



Genanvendelige emballage af monoplast Trykbare svejselag

MUDP Rapport

December 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:
Teknologisk Institut
Plast og Emballage

Fotos:
Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-687-6

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Baggrund	5
1.1	Kort beskrivelse af projektet	5
1.2	Projektets idé	5
1.3	Projektets formål	5
2.	Laminatemballage	7
2.1	Generelt	7
2.2	Fleksible emballager	7
2.3	Svejeegenskaber	9
2.4	Barriereegenskaber	9
2.5	Plastemballage til fødevarekontakt	11
2.6	Andre egenskaber	12
3.	Teknologier til fremstilling af fleksible emballager i samme polymer	14
3.1	Svejsning i almindelige pakkemaskiner	14
3.1.1	Hæve svejsetemperaturen	17
3.1.2	Trykte svejselag	18
3.1.3	Etablering af tæthed	18
4.	Trykte svejselag med PE-partikler	22
4.1	Indledning	22
4.2	Udvikling og tilpasning af udstyr til atomisering af plast	23
4.3	Teoretiske overvejelser over atomiseringsprocesser	24
4.3.1	Hydraulisk forstøvning	24
4.3.2	Atomisering med plasma- og laserteknikker	25
4.3.3	Ultrasonisk dyse	26
4.4	Overflademodificering af PE-partikler for bedre dispersion i vand	27
4.4.1	Materialer og udstyr	27
4.4.2	Procedure	27
4.4.3	Analyse af pakningstæthed og lagtykkelse	29
4.4.4	Svejeegenskaber	30
4.4.4.1	Svejsestyrke af solvent castede svejselag	31
4.4.5	Trykke og svejsetest af PE-partikelbaserede formuleringer i løbende baner	32
4.4.6	Trykning og genanvendelsesforsøg	33
4.5	Konklusion	37
5.	Trykte svejselag med PETG-partikler	39
5.1	Introduktion	39
5.2	Partikelpræparation	39
5.3	Test af svejeegenskaber	40
5.4	Formulering af vandige og alkoholbaserede systemer	40
5.5	Svejsetest af formulerede systemer og in-line-test af bearbejdning	40
5.6	Konklusioner baseret på testene	41
6.	Trykte svejselag med svejselag	43
6.1	Introduktion	43

6.2	Svejselak	43
7.	Alternative svejseløsninger	45
7.1	Svejsning af PET uden svejselag	45
7.2	Alternativ plasttype end PET	46
8.	Trykteknologier	47
8.1	Silketryk	47
8.2	Flexografi	48
8.3	Offset	49
8.4	Dybtryk	50
8.5	Ink-jet	50
8.6	Oversigt over trykteknologier	51
9.	Svejseforsøg	52
9.1	Branchekutyme og formål	52
9.2	Forsøgsplan	52
9.3	Forsøgsresultater	55
10.	Svejseudfordringen i pakkemaskinerne	61
10.1	Svejseudstyr på flowpakkemaskiner	61
10.1.1	Langsgående svejsning	62
10.1.2	Tværgående svejsninger (Top og bund)	63
10.2	Indkøb af film	64
10.3	Udfordringen med svejsekæber til top- og bundsvejsninger	64
10.3.1	Andre plastmaterialer	64
10.3.2	PET-svejsning uden svejselag	65
10.3.3	Fleksible svejsekæber	65
10.3.4	Svejsekæber formgivet efter emballagen	67
10.3.5	Bølgeformede top- og bundsvejsninger	67
10.4	Styring af PET-materialets struktur	67
11.	Forsøg med rengøring af brugte emballager	68
11.1	Forsøgsplan	68
11.2	Resultater af de cykliske forsøg	68
12.	Vurdering af projektets resultater	69
12.1	Evaluering af projektets målsætning	69
12.2	Mulighederne for at fremstille fleksible emballager i monoplast	69
12.2.1	Svejsekæber formet efter emballagens overflade	69
12.2.2	Elastiske svejsekæber	69
12.2.3	Svejsekæber med kølezoner	69
12.2.4	Alternative plastmaterialer	70
12.3	Industriel implementering	70
12.4	Udfordringer for genvindingssystemerne	70
12.5	Overordnet konklusion	71
Bilag 1.	PETG-baseret forsegling af PET-folie, resumé	72
Bilag 1.1	Forberedelse og svejsning af PETG-baserede partikler	72
Bilag 1.2	Print af PETG på PET-folie og svejsning	73

1. Baggrund

1.1 Kort beskrivelse af projektet

Plastlaminater bruges meget til fleksible emballager, fordi det er nødvendigt for at beskytte indholdet. Laminaterne kan ikke separeres efter brug, hvorfor genvinding er umulig. Vælges monoplast af PET er det muligt at gøre emballagen tæt med plasmacoating, men PET kan ikke svejses i almindelige pakkemaskiner. Målet med dette projekt, er blandt andre formål også at udvikle et tyndt svejselag, der kan trykkes på filmen på de steder, hvor emballagen skal forsegles. Hermed skabes en mulighed for at fremstille emballager af genvundet PET på virksomhedernes eksisterende produktionsanlæg.

1.2 Projektets idé

Projektets idé, da det blev ansøgt i 2019 var, at i 2025 skal Danmark genanvende yderligere ca. 50.000 tons plastemballage for at nå målsætningen om at genanvende 50 % af den indsamlede plastemballage i direktiv (EU) 2018/852. Størstedelen af dette er fødevareremballage og det vurderes, at 25 % af al denne plastemballage er forseglet ved svejsning eller består af laminater.

Designmanualen fra Plastindustriens forum for cirkulær plastemballage, dogmeregler fra Rethink Plastics projektet, og Design4Recycling guiden fra Der Grüne Punkt har som vigtigste regel overhovedet - at bruge en enkelt plasttype til fremstilling af hele emballagen. Så rykker emballagen op i den grønne kategori, hvor den kan sorteres på centrale anlæg og genanvendes med værdi i en cirkulær økonomi.

Projektet adresserer at gøre 3-5 mio. tons plastaffald værdifuldt på EU-niveau pr. år med en økonomisk værdi på mere end 10 milliarder kroner og en reduceret klimabelastning på 10-20 mio. tons CO₂-ækv.

Plastlaminater bruges meget til fleksible emballager, fordi det er nødvendigt for at beskytte indholdet. Laminaterne kan ikke separeres efter brug, hvorfor genvinding er umulig. Vælges monoplast af PET er det muligt at gøre emballagen tæt med plasmacoating, men PET kan ikke svejses i almindelige pakkemaskiner. Dette projekts mål er at udvikle et tyndt svejselag, der kan trykkes på filmen de steder, hvor emballagen skal forsegles. Hermed skabes en mulighed for at fremstille emballager af 100% PET til det eksisterende PET-genvindingssystem med virksomhedernes eksisterende produktionsanlæg.

I 2018 gennemførte partnere projektet: "Undersøgelse af mulighederne for at udvikle genanvendelige plastfilm til emballage". Målet var at erstatte flerlags-plastfilm med en coatet monoplastfilm fremstillet i samme plasttype. Fordelen ved denne monofilm er en simpel og effektiv affaldshåndtering, samt ikke mindst brugte emballager, der kan genvindes i en cirkulær økonomi. Desuden kan denne nye monofilm erstatte lamineret plastfilm i eksisterende posepakkemaskiner og andre pakkemaskiner til fleksibel emballage.

Der blev på laboratoriebasis fundet frem til en løsning i 100% PET eller rPET, hvor genvundet plast fra brugte emballagefilm kan genvindes til ny emballagefilm.

1.3 Projektets formål

Formålet med dette projekt er at videreudvikle ovenstående projekts resultater fra laboratorieniveau til demonstration i et industrielt miljø, hvor det efterfølgende slutmål er at udvikle industrielt udstyr til at fremstille genanvendelige plastfilm i monoplast til fleksibel emballage.

De fleste enkeltkomponenter i et sådant emballagesystem findes på markedet fx laminering af en monoplastfilm, hvor den recirkulerede plast lamineres under et nyt plastmateriale eller et

fødevarer godkendt recirkuleret plastlag. Desuden er coatede plastfilm, hvor et plasmalag giver en meget tæt og stort set transparent film, allerede kommercielt tilgængelig. Udfordringen er, at der skal bruges PET-film for at holde filmen gastæt. Desværre så kan PET ikke svejses i almindelige pakkemaskiner.

Dette projekts primære formål er at bringe konceptet for et trykbart svejselag videre fra laboratorietests (TRL2-3) til forsøgsvalidering på laboratorieprocesudstyr, samt en mindre afprøvning på en eksisterende pakkelinje (TRL4-5).

Det langsigtede mål er at kunne fremstille en monoplastfilm til fleksible emballager, der kan genvindes til samme formål. PET er valgt, fordi PET er relativt stærkt og u-elastisk, så en plasma-coating ikke får pinholes når filmen stresses mekanisk, og derfor bliver utæt. Desuden bruges PET i stadig større grad i branchen, fordi det er en både funktionel og billig løsning. Endelig er PET oplagt, fordi det er et af de få plastmaterialer, hvor der er et etableret genvindingsmarked. Udfordringen med PET er, at materialet ikke kan svejses på almindelige pakkemaskiner pga. et højt smeltepunkt.

Ved at trykke svejses materialet partielt på plastfilmen kan svejselaget minimeres til promiller. Desuden kan svejselaget påføres med almindelige trykmaskiner som alligevel anvendes til dekoration af plastfilm.

Teknologien har derfor den fordel, at fleksibel emballage kan fremstilles af 99,9% PET, samt at emballagen kan fremstilles uden rynker på de eksisterende almindelige pakkemaskiner.

Den foreslåede løsning findes ikke på markedet, men vil kunne løse den alvorlige udfordring med affaldshåndtering og genvinding, som laminerede plastfilm, giver i dag.

2. Laminatemballage

2.1 Generelt

Generelt skal en emballage opfylde følgende formål:

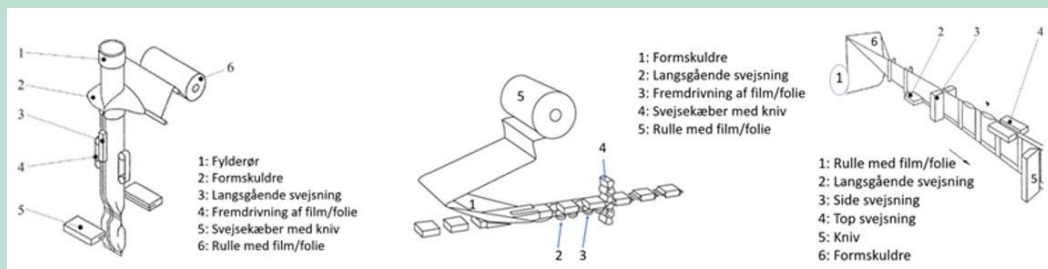
- Beskytte fra produktion til forbrug
- Effektivisere transport, lagring og håndtering
- Informere alle led i distributionskæden
- Sælge og markedsføre
- Indgå og lette tilberedning og forbrug

2.2 Fleksible emballager

Fleksible emballager fremstilles af fleksible film eller folier, der er fortrykte, og som foldes rundt om produktet. Filmen eller folien samles med svejsning. I enkelte tilfælde svejses filmen/folien ikke fx margarine- og smørpakning.

