.3165E-11	3.3354E-9	40.105
0.2	8.3779E-11	3.3412E-9	39.881
0.1	1.211E-10	6.5782E-9	54.321
0.1	1.2322E-10	6.549E-9	53.147
0.05	1.8638E-10	1.2751E-8	68.414
0.05	1.8349E-10	1.2673E-8	69.065
0.02	5.0646E-10	3.0907E-8	61.026
0.02	4.9123E-10	3.1162E-8	63.437
0.0099999	1.3324E-9	6.2711E-8	47.068
0.0099999	1.3804E-9	6.2704E-8	45.423

#3:Amplitude = 2 kV (RMS)

#3:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.7588E-11	1.2302E-11	0.2585
100	4.76E-11	1.228E-11	0.25798
50.314	4.9126E-11	1.707E-11	0.34748
50.314	4.9139E-11	1.7028E-11	0.34653
20	4.9722E-11	3.6634E-11	0.73678
20	4.9722E-11	3.66E-11	0.73609
10	5.0006E-11	7.1288E-11	1.4256
10	5E-11	7.1212E-11	1.4242
5	5.0511E-11	1.4145E-10	2.8003
5	5.0495E-11	1.4154E-10	2.803
2	5.2328E-11	3.5297E-10	6.7454
2	5.2302E-11	3.5283E-10	6.746
1	5.5891E-11	7.0217E-10	12.563
1	5.5861E-11	7.009E-10	12.547
0.5	6.435E-11	1.3908E-9	21.613

0.5	6.4188E-11	1.39E-9	21.655
0.2	9.2974E-11	3.4499E-9	37.106
0.2	9.2848E-11	3.4502E-9	37.16
0.1	1.5638E-10	6.8085E-9	43.537
0.1	1.5504E-10	6.8038E-9	43.884
0.05	3.1711E-10	1.3408E-8	42.283
0.05	3.2339E-10	1.3413E-8	41.476
0.02	1.0216E-9	3.1848E-8	31.175
0.02	1.1174E-9	3.1252E-8	27.969
0.0099999	4.0659E-9	5.7622E-8	14.172
0.0099999	4.1887E-9	5.6353E-8	13.453

#4:Amplitude = 4 kV (RMS)

#4:Frequency:	c'	c''	Tan-Delta
100	4.8113E-11	1.221E-11	0.25378
100	4.8103E-11	1.1881E-11	0.24699
50.314	4.9913E-11	1.5445E-11	0.30943
50.314	4.9956E-11	1.5315E-11	0.30658
20	5.0692E-11	3.162E-11	0.62376
20	5.0774E-11	3.1219E-11	0.61486
10	5.1339E-11	5.9958E-11	1.1679
10	5.1305E-11	5.9682E-11	1.1633
5	5.2292E-11	1.1774E-10	2.2516
5	5.2494E-11	1.1671E-10	2.2234
2	5.6743E-11	2.8893E-10	5.092
2	5.6458E-11	2.8843E-10	5.1088
1	6.6556E-11	5.7131E-10	8.5839
1	6.6105E-11	5.6643E-10	8.5687
0.5	8.9493E-11	1.1116E-9	12.421
0.5	8.8187E-11	1.1136E-9	12.628
0.2	1.6985E-10	2.7195E-9	16.011
0.2	1.726E-10	2.7082E-9	15.691
0.1	3.4039E-10	5.2587E-9	15.449
0.1	3.2994E-10	5.2974E-9	16.056
0.05	6.7984E-10	1.0353E-8	15.228
0.05	6.8482E-10	1.042E-8	15.216
0.02	1.8323E-9	2.4896E-8	13.588
0.02	1.7514E-9	2.4978E-8	14.262
0.0099999	3.3732E-9	4.7512E-8	14.085
0.0099999	3.3466E-9	4.7668E-8	14.244

Tillegg B

Matlab-script

B.1 Beregning av prosentmessig vannopptak i polymer og krympemateriale

```
tk1=[0.001 1.3566 3.7292 5.7603 23.8011 28.7233 119.5408 148.1703 174.1056]
vk1=[744.737 745.6028 745.9045 746.2774 748.1747 748.4598 751.8135 752.4291 752.9572]

tk2=[0.001 1.3275 3.7244 5.7572 23.7975 28.7181 119.5361 148.1656 174.1025]
vk2=[705.6888 706.6449 706.8166 707.2048 709.1251 709.4294 712.7982 713.2618 713.8274]

tp1=[0.001 1.3914 3.7411 5.7944 23.814 28.7194 119.5667 148.1631 174.1028]
vp1=[394.4653 396.7835 399.0654 399.8084 403.3838 404.14 413.1931 413.3592 413.4121]

tp2=[0.001 1.3911 3.7408 5.7933 23.8111 28.7481 119.5644 148.1608 174.1019]
vp2=[400.4567 402.8717 405.2211 405.9107 409.5005 410.1783 419.6325 420.611 420.7009]

vk1_ref=744.737
vk2_ref=705.6888

vp1_ref=394.4653
vp2_ref=400.4567

vk1_pu=vk1/vk1_ref
vk2_pu=vk2/vk2_ref

Tk=[tk1 tk2]
Vkpu=[vk1_pu vk2_pu]
Vk_p=(Vkpu-1)*100

vp1_pu=vp1/vp1_ref
vp2_pu=vp2/vp2_ref
```

```
Tp=[tp1 tp2]
Vppu=[vp1_pu vp2_pu]
Vp_p=(Vppu-1)*100
```

B.2 Plotting av prosentmessig vannopptak i 4mm tykk polymer

```
T=[0:5:1000]
Vp=5*(1-exp(-7.3*(0.0013617*T/(8^2))^(3/4)))
figure
plot(T,Vp)
grid on;
title('Prosentmessig vanninnhold i 4mm tykk polymer nedsenket i vann på en side');
xlabel('Tid [timer]'); ylabel('Vanninnhold i prosent');
```