

MASTER THESIS

LUTMDN(TMMV-5240)1-111/2011



LUND UNIVERSITY
Lund Institute of Technology

Bindemedelsystem för SM²C-material

Daniel Kihlbaum

2011

INSTITUTIONEN FÖR MASKINTEKNOLOGI
AVDELNINGEN FÖR INDUSTRIELL PRODUKTION
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Förord

Denna rapport är en redovisning av mitt examensarbete vid Avdelningen för Industriell Produktion. Det avslutar min civilingenjörsutbildning i teknisk-nanovetenskap. Examensarbetet motsvarar 30 högskolepoäng och har utförts mellan augusti 2010 och februari 2011.

Jag har i examensarbetet fördjupat mig i ett område som är relevant för min utbildning. Examensarbetet har även gett mig möjlighet att använda de kunskaper jag förvärvat under tidigare del av utbildningen.

Jag vill särskilt tacka min handledare Mats Andersson samt Tord Cedell, Leif Svensson och Kenneth Frogner för era idéer och den ovärderliga hjälp ni kommit med under examensarbetets gång. Jag vill även tacka personal på institutionen för era bidrag. Slutligen vill jag även tacka min familj och vänner för den hjälp och stöd ni givit mig under min utbildning.

Lund, februari 2011

Daniel Kihlbaum

Sammanfattning

En stor andel av dagens elektriska maskiner använder så kallade laminatbaserade magnetiska flödesledare. Denna metod begränsar i stor utsträckning utformningen av dessa flödesledare. Konstruktionen resulterar också i relativt stora effektförluster.

Avdelningen för Industriell Produktion driver därför i samarbete med Magnetic Components Sweden AB (MagComp) ett projekt där dessa laminerade flödesledare ersätts med gjutbara flödesledare av mjukmagnetiska pulverkompositier.

MagComps gjutbara flödesledare kallad SM²C består av ett mer eller mindre legerat järnpulver i en matris av epoxi. Epoxin ger kompositen hög mekanisk styrka i kombination med hög järnpulverpackning. På grund av epoxins utmärkta vätningssegenskaper isoleras också varje järnkorn väl elektriskt. Detta är nödvändigt för att uppnå en energieffektiv flödesledare. Epoxin har dock ett antal nackdelar så som dålig temperaturlåghet och arbete med epoxin involverar relativt stora hälsorisker.

I detta examensarbete undersöks därför möjligheten att ersätta epoxin med ett annat bindemedel.

Arbetet började med en undersökning av tänkbara bindemedel. Efter en kort utvärdering testades de mest lovande av dessa bindemedel. De testmetoder som användes var framtagna för att ge en uppfattning om kompositens lämplighet som magnetisk flödesledare. I undersökningen ingick såväl polymera som keramiska bindemedel.

De utförda testerna visade att andra konventionella polymerbaserade bindemedel har svårt att mäta sig med epoxin. Det framkom dock att vissa av de keramiska bindemedlen i vissa fall uppvisade bättre eller liknande egenskaper som epoxin.

Det keramiska bindemedel Bindzil 50/80 visade sig ha minst lika bra egenskaper som epoxin i samtliga tester med undantag för mekanisk hållfasthet. Samtidigt var hanteringen av detta bindemedel kopplat till markant färre hälsorisker än epoxin.

Innehållsförteckning

Förord	i
Sammanfattning	iii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Problembeskrivning	1
1.3 Syfte	2
1.4 Avgränsning	2
1.5 Företagspresentation	2
2 Metodik	3
2.1 Metodik och arbetsgång	3
2.2 Teoretiska referensverk	4
3 SM²C	5
3.1 Magnetiska flödesledare	5
3.2 Konventionell teknik	5
3.3 SMC och SM ² C	6
4 Bindemedelsförslag	9
4.1 Vattenglas	9
4.2 Kiselsyrasol	13
4.3 Keramiska lim	14
4.4 Geopolymerer	15
4.5 Metaller	16
4.6 Härdplaster	17
5 Utvärdering av bindemedelsförslag	27
5.1 Utvärdering	27
5.2 Kommentarer till tabell	29
5.3 Resultat	29
6 Teori för bindemedel	31
6.1 Natriumsilikat	31
6.2 Kiselsyrasol	37
6.3 Keramiska lim	40
6.4 Epoxi	41
6.5 Fenolharts	44
7 Experimentella studier	49
7.1 Framtagning av testkroppar	49
7.2 Testmetoder	62
8 Resultat	71
8.1 Pulverpackningstäthet	71
8.2 Mekanisk hållfasthet	72
8.3 Dielektrisk förlust	73

8.4	Dielektriskt genombrott	77
8.5	Termisk ledningsförmåga	79
8.6	Magnetisk permeabilitet	80
9	Resultatanalys	83
9.1	Tillförlitlighet i tester	83
9.2	Pulverpackningstäthet	86
9.3	Mekanisk hållfasthet	86
9.4	Dielektrisk förlust	88
9.5	Dielektriskt genombrott	89
9.6	Termisk ledningsförmåga	91
9.7	Magnetisk permeabilitet	91
10	Slutsatser	93
11	Förslag på vidare arbete	95
12	Källförteckning	97
13	Bilagor	101
13.1	Testkroppar	101
13.2	Mätresultat i tabellform	103
13.3	Tap density resultat	109
13.4	Samband mellan pulverpackningstäthet och densitet	110
13.5	Generella bestämmelser för hårdplaster	111

1 Inledning

Detta kapitel ger läsaren en snabb inblick i arbetets problembeskrivning, syften och mål.

1.1 Bakgrund

En mycket stor del av dagens avancerade industriprodukter använder elektromekaniska energiomvandlare, t.ex. elmotorer, värmeplattor, högtalare, mikrofoner, givare och ställdon för att öppna luckor (t.ex. DVD-spelare), mm. För att förbättra effektiviteten i dessa energiomvandlare så utnyttjar de alla så kallade magnetiska flödesledare. Tillverkning och utformning av dessa flödesledare har inte utvecklats mycket under det senaste seklet. Eftersom flödesledaren är en så väsentlig del av alla elektromagnetiska energiomvandlare så har inte heller dessa utvecklats mycket det senaste seklet.

På senare år har dock en ny materialteknik tagits fram för tillverkning av dessa flödesledare, tekniken ger näst intill obegränsade möjligheter att specialanpassa, optimera och integrera flödesledaren i både konsument och industriprodukter. Materialet som benämns SMC (Soft Magnetic Composites) är en kompositet av mer eller mindre legerat järnpulver med varierande grad inblandat bindemedel. Tillverkningen av komponenter i dessa material tilldrar sig stort intresse, eftersom kraven på hög täthet och frihet i utformning går i konflikt med använd tillverkningsteknik. Materialet ger i många fall en elektromekanisk energiomvandlare med i många avseenden betydligt bättre egenskaper än de tillverkade på konventionellt vis – lägre förluster, mindre fysisk storlek, kompaktare integration i det drivna objektet/produkten.

Företaget Magnetic Components Sweden AB (MagComp) arbetar idag med en vidareutveckling av SMC kallad SM²C (Soft Magnetic Mouldable Composites). SM²C-materialet baseras på sfäriska järnpartiklar med en matris av epoxi. Trots att epoxin är ett mycket allsidigt bindemedel så har det sina brister. Detta examensarbete undersöker därför möjligheten att ersätta epoxin med ett annat bindemedel.

1.2 Problembeskrivning

Epoxi är ett utmärkt bindemedel, bland annat på grund av att det väter partiklarna på ett bra sätt vilket ger upphov till goda mekaniska egenskaper hos de gjutna detaljerna. Bindemedlet har även hög kemisk resistens och låg elektrisk ledningsförmåga. Vissa av epoxins egenskaper är dock mindre önskvärda. Till exempel är de termiska egenskaperna i vissa fall underkritiska. Epoxi kan också vara besvärligt att hantera i produktion och på grund av diverse hälsorisker gäller stränga arbetsmiljöregler. Avformning av gjutna detaljer från verktyg kan vara besvärligt eftersom epoxi är ett utmärkt lim med god vidhäftning mot nästan alla material. Då härdningen av epoxin sker vid förhöjd temperatur under relativt lång tid, påverkas produktiviteten och utbytet. Slutligen kan epoxins extrema

inträngning vid härdtemperaturen (p.g.a. minskad viskositet) ställa till problem med bristfällig elektrisk isolation mellan flödesledarmaterialet (SM²C) och strömledaren (spolen).

1.3 Syfte

Examensarbetets främsta syfte är:

1. Kartläggning och analys av bindemedelssystem för mjukmagnetiska pulverkompositer.
2. Föreslå alternativ till epoxi som bättre uppfyller kraven på miljö, arbetsmiljö, termisk uthållighet, tillverkningsvänlighet samt elektrisk isolering av spole.

1.4 Avgränsning

Polymera bindemedlen det vill säga plaster delas normalt in i härdplaster respektive termoplaster. I arbetets början togs beslutet att endast härdplaster skulle ingå i kartläggningen av möjliga polymerbaserade bindemedel. Någon liknande begränsning av för keramiska bindemedel gjordes inte.

1.5 Företagspresentation

Magnetic Components Sweden AB (MagComp) startade 2005 som en avknoppning från Lunds Tekniska Högskola och är ett företag som hanterar elektromagnetiska komponenter. MagComp avser i samarbete med Lunds Tekniska Högskola att utveckla ett teknikskifte inom elektromagnetiska produkter, elektriska drivsystem och system för industriell uppvärmning.¹

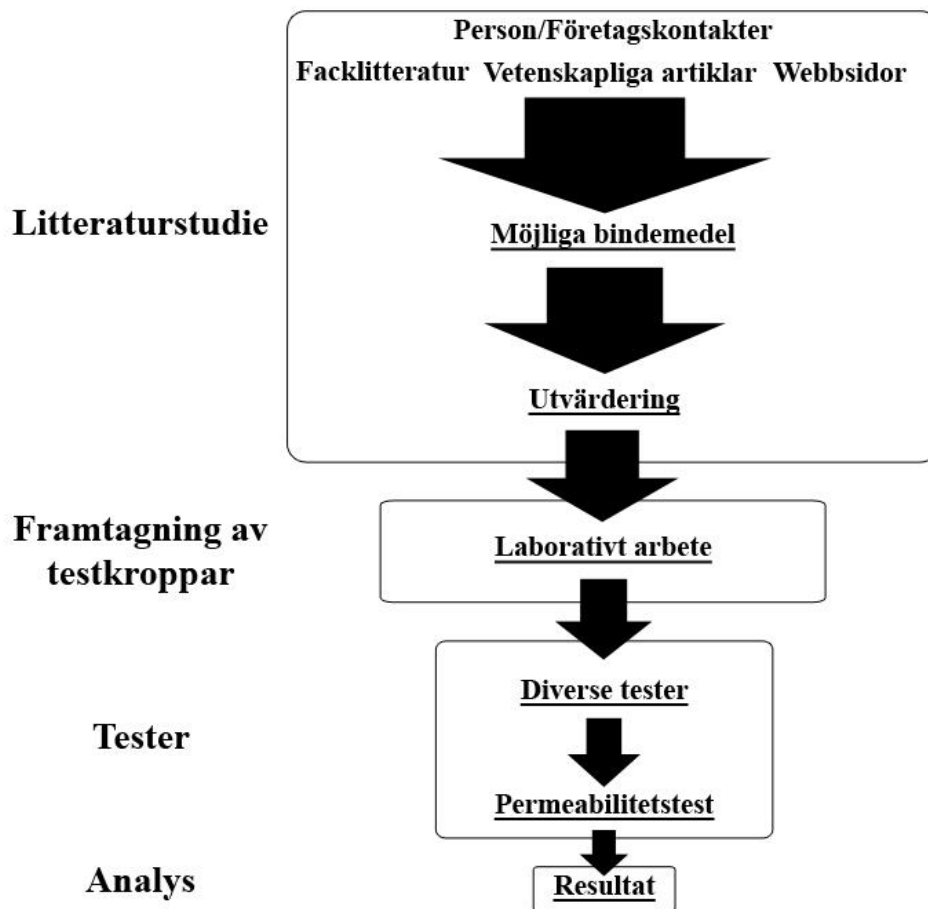
¹ (Magnetic Components Sweden AB, 2011)

2 Metodik

Detta kapitel avser att ge läsaren en uppfattning av den metodik som använts under arbetets gång.

2.1 Metodik och arbetsgång

Nedanstående figur beskriver i kronologisk ordning arbetsgången i examensarbetet. Arbetsgången var relativt väldefinierad vid arbetets start och endast mindre korrigeringar gjordes under arbetets gång.



Figur 1: Arbetsflöde. Examensarbetet kan i stora drag delas in i fyra delar, litteraturstudie, framtagning av testkroppar, tester och analys. Bilden avser att visa samband mellan dessa delar.

Litteraturstudie

I den initiala undersökningen av möjliga bindemedel gjordes en bred infosökning med hjälp av alla tillgängliga källor. I vissa fall hittades bindemedel direkt medan i andra fall identifierades personer eller företag med lämplig profil vilka i sin tur gav förslag på lämpliga bindemedel.

Efter att ett större antal möjliga bindemedel identifierats så utvärderades dessa bland annat med hänsyn på risker vid hantering samt troliga mekaniska och elektriska egenskaper. I slutet av denna utvärdering valdes ett antal bindemedel ut för vidare tester.

Framtagning av testkroppar

Ytterligare information om de utvalda bindemedlen inhämtades i detta stadium. Bland annat undersöktes bindemedlen utifrån hantering- och tillverkningskrav etc. Därefter identifierades lämpliga leverantörer varpå bindemedlen beställdes. När väl bindemedlen mottagits påbörjades en ”trail and error” undersökning för att identifiera lämpliga tillverkningsmetoder för respektive bindemedel.

Tester

För att bedöma bindemedlens lämplighet utfördes en mängd tester på testkropparna. Som slutligt test utfördes permeabilitetsmätningar på det testkroppsmaterial som presterat bäst i de föregående testerna.

Analys

Resultatet från testerna analyserades och slutsatser drogs utifrån dessa.

2.2 Teoretiska referensverk

För att få en grundläggande kunskap om bindemedelsområdet användes som första steg internet samt person- och företagskontakter. När ett tänkbart bindemedel väl identifierats inhämtades mer information från vetenskapliga artiklar, facklitteratur, kontakt med expertis inom området och i vissa fall internethemsidor.

Mycket lite av denna litteratur hanterade direkt bindning av metallkorn eller metallytor. Mycket av den använda litteraturen är därför relativt generell men ger ändå en fingervisning om resultatet av att använda respektive bindemedel.

3 SM²C

Detta kapital inleds med en kort förklaring av flödesledarmaterial. Därefter beskrivs hur dessa integreras i många av dagens elektriska maskiner. Kapitlet avslutas med en beskrivning av SM²C.

3.1 Magnetiska flödesledare

De flesta elektriska maskiner innehåller en så kallad magnetisk flödesledare som används för att förstärka elektromagnetiskfält. Denna förstärkning är nödvändigt för att kunna tillverka energieffektiva elektriska maskiner.

En magnetisk flödesledare är i sin enklaste form ett homogent material som kan magnetiseras med hjälp av ett yttre magnetfält. Material som kan magnetiseras är nästan helt uteslutande metalliska. Magnetisering som sker i materialet är en effekt av att materialets så kallade magnetiska domäner linjerat sig med flödeslinjerna från ett yttre magnetiserande fält. Linjärisering av de magnetiska domänerna ger upphov till ett nytt magnetfält med samma riktning som det ursprungliga. Inom materialet verkar alltså två likriktade magnetfält. Eftersom fälten kan summeras så är det magnetiska flödet högre i materialet än i omkringliggande miljö.²

Vissa material är lättare att magnetisera än andra, i princip är det så att ett material som är lätt att avmagnetisera också är lätt att magnetisera. Ett material som är lätt att magnetisera kallas mjukmagnetiskt eller ”soft magnetic”. Att använda sig av ett material som är lätt att magnetisera är av extra vikt vid högfrekvens-applikationer. I dessa applikationer växlar riktningen på det externa magnetiserande fältet mycket snabbt. Om materialets magnetiska domäner inte hinner växla lika snabbt uppstår stora effektförluster i materialet.

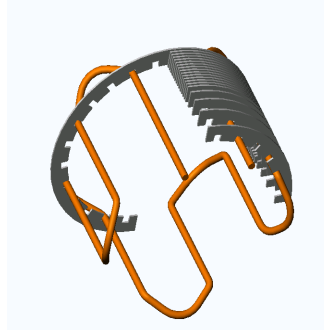
Ovanstående beskrivning kan verka förespråka solida mjukmagnetiska flödesledarmaterial. Problemet med att använda solida mjukmagnetiska material som flödesledare är dock att det då uppstår så kallade virvelströmmar. Dessa virvelströmmar som induceras av det magnetiskaflödet i materialet inducerar i sin tur magnetiska fält som motverkar det ursprungliga magnetiska fältet. Detta motverkande magnetiska fält leder till lägre verkningsgrad i flödesledaren.

3.2 Konventionell teknik

För att minimera problemet med effektförluster p.g.a. virvelströmmar så tillverkas flödesledare i elektriska maskiner genom att stapla tunna lager (0.1-0.5 mm) plåt. Mellan varje plåt läggs ett tunt lager isolationsmaterial. På grund av denna konstruktion måste flödesledarna designas i det tvådimensionella planet. Det är först vid staplingen av plåtarna som den tredje dimensionen framträder. Att designa detaljer på detta vis begränsar möjligheten att tillverka kompakta och

² (Benson, H., 1996) sida 606

effektiva energiomvandlare. Alla elmotortillverkare i världen använder idag denna metod.³



Figur 2: En konventionell flödesledare (grå) kopplad till en spole (orange).

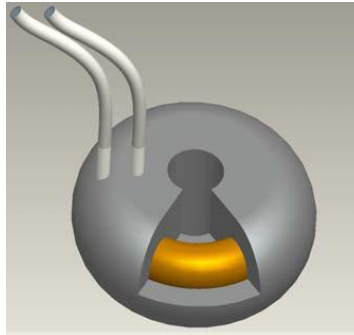
3.3 SMC och SM²C

SMC (Soft Magnetic Composites) baseras till skillnad från dagens konventionella elektromagnetiska energiomvandlare i elmotorer och dielektriska värmare, m.m. inte på laminerade plåtar. Istället är SMC ett kompositmaterial baserat på mer eller mindre legerat järnpulver med varierande grad inblandat bindemedel. På grund av denna komposition så kan materialet formas med bland annat högtryckspressning. Detta ger möjligheten att tillverka geometriskt sett relativt enkla flödesledare, men med större möjlighet till integration och förbättrade magnetiska egenskaper.

SM²C (Soft Magnetic Moldable Composites) är en vidareutveckling av SMC. Precis som SMC baseras materialet på ett legerat järnpulver i varierande mängd bindemedel. Skillnaden mellan SMC och SM²C är att SM²C-materialt bland annat kan gjutas utan pressverktyg. SM²C kan som en följd av detta lättare integreras i komponenter, materialet kan även formas till realitet komplexa former. Det bindemedel som används i SM²C är ofta polymerbaserat och fungerar både som bindemedel och som elektriskt isolationsmaterial mellan järnkornen.⁴

³ (Cedell T., et al) New advances in soft magnetic materials

⁴ (Cedell T., et al) New advances in soft magnetic materials



Figur 3: En induktor med spolen (orange) integrerad i flödesledarmaterialet SM²C.

3.3.1 Egenskaper

Eftersom SM²C materialet består av en stor mängd elektriskt isolerade järnkorn så minimeras uppkomsten av virvelströmmar. Detta resulterar i mycket små effektförluster i materialet, i storleksordningen 1/10 av konventionella motsvarande lösningar. Den ökade effektiviteten är så stor att en komponent som idag kräver vattenkylning kan om den konstrueras i SM²C istället konvektionskylas. Då materiellt är gjutbart kan även konstruktörer ta sig stora friheter med utformningen av komponenter.

SM²C kan alltså användas för att tillverka elektromekaniska energiomvandlare med i många avseenden betydligt bättre egenskaper än med konventionell teknik – lägre förluster, mindre fysisk storlek och kompaktare integration i objektet/produkten.⁵

3.3.2 Viktiga faktorer i ett SM²C material

Permeabilitet

Permeabilitet eller materialets förmåga att magnetiseras är en mycket viktig egenskap i en flödesledare. En flödesledare med en låg permeabilitet kommer vara svår att magnetisera och därför vara dålig på att förstärka elektromagnetiska fält, vilket är flödesledarens huvudsakliga syfte.

Pulverpackningstäthet

Då järnpulvret är den enda del av SM²C-materialet som kan magnetiseras så är det önskvärt att pulvret utgör så stor del av den färdiga kompositen som möjligt. Tester som gjort under detta examensarbete visar att det föreligger ett exponentiellt samband mellan pulverpackningsmängd och permeabilitet. Även relativt små ökningar av mängden järnpulver kan därför resultera i stora vinster.

⁵ (Cedell T., et al) New advances in soft magnetic materials

Dielektrisk förlust

Dielektriska förluster uppkommer framför allt i högfrekvensapplikationer som en effekt av bindemedlets dielektriska egenskaper.

Dielektriskt genombrott

I vissa applikationer är det tänkbart att SM²C-materialet utsätts för relativt höga elektriska spänningar. Det är i dessa fall viktigt att spänningen inte ger upphov till bryggbildningar i materialet då detta resulterar i ett material med högre effektförluster.

Mekanisk hållfasthet

Eftersom SM²C kan komma att användas i system som utsätts för mekanisk belastning både i form av slag och vibrationer så är det viktigt att kompositen kan hantera viss mekanisk belastning.

Termisk ledningsförmåga

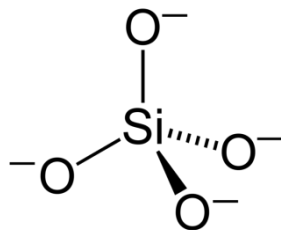
Trots att materialet har lägre järnförluster än många av dagens laminerade system så måste hänsyn tas till eventuella energiförluster. Alla energiförluster i materialet uttrycks som värme, och bör avlägsnas. För att detta ska vara möjligt krävs det att materialet har en viss termisk ledningsförmåga.

4 Bindemedelsförslag

Detta kapitel avser att ge läsaren en snabb översikt över de bindemedel som författaren ansett är av intresse för SM²C-material. Kapitlet avslutas med en kort utvärdering av dessa med hänsyn på kravspecifikationerna.

4.1 Vattenglas

Vattenglas är samlingsnamn för ett flertal närbesläktade produkter. Gemensamt för dessa produkter är att de alla innehåller alkalisilikater lösta i ett lösningsmedel, vilket oftast är vatten. En silikat definieras kemiskt som en anjonisk (negativ) kiselmolekyl⁶. Det stora flertalet silikater är oxider vilka ofta är nätverksbildande. Till exempel så kan den tetraediska SiO₄⁻⁴ molekylen bygga upp tredimensionella strukturer. Namnet alkalisilikat kommer från att minst en av alkalimetallerna (Na, Ka eller Li) binds in till silikaten under tillverkning. Alkalimetallen ger hela molekylen högre vattenlösligheten vilket i sin tur resulterar i högre silikatkoncentrationer i vattenglas⁷.



Figur 4: Den tetraedriska SiO₄⁻⁴ molekylen.⁸

Silikater har ett stort användningsområde inom gjutindustrin där de fungerar som bindemedel för gjutkärnor. Definitionsmässigt så tillhör de kerammaterialen, det vill säga de oorganiska icke metalliska materialen⁹. Precis som andra keramiska material så är de hårda men spröda och känsliga för lokala defekter. Frånvaron av organiskt material betyder dock att silikatbindemedel är markant mer temperaturtåliga än dess organiska motsvarigheter.¹⁰

Härdning av silikaten sker genom torkning eller genom reaktion med tillsatta kemikalier¹¹. Vid ungefär 500 °C påbörjas sintring av silikatmolekylerna vilket ger en ökad kemisk resistens och hållfasthet. I lägre temperaturer (0-120 °C) bildas en torr kiselgel utan någon mekanisk styrka. Tester i detta arbete visar på viss mekanisk styrka efter torkning även under 100 °C.¹²

⁶ (Wikipedia, 2010) Silicate

⁷ (Iler, R. K., 1979) sida 10

⁸ (Wikipedia, 2010) Silikat

⁹ (Askeland, D.R., 2004) sida 450

¹⁰ (Brown, J.R., 1994), sida 71

¹¹ (McDonald, M., 2002), sida 3

¹² (EKA Chemicals, 2010) Telefonkontakt

Arbetsmiljö

Trots att silikatbaserade bindemedel kan sägas vara relativt hanteringsvänliga så föreligger fortfarande vissa risker. Samtliga silikatbindemedel är t.ex. kraftigt basiska (>pH 10) och därför irriterande för ögon och hud. Vid risk för direkt kontakt ska därför skyddsglasögon och handskar bäras. Om det föreligger risk för dimbildning så ska även andningsskydd användas under hantering.¹³

4.1.1 Natriumsilikat

Natriumsilikat eller vatten glas som det också kallas är silika (SiO_2) löst i vatten med hjälp av en alkaliskmetall (natrium). Natriumsilikat framställs genom att reagera natriumkarbonat med silika i temperaturer över 1300 °C¹⁴. Efter nedkylning löses det resulterande glaset ($\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$) upp med hjälp av trycksatt upphettat vatten vilket ger en viskös vätska¹⁵. Silika har en relativt låg löslighet i vatten vilket leder till låga halter silika i vattenglaslösningar.