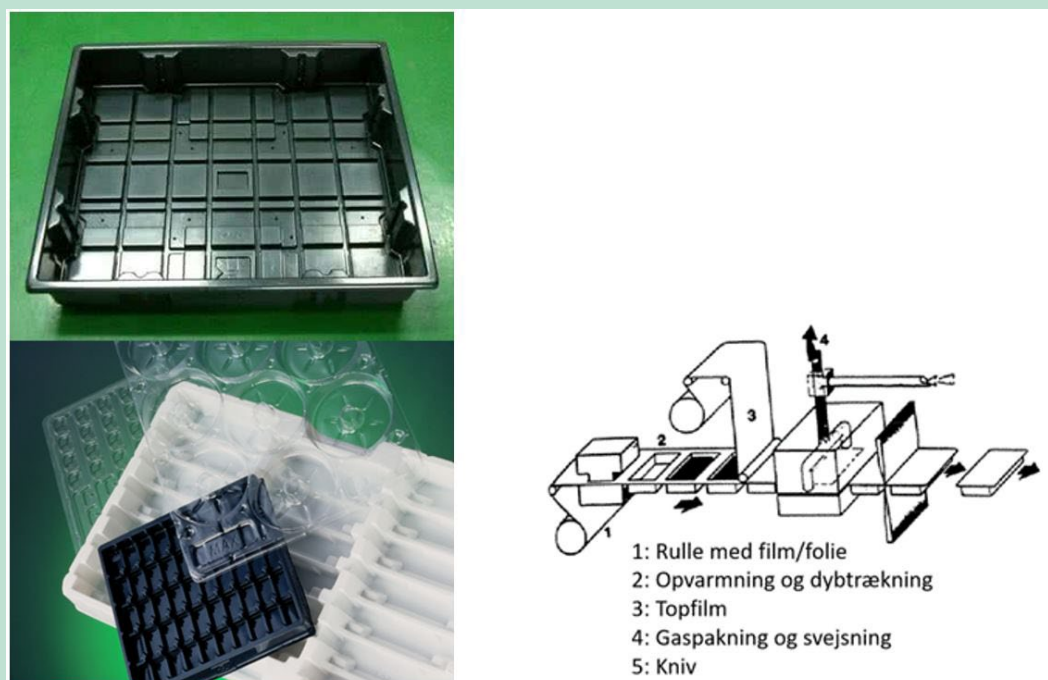


FIGUR 1. Typisk fleksibel emballage



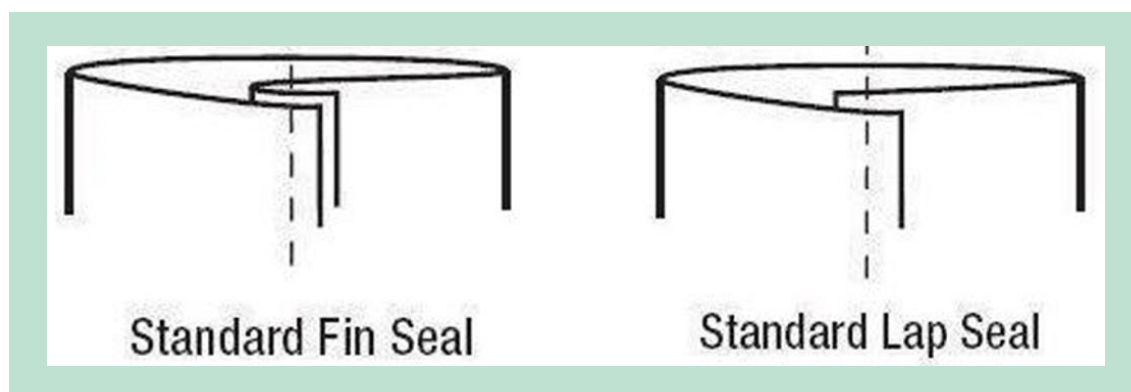
FIGUR 2. Typiske pakkemaskiner til fleksible emballager

Desuden er der halv-fleksible og/eller halv-stive emballagetyper, som ikke er inkluderet i dette projekts formål, men som alligevel udgør en væsentlig del af problemstillingen med laminaer i husholdningsaffaldet. Det er de dybtrukne bakker, som typisk anvendes til pålæg, kød og mange andre produkter.



FIGUR 3. Pakkemaskine til dybtrukne bakker

Langt de fleste fleksible poser fremstilles med en langsgående svejsning. Denne svejsning udgør for visse posetyper en faglig udfordring. Filmen/folien samles og svejses på to meget forskellige måder.



FIGUR 4. Langsgående svejsninger på fleksible emballager

- **Fin seal** Filmens inderside samles i en snip som svejses sammen. Dette betyder, at kun indersiden er i berøring med fødevarerne. Det er også kun indersiden, som skal kunne svejses sammen.
- **Lap seal** Filmen samles med et overlap. Det giver en stærk samling, men filmen skal svejses på begge sider. Ydersiden får også fødevarekontakt.

2.3 Svejseegenskaber

Ikke alle plasttyper svejser lige godt. Især har almindelig PET, papir og metaller alvorlige problemer med at svejse på almindelige posepakkemaskiner. Derfor bruger man ofte plast-laminater for at tilføje et svejselag på folier.

Meget ofte anvender man LDPE som svejselag. Anvendes lap-seal, så er der typisk et svejselag på begge sider af filmen.

Nedenfor er vist en liste over nogle almindelige emballagefilm med svejseegenskaber, der skal bruges på almindelige pakkemaskiner.

TABEL 1. Plasttypernes evner til at varmsvejse til hinanden ved almindelige pakkemaskiner

	PA	HDPE	LDPE	PP	PS	PET
PA	OK	Middel	Middel	Middel	Ringe	Ringe
HDPE	Middel	OK	OK	Ringe	Ringe	Ringe
LDPE	Middel	OK	OK	OK	Ringe	Ringe
PP	Middel	Ringe	OK	OK	Ringe	Ringe
PS	Ringe	Ringe	Ringe	Ringe	OK	Ringe
PET	Ringe	Ringe	Ringe	Ringe	Ringe	Ringe

Når skemaet siger, at PET ikke svejser mod PET, så er det en sandhed med modifikationer. PET-PET svejser slet ikke ved de 160-170°C som svejsekæberne typisk er indstillet på. APETs smeltetemperatur ligger mellem 180-190°C. (CPET som bruges i ovne ol. ligger mellem 250-300°C).

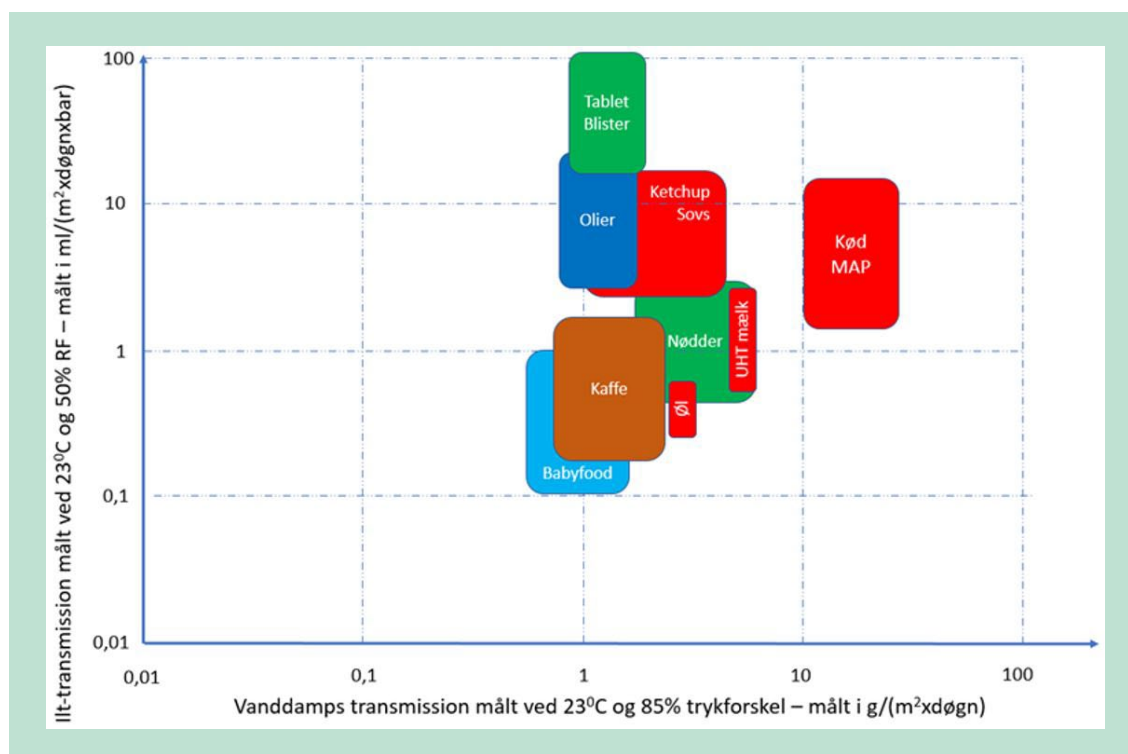
2.4 Barriereegenskaber

Posen virker ofte som et barrierelag, så der opretholdes en kontrolleret atmosfære inde i posen. Denne modificerede atmosfære prøver at udelukke visse skadelige gasser.

- Vanddamp/fugt: Skal enten holdes uden for posen for tørre produkter eller fugten skal holdes inde i posen for at undgå udtørring og væggtab.

Ilt: Skal typisk holdes på et ekstremt lavt niveau inde i posen for at undgå at kombinationen af ilt, lys og fedtstoffer harsker og/eller misfarver produkterne.

Forskellige produkter er mere eller mindre følsomme overfor disse påvirkninger.



FIGUR 5. Produkters krav til barriere

TABEL 2. Permeabilitetsegenskaber for forskellige typer plast

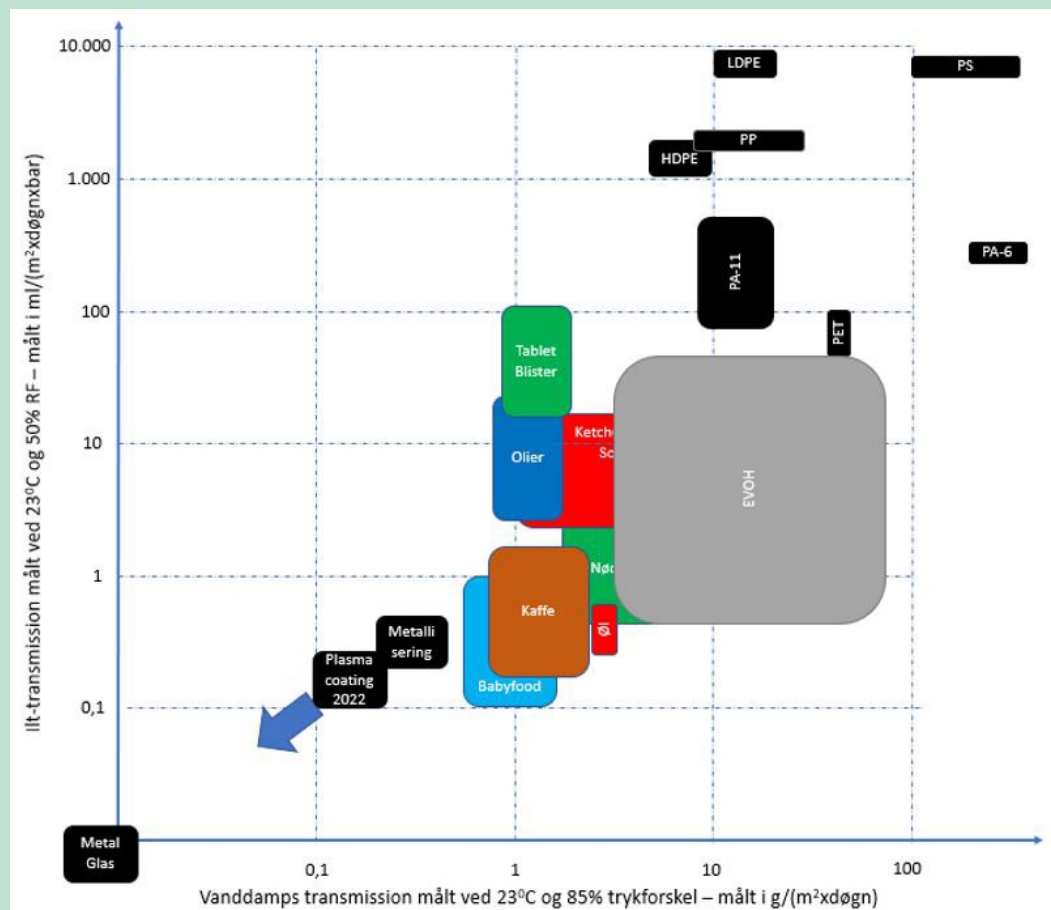
Plasttype	Vanddamp g/(m²xdøgn)	Ilt ml/(m²xdøgn)
LDPE	10-20	6000-8500
HDPE	5-10	1600-2100
PP	4-12	2000-2500
PET	10-30	40-100
PS	100-150	5500

Som det ses af ovenstående, er langt de fleste plasttyper alt for utætte til at pakke de mere vanskelige produkter ind i. Derfor bruger man allerede barrierelag og dermed laminater. Faktisk er PET relativt tæt, men ikke tæt nok. PET har også den gode egenskab, at PET ikke er særligt elastisk og derfor egnet til at coate barrierelag på. Da PET også er en mekanisk stærk film, kan der anvendes mindre materiale for at opnå den nødvendige styrke.

Typiske barriere lag er:

- Metallisering (Al)
- EVOH
- Plasmacoatede:
 - SiOx
 - AlOx
 - DLC

Metallisering er aluminium lagt i et tyndt lag under vakuum på plastfilmen. EVOH og lignende plasttyper er termoplastiske og kan således termoforms. De tåler dog ikke fugt, da de er vandopløselige. EVOH el. skal derfor placeres mellem andre lag af plast. De plasmacoatede barrirelag er ekstremt tynde og har slet ikke nogen mekanisk styrke. Ved termoformning opstår, der delvist cracks i laget, så barriereeffekten reduceres.



FIGUR 6. Typiske emballagefilm og fødevarekrav

2.5 Plastemballage til fødevarekontakt

Alle plastfilm til fødevarer skal opfylde EU's krav til fødevarekontaktmaterialer. Her har plast været i fokus i mange år, hvorfor alle fabrikanter allerede nu er meget opmærksomme på om plastemballagen er fødevaregodkendt.

Tidligere blev genvundet plastmateriale slet ikke accepteret i plastemballager til fødevarer. I den første EU-forordning om fødevarekontaktmaterialer af genvundet plast (EU 282/2008), blev der indført regler om godkendelse af genanvendelsesprocesser.

