Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Kandidatprogrammet i kemiteknik

Mekaniska och kemiska processparametrarnas inverkan på bubbelformning vid formgjutning av polyuretaner

Fredrik Parvinen

Kandidatarbete
2025

Copyright ©2025 Fredrik Parvinen

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Författare Fredrik Parvinen

Titel Mekaniska och kemiska processparametrarnas inverkan på bubbelformning vid formgjutning av polyuretaner

Utbildningsprogram Kandidatprogrammet i kemiteknik

Huvudämne CHEM3050 Kemiteknik och processer

Ansvarslärare TkD Jari Aromaa

Handledare Matias Tuomisalo, Oy Forcit Ab

Medarbetare Oy Forcit Ab

Datum 10.12.2025 **Sidantal** 29 + 3 **Språk** Svenska

Sammandrag

Arbetet undersöker hur processmiljön påverkar bildningen av bubblor vid formgjutning av polyuretan (PU), med fokus på processmiljöns olika processparametrar. Inledningsvis behandlas polyuretan som ett material, dess användning samt problemställning för bubblor. Detta följs av en förklaring av polyuretanets polymerisationsmekanism och en analys över bubbelformningsens mekanismer. De centrala parametrarna ur processmiljön som behandlas är temperatur, luftfuktighet (RH-%), vakuumtryck, viskositet, gjutning och processtid. Arbetet förklarar sambanden mellan bubblorna i polyuretan och processmiljön. Arbetet bygger på en omfattande litteraturstudie av vetenskapliga artiklar inom polymerkemi och processteknik. Arbetet behandlar möjliga tillämpningar av metoder för att minska bubblorna i materialet. Litteratur som granskas behandlar bubbelformningens mekanism eller processmiljöns påverkan på bubblor i polyuretan eller liknande material.

Resultaten visar att det finns en möjlighet att minska bubblor i polyuretanet med att kontrollera processmiljön, särskilt parametrarna fukt, vakuumtryck och temperatur. Fukt i reaktanterna orsakar kemiska sidoreaktioner där koldioxid bildas. Arbetet visar att gränsvärdet för fukten i reaktanter är 1000 ppm men för att förebygga bubblor rekommenderas lägre fukt kring 300 ppm. Arbetet granskar vakuumbehandlingen och utesluter flyktiga komponenters förångning under detta skede. Vakuumtrycket visar minska bubblorna i polyuretanet och trycken som behandlas i arbetet varierar mellan 5 och 50 mbar. Arbetet framhåller även praktiska åtgärder för att minska bubblor, som användning av inert gas för att hålla reaktanter torra, kontrollerad vakuumbehandling, tillämpning av kärnbildningsmedel samt kontrollerad vibration (5 – 50 Hz) under gjutningen. Slutsatsen är att en väl kontrollerad processmiljö med särskilt fokus på styrning av fukt, vakuum och temperatur är avgörande för att uppnå ett bubbelfritt polyuretan.

Nyckelord polyuretan, processmiljö, bubbelformning, formgjutning, fukt, vakuum, viskositet, kärnbildning, vibrationer, mjukformare, Henrys lag

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Tekijä Fredrik Parvinen

Työn nimi Mekaanisten ja kemiallisten prosessiparametrien vaikutus kuplien muodostumiseen polyuretaanien muottivalussa

Koulutusohjelma Kemian tekniikan kandidaatti

Pääaine CHEM3050 Kemian tekniikka ja prosessit

Vastuuopettaja TkT Jari Aromaa

Työn ohjaaja Matias Tuomisalo, Oy Forcit Ab

Yhteistyötaho Oy Forcit Ab

Päivämäärä 10.12.2025 **Sivumäärä** 29 + 3 **Kieli** Ruotsi

Tiivistelmä

Työssä tutkitaan, miten prosessiympäristö vaikuttaa kuplien muodostumiseen polyuretaanin (PU) muottivalussa, keskittyen prosessiympäristön eri prosessiparametreihin. Alussa polyuretaania käsitellään materiaalina, sen käyttöä sekä kuplien tuomaa ongelmaa materiaalissa. Tätä seuraa polyuretaanin polymerointimekanismin selitys ja kuplien mekanismien analyysi. Käsiteltävän prosessiympäristön keskeisiä parametreja ovat lämpötila, kosteus (RH-%), tyhjiöpaine, viskositeetti, valu ja prosessiaika. Työ selittää polyuretaanikuplien ja prosessiympäristön väliset yhteydet. Työ perustuu laajaan kirjallisuustutkimukseen polymeerikemian ja prosessitekniikan tieteellisistä artikkeleista. Tarkasteltava kirjallisuus käsittelee kuplien muodostumismekanismia sekä prosessiympäristön vaikutusta polyuretaanin tai vastaavien materiaalien kupliin. Työssä käsitellään mahdollisia menetelmiä kuplien vähentämiseksi materiaalissa.

Tulokset osoittavat, että polyuretaanin kuplia on mahdollista vähentää hallitsemalla prosessiympäristöä, erityisesti kosteuden, tyhjiöpaineen ja lämpötilan hallitseminen. Reaktanttien kosteus aiheuttaa kemiallisen sivureaktion, jossa muodostuu hiilidioksidia. Työ osoittaa, että reaktanttien kosteuden raja-arvo on 1000 ppm, mutta kuplien ehkäisyä varten on suositeltavaa käyttää kosteutta noin 300 ppm ympärillä. Työ tarkastelee tyhjiön käyttöä ja poissulkee haihtuvien komponenttien höyrystymisen tässä vaiheessa. Tyhjiöpaine näyttää vähentävän polyuretaanikuplia ja työssä käsiteltävät paineet vaihtelevat 5 ja 50 mbar välillä. Työssä korostetaan myös käytännön toimenpiteitä kuplien vähentämiseksi, kuten inertin kaasun käyttöä reaktanttien pitämiseksi kuivina, hallittua tyhjiön käyttöä, ytimenmuodostusaineiden käyttöä sekä hallitun tärinän käyttöä (5 – 50 Hz) valun aikana. Johtopäätös on, että hyvin hallittu prosessiympäristö, jossa erityisesti kosteutta, tyhjiötä ja lämpötilaa ohjataan, on ratkaiseva kuplattoman polyuretaanin saavuttamiseksi.

Avainsanat polyuretaani, prosessiympäristö, kuplien muodostuminen, muottivalu, kosteus, tyhjiö, viskositeetti, ydinmuodostus, tärinä, pehmitin, Henryn laki

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Author Fredrik Parvinen

Title of thesis Effects of mechanical and chemical process parameters on bubble forming in mold casting of polyurethane

Programme Chemical engineering

Major CHEM3050 Chemical Engineering and Processes

Thesis supervisor D.Sc. Jari Aromaa

Thesis advisor(s) Matias Tuomisalo, Oy Forcit Ab

Collaborative partner Oy Forcit Ab

Date 10.12.2025 **Number of pages** 29 + 3 **Language** Swedish

Abstract

The work examines how the process environment affects the formation of bubbles in polyurethane (PU) mold casting, focusing on the process environment's different process parameters. Firstly, polyurethane as a material, its use and problem of bubble formation is explained. This is followed by an explanation of the polyurethane polymerisation mechanism and an analysis of the bubble forming mechanisms. The central parameters of the process environment treated are temperature, humidity (RH-%), vacuum pressure, viscosity, casting and process time. The work explains the relationship between the bubbles in polyurethane and the process environment. The work is based on an extensive literature study of scientific articles in polymer chemistry and process technology. The work deals with possible applications of methods to reduce bubbles in the material. Literature reviewed deals with the mechanism of bubble forming or the effect of the process environment on bubbles in polyurethane or similar materials.

The results show that there is a possibility to reduce bubbles in the polyurethane by controlling the process environment, especially moisture, vacuum pressure and temperature parameters. Humidity in the reactants causes side chemical reactions where carbon dioxide is formed. The work shows that the limit value for moisture in reactants is 1000 ppm but to prevent bubbles, lower moisture is recommended around 300 ppm. The work examines the vacuum treatment and excludes the evaporation of volatile components at this stage. Vacuum pressure shows reducing bubbles in polyurethane and the pressures treated in this work vary between 5 and 50 mbar. The work also highlights practical measures to reduce bubbles, such as the use of inert gas to keep reactants dry, controlled vacuum treatment, the application of nuclear agents and controlled vibration (5 – 50 Hz) during casting. The conclusion is that a well-controlled process environment with a particular focus on controlling moisture, vacuum and temperature is crucial to achieving a bubble-free polyurethane.

Keywords polyurethane, process environment, bubble formation, mould casting, moisture, vacuum, viscosity, nucleation, vibration, plasticiser, Henry's law

Innehåll

Förord 7
Symboler och förkortningar 8
Symboler 8
Förkortningar 8
1 Inledning 9
2 Polyuretans polymerisering och bubbelformning 11
2.1 Polymerisering av polyuretan 11
2.2 Bubbelformning 12
3 Processmiljön 15
3.1 Processmiljöns påverkan 15
3.2 Fördjupning i processmiljön och möjliga åtgärder 18
3.3 Tillämpade metoder 21
3.4 Den praktiska processmiljön 24
4 Slutsats och sammanfattning 28
Källor 30

Förord

Jag vill rikta ett tack till företaget Oy Forcit Ab för samarbetet och möjliggörandet av detta kandidatarbete. Jag vill speciellt tacka min handledare från företaget, Matias Tuomisalo, för den handledning och stöd som jag fått under arbetets gång. Jag vill även tacka min ansvarslärare samt handledare TkD Jari Aromaa för handledningen och samarbetet från skolans sida.