Tabell 1: Egenskaper natriumsilikat¹⁶

Max temperatur	~1000 °C
Ungefärligt pris	15 kr/L
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Mycket hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög kemisk resistens efter sintring	Lösningemedelsbaserad
Miljö och hanteringsvänligt	Relativt hög viskositet (~sirap)
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	
Lågt pris	

¹³ (Swedhandling, 2010) CAS-1344-09-8

¹⁴ (Iler, R. K., 1979) sida 117

¹⁵ (McDonald, M., 2002), sida 1

¹⁶ (Swerea|IVF, 2010) Silikat

4.1.2 Kaliumsilikat

Kaliumsilikat har stora likheter med natriumsilikat med då kalium har högre vattenlöslighet så är även $\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ mer lösligt i vatten än $\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$. Pågrund av detta så innehåller kaliumsilikat baserade vattenglas en större andel silika. Kaliumsilikat har även mindre problem med skumning än natriumsilikat.¹⁷

Tabell 2: Egenskaper kaliumsilikat¹⁸

Max temperatur	~1000 °C
Ungefärligt pris	<20 kr/L
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Mycket hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög kemisk resistens efter sintring	Lösningsmedelsbaserade
Miljö och hanteringsvänligt	Relativt hög viskositet (dock lägre än natriumsilikat)
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	
Lågt pris	

¹⁷ (Smith A., 2008) ”Potassium Silicate vs. Sodium Silicate”

¹⁸ (Swerea|IVF, 2010) Silikat

4.1.3 Etylsilikat

Etylsilikat kan liknas vid natriumsilikat där en stor del (~80 %) av lösningsmedlet (vatten) ersatts med etanol. Silika har dock begränsad löslighet i alkoholer vilket leder till lägre silikat koncentration i den färdiga lösningen¹⁹. Då etanol evaporerar snabbare än vatten är etylsilikat mer snabbtorkande än till exempel natriumsilikat. Den höga evaporationen leder dock till hög porositet och arbetsmiljöproblem. Etylsilikater har idag nästan helt ersatts av kiselsyrasol.²⁰

Tabell 3: Egenskaper etylsilikat²¹

Max temperatur	<1000 °C
Ungefärligt pris	20 kr/L
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Mycket hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög kemisk resistens efter sintring	Lösningsmedelsbaserade
Miljö och hanteringsvänligt	Relativt låg viskositet
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	

¹⁹ (Iler, R. K., 1979, 2010) sida 4

²⁰ (Swerea|IVF, 2010) Etylsilikat

²¹ (Swerea|IVF, 2010) Etylsilikat

4.2 Kiselsyrasol

Kiselsyrasol är precis som vattenglas baserad på silikater i en vattenlösning. Men till skillnad från vattenglas där större delen av silikaterna är upplösta i lösningsmedlet så är de i solen fördelade i kolloidala partiklar. Kiselsyrasolens maximala silikatkoncentration är därmed inte begränsad av silikatens vattenlöslighet²². Viskositeten hos kiselsyrasol är i närheten av vatten trots högre silikat koncentration än vattenglas. För information om arbetsmiljöaspekter se avsnittet under vattenglas.²³

Tabell 4: Egenskaper kiselsyrasol^{24 25}

Max arbetstemperatur	1400 °C
Ungefärligt pris	15 kr/kg
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Mycket hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög kemisk resistens efter sintring	Vattenbaserad
Bättre kemisk resistans än vattenglas efter torkning	
Låg viskositet	
Miljö och hanteringsvänligt	
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	
Lågt pris	

²² (Iler, R. K., 1979) sida 119

²³ (Swerea|IVF, 2010) Soler

²⁴ (Swerea|IVF, 2010) Soler

²⁵ (EKA Chemicals, 2010) Telefonkontakt

4.3 Keramiska lim

Keramiska lim marknadsförs under ett flertal olika namn men gemensamt för dessa är att de oftast bygger på en oxid som t.ex. SiO₂ eller MgO som blandas med ett organiskt eller oorganiskt lösningsmedel. Keramiska lim ersätter de konventionella limmen över ~300 °C där dessa inte längre är tillförlitliga. Keramiska lim resulterar inte i helt vattentäta strukturer då tillverkningsmetoden ger upphov till relativt porösa strukturer. Det kan i vissa fall åtgärdas genom värmebehandligt eller efterbehandling av ytan med en primer. Priset för keramiska lim är högre än för de flesta polymerer men inte så dyra att de är helt orealistiska. För information om arbetsmiljöaspekter se avsnittet under vattenglas.²⁶

Tabell 5: Egenskaper keramiska lim^{27 28}

Max arbetstemperatur	1650 °C
Ungefärligt pris	500 kr/kg
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Mycket hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög kemisk resistens efter härdning	Lösningsmedelsbaserade
Miljö och hanteringsvänligt	Dyra
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	Ofta hög blandningsviskositet (sirap → pasta)

²⁶ (Swerea|IVF, 2010) Keramiska lim

²⁷ (Swerea|IVF, 2010) Keramiska lim

²⁸ (Aremco, 2010) High temperature inorganic binders

4.4 Geopolymerer

Geopolymerer är ett samlingsnamn för oorganiska aluminosilikatpolymerer (AIPs). De är fortfarande relativt nya på marknaden men kan bland annat användas som ersättare för cement vid förvaring av giftigt material och som bindemedel i komposit²⁹. Råmaterialet är naturligt förekommande aluminosilikat eller biprodukter som flygaska. När material löses upp i alkalisk hydroxidlösning, frigörs tetraedriska AlO_4 och SiO_4 . När natrium- eller kaliumsilikat blandas med geopolymeren bildas en pasta som snabbt omvandlas till en hård geopolymer. Geopolymerer har initialt en relativt hög kompressionsstyrka men fortsätter att bli hårdare under ungefär en månad. En färdighärdad geopolymer är mycket temperaturtålig. I framtiden har geopolymerer potential att bli både billiga och lätthanterade men i dagsläget är de kostsamma >3000 SEK/kg och kräver i vissa fall förvaring i minst -18 °C³⁰. För information om arbetsmiljöaspekter se avsnittet under vattenglas.³¹

Tabell 6: Egenskaper geopolymerer³²

Max arbetstemperatur	1000 °C
Ungefärligt pris	300 €/kg
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Mycket hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög kemisk resistens efter härdning	Lösningemedelsbaserade
Miljö och hanteringsvänligt	Mycket dyra
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	Hög blandningsviskositet (pasta)

²⁹ (Rowles, M.R., 2009) sida 1

³⁰ (Geopolymer Institute, 2010)

³¹ (Komnitsas, K., et al., 2007) sida 2,5,7

³² (Geopolymer Institute, 2010)

4.5 Metaller

4.5.1 Mjuka bronser

De metalliska bindemedel som kan vara av intresse för SM²C är de mjuka bronserna. De mjuka bronserna är legeringar av koppar och tenn med en relativt låg kopparhalt <70 %. Bindemedlet leveras vanligen i pulverform med viss koppar- respektive tennhalt. Pulvret blandas med fyllningsmaterialet varefter hela blandningen pressas. Därefter höjs temperaturen till dess att legeringen övergår till flytande fas. Vid höga halter tenn så kan detta ske vid så låga temperaturer som 300 °C. Det huvudsakliga problemet med detta bindemedel är den mycket höga elektriska ledningsförmågan jämfört mot de andra bindemedelsalternativen i denna utvärdering.³³

Arbetsmiljö

Arbetet involverar hantering av flytande metaller och de flyktiga ämnen som bildas vid gjutningsprocessen.³⁴

Tabell 7: Egenskaper mjuka bronser³⁵

Max arbetstemperatur	<300 °C
Ungefärligt pris	Cu 400 kr/kg, Sn 400 kr/kg (finkornigt)
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Hög värmetålighet	Markant lägre hållfasthetsegenskaper än organiska bindemedel
Hög mekanisk styrka	Dyra
Miljö och hanteringsvänligt	Pulverbaserade
	Dåliga elektriska isolatorer

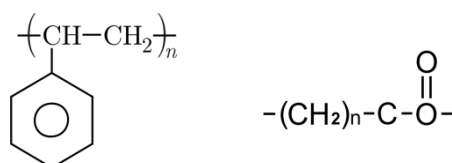
³³ (Slipnaxo, 2010) Telefonkontakt

³⁴ (Slipnaxo, 2010) Telefonkontakt

³⁵ (Slipnaxo, 2010) Telefonkontakt

4.6 Hårdplaster

En plast definieras ofta som en blandning av en eller flera polymersorter samt tillsatssämnen såsom färgämnen flamskydd, fibrer osv.³⁶. Polymerer är oftast baserade på organiskt material, dvs. kolföreningar, ett undantag är silikonpolymerer som istället är kiselbaserade. De organiska polymererna består av långa kedjor av dessa kolföreningar. Beroende på vilken eller vilka så kallade funktionella grupper som ingår i kedjan så varierar polymerens egenskap. Dessa grupper kan till exempel vara en bensenring som i fallet med polystyren eller ett dubbelbundet syre som i polyester.



Figur 5: T.v polystyren, T.h polyester

Hårdplast

Plaster delas normalt in i två grupper baserat på hur de beter sig efter härdning. De är antingen hårdplaster eller termoplaster, termoplaster mjuknar när det värms till sin så kallade glastemperatur. Hårdplaster har också en glastemperatur men den ligger normalt mycket nära nedbrytningstemperaturen, eller i vissa fall över nedbrytningstemperaturen³⁷. Detta får effekten att plasten bryts ner vid sin nedbrytningstemperatur ofta utan någon tidigare mekanisk försvagning. Anledning till att hårdplaster uppför sig på detta sätt är att de vid polymerisering (härdning) bildar stora nätverk. Dessa nätverk är starka nog att de ofta bryts ner helt innan de blir rörliga i någon större utsträckning. Nätverksbildandet i hårdplaster initieras antingen genom att man tillsätter reagenter eller genom att man tillför energi i form av värme. Detta gör de mycket lämpliga för att gjuta komponenter. Man kan också dela upp polymererna efter polymerisationsmekanism. Antingen så sker polymerisationen genom en additionsreaktion eller genom en kondensationsreaktion. Typiskt för kondensationsreaktioner är att en mindre molekyl som ofta är vatten frigörs under polymeriseringsprocessen. Under en additionsreaktion så frigörs däremot inga molekyler så som vatten eller salter.³⁸

Arbetsmiljö

Hantering av hårdplaster för med sig vissa risker, vissa gäller allmänt för hårdplaster medan vissa gäller specifik för enstaka typer. Många av de ingående kemikalierna är mycket reaktiva och i vissa fall biologiskt aktiva. Hårdplaster så som epoxi och fenolharts kan därför framkalla mycket kraftiga hudallergiska reaktioner. I många fall är även hårdarna irriterande för ögon och luftvägar och i vissa fall kan de orsaka överkänslighet i luftvägar. Aromatiska aminer som är den

³⁶ (NE, 2010) Plast

³⁷ (LTH, 2010) Personkontakt

³⁸ (Fried, J.R, 2007) sida 4,5

aktiva delen i vissa härdare har också visat sig vara cancerogena. Generellt så antas fullt härdade härdplaster vara kemiskt inerta. Vid nedbrytning eller i fall där härdning inte skett fullt ut föreligger det dock risk giftiga biprodukter.³⁹

4.6.1 Polyester (UP)

Polyesterhartsen kan bildas genom en reaktion mellan en diol och en omättad syra som karboxylsyra eller deras anhydrider. Den lågmolekylära produkten är lös i styren. Den resulterande lösningen kan polymeriseras i närvaron av en peroxid⁴⁰. Eftersom styren igår som monomer och medverkar i polymeriseringen så måste det tillses att det inte evaporera innan härdningsprocessen. Polyesterharts lämpar sig därför inte för tillverkning av ”tunna” laminat. Styrenet får polyester att lukta starkt, styrenet är normalt det största problemet både när det gäller polyester och i den närbesläktade vinylestern. Styren är skadligt under långvarig eller långvarig exponering men m.h.a. enkla kolfiltermasker så kan man skydda sig tillfredställande⁴¹. Polyestern har sämre mekaniska kemiska egenskaper än de flesta andra härdplaster. Den har också en låg glastemperatur runt 100 °C. Plasten är dock markant billigare än många av dessa.

Tabell 8: Egenskaper polyester^{42 43}

Tg	~70 °C ⁴⁴
Ungefärligt pris	50 kr/kg ⁴⁵
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Styvt hårt material med draghållfasthet jämförbart med vissa metaller	Låg glastemperatur
Kan bearbetas såväl med som utan både värme och tryck	Lösningsmedlet styren är hälsovådligt och stark illaluktande
Kan användas med mycket hög halt fyllmedel	Ej lika bra mekaniska och kemiska egenskaper som många andra härdplaster
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	Krymper under härdningsprocessen
God väderbeständighet	
Lågt pris	

³⁹ (Arbetsmiljöverkets författningssamling, 2005) Härdplaster

⁴⁰ (Fried, J.R., 2007) sida 381

⁴¹ (Kompositfabriken, 2009) sida 1

⁴² (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 944

⁴³ (Klason, C., 1987) sida 133

⁴⁴ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 226

⁴⁵ (Kompositfabriken, 2009) sida 3

4.6.2 Vinylester

Vinylester kan sägas befinna sig mellan polester och epoxi såväl egenskapsmässigt som kemiskt då polymeren innehåller epoxigrupper men även många estergrupper. Temperaturlågheter uppemot 150 °C kan i vissa fall uppnås (som i fallet med blandningen vinylester, epoxy, novolack) men vanligare är ~100 °C⁴⁶. Priset för vinylester är ungefär det dubbla av det för polyester dvs. fortfarande billigare än för epoxi. Det har också bättre mekaniska och kemiska egenskaper än polyestern men sämre än epoxin. Styren används även som lösningsmedel i vinylester men i mindre mängder än för polyester, en peroxid används också som härdare.⁴⁷

Tabell 9: Egenskaper vinylester⁴⁸

Tg	~100 °C ⁴⁹
Ungefärligt pris	70 kr/kg ⁵⁰
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Styvt hårt material med draghållfasthet jämförbart med vissa metaller	Låg glastemperatur
Kan bearbetas såväl med som utan både värme och tryck (kan gjutas)	Lösningsmedlet styren är hälsovådligt och stark illaluktande
Kan användas med mycket hög halt fyllmedel	Ej lika bra mekaniska och kemiska egenskaper som många andra härdplaster
Mycket goda elektriska isoleringsegenskaper	Krymper under härdningsprocessen
God väderbeständighet	
Lågt pris	

⁴⁶ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 944

⁴⁷ (Kompositfabriken, 2009) sida 1,3

⁴⁸ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 944

⁴⁹ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 226

⁵⁰ (Kompositfabriken, 2009) sida 3

4.6.3 Polyuretan (PUR)

Polyuretan är ett samlingsnamn för en mycket stor materialgrupp med allt från elastomerer till formskum. I detta fall är det dock den hårda härdplasten som är av intresse. Plasten är framför allt känd för sin höga nötningsbeständighet, kemiska resistens och vädertålighet. Den börjar brytas ner vid ungefär 240 °C. Sådana temperaturer kan uppnås vid bearbetning av materialet. PUR tillverkas vanligen genom en reaktion mellan diisocyanater och dihydroxyl⁵¹. Härdningen, dvs. korslänkning av strukturen sker genom att hartsen blandas med en diamin⁵². Vid nedbrytning finns risk för att isocyanater och cyanid frigörs⁵³. Bearbetningsmetoder som höjer temperaturen så högt att det finns risk för nedbrytning ska därför undvikas i största möjliga mån.⁵⁴

Tabell 10: Egenskaper polyuretan⁵⁵

Tg	<180 °C ⁵⁶
Ungefärligt pris	80 kr/kg (90 kg) ⁵⁷
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Hårda och samtligt flexibla	Utveckling av rök och giftiga gaser vid nedbrytning
Hydrolys- och värmebeständiga	Risk för fria isocyanater innan härdning
Hög nötningsbeständighet	Strikta hanteringsregler
Goda elektriska egenskaper	
Kan bearbetas såväl med som utan värme och tryck	

⁵¹ (Fried, J.R., 2007) sida 373

⁵² (Fried, J.R., 2007) sida 375

⁵³ (National stone, sand & gravel association, 2004) Health alert

⁵⁴ (Klason, C., 1987) sida 141

⁵⁵ (Klason, C., 1987) sida 141

⁵⁶ (Goodman, S.W., 1999) sida 271

⁵⁷ (ABIC Kemi AB, 2010) Telefonkontakt

4.6.4 Epoxiplast (EP)

Tabell 11: Egenskaper epoxiplast^{58 59}

Tg	<200 °C
Ungefärligt pris	200 kr/kg
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Utomordentlig vidhäftning till andra material	Dålig resistens mot alkoholer och vissa lösningsmedel
Väl avvägd kombination av elektriska, mekaniska och termiska egenskaper	Härdning bör ske i förhöjd temperatur för att uppnå bästa möjliga kemiska och mekaniska egenskaper.
Nötningsbeständig	Mycket sensibiliserande vid hudkontakt
Bättre resistens mot lösningsmedel än polyester	
Kan gjutas	
Dimensionsstabil	

Epoxin har fått sitt namn från de epoxigrupper som alltid återfinns i dessa polymerer. Epoxiharts bildas genom reaktionen mellan en dihydroxyl så som bisfenol-A med en epoxid så som epiklorhydrin⁶⁰. När epoxin tillåts reagera med en härdare kan det bildas mycket starka polymera nätverk. Härdare kan delas in i två typer, alkalier och syror. De vanligaste härdarna är alifatiska aminer och anhydrider⁶¹. En nackdel med kvävebaserade (aminer, amider osv.) härdare är att de kan vara mycket irriterande och sensibiliserande för huden och i vissa fall som med aromatiska aminer kan de vara mycket giftiga. Anhydrider är ofta mindre irriterande för huden men kan i vissa fall irritera luftvägarna⁶². Mycket av epoxins egenskaper är en funktion av vilken härdare som används. Epoxiharts innehåller inget lösningsmedel men återfinns ändå i mycket lågviskös form mycket beroende på dess lågmolekylära karaktär (vilket också resulterar i en mycket reaktiv produkt). Epoxin har mycket bra mekaniska egenskaper och fäster bra på de flesta material. Den har även bra temperaturegenskaper jämfört mot många andra härdplaster.

⁵⁸ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 944

⁵⁹ (Nils malmgren AB, 2010) Telefonkontakt

⁶⁰ (Fried, J.R, 2007) sida 379

⁶¹ (Cowie, J.M.G, 2008) sida 50

⁶² (Goodman, S.W., 1999) sida 225

4.6.5 Fenolplast (PF)

Fenolharts bildas genom en kondensationsreaktion mellan fenol och formaldehyd. Beroende på katalysator så bildas en av två möjliga hartser, resol eller novolac. Resoler som oftast är lösningsmedelbaserade härdas genom värmning. Novolac som normalt återfinns i pulverform kräver att en härdare t.ex. HEXA tillsätts samt värme för att hartsen ska härda. Plasten är kemiskt resistent mot vanliga lösningsmedel och svaga syror. Fenolhartser har även relativt goda mekaniska egenskaper vilka ytterligare förbättras med hjälp av fyllningsmaterial. Den är en av plasterna med högst glastemperatur, temperaturer över 250 °C är inte ovanliga. De största problemen med hantering av PF är fri fenol och formaldehyd samt lösningsmedel för resoler respektive aminer vid användning av novolacer.⁶³

Tabell 12: Egenskaper fenolplast^{64 65}

Tg	~250 °C
Ungefärligt pris	<30 kr/kg ⁶⁶
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Styvt material med goda ”allround” egenskaper	Påverkas av starka oxiderande syror och baser
Hög dimensionsstabilitet vid belastning över ett brett temperaturområde	Benägen till bryggbildning vid höga elektriska spänningar
Kemisk resistens mot vanliga lösningsmedel, svaga syror och de flesta tvättmedel	Ej lämplig för utomhusbruk
Används som formgods praktiskt taget alltid med fyll- eller armeringsmedel av mycket varierande slag från trämjöl till glasväv	
Lågt pris	

⁶³ (Fried, J.R, 2007) sida 382-386

⁶⁴ (Klason, C., 1987) sida 129

⁶⁵ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 944

⁶⁶ (PA-resins AB, 2010) Personkontakt

4.6.6 Aminoplaster (MF och UF)

Melaminformaldehyd (MF) och Ureaformaldehyd (UF) tillhör båda aminoplasterna. De bildas likt fenolharts genom en kondensationsreaktion med formaldehyd och melamin respektive urea. De används även inom liknande områden som dvs. som bindemedel för organiskt material, så som plywood etc. Under senare år så har det framkommit viss risk för att formaldehyd frigörs från UF-material, detta har lett till vissa användningsrestriktioner⁶⁷. En fördel med aminoplaster är att de är färglösa vilket gör att de även går att färga. MF är mycket hårt och mer kemiskt och temperaturrestant än UF. MF har en maximal arbetstemperatur på runt 200 °C. Det största problemet med hantering av MF är fri fenol det samma gäller även för UF. Aminoplaster härdas normalt genom värmeförseglning.⁶⁸

Tabell 13: Egenskaper aminoplast⁶⁹

Tg	UF <80 °C, MF <200 °C
Ungefärligt pris	<20 kr/kg ⁷⁰
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Styvt, hårt och nötningsbeständigt material	Angrips av starkt oxiderande syror
Mycket bra elektriskt isoleringsmaterial	Låg slagseghet
Resistens mot vatten och tvättmedel	Bör ej användas kontinuerligt över 65 °C (UF)
Beständigt mot ljus	Låg åldringsbeständighet (UF)
Används i kontakt med livsmedel, smak- och luktfri (MF)	
Lågt pris (UF billigare än MF)	

⁶⁷ (Britannica, 2010) Urea-formaldehyde resin

⁶⁸ (Fried, J.R., 2007) sida 382

⁶⁹ (Klason, C., 1987) sida 131-132

⁷⁰ (PA-resins AB, 2010) Personkontakt

4.6.7 Polyimider (PI)

Polyimider tillhör den mest avancerade typen av härdplaster. De är de mest temperaturtåliga av alla polymerer med bibehållen mekanisk styrka vid 250 °C eller mer även efter längre tid. Polyimider av härdplasttyp härdas genom en additionsreaktion mellan omättade prepolymerer. Eftersom det handlar om en additionsreaktion så avges inga biprodukter under härdningsprocessen. Härdning sker dock vid mycket hög temperatur (~350 °C) och ställer krav på högt tryck (~400 kg/cm² och högre)⁷¹. De är även markant dyrare än andra plaster på marknaden vilket betyder att de endast lämpar sig där ingen annan plast fungerar.⁷²

Tabell 14: Egenskaper polyimid^{73 74}

Tg	>250 °C
Ungefärligt pris	100 \$/kg
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Hög termisk stabilitet, i vissa extremfall upp till 400 °C	Hög härdningstemperatur (>300 °C)
Utmärkta mekaniska egenskaper i såväl rumstemperatur som i högtemperatur (dock sämre än termoplastvarianter)	Krav på trycksättning under härdning
Utmärkt vidhäftningsegenskaper inom stort temperaturintervall	Spröd
Icke brännbara	Dyr
Inga biprodukter under härdning	

⁷¹ (HP-Polymer, 2010)

⁷² (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 263,282

⁷³ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 263-269

⁷⁴ (HP-Polymer, 2010)

4.6.8 Bismaleimider (BMI)

Bismaleimiderna (BMI) tillhör polyimiderna vilket medför mycket bra kemiskt resistens samt hög temperaturlåghet. Plasten är dock dyr och kräver avancerad processutrustning (vakuumugnar, pressar osv). Vanliga processtemperaturer är runt 200 °C och processmetoderna är formpressning och reaktionsformsprutning. BMI bibehåller utmärkta mekaniska egenskaper upp till 250 °C och har även bra motstånd mot lösningsmedel. Den största fördel med BMI-lim jämfört mot polyimider är den ökade processbarheten. BMI påminner mycket om epoxi och har möjligheten att i framtiden ersätta epoxi inom t.ex. flyg och rymdindustrin. Precis som epoxin så härdas BMI genom en additionsreaktion vilket bland annat ger hög dimensionsstabilitet under härdning. De härdas normalt i flera timmar i temperaturer (150-180 °C) under tryck, och sedan efter härdning nära service-temperaturen utan tryck för att nå optimala egenskaper.⁷⁵

Tabell 15: Egenskaper bismaleimider^{76 77}

Tg	>200 °C
Ungefärligt pris	70 \$/kg ⁷⁸
Fördelar	Begränsningar och nackdelar
Hög termiskstabilitet >200 °C	Hög härdningstemperatur
Väl avvägd kombination av elektriska, mekaniska och termiska egenskaper	Krav på trycksättning under härdning
Utmärkt vidhäftningsegenskaper inom stort temperatur intervall	Känslig för skador
Icke brännbara	Dyr
Inga biprodukter under härdning	

⁷⁵ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 244,248

⁷⁶ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 240-261

⁷⁷ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 944

⁷⁸ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 269

5 Utvärdering av bindemedelsförslag

I detta kapitel utvärderas de bindemedel som presenterades i föregående kapitel, utvärderingen är uteslutande baserad på litteraturstudier.

5.1 Utvärdering

Bindemedelsalternativ bedöms mot de kravspecifikationer som upprättats. Då varje specifik egenskap inte är av samma betydelse så införs en viktningsfaktor som beskriver just detta. Viktningsfaktorerna bör ses som fingervisningar och inte som absoluta sanningar. Faktorn ges ett värde från ett till tio där ett betyder oviktigt och tio betyder mycket viktigt. Vidare ges kravspecifikationerna ett värde från ett till fem, där fem betyder att bindemedlet mycket väl uppfyller kravspecifikationen medan ett betyder att det inte gör det. Följande kravspecifikationer används för utvärdering av bindemedlen:

- **Arbetsmiljö** - Går bindemedlet att hantera utan stora hälsorisker.
- **Temperaturegenskaper** - Bindemedlet fungerar i höga temperaturer.
- **Processtemperatur** - Bindemedlet kan processeras i låga temperaturer.
- **Mekaniska egenskaper** - Bindemedlet har hög mekanisk styrka.
- **Pulverpackning** - Pulverpackning nära teoretisk gräns (~70 %).
- **Elektrisk isolation** - Varje pulverkorn är väl isolerat.
- **Kostnad** - Bindemedlet är billigt.
- **Kemisk resistens** - Bindemedlet påverkas i liten utsträckning av lösningsmedel etc.
- **Potlife** - Tiden färdigblandat bindemedel kan förvaras utan att härdas.

Observera att värdet ges relativt epoxin då detta bindemedel är väl dokumenterat genom tidigare tester. Eftersom all information om de andra bindemedlen härstammar från litteraturstudier och inte faktiska tester bör de endast hanteras som kvalificerade gissningar.

Tabell 16: Utvärdering av bindemedelsalternativ. *Epoxiharts FW3070, H510B

Kravspecifikation	Viktningfaktor	Natriumsilikat	Kaliumsilikat	Etylsilikat	Kiselsyrasol	Keramiska lim	Geopolymerer	Mjuka bronser	Polyester	Vinyl ester	Polyuretan	Epoxi *	Fenolharts	Aminoplast	Polyimid	Bismaleimid
Arbetsmiljö	10	4	4	3	4	4	4	3	2	2	2	2	3	3	3	3
Temperaturregenskaper	5	5	5	5	5	5	5	4	0	0	2	3	4	2	4	4
Processtemperatur	4	2	2	2	2	3	5	2	4	4	4	3	4	4	2	3
Mekaniska egenskaper	4	2	2	2	2	3	3	5	3	3	3	5	3	3	5	5
Packning	10	1	2	1	3	2	2	3	4	4	3	5	3	3	3	3
Elektrisk isolation	10	4	4	4	4	4	4	1	3	3	3	3	3	3	3	3
Kostnad	3	4	4	4	5	2	1	2	5	5	4	3	5	5	1	2
Kemisk resistens	3	4	4	4	4	4	4	3	2	2	3	4	3	2	4	4
Potlife	6	5	5	4	5	5	1	1	4	4	4	4	5	5	5	5
	Summa	200	210	184	223	212	193	151	163	163	169	201	195	185	183	190
	Vidare tester	X			X	X						X	X			

5.2 Kommentarer till tabell

I tabellen framgår det tydligt att vissa av kravspecifikationerna är av större vikt än de andra. Till exempel ges packning av järnpulvret och elektrisk isolation båda tior i viktningsfaktor. Anledning till detta är att båda dessa faktorer är absolut nödvändiga för att SM²C-materialet ska fungera som en effektiv flödesledare. Arbetsmiljö är också en kravspecifikation som anses mycket viktig. Skälet till det är bland annat ett av syftena med detta examensarbete är att hitta ett mer hanteringsvänligt alternativ till epoxi.