15. september 2022 udkom Kommissionens Forordning EU 2022/1616 om materialer og genstande af genanvendt plast bestemt til kontakt med fødevarer. Denne forordning er således allerede implementeret i alle EU-lande og erstatter alle tidligere regler.

Væsentlige tilpasninger:

- Det europæiske fødevarsikkerhedsinstitut (EFSA) har allerede vurderet ca. 240 cirkulære forløb af genvundet plast. Disse materialer kaldes ofte på markedet for godkendt til fødevarekontakt, men det er ikke helt korrekt, da EU ikke har udstedt nogle egentlige godkendelser, men de lokale myndigheder accepterer dette alligevel.

- De ca. 240 vurderinger er foretaget på primært rPET (genvundet PET). Kun to vurderinger er foretaget på HDPE. Det er begge mælkeflasker (jerry-cans) fra Storbritannien, som nu står udenfor EU.
- Flere af de vurderede forløb baserer sig på de såkaldte ABA-film, hvor enten nyt PET eller flaskePET ligger rundt om et mere ukendt mellemlag. Nu skal alle lag kunne have fødevarekontaktegenskaber, hvorfor ABA ikke er så interessant mere. Der er dog tilladt de ca. 240 tidligere positivt vurderede genvindingssystemer i en kort periode at anvende deres tidligere godkendte genvindingsproces.
- Ultimo 2022 vedtog EU Forordning 2022/1616 om plastmaterialer med fødevarekontakt, som allerede nu er lovgivning i alle EU-lande. Det har følgende konsekvenser:
 - Alle lag i materialet skal fremstilles i et godkendt genvundet materiale. ABA-film vil ikke blive forbudt, men vil i fremtiden ikke give mening for at give fødevaresikkerhed. ABA- eller BAB-film kan dog forekomme af fremstillingstekniske grunde.
 - rPET skal fremstilles af brugt PET, der er brugte fødevareemballager og er samlet specielt ind. Det må ikke komme fra dagrenovation. Det kan dog udsorteres fra vores nuværende Plast/Drikkevare-fraktion.
 - Post-consumer-PET må max. indeholde 5% ikke FKM-PET (Fødevaregodkendt PET). Man skal derfor ikke alene sortere efter plasttype, men også efter hvad emballagen tidligere har været brugt til.
 - Alle materialer skal være fra cirkulære forløb, hvor alle step i kæden er evalueret af EFSA og godkendt af EU.
 - Der findes alternative måder at genanvende andre plastmaterialer i form af "Closed loop" og "Nowel Technologies", men under normale omstændigheder er det foreløbigt rPET, der er den reelle mulighed.
 - Registrering sker hos Fødevarestyrelsen og EU-Kommissionen senest 30 dage før produktionen startes.
- Yderligere arbejder EU med at lave en ny forordning om emballage og emballageaffald. Denne forordning skal erstatte det tidligere emballagedirektiv, således der kommer en fælles og enslydende lovgivning i alle EU-lande. Det ser ud som om, at den nye forordning fra 2030 vil specificere et minimum indhold af genvundet materiale i alle typer af emballager – også til fødevareemballage.

2.6 Andre egenskaber

• Omkostninger

Råmaterialet til at producere PET koster stort set det samme som råmaterialet til fx PE og PP. Da PET har en densitet på 1,3-1,4, hvor eksempelvis PE og PP har en densitet på henholdsvis 0,93 og 0,91, er PET umiddelbart 50% dyrere at anvende. PET har dog en stivhed/robusthed der gør at man som oftest kan anvende tilsvarende 50% tyndere materiale end ved PE og PP, og således opnå samme pris, men en 50% mindre miljøbelastning.

• Egnet til genvinding

Der er allerede et stort marked for genvundet PET baseret på brugte flasker, hvorfor indsamlingen af brugte PET-flasker allerede er sat i system. Brugte PET-flasker udgør kun 10-20% af brugt PET-emballage, mens film, bakker og koppe i PET udgør ca. 70%. Genvindingssystemet skal opgraderes for at udbygge genvindingen af PET til henholdsvis 50% i 2025 og 55% i 2030.

• Transparens

PET er en af de mest transparente plasttyper på markedet. Dog vil brug af rPET og coating gøre emballagen lidt mindre transparent. Dette er sjældent værre end poser fremstillet af PE og PP, som også er meget brugt til fleksible emballager.

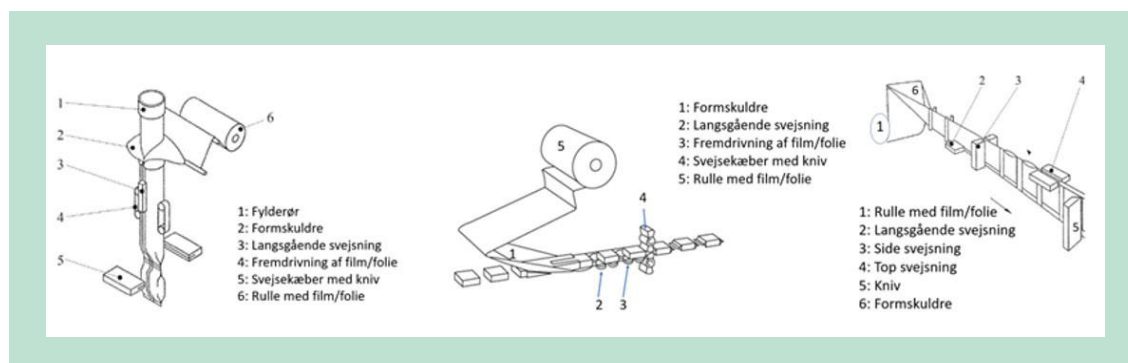
Plastfilm har mange andre egenskaber, som man skal tage hensyn til. Dette er udeladt her, fordi dette ikke har den samme store betydning.

3. Teknologier til fremstilling af fleksible emballager i samme polymer

I dette afsnit gennemgår vi en række tekniske udfordringer omkring fremstilling af fleksible emballager af samme plastmateriale:

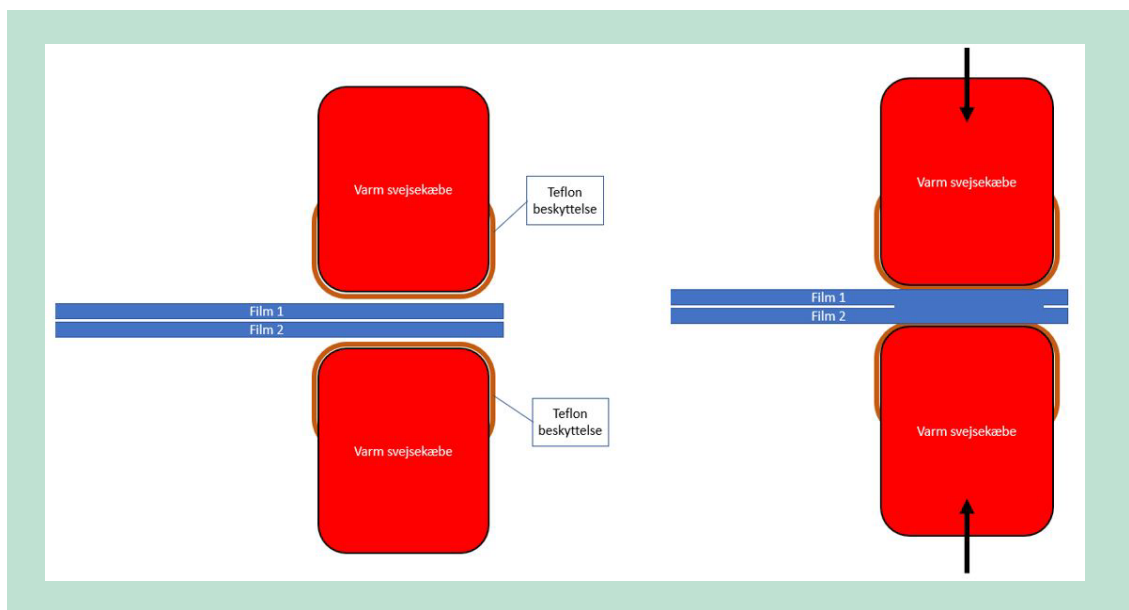
- Svejsning i pakkemaskiner
- Barriere egenskaber (tæthed)
- Fødevaresikkerhed

3.1 Svejsning i almindelige pakkemaskiner



FIGUR 7. Typiske pakkemaskiner til fleksible emballager

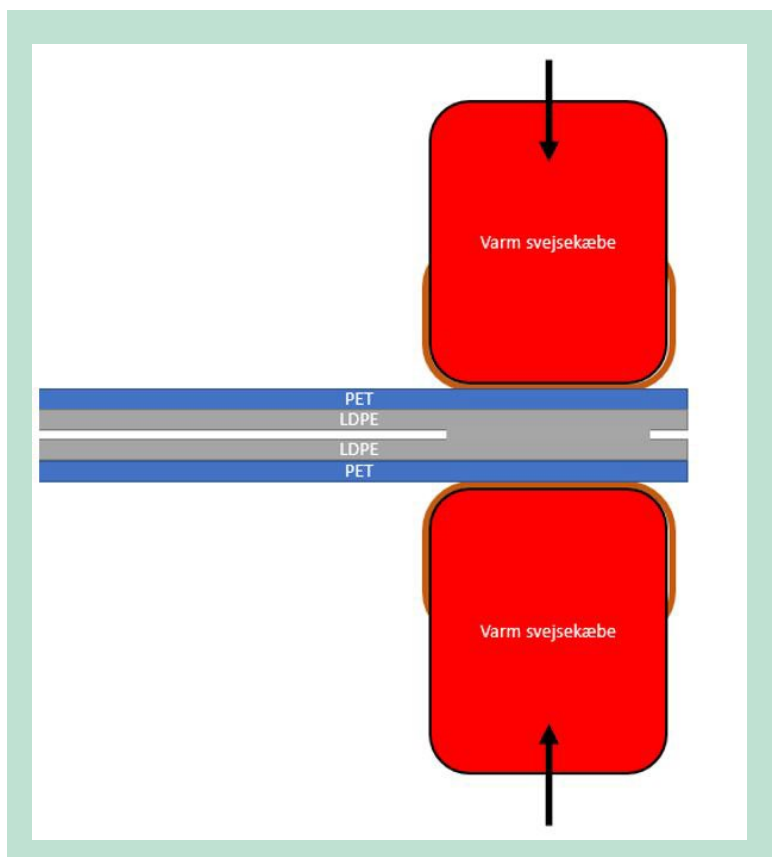
Typiske pakkemaskiner (se ovenfor) er udstyret med svejsekæber, der samler plastfilmen i flere retninger. Er plasttyperne PA, PE, PP eller PS gøres dette med termosvejsning, hvor kæberne varmes op til 120-190°C.



FIGUR 8. Typiske svejsekæber til fleksible emballager. Kæberne trykkes sammen om to lag plastfilm, der smelter sammen.

Som det er beskrevet i kapitel 2, er målet at kunne samle PET-film i almindelige pakkemaskiner til forskellige fleksible emballager. Normale pakkemaskiner har svejseudstyr, der maksimalt kan svejse op til 180-190°C. PET kræver noget højere temperatur for at kunne svejse. Vi gennemgår nogle teknologier, der bruges i dag for at overvinde denne udfordring:

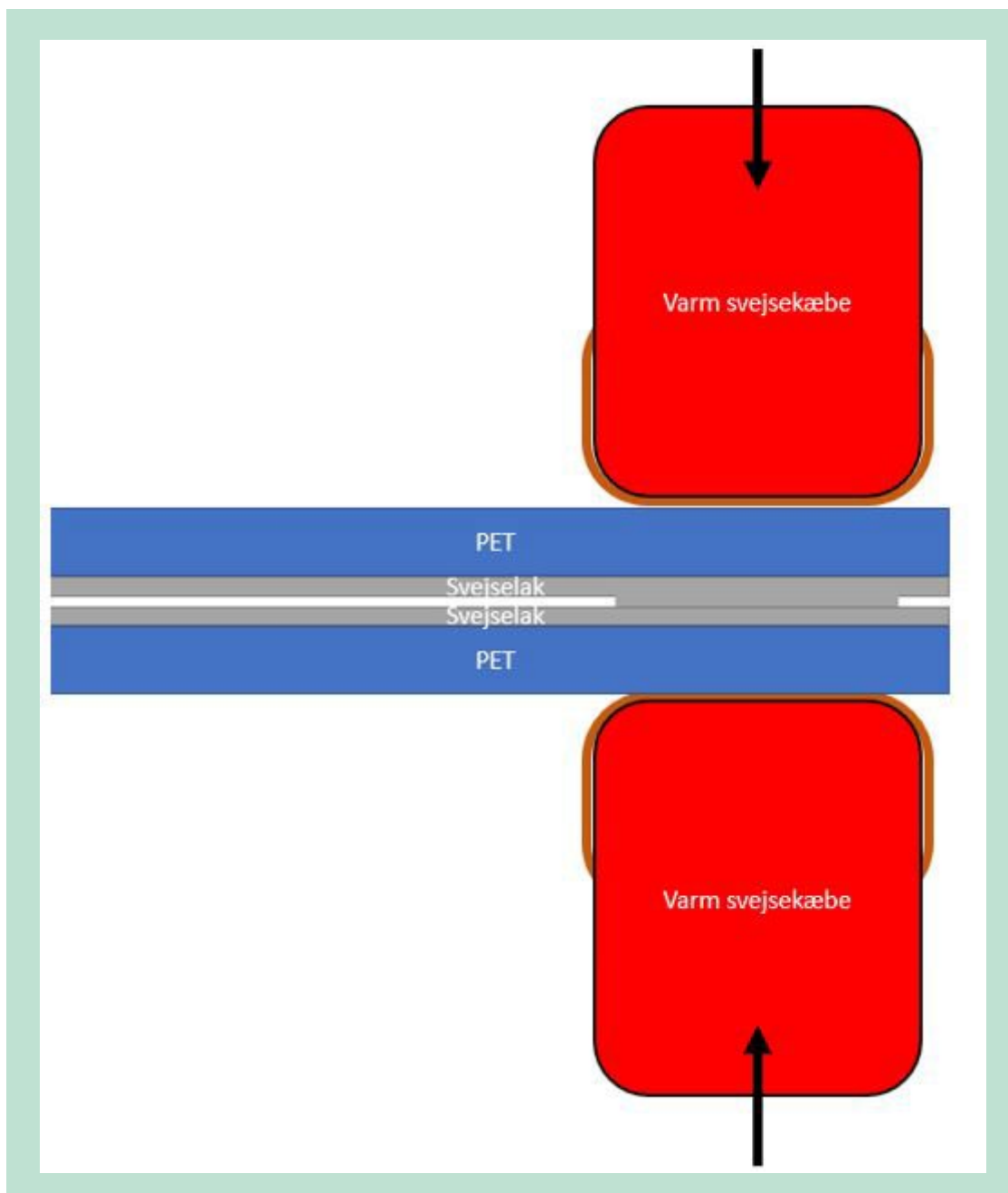
Plastlaminat



FIGUR 9. To PET/LDPE-laminater svejses sammen

LDPE med en meget lavere smeltetemperatur limes på PET. Disse film svejser flot sammen ved lave temperaturer, fordi PET kun opvarmes, så LDPE smelter og svejser sammen på den indvendige side. MEN denne blandede sammensætning gør reelt genvinding umulig.

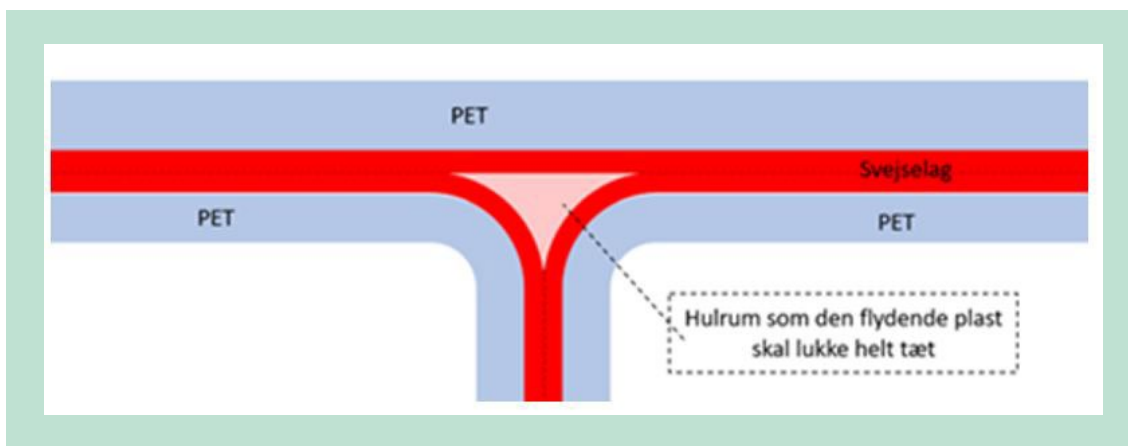
Svejselak



FIGUR 10. To PET-film med svejselak svejses sammen

En lak påføres PET i et tyndt lag. Denne lak består af en polymer, der svejser ved lavere temperaturer. Udfordringen ved svejselag er to forhold:

- Svejselak påføres på hele overfladen – også på områder, der slet ikke skal svejses sammen. Derfor vil svejselak være et forurenende element i en genvindingscyklus.
- Svejselak er påført i så tynde lag, at det kan blive vanskeligt at udfylde hulrum ved dobbelt samlinger og rynker i plastfilmen.



FIGUR 11. To PET-film med svejselag kan have vanskeligt ved at fylde hulrum ved dobbelt samlinger og rynker i plastfilmen.

Der gælder samme betingelser, hvis svejsesfilmen er så tynd, at der ikke er materiale nok til at udfylde eventuelle hulrum.

I det følgende bliver forskellige teknologiske metoder til at overvinde disse udfordringer gennemgået.

3.1.1 Hæve svejsetemperaturen

APET-film er en transparent film og et emballagemateriale, hvor genvindingssystemet er meget udbredt fx PET-flasker til sodavand, juice osv.



FIGUR 12. PET-film svejst ved forskellige temperaturer mellem 180-220°C

Som det fremgår af foto (figur 12), er svejsningen ved de lave temperaturer af en rigtig dårlig kvalitet, mens de høje temperaturer giver trækninger i materialet lige ved siden af svejselinjen. Trækningerne skyldes, at varmen får plasten til at trække sig sammen.

Derfor er et laminat med hovedparten PET og et svejselag af en plast, der smelter ved lavere temperaturer en perfekt løsning til at opnå en flot svejsning og et godt udseende af emballagen. PET vil ved de normale svejsetemperaturer slet ikke reagere og fortsat have styrken, mens PE-laget smelter fuldstændigt.

På markedet findes allerede pakkemaskiner, der kan svejse PET ved høje temperaturer. Disse anlæg har typisk en kølezone op til svejsesømmen for at minimere "krøl" i filmen. Det er en voldsom investering at ombygge pakkemaskinen med denne teknologi, hvorfor andre tekniske løsninger er at foretrække, hvis monoemballageløsninger skal implementeres hurtigt.

3.1.2 Trykte svejselag

Dette projekt fokuserer alene på at kunne trykke et tilstrækkeligt tykt svejselag på de steder, hvor man skal svejse PET-film sammen og holde de øvrige flader fri for svejselag.

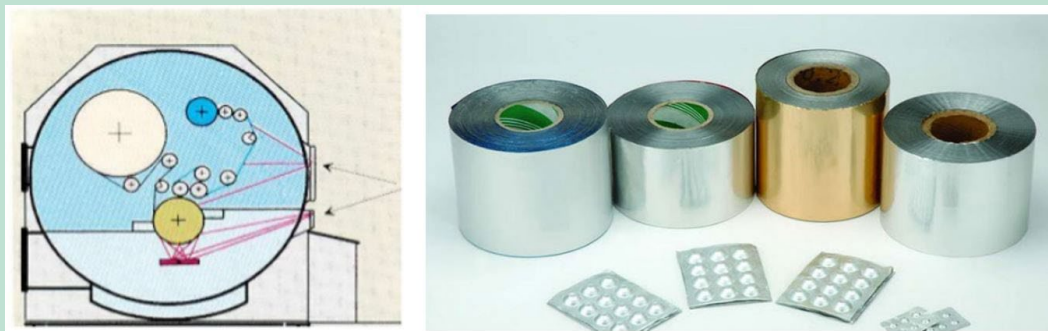
Ved at trykke PET-film alene de steder, hvor der er brug for denne funktion, så minimeres forureningen af den PET-film der skal genvindes. Ideen med at bruge trykteknik er både denne partielle belægning af filmen, men også at funktionaliteten kan påføres filmen i de trykkemaskiner, der alligevel skal dekorere filmen. Mere om de forskellige trykteknologier i kapitel 8.

3.1.3 Etablering af tæthed

Laminater

Den helt traditionelle metode til at skabe tæthed er at bruge laminater af mange forskellige typer af plast – hvert lag har sin specielle funktion. Det er netop det, der gør genvinding svær.

Metallisering



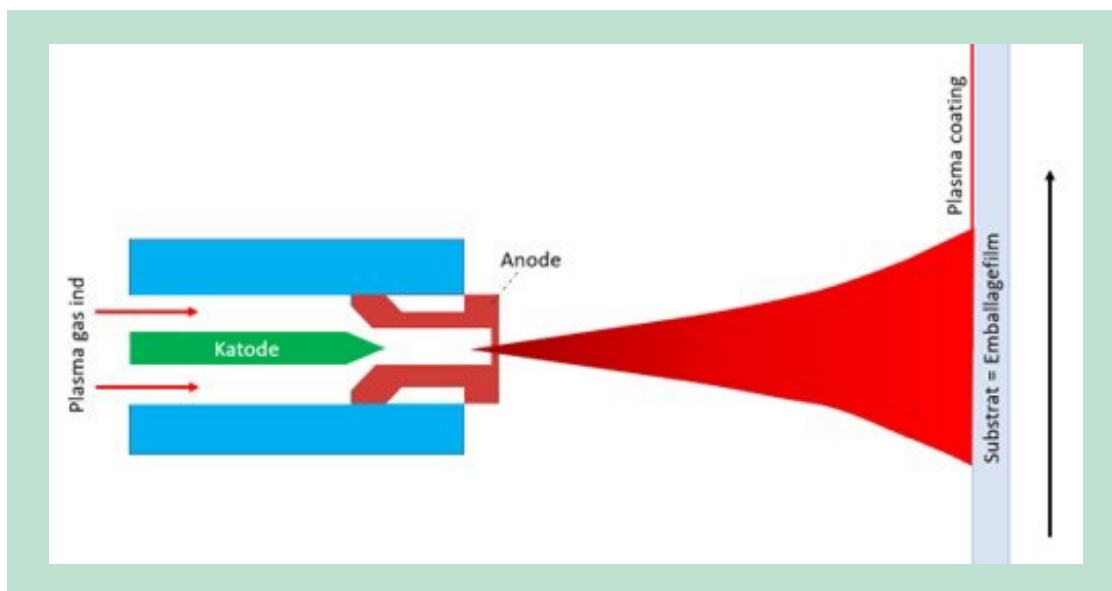
FIGUR 13. Metalliseringskammer og metalliseret emballagefilm

En anden almindelig metode til at gøre emballagefilm helt tætte er brug af metallisering. Her dampes typisk aluminium på plastfilmen i vakuum. Metoden er relativ dyr, fordi der bruges et vakuumkammer, hvor filmrullerne ikke kan være så store, og at det tager lang tid at etablere vakuum i en stor beholder med plads til to store ruller, samt behandlingsudstyret. Så er metalliseringen ikke transparent.

Plasmacoating

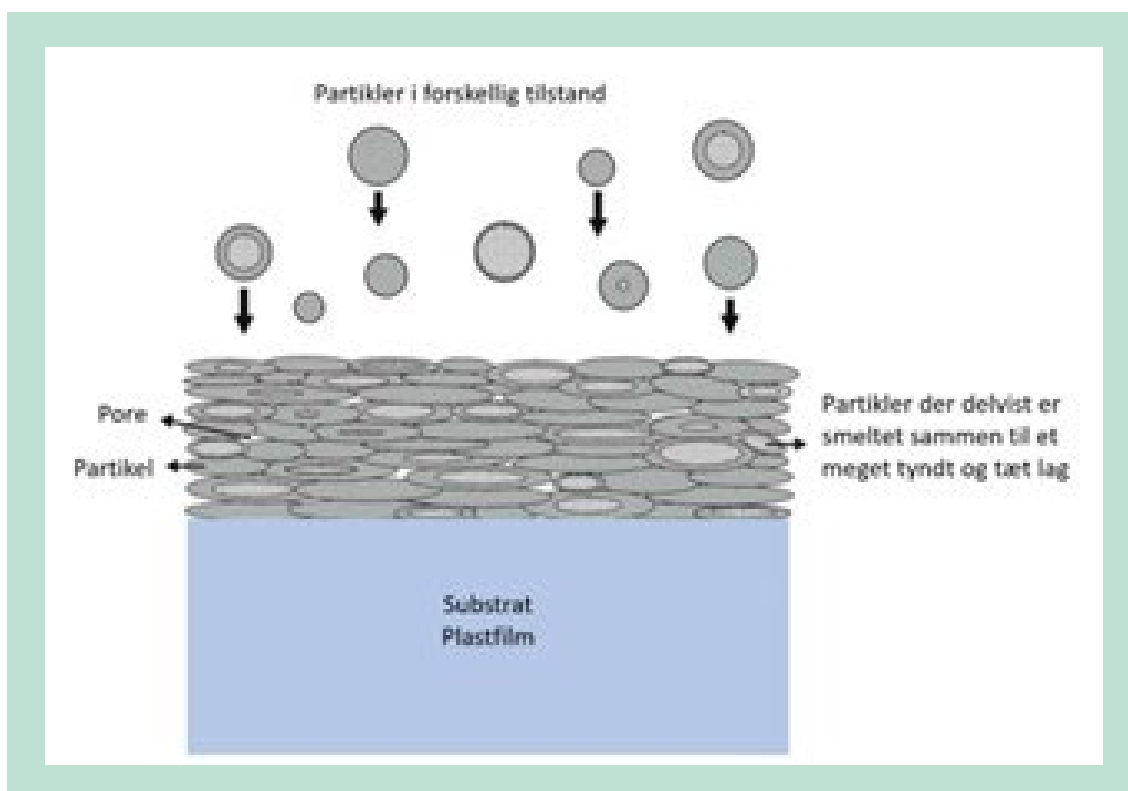
Plasma

Plasma er en fysisk tilstand at et givet materiale, hvor molekylerne er opdelt i ioner. Det er altså en tilstand på samme måde som fast stof, væske- og gastilstand.