10.12.2025
Fredrik Parvinen

Symboler och förkortningar

Symboler

f	Frekvens	Hz
RH-%	Luftfuktighet	(%)
μ	viskositet	(Pa s)
p	tryck	(mbar)

Förkortningar

DOA	Dioktyladipat
DOS	Dioktylsebacat
HTPB	Hydroxiterminerad polybutadien
HEUR	Hydrofobiskt modifierat etoxylerat uretan
IPDI	Isoforondiisocyanat
PU	Polyuretan
PBX	Polymerbundna sprängämnen
PRF	Fenol-resorcinol-formaldehyd
PDMS	Polydimetylsiloxan
TDI	Toluendiisocyanat
TPB	Trifenylbismutin

1 Inledning

Polyuretan (PU) utgör en av de mest mångsidiga polymerfamiljerna och används till ett flertal industriella syften. Till dessa syften hör bland annat elastomerer, skum, bindemedel och ytbeläggningar (Kovel et al., 2025). Polyuretanets mångsidighet härstammar från polymeriseringsreaktionen mellan polyol- och isocyanatmonomerer. Mångsidiga slutprodukter framkommer i olika former, allt från gummiliknande material till hårda plastmaterial. Dessa egenskaper avgörs av vilka förhållanden komponenterna blandas i samt hur processparametrarna regleras. I den industriella världen är polyuretanets användning väldigt brett och mångsidigt. Denna industriella utbredning av polyuretan framkommer även i statistik där kommersiella polyuretanvaror utgör runt 8 % av hela plastproduktionen (Kovel et al., 2025).

Användningen på den kommersiella marknaden för polyuretan är därmed mångsidig. Kommersiella polyuretaner använder man bland annat till flexibelt skum för möbler eller madrasser, styvare skum används som isolationsämne, ytbeläggningar och till elastomerer i tekniska och industriella system eller komponenter (Clemitson, 2011, kapitel 1). Samma grundläggande kemi som möjliggör mångsidiga produkter möjliggör också gjutbara polyuretaner. Polyuretanets mekaniska och kemiska egenskaper kan varieras beroende på användning av reaktanter och tillsatser samt processparametrar. Denna förmåga att skräddarsy slutprodukten är en central orsak för användning av polyuretan. Som Kovel et al. (2025) presenterar, används termoplaster av polyuretan som material inom både civila och militära produkter.

En central användning för polyuretan ligger i dess roll som bindemedel i polymerbundna sprängämnen (PBX) och som bindemedel i fasta drivmedelkompositer. I dessa typer av polyuretan-system används polyuretanmatrisens förmåga som bindemedel att nå eftersökta mekaniska egenskaper samt kemisk stabilitet. De vanligaste polymerbundna sprängämnena (PBX) är polyuretanbaserade (Daniel, 2006). Användningen av polyuretanbaserade system inom sprängämnen härstammar från forskningen och framstegen inom raketdrivmedelsforskning varifrån teknologin gick över till försvarsindustrin för dess fördelar (Daniel, 2006). Fördelen med polyuretanbundna sprängämnen jämfört med traditionella sprängämnen är att matrisen för polyuretan har en mindre känslighet vilket ger en ökad hanteringssäkerhet samtidigt som den explosiva prestationsförmågan behålls. Även om polyuretanbaserade sprängämnen har en mindre känslighet för yttre faktorer är dess kinetik viktig att förstå. Det är kritiskt att förstå polyuretanets kinetik vid framställningen av det slutliga PBX-ämne (Lee et al., 2015). Andra forskningar om polyuretan drar också slutsatsen att polyuretanmatrisen påverkar såväl säkerheten som prestationen av materialet (Elbeih et al., 2021). I Elbeih et al. (2021) framkommer att både inom raketdrivmedel och sprängämnen är

matrisen för polyuretan central för vilka mekaniska egenskaper produkten antar. Nyligen har tillämpningar som silikongummi eller energiska material (EMs) undersökts inom explosiva tillämpningar men polymerbundna sprängämnen (PBX) har konstaterats som mera gynnsamma val på grund av deras mekaniska och kemiska egenskaper (Szydło et al., 2025).

Polyuretanet är därmed ett centralt ämne i polymerbundna sprängämnen och det är viktigt att förstå dess kinetik vid bildningen av de olika produkterna. Vid tillverkningen av polyuretan, speciellt för formgjutna elastomerer och polymerbundna sprängämnen, kan bubblor framkomma i produkten. Bubblor i produkten utgör ett kvalitetsproblem där elastomererna inte har önskade egenskaper. I sprängämnen innebär det en risk för detonationsproblem som gör produkten osäker. Dessa bubblor formas på olika sätt och har olika ursprung under processen. Bubblornas ursprung kan vara kemiskt eller fysiskt. Trots en omfattad industriell användning av polyuretan, fattas det en förståelse för hur och vilka processparametrar som påverkar bubbelformningen. Bubbelformningen är även svår att förstå då olika processparametrar påverkar under olika stadier under polyuretanens polymerisation och härdning i formgjutningsprocessen.

Syftet med detta kandidatarbete är att besvara forskningsfrågan: Inverkar processmiljön på formning av bubblor vid formgjutning av polyuretan? Ytterligare strävar arbetet att undersöka mera specifikt hur processparametrarna i processmiljön påverkar formningen av bubblor och dra slutsatser om vilka som är de mest relevanta faktorerna. Arbetet strävar också efter att presentera möjliga åtgärder som kan tillämpas för att minska bubbelformningen i den slutliga produkten hos polymerbundna sprängämnen.

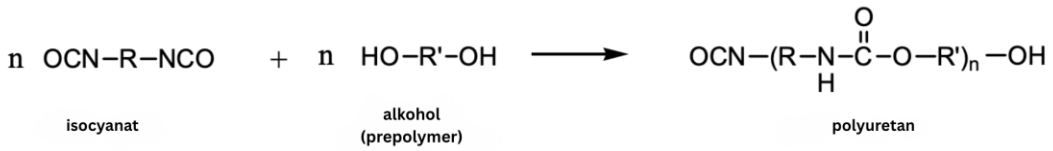
Arbetet utförs som en litteraturstudie som granskar och sammanställer existerande forskningar kring polymerkemi och processteknik. Litteratur som granskas handlar om bubbelformningens mekanism eller processmiljöns påverkan på bubblor i polyuretan eller liknande material. Arbetet fokuserar på forskning inom både polyuretan-system och liknande material, som trögflytande hartser, då samma fysiska principer påverkar dessa system. De parametrar inom processmiljön som arbetet fokuserar på är temperatur, luftfuktighet (RH-%), vakuumtryck, viskositet, gjutning och processtid. Betydelsen av arbetet är att koppla bubbelformningen som sker i processen med processparametrarna som används och framföra en koherent helhet om bubbelformning. Därmed ger detta arbete en grundläggande förklaring om polyuretan och dess användning.

2 Polyuretans polymerisering och bubbelformning

Detta kapitel presenterar grunderna för polyuretanets kemiska struktur samt de mekanismer som leder till bubbelformning under polymerisering och gjutning. Kapitlet behandlar både kemisk bubbelformning, som uppstår genom sidoreaktionen mellan isocyanat och vatten, och fysisk bubbelformning som orsakas av luftinneslutning under olika skeden av processen. Kapitlet ger en helhet av hur polyuretanets kemiska och fysiska egenskaper ger upphov till bubbelformning i formgjutningsprocessen.

2.1 Polymerisering av polyuretan

Polyuretan bildas då isocyanater reagerar med polyoler. Isocyanat kännetecknas naturligt av isocyanatgruppen (-NCO). Polyol kännetecknas av sin hydroxylgrupp (-OH). Dessa reaktanter bildar karbamatbindningar (uretanbindningar) som är grunden till polyuretanets struktur. Denna polymeriseringsreaktion presenteras i figur 1.