5.3 Resultat

Utvärderingen visar att vissa bindemedelsalternativ är mer lämpliga som bindemedel för SM²C. De bindemedel som anses lämpliga för vidare tester är enligt ovanstående tabell: natriumsilikat, kiselsyrorol, epoxi och fenolharts. Epoxin tas med som en referens då det är bindemedlet som normalt används i SM²C-material. Natriumsilikat används istället för kaliumsilikat då natriumsilikat finns lätt tillgängligt. Det visade sig under arbetets gång att det införskaffade keramiska limmet var kaliumsilikatbaserat. Limmet kan möjligen ge en fingervisning om vilka egenskaper man kan förvänta sig av rent kaliumsilikat.

6 Teori för bindemedel

Detta kapitel är tänkt att ge läsaren en djupare förståelse för de bindemedel som kommer användas i kommande kapitel.

6.1 Natriumsilikat

Natriumsilikat som också kallat vattenglas, har varit känt i hundratals år men det var först på 1950-talet som det började användas som ett industriellt bindemedel⁷⁹. Natriumsilikat är silika (SiO_2) löst i vatten med hjälp av en alkalimetall (natrium). Natriumsilikat har en relativt låg löslighet i vatten vilket leder till låga halter silika i vattenglaslösningar. Natriumsilikat har markant sämre mekaniska egenskaper än de flesta organiska bindemedel men har också bättre temperaturegenskaper.

6.1.1 Användning

Natriumsilikat används inom allt från skogs- och pappers-massaindustrin till tvättmedel och gjutindustrin⁸⁰.

Tillverkare av natriumsilikat specificerar normalt vikt eller mol förhållandet mellan silika (SiO_2) och soda (Na_2O) samt vatteninnehåll (56 % vanligt) och viskositet⁸¹. Förhållandet mellan silika och soda ($\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$) ger natriumsilikatet dess egenskaper. Höga halter av SiO_2 ger upphov till ett mer glasbildande hårdare och mer svårlöslig silikat medan höga halter av soda (alkali) ger en mer löslig silikat⁸². Förhållandet $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ varierar normalt mellan 3.9:1 och 1.6:1. Vid halter över 4:1 löser sig natriumsilikat inte längre i vatten⁸³. Den maximala SiO_2 koncentrationen i kommersiella produkter begränsas även av lösningens viskositet som måste vara låg nog för att pumpas under normala förutsättningar. Ju högre förhållande $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ desto lägre koncentration silika finns tillgängligt i kommersiella produkter. Då natriumsilikat används som bindemedel är förhållande mellan 2.5 och 3.8 vanliga⁸⁴. När lösningen torkas bildas det ett ljust pulver eller torr gel som är lösligt i vatten och alkalier men ej i alkoholer eller syror⁸⁵.

⁷⁹ (Owusu, Y.A., 1982) sida 57

⁸⁰ (Owusu, Y.A., 1982) sida 58

⁸¹ (Brown, J.R., 1994) sida 71

⁸² (Kemikalieinspektionen, 2010) Natriumsilikat

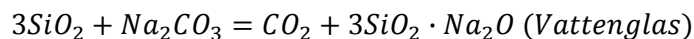
⁸³ (Iler, R. K., 1979) sida 119

⁸⁴ (Iler, R. K., 1979) sida 121

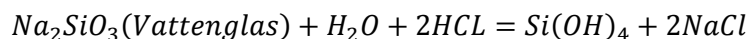
⁸⁵ (Owusu, Y.A., 1982) sida 1

6.1.2 Framställning

Natriumsilikat tillverkas oftast genom att man reagerar krossat glas (SiO_2) med natriumkarbonat (Na_2CO_3) i ugnar över 1300°C . Reaktionen är den följande:

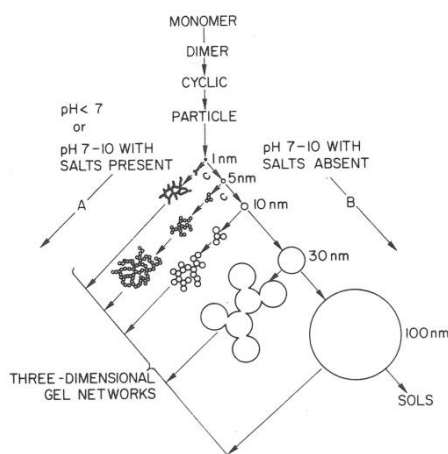


Vattenglaset upplöses sedan i varmt vatten under tryck.⁸⁶ Monomeren $\text{Si}(\text{OH})_4$ bildas då Na_2SiO_3 surgörs enligt⁸⁷:



$\text{Si}(\text{OH})_4$ är den enda vattenlösliga formen av silika, formen kallas ibland ”monosilic acid” eller ”ortosilicic acid”⁸⁸.

6.1.3 Polymerisation



Figur 6: Polymerisation, (Iler, R. K., sida 174).

$\text{Si}(\text{OH})_4$ -molekylen är stabil i rumstempererat vatten vid koncentration $2 \cdot 10^{-3}$ M men molekylen polymeriseras snabbt vid högre koncentrationer⁸⁹. Polymerisationen sker i steg, initialt omvandlas $\text{Si}(\text{OH})_4$ till ”polysilic acid” i form av en lågmolekylär dimer. Kiselsyran polymeriseras på ett sådant sätt att antalet siloxan (Si-O-Si) grupper maximeras och antalet oreagerade SiOH-grupper minimeras. De ringstrukturer som bildas under polymeriseringen länkas i sin tur ihop med andra närliggande ringstrukturer med hjälp av fria monomerer (se figur 9). På detta vis bildas små kompakta enheter med ett hölje av oreagerade SiOH

⁸⁶ (Iler, R. K., 1979) sida 117

⁸⁷ (Iler, R. K., 1979) sida 5

⁸⁸ (Iler, R. K., 1979) sida 4

⁸⁹ (Iler, R. K., 1979) sida 10-11

grupper. Dessa små enheter kan ses som kärnan i de partiklar som sedan bildas då polymeriseringen fortskrider. Eftersom de mycket små partiklarna har högre löslighet än de något större partiklarna så kommer de stora partiklar växa på bekostnad av de små ("Ostwald ripening"). Denna mekanism är endast av betydelse för partiklar mindre än ca 5 nm.

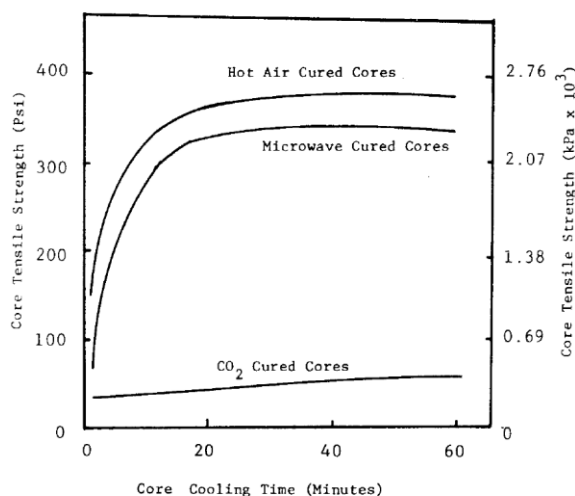
Om partiklarna ska bli större än ca 5 nm måste alltså någon annan mekanism ta över. I en basisk miljö ~pH 7-10.5 så börjar silikan brytas ner till silikat. Som tidigare nämnts så är en silikat en anjonisk (negativ) kisel-molekyl. Eftersom varje omvandlad partikel har en negativ laddning så repellerar de nu varandra. Ett högt pH leder också till nedbrytning av silikan till kiselsyra. Då kiselsyran är oladdad kan den användas för att öka partikelstorleken på närliggande partiklar.

Detta reaktionsförlopp är vad som bildar kiselsyrasol, det vill säga stora partiklar som hålls separerade på grund av deras repellerande ytladdningar. I fallet med alkalisilikaterna sker det dock något annat. Anledningen till detta är det relativt höga saltinnehållet i dessa lösningar. Dessa alkaliska joner binder in till ytan på utfällda silikater och skärmar på så sätt partiklarnas negativa laddningar. Istället för att individuella partiklar ökar i storlek så bygger de i stället upp stora tredimensionella nätverk genom aggregering (se figur 6) Om en silikatlösning surgörs så kommer antalet negativa laddningar på partiklarnas yta minska vilket i sin tur leder till en ökad aggregering (gelning)⁹⁰

⁹⁰ (Iler, R. K., 1979) sida 175

6.1.4 Härdning

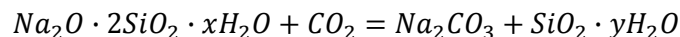
Vattenglas kan härdas på ett flertal sätt vilka samtliga har sina för och nackdelar. De vanliga härdningsmetoderna inom gjutindustrin är att tillsätta en svag syra så som en organisk ester eller CO₂-gas⁹¹. Men natriumsilikat kan också härda genom torkning eller genom tillsats av alkalimetaller och andra förtjockare⁹². Hur natriumsilikat härdas har mycket stor betydelse för bindemedlets slutliga egenskaper. Normalt antas att torkning ger starkast bindning medan CO₂-härdning antas ge en mer omedelbar och mer vattentålig bindning (se figur 7).



Figur 7: Mekanisk styrka beroende på härdningsmekanism (Owusu, Y.A., sida 76).

Härdning med CO₂-gas

Vid härdning med CO₂-gas reagerar koldioxiden med vattenglasets och bildar Na₂CO₃ samt hydrerad silika gel enligt:



Styrkan i bindningen kommer initialt endast från Na₂CO₃ men när silikagelen förlorat tillräckligt med vatten så bidrar även denna till bindningen. Dess bidrag till den mekaniska styrkan är dock försumbar⁹³. I närvaron av Na₂CO₃ och vatten finns det risk för övergasning vilket resulterar i NaHCO₃ (bikarbonat) vilket försämrar bindningsstyrka.

Härdning med svag syra

Som tidigare nämnts så resulterar en sänkning av pH i en minskad repellering mellan silikatpartiklarna i lösningen vilket resulterar i en ökad gelning.

⁹¹ (Brown, J.R., 1994) sida 71

⁹² (Iler, R. K., 1979) sida 153

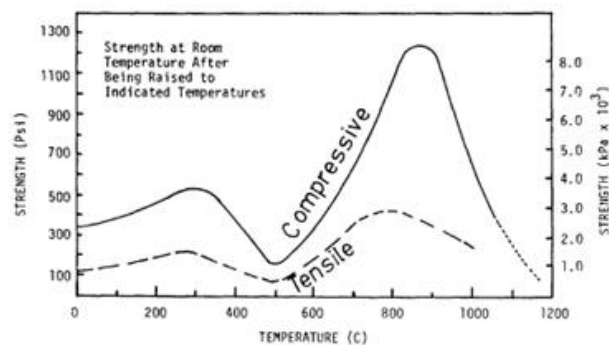
⁹³ (Owusu, Y.A., 1982) sida 79

Härdning genom torkning

Härdning av natriumsilikat genom torkning är mycket närbesläktad med härdning av kiselsyrasol genom torkning. Viss ytterligare information om processen kan därför finnas under kapitlet Kiselsyrasol. Till skillnad från kiselsyrasol så innehåller natriumsilikat en relativt stor mängd salt. Natriumsilikatkoncentrationen kan dessutom inte överstiga vattenlösligheten i någon större utsträckning utan att partiklar faller ur lösningen. Vid avlägsning av vatten (torkning) så ökar koncentrationen av silika vilket resulterar i en utfällning av fasta anjoniska partiklar. På grund av lösningens relativt höga saltinnehåll så kan dessa partiklar aggregera trots partiklarnas repellerande krafter. Dessa aggregat bildar i sin tur tredimensionella nätverk som när allt vatten avlägsnats bildar den torra gel som står för styrkan i bindningen.⁹⁴

Sintring

Vid temperaturer över cirka 400 °C så börjar silikapartiklarna sintras. Denna process skapar ytterligare bindningar inom kiselgelen och resulterar i markant bättre mekaniska egenskaper än endast torkning⁹⁵. Nedanstående figur visar hur de mekaniska egenskaperna för natriumsilikat kan påverkas genom sintring.



Figur 8: Bindningsstyrka i natriumsilikat som en funktion av temperatur (Owusu, Y.A., sida 83).

Sintringsprocessen resulterar även i att bindemedlet blir mer kemiskt resistent, t.ex. så är det efter sintring inte längre vattenlösligt.

⁹⁴ (Iler, R. K., 1979) sida 116

⁹⁵ (EKA Chemicals, 2010) Telefonkontakt

6.1.5 Arbetsmiljö

Trots att silikatbaserade bindemedel kan sägas vara relativt hanteringsvänliga så föreligger fortfarande vissa risker. Samtliga silikatbindemedel är t.ex. kraftigt basiska (>pH 10) och därför irriterande för ögon och hud. Vid risk för direkt kontakt ska därför skyddsglasögon och handskar bäras. Om det föreligger risk för dimbildning ska även andningsskydd användas under hantering.⁹⁶

⁹⁶ (Swedhandling, 2010) CAS-1344-09-8

6.2 Kiselsyrasol

En sol eller kolloidal lösning definieras som en stabil dispersion av partiklar större än 50 nm⁹⁷. Till skillnad från vattenglas där större delen av silikaterna är upplösta i lösningsmedlet återfinns silikan i kiselsyrasolen i partikelform. En klar fördel med detta är att silikans vattenlöslighet inte är begränsande för mängden silika. Kiselsyrasol kan därmed innehålla en markant större andel silika än natriumsilikat och andra vattenglas. Idag finns kiselsyrasoler innehållande upp till 50 wt% SiO₂ tillgängliga⁹⁸. Eftersom ingen silika måste lösas i vattnet så är behov av alkalimetaller mindre. Som en effekt av detta så innehåller kiselsyrasolerna mindre fria joner än vattenglasen vilket kan antas resultera i en mindre korrosiv lösning. Trots dessa skillnader så är kiselsyrasolen mycket närbesläktad med vattenglasen. Både lösningarna är t.ex. mycket basiska och mycket av dagens kiselsyrasol tillverkas idag genom en ”förädling” av diverse vattenglas⁹⁹. Precis som för vattenglas så är pH en mycket viktig parameter. Till exempel så ökar gelningshastigheten exponentiellt med en minskning av pH. Bindemedlet har precis som vattenglasen dåliga mekaniska egenskaper men mycket bra temperatur egenskaper (1400 °C)¹⁰⁰.

6.2.1 Användning

Kiselsyrasol har många användningsområden, först och främst som bindemedel för högtemperaturkeramer och vid tillverkning av formar för metallgjutning. Det finns även exempel där kiselsyrasol blandats med latex för att binda metallpulver. Kiselsyrasol kan även blandas med organiska bindemedel för att uppnå bättre vidhäftning, nötningsmotstånd och elektriska egenskaper hos det organiska bindemedlet.¹⁰¹

6.2.2 Framställning

Kiselsyrasol kan framställas på en mängd olika sätt men vanligast är att förädla natriumsilikat. Till exempel så kan kiselsyrasol tillverkas genom neutralisering av natriumsilikat med en syra eller genom att natriumsilikat tillåts vandra genom en jonutbytare för att avlägsna natriumjonerna.¹⁰²

6.2.3 Polymerisation

Se kapitel 6.1.3 för en allmän beskrivning av polymerisationsprocessen för silikater.

⁹⁷ (Pashley, R.M., 2004) sida 5

⁹⁸ (Iler, R. K., 1979) sida 313

⁹⁹ (Iler, R. K., 1979) sida 313

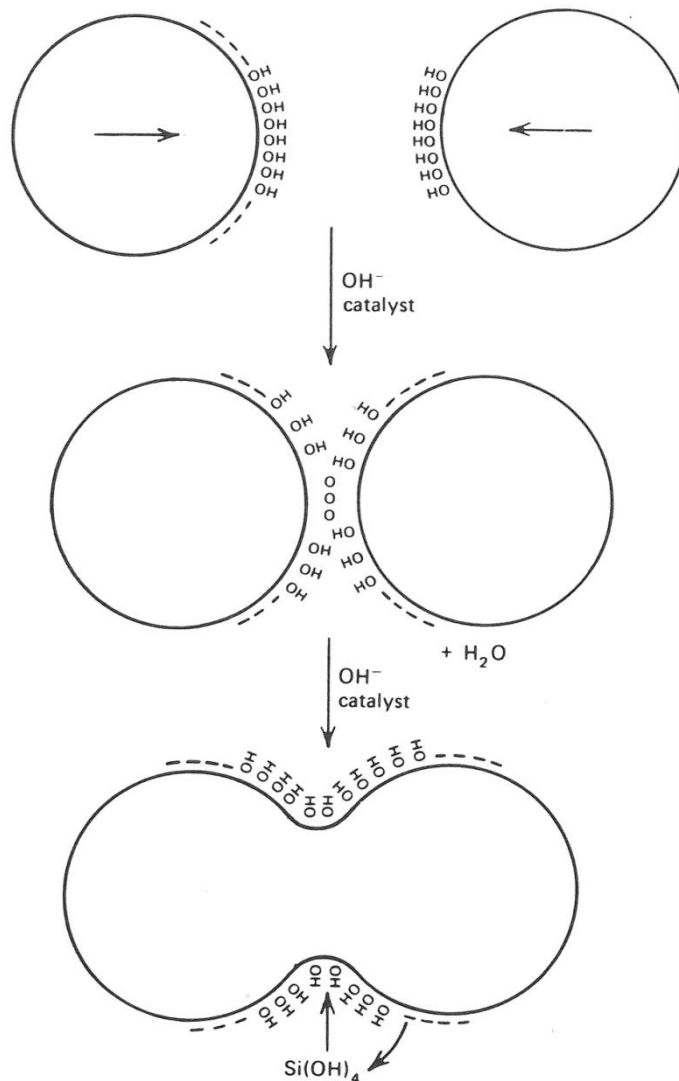
¹⁰⁰ (Swerea|IVF, 2010) Soler

¹⁰¹ (Iler, R. K., 1979) sida 420-438

¹⁰² (Occidental Petroleum Corporation, 2010) sida 8

6.2.4 Härdning

Bindningsmekanismen från kolloidallösning till gel och slutligen mellan gel och metallpulver är inte helt enkelt att förklara. Följande beskrivning är därför förenklad och beskriver bara förloppen i stora drag. För en mer fullständig förklaring rekommenderas boken "The Chemistry of silica" av Iler, R.K.



Figur 9: Kondensationsreaktion, (Iler, R. K., sida 224).

Den vanligaste bindningsmekanismen mellan två solpartiklar är skapandet av siloxan (Si-O-Si) bryggor när partiklarna kommer i kontakt. Ett sätt detta kan ske är genom en kondensationsreaktion mellan de neutrala SiOH samt de laddade SiO⁻

-grupper som finns på partiklarnas ytor¹⁰³. Eftersom det handlar om en kondensationsreaktion så sker ”avspjälkning” av vatten vilket resulterar i en viss volymändring under torkprocessen¹⁰⁴.

Aggregering av partiklar resulterar först och främst i linjära system då en inkommande partikel då endast behöver överkomma repulsionen från en annan partikel¹⁰⁵. Silikagelen beter sig därmed fiberliknade eller polymert. Detta är anledning till namnet ”keramiska polymerer” som ibland används för att beskriva vissa keramiska bindemedel.

Härdning genom torkning

Genom torkning ökar koncentrationen av solpartiklarna vilket leder till att partiklarna tvingas närmare varandra. När partiklarna kommer tillräckligt nära så övervinns den repellerande kraften av den attraherande van der Waals kraften¹⁰⁶. När partiklarna befinner sig tillräckligt nära varandra så kan de bindas samman genom kondensationsreaktionen enligt ovanstående figur. Till slut består hela strukturen av ett sammanhängande nätverk som när allt vatten avlägsnats bildar en torr solid gel.¹⁰⁷

Den torra gelens mekaniska styrka är direkt proportionell mot styrkan i den slutgiltiga kompositen vilken är flera gånger svagare än de flesta organiska bindemedlen. Det finns ett antal sätt att förbättra denna egenskap, till exempel så visar undersökningar att kiselsyrasolens styrka kan förbättras om den kombineras med etylsilikat. Det är även möjligt att blanda in ett organiskt bindemedel i kiselsyrasolen. Undersökningar på likande material har visat på en tredubbling av den mekaniska styrkan som en effekt av hur snabbt vattnet avlägsnats från solen¹⁰⁸

Sintring

Se kapitel 6.1.4 för sintring av natriumsilikat då kiselsyrasolen antas bete sig mycket snarlikt under en eventuell sintringsprocess.

6.2.5 Arbetsmiljö

Precis som i fallen med vattenglas så är kiselsyrasoler mycket basiska lösningar (>pH 10) och ska hanteras därefter. Grundutrustning med heltäckande klädsel, skyddshandskar och skyddsglasögon ska enligt MSDS användas vid hantering och vid risk för dimbildning så ska andningsskydd bäras.

¹⁰³ (Iler, R. K., 1979) sida 223

¹⁰⁴ (Swerea|IVF, 2010) Soler

¹⁰⁵ (Iler, R. K., 1979) sida 225

¹⁰⁶ (Pashley, R.M., 2004) sida 4

¹⁰⁷ (Iler, R. K., 1979) sida 173

¹⁰⁸ (Kovalchuk, G., 2006) sida 3

6.3 Keramiska lim

Keramiska lim finns tillgängliga i en mängd olika varianter. Gemensamt för dem är att de oftast bygger på en oxid som t.ex. SiO_2 eller MgO som blandas med ett organiskt eller oorganiskt lösningsmedel.

6.3.1 Användning och framställning

Keramiska lim ersätter de konventionella limmen över $300\text{ }^\circ\text{C}$ där dessa inte längre är tillförlitliga. Keramiska lim resulterar i en vattenfast men inte helt vattentät stuktur. Detta kan i vissa fall åtgärdas genom värmebehandling eller efterbehandling av ytan med en så kallad primer.¹⁰⁹

Trots mer eller mindre komplicerade namn så är keramiska lim ofta närbesläktade med alkalisilikaterna och kiselsyrsol och uppvisar många likheter med dessa. Cerama-Bind 643-1 som används i denna undersökning är till exempel baserat på kaliumsilikat, troligen med diverse tillsatser så som vätmedel, antiskummedel och flytmedel. Cerama-Bind 643-1 ska i sin tur blandas med ett fyllmedel så som Al_2O_3 , SiO_2 , MgO eller ZrO_2 . Det är även som i denna undersökning möjligt att blanda det med ett metallpulver.¹¹⁰

6.3.2 Härdning

Företaget Aremco som marknadsför Cerama-Bind 643-1 har trots upprepade försök inte varit intresserade av att delge härdningsprocessen. Det går likväl att uttröna att det verkligen handlar om en process som är mycket lik den som sker för alkalisilikaterna. För mer information om härdningsprocessen se därför kapitel om natriumsilikat och kiselsyrsol. En viktig skillnad jämfört med dessa bindemedel är att Cerama-Bind redan vid en relativt låg härdningstemperatur ($<300\text{ }^\circ\text{C}$) uppvisar full mekanisk styrka.¹¹¹

6.3.3 Arbetsmiljö

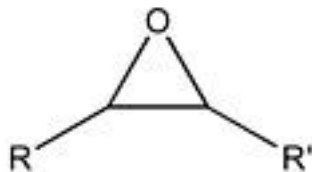
Som i fallen med vattenglas och kiselsyrsoler så handlar det här om en mycket basisk lösning ($>\text{pH } 10$) vilken ska hanteras därefter. Grundutrustning med heltäckande klädsel, skyddshandskar, skyddsglasögon och i vissa fall andningsskydd, ska enligt MSDS användas vid hantering.

¹⁰⁹ (Swerea|IVF, 2010) Keramiska lim

¹¹⁰ (Aremco, 2010) High temperature inorganic binders

¹¹¹ (Aremco, 2010) High temperature inorganic binders

6.4 Epoxi



Figur 10: Epoxibindning (ASM Handbook Volume 21, sida 196).

Epoxiharts togs fram parallellt i Europa och USA under det sena 1920-talet. Epoxin har fått sitt namn från de epoxigrupper som återfinns i dessa polymerer.

6.4.1 Användning

Epoxihartsen används mycket inom komposittillverkning då den kombinerar egenskaper som inte finns tillgängliga i någon annan enstaka härdplast. Till exempel så har epoxin hög mekanisk styrka, bra vätning av nästan alla ytor, hög elektrisk isolation, hög kemisk resistens och uppvisar inga problem med krympning under härdning. För att uppnå dessa egenskaper så är det vanligt att flera olika harster/komponenter blandas. Avancerade epoxihartser kan därför sägas bestå av bashartsen, härdmedel och diverse tillsatser.¹¹²

6.4.2 Framställning

Epoxiharts bildas genom reaktionen mellan ett dihydroxyl så som bisfenol-A med en epoxid så som epiklorhydrin¹¹³.

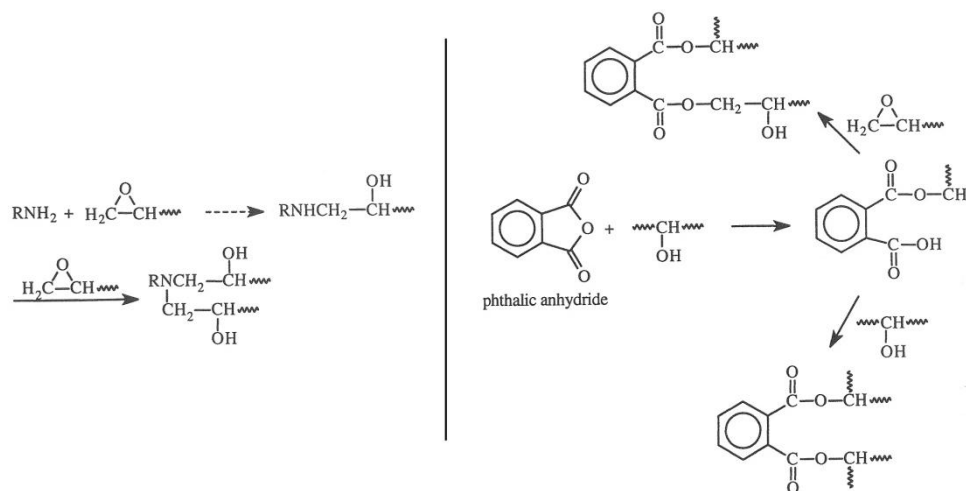
6.4.3 Härdning

När epoxin tillåts reagera med en härdare kan det bildas mycket starka polymera nätverk. Härdtider kan variera från ett fåtal sekunder till flera månader i värmeaktiverade system. Härdare och bas måste blandas i korrekta stökiometriska mängder för att härdningsreaktionen ska ske fullt ut. Trots detta så är de rekommenderade blandningsmängderna oftast framtagna på experimentell väg.¹¹⁴

¹¹² (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 195

¹¹³ (Fried, J.R., 2007) sida 379

¹¹⁴ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 201



Figur 11: T.v. Aminhärdare. T.h. Anhydridhärdare (Fried, J.R., sida 380).