FIGUR 14. Plasmacoatingsproces

Man bringer en gasart i en plasmatilstand gennem en elektrisk proces mellem en katode og anode. Dette sker ofte i vakuum. Ionerne sprøjtes på plastfilmen, som kører forbi dysserne. Herved dannes et ganske tyndt lag på overflade af den glatte plastfilm.



FIGUR 15. Plasmacoating af barrierelag på plastfilm

Denne nye overflade ændrer totalt egenskaberne på filmen. Disse plasmapartikler kan også pålægges i forskellige lag af forskellige stoffer med hver sin egenskab.

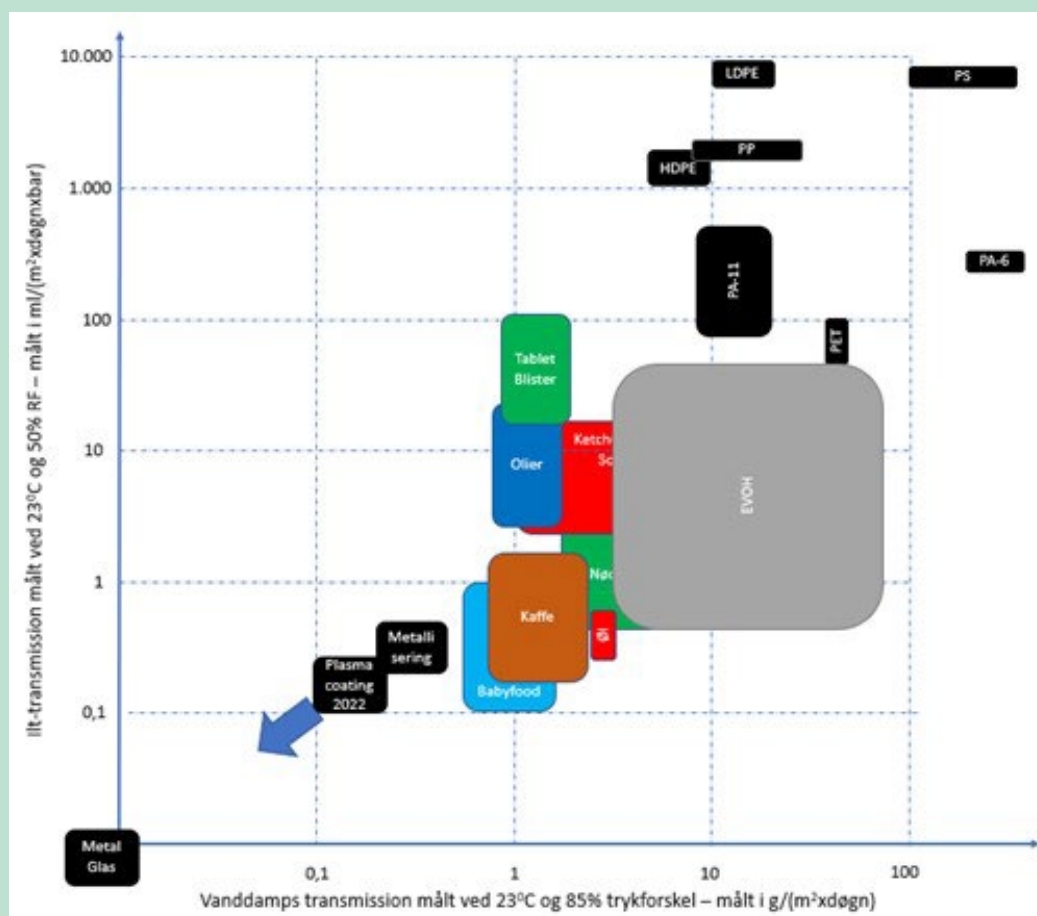
Projektansøgningen har satset på plasma-coating af plastfilmen. Gode kandidater er:

- SiOx (svagt gullig)
- AlOx (svagt grå)

- DLC (svagt grå)

Der kan være andre relevante plasma-coating metoder, der giver filmen en rimelig transparens.

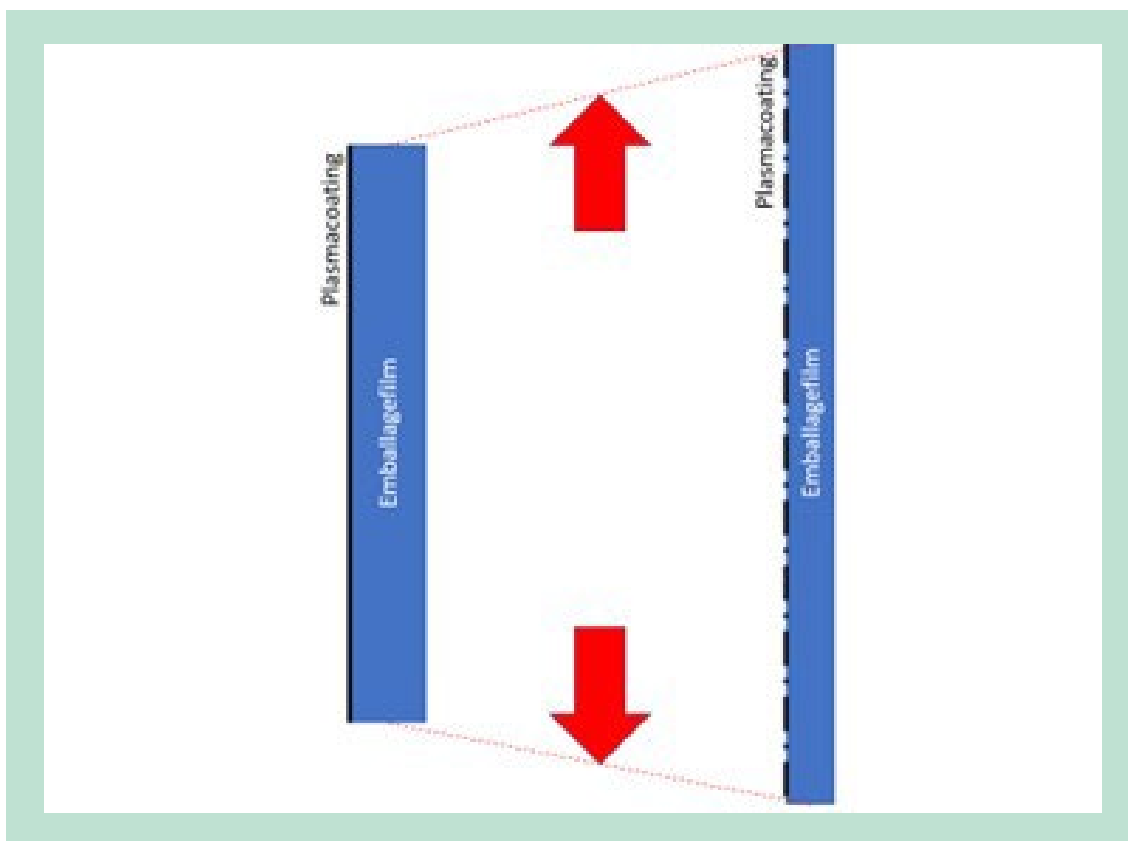
Plasma-coating giver en meget tæt emballage



FIGUR 16. Coating af plastfilm øger tætheden dramatisk

Plasmacoating bliver tættere end de traditionelle barrierecoatings og kan bruges til stort set alle typer af barrierer. Teknologien er under udvikling, så det må forventes, at det indenfor få år er muligt at opbygge beskyttelse for alle typer af fødevarer.

Plasmacoating er altid ultra-tynde lag, som derfor heller ikke har en mekanisk styrke. Dette giver en udfordring, når coatingen er pålagt en plastfilm, fordi de fleste plastmaterialer er relativt elastiske.



FIGUR 17. Der opstår pinholes (revner) i plasma coatingen på elastiske plastfilm der bukkes og strækkes

De revner og huller, der opstår hvis plastfilmen bukkes eller strækkes, ødelægger tætheden ganske betydeligt.

Anvendes der plasma coatings, skal den genanvendelige plastfilm være fremstillet i en plast, der er relativ u-elastisk og mekanisk stærk. Her er PET et godt valg.

Status på tæthed

Der findes allerede nu PET-film på markedet med plasma coating – typisk SiOx og AlOx. Disse plasma coatings er foreløbigt pålagt i vakuum. Et projekt finansieret af Innovationsfonden har udviklet en metode, hvor denne plasma coating pålægges integreret i de almindelige trykprocesser, hvor filmen dekorerer. På tryklinjerne pålægges plasma coating under atmosfærisk tryk.

Pålægges plasma coating som yderste lag, vil rengøringsprocesserne efter de brugte emballager er indsamlet og sorteret både fjerne madrester ol. og også hovedparten af plasma coatingen.

Det må derfor konstateres, at PET-film kan fremstilles tætte nok til at emballere langt hovedparten af alle produkter. Udfordringen er derfor primært at etablere svejsninger, der ikke forhindrer, at PET-materialet kan genanvendes igen og igen.

4. Trykte svejselag med PE-partikler

Kapitlerne 4-6 omhandler tre forskellige teknologier til at fremstille trykte svejselag. Det følgende kapitel 7 beskriver alternative svejseløsninger. Først kommer kapitel 4. Trykte svejselag fremstillet af meget små PE-partikler.

4.1 Indledning

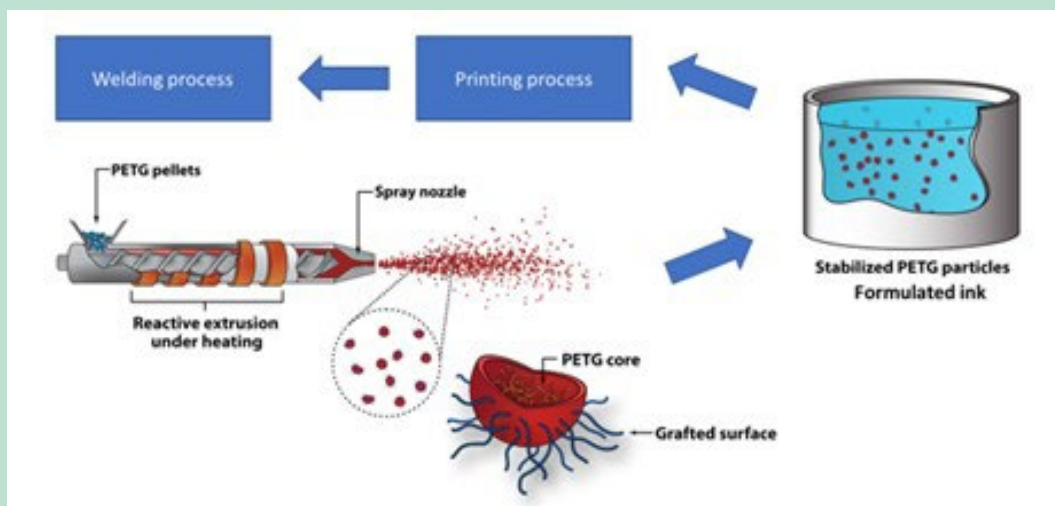
Dette projekts arbejdsplan 2 "Udvikling og fremstilling af svejsepartikler" havde til formål at udvikle og fremstille mikropartikler af svejsbar plast, som efterfølgende kan dispergeres i en miljøvenlig opløsning – fx vand. Disse mikropartikler skulle ved svejsning ved 150-170 grader kunne smelte sammen til et svejselag, der forsegler PET-film. I projektet er der udført forsøg med flere polymertyper især glycol-modificeret polyethylenterephthalat (PETG) og polyethylen (PE) partikler.

I arbejdsplanen blev der analyseret metoder til fremstilling af mikropartikler i plast af tre ruter:

1. Kemiske metoder omfattende opløsning og udfældningsreaktioner samt polymerisationsreaktioner.
2. Atomisering (forstøvning) af en smeltet plaststrøm.
3. Køb af kommercielt tilgængelige partikler

I arbejdsplanen blev metode 2) afprøvet på LDPE uden det lykkedes at skalere metoden og opnå de søgte størrelser af partikler. Samtidigt viste det sig muligt at købe PE-mikropartikler med en middelstørrelse på 6 µm, der kunne anvendes direkte i arbejdsplan 3 "Metoder til dispersion af plastpartikler" således, at et trykbart svejseblæk kunne fremstilles og anvendes til at trykke svejselag i det mønster, som emballagen og pakkemaskinen krævede.