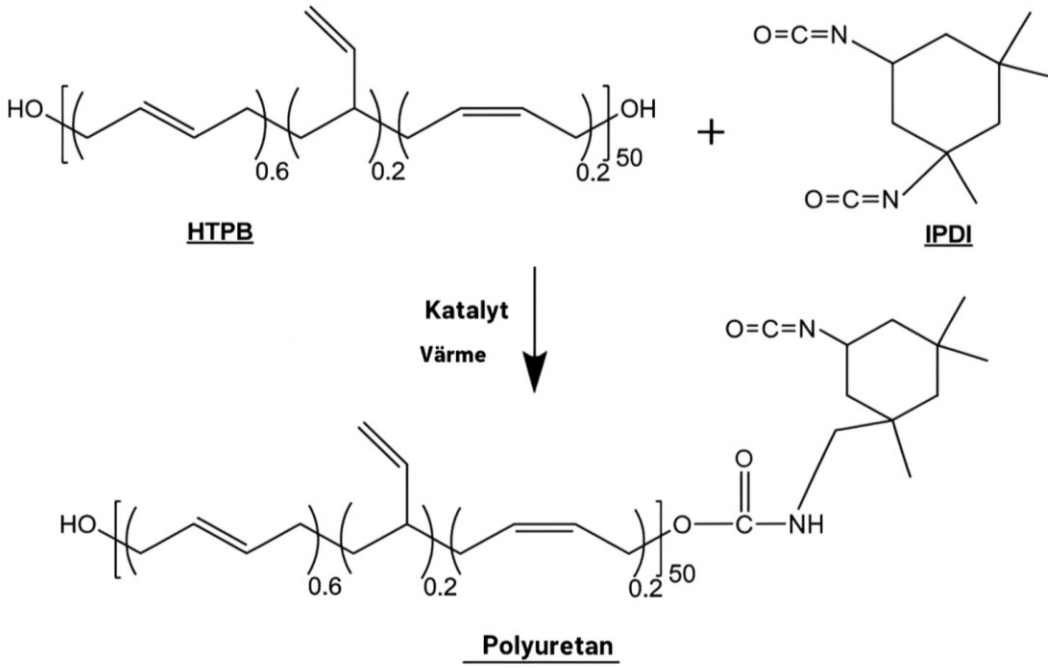


Figur 1. Huvudreaktionen, polymerisering av polyuretan (Daniel, 2006), översatt av författaren.

Polymeriseringsreaktionen för polyuretan har tre huvudsakliga processvägar enligt Clemitson (2011, kapitel 2). Den första processvägen är "One-shot"-processen, där alla reaktanter och komponenter blandas samtidigt in. Denna processväg är ovanlig och kräver mycket kontroll då reaktionen är exoterm och en upprepning av likadana produkter är svår. Den andra processvägen är prepolymer-vägen. Här är huvudsakliga syftet att terminera monomererna med hydroxylgrupper respektive isocyanatgrupper. Prepolymererna bygger på att reagera små delar av reaktanterna för att den slutliga reaktionen inte ska bli lika exoterm. Den tredje processvägen är "quasiprepolymer" vilket bygger på att det finns relativt mycket oreagerade isocyanatgrupper. Den huvudsakliga fördelen med denna processväg är att blandningsförhållandet mellan isocyanat och alkohol kan sättas till 1:1. Val av processväg påverkar viskositet, hur mycket värme som frigörs, blandningskrav och risken för oönskade bubblor i produkten (Clemitson, 2011, kapitel 2).

En vanlig användning för polyuretan är i polymerbundna sprängämnen (PBX). En av de mera använda monomererna är hydroxiterminerad polybutadien (HTPB) som är en monomer förberedd med en hydroxylgrupp på

vardera ända. Detta möjliggör polymerisering vid båda ändorna där uretanbindningar kan formas. Vid polymeriseringsreaktioner för att bilda PBX används diisocyanater i allmänhet för att få polymerstrukturen samt för att få en produkt med de mekaniska egenskaperna som förväntas. Vanliga diisocyanater som används är toluendiisocyanat (TDI) eller isoforondiisocyanat (IPDI) där TDI är ett mera känsligt och reagerande ämne jämfört med IPDI. Detta gör att IPDI föredras framför TDI vid processer med en längre brukstid och där produkten blir större (Lee et al., 2015). I figur 2 illustreras polymeriseringsreaktionen mellan hydroxiterminerad polybutadien och isoforondiisocyanat.

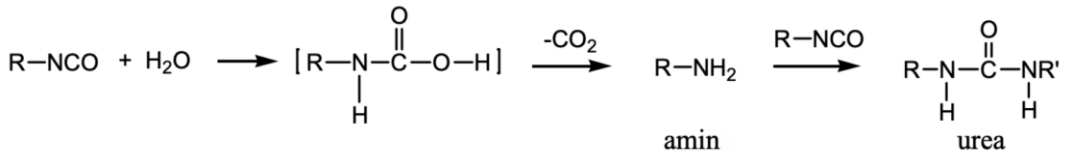


Figur 2. Första steget i den homogena katalyserade polymeriseringsreaktionen mellan HTPB och IPDI från (Lee et al., 2015), översatt av författaren.

2.2 Bubbelformning

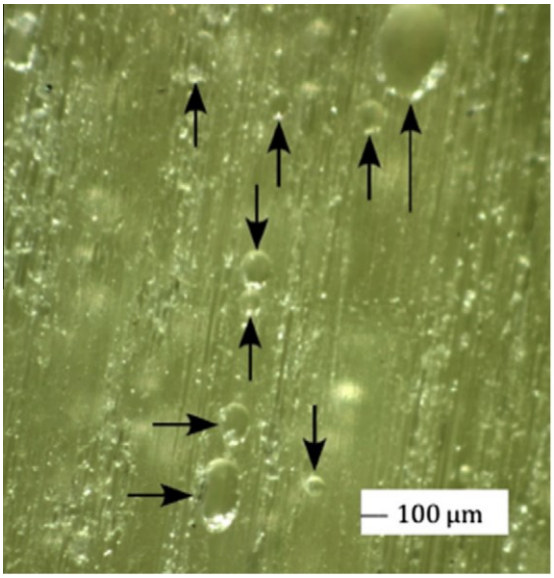
Bubbelformning i polyuretans polymeriserings- och gjutningsprocess är den centrala problematiken som råder. Man vill minimera om inte totalt utesluta bubblor i materialet. Ifall bubblor framkommer i det slutliga gjutna materialet leder det till möjliga defekter och problem i produkten. Bubblor under gjutningsprocessen kan uppstå på två huvudsakliga sätt, kemisk gasbildning eller fysisk luftinneslutning. Kemisk bubbelformning eller gasformning förekommer i sidoreaktioner under polymeriseringen av polyuretan. Sidoreaktionen sker då det finns fukt i form av vatten (H_2O) som isocyanat (NCO) reagerar med för att bilda sidoprodukten urea samtidigt som koldioxid (CO_2) bildas. Fuktfriheten har en central roll i bubbelbildningen då fukt ger upphov

till bildningen av koldioxid (Clemitson, 2011, kapitel 8). Sidoreaktionen där koldioxid bildas presenteras i figur 3.



Figur 3. Sidoreaktionen där isocyanat reagerar med vatten (Daniel, 2006), översatt av författaren.

Bubblor i polyuretanprodukten kan också framkomma mekaniskt genom fysisk luftinneslutning. Mekanisk luftinneslutning innebär att luft eller gas från omgivningen blir fysiskt inneslutet i det flytande polyuretanet. Luftinneslutningen kan uppstå under flera kritiska moment i processen, som under blandning, hällning, vakuumbehandling och härdning av ämnet. I figur 4 presenteras visuellt hur bubblor i högviskosa ämnen ser ut.



Figur 4. Tvärsnitt av ett kompositlaminat taget med optiskt mikroskop. Bubblorna identifierats med svarta pilar (Muric-Nesic et al., 2011)

Luftinneslutning kan framkomma under förberedelsen och blandningen av massan. Under omrörningen av det flytande ämnet kan bubblor framkomma i lokala områden vid det flytande ämnets yta eller längs kontaktytorna mellan fasta och flyktiga faser. Bubblorna kan framkomma på grund av snabba omblandningar eller felaktigt monterade blandningsredskap där det uppstår virvlar och kaviteter där bubblor framkommer (Afendi et al., 2005).

Luftinneslutning kan även framkomma när matrisen och isocyanatet hälls in i formen. Afendi et al. (2005) lyfter fram själva hällningsstadiet som ett

kritiskt skede för luftinneslutning. Detta kan framkomma vid svårt placerade inlopp i gjutformen, då viskositeten är hög kan luft inneslutas i formen. Man skall försöka minska på riskerna för bubbelformning vid hällning (McClain et al., 2019).

Bubbelformning kan också framkomma när massan utsätts för trycksänkning. Detta sker under vakuumbehandlingen där bubblor framkommer genom gas-inducerade bubbelformning (Sul et al., 2012). Dessa gas-inducerade bubblor kan framkomma som resultat av förångning. Gas-inducerad bubbelformning ger form till två olika bubbelformningar, homogen kärnbildning och heterogen kärnbildning. Homogen kärnbildning förekommer när själva gasen i hartser diffunderas. Heterogen kärnbildning sker vid gränsytan mellan flytande hartsen och fasta ämnet eller vid tomrum i materialet, denna kärnbildning förklaras av yttre faktorer som exempel, värme (Sul et al., 2012).

Under härdningen kan luftinneslutning också förekomma. När polymeren härdas stiger viskositeten och beroende på receptet kan slutliga materialet ha fasta materialegenskaper. Då viskositeten ökar kan diffunderande bubblor bli inneslutna i materialet (Lee et al., 2015). Lee et al. (2015) visar att viskositetskurvor ofta följer en Arrhenius-typ beroende och att temperatur och katalysatorer styr hur snabbt viskositetsökningen sker.

3 Processmiljön

Detta kapitel behandlar processmiljön och hur dess parametrar påverkar bubbelformningen under hela formgjutningsprocessen. De centrala processparametrar som analyseras är temperatur, luftfuktighet, vakuumtryck, viskositet, gjutning och processtid. Därefter fördjupas kapitlet i tre kritiska områden: fuktens roll i bubbelformningen, mekanismerna för kärnbildning och användningen av kärnbildningsmedel, samt en riskanalys av flyktiga komponenters förångning vid vakuumbehandling. Kapitlet presenterar även olika tillämpade metoder som användningen vibrationer och centrifugalgjutning för att möjligen minska mängden bubblor. Avslutningsvis kopplas den teoretiska processmiljön till den praktiska. Detta görs genom en stegvis genomgång av processens olika skeden och hur kontroll av processparametrarna i respektive steg kan reducera bubblor i det slutliga polyuretanet.