Härdarna kan delas in i två typer, alkalier och syror. I de alkaliska härdarna ingår lewis baser, primära och sekundära aminer och amider samt andra kvävebaserade föreningar¹¹⁵. Till syror räknas lewis syror, organiska syror, fenoler, anhydrider m.fl. De vanligaste härdarna är alifatiska (linjära) aminer och anhydrider¹¹⁶. Aminerna härdar hartsen genom ringöppning av de yttre epoxigrupperna. Anhydriderna fungerar så att de först reagerar med hydroxylgrupperna vilket resulterar i estersyror som i sin tur kan ge upphov till ringöppningar av epoxigrupperna¹¹⁷.

Mycket av epoxidens egenskaper är en funktion av härdaren. Val av korrekt härdare är därför extra viktigt. Till exempel så kan en anhydridisk härdare ibland vara att föredra framför en aminbaserad härdare eftersom det ger upphov till ett lågvisköst system med lång potliffe och hög glasstemperatur. En anhydridisk härdare påverkar också huden i mindre utsträckning än en aminbaserad härdare. En nackdel med anhydridiska härdare är dock att de ger en mer fuktkänslig slutprodukt med sämre mekaniska egenskaper.¹¹⁸

Epoxins glastemperatur (T_g) är starkt beroende på vilken molekylstruktur som bildas under härdningsprocessen vilket i sin tur är beroende på polymerens styvhet och intermolekylära interaktioner. Det är dock allmänt accepterat att glastemperaturen är starkt kopplad till korslänkingsdensiteten i materialet. T_g är därför mycket nära kopplat till härdtemperaturen. En hög härdtemperatur ger för ett visst system högre glastemperatur än vad en låg härdtemperatur ger för samma

¹¹⁵ (Goodman, S.W., 1999) sida 211

¹¹⁶ (Cowie, J.M.G., 2008) sida 50

¹¹⁷ (Fried, J.R., 2007) sida 380

¹¹⁸ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 206

system. I de flesta system så ligger optimal härdtemperatur nära den slutliga glastemperaturen.¹¹⁹

6.4.4 Arbetsmiljö

När epoxihartser hanteras så är det viktigt att vara införstådd med de risker som är involverade. På grund av epoxins stora variation så bör hantering av varje specifik harts anpassas enligt medföljande MSDS. Till exempel så kan kvävebaserade härdare vara mycket irriterande eller sensibiliserande för huden. Medan anhydrider som ofta är mindre irriterande för huden i vissa fall kan irritera luftvägarna¹²⁰.

Hantering av ickehärdade hartser ska alltid ske i väl ventilerade lokaler med väl fungerande personlig skyddsutrustning. Den personliga utrusningen ska bestå av heltäckande kläder, glasögon och handskar. Andningsskydd ska även bäras vid hantering av ohärdade epoxihartser. Beroende på hartsens ångtryck och ångdensitet kan det ibland vara nödvändigt med mycket välventilerade lokaler. Trots att t.ex. lågmolekylär epoxi är mycket svårflyktigt så kan det föreligga risker för andra giftiga flyktiga ämnen¹²¹. Hud- och luftvägssensibilisering kan ske om dessa riktlinjer ej följs.¹²²

För mer information se medföljande bilaga om allmänna hanteringsregler för härdplaster eller se Arbetsmiljöverkets hemsida.

¹¹⁹ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 195

¹²⁰ (Goodman, S.W., 1999) sida 225

¹²¹ (Arbetsmiljöverkets författningssamling, 2005) sida 34

¹²² (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 206

6.5 Fenolharts

Fenolharts, fenoplast eller Bakelit som det även kallas, var den första helt syntetiska öppet tillgängliga plasten (1907)¹²³. Fenolplaster är mycket brandresistenta och har allmänt mycket bra högttemperaturegenskaper med bibehållna egenskaper. Plasten är även resistent mot kolväte och klorbaserade lösningsmedel¹²⁴.

6.5.1 Användning

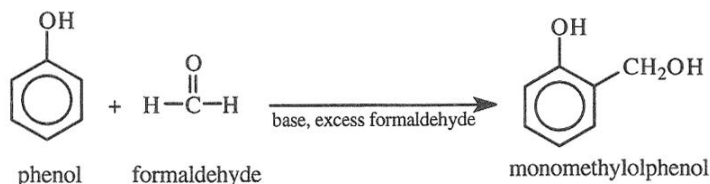
Fenolharts används i stor utsträckning som bindemedel i slipskivor och flamsäkra väggskivor. Eftersom plasten är mycket spröd i sin rena form kombineras den nästan alltid med fyllmedel så som t.ex. sågspån vilket ger ett mindre sprött material¹²⁵.

6.5.2 Framställning

Fenolharts produceras genom en reaktion mellan fenol och en aldehyd som oftast är formaldehyd¹²⁶. Beroende på vilket sätt dessa två ämnen tillåts reagera så delas hartsen upp i två grupper, resol eller enstegsharts och novolac eller tvåstegsharts¹²⁷.

Resol

Vid tillverkningen av resol så reagerar fenol och ett överskott eller ett 1:1 förhållande av formaldehyd i en basisk miljö. Under denna reaktion bildas antingen mono- di- och trimetylofenol (se figur 12). Formaldehyden fäster antingen i orto- eller para- positioner på fenolen vilken ger upphov till en resonans-stabiliserad struktur.



Figur 12: Resol tillverkning (Fried, J.R., sida 383).

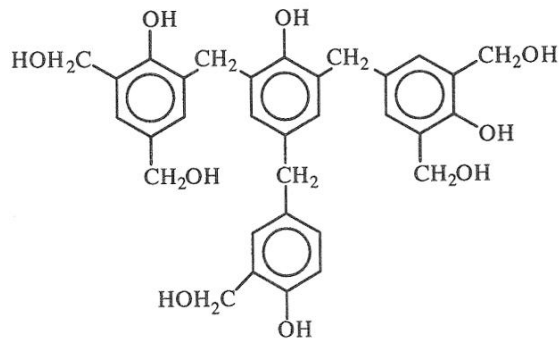
¹²³ (Goodman, S.W., 1999) sida 28

¹²⁴ (ASM Handbook Volume 21, 2001) sida 309

¹²⁵ (Goodman, S.W., 1999) sida 24

¹²⁶ (Goodman, S.W., 1999) sida 23

¹²⁷ (Goodman, S.W., 1999) sida 28



Figur 13: Resolstruktur, (Fried, J.R., sida 383).

Genom upphettning kondenserar metylofenolerna till lågmolekylära prepolymere kallade resoler. Dessa grupper innehåller en stor andel fria metylol grupper som gör hela molekyl lös i vatten och baser¹²⁸. Polymeriseringen stoppas precis innan gelbildning genom kylning. Eftersom resolen är vattenlöslig så kan önskad viskositet uppnås genom utspädning av hartsen.

Novolac

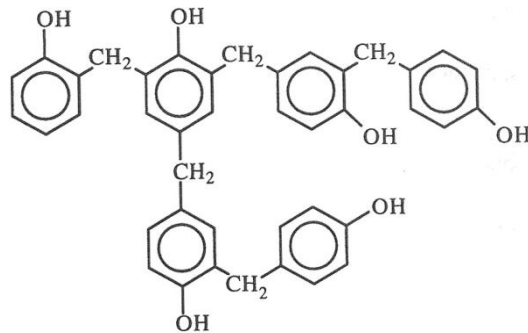
Novolac polymeriseras i ett första steg med hjälp av en sur katalysator. Fenolen blandas dock medvetet med för lite formaldehyd för att polymerisering ska kunna ske fullt ut.



Figur 14: Novolac tillverkning (Fried, J.R., sida 383).

Under dessa sura förhållande så bildas den lågmolekylära prepolymeren novolac. Novolac är till skillnad från resol inte vattenlösligt.

¹²⁸ (Goodman, S.W., 1999) sida 30



Figur 15: Novolacstruktur (Fried, J.R., sida 384).

6.5.3 Härdning

Resol

Den slutliga härdningen av resolen initieras genom en temperaturökning utan extra härdningsagenter. Härdningen sker genom en typisk polykondensation där vatten avges som biprodukt¹²⁹. Ett möjligt problem med härdning av resoler är avlägsnandet av vatten och andra lösningsmedel. Under tidigt 1900-tal härdades resoler i öppna formar vilket resulterade i kraftig bubbelbildning. Ett sätt att minska denna problematik var att tillåta mycket långa härdningstider i låg temperatur¹³⁰. Det är tänkbart att det går att använda sig av torkmedel för att minska problemet med bubbelbildningen¹³¹. Dr Leo H. Baekeland grundaren av Bakelit tog 1907 fram en mycket effektivare teknik som fortfarande används utan att använda torkmedel. Tekniken bygger på att harsten hålls under högt tryck i stängda formar under hela härdningsförloppet. På detta vis undviks problemet med gasbildning.

Novolac

Prepolymeren novolac bildar i rumstemperatur ett glas. Detta glas krossas till ett fint pulver som sedan blandas med pulvret hexametylentetraamine (HEXA). Vid uppvärmning (~165 °C) bryts HEXA ner till den formaldehyd som krävs för att slutföra polymeriseringen¹³². Novolac ger ifrån sig ammoniak under härdning. Begränsade mängder ammoniak kan även frigöras efter härdning då plasten värms till temperaturer nära T_g ¹³³.

¹²⁹ (Fried, J.R., 2007) sida 383

¹³⁰ (Goodman, S.W., 1999) sida 23,24

¹³¹ (PA-resins, 2010) Personkontakt

¹³² (Goodman, S.W., 1999) sida 31

¹³³ (PA-resins, 2010) Personkontakt

6.5.4 Skillnader mellan resol och novolac¹³⁴

- Resoler har en kort ”shelf life” ofta under 60 dagar medan novolacer i princip har en oändlig ”shelf life”.
- Novolac är ungefär dubbelt så dimensionsstabil som resol.
- Vatten avspjälkas vid härdning av resoler medan ammoniak avspjälkas vid härdning av novolacer.
- Resoler är oftast vätskor medan novolacer oftast är pulver.

6.5.5 Arbetsmiljö

Precis som vid hantering av epoxiharts så är det vissa risker med hanteringen av fenolharts. Fenol och formaldehyd som båda ingår i fenolhartsen är giftiga. Fenol är dessutom brandfarligt och frätande medan formaldehyd är en stark illaluktande gas. Mängden fri fenol och formaldehyd bör dock vara relativt minimal i en novolac eller resol¹³⁵. När arbete med fenolplaster sker så är det ändå viktigt att framförallt kontrollera mängden formaldehyd i luften¹³⁶. Precis som för epoxiharts så är ickehärdad fenolplast sensibiliserande. Icke-härdade hartser ska därför alltid hanteras i väl ventilerade lokaler med väl fungerande personlig skyddsutrustning. Enligt MSDS ska den personliga utrusningen bestå av heltäckande kläder, glasögon, handskar, andningsskydd.

För mer information se medföljande bilaga om allmänna hanteringsregler för härdplaster eller se Arbetsmiljöverkets hemsida.

¹³⁴ (Goodman, S.W., 1999) sida 3

¹³⁵ (PA-resins, 2010) Personkontakt

¹³⁶ (Arbetsmiljöverkets författningssamling, 2005) sida 34

7 Experimentella studier

Detta kapitel är tänkt att ge läsaren en uppfattning om de metoder som användes för att ta fram testkropparna samt de testmetoder som sedan användes för att utvärdera dessa.

7.1 Framtagning av testkroppar

7.1.1 Tillverkningsvariabler

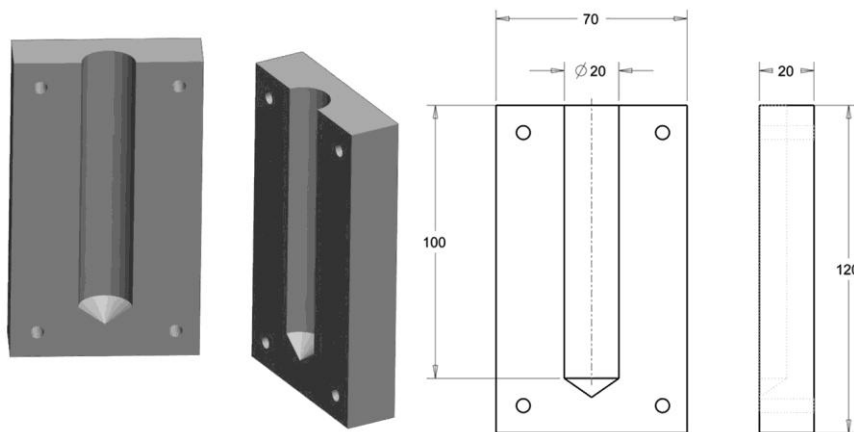
Bindemedelsmängd

Eftersom den slutliga produkten ska kunna gjutas så antogs att ett så kallat hållbart system var att föredra. Det vill säga att efter det att pulver och bindmedel blandats så går blandningen att hålla i en gjutform. För att finna gränsen för när ett system går från icke hållbart till hållbart blandades små mängder bindemedel med metallpulvret till dess att systemet var hållbart. Tester med högre mängder bindemedel utfördes även för att undersöka hur t.ex. pulverpackningstätheten påverkades av stora mängder bindemedel. Undersökningen visade att högst pulverpackningstäthet uppnås nära gränsen för ett hållbart system.

Vissa bindemedel kunde på grund av problem med torkningsprocessen inte användas i hållbar form. I dessa fall minskades mängden bindemedel tills dess att torkning var möjlig.

Gjutformar

På grund av olika krav på härdnings- respektive torkningstemperaturer för bindemedlen så var det nödvändigt att använda flera olika gjutformsmaterialet. För tillverkning av de initiala testkropparna användes materialen POM och stål. Vid tillverkning av testkroppar för permeabilitetstester så användes formar av silikongummi.



Figur 16: Skiss av gjutformen som används vid framtagning av testkroppar [mm].

POM

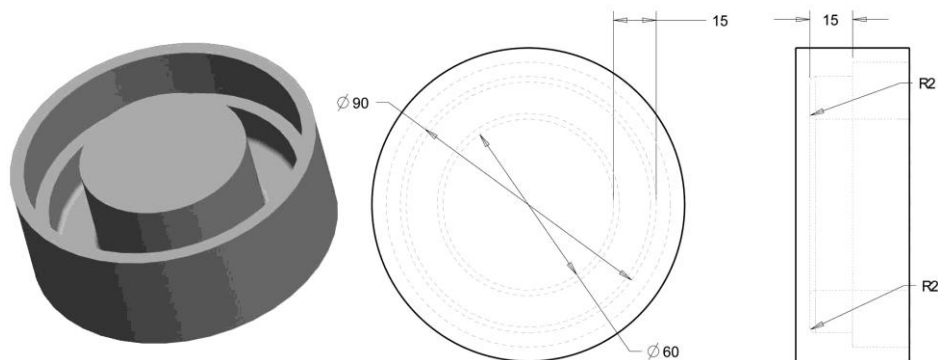
Formar tillverkade i acetalplasten POM (Polyoximetylen) användes vid framtagandet av provkroppar där torkning respektive härdning kunde ske i temperaturer under 90 °C. POM-plasten bryts ner vid ca 170 °C men den uppvisar tydlig volymändring även under 100 °C. Vid framtagandet av material med låg mekanisk styrka var det därför viktigt att så låga temperaturer som möjligt användes, helst under 70 °C.¹³⁷

Stål

Stålformar användes i de fall där temperaturer över 90 °C krävdes för härdning av testkroppen. I lägre temperaturer är dock POM-formar att föredra då testkroppar är lättare avlägsnas från detta formmaterial.

Silikongummi

Silikonformen som i sig själv är gjuten har fördelen att den är elastisk. Gjutformen är därför mer förlåtande mot de små volymändringar som kan ske under torkning av t.ex. Bindzil. Formens elastiska natur gör även att avformningsprocessen underlättas.



Figur 17: Skiss av gjutformen som användes för framtagningen av toroidformade testkroppar [mm].

Torkning/härdning

Tekniken som användes för torkning/härdning anpassades efter varje enskilt bindemedel. I vissa fall fanns tydliga instruktioner att tillgå medan i andra fall så identifierades lämplig teknik rent experimentellt.

Avformning

Avformning kallas den process där gjutkroppen avlägsnas från gjutformen. Beroende på vilket bindemedel som användes så var det nödvändigt att använda olika tekniker för att avforma gjutkroppen. I vissa fall kunde processen underlättas

¹³⁷ (Klason, C., 1987) sida 108

med diverse släppmedel så som silikonspray eller matolja (lämpligt för Bindzil-baserade testkroppar). Om dessa användes i för stora mängder hade de dock en negativ effekt på slutresultatet. När POM-formar används bör gjutkroppen avlägsnas medan formen fortfarande är relativt varm (nära tork/härdtemperatur). När POM-formar svalnar från ~50 °C eller mer sker nämligen en påtaglig volymändring i formmaterialet. Denna volymändring försvårar avformningen markant och leder i extremfall till sprickor i gjutkroppen.

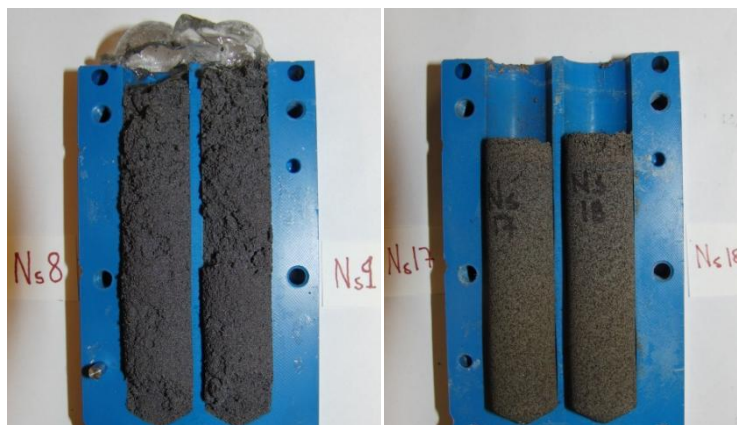
Möjlig avformningsteknik styrdes till stor del av gjutkroppens mekaniska styrka. För både keram och polymerbaserade bindemedel var dock en teknik som pressade gjutkroppen ur formen att föredra framför en teknik som antingen böjde eller drog gjutkroppen ur formen.

7.1.2 Natron (Natriumsilikat)

Natron som är en variant av natriumsilikat är en relativt trögflytande klar vätska. Lösningen blandades för hand med metallpulvret i ca 30 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåts.

Bindemedelsmängd

Initialt så försökte ett hållbart system uppnås genom att blanda 15 wt% bindemedel med metallpulvret. Trots långsam torkning i 65 °C så gelade dock bindemedlet kraftigt i övre delen av formen. På grund av denna gelbildning så slöts lösningsmedlet effektivt in i formen, detta medförde att systemet inte gick att torka. Bindemedelsmängden minskades därför till dess att detta problem ej kvarstod, vilket skedde vid ungefär 4 wt% bindemedel.



Figur 18: T.v. Resultat från torkning av hållbart system. T.h. Resultat från torkning av icke hållbart system.

Kompakteringsteknik

Eftersom systemet inte kunde göras hållbart så användes centrifugering för att kompaktera systemet. För att kompakteringen skulle bli så effektiv som möjligt så centrifugerades testkropparna i 10, 30, 50, 80 och 100 g (gravitation) i respektive 10min.

Torkning

Härdning av testkropparna skedde genom torkning i en 65 °C varm ugn i ca 10 timmar. För att uppnå full mekanisk styrka krävs sintring av testkropparna men på grund av tidsbrist så utfördes inte några sådana tester på Natron baserad testkroppar. Som nämnts i tidigare kapitel så finns det undersökningar som visar på att de mekaniska egenskaperna kan förbättras ytterligare genom att noga kontrollera torkprocessen^{138 139}. Någon undersökning av detta utfördes inte under detta examensarbete.

¹³⁸ (Kovalchuk, G., 2006) sida 3

¹³⁹ (Iler, R. K., 1979) sida 442

Gjutformar

Eftersom torkning av provkropparna skedde i 65 °C så användes POM-formar. Valet påverkades även av att centrifugering endast var möjlig med denna typ av form. I de fall då stålform ändå användes försvårades avformningen av testkroppen.

Avformning

Testkropparna var i de allra flesta fall mycket lätta att avforma. Endast processen att öppnandet av gjutformen räckte oftast för att testkropparna skulle avformas. När så inte var fallet pressades provkroppen lätt ur formen i provkroppens längdriktning.

Kommentarer

De resulterande testkropparna var synligt porösa och löste upp sig om de placerades i vatten. En mindre testkroppsdelen som sintrades uppvisade minskad vattenlöslighet och ökad mekanisk styrka.

7.1.3 Cerama-bind 643-1

Cerama-bind som av företaget Aremco marknadsförs som ett oorganiskt högttemperaturbindemedel är en relativt lågviskös klar vätska baserad på kaliumsilikat. Lösningen blandades för hand med metallpulvret i ca 30 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåtts.

Bindemedelsmängd

På grund av bindemedlets relativt låga viskositet så uppnåddes ett hållbart system redan vid 10 wt% bindemedel. Trots detta så uppstod samma problematik som med Natron, det vill säga gelning i övre delen av formen vilket i sin tur hindrar nedre delen av testkroppen att torka. För att systemet ska kunna torkas måste därför bindemedelmängden minskas, vilket kommer resultera i att systemet inte längre är hållbart.



Figur 19: Resultat från torkning av hållbart system.

Härddningen

Härddning av testkropparna skedde i stegvisa temperaturökningar enligt tillverkarens anvisningar. Första torkningssteget skedde i 70 °C under en timme, andra steget skedde i 100 °C i två timmar och det sista steget skedde i 200 °C under en timme.

Kommentarer

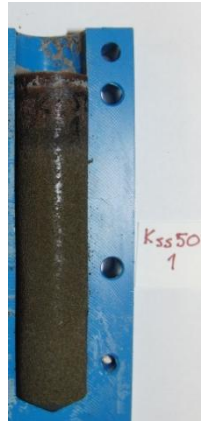
Från erfarenheter med Natron så är centrifugering inte en lämplig kompakteringsteknik för dessa ”fuktiga” pulver. På grund av detta samt den kemiska likheten med Natron så antogs det att vidare tester var onödiga. Inga vidare tester utförs därför på Cerama-bind 643-1.

7.1.4 Bindzil 50/80

Bindzil 50/80 är en mycket lågviskös mjölkig vätska. Lösningen är en kiselnyrasol där talet 50 står för kiselinnehållet i viktprocent och 80 för partikelytan i ett gram av lösningen (m²/g). Lösningen blandades för hand med metallpulvret i ca 30 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåts.

Bindemedelsmängd

Den mycket låga viskositeten gjorde att systemet blev hållbart redan vid 9 wt% bindemedel. Till skillnad från både Natron och Cerama-bind så gick det hållbara systemet att torka utan problem med gelning.



Figur 20: Resultat från torkning av Bindzil 50/80.

Torkning

Härdning av testkropparna skedde genom torkning i en 65 °C varm ugn i ca 10 timmar. Avformning var möjlig redan efter 4 timmar men på grund av synlig ångbildning står det klart att torkprocessen då fortfarande pågår. Precis som för de flesta keramiska bindemedel så uppnås full mekanisk styrka först efter sintring. På grund av tidsbrist så utfördes bara ett enda sådant test. Som nämnts i tidigare kapitel så finns det undersökningar som visar på att de mekaniska egenskaperna kan förbättras ytterligare genom att noga kontrollera torkprocessen^{140 141}. Någon sådan undersökning utfördes dock inte under detta examensarbete.

Gjutformar

Eftersom torkning av provkropparna skedde i 65 °C så användes POM-formar. I de fall då stålform ändå användes så upplevdes avformningen som svårare.

Avformning

Avformning av testkroppar var ofta relativt svår, i många fall förstördes testkropparna under processen. Kiselbaserade släppmedel verkade inte underlätta processen, möjligen kan det vara värt att prova matolja då bra resultat uppnåtts med det i silikonformar. Den mest framgångrika avformningstekniken var att med handkraft eller med hjälp av ett skruvstäd pressa provkroppen ur gjutformen i provkroppens längdriktning.

Kommentarer

De resulterande provkropparna har viss synlig porositet. På grund av den stora mängden bindemedel så sker viss synlig oxidering av metallpulvret både under och efter torkning. Observera att ovanstående process användes även vid framtagningen av de testkroppar som användes under permeabilitetstesterna.

¹⁴⁰ (Kovalchuk, G., 2006) sida 3

¹⁴¹ (Iler, R. K., 1979) sida 442

7.1.5 Bindzil 40/220

Bindzil 40/220 är precis som Bindzil 50/80 en kiselsyrasol där talet 40 står för kiselinnehållet i viktprocent och 220 är partikelytan i ett gram lösning. Eftersom partikelytan är större och kiselinnehållet är lägre än för Bindzil 50/80 så måste kiselpartiklarna i Bindzil 40/220 vara mindre. Bindzil 40/220 är en lågviskös klar vätska. Lösningen blandades för hand med metallpulvret i ca 30 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåts.

Kommentarer

Bindzil 40/220 hanterades på samma sätt som Bindzil 50/80 med det undantag att 10 wt% bindemedel användes. Eftersom de båda bindemedlen både hanteras och beter sig så likartat så hänvisas läsaren till föregående kapitel om Bindzil 50/80 för ytterligare information om hantering av Bindzil 40/220.



Figur 21: Resultat från torkning av Bindzil 40/220.

7.1.6 Epoxi FW3070 H510B

Epoxiharsten består av en bas och en härdare som måste blandas enligt instruktion innan härdning är möjlig. För att underlätta blandning av bindemedel och pulver så värmdes båda till 65 °C. På detta sätt minskades bindemedlets viskositet markant. Bindemedlet och metallpulvret blandades därefter för hand i ca 30 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåts.

Bindemedelsmängd

15 wt% bindemedel används då detta är standard för MagComps SM²C material.