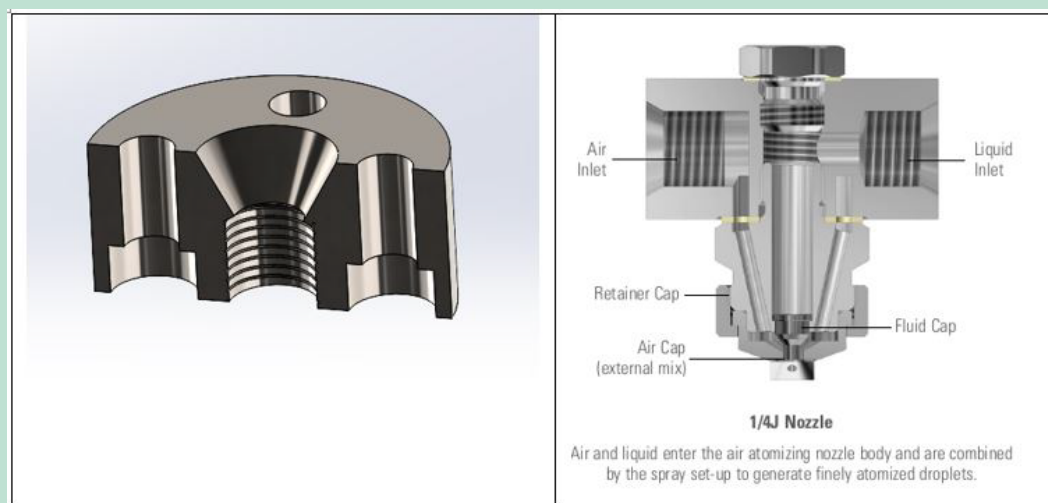
Metode 1) afrapporteres i afsnit 5, trykte svejselag med PETG-partikler. Den oprindelige plan for dannelse af PETG-partikler omfattede metode 2) under brug af atomisering og reaktiv ekstrudering. Det har ikke i projektet været muligt at danne tilstrækkelige små partikler ved ekstrudering, se nedenfor. Figur 18 viser plantegningen for den udvikling.



FIGUR 18. Atomiseringsproces for partikeldannelse. Planskitse for reaktiv ekstrudering og atomisering

4.2 Udvikling og tilpasning af udstyr til atomisering af plast

En CNC fræset ekstruder stålprofil blev tilpasset til montering af en kommercielt tilgængelig tryklufstdyse fra Spraying Systems Co. Figur 19 viser de to hovedkomponenter.



FIGUR 19. Tværsnit af ekstruderprofil (venstre) tilpasset montering af en MT 1/4J spray dyse (højre)

Spraysystemet blev monteret på en enkelt-snekkeekstruder¹ og monteret på en tryklufforsyning med et maksimalt tryk på 8 bar. Udstyret er illustreret i Figur 20.

Overordnet set kræver det et højere lufttryk/flow at skabe små partikler end det var muligt med 8 bars trykluft. Alternativer blev ikke afprøvet, men en dampgenerator eller et hydraulisk system kommer nærmest på at kunne levere de nødvendige tryk. I afsnittet nedenfor gennemgås en række af de metoder til atomisering af plastpartikler, der har været under overvejelse.

¹ Enkelt-snekke ekstruder, BX18 (Axon) med 18 mm snække. Op til 400 °C og 260 omdrejninger i minuttet. Til ekstrudering af en bred vifte af materialer



FIGUR 20. Spraysystem monteret på ekstruder

4.3 Teoretiske overvejelser over atomiseringsprocesser

En række metoder er overvejet og relationer, der bestemmer partikelstørrelse, gennemgås i de næste delafsnit for tre metoder: Hydraulisk forstøvning; ultrasonisk dyse; og plasma- og laser-teknikker.

4.3.1 Hydraulisk forstøvning

Spray dysen monteret på ekstruderen er af typen en hydraulisk forstøver. I den hydrauliske forstøver river en luftstrøm en væske med og væsken forstøves i dysen. Overordnet er det lufthastigheden og viskositeten af væsken, der bestemmer dråbestørrelsen i den dannede aerosol. I det følgende gennemgås skalering af dråbestørrelsen i forhold til størrelsen for vand, der forstøves.

Dråbestørrelsen afhænger af dysens geometri, lufttrykket, væskens massefylde og viskositet samt væskens overfladespænding. Relativt til dråbestørrelsen af vand forstøvet i den samme dysse, kaldet d_w , har parametrene de relative indflydelser på dråbestørrelsen af fx en flydende polymersmelte, kaldet d_p , som angivet i TABEL 3.

TABEL 3. Skalering af hydraulisk forstøvningsproces

Parameter	Skalering	Betydning
Lufttryk	$\frac{d_p}{d_w} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{-0.3}$	10 x trykstigning reducerer partikelstørrelsen til det halve
Massefylde	$d_p = d_w \left(\frac{\rho_p}{1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}}\right)^{0.3}$	massefylden har lille indflydelse
Viskositet	$d_p = d_w \left(\frac{\eta_p}{1.0 \text{ cP}}\right)^{0.2}$	Polymersmeltens viskositet på ca. $\eta_p = 10^7 \text{ cP}$ at $180^\circ\text{C} \Rightarrow$ stigning i partikelstørrelse 25
Overfladespænding	$d_p = d_w \left(\frac{\gamma_p}{73 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}}\right)^{0.5}$	Polymersmeltens overfladespænding omkring $\gamma_p = 20 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ at $180^\circ\text{C} \Rightarrow$ halv partikelstørrelse

Konklusionen er, at polymerpartiklerne altid vil være større end vanddråberne og under optimale forhold 5-10 gange større, hvor optimale forhold er et lufttryk på 80 bar, og en ekstruder-temperatur på væsentligt over 180°C .

4.3.2 Atomisering med plasma- og laserteknikker

Plasma- og laserteknologier har stor relevans for forstøvning. Da et ikke-termisk plasma indeholder højenergi partikler, der direkte kan påvirke atombinding. Udover at bombardere materialerne med accelererede ioner i et plasma, kan materialets atomer slås løs fysisk. Som et resultat kan der opnås forstøvning på atomart niveau. Forstøvning ned til nanometer eller mindre bruges til materialekarakteriseringer og materialesyntese i atomare skala (Grazhulene_BMS_2005, Kylian_Materials_2019 (sputtering), Winchester_AS_1988). Det bruger dog generelt meget energi, og den typiske størrelse af forstøvningen er for lille til industrielle fx inkjet-applikationer.

Laserforstøvningsproces bruges ofte til forstøvning af metalliske materialer. Specifikt bruges infrarød laser såsom CO₂-laser til lokalt at smelte et råmateriale til fordampning (Alavi_PE_2017). Det er blevet foreslået, at lasersmeltning anvendes til fremstilling af polymerpulvere. I forslaget bruges polymerer dispergeret i en opløsningsmiddelmatrix (Dummer_PE_2015). Schmidt_CES_2016 rapporterede polybutylenterephthalat (PBT) pulverproduktion ved hjælp af lasersmeltning. Det bruger generelt meget energi og metoder er ikke relevante for fx inkjet-applikationer.

De to metoder er kombineret i plasmaforstøvning udviklet til at syntetisere fine, sfæriske uorganiske pulvere i mikrometerskala ved hjælp af plasmabrændere (Entrazien_JOM_1996). En plasmabrænder er et termisk plasma og er i det væsentlige en termisk proces. Det er generelt nyttigt til at syntetisere eller producere uorganiske fine partikler, og kan potentielt bruges til fremstilling af polymerpartikler.

Generel forstøvning i en millimeterskala kan baseres på plasmateknologi kombineret med en hydraulisk forstøver. Specifikt bruges en forstøver til at injicere et råmateriale til en plasma-spray (typisk plasmabrænder) (Aubignat_JV_2016, Xia_PIERS_2008, Palumbo_Coatings_2020). Teknologien kaldes ofte suspension plasma spray (SPS) (Aghasi-beig_JTST_2019), hvormed belægninger kan syntetiseres. SPS er ikke en proces til fremstilling af partikler, men i et plasma kan partikelstørrelsen reduceres drastisk til nogle få μm . En mekanisme er baseret på hurtig fordampning af opløsningsmidler, se FIGUR 21.

Desuden er størrelsesreduktionen af polymerpartikler i plasmaspray rapporteret (Bao_thesis Brunel). Selvom detaljeret diskussion om en mulig mekanisme ikke er beskrevet, spekuleres det i, at bestråling i et plasma kan reducere viskositeten af polymervæsker, induceret af hovedkædespaltning og opvarmning.

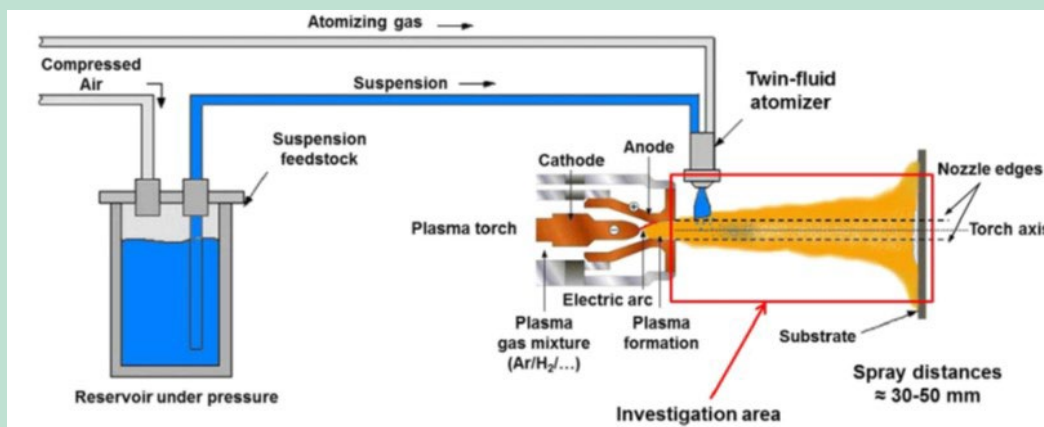


Fig. 1 Scheme of the SPS process (adapted from Marchand 2010)

FIGUR 21. Princippet i en suspension plasma spray (SPS).

EN SPS-proces vil kun være relevant for vandopløselige polymerer og derfor mest relevant for en modificeret PETG, der kan dispenseres i vand.

4.3.3 Ultrasonisk dyse

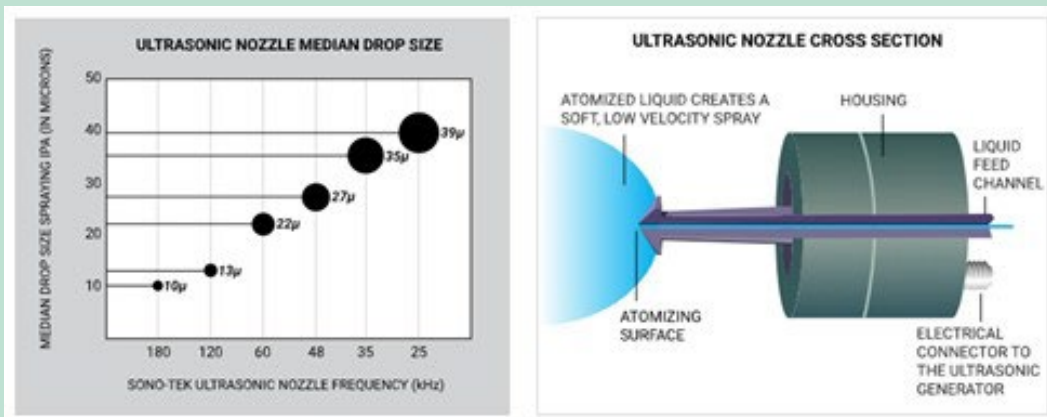
En ultrasonisk dyse anvender enten en piezo actuator eller en geometrisk udformning, hvor luften skaber en resonans med frekvens, der kan tunes. Princippet kendes fra trykluftdrevne horn, som fodboldtilhængere og studenter med stor glæde anvender. Vi vurderer, at det mest relevante for forstøvning af en polymersmelte er at anvende en piezoaktuator med frekvens mellem 30 og 200 kHz.

Den teoretiske baggrund bygger på, at dråberne er dannet ved en kapillærbølgemekanisme. Dråbestørrelsen kan estimeres rimeligt nøjagtigt ved at bruge ligningen for kapillær bølgelængde, der angiver, at dråbestørrelsen er en konstant brøkdel af kapillærbølgelængden, og denne brøkdel viste sig at være 0,34, hvilket giver den endelige korrelation som:

$$d_p = 0.34 \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \rightarrow d_p \propto \sqrt[3]{\frac{1}{f^2}}$$

Dråbestørrelsens skalering og princippet i den ultrasoniske dyse er illustreret i FIGUR 22 taget fra SONO-TEK's² brochure.