3.1 Processmiljöns påverkan

Processmiljön har en central roll när det gäller bubbelformning i processen. Processmiljöns olika faktorer påverkar på formningen, tillväxten och minskningen av bubblor och tomrum under polymeriseringen av polyuretan (PU) samt dess härdning. Olika faktorer i processmiljön har olika påverkan på hur processen framskrider och kvaliteten av slutprodukten. Framförallt har fysiska samt kemiska omständigheter som temperatur, luftfuktighet (RH-%), vakuumtryck, viskositet, gjutning och processtid en direkt påverkan på reaktionen och bubbelformationen. Dessa faktorer och parametrar bör kontrolleras för att nå en gjutning med minimal bubbelformation, stabil och jämn härdningsprocess. En optimering kring processparametrar har visat direkt påverka bubblornas andel i den färdiga härdade och formgjutna hartsen (Luangpaiboon och Juttijudata, 2021).

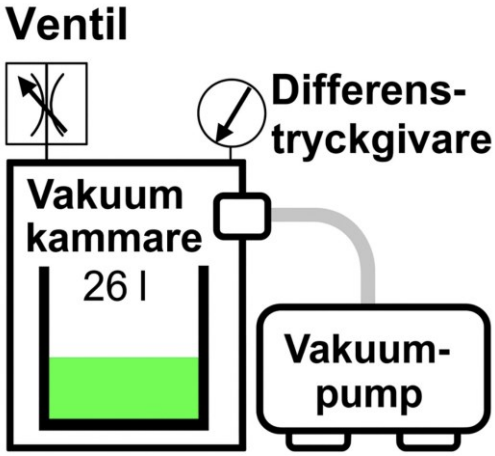
Temperaturen är en av faktor i processmiljön som påverkar både polymerisationens kinetik och bubbelformningen under polyuretanets bildning. Reaktionshastigheten och processtiden påverkas direkt av agerande temperatur i processmiljön. Små ändringar i temperaturen ändrar viskositeten, härdningstiden och därmed tiden bubblorna har att diffundera sig från materialet. I Clemitson (2011, kapitel 13) betonas temperaturkontrollen som väsentlig för processtiden samt härdningstiden. En bristfällig temperaturkontroll kan leda till variation i härdning och kan orsaka defekter i färdiga polyuretan produkten.

Temperaturen påverkar direkt viskositeten för trögflytande hartser. Hartsers viskositet påverkar hur effektivt bubblor diffunderar och stiger bort från ämnet med hjälp av lyftkraften. Med en höjning av temperaturen kan man sänka

viskositeten och därmed förbättra borttagningen av bubblor (Afendi et al., 2005). En lägre viskositet förbättrar ämnets förmåga att låta inneslutna bubblor stiga snabbare bort från ämnet. Problematiken som temperaturhöjning medför är att härdningstiden kan förkortas då polymeriseringsreaktionen försnabbas mellan isocyanat och polyol. Afendi et al. (2005) utför en teoretisk beräkning där en bubbla med en diameter på 0,01 mm, i en harts med viskositeten 200 mPa s, kräver 11 h för att stiga till ytan från ett djup på 50 mm. Denna teoretiska beräkning reflekterar inte verkligheten då parametrar som blandning och vakuum inte tas i beaktande. Viskositeten som beräkningen är räknad med är också relativt låg jämfört med polyuretan och andra hartser som Fenol-resorcinol-formaldehyd (PRF) som har en viskositet på 1100 mPa s (Afendi et al., 2005). Det som den teoretiska beräkningen betonar är den långa tiden för bubblornas borttagning.

En höjning av temperaturen ökar risken för förångning under vakuumbehandlingen (Sul et al., 2012). Sul et al. (2012) betonar att tryckskillnaden orsakad av vakuumbehandlingen är en drivande kraft för förångning. Denna förångning leder till en ökad bubbelformning och tillväxten av bubblor. En ökning av temperatur höjer också ångtrycket av ett ämne vilket leder till att flyktiga komponenterna förångas lättare när man utför vakuumbehandling. Detta sker för att tryckskillnaden ökar vilket ökar risken för förångning.

Själva vakuumbehandlingen är en av de effektivaste metoderna för att minska inneslutna bubblorna i ämnet före slutliga härdningen. Dock kan vakuumbehandlingen ge upphov till bubbelformning vid bristfällig tillämpning. Vakuumtrycket och behandlingstiden är kritiska parametrar som påverkar slutliga produkten och dess kvalitet. En schematisk illustration över vakuumbehandlingen presenteras i figur 5.



Figur 5. En klassisk vakuumbehandling utan ytterligare hjälpmedel (Juan et al., 2021), översatt av författaren.

Vid vakuumbehandling följer man principen av Henrys lag där upplösta gasers koncentration följer ett linjärt förhållande med trycket som råder (Afendi et al., 2005). Därför påvisas teorin att upplösta gasers koncentration i absolut vakuum är noll. Afendi et al. (2005) påpekar att en sänkning av trycket kan orsaka tillväxt av bubblor eller kärnbildning i hartsen. Vakuumbehandlingen präglas av behandlingens längd tidsmässigt samt vilket tryck som skall användas. Hartser som epoxihartser kan formgjutas med hjälp av vakuumbehandling för att förbättra kvaliteten av produkten (Oosterom et al., 2020). Det huvudsakliga som Oosterom et al. (2020) svarar på är hur man effektivt kan minska på bubbelformningen och tomrummen i hartser. Under kortare tidsintervall har vakuumtrycket större inverkan. Vakuumtrycket har en stor inverkan i borttagningen av bubblor, Oosterom et al. (2020) behandlar 5 mbar, 15 mbar och 50 mbar. Oosterom et al. (2020) konstaterar att man med vakuumtryck under 5 mbar når högsta effektiviteten på borttagningen av bubblor. Vakuumtrycket spelar därför en stor roll vid borttagningen av bubblor. Den problematik som uppstår är praktiskheten. Ett vakuumtryck på 5 mbar är mycket svårt att uppnå, speciellt på en industriell nivå.

Tiden att utföra vakuumbehandlingen är kritisk då det vid formgjutningen inte får finnas bubblor i ämnet. Det som är trivialt är att gaser expanderar då trycket sänks, vilket är problematiskt om materialet som gjutits innehåller bubblor. Som exempel använder Afendi et al. (2005) ett vakuumtryck på 20 mbar som får existerande bubblor att expandera till 50 gånger större. Det är därför viktigt att före detta skede få bubblorna bort ifall formgjutningen utförs med vakuumbehandling. Vid förberedelsen av hartsen är det viktigt att få bubblorna bort från ämnet. Gaser kan redan finnas i hartsen och specifikt vid förberedande skedet av polyuretan.

Luftfuktigheten (RH-%) är en viktig parameter i processmiljön att kontrollera liksom fukten i reaktanterna och de komponenter som tillhör processen. Fukten påverkar direkt på bubblornas formning genom kemiska sidoreaktionen visad i figur 3, där polyuretanets monomer isocyanat reagerar med vatten och urea samt koldioxid bildas (Clemitson, 2011, kapitel 13; Daniel, 2006). Därför är det viktigt att kunna hålla ämnen i en torr omgivning både under lagring samt under de olika skeden i processen. Fukten i reaktanter har en betydande effekt under bildningen särskilt fukt som förekommer i polyolen (Bampouli et al., 2022). Bampouli et al. (2022) undersöker fuktens påverkan i ett hydrofobiskt modifierat etoxylerat uretan (HEUR) system. Polyolens fukt påverkar direkt polymerisationsreaktionen då diisocyanatet reagerar med fukten och urea bildas. Den slutsats som Bampouli et al. (2022) drar är att polyolen bör ha en fuktkoncentration på mindre än 1000 ppm för att undvika sidoreaktionen mellan diisocyanatet och fukten. Detta innebär att fukt i själva omgivningen är kritisk då komponenterna i processen måste innehålla en mycket låg fukthalt. Luftfuktigheten (RH-%) är inte direkt

kritisk men påverkar direkt bubbelformningen ifall fukten når de olika reaktanterna och komponenterna vid lagringskede eller vid blandningsprocessen.

Hällningstekniken är också en av processmiljöns parametrar som har en påverkan på formning av bubblor. Detta är ett kritiskt skede där risken för fysisk luftinneslutning finns. Grunden till hällningstekniken är att minska risken för luftinneslutningen (Clemitson, 2011, kapitel 3). De huvudsakliga faktorerna är att hällningstrålen skall vara tunn och att polyuretanet skall flöda längs formen för att minska risken av luftinneslutning. Det är också viktigt hurudan gjutningsformen är då den orsakar den största problematiken för att hällningen skall vara jämn.

Viskositeten påverkar både bubblornas formning och deras förmåga att diffundera ut ur ämnet. I högviskosa hartser som polyuretan hindras både diffusionen och lyftkraften vilket gör borttagningen av bubblor problematisk. Viskositeten har en direkt påverkan på hur effektivt bubblorna fås bort från massan under de olika skeden av processen (Afendi et al., 2005).