Härdning

Härdningen av epoxin sker genom termisk aktivering utan någon specifik tröskeltemperatur. Det är alltså möjligt att härda hartsen i rumstemperatur men processen tar då mycket lång tid. Då POM-formar är att föredra vid gjutning av epoxibaserade gjutkroppar så skedde härdningen i 65 °C i ett dygn. Då epoxin inte

innehåller några lösningsmedel och polymeriseras genom en additionsreaktion så bildas inga biprodukter under härdningsprocessen.

Gjutformar

POM-formar användes med fördel då detta underlättade avformningen av gjutkroppen.

Avformning

Avformningen av testkropparna var relativt svår då epoxin ofta band in starkt till gjutformen. Denna bindning till formen var så stark att testkroppen ibland sprack då gjutformen öppnades. Detta problem blev tydligare ju mer formen användes, troligen som en effekt av diverse beläggningar och mikroskador på gjutformen.

Kommentarer

Bindemedlet luktar relativt starkt och ska hanteras i välventilerade utrymmen. Det är tydligt att epoxin lämpar sig mycket väl för att tillverka gjutna detaljer då dessa verkar ha både bra mekaniska egenskaper och bra finish. Observera att ovanstående process användes även vid framtagningen av de testkroppar som användes under permeabilitetstesterna.

7.1.7 Fenolharts PA3589L

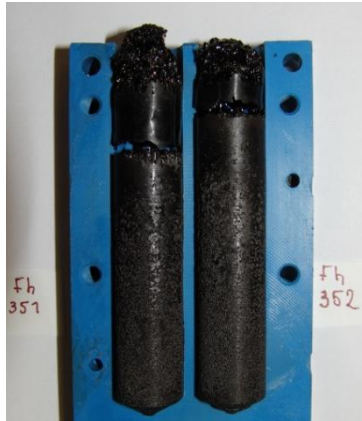
Resolen PA3589L är en relativt högviskös brunfärgad lösningen. För att underlätta blandning av bindemedel och pulver så värmdes båda till 65 °C. På detta sätt minskades bindemedlets viskositet markant. Bindemedlet och metallpulvret blandades därefter för hand i ca 60 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåts.

Bindemedelsmängd

Trots uppvärmningen av både pulver och bindemedel till 65 °C så blev blandningen hållbar först vid ca 17 wt% bindemedel.

Härdning

Härdningen av PA3589L sker genom termisk aktivering utan någon specifik tröskeltemperatur. Härdning kommer alltså ske vid relativt låga temperaturer men kommer då ta mycket lång tid. Vid 130-140 °C så sker härdningen relativt omedelbart (<1 h). Trots bindemedlets låga mängd lösningsmedel så upplevdes mycket stora problem med dess avlägsnande. Initialt så var bindemedlet relativt lättflytande och tillåtande för vattenångstransport men allt eftersom lösningsmedelmängden minskade så blev denna transport svårare och svårare. Till slut kunde den inte ske utan mycket kraftigt bubbelbildning. Detta skedde trots långsamma temperaturstegringar i många timmar och medförde att testkropparna blev mycket porösa, särskilt i deras övre del.



Figur 22: Resultat från härdning av PA3589L.

Gjutformar

Eftersom torkning av provkropparna skedde i över 90 °C så användes stålformar med släppmedel.

Avformning

Avformning av testkroppar var oftast enkelt men i vissa fall så gjorde fenolhartsens relativa sprödhet att testkroppar sprack antingen vid öppnandet av formen eller vid själva avformningen.

Kommentarer

Bindemedlet luktar starkt och måste hanteras i välventilerade utrymmen. Nitrilhandskar ska bäras under hantering då vinylhandskar riskerar att lösas upp vid kontakt med bindemedlet. Som det står teorikapitlet om resoler så är bindemedel inte lämpligt att härda i öppna formar på grund av den oundvikliga bubbelbildningen.

7.1.8 Fenolharts PA5540A

Resolen PA5540A är som PA3589L en brunfärgad lösning men på grund av större mängd lösningsmedel så är viskositeten uppenbart lägre. För att förbättra blandning av bindemedel och pulver så värmdes båda till 65°C. På detta sätt minskades bindemedlets viskositet ytterligare. Bindemedlet och metallpulvret blandades därefter för hand i ca 60 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåts.

Bindemedelsmängd

Trots PA5540A märkbart lägre viskositet i rumstemperatur så blev systemet hållbart vid 16wt% bindemedel, bara en viktprocent lägre än för PA3589L.

Härdning

Härdningsmekanismen är den samma som för PA3589L. PA5540A innehåller som nämnt mer lösningsmedel än PA3589L. Initialt så trodde författaren att detta

skulle medföra en lättare avlägsning under härdningsprocessen. Det visade sig dock att det omvända var sant. Trots den höga lösningsmedelhalten så var bindemedlet ”klibbigt” nog att börja bilda bubblor redan efter att små mängder lösningsmedel avlägsnats. När detta stadium nåtts så var det inte längre möjligt att avlägsna de stora mängder kvarvarande lösningsmedel utan att det resulterade i mycket kraftig bubbelbildning. Detta gav i sin tur upphov till en mycket porös struktur i testkropparnas övre del.



Figur 23: Resultat från härdning av PA5540A.

Gjutformar

Se motsvarande avsnitt under för PA3589L.

Avformning

Se motsvarande avsnitt under för PA3589L.

Kommentarer

Se motsvarande avsnitt under för PA3589L.

7.1.9 Fenolharts PA5803L

Resolen PA5803L är precis som de två föregående fenolhartserna en brunaktig lösning men på grund av mycket höga mängder lösningsmedel så har PA5803L markant lägre viskositet än båda. För att ytterligare underlätta blandning av bindemedel och pulver så värmdes båda till 65 °C. Bindemedlet och metallpulvret blandades därefter för hand i ca 60 sekunder eller till dess att en homogen blandning uppnåtts.

Bindemedelsmängd

På grund av PA5803L låga viskositet även i rumstemperatur så blev systemet hållbart redan vid 10 wt% bindemedel.

Härkning

Härningsmekanismen för PA5803L är precis samma som för de två föregående fenolhartserna. Precis som för PA5540A så visade det sig att bubbelbildning var i princip omöjlig att undvika trots bindemedlets låga viskositet.

På grund av bindemedlets mycket låga viskositet så skedde det flera gånger att relativt stora mängder bindemedel rann ut genom gjutformen under härdningsprocessen. De testkroppar som resulterade från dessa gjutningar uppvisade markant lägre porositet än de testkroppar där bindemedlet stannat kvar i formen under hela härdningsprocessen.



Figur 24: T.v. Resultat från härkning av PA5803L. T.h. Resultat från härkning med läckande gjutform.

Gjutformar

Se motsvarande avsnitt för PA3589L.

Avformning

Se motsvarande avsnitt för PA3589L.

Kommentarer

Se motsvarande för PA3589L.

7.1.10 Fenolharts PA7504G

Detta bindemedel är en novolac och precis som de flesta novolacer så återfinns det i pulverform. Eftersom det inte fanns något att vinna med att värma upp bindemedlet och metallpulvret så blandades de rumstempererade till dess att en homogen blandning uppnåts.

Bindemedelsmängd

Då det inte gick att uppnå en hållbar blandning så undersöktes vilken bindemedelsmängd som gav upphov till högst metallpulverpackning. Det visade sig inte helt förvånande att en låg andel PA7504G gav upphov till en hög

metallpulverpackning. En kompromiss mellan mekanisk styrka och metallpulverpackning resulterade i valet av 3 wt% bindemedel.

Härdning

Härdning av en novolac som PA7504G sker som det står i teorikapitlet genom nedbrytning av HEXA. Nedbrytningen av denna molekyl sker redan vid 130 °C men för att garantera fullständig nedbrytning så härdades blandningen i 150 °C. Vid denna temperatur så sker härdning på mindre än 5 minuter. Genom att härda i 150 °C under en timme så säkerställdes att hela testkroppen genomhärdats. Då inget lösningsmedel skulle avlägsnas samt att härdningsprocessen både producerar och förbrukar liknande mängder vatten så upplevdes inga problem under processen.



Figur 25: Resultat från härdning av PA7504G.

Gjutformar

Eftersom härdning skedde i 150 °C så användes stålformar, dock utan släppmedel.

Avformning

Avformning skedde genom att testkropparna pressades ur formen i testkroppens längdriktning. På grund av den relativt låga mekaniska styrkan och den höga vidhäftningen i gjutformerna så bröts testkroppar ibland sönder under avformning.

Kommentarer

Till skillnad från resolerna så frigörs bara mindre mängder flyktiga ämnen under härdningsprocessen. Detta betyder att behovet av ventilation blir mindre. PA7504G tenderar dock att damma kraftigt i sin rena form och andningsskydd bör därför alltid bäras under hantering.

7.2 Testmetoder

Dessa testmetoder är särskilt framtagna för att undersöka testkropparnas lämplighet som ett SM²C-material.

7.2.1 Pulverpackningstäthet

Mätningar av pulverpackningstätheten ger ett snabbt sätt att bedöma och jämföra ett bindemedel då en hög pulverpackning är nödvändig i ett SM²C-material.

Följande antagande görs i denna metod att beräkna pulverpackningstätheten:

- *Inget pulver avlägsnas under tork/härtningsprocessen.*
- *När eventuellt överskottsbindemedel avlägsnas så medföljer inget pulver.*
- *Pulvret är jämnt fördelat i provkroppen.*

Pulverpackningstätheten beräknas enligt följande:

1. *Vikten av metallpulvret i gjutformen noteras. Då viktförhållandet mellan metallpulvret och bindemedlet är känt så kan eventuella förluster i blandningsbehållaren lätt kompenseras för.*
2. *Överskottsbindemedel avlägsnas efter härdning/torkningsprocess.*
3. *Volymen av den resterande testkroppen mäts. I de fall där testkroppen är porös så görs detta med hjälp av skjutmått i annat fall så sker det med fördel genom nedsänkning i vatten.*
4. *Beräkna därefter ρ_{pulver} :*

$$\rho_{pulver} = \frac{m_{pulver}}{V_{testkropp}}$$

5. *Pulverpackningstätheten beräknas därefter med m.h.a. följande ekvation:*

$$\text{Pulverpackningstäthet [\%]} = \frac{\rho_{pulver}}{\rho_{solid}}$$

ρ_{solid} är en uppskattning av densiteten hos en tänkt homogen kropp med samma materialfördelning som metallpulvret.

$$\begin{aligned}\rho_{solid} &= \text{andel}_{\text{järn}} \cdot \rho_{\text{järn}} + \text{andel}_{\text{kisel}} \cdot \rho_{\text{kisel}} \\ &= 0.94 \cdot 7.874 + 0.06 \cdot 2.330 = 7.54 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

7.2.2 Mekanisk hållfasthet¹⁴²

Vid mätning av mekanisk styrka hos spröda material så lämpar sig inte det vanliga dragtestet, istället rekommenderas det så kallade 3-punktsböjtestet. Eftersom materialen i denna underökning är spröda så används därför denna metod. Fördelar med detta test är att de gjutna testkropparna kan användas utan någon extra bearbetning samt att själva testet är lätt och snabbt att genomföra. En nackdel med testet är att det är känsligt för lastgeometrin samt töjningshastigheten.



Figur 26: 3-punktsböjtest. På bilden ses de två stöden och den höj- och sänkbara "kraftappliceraren".

För provkroppar med cirkulära tvärsnitt ges den maximala spänningen av:

$$\sigma = \frac{3FL}{\pi R^3}$$

Där F är totala kraften vid brott, L längden mellan stöden och R är radien av testkroppen.

Förutom den maximala spänningen så beräknas även elasticitetsmodulen av den tillhörande mjukvaran. Uppställning kontrolleras inför varje mätning genom mätning på en detalj med kända mekaniska egenskaper.

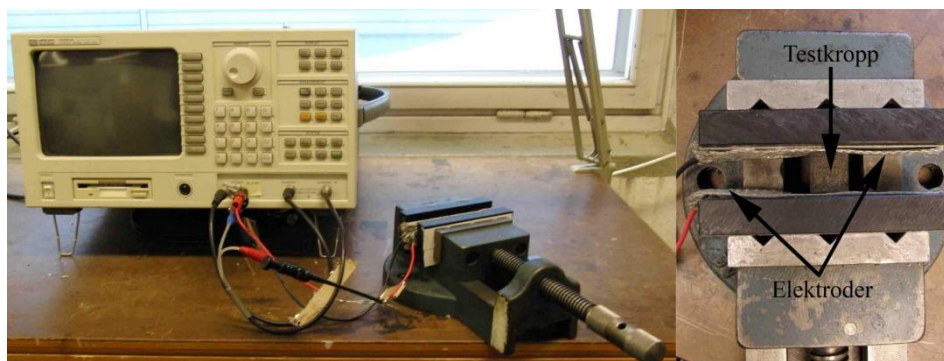
¹⁴² (Askeland, D.R.,2004) sida 162

7.2.3 Dielektriska mätningar

Dielektriska egenskaper undersöks med hjälp av två olika uppställningar. Den första uppställningen mäter frekvensberoende egenskaper som impedans samt fasvridning, dvs. vinkeln mellan ström och spänning. Den andra uppställningen mäter bland annat elektrisk resistivitet och spänning vid elektriskt genombrott. Båda uppställningarna kontrolleras inför varje mätning genom att mätning på en kondensator respektive en resistor med kända egenskaper.

7.2.3.1 Dielektrisk förlust

Observera att det inte är fastställt att dielektriska förluster är av betydelse i normala SM²C-applikationer.



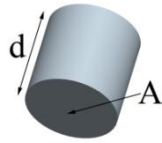
Figur 27: Utrustning för mätning av dielektrisk förlust. I detaljbilden till höger illustreras hur testkroppen hålls på plats under mätningen.

Mätningar av impedans och fasvridning utförs vid 1 kHz och 20 kHz. Valet av dessa frekvenser beror på att de är representativa för förhållandena i två kända tillämpningar: motor/generator respektive induktionsvärmning.

Impedans är växelströmmens motsvarighet till elektrisk resistans. Den frekvensberoende storheten kännetecknas av sitt belopp $|Z|$ och sin fasvridning $\varphi = \arg(Z)$. Fasvridningen beskriver fasskillnaden mellan ström och spänning. En fasvridning på 0° motsvarar en ideal resistor medan -90° motsvarar en ideal kondensator.¹⁴³

Genom att anta att testkroppen fungerar som ett dielektrikum mellan de båda elektroderna så kan systemet modeleras som en plattkondensator med arean A och längden d (se figur 27, 28).

¹⁴³ (Carlson, P., 2002) sida 392,393



Figur 28: Skiss av testkroppen som används för att undersöka dielektrisk förlust.

När väl impedans och fasvridning är bestämda används dessa för att beräkna materialparametern permittivitet. Permittivitet är en fysikalisk storhet som beskriver hur mycket det elektriskt isolerande materialet (dielektrikum) polariseras som en effekt av det verkande elektriska fältet.

Permittiviteten beräknas på följande sätt¹⁴⁴.

Antag den komplexa impedansen $Z = X + iY$. Sambandet mellan spänning (U) och kapacitans (C) kan uttryckas på följande vis:

$$U(t) = \frac{1}{C} \int I(t) dt$$

Definiera nu komplex kapacitans, i det komplexa talplanet ges då att: $U_{topp} = \frac{I_{topp}}{i\omega \cdot C}$. Ohms lag, $Z = \frac{U_{topp}}{I_{topp}}$ ger i sin tur att:

$$X + iY = \frac{1}{i\omega \cdot C}$$

där kapacitansen C har en realdel C_{re} och en imaginärdel C_{im} dvs. $C = C_{re} + iC_{im}$. Den okända kapacitansen C identifieras sedan enligt:

$$C = \frac{1}{i\omega \cdot (X + iY)}$$

Genom att därefter multiplicera det komplexa uttrycket för C med d/A erhålls den komplexa permittiviteten ε :

$$\varepsilon = \varepsilon_{re} + \varepsilon_{im}$$

Den imaginära delen av ε beskriver energiförlusten när en växelström passerar genom dielektrikumet medan den reella delen beskriver mängden energi som lagras i materialet.¹⁴⁵

Beloppet av ε dvs. $|\varepsilon|$ är materialparametern permittivitet och $\arg(\varepsilon)$ motsvara förlustvinkeln. Enligt ovanstående beskrivning av komplex permittivitet så leder en stor förlustvinkel till stora förluster då ε då till stor del är imaginär.

¹⁴⁴ (Cedell, T., 2011) Personkontakt

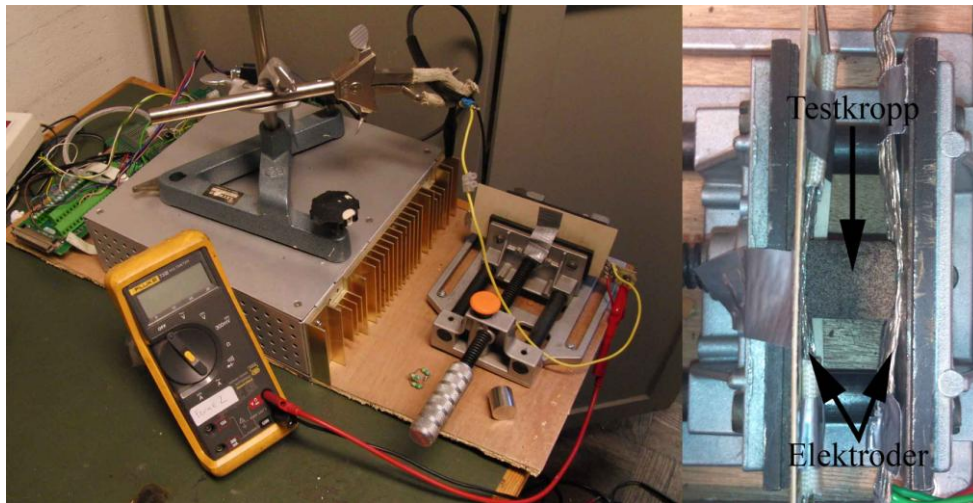
¹⁴⁵ (Wikipedia, 2011) Permittivity

Permittiviteten som redovisas i detta examensarbete är den så kallade relativa permittiviteten (ϵ_r), vilken beräknas på följande vis:

$$\epsilon_r = \frac{|\epsilon|}{\epsilon_0}$$

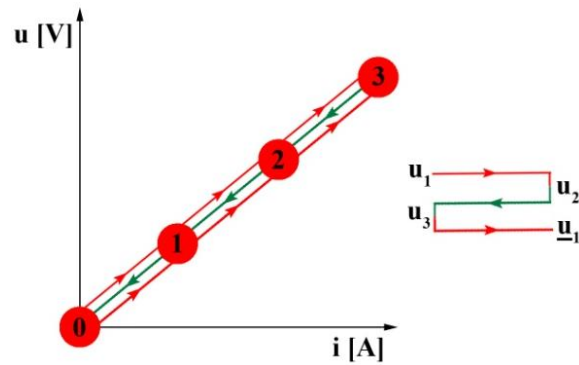
där $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ är permittiviteten för vakuum.

7.2.3.2 Dielektriskt genombrott



Figur 29: Utrustning för mätning av dielektriska storheter vid likspänning. I detaljbilden till höger illustreras hur testkroppen hålls på plats under mätningen.

Denna uppställning är framtagen för att mäta vilken likspänning ett visst material kan utsättas för innan det sker ett så kallat dielektriskt genombrott. Vid dielektriskt genombrott ändras materialets dielektriska egenskaper kraftigt, troligen på grund av bryggbildningar i materialet. Reaktionen är irreversibel och gör att vidare elektriska mätningar ej är lämpliga. Denna mätning utfördes därför efter mätningar av dielektrisk förlust.



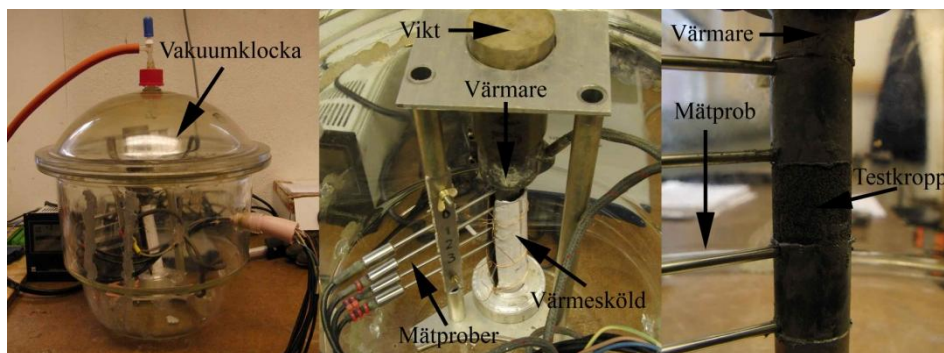
Figur 30: Princip för mätning av dielektriskt genombrott. Inget dielektriskt genombrott har skett så länge som $u_1 \approx u_3$.

Förutom att registrera de dielektriska storheterna precis innan det dielektriska genombrottet så registreras även resistiviteten i det så kallade linjära området. Med det linjära området menas det område där resistiviteten är oberoende av spänningen. Detta är inte samma för samtliga material men infaller normalt i området 0-70 V. För att inte tvingas manuellt notera värdet för varje enskild mätning så lagras resistansen automatiskt vid 30 V.

7.2.4 Termisk ledningsförmåga

Termisk ledningsförmåga eller värmeledningsförmåga som ofta representeras med ett k eller λ är ett mått på hur väl värme transporteras genom ett material. Enheten för termiska ledningsförmågan är $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$.¹⁴⁶

Det finns flera sätt att mäta den termiska ledningsförmågan. Metoden som används i detta examensarbete är en jämförande metod som kallas ”delade stångmetoden”. Fördelen med denna metod är att den termiska ledningsförmågan kan bestämmas genom mätning på ett enda prov. Nackdelen är att metoden är relativt långsam, uppemot två timmar behövs för varje mätning.



Figur 31: Uppställning för mätning av termisk ledningsförmåga. T.v. Bild på hela mätuppställningen. Mitten. Bild på värmare, temperaturgivare och värmesköld. T.h. Den delade staven med testkroppen centralt placerad.

Metoden bygger på att värmeflöden längs den delade stången är konstant så länge som det inte sker några andra förluster i form av strålning och konvektion. För att minska effekten av konvektion placeras mätuppställningen i en vakuumklocka och för att minska strålningsförlusten så placeras en tunn värmesköld av aluminiumfolie kring den delade stången.

När värmaren i övre delen av uppställningen startas så värms den delade staven långsamt till dess att jämvikt uppnåtts. Med hjälp av de fyra temperaturgivarna kan därefter testkroppens termiska ledningsförmåga beräknas.

¹⁴⁶ (Benson, H., 1996) sida 392

7.2.5 Magnetisk permeabilitet

Magnetisk permeabilitet är mått på ett materials förmåga att bilda magnetiska fält, det vill säga hur mycket ett material magnetiseras då det utsätts för ett magnetfält. Permeabilitet representeras ofta med tecknet μ och har enheten $H \cdot m^{-1}$. Enheten kopplar ihop magnetisk fältstyrka H och magnetisk flödestäthet B enligt:¹⁴⁷

$$B = \mu H$$

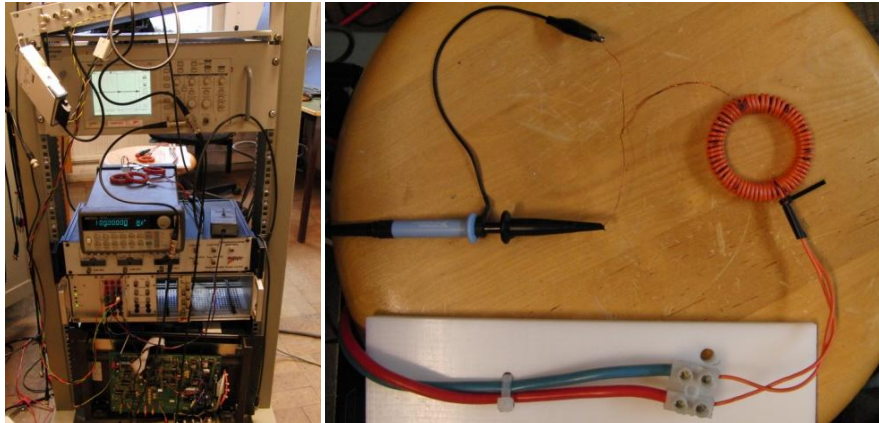


Figur 32: Toroidformad testkropp lindad med exciteringslindning (orange) och "pick-up-lindning" (kopparfärgad).

För att kunna bestämma μ så är det därför nödvändigt att känna storleken på det magnetiska fält som verkar på materialet. Detta åstadkommes genom att testkroppen lindas med en elektrisk ledare och på det sätt skapa en elektromagnet. När en ström flödar genom denna ledare induceras ett känt magnetiserande fält. För att mäta den magnetiska flödestätheten som detta magnetiserande fält ger upphov till lindas ytterligare en så kallad "pick-up" ledare kring testkroppen. Det skapade magnetiserande fältet kommer att inducera en mätbar spänning i denna pick-upledare.

Eftersom testkroppens förmåga att magnetiseras påverkar storleken på det inducerade magnetfältet så kan storleken på ström och inducerad spänning relateras till bland annat materialets permeabilitet och eventuella effektförluster i transformeringen.

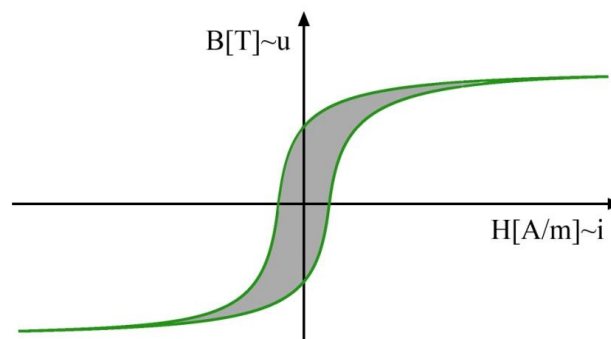
¹⁴⁷ (Wikipedia, 2011) Permeability



Figur 33: Uppställning för mätning magnetiska egenskaper.

För att underlätta jämförelse mellan olika material så är det vanligt att ange relativ permeabilitet μ_r istället för μ . Relativ permeabilitet är inget annat än kvoten mellan μ och μ_0 där μ_0 är permeabiliteten för ett tomrum. Att linda ett material som plast som inte är magnetiserbart bör därmed enligt ovanstående beskrivning ge den relativa permeabiliteten 1.¹⁴⁸

Genom att plotta den magnetiska hystereskurvan så kan effektförlusten beräknas genom att multiplicera den omslutna arean (grå) med matarfrekvensen (se nedanstående figur).



Figur 34: Exempel på en hystereskurva.