² www.sono-tek.com



FIGUR 22. Skalering af dråbestørrelse med frekvensen af piezoaktuatoren og princippet i den ultrasoniske dyse fra SONO-TEK

4.4 Overflademodificering af PE-partikler for bedre dispersion i vand

PE-partikler er hydrofobe og ikke i sig selv forenelige med vandige opløsninger, så de kan ikke dispergeres til et stabilt blæk – de vil hurtigt bundfældes i en vandig opløsning. Derfor er de blevet overflademodificeret med en hydrofil coating af polyethylenglycol. Proceduren beskrives i detaljer nedenfor.

4.4.1 Materialer og udstyr

- Overflademodifikation og oprensning foregår i superkritisk CO₂ (ScCO₂) reaktor.³
- PE-partikler fra Mitsui Chemicals: Størrelse 6 μ m – 10 μ m. <https://us.mitsuichemicals.com/service/product/mipelon.htm>
- Benzoylperoxid (BPO), Aldrich
- Ethylenglycol dimethacrylate (Mw 200, Sigma Aldrich)
- Ethylenglycol methacrylate (Mw 300-500, Sigma Aldrich)

4.4.2 Procedure

Indledende forsøg anvendte følgende procedure: 100 mg BPO blandes i ca. 1 g PE-pulver og anbringes i en glaskrukke hævet fra bunden af 250 ml ScCO₂-kammeret. PEG-acrylat 100 μ l anbringes i bunden af kammeret.

Temperatur og tryk: 80 °C og 200 bar. Reaktoren lukkes ned under tryk og efterlades i 24 timer ved 80 °C. Trykket falder til 80 bar. Partikler udtages uden yderligere oprensning.

Proceduren blev forfinet til fremstilling af større mængder (1 kg skala) under brug af det superkritiske udstyr til oprensning:

- 1) Opvarm PE til 80 °C i toluen i 1 time og afkøl. Tilsæt BPO og lad stå i 12 timer.
- 2) Brug af ScCO₂ ved 32 °C ekstraher toluen og overskydende BPO.

³ SFE-system (Supercritical Fluid Extraction) (Waters®) indeholdende reaktor/ekstraktionsskammer på 250 ml, pumpe (maksimalt tryk: 400 bar), pumpe til co-sol-venter, 5 liter. Vi har desuden et mindre TharSFC-system med et 100 ml kammer med vindue. Superkritisk CO₂-processering er velegnet til ekstraktion, imprægnering, rengøring og kemisk modificering af materialer.

- 3) Tilsæt PEG/acrylat i den superkritiske reaktor i en filterpose⁴ og lad stå ved 80 °C i 24 timer ved 200 bar.
- 4) Ekstraher overskud af PEG/acrylat ved flow af ScCO₂
- 5) Lad tørre

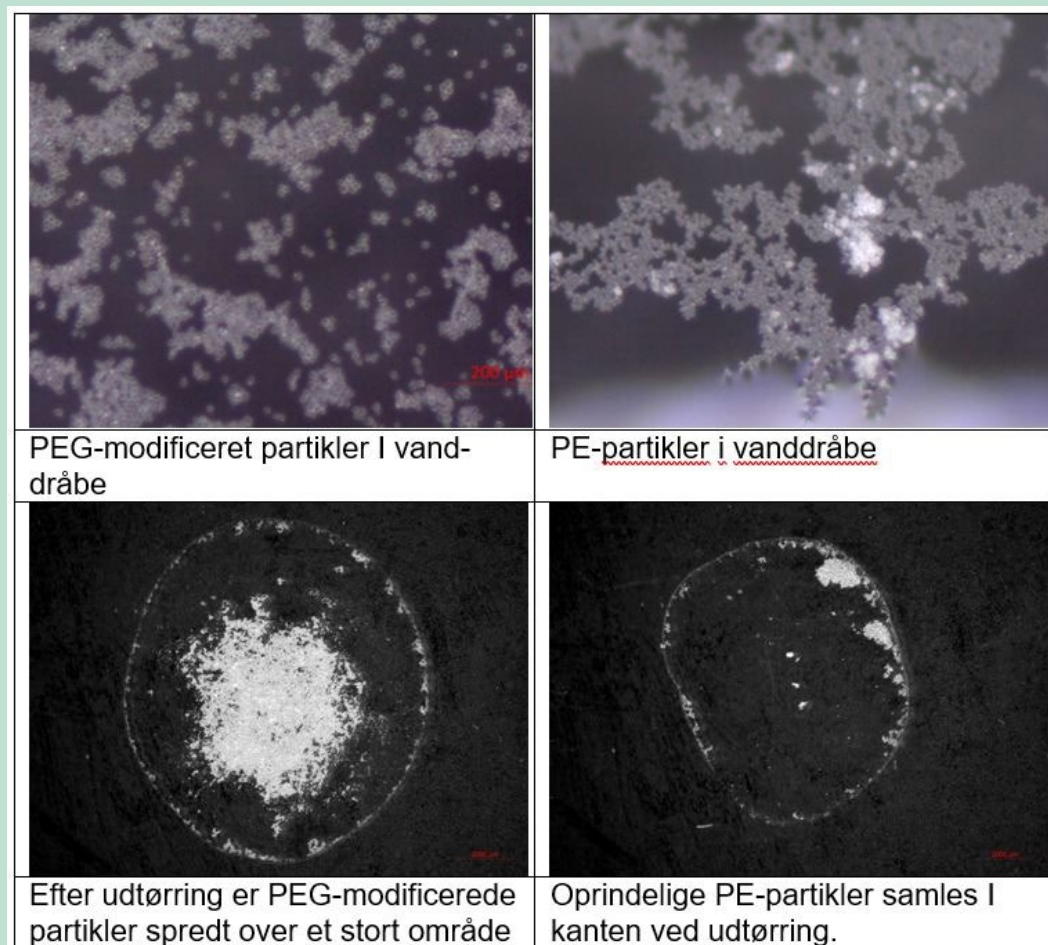
Udtrystes partiklerne i vand dispergerer de og dispersionen holder sig stabil i længere tid. FIGUR 23 viser adskillelse efter 5 sekunder. Den PEG-modificerede dispersion holdt sig flere timer. I en blæk-formulering tilsættes fortykkelsesmiddel, der også stabiliserer dispersionen. Der blev ikke observeret flokkulering, der ikke kunne gendispenseres ved rystning af opløsningen.



FIGUR 23. Dispersion af PE-partikler i vand (venstre) og PEG-modificerede partikler i vand (højre) 5 sekunder efter udtrystning. PEG-modificerede partikler holder sig svævende i timevis, mens de oprindelige PE-partikler øjeblikkeligt stiger til overfladen

⁴ https://www.ultra-filter.dk/ub1pp0001/ultra-bag-pp--size-1--1-m/?gclid=EA-lalQobChMln-6J5rHe6glVFiwYCh06QAfoEAQYASABEgl7CPD_BwE

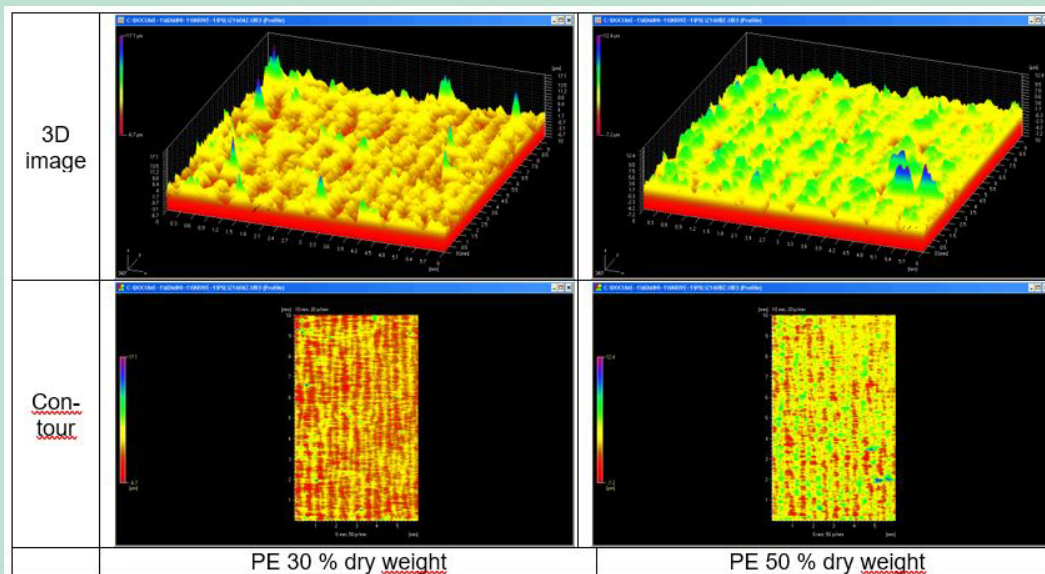
Mikroskopibilleder viser, at PEG-modificerede partikler spredtes, mens de oprindelige PE-partikler flokkulerer. Også efter tørring spredtes partikler i et lag, hvorimod de ubehandlede partikler tørrer ud i kanterne, se FIGUR 24.



FIGUR 24. Dispersion og flokkulering af modificerede og ubehandlede partikler

4.4.3 Analyse af pakningstæthed og lagtykkelse

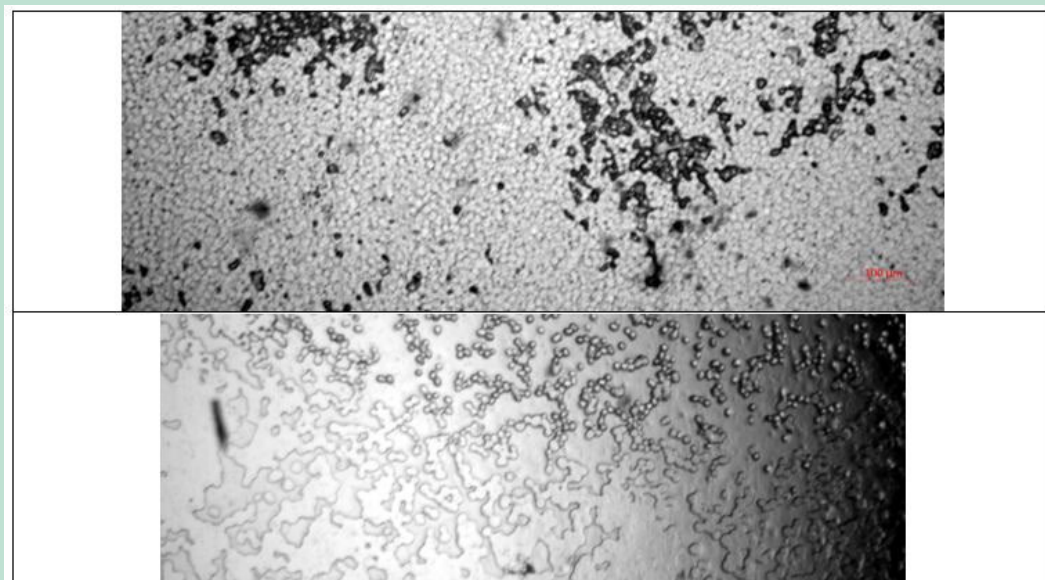
Formuleringer med kommercielt tilgængelige bindere fra partner Resino viste typisk agglomerat af partikler i spor ved optørring. Dækningsgrad og lagtykkelse blev undersøgt med profilometer, som illustreret i FIG 25. Filmene blev udstrøget med en Flexo handproofer af partner Resino og undersøgt med et skannings profilometer hos partner Teknologisk Institut. Lagtykkelsen ligger mellem 6 og 12 μm svarende til 1-2 partikler, der ligger oven på hinanden (enkelt og dobbeltlag). Et højere tørstofindhold (50 % tørstof mod 30 % tørstof) øger tætheden af dobbeltlag, men ændrer ikke ved, at partiklerne danner agglomerat i linjer.