Processtiden påverkar direkt på bubbelformningen och hurudan slutliga produkten blir. För att minska bubblorna i ämnet kan vakuumbehandling användas vilket förlänger processtiden men minskar på samma bubblor i produkten. Processtiden påverkas direkt av temperaturen då den påverkar härdningstiden samt påverkas tiden av hur länge man vill utföra vakuumbehandlingen. Processtiden är en parameter som påverkas av många andra faktorer i processen, men i allmänhet ger en längre processtid bättre produkter.

3.2 Fördjupning i processmiljön och möjliga åtgärder

När man förstår de mest betydande parametrarna i processmiljön och hur de påverkar, kan man fördjupa sig i de delar av processmiljön som anses kritiska och kunde påverkas via åtgärder. Den första parametern i processmiljön som anses kritisk är fukten och i fokus ligger hur fukten kan påverkas. Den andra parametern är bubblornas kinetik vid kärnbildningen och en möjlig åtgärd med kärnbildningsmedel. Tredje parametern är inte direkt en av processmiljöns parametrar men framkommer som ett möjligt problem i polyuretan-system då vakuumtryck används. Därmed är den tredje fördjupningen en riskanalys över förångning av mjukformare som används i PU-system.

Det är viktigt att kunna underhålla en processmiljö som är fuktfri och har torra reaktanter och tillsatsämnen då till och med en låg nivå på fuktigheten kan orsaka problem och den oönskade sidoreaktionen som visats i figur 3. Som Bampouli et al. (2022) konstaterar har polyolens fuktighet på mera än

1000 ppm en drastisk påverkan på bubbelformningen i härdnings- och polymerisationsprocessen. Andra värden som framkommer i den granskade litteraturen för reaktanters fukt är en fukt på 0,05 %, ytterligare presenteras en rekommendation på 0,03 % för att minska risken av sidoreaktionen (Clemitson, 2011, kapitel 8). Dessa värden konverterade till ppm är 500 ppm samt 300 ppm vilka är lägre än gränsvärdet som Bampouli et al. (2022) framför. Det är därför centralt att kontrollera fuktigheten och mäta den under processens olika skeden. Det är speciellt viktigt att redan från förvaring kunna underhålla en låg fuktighet för att minska risken för bubbelformning (Clemitson, 2011, kapitel 8).

Vid förvaring måste polyolen, isocyanaten, andra komponenter och tillsatsämnen kunna underhållas under låg fuktighet. Polyolen bör ha en fuktighet på mindre än 1000 ppm (Bampouli et al., 2022). Ett sätt att förvara ämnen där syftet är att underhålla torrheten är genom att använda en inert gas som reaktanterna och ämnen behandlas med. En gas som används är kvävgas för att skapa ett skikt på ytan av ämnen som förhindrar komponenterna och reaktanterna att komma i kontakt med fukt (Bampouli et al., 2022; Clemitson, 2011, kapitel 8). Vid användning av kvävgas betonar Bampouli et al. (2022) att kvävgasen insätts på ytan av matrisen direkt efter vakuumbehandlingen, för att skapa ett inert skikt som förhindrar absorbering av fukt. Användning av en inert gas är därför väsentligt då det gäller förhindrandet av fukt samt underhållandet av torrheten. Ytterligare kunde inert gas användas i de olika processinstrumenten och kärlen för att behålla en torrhet. Detta kunde användas före blandningsskedet eller härdningsskedet. Detta skulle kunna minska eller förhindra fukt och isocyanat att reagera samt polyol att absorbera fukt. För att kunna granska fukten i de olika reaktanterna samt matrisen kan man använda analytiska metoder för att mäta fukten. I Clemitson (2011, kapitel 8) framkommer en specialiserad analytisk metod som heter Karl Fischer-metoden. Metoden är vanlig inom processer kring polyuretan och är en typ av potentiometrisk titrering som utnyttjar en jod- och svaveldioxidlösning för att mäta fukten. Denna metod används för att mäta fukten av råvarorna, särskilt i polyolen och isocyanatet.

Under blandningen av matrisen och vid vakuumbehandlingen är kärnbildningen väsentlig för att kunna förstå bubblornas kinetik. De bubblor som formas och växer har antingen ursprung från en homogen kärnbildning eller heterogen kärnbildning enligt (Sul et al., 2012). För att kontrollera denna kinetik kan kärnbildningsmedel användas för att påverka storleken och fördelningen av bubblor. Kontrollerad kärnbildning kan utnyttjas för att tvinga bubblor att formas och diffunderas ut från materialet. Kärnbildningen kan kontrolleras genom att införa kärnbildningsmedel (Juan et al., 2021). Juan et al. (2021) framför att tillämpningen av porösa fasta ämnen, eller kärnbildningsmedel, minskar hartsers bubblor under vakuumbehandling upp till 72

% jämfört med om endast vakuumbehandling skulle ha använts. Idén med dessa medel är att försnabba bubbelformningen och därmed minska mängden bubblor i den slutliga produkten. I gjutning av polyuretan och system med hög viskositet är det lika relevant att kontrollera kärnbildningen. Kärnbildningsmedel är fasta porösa ämnen med flera centrum för kärnbildning (Oosterom et al., 2020). Ett allmänt kärnbildningsmedel som kan användas är "Scotch-Brite", ett svampaktigt material som möjliggör kärnbildning (Afendi et al., 2005; Oosterom et al., 2020). Oosterom et al. (2020) framför att detta kärnbildningsmedel minskar på diffunderade syrebubblorna i ämnet med 14 % och 4 % under vakuumtryck på 15 mbar och 50 mbar jämfört med endast en vakuumbehandling. Det som dock konstateras är att då ett tryck på 5 mbar råder har kärnbildningsmedlet ingen betydlig påverkan. Ett annat kärnbildningsmedel som även framkommer är talk, ett poröst material med flera kärnbildningscentrum (Brondi et al., 2022). Till motsats från de andra artiklarna vill Brondi et al. (2022) att bubblor framkommer i materialet i detta fall ett skumaktigt polyuretan. Det som uppnås med kärnbildningsmedlet här är en jämn struktur av bubblor i materialet då kärnbildningen induceras av medlet. Syftet med kärnbildningsmedlen är att påskynda bubbelformningen med hjälp av kärnbildning för att undvika bubblornas inneslutning i materialet under härdningen av ämnet.

Under vakuumbehandlingen framkommer en risk att flyktiga ämnen i processen förångas på grund av tryckskillnaden (Sul et al., 2012). Det är viktigt att granska möjligheten för flyktiga komponenter i processen att avdunsta under vakuumbehandlingen. Polyuretanet i gjutningsprocessen är mycket trögflytande på grund av den höga viskositeten. En vanlig åtgärd är att försöka minska på viskositeten för att underlätta processens olika skeden speciellt formgjutningen. För att minska viskositeten används mjukningsmedel eller mjukformare för polymerbundna sprängämnen (Daniel, 2006). Daniel (2006) framför mjukformare som vanliga komponenter i PBX-system. De mjukformare som framkommer är bland annat dioktyladipat (DOA) och dioktylsebacat (DOS) samt andra organiska lösningsmedel. DOA är också ett medel som ofta tillämpas som en vanlig mjukformare i PU-system (Elbeih et al., 2021). Dessa flyktiga komponenter kännetecknas av deras långa kolkedjor och användning som mjukformare i även andra plaster. På grund av denna allmänna struktur på mjukformare kan man konstatera att en hög kokpunkt för mjukformare krävs för att risken för avdunstning inte skulle vara relevant. För att undersöka risken för dessa komponenter att avdunsta under vakuumbehandling så jämför man med litteratur som internationella kemikaliesäkerhetskort.

DOS-oljan har ett förångningstryck på 0,000024 Pa vid 37 °C (Internationella arbetsorganisationen (ILO), 1998). Detta överfört till mbar blir 0,00000024 mbar, vilket kan konstateras vara mycket lågt. Till jämförelse

kan man använda realistiska trycket av 5 mbar (Oosterom et al., 2020) och därmed kan man konstatera att DOS-oljan inte har risk att förångas vid vakuumbehandlingen. DOA-oljan har ett förångningstryck på 0,11 kPa vid 20°C (Internationella arbetsorganisationen (ILO), 2009). Detta överfört till mbar blir 1,1 mbar, vilket är ett lågt tryck men inte lika lågt som DOS-oljan. Jämfört med det realistiska trycket som används vid vakuumbehandling kan man lyfta upp en liten risk för DOS-oljan att förångas vid ett mycket lågt tryck. Därmed kan man konstatera på basen av dessa förångningstryck att det är mycket osannolikt att de flyktiga mjukformarna skulle ha en roll i bubbelformningen. Därför kan man utesluta dessa flyktiga komponenter från risken för bildning av bubblor under vakuumbehandlingen. Däremot skulle en närvaro av fukt i form av vatten i ämnet under vakuumbehandlingen framföra en risk för förångning under vakuumbehandling. Vattnets förångningstryck vid 25 °C är 0,031697 Bar (Process Contact Skandinavia AB, u.å.), i mbar är det 31,697 mbar vilket påvisar en förångningsrisk vid vakuumbehandling ifall vatten framkommer.