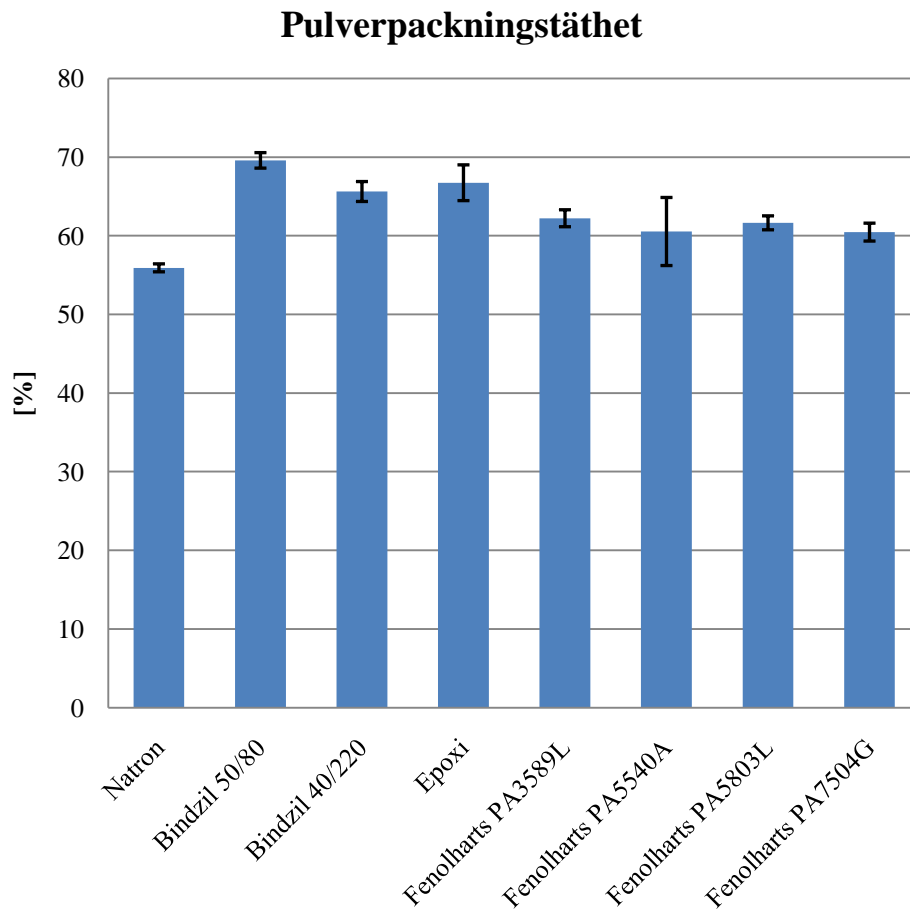
Innan varje mätsession kontrollerades utrustningen genom mätningar på en testkropp med känd permeabilitet och förlust (plastkropp).

¹⁴⁸ (Wikipedia, 2011) Permeability

8 Resultat

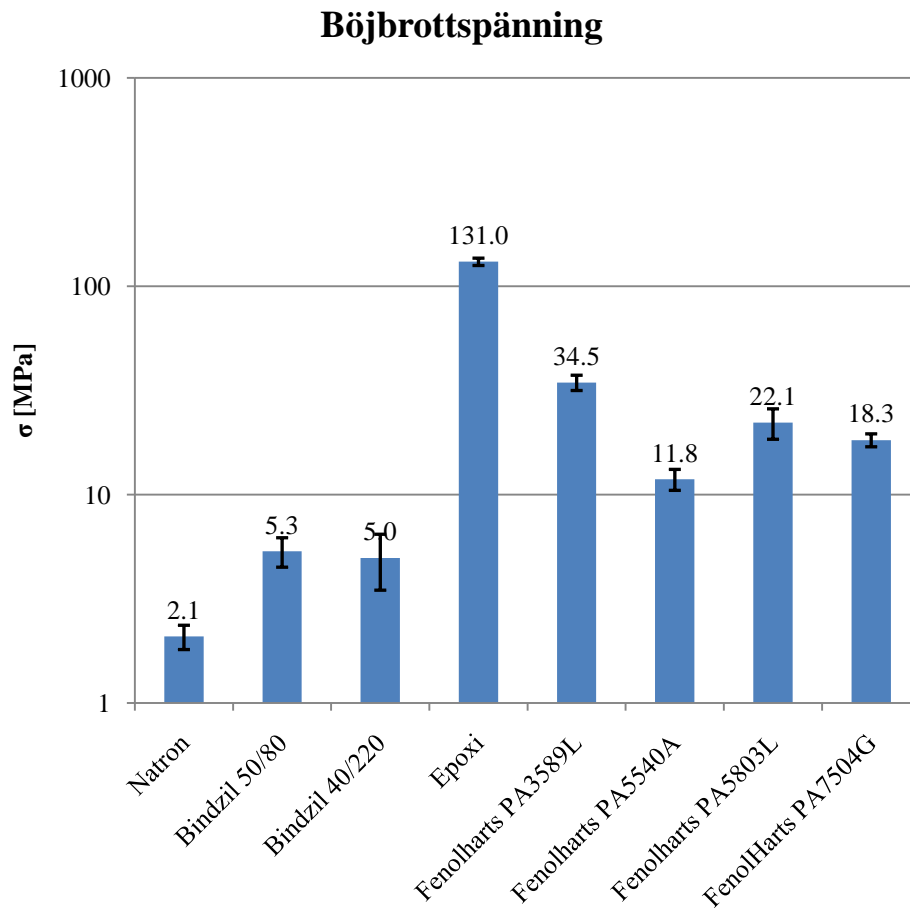
I detta kapitel redovisas resultaten som erhållits m.h.a. de tester som beskrivits i föregående kapitel. En mer djupgående analys av resultatet återfinns i kapitlet Resultatanalys. Resultat från ytterligare under finns att hitta i bilagorna.

8.1 Pulverpackningstäthet



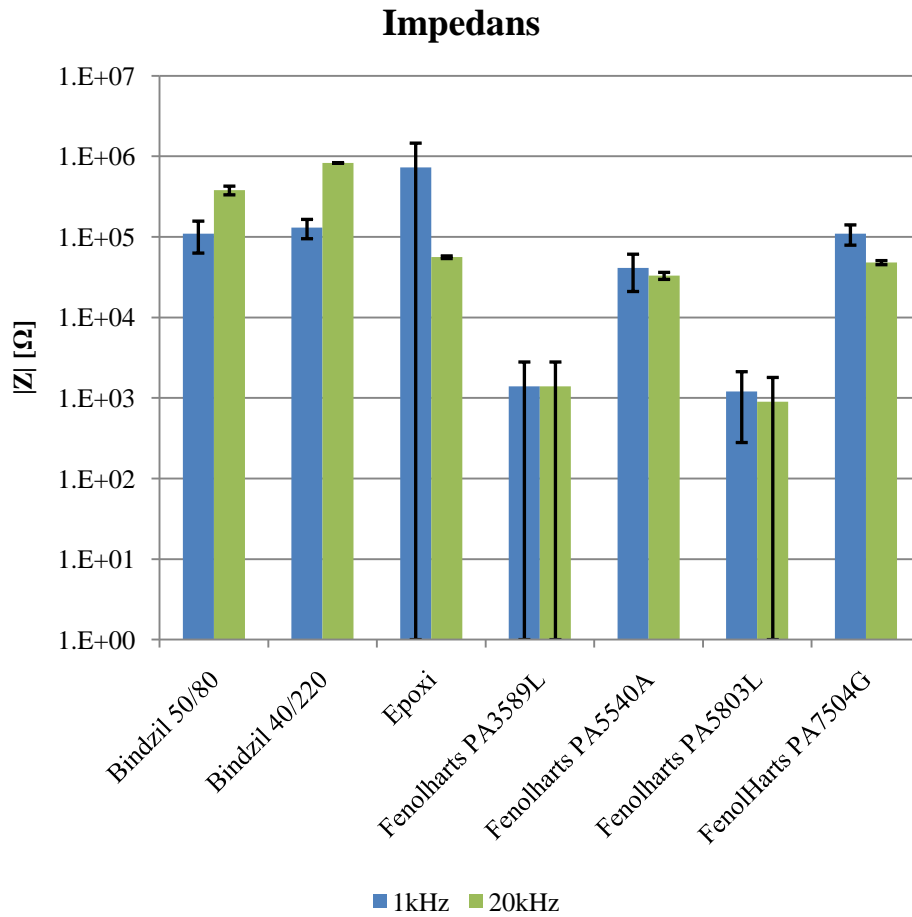
Figur 35: Värdena motsvarar pulverpackningstätheten i % dvs. pulverinnehållet i förhållande till en solid av samma material. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

8.2 Mekanisk hållfasthet



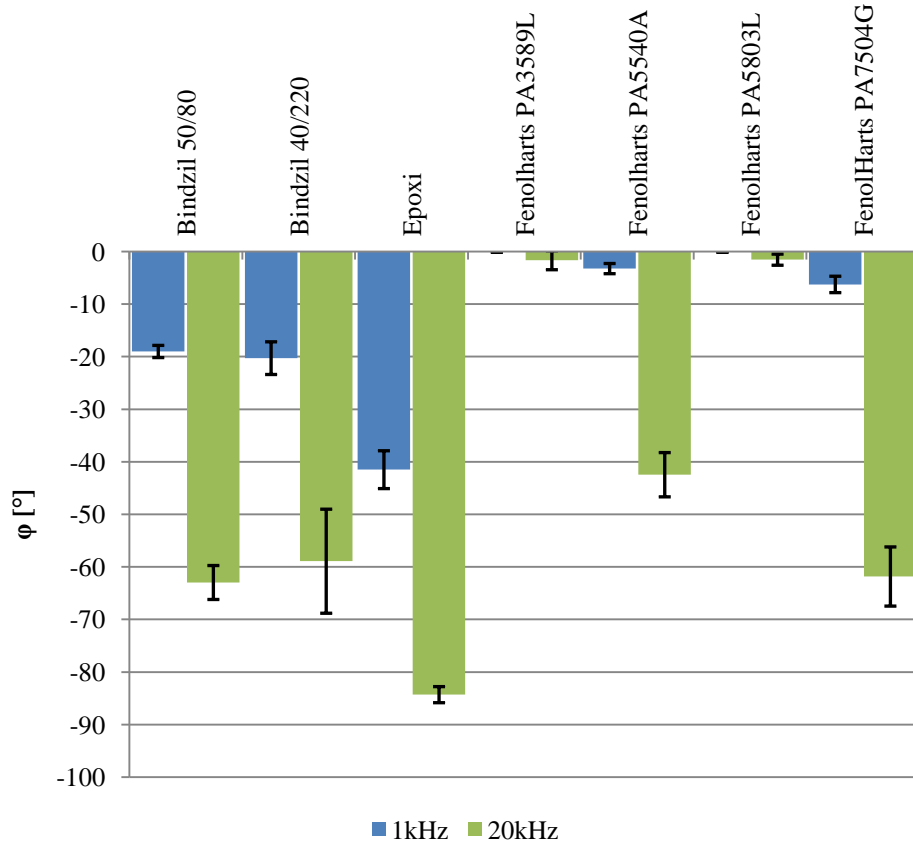
Figur 36: Värdena motsvarar böjbrottspänning för respektive bindemedelsmaterial. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

8.3 Dielektrisk förlust



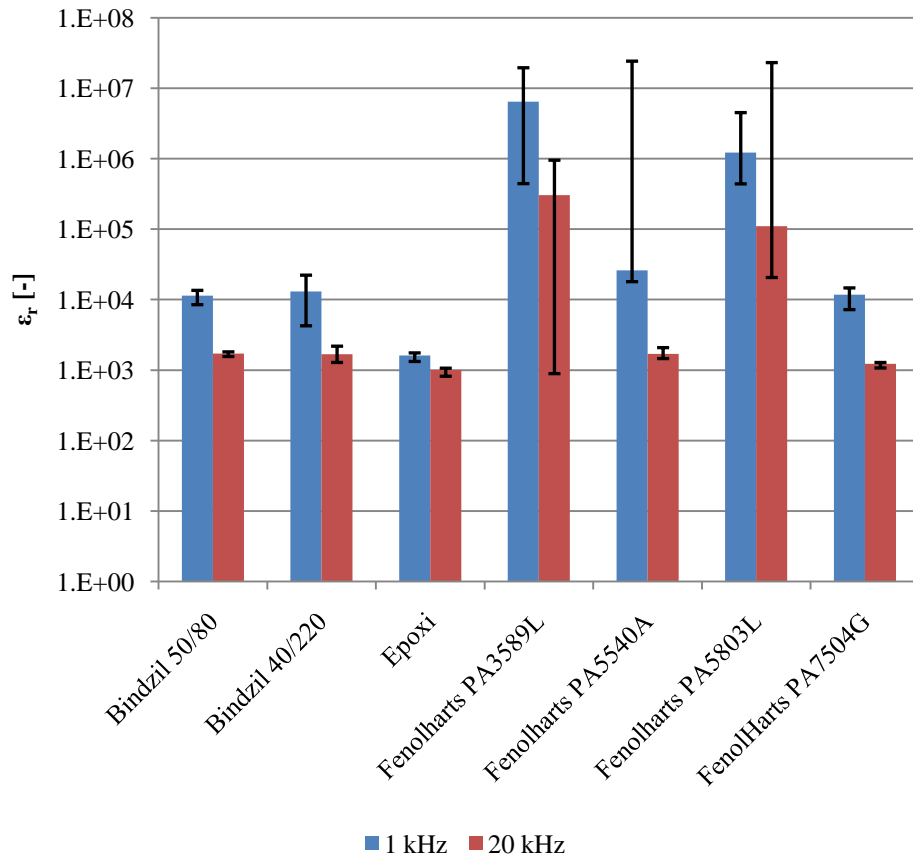
Figur 37: Impedans från mätningar i 1 kHz respektive 20 kHz. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

Fasvridning



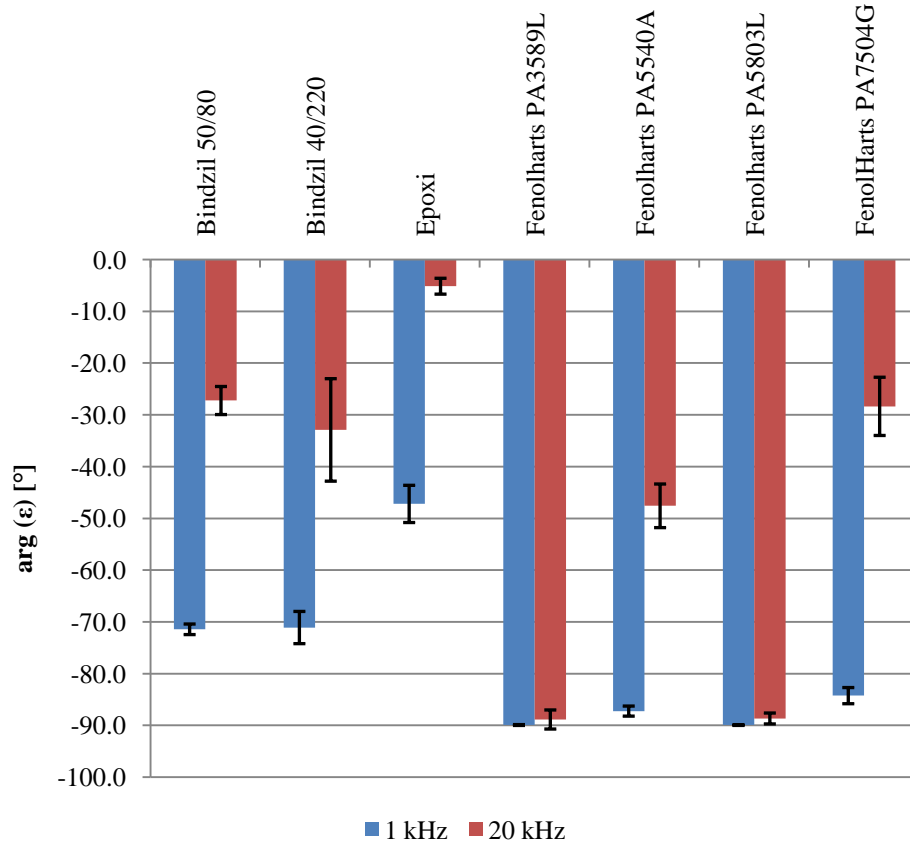
Figur 38: Fasvridning från mätningar i 1 kHz respektive 20 kHz. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

Relativ permittivitet



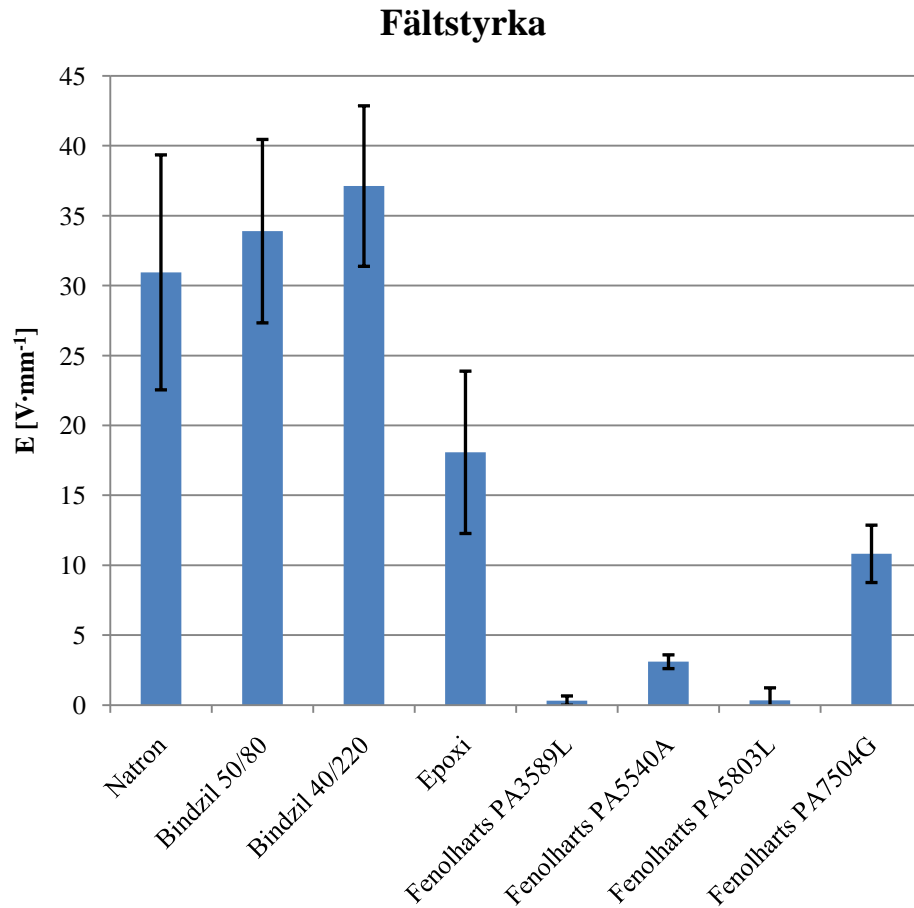
Figur 39: Beräknad relativ permittivitet för 1 kHz respektive 20 kHz. För ytterligare information om resultaten se bilagorna.

Förlustvinkel



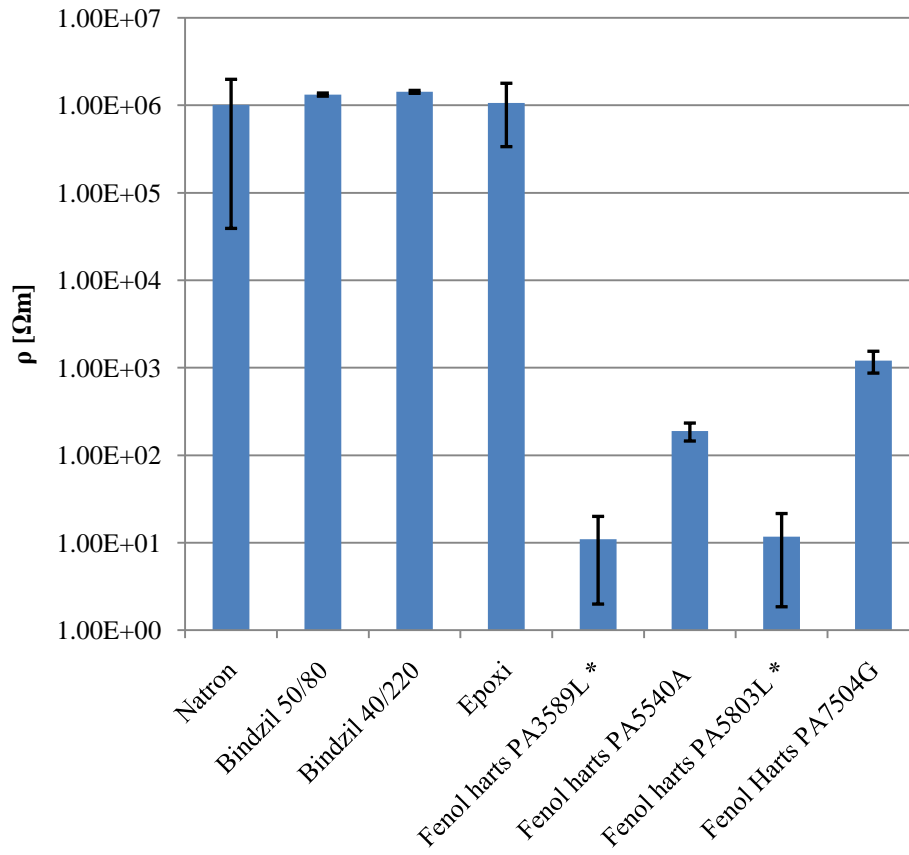
Figur 40: Beräknad förlustvinkel ($\arg(\epsilon)$) för 1 kHz respektive 20 kHz. För ytterligare information om resultaten se bilagorna.

8.4 Dielektriskt genombrott



Figur 41: Uppmätt högsta fältstyrkan materialet kan utsättas för utan att ett genombrott sker. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

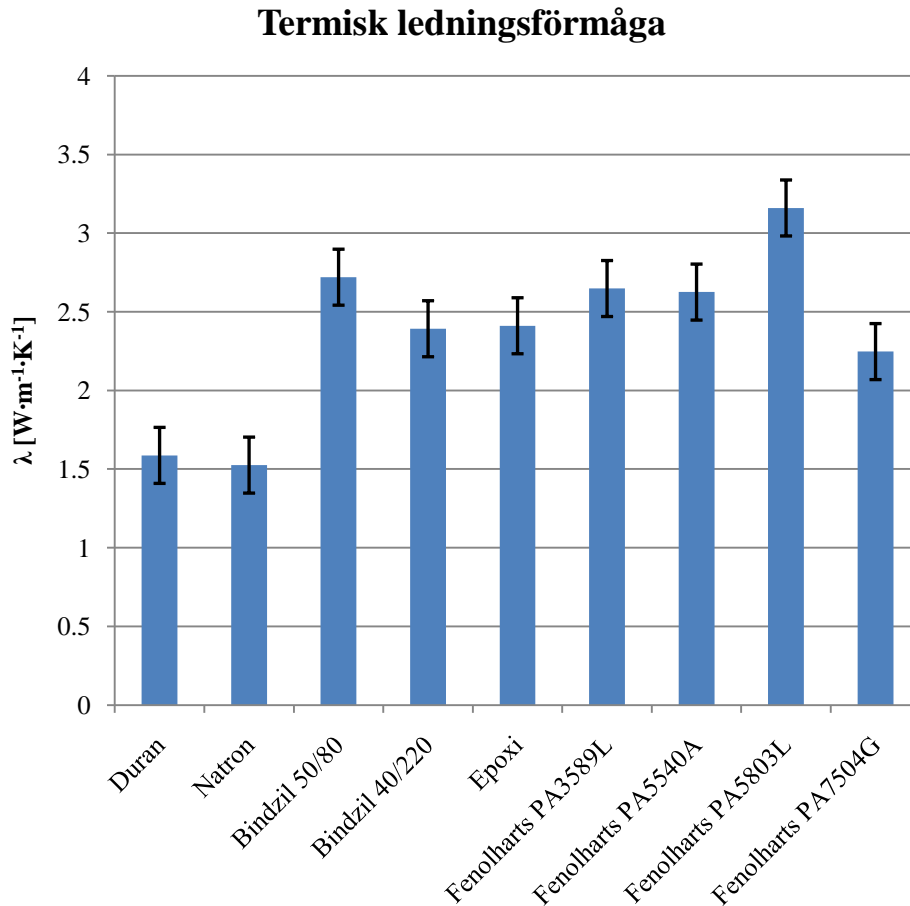
Resistivitet



Figur 42: Resistiviteten i det så kallade linjära området. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

* Strömlarmet (10 mA) aktiverades innan 30 V som definierats som linjärt område uppnåddes, värdena som redovisas är från detta strömlarm.

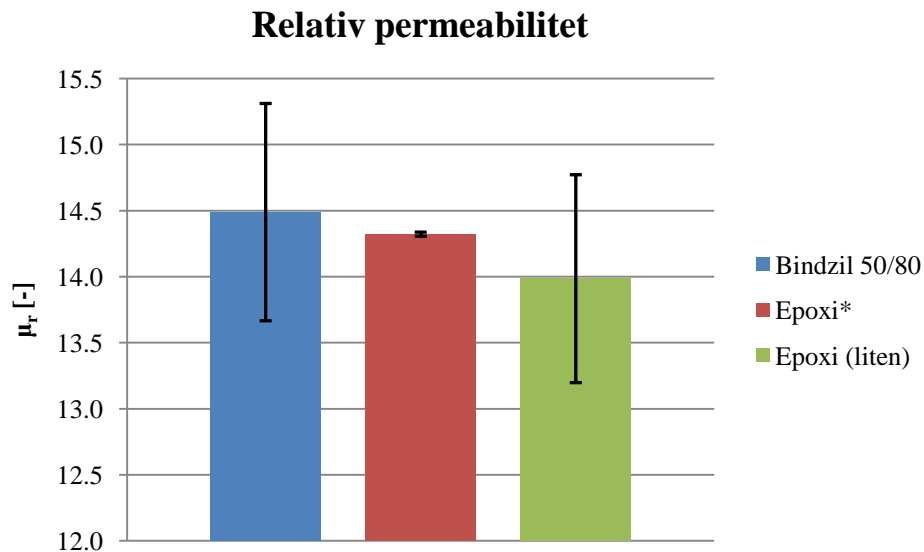
8.5 Termisk ledningsförmåga



Figur 43: Termisk ledningsförmåga för respektive testkroppsmaterial. Observera att endast en mätning på varje material är utförd. För att ändå få en uppfattning av en möjlig standardavvikelse så används standardavvikelsen från Duran för samtliga testkroppar. Standardavvikelserna i figuren bör därför endast ses som uppskattningar av de verkliga standardavvikelserna. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

8.6 Magnetisk permeabilitet

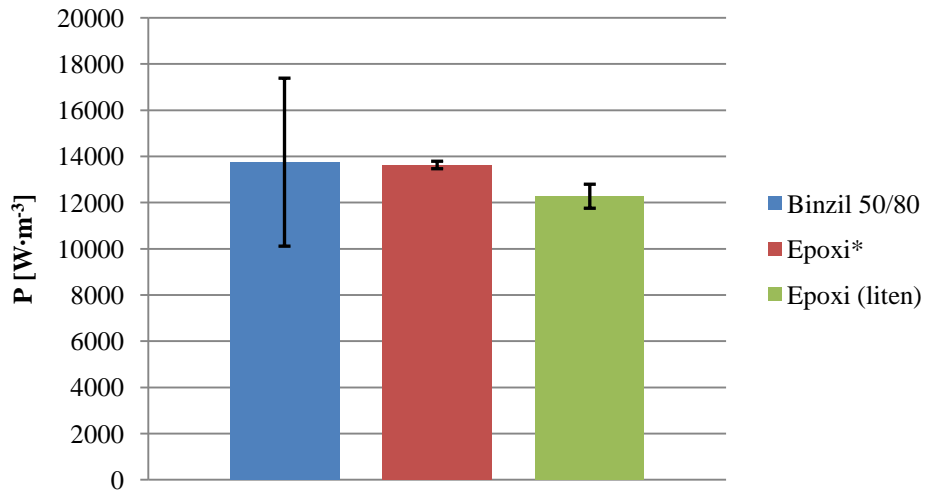
På grund av resultat från de andra testerna så bestämde författaren tillsammans med handledaren att permeabilitetsmätningar endast skulle utföras på testkroppar baserade på Bindzil 50/80. Anledning till att Bindzil 50/80 valdes ut är att det presterat bäst i de tidigare testerna. För att kunna utvärdera resultatet så tillverkades även lämpliga testkroppar baserade på epoxi. Samtliga mätningar utfördes med matarfrekvensen 2 kHz.



Figur 44: Den relativa permeabiliteten i respektive testkroppsmaterial. Observera att en liten testkropp används i ena fallet, detta ska dock inte påverka resultatet. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

** Samtliga mätningarna gjordes på en och samma testkropp vilket är orsaken till testkroppens mycket lilla standardavvikelse.*

Effektförlust



Figur 45: Effektförlusten i respektive testkroppsmaterial. Observera att testkroppen är mindre i ena fallet vilket dock inte ska påverka resultatet. För ytterligare information om testresultaten se bilagorna.

* Samtliga mätningarna gjordes på en och samma testkropp vilket är orsaken till testkroppens mycket lilla standardavvikelse.

9 Resultatanalys

Resultatanalysen avser de testresultat som redovisats i föregående kapitel. Kapitlet inleds med en allmän analys av de olika testmetoderna och deras tillförlitlighet. Därefter avslutas kapitlet med en analys av testresultaten.

9.1 Tillförlitlighet i tester

9.1.1 Pulverpackningstäthet

Tillförlitligheten i detta test är till stor del en funktion av hur korrekt volymmätningen av testkroppen blir. För icke porösa testkroppar, som de baserade på bindemedlet epoxi, går denna mätning att göra mycket exakt. För porösa material finns det dock en viss risk att den beräknade volymen inte är helt korrekt.

För att undersöka hur stort denna felkälla är utfördes därför ett mindre test. Detta test gick till så att volymen av en porös testkropp först bestämdes med hjälp av ett skjutmått (metoden vanligen använd för porösa kroppar). Därefter spraymålades testkroppen så att eventuella porer täpptes till. Därpå mättes volymen av testkroppen genom att den sänktes ner i ett vattenbad (metoden normalt använd för icke porösa kroppar). För att säkerställa att testkroppen verkligen var tät så vägdes den före och efter volymmätningen.

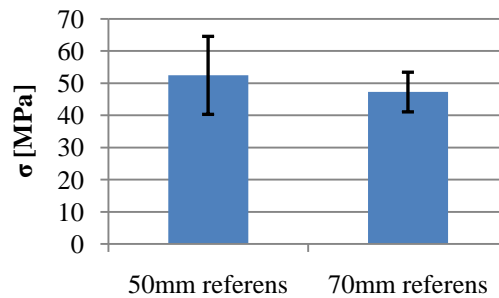
Testet visade att metoden för att mäta volymen av porösa testkroppar i detta fall överskattade volymen med nästan exakt 0.5 cm^3 . Detta motsvarar ungefär 2,5 vol% för en normalstor testkropp. Om detta resultat antas gälla för samtliga porösa testkroppar så underskattar denna teknik pulverpackningstätheten med ungefär 2 % vid en uppmätt pulverpackningstäthet på 70 %.

Vid mätningen av pulverpackningstätheten av fenolhartserna av resolutyp så finns det ytterligare än felkälla. På grund av den kraftiga bubbelbildningen som sker under härdningen är antagandet att inget metallpulver avlägsnas under härdning eller bearbetning sannolikt inte korrekt. Detta får effekten att resolernas pulverpackningstäthet överskattas. Hur stor denna överskattning är, är svårt att uppskatta.

Till de porösa testkropparna räknas de baserade på bindemedlen: Bindzil, Natron och fenolharts.

9.1.2 Mekanisk hållfasthet

Initialt var det tänkt att samtliga testkroppar skulle testas med samma inställningar på mätutrustningen. Tyvärr visade sig detta inte möjligt då vissa testkroppar på grund av diverse faktorer inte kunde tillverkas i planerad längd. Vissa material testades därför med något kortare avstånd mellan stöden i uppställningen (50 mm mot 70 mm). För att säkerställa att detta inte påverkade resultatet så gjordes mätningar på en referens av plast.



Figur 46: Resultatet från mätningar på samma referensbit med 50 mm respektive 70 mm mellan stöden. Resultaten baseras på tre mätningar för varje längd.

Som ovanstående figur visar så föreligger det en viss tendens till att tester som utförts med det kortare stödavståndet ger upphov till något högre spänningsvärden.

Testresultaten antas dock vara tillräckligt bra för att utvärdera den mekaniska hållfastheten i de olika testkropparna.

9.1.3 Dielektrisk förlust

Kontrollmätningar på en kondensator med kända egenskaper visade på relativt hög noggrannhet. Både värden för fasvridning och impedans antas därför vara tillräckligt bra för den utvärdering som görs i detta examensarbete.

De beräknade värdena av relativ permittivitet är mycket höga, värden under 100 hade varit mer rimliga, inga uppenbara fel har dock identifierats i varken mätningarna eller beräkningarna. Författaren har därför ändå valt att redovisa värdena i detta examensarbete.

9.1.4 Dielektriskt genombrott

Eftersom testkroppen förstörs under testets gång så var det inte möjligt att undersöka testets repeterbarhet. På grund av testets konstruktion är det så att osäkerheten i resultatet ökar med spänningen, vilket tydligt avspeglar sig i resultatet. Anledning till detta är att ökningen av den pålagda spänningen skedde i diskreta steg enligt:

$$\text{Tidigare spänning} \cdot 2^{1/4} = \text{Ny spänning}$$

Skillnaden mellan varje steg ökar alltså exponentiellt, vilket medför att spänningen för genombrott rent tekniskt kan underskattas med nästa ett helt spänningssteg. Någon liknande överskattningen av genombrottsspänningen sker inte.

9.1.5 Termisk ledningsförmåga

På grund av tidsbrist så utfördes endast ett test av termisk ledningsförmåga på varje testkroppsmaterial. Standardavvikelse för ett visst bindemedel finns därför inte att tillgå. För att ändå få en viss uppfattning om repeterbarheten i testet så användes standardavvikelsen från tester på Duran (glas). Den standardavvikelse som används i resultatredovisningen ger därför som bäst en uppfattning om tänkbar spridning av flera tester på testkropparna.

Trots flera försök med att kalibrera uppställningen så uppvisade den hela tiden ett visst mätfel. I områden $\lambda \approx 0-10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ så överskattades till exempel alltid den termiska ledningsförmågan.

Tabell 17: Resultat från mätningar på testkroppar (20 mm).

Material	Tabell λ	Uppmätt λ
Duran	1.2	1.59
Titan (Ti-6Al-4V)	6.70	9.57

I båda ovanstående fall så föreligger ett mätfel på över 30 %. Uppställningen visade sig också känslig för längden på testkroppen. Resultaten från mätningarna av termisk ledningsförmåga bör därför endast ses som fingervisningar och inte som absoluta sanningar.

9.1.6 Magnetisk permeabilitet

Uppställningen för mätning av magnetisk permeabilitet och effektförlust kalibrerades genom mätningar på en spole med en ickemagnetiserbar kärna. Dessa mätningar resulterade i samtliga fall i en relativ permeabilitet mycket nära ett och en mycket låg effektförlust. Detta betyder att de uppmätta värdena av relativ permeabilitet och effektförlusten sannolikt ligger mycket nära det verkliga värdet.

Initiala tester ledde till att författaren trodde att det förelåg ett skalningsfel i programvaran som användes under mätningarna. För att undersöka detta så tillverkades testkroppar baserade på epoxi i två storlekar. Tyvärr så lyckades inte samma pulverpackning uppnås i både storlekarna. Frågan om det förelåg något skalningsfel kunde därför inte klargöras genom dessa tester. Vidare undersökning av äldre testresultat talar dock för att de uppmätta värdena verkligen är korrekta.

9.2 Pulverpackningstäthet

Testresultaten visar tydligt att de testkroppar som baseras på Bindzil och epoxi uppnår högre pulverpackningstäthet än de resterande bindemedlen. Anledningen till detta är troligen en kombination av bindemedlens mycket låga viskositet. Samt det oproblematiska sättet med vilket lösningsmedlet kan avlägsnas. Eller som i fallet med epoxi helt avsaknaden av lösningsmedel.

Det går också att avläsa att novolacen PA7504G uppnår nästan 5 % högre packningstäthet än Natron. Inte helt oväntat så är det därmed lättare att packa ett torrt pulver än ett något fuktigt.

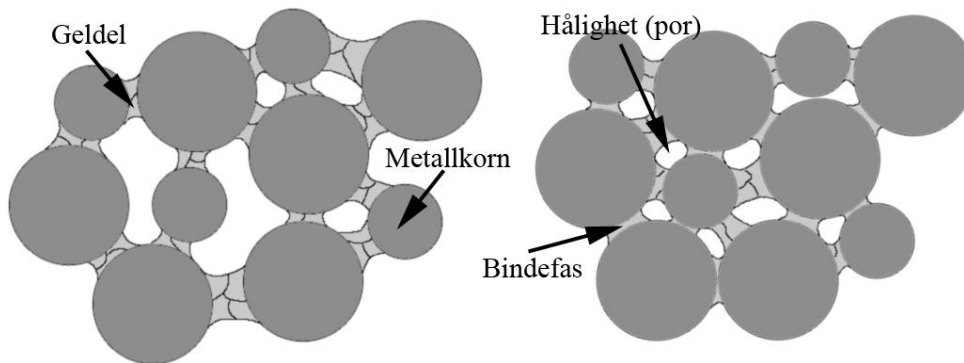
Anledningen till resolernas dåliga resultat är sannolikt en effekt av den kraftiga bubbelbildningen som skedde under härdningsprocessen. Denna bubbelbildning gav upphov till områden med mycket hög porositet.

9.3 Mekanisk hållfasthet

Resultaten visar tydligt att de polymerbaserade bindemedlen gav upphov till markant starkare testkroppar än de kerambaserade.

Särskilt tydligt är detta i fallet med de epoxibaserade testkropparna. Det sämre resultat som fenolhartsen uppvisar beror troligen på en kombination av testkropparnas porositet och bindemedlets naturliga sprödhet.

Skillnaden mellan de keramiska bindemedlen är troligen mer en effekt av att pulverpackningstäthet än styrkan i bindemedelfasen. Trots att den torra gelen kan uppfattas som homogen så är den egentligen uppbyggd av sammankopplade ”geldelar”. Bindningen mellan dessa delar är svagare än inom en sådan geldel. Högre pulverpackningstäthet borde resultera i att mindre samlingar geldelar bygger upp bindefasen mellan metallkornen. Detta resulterar i färre svaga bindningar i bindefasen och därmed högre bindningsstyrka i testkroppen. Då metallpartiklarna kommer närmare varandra så ökar också möjligheterna att binda till närliggande metallpartiklar, något som också bör leda till högre hållfasthet.



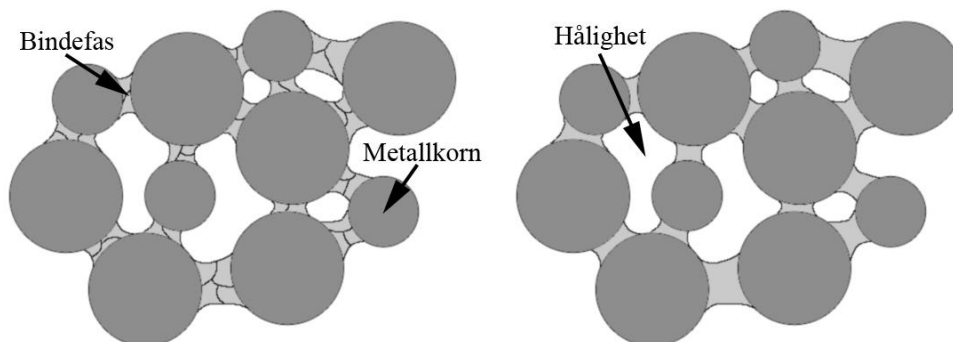
Figur 47: T.v. Bindefas uppbyggd av många små delar. T.h. Bindefas uppbyggd av färre sammankopplade delar på grund av högre pulverpackningstäthet.

Tester som utförts på Bindzil som efter torkning sintrats i 800 °C visar på en viss ökning av mekanisk styrka.

Tabell 18: Resultat från härdning av Bindzil genom torkning respektive sintring.

Bindemedel	Efter torkning [MPa]	Efter sintring [MPa]
Bindzil 50/80	5.3	8.02
Bindzil 40/220	5.0	8.29

Ökningen i mekanisk styrka efter sintringen är troligen en effekt av både fler bindningar inom den torra gelen och mellan gelen och metallpulvret.



Figur 48: T.v. Bindefas innan sintring. T.h. Bindefas efter sintring.

Från författarens egna erfarenheter så kan testkroppar med mekanisk styrka under ~10 MPa relativt lätt brytas av med handkraft. Det är dock möjligt att 10 MPa ändå är tillräcklig för vissa obelastade applikationer.

9.4 Dielektrisk förlust

Resultatet från av mätningarna av impedans och fasvridning visar tydligt att epoxi uppvisar högst impedans samt att denna till stor del är av reaktiv natur. Särskilt tydligt är detta i resultatet från mätningarna utförda vid 20 kHz, då epoxi uppvisar en fasvridning på hela -84° . Även de båda Bindzil bindemedlen samt fenolhartsen PA7504G uppvisar hög impedans, i dessa fall är större del dock av resistiv natur.

När det kommer till resultaten från beräkningarna av relativ permittivitet så uppvisar epoxin lägst värde. Fenolhartserna uppvisar överlag något högre relativ permittivitet än de keramiska bindemedlen. Detta beror troligen på att fenolhartserna innehåller material som vatten och metanol vilka lätt polariseras av det verkande elektriska fältet.

Enligt nedanstående uttryck så resulterar en hög permittivitet i en hög kapacitans:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

där C är kapacitans, ε permittivitet, A area och d längd enligt figur 28. Då strömmen (i) genom en kondensator ges av:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

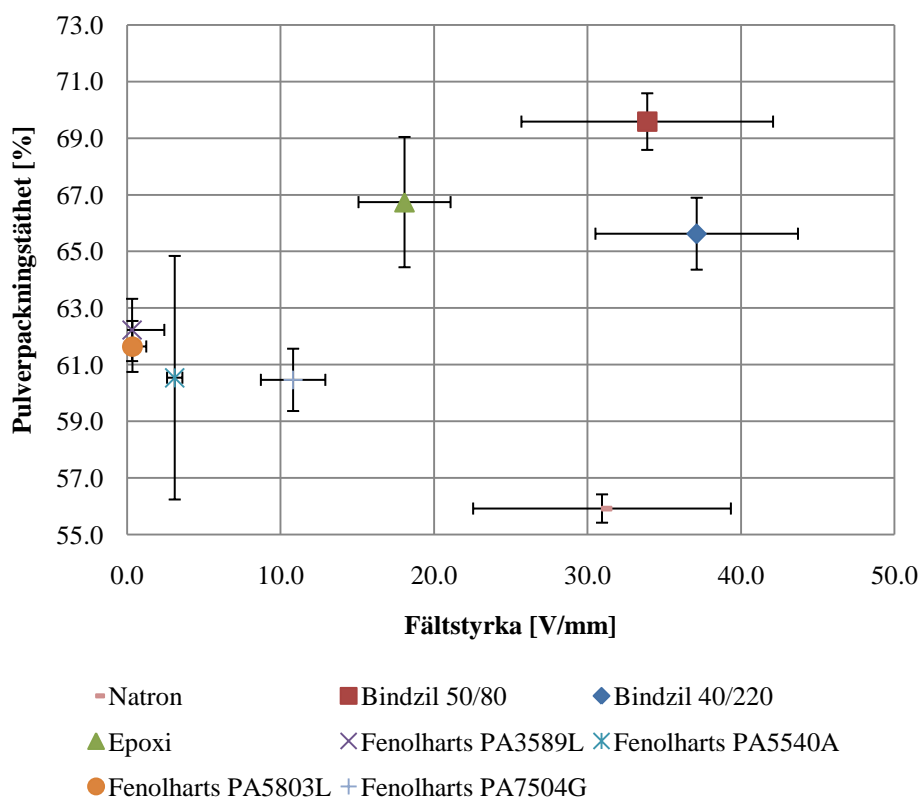
gäller också att en ökad permittivitet leder till en ökad ström i genom materialet. Testkroppar baserade på fenolhartsen PA3589L kommer pga. sina höga permittivitet därför uppvisa högre elektriska strömmar än de andra testkropparna. Lägst strömmar kommer testkroppar baserade på epoxi uppvisar, dessa testkroppar uppvisar även lägst förlustvinklar

SM²C-material baserade på epoxi kommer därför uppvisa lägst energiförluster i punkter där kapacitiva element uppstår, t.ex. mellan in- och utgående ledare till ingjutna elektriska komponenter.

9.5 Dielektriskt genombrott

9.5.1 Dielektriskt genombrott

Enligt nedanstående figur visar mätningarna av dielektriskt genombrott på mycket stora skillnader mellan de olika bindemedlen.



Figur 49: Pulverpackningstäthet som funktion av hanterbar fältstyrka.

Till exempel så uppvisar de flesta fenolhartser ett mycket lågt motstånd mot dielektriskt genombrott. Motståndet var ibland så lågt att det var svårt att överhuvudtaget registrera ett mätvärde. De låga värdena för fenolhartsen kan möjligen förklaras med att materialet har lätt för bryggbildning som effekt av en elektrisk spänning. Enligt teorin för fenolharts så bör detta dock ske vid höga spänningar. En annan möjlighet är att större mängder vatten finns kvar i bindemedlet efter härdning. Detta kan till exempel förklara varför fenolhartsen PA7504G som inte innehåller vatten presterar bättre än de andra fenolhartserna i detta test.

Samtliga keramiska bindemedel presterar tvärt emot fenolhartserna mycket bra i detta test. I fallet med Natron kan detta till viss del förklaras med den låga pulverpackningstätheten. Men i fallen med de båda Bindzilbindemedlen så är det

troligen så att bindmedlet verkligen ger upphov till mycket hög elektrisk isolering av varje metallpartikel. En annan möjlig förklaring till Binzilernas utmärkta resultat i detta test är att en viss andel av järnpulvret omvandlats till oxider eller rost. Det sker nämligen en tydlig oxidation av testkropparna under tillverkningsprocessen. Resultatet från permeabilitetstesterna pekar dock mot att denna oxidering inte bryter ner järnpulvret i någon större utsträckning. Keramernas utmärkta resultat är troligen även en effekt av den relativt låga mängden bindemedel samt den höga andel luftfyllda håligheter i testkroppen.

De epoxibaserade testkropparna uppvisar enligt ovanstående figur markant bättre resultat än de andra polymerbaserade bindemedlen. Dock så uppvisar det något sämre resultat än de kerambaserade bindemedlen. En möjlig anledning till detta är förutom bindemedlets lägre isolerande egenskaper den totala frånvaron av luftfyllda håligheter. Luft har bättre isolerande egenskaper än samtliga andra material som används i denna undersökning.

9.5.2 Resistivitet i linjärt område

Detta test utfördes samtidigt med ovanstående genom att resistiviteten vid 30 V spänning lagras. Även resultatet avspeglar sig i stort sett i ovanstående figur. De fyra bäst presterande bindemedlen Natron, Bindzil 50/80, Bindzil 40/220 och Epoxi ger samtliga upphov till en resistivitet på ungefär $1 \cdot 10^6 \Omega\text{m}$. Som nämnts tidigare så kunde 30 V inte uppnås för varken fenolharts PA3589L eller PA5803L innan mätutrusningens strömlarm utlöstes. Den ovanstående förklaringen om varför vilka material kan hantera höga spänningar kan troligen även användas för att förklara resultaten i detta test.

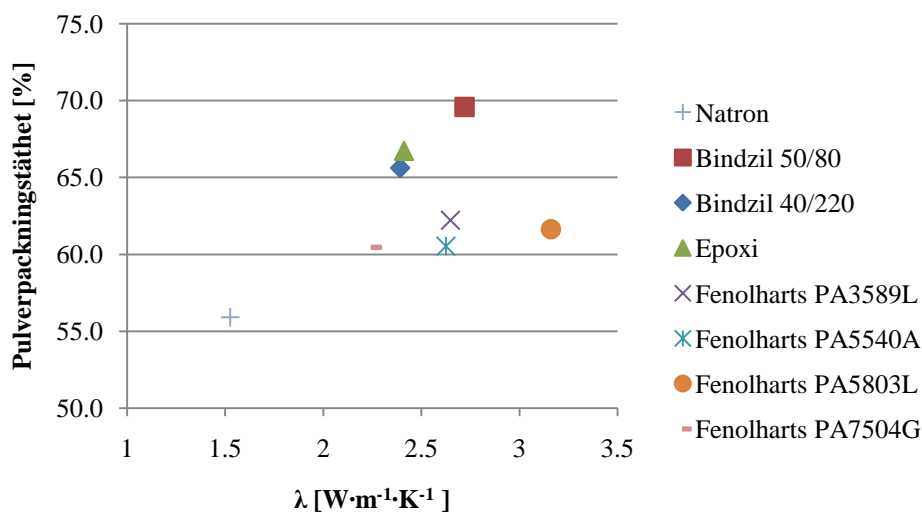
Tabell 19: Exempel på resistivitet för ett antal vanliga material¹⁴⁹.

Material	Resistivitet. (Ωm)
Silver	$1,59 \cdot 10^{-8}$
Koppar	$1,72 \cdot 10^{-8}$
Aluminium	$2,65 \cdot 10^{-8}$
Järn	$9,7 \cdot 10^{-8}$
Stål	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Kol (grafit)	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Vatten (destillerat)	$5 \cdot 10^8$
Glas	$5 \cdot 10^{11}$
Gummi	$5 \cdot 10^{13}$

¹⁴⁹ (Wikipedia, 2011) Resistivitet

9.6 Termisk ledningsförmåga

Som nämnts tidigare i detta kapitel så bör dessa mätvärden hanteras med viss försiktighet. Värdena bör dock kunna tolkas relativt referensen av Duran. Det går därför att säga att samtliga material har något bättre ledningsförmåga än denna referens. Enligt nedanstående figur så verkar det finnas ett visst samband mellan pulverpackningstäthet och ledningsförmåga. Hög ledningsförmåga i materialet som omsluter metallkornen verkar dock kunna kompensera för lägre pulverpackningstäthet. Detta är särskilt tydligt för bindemedlet fenolharts PA5803L som trots nästan 10 % lägre pulverpackningstäthet än Bindzil 50/80 ändå har högre ledningsförmåga.



Figur 50: Pulverpackningstäthet som funktion av termisk ledningsförmåga.

Allt som allt har endast små skillnader uppmätts i termisk ledningsförmåga för de olika bindemedlen. Lägg därtill den osäkerhet som föreligger i dessa tester och denna skillnad blir ännu mindre.

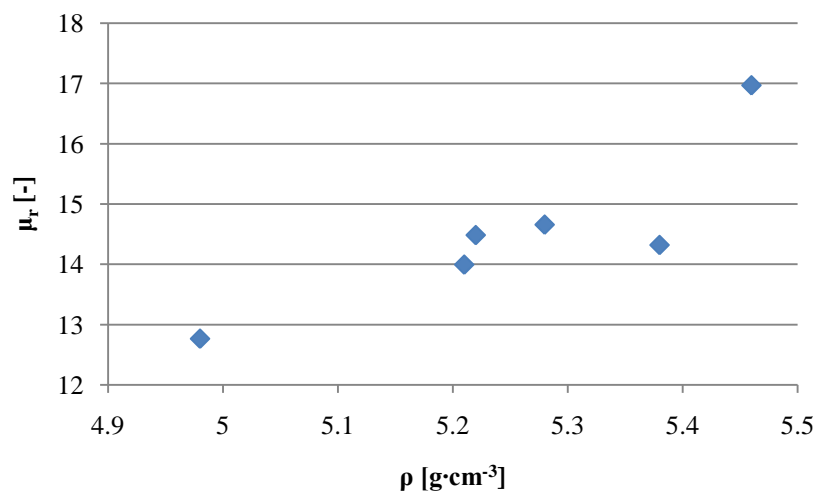
9.7 Magnetisk permeabilitet

Relativ permeabilitet

Resultaten från mätningarna visar på att testkropparna baserade på Bindzil 50/80 presterar minst lika bra som de testkropparna baserade på epoxi. Den högsta uppmätta relativa permeabiliteten på 15,7 är dock något lägre än vad som är önskvärt. Mätningar på en epoxibaserad referens toroid som tillverkats innan detta examensarbete uppvisar t.ex. en relativ permeabilitet på 17. Epoxibaserade toroider i samma storlek som tillverkades under detta examensarbete nådde som högst en relativ permeabilitet på 14,6.

Denna skillnad kan troligen förklaras genom den mycket höga pulverpacknings-tätheten eller densitet i referenstoroiden (densitet $5,46 \text{ g/cm}^3$ jämfört mot $5,26 \text{ g/cm}^3$). Trots upprepade försök så lyckades författaren inte nå en så hög densitet i egentillverkade testkroppar. Detta kan möjligen förklaras genom att olika pulver använts vid tillverkningen. Så som visas i ”tap density” bilagan kan den maximala densitet variera även inom samma ”batch” metallpulver, troligen som en effekt av sedimentering under transport.