För att vara säker att detta inte är en betydande faktor kan man använda processmetoder som en stegvis vakuumbehandling. Som Sul et al. (2012) rekommenderar är en stegvis vakuumbehandling ett förebyggande medel för att minska risken för förångning av flyktiga komponenter. För att ytterligare förebygga bubbelformning kan en kombination av vakuumbehandling samtidigt som omrörning eller användning av kärnbildningsmedel tillämpas (Juan et al., 2021). Som ett tillägg framför Bampouli et al. (2022) idén av ett system, HEUR-system, där man inte utnyttjar flyktiga komponenter eller mjukformare. Här framkommer ett alternativ om att utesluta flyktiga komponenter i processen under vakuumbehandlingen för att kunna framföra ett stabilt vakuum utan förångning. Detta har uttryckts endast på teoretisk nivå då ett mycket trögflytande ämne inte är praktiskt att behandla.

3.3 Tillämpade metoder

För att kunna framställa ett slutligt material som innehåller en minimal andel bubblor är det viktigt att utforska möjliga metoder. Som tillämpade metoder ligger fokuset vid omrörningsteknik. Kontrollerad användning av vibrationer under olika delar av processen kan minska andelen bubblor i matrisen och slutprodukten (Muric-Nesic et al., 2011, 2009; Reddy och Aparna, 2011). En annan metod baserar sig på att tillämpa centrifugalkraft under formgjutningsprocessen för att jämnt kunna formgjuta matrisen i den form som används och påskynda borttagningen av bubblor (Clemitson, 2011, kapitel 3; Mazzeo et al., 2012). Det mest centrala skedet är vakuumbehandlingen och hur man kan kombinera vakuumbehandlingen med andra

metoder för att minska bubblor i materialet (Juan et al., 2021; Oosterom et al., 2020).

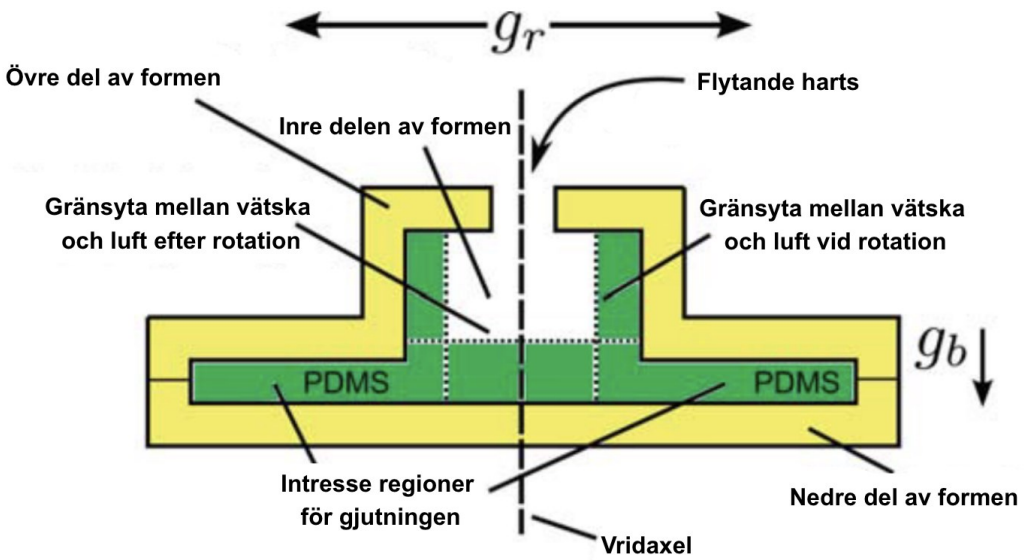
Kontrollerade vibrationer grundar sig på att få bubblorna att diffundera snabbare bort från materialet. Att introducera en kontrollerad tillämpning av vibrationer kan minska bubblorna i material under formgjutningen i ett polymer-system. Vibrationerna är ljudvågor vars frekvenser varierar mellan 0 Hz och 40 000 Hz. De frekvenser som visar mest effektiv borttagning av bubblor är enligt Muric-Nesic et al. (2011) låga frekvenser i intervallet 5 – 50 Hz. Den optimala frekvensen påvisades vara 10 Hz och med en tillämpad användning under formgjutningen minskade det härdade materialets bubblor upp till 60 % jämfört med att inte använda vibration (Muric-Nesic et al., 2011). I formgjutningen fungerar vibrationerna som hjälpmedel för att styra bubbelformningen och få bubblor att växa och stiga snabbare till gränsytan för att ta sig ut från materialet. Det som Muric-Nesic et al. (2011) förklarar är en kombination av diffusionsdrivna tillväxten av bubblor och att bubblorna når ytan snabbare när vibrationerna är nära systemets naturliga frekvens.

Frekvensen av vibrationerna är den centrala faktorn som kan ändras för att få en betydlig minskning av bubblorna. Frekvensen och amplituden har en betydande roll under hällningen av materialet i formen (Reddy och Aparna, 2011). En ökning av frekvensen leder till mindre bubblor i materialet enligt Reddy och Aparna (2011), vilket är annat än det Muric-Nesic et al. (2011) framförde. Reddy och Aparna (2011) jämför med två frekvenser, där den lägre är 3000 Hz och högre är 6000 Hz. Skillnaden mellan artiklarna är även vid det undersökta materialet där Muric-Nesic et al. (2011) behandlar hartser som epoxihartsen medan Reddy och Aparna (2011) behandlar polyvinylsiloxan (PVS) som är en typ av silikon. Därför kan man inte direkt säga vilka frekvenser som är effektivast att använda för att minska bubblorna. Dock behandlar Muric-Nesic et al. (2011) mer liknande material till polyuretan, varför man kan föredra lägre frekvenser som mera effektiva i minskningen av bubblor.

Optimering av vibrationens frekvens är viktig att förstå och beror på systemet som behandlas. På basen av det som Muric-Nesic et al. (2011) påpekar får man bästa resultatet med att använda den lägsta naturliga frekvensen för ett system. Därför vore det viktigt att anpassa frekvensen för olika system och gjutningsformer för att hitta den lägsta naturliga frekvensen. Det kan även vara orsaken till skillnaden mellan artiklarnas resultat då Reddy och Aparna (2011) inte tar i beaktande systemets naturliga frekvens. Det som kan konstateras från artiklarna är att användningen av vibrationer minskar bubblorna i material. Därför kunde vibrationer tillämpas vid formgjutning av polyuretan. En tillämpning av vibrationer effektiviseras ytterligare genom att kombinera det med andra metoder, som vakuumbehandling (Sul et al.,

2012), för att effektivt minska bubblor i materialet. Vibrationer kunde även användas under blandningsskedet eller under gjutningen av polyuretanet. Därför kunde tillämpningen av vibrationer minska bubblorna i polyuretanet.

En annan metod för att minska bubblorna i materialet är centrifugal formgjutning. Centrifugal formgjutning är en metod som används för att minska bubblorna under formgjutningen. Metoden grundar sig på att använda rotation för att skapa centrifugalkraft som minskar bubbelmängden i materialet. Centrifugalkraften tvingar gjutna hartsen till alla delar av formen, påskyndar diffusionen av mindre bubblor och ökar lyftkraften av större bubblor (Mazzeo et al., 2011). För att effektivisera bubblornas borttagning är det viktigt att minst uppnå en rotationshastighet på 3,6 m/s (Clemitson, 2011, kapitel 3). Den fysiska effekten som centrifugala formgjutningen skapar är en ökad lyftkraft då dragkraften ökar i materialet mot väggarna. Denna dragkraft får bubblor att framskrida snabbare mot mittpunkten av rotationen genom lyftkraften än om formen vore stillastående. Centrifugala formgjutningens fördel är att den gjutna massan når effektivare alla delar av en form, speciellt då formen som gjuts är mera komplex. I figur 6 presenteras en illustration av centrifugal formgjutning av polydimetylsiloxan (PDMS) där hällningen når alla delar av formen.



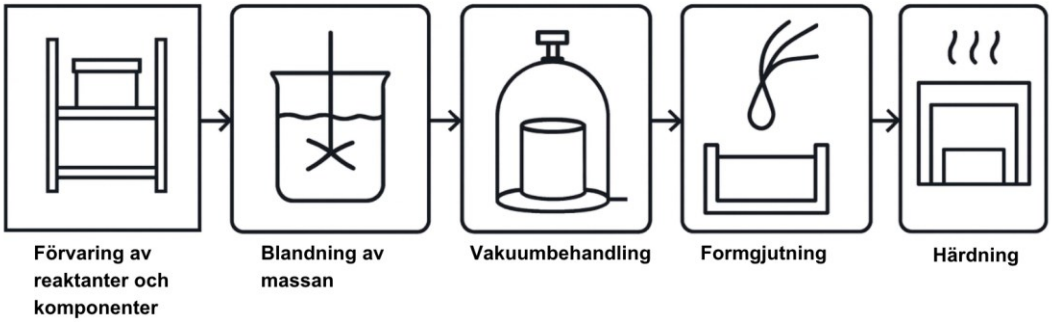
Figur 6. Centrifugal formgjutning av en form som roteras runt en vridaxel. Parametrarna g_r och g_b representerar accelerationer orsakade av centrifugal- och gravitationskraft (Mazzeo et al., 2011), översatt av författaren.

En problematik som rotationen medför är dess användning på industriell nivå. Det är svårt att uppnå tillräckligt höga rotationshastigheter samtidigt som man häller materialet i den roterande formen. Det är även svårt att kombinera vakuum med centrifugal formgjutning på industriell nivå. För att

använda centrifugal formgjutning på en industriell nivå skulle det krävas flera steg av förberedning och kontrollering. Det är därför viktigt att betona de fysiska principer som metoden lyfter fram om borttagningen av bubblor.

3.4 Den praktiska processmiljön

De praktiska stegen i processmiljön kring formgjutning av polyuretan berör flera steg under processen. Stegen i processen kan delas in i förvaring av reaktanter och komponenter, blandning av massan, vakuumbehandling, formgjutning och slutligen härdning av polyuretan (Clemitson, 2011). De praktiska åtgärderna som utförs i varje skede av processen påverkar direkt bubblornas beteende och därmed produkten som bildas. För att kunna tillämpa den teoretiska förståelsen av processmiljön till den praktiska är det viktigt att utföra stegvis genomgång av den praktiska processmiljön samt vilka faktorer råder under de olika skeden. En schematisk illustration över de praktiska processmiljöns skeden presenteras i figur 7.



Figur 7. De olika skeden i den praktiska processmiljön, skapad i Canva.

Under förvaringen och förberedning av reaktanter och komponenter är fukt, tid och temperatur i processmiljön rådande faktorer som bör kontrolleras (Clemitson, 2011). Av dessa faktorer är fuktkontrollen den viktigaste faktorn att kontrollera för att kunna minska bubblor i processen och det slutliga polyuretanet (Bampouli et al., 2022; Clemitson, 2011, kapitel 8). Denna parameter är kritisk då det påvisats att isocyanat reagerar med vatten enligt sidoreaktionen i figur 3 och bildar koldioxid (Bampouli et al., 2022; Clemitson, 2011; Daniel, 2006). Temperaturen påverkar förvaringen då luftfuktigheten påverkas indirekt av temperaturen. Temperaturen påverkar även förvaringen av de olika komponenterna, speciellt stabila prepolymerer, där hållbarhetstiden varierar beroende på temperaturen (Clemitson, 2011, kapitel 2). Tiden för förvaringstiden är en påverkande faktor då en längre förvaringstid ökar risken för inträngning av fukt samt gör det svårare att behålla torrheten i de olika komponenterna och reaktanterna. Tiden kopplas direkt till

hållbarhetstiden av olika komponenter som Clemitson (2011, kapitel 2) visade. För att förebygga inträngningen av fukt till systemet kan inerta gaser användas under förvaringen för att minska luftbubblor (Bampouli et al., 2022; Clemitson, 2011, kapitel 8). Fukten kan mätas med olika analytiska metoder för att kunna kontrollera fukthalten av de olika komponenterna. Temperaturen är även viktig att kontrollera då det påverkar viskositeten, hållbarhetstiden samt fukten.

Under tidig blandning av massan, det vill säga matrisen utan isocyanat, är omrörningshastighet, viskositet och temperatur påverkande parametrar i processmiljön (Afendi et al., 2005; Lee et al., 2015). Omrörningshastigheten påverkar direkt luftbubblornas i ämnet då för höga omblandningshastigheter kan orsaka turbulens som bidrar till bubblorna i massan. För snabba omrörningar kan bilda mikrobubblor samt inneslutna luft från processmiljön (Afendi et al., 2005). Viskositeten påverkar direkt bubbelandelen i massan då en högre viskositet både försvårar blandningen samtidigt som den skapar problem för bubblornas borttagning från massan. Temperaturen är en påverkande processparameter då en ökning av temperaturen minskar viskositeten. En höjning av temperatur ökar risken för att polymerisationen skall ske för snabbt då isocyanat tillagts till matrisen (Lee et al., 2015). Blandningen av massan bör därför ske i en kontrollerad processmiljö där omrörningshastighet, utrustning och temperatur granskas för att kunna förebygga och minska bubbelformningen samt luftinneslutningen.

Vakuumbehandlingen är inte direkt ett steg i processen utan en metod som tillämpas under olika skeden av processen, till exempel under blandningen och formgjutningen av polyuretan (Clemitson, 2011; Daniel, 2006). De faktorer som påverkar vakuumbehandlingen är vakuumtrycket, temperaturen och tiden. Trycket i vakuumbehandlingen är den viktigaste faktorn att kontrollera då en effektiv användning av vakuum kan minska bubblorna i massan betydligt. Då upplösta gaserna och inneslutna luften följer i allmänhet Henrys lag. Detta innebär ett linjärt samband mellan trycket som råder och gaserna i ämnet, där ett lägre tryck ger en lägre gas- och lufthalt (Afendi et al., 2005; Oosterom et al., 2020). Ett lägre tryck framför en risk för förångning av flyktiga komponenter (Sul et al., 2012). De flyktiga komponenterna i polyuretan-system är mjukformande oljor (Daniel, 2006). Mjukformarnas långa kolkedjor ger dem ett väldigt lågt förångningstryck, till exempel mjukformare som DOS- och DOA-oljan (Internationella arbetsorganisationen (ILO), 2009, 1998). Risken för dessa mjukformare att förångas som resultat av vakuumbehandlingen är mycket liten. Därför kan det konstateras att förångningen av mjukformare inte är en relevant faktor för bubbelformningen. Däremot kan man påpeka att fukt i form av vatten tillför en risk för förångning under vakuumbehandlingen. Därför är det viktigt att utesluta fukt före vakuumbehandlingen. Temperaturen påverkar de olika

förångningstrycken direkt vilket är varför temperaturen bör hållas kontrollerad och jämn. En högre temperatur ger en lägre viskositet men ökar risken för förångning. Ifall man kan påvisa att ingen fukt är närvarande i massan kan temperaturen höjas för att underlätta bubblornas borttagning från massan. Tiden för vakuumbehandlingen påverkar processen då den måste vara tillräckligt lång för att all gas och inneslutna luft skall hinna borttas från massan (Afendi et al., 2005). Under vakuumbehandlingen är det viktigt att ha ett kontrollerat och lågt vakuumtryck, en kontroll på temperaturen samt låta vakuumbehandlingen råda i en tillräckligt lång tid för att effektivisera vakuumets påverkan. Som tillägg kan användning av kärnbildningsmedel (Afendi et al., 2005; Oosterom et al., 2020) hjälpa borttagningen av bubblor.

Under formgjutningen sker en hällning av massan i formen och polyuretanet börjar härdas. Här är hastigheten av hällningen, viskositeten, temperaturen samt formen som gjuts påverkande faktorer i processmiljön. Hällhastigheten är viktig att kontrollera. En rekommenderad hällningsteknik för att minimera risken för luftinneslutning sker med en jämn hällhastighet och en tunn stråle längs formens väggar (Clemitson, 2011, kapitel 3). Viskositeten påverkar formgjutningen direkt då en hög viskositet gör att tiden för hällningen blir längre och risken för luftinneslutning högre. Temperaturen påverkar viskositeten men förkortar härdningstiden då temperaturen är högre (Lee et al., 2015). Formen som gjuts påverkar mycket hur kontrollerad hällning som krävs, en mera komplex form gör att massan når svårare varje del av formen speciellt då polyuretan har en högre viskositet. Formen bör ha någon form av ventil för att luft skall kunna ta sig ut från andra ställen än mynningen varifrån massan hälls (Oosterom et al., 2020). Med användningen av en ventil minskar man därmed risken för luftinneslutningen. En användning av vakuum under formgjutningen kan hjälpa förebyggandet av luftinneslutning vid hällningen. Under formgjutningen kan även en tillämpning av vibrationer, speciellt vibrationer med frekvensen 5 - 50 Hz, användas för att förbättra fyllningen av formen (Muric-Nesic et al., 2011).

Under härdningen är de viktigaste parametrarna i processmiljön temperaturen och tiden. Temperaturen styr polymerisationens hastighet och därmed påverkar den härdningstiden. Tiden för härdningen påverkar ifall bubblor hinner borttas innan polyuretanet antar fasta materialegenskaper (Lee et al., 2015). Vid härdningen värms formen upp stegvis till en härdningstemperatur (Clemitson, 2011, kapitel 3). Vid en för snabb uppvärmning kan kvarvarande gaser expandera och bilda bubblorna i materialet (Sul et al., 2012). En kontrollerad härdning sker stegvis med att börja från lägre temperaturer och värma upp polyuretanet till en slutlig härdningstemperatur. För ett HTPB/IPDI-system med användning av TPB-katalysator som studerats av Lee et al. (2015) var den exoterma härdningstemperaturen omkring 180–240 °C beroende på uppvärmningshastighet. Härdningstemperaturen för

polyuretan varierar beroende på system men det som är viktigt är att använda lämpliga temperaturer och tider för härdningen för att minska bubblorna i det härdade polyuretanet.