Relativ permeabilitet mot densitet



Figur 51: Relativ permeabilitet som funktion av densitet i testkropparna. Värdena kommer uteslutande från mätningar på testkroppar baserade på epoxi.

Trots det något dåliga resultatet från testkroppar baserade på Bindzil 50/80 går det att fastslå att den synliga oxideringen av testkropparna inte bryter ner järnpulvret i någon större omfattning. Om så var fallet hade mätresultatet varit markant sämre än vad som uppmätts.

Effektföruster

Effektförusterna i Bindzil 50/80 och epoxibaserade testkroppar är ungefär samma. Eventuella skillnader faller inom felmarginalen för de båda.

10 Slutsatser

I detta kapitel presenteras de slutsatser som författaren har dragit under examensarbetets gång.

Syftet med examensarbete var som det står i det inledande kapitlet:

1. Kartläggning och analys av bindemedelssystem för mjukmagnetiska pulverkompositier.
2. Föreslå alternativ till epoxi som bättre uppfyller kraven på miljö, arbetsmiljö, termisk uthållighet, tillverkningsvänlighet samt elektrisk isolering av spole.

Resultaten från initiala kartläggningen visade att det finns ett flertal system på marknaden som kan användas som bindemedel för mjukmagnetisk kompositeter. Problemet med flertalet av dessa bindemedel var dock att de överlag presterade markant sämre än epoxi i de utförda testerna.

I examensarbetet visas att t.ex. fenolharts av resolyt inte alls lämpar sig för gjutning i öppna formar. Då problem med bland annat avlägsningen av lösningsmedlet ger upphov till låg pulverpackningstätheten. Pulverpackningstätheten kan sannolikt förbättras markant om härdningen sker i ett pressverktyg. Men även om pulverpackningstätheten kan ökas så ger bindemedlets låga elektriska isolationsegenskaper troligen en medioker slutprodukt.

Testkroppar baserade på keramiska bindemedel så som Bindzil 50/80 och Bindzil 40/220 uppvisade dock i flertalet fall bättre eller likande resultat som epoxibindemedlet. Särskilt när det gällde egenskaper av stor vikt så som pulverpackningstäthet, elektrisk isolation och permeabilitet. Även ifall testkropparna inte utförligt testats med hänsyn på temperaturlåglighet så visar ett initialt test att de testkroppar baserade på keramiska bindemedel har markant bättre temperaturlåglighet än de epoxibaserade.

Allra bäst resultat uppvisade bindemedlet Bindzil 50/80. Jämfört mot testkroppar baserade på epoxi så uppvisade dessa testkroppar bättre eller likande resultat i alla tester förutom mekanisk hållfasthet och dielektrisk förlust.

Dålig mekanisk styrka är ett återkommande problem med samtliga testkroppar baserade på keramiska bindemedel.

Inte helt oväntat så visade det sig att hantering av keramiska bindemedel är kopplat till färre hälsorisker än deras polymerbaserade motsvarigheter. Till skillnad från de polymerbaserade bindemedlen så är de keramiska bindemedlen varken sensibiliserande eller cancerogena. Vissa försiktighetsåtgärder är dock lämpliga vid hantering då bindemedlet oftast är starkt basiskt och korrosivt.

11 Förslag på vidare arbete

På grund av att Bindzil 50/80 är korrosivt så sker en tydlig oxidation av metallpulvret så väl under torkning som efter. Initiala tester av permeabilitet visar att denna oxidation troligen inte har någon större nedbrytande effekt. Det är likväl lämpligt att undersöka ifall detta även är fallet efter lång tid i en högtemperaturmiljö.

Det är även tänkbart att järnoxiden påverkar kompositens mekaniska styrka främst genom att bindemedlet binder in till den porösa oxiden istället för kornens metallyta.

Om möjligt bör därför denna oxidation minimeras t.ex. genom ökad ytbehandling av metallkornen eller genom att låta torking/härdning av gjutkroppen ske i en inert miljö.

En annan aspekt som bör undersökas är möjligheten att förbättra den mekaniska hållfastheten i gjutkroppar baserade på Bindzil 50/80.

Det är tydligt att de mekaniska egenskaperna förbättras genom sintring. Men det kan även vara värt att undersöka hur en tillsats av fibrer eller små mängder novolac påverkar de mekaniska egenskaperna. Trots att en inblandning av novolac skulle sänka temperaturlågheten markant så skulle bindemedlet troligen fortfarande ha bättre högtemperatur egenskaper än t.ex. epoxi.

12 Källförteckning

ABIC kemi AB, telefonkontakt med försäljningsavdelning (november-2010)

Arbetsmiljöverkets författningssamling (2005), *Härdplaster (AFS 2005:18)*, Hämtad från www.AV.se (september-2010)

Aremco Products inc., *High temperature inorganic binders*, Hämtat från: http://www.aremco.com/PDFs/A11_06.pdf (september-2010)

ASM Handbook Volume 21 (2001). *Composites*. ASM International

Askeland, D.R.,(2004). *Essentials of materials Science and engineering*. United States of America: Thomson

Benson, H., (1996). *University physics*. England: John Wiley & Sons

Urea-formaldehyd-resin: Britannica. Hämtat från: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/619659/urea-formaldehyde-resin> (september-2010)

Brown, J.R. (1994). *The FOSECO foundryman's handbook 10th ed*. Oxford: Butterworth-Heinemann

Carlson, P., et al (2002). *Modern elektronisk mätteknik*. Eskilstuna: Liber

Cedell, T.,(2011) Adj. Professor, LTH Industriell Produktion, Personkontakt

Cedell T., Jeppson P., Andersson M., Ståhl J, et al. *New advances in soft magnetic materials*.

Cowie, J.M.G., Arrighi, V., (2008). *Polymers: Chemistry and physics of modern materials* (3:e uppl.), Boca Raton: Taylor & Francis Group

EKA Chemicals AB. Telefonkontakt med Bozena Tokarz, (augusti-2010).

Fried, J.R., (2007). *Polymer science & technology, 2nd Ed*. New Jersey: Prentice Hall PTR.

Geopolymer Institute, <http://www.geopolymer.org/shop/> (september-2010)

Goodman, S.W., (1999). *Handbook of Thermoset Plastics, 2nd Ed*. Norwich: William Andrew Publishing.

Iler, R. K (1979). *The Chemistry of silica*, New York: John Wiley & Sons.

Klason, C., Kubát, J.(1987). *Plaster: Materialval och materialdata*, Stockholm: Mekanförbundets Förlag.

Komnitsas, K., et al., (2007), *Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry*, ScienceDirect, Minerals Engineering 20 (2007) 1261–1277

Kompositfabriken, (2009). *Skillnad mellan plaster*, Hämtat från kompositfabriken: http://www.kompositfabriken.com/pdf/Skillnader_mellan_plaster.pdf (september-2010)

Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. (2006). *Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II*. Fuel 86 (2007) 315-322

LTH. Personkontakt med Franz Mauer (augusti-2010).

Magnetic Componets Sweden AB, (2011), <http://www.magcomp.se/> (januari-2011)

McDonald, M., Thompson, J.L. (2002), *Sodium Silicate a Binder for the 21st Century*. The PQ Corporation.

National stone, sand & gravel association (2004), *Health alert, Polyurethane exposure*.

Nils Malmgren AB, Telefonkontakt med försäljningsavdelning (november-2010)

Occidental Petroleum Corporation, (2010), *The OxyChem Sodium Silicates Handbook*. Hämtat från: http://www.oxy.com/Our_Businesses/chemicals/Documents/silicates/silicate.pdf (september-2010)

Owusu, Y.A. (1982). *Physical-Chemical study of Sodium Silicate as a foundry sand binder*. Amsterdam: Advances in Colloid and Interface Science, 18 (1982) 57-91.

PA-resins, personkontakt med “Group Application R&D Manager” Anders Johansson (september-2010)

Pashley, R.M, Karaman, M.E. (2004). *Applied Colloidal and Surface Chemistry*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.

Permeability: Wikipedia. Hämtat från Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism)) (januari-2011)

Permittivity : *Wikipedia*. Hämtat från Wikipedia:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Permittivity> (februari-2011)

Plast: *Nationalencyclopedia*. Hämtat från Nationalencyclopedia:
<http://www.ne.se/lang/plast> (september-2010)

Rabbii, A (2001). *Sodium Silicate Glass as an Inorganic Binder Foundry Industry*.
Tehran: Iranian Polymer Journal/Volume 10 Number 4(2001).

Resistivitet: *Wikipedia*. Hämtat från Wikipedia:
<http://sv.wikipedia.org/wiki/Resistivitet> (november-2010)

Rowles, M.R. et al., (2009), *Chemical and Structural Microanalysis of Aluminosilicate Geopolymers Synthesized by Sodium Silicate Activation of Metakaolinite*, The American Ceramic Society

Silicate: *Wikipedia*. Hämtat från Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicate>
(september-2010)

Silikat: *Wikipedia*. Bild hämtad från Wikipedia: <http://sl.wikipedia.org/wiki/Silikat>
(december-2010)

Slipnaxo. Telefonkontakt med Stefan Berg (september-2010)

Smith. A., (14th February 2008). *Potassium Silicate vs. Sodium Silicate*. Hämtad från Article Database: <http://www.articlesbase.com/business-articles/potassium-silicate-vs-sodium-silicate-333111.html> (12 oktober-2010)

Swed handling AB, Swed Handling AB är en kemikaliedistributör
<http://www.swedhandling.com/> (1 januari-2011).

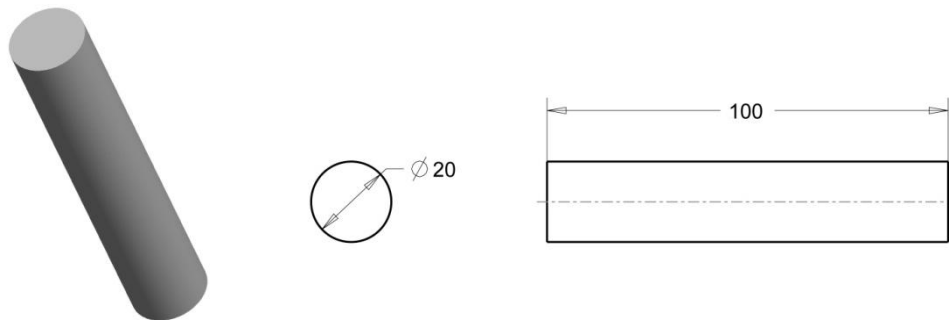
Swerea|IVF. *Limtyper*. Hämtat från:
<http://lotsen.ivf.se/KonsLotsen/Bok/appendix4/Limtyper.html> (september-2010).

13 Bilagor

13.1 Testkroppar

13.1.1 Standard testkropp

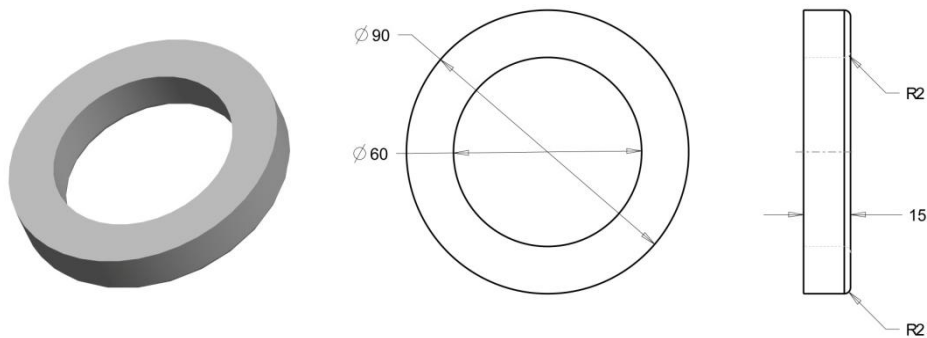
Denna testkroppstyp användes för samtliga tester förutom de för mätning av magnetisk permeabilitet. Testkroppens färdiga längd varierade något beroende på använt bindemedel. För vissa tester så var det nödvändigt att dela upp testkroppen i flera mindre delar.



Figur 52: Standard testkropp.

13.1.2 Toroidformad testkropp

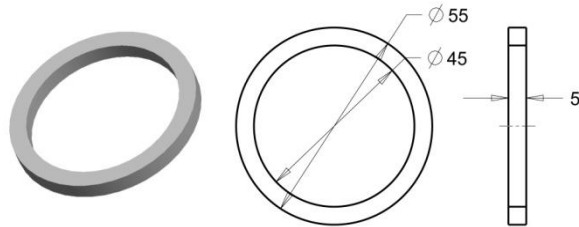
Denna testkroppstyp användes för att bestämma testmaterialets magnetiska egenskaper. Kropparna lindades med 84 varv exciteringstråd och 84 varv pick-up-tråd.



Figur 53: Toroidformad testkropp.

13.1.3 Liten toroidformad testkropp

För att undersöka om det förelåg något skalningsfel i mätutrusning för magnetiska egenskaper tillverkades dessa mindre toroidformade testkroppar. Kropparna lindades med 60 varv exciteringstråd och 60 varv pick-up-tråd.



Figur 54: Liten toroidformad testkropp.

13.2 Mätresultat i tabellform

Tabell 20: Uppmätt pulverpackningstäthet.

Bindemedel	Pulverpackningstäthet [%]	Standardavvikelse	Antal testkroppar
Natron	55,9	0,5	3
Bindzil 50/80	69,6	1,0	8
Bindzil 40/220	65,6	1,3	6
Epoxi	66,7	2,3	6
Fenolharts PA3589L	62,2	1,1	4
Fenolharts PA5540A	60,5	4,3	4
Fenolharts PA5803L	61,6	0,9	4
Fenolharts PA7504G	60,5	1,1	4

Tabell 21: Uppmätt Böjbrottspänning.

Bindemedel	Böjbrottspänning [MPa]	Standardavvikelse	Antal testkroppar
Natron	2,1	0,3	5
Bindzil 50/80	5,3	0,9	4
Bindzil 40/220	5,0	1,5	5
Epoxi	131,0	5,3	3
Fenolharts PA3589L	34,5	2,9	4
Fenolharts PA5540A	11,8	1,4	4
Fenolharts PA5803L	22,1	3,7	4
Fenolharts PA7504G	18,3	1,3	4

Tabell 22: Uppmätt fältstyrka vid dielektriskt genombrott.

Bindemedel	Fältstyrka [V/mm]	Standardavvikelse	Antal testkroppar
Natron	30,9	8,4	7
Bindzil 50/80	33,9	6,6	8
Bindzil 40/220	37,1	5,7	8
Epoxi	18,1	5,8	7
Fenolharts PA3589L	0,3	0,3	4
Fenolharts PA5540A	3,1	0,5	7
Fenolharts PA5803L	0,3	0,9	8
Fenolharts PA7504G	10,8	2,1	8

Tabell 23: Uppmätt resistivitet vid 30 V. * 30 V kunde inte uppnås på grund av ström larm, värdet som redovisas är det sist registrerade värde under 30 V spänning.

Bindemedel	Resistivitet [Ω m]	Standardavvikelse	Antal testkroppar
Natron	1.01E+06	9.70E+05	7
Bindzil 50/80	1.33E+06	5.43E+04	8
Bindzil 40/220	1.42E+06	5.42E+04	8
Epoxi	1.06E+06	7.23E+05	7
Fenolharts PA3589L *	1.10E+01	9.00E+00	4
Fenolharts PA5540A	1.89E+02	4.39E+01	7
Fenolharts PA5803L *	1.17E+01	9.84E+00	8
Fenolharts PA7504G	1.20E+03	3.37E+02	8

Tabell 24: Uppmätt impedans vid 1 kHz respektive 20 kHz.

Bindemedel	1 kHz		20 kHz		Antal testkroppar
	Impedans [Ω]	StdAv.	Impedans [Ω]	StdAv.	
Bindzil 50/80	1.E+05	5.E+04	4.E+05	5.E+04	8
Bindzil 40/220	1.E+05	4.E+04	8.E+05	6.E+03	7
Epoxi	7.E+05	7.E+05	6.E+04	2.E+03	8
Fenolharts PA3589L	1.E+03	1.E+03	1.E+03	1.E+03	8
Fenolharts PA5540A	4.E+04	2.E+04	3.E+04	3.E+03	7
Fenolharts PA5803L	1.E+03	9.E+02	9.E+02	9.E+02	8
Fenolharts PA7504G	1.E+05	3.E+04	5.E+04	3.E+03	8

Tabell 25: Uppmätt fasvridningen vid 1 kHz och 20 kHz.

Bindemedel	Fasvridning [$^{\circ}$]				Antal testkroppar
	1 kHz	StdAv.	20 kHz	StdAv.	
Bindzil 50/80	-19.01	1.16	-62.97	3.23	8
Bindzil 40/220	-20.28	3.11	-58.92	9.9	7
Epoxi	-41.5	3.6	-84.31	1.53	8
Fenolharts PA3589L	-0.06	0.08	-1.66	1.79	8
Fenolharts PA5540A	-3.24	0.97	-42.46	4.21	7
Fenolharts PA5803L	-0.08	0.06	-1.54	1.06	8
Fenolharts PA7504G	-6.25	1.56	-61.83	5.63	8

Tabell 26: Beräknade relativ permittivitet och förlustvinklar (medianvärden).

Bindemedel	1016 Hz		21500 Hz		Antal testkroppar
	Relativ permittivitet [-]	arg(ϵ) [°]	Relativ permittivitet [-]	arg(ϵ) [°]	
Bindzil 50/80	11438	-71	1719	-27	7
Bindzil 40/220	13027	-71	1677	-33	8
Epoxi	1619	-47	1006	-5	7
Fenolharts PA3589L	6417035	-90	303970	-89	4
Fenolharts PA5540A	26124	-87	1704	-48	7
Fenolharts PA5803L	1216110	-90	110620	-89	8
Fenolharts PA7504G	11796	-84	1225	-28	8

Tabell 27: Standardavvikelser för resultaten i tabell 26.

Bindemedel	1016 Hz			21500 Hz		
	Relativ permittivitet [-]		arg(ϵ)	Relativ permittivitet [-]		arg(ϵ)
	StdAv. hög	StdAv. låg	StdAv.	StdAv. hög	StdAv. låg	StdAv.
Bindzil 50/80	2,11E+03	2,95E+03	1	9,60E+01	1,59E+02	3
Bindzil 40/220	9,22E+03	8,78E+03	3	5,08E+02	3,95E+02	10
Epoxi	1,35E+02	2,93E+02	4	5,90E+01	1,87E+02	2
Fenolharts PA3589L	1,31E+07	5,97E+06	0	6,48E+05	3,03E+05	2
Fenolharts PA5540A	2,42E+07	8,13E+03	1	3,81E+02	2,46E+02	4
Fenolharts PA5803L	3,29E+06	7,77E+05	0	2,30E+07	9,00E+04	1
Fenolharts PA7504G	2,87E+03	4,58E+03	2	5,75E+01	1,53E+02	6

Tabell 28: Uppmätta magnetiska egenskaper.

* Hälften av testkropparna tillverkades med pulver # 3 medan andra hälften tillverkades med pulver # 4, se bilaga tap density test för mer information om respektive pulver.

Bindemedel	Relativ permeabilitet [-]	StdAv.	Förlust [$W \cdot m^{-3}$]	StdAv.	Antal testkroppar
Bindzil 50/80*	14,49	0,82	13748,88	3636,26	6
Epoxi	14,32	0,02	13627,52	161,43	1
Epoxi (liten)	13,98	0,79	12274,71	519,67	4

Tabell 29: Uppmätt termisk ledningsförmåga.

Bindemedel	λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Antal testkroppar
Natron	1.53	1
Bindzil 50/80	2.72	1
Bindzil 40/220	2.39	1
Epoxi	2.41	1
Fenolharts PA3589L	2.65	1
Fenolharts PA5540A	2.63	1
Fenolharts PA5803L	3.16	1
Fenolharts PA7504G	2.25	1

13.3 Tap density resultat

Tap density testerna utfördes genom att ett torrt pulver hälldes i ett 100mL mättrör. Röret vibrerades därefter tills dess att ingen synlig minskning av pulvrets volym längre skedde. Den resulterande volymen antas vara resultatet av optimal pulverpackning. Tap density beräknades därefter enligt:

$$\rho (\text{tap density}) = \frac{\text{pulvrets massa}}{\text{minimal volym}}$$

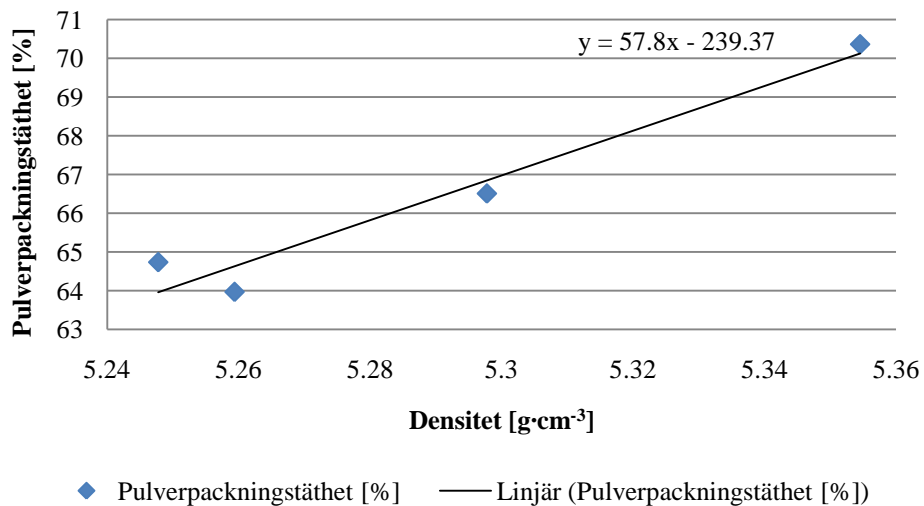
Under examensarbetets gång så fylldes pulver reservoaren på ett antal gånger, nedan redovisas tap density resultaten efter varje sådan påfyllning.

Tabell 30: Resultat från tap density tester på olika pulver.

Pulver #	Tap density [g/cm³]
1	5,04
2	5,22
3	5,20
4	5,19

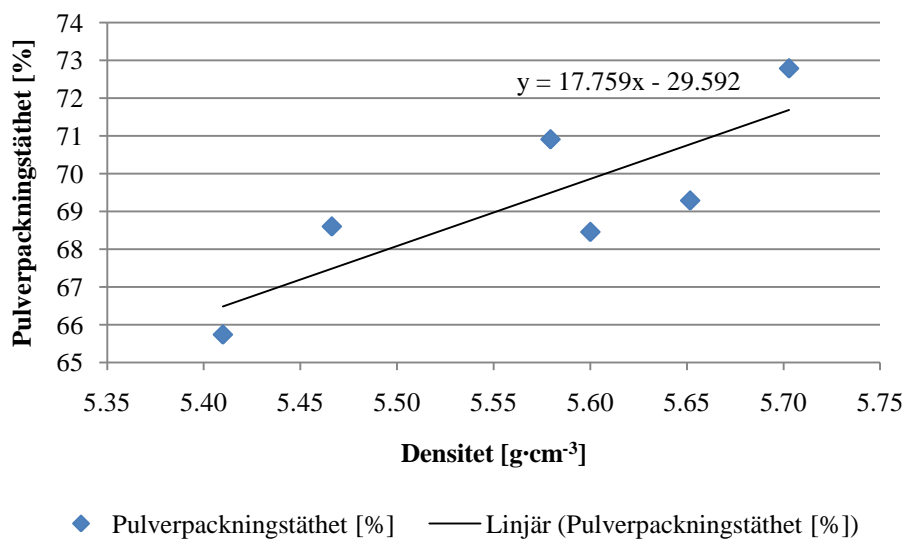
13.4 Samband mellan pulverpackningstäthet och densitet

Epoxibaserade testkroppar



Figur 55: Pulverpackningstäthet som funktion av densitet.

Bindzil 50/80-baserade testkroppar



Figur 56: Pulverpackningstäthet som funktion av densitet.

13.5 Generella bestämmelser för härdplaster¹⁵⁰

Generella bestämmelser för alla slags härdplastkomponenter, inklusive luftföroreningar som bildas vid termisk nedbrytning

Allmänna skyddsåtgärder

6 §

Arbete i verksamhet som omfattas av dessa föreskrifter får ledas och utföras endast av personer som har genomgått särskild teoretisk och praktisk utbildning och har tillräckliga kunskaper om riskerna och om de skyddsåtgärder som behöver vidtas vid arbetet.

7 §

Skriftliga hanterings- och skyddsinstruktioner skall finnas tillgängliga på arbetsplatsen och vara anpassade för arbetet.

8 §

Hudkontakt med härdplastkomponent skall undvikas. Detsamma gäller exponering för luftförorening från härdplastkomponent eller från arbeten som avses i 2 § punkt 2 i dessa föreskrifter (termisk nedbrytning).

9 §

Varje arbetsplats där härdplastkomponent hanteras eller där arbete som avses i 2 § punkt 2 i dessa föreskrifter (termisk nedbrytning) utförs, skall ha sådana utsugsanordningar att förekommande luftföroreningar från komponenterna och/eller nedbrytningen effektivt tas om hand. Även lagringsplats för härdplastkomponenter skall ha sådana utsugsanordningar. Bestämmelserna i första stycket behöver inte följas på tillfällig arbetsplats om det med hänsyn till omständigheterna inte är rimligt att ordna utsug. I sådana fall skall andra särskilda skyddsåtgärder vidtas som effektivt hindrar exponering för luftföroreningarna.

10 §

För arbetslokal där härdplastkomponent hanteras återkommande eller där arbete som avses i 2 § punkt 2 i dessa föreskrifter (termisk nedbrytning) utförs regelmässigt och där luftföroreningar från komponenterna eller från den termiska nedbrytningen kan uppkomma gäller följande: 1. Lokalen skall i regel ha undertryck i förhållande till angränsande lokaler eller utrymmen. 2. Obehöriga får inte vistas i lokalen. Under härdning skall härdkammare och härdugn ha undertryck.

AFS 2005:18

11 §

När härdplastkomponent hanteras öppet eller när arbete som avses i 2 § punkt 2 i dessa föreskrifter (termisk nedbrytning) utförs öppet, och ohälsa till följd av exponering för luftföroreningar kan uppkomma, får verksamhet som inte hör till det ifråga varande arbetet förekomma i samma arbetslokal eller i samma utrymme endast om tillräckliga åtgärder till skydd för övriga arbetstagare vidtagits. Om det behövs skall åtgärder också vidtas för att förebygga att luftföroreningar sprids till angränsande lokaler eller utrymmen. Skyltar som anger att öppen hantering pågår skall sättas upp i anslutning till arbetsplatsen samt anslås på dörrarna till lokalen eller utrymmet.

¹⁵⁰ (Arbetsmiljöverkets författningssamling, 2005)