4 Slutsats och sammanfattning

Arbetet har behandlat hur processmiljön vid formgjutning av polyuretan påverkar bildningen av bubblor. I fokus har varit att förstå sambanden mellan de kemiska reaktionerna, de fysiska förutsättningarna och de praktiska processtegen som styr slutproduktens bubblor. Som mål har arbetet strävat att besvara forskningsfrågan: Inverkar processmiljön på bubblornas formning vid formgjutning av polyuretan? Enligt litteraturstudien som arbetet utfört är svaret på forskningsfrågan, ja. Resultatet från arbetet visar att en väl kontrollerad processmiljö är avgörande för att erhålla ett bubbelfritt polyuretan, särskilt i system som polymerbundna sprängämnen (PBX), där även små bubblor påverkar kvaliteten.

Arbetet har behandlat de olika parametrarna i processmiljön samt hur var och en påverkar bubbelformningen. Genom att använda litteratur som behandlar polyuretan eller jämförbara hartser har arbetet skapat sambandet mellan bildningen av bubblor och processmiljön. Arbetet har konstaterat att alla parametrar som behandlats har en påverkan på bildningen av bubblor i processen. Dessa parametrar i processmiljön har varit temperatur, luftfuktighet (RH-%), vakuumtryck, viskositet, gjutning och processtid. Som fokus har arbetet även haft att försöka lyfta fram de mest kritiskt påverkande parametrar ur processmiljön. Som resultat har arbetet lyft fram fukten samt vakuumbehandlingens vakuumtryck som de främst kritiska parametrarna i processmiljön. Fuktens roll har konstaterats som central i bildningen av bubblor i polyuretan-system. Arbetet har visat att närvaro av vatten i polyolen eller omgivande luften leder till en gasbildning genom en sidoreaktion mellan isocyanat och vatten. Arbetet har lyft fram gränser för fukten i reaktanter mellan 300 ppm och 1000 ppm, där den högre gränsen är ett tröskelkrav speciellt för polyolen för att uppnå bubbelfri process. Slutsatsen för fukten är att behålla en så låg fukt som möjligt, fukten bör inte överskrida 1000 ppm men den rekommenderade fukten är kring 300 ppm för alla reaktaner och komponenter.

Arbetet har ytterligare hanterat vakuumtrycket under vakuumbehandlingen som en kritisk parameter i processmiljön. Arbetet har lyft fram olika tryckintervall mellan allt mindre än 5 mbar och 50 mbar. Arbetet har påvisat vakuumbehandlingen som en kritisk metod för borttagningen av bubblor men även risken den framför genom förångningen av flyktiga komponenter. Resultatet visar att lägre vakuumtryck ger enligt Henrys lag mindre gas eller bubblor i systemet. Som praxis har tiden även lyfts upp under vakuumbehandling där en tillräckligt lång tid är central för steget. En uteslutning som arbetet visat är att flyktiga komponenter som används i polyuretan-system, exempelvis mjukformare som DOS- och DOA-oljan, inte spelar en roll i bubbelformningen under vakuumbehandling. På grund av dessa ämnens låga

ångtryck förångas de inte vid vakuumtryck som används i industrin (5 – 50 mbar). Därmed kan komponenterna i polyuretan-systemet uteslutas som faktorer till bubbelformningen under vakuumbehandling. Därför bör ett lågt vakuumtryck användas, kring 5 mbar, för att minska bubblor mer effektivt. Risken för förångning under vakuumbehandling framkommer då vatten i form av fukt finns närvarande i systemet.

Arbetet har även behandlat möjliga åtgärdande tekniker och metoder, för de olika skeden i processen, med målet att minska på bubblorna i polyuretanet. Olika tekniska åtgärder har behandlats, exempelvis torrbeläggning av reaktanter med inert gas samt kontrollering av komponenternas fukthalter med analytiska metoder som Karl Fischer-titrering. Ytterligare har åtgärdande metoder behandlats, exempelvis tillämpningen av vibrationer och användning av kärnbildningsmedel som vardera visat minskning av bubblor i slutprodukten. Praktiska tekniker i processmiljön har även behandlats där kontrollen av de övriga processparametrarna lyfts fram, exempelvis temperaturen, processtiden, hällning under formgjutningen och blandnings tekniker. Dessa olika tekniker samt metoder möjliggör en kontrollerad formgjutningsprocess av polyuretan från lagring till härdning.

Därmed framstår processmiljöns roll som avgörande för bubblornas uppkomst i polyuretan. Genom att kontrollera fukten, vakuumbehandlingen, processtiden, temperaturen, och optimera de mekaniska processtegen är det möjligt att minska mängden bubblor i polyuretangjutningar. De praktiska tillämpningarna av dessa kontrollerade processteg gör det möjligt att skapa polyuretanprodukter med minimal mängd bubblor.

Källor

Afendi, M., Banks, W.M., Kirkwood, D., 2005. Bubble free resin for infusion process. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 36, 739–746. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.10.030

Bampouli, A., Tzortzi, I., de Schutter, A., Xenou, K., Michaud, G., Stefanidis, G.D., Van Gerven, T., 2022. Insight Into Solventless Production of Hydrophobically Modified Ethoxylated Urethanes (HEURs): The Role of Moisture Concentration, Reaction Temperature, and Mixing Efficiency. ACS Omega 7, 36567–36578. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04530

Brondi, C., Santiago-Calvo, M., Di Maio, E., Rodríguez-Perez, M.Á., 2022. Role of Air Bubble Inclusion on Polyurethane Reaction Kinetics. Materials 15. https://doi.org/10.3390/ma15093135

Clemitson, I.R., 2011. Polyurethane Casting Primer. CRC Press. ISBN 978-1-4398-7922-1

Daniel, M.A., 2006. Polyurethane binder systems for polymer bonded explosives (DSTO-GD-0492). Defence Science and Technology Organisation, Weapons Systems Division. Tillgänglig: https://apps.dtic.mil/sti/html/tr/ADA467800/ [Hämtad: 12.9.2025]

Elbeih, A., Abdelhafiz, M., Hussein, A.K., 2021. Influence of Different Polymeric Matrices on the Properties of Pentaerythritol Tetranitrate. Defence Science Journal 71, 177–184. https://doi.org/10.14429/dsj.71.16132

Internationella arbetsorganisationen (ILO), 1998. ICSC 1290 - DI(2-ETHYLHEXYL) SEBACATE. Tillgänglig: https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1290&p_edit=&p_version=2&p_lang=en [Hämtad: 20.10.2025]

Internationella arbetsorganisationen (ILO), 2009. ICSC 1292 - DIOCTYL ADIPATE. Tillgänglig: https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1292&p_edit=&p_version=2&p_lang=en [Hämtad: 20.10.2025]

Juan, J., Silva, A., Tornero, J.A., Gámez, J., Salán, N., 2021. Void Content Minimization in Vacuum Infusion (VI) via Effective Degassing. Polymers 13, 2876. https://doi.org/10.3390/polym13172876

Kovel, C.B., Perine, H., Chirik, P.J., Mohadjer Beromi, M., 2025. Synthesis, Properties, and Metathesis Activity of Polyurethane Thermoplastics and Thermosets from a Renewable Polysesquiterpene Diol. Macromolecules 58, 8235–8248. https://doi.org/10.1021/acs.macromol.4c02436

Lee, S., Choi, J.H., Hong, I.-K., Lee, J.W., 2015. Curing behavior of polyurethane as a binder for polymer-bonded explosives. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 21, 980–985. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.05.004

Luangpaiboon, P., Juttijudata, S., 2021. Air bubble reduction in epoxy resin casting process for CNC industries. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 10, 478–484. https://doi.org/10.18178/ijmerr.10.9.478-484

Mazzeo, A.D., Lustrino, M.E., Hardt, D.E., 2012. Bubble removal in centrifugal casting: Combined effects of buoyancy and diffusion. Polymer Engineering & Science 52, 80–90. https://doi.org/10.1002/pen.22049

McClain, M.S., Gunduz, I.E., Son, S.F., 2019. Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings. Proceedings of the Combustion Institute 37, 3135–3142. https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.052

Muric-Nesic, J., Compston, P., Noble, N., Stachurski, Z.H., 2009. Effect of low frequency vibrations on void content in composite materials. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 40, 548–551. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.11.010

Muric-Nesic, J., Compston, P., Stachurski, Z.H., 2011. On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42, 320–327. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.011

Oosterom, S. van, Schreier, A., Battley, M., Bickerton, S., Allen, T., 2020. Influence of dissolved gasses in epoxy resin on resin infusion part quality. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 132, 105818. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105818

Process Contact Skandinavia AB, u.å. PumpHandboken. Tillgänglig: http://pumpportalen.test/pumphandboken/ [Hämtad: 5.11.2025).

Reddy, N.K., Aparna, I., 2011. Effect of frequency and amplitude of vibration and role of a surfactant on void formation in models poured from polyvinyl siloxane impressions. Journal of Conservative Dentistry and Endodontics 14. https://doi.org/10.4103/0972-0707.82620

Sul, I.H., Youn, J.R., Song, Y.S., 2012. Bubble development in a polymeric resin under vacuum. Polymer Engineering & Science 52, 1733–1739. https://doi.org/10.1002/pen.23112

Szydło, K., Stolarczyk, A., Jarosz, T., Lisiecka, B., Waśkiewicz, S., Lukaszkowicz, K., Gołombek, K., Polis, J., Polis, M., 2025. Effect of Silicone Rubbers on the Properties of RDX-Based PBXs and Their Application in the Explosive Hardening of Steel. Materials 18. https://doi.org/10.3390/ma18102311