FIGUR 25. Skannede højdeprofiler af flexo-udstrøg af PE/binder system med 30 % og 50 % tørstofindhold. Partiklerne agglomerer i linjer og højdeprofilen viser 0, 1, 2, og 3 partikler ovenpå hinanden

4.4.4 Svejseegenskaber

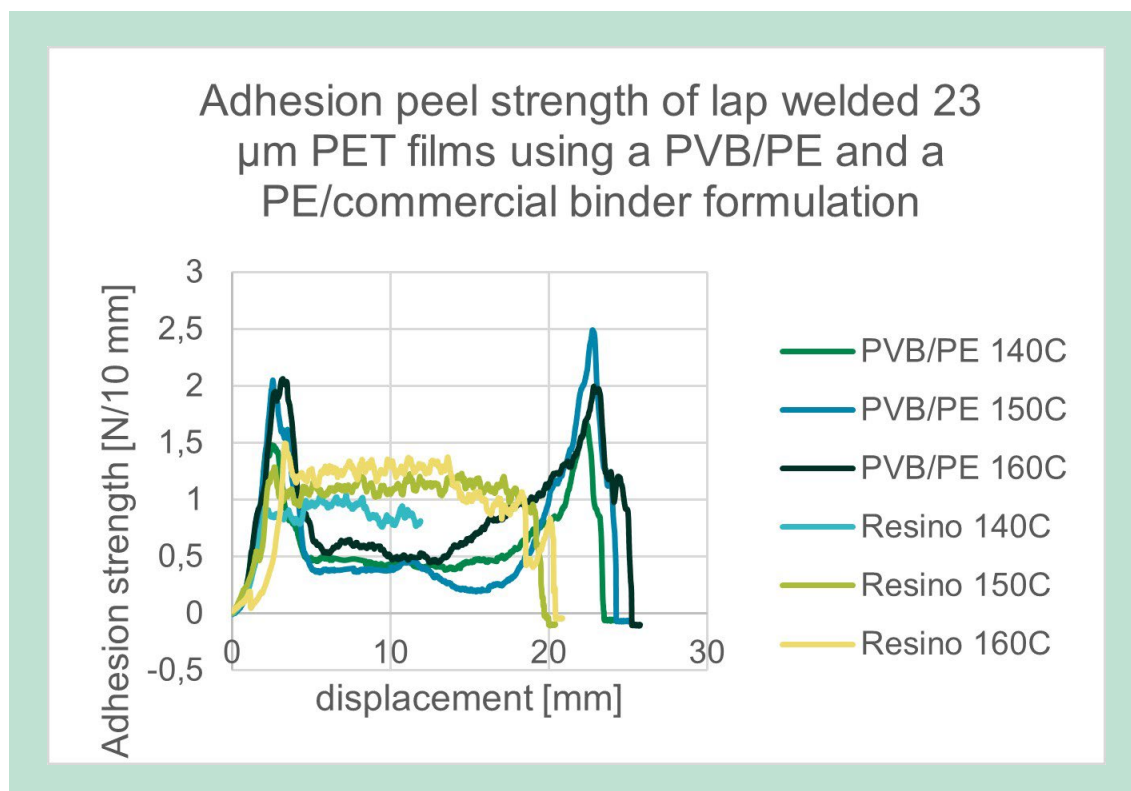
Bindersystemet har forbavsende stor indflydelse på svejseevnen af et partikelbaseret blæk. Mikroskopering af systemerne efter svejsning viser, at en formulering med et kommercielt bindersystem fra Resino ikke tillader en sammensmeltning af PE-partikler, mens en formulering af PVB (polyvinylbutyral) i ethanol tillader mindre agglomerering og fuld sammensmeltning i svejseprocessen. Se Figur 26.



FIGUR 26. Sammensmeltning af partikler. Øverst med en kommerciel heatseallak som binder. Partiklerne smelter ikke sammen men ligger enkeltvis i bindermatricen. Nederst med PVB binder. 10 % PVB i ethanol + 30 % PE-partikler. PVB: Kuraray Mowital B 30 HH. I det opvarmede område smelter partiklerne sammen, mens de ligger enkeltvis udenfor.

Konsekvensen af forskel på sammensmeltning er, at med den kommercielle binder er det i højere grad, binderen, der sikrer sammensvejsning, mens det med PVB-binderen i højere grad er partiklerne, der sikrer sammensvejsning.

Figur 27 viser svejsestyrker ved peel af en svejst film, dannet ved sammensvejsning af to film, der begge er coated med svejseblæk. Svejsestyrken er mindre end trækstyrken af PET, men alligevel bryder PET-filmen i en del af prøverne svejst med PVB-binderen. Prøverne med heatseallak (HSL-binder) peeler over hele aftrækningen. PVB/PE-systemet viser dobbelt svejsestyrke af HSL/PE-systemet, hvilket tilskrives sammensmeltningen af PE-partiklerne. I øvrigt viser resultaterne, at der er dårlig adhesion mellem PE og PET. Denne lære bruges senere i cirkulære forsøg, hvor PET behandles med en adhesionsprimer.



FIGUR 27. Svejsestyrker i N/10 mm ved peel af en overlapsvejsning. De to bindersystemer testet er en PVB-binder og en kommerciel heatseallak fra Resino. Varmesvejsningerne er foretaget ved 140 °C, 150 °C og 160 °C. PVB/PE-systemet viser størst initial styrke, hvorefter svejsningen bryder. Heatseallakken peeler af med konstant og lav kraft i hele peeling.

4.4.4.1 Svejsestyrke af solvent castede svejselag

Svejseegenskaber af PETG mod PET er demonstreret ved udstrøg fra PETG-opløsninger. Figur 28 viser sammenhængen mellem opløsningsmiddel, svejsetemperatur og svejsestyrke kvalitativt. Succeskriteriet er, at svejsningen bryder i PET-filmen og ikke i svejselaget. PETG fra et filament til 3D-printning er anvendt og methylenklorid, THF og 1,4-dioxan er testet som opløsningsmidler. Det er også undersøgt, om en film af PETG blødgjort i methylenklorid lag mellem PET-filmlag kunne svejse. Dette sidste virkede ikke. Men udstrøgene kunne med stor svejsestyrke svejses ved lave temperaturer – helt ned til 130 °C.

Svejestyrke – kvalitativ

Håndpeel:

Visuel bedømmelse:

brud i PET

jævn svejsning

adhesivt peel i PETG

ujævn svejsning

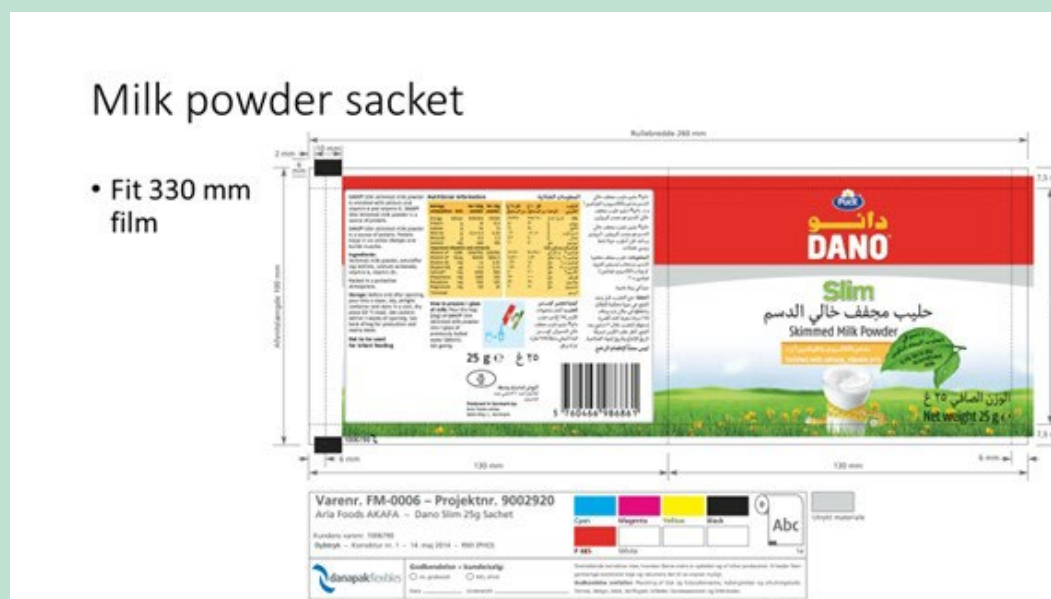
Adhesivt brud mod PET

PETG	3D filament			Film
Opl.m.	Methylenklorid	THF	Dioxan	Methylenklorid
Svejs temp.				
130 °C	✓✓	✓✓	✗✗	✗✗
150 °C	✓✓	✓✗	✓✓	✗✓
180 °C	✓✓	✓✗	✓✓	✗✓

FIGUR 28. Svejsetest af to PET-film med udstrøg af PETG opløst i en række opløsningsmidler, som svejse lag mellem filmene. Der er anvendt PETG, der bruges i et filament til 3D-printning samt en film af PETG blødgjort med methylenklorid. Methylenklorid kan kun anvendes i laboratorietest, mens 1,4-dioxan også viser gode svejseegenskaber ved lidt højere temperaturer. Svejseparametre: 2 sekunder. 2 bar. set-point: 130 °C. 150 °C. 180 °C. temp. målt mellem kæber 20 °C lavere.

4.4.5 Trykke og svejsetest af PE-partikelbaserede formuleringer i løbende baner

Tryktest blev først udført med et layout svarende til en mælkepulverpose vist i Figur 29.



FIGUR 29. Layout for mælkepulver Sachet for 330 mm web-bredde

Trykningen blev foretaget med såvel PE-partikler og PETG-partikler udviklet på henholdsvis DTI og DTU. Blæk blev fremstillet af partner Resino og fulddækkende sort farve blev også leveret af Resino. Poserne blev fremstillet som et laminat, hvor virksomheden Vetaphone i parallel udvikling også coatede filmen med en SiOx-barriere lag. Film blev lamineret og trykt hos partner Nilpeter og et pakke-/svejseforsøg blev udført hos partner Arla. Det blev konkluderet, at svejsningerne var for svage til at fylde mælkepulver i poserne ved pakningen. Et stykke af den fremstillede film er illustreret i Figur 30.



FIGUR 30. Mælkepulverposer svejst hos Arla (venstre side) og trykt film (højre side)

4.4.6 Trykning og genanvendelsesforsøg

En række tryktest og genanvendelsesforsøg er udført. Basis PET-folien er leveret af Flexfilm i Polen. Det er en 23 m tyk folie, der er corona behandlet på den ene side og kemisk behandlet med den såkaldte UPF-behandling (handelsnavn, coatingen er Flexfilms proprietær viden). Figur 31 viser produktinformation for folierullen. Ruller blev udskåret til valgte bredder hos underleverandør.

Figur 32 viser det generelle layout for monoplast filmen. Tryktest blev udført hos partner Nilpeter på et flexoværk. Der blev udført forsøg med 1x, 2x, og 3x trykning af svejseblæk. Svejseblækken er en formulering af PE-partikler og en kommerciel binder i ethylacetat opløsningsmiddel med 30 % binder til 70 % PE-partikler w/w i tør tilstand. Forholdet mellem ethylacetat og tørstof (70:30) blev indstillet til passende viskositet (figur 33). Resultaterne for flergangstryk

var varierende fordi blækket fra første trykning blev delvist genopløst i anden trykning og endnu værre i tredje trykning. Derfor blev der anvendt 2x tryk i genanvendelsesforsøget. På filmens yderside blev der trykt et tofarvet ARLA-logo og overtrykt med en beskyttelseslak. Figur 34 opsummerer data for flexotryktesten. Figur 35 viser clichéer anvendt til at trykke og figur 36 viser selve trykkeprocessen hos Nilpeter A/S.

Partner Boeras organiserede et genanvendelsesforsøg ved underleverandør. Genanvendelsesprocessen omfatter både vask af filmen og decontaminering. Resultatet var en rulle folie, der blev gemt for at kunne udføre endnu et genanvendelsesforsøg uden for projektets tidsperiode. Basis folien og den genanvendte folie blev sammenlignet i en FTIR-analyse. Figur 37 viser spektret af basis folien og den genvundne folie. Det har ikke været muligt spektroskopisk at identificere forskelle på de to folier.

PET Films for recycling experiment

2 x 3000 m slized to 422 mm width

Marks & Nos./ Container No.	No & Kind of Pkgs	Description of Goods						Quantity	
111611225526	4	POLYSTER FILM ONE SIDE CHEMICAL COATED OTHER SIDE CORONA TREATED	Item Code	Thickness (Mic)	Width (mm)	Core ID (Inch)	No of Rolls	Length (Mtr)	
001,002,003,004,	PALLETS		F-UPF-023.0-CT-B	23	750	6	1	6000	143.00 KGS
			F-UPF-023.0-CT-B	23	1500	6	5	6000	1446.00 KGS

PET 23 micron
Bredde : 422mm
Antal meter : 3000 mtr
ID core 76



NT - 6263 - maj 2022
Roll nr : M122BF00515

NT HORSSENS ApS
Sandvej 9B
8700 Horsens
Tlf : 75617688
info@nthorsens.dk

FIGUR 31. PET-film fra Flexfilm som bestilt og opskåret hos NT Horsens.

Recycling experiment

Printing of film Miljøpet A/S, Slagelse 13-14/92022

Participants

Peter Albrechtsen, Tom Andersen, Nilpeter A/S
Poul Erik Stenfelt, Resino A/S
Peter Sommer-Larsen, DTI

Materials

PET Film: 23 µm / 422 mm width – se enclosure 1
Materials: See enclosure 2 for MSDS

No.	Materiale	Amount
	Redivers 900 Heat seal Primer	
1	0059-AB	10 kg (vandbaseret)
2	Redivers 300 weldingacquer 0113-AB	12 kg Trykkes på 2 gange tykt lag (solventbaseret)
3	Revalux 156 Gul P123520	10 kg ARLA LOGO. (vandbaseret)
4	Revalux 156 Grøn P036120	10 kg ARLA LOGO. (vandbaseret)
5	Revalux 156 Barriere lak 0130	10 kg Overtrykslak til ARLA LOGO. (vandbaseret)



FIGUR 32. Layout af trykt monolag

Recycling experiment

- All materials are food approved except
 - Pigment in Arla's yellow and green colours
 - PE particles, MIPELON PM-200 from MITSUI Chemicals Inc.
- Welding ink: 30 % dry matter in Ethylacetate
 - Dry matter: 30 % binder / 70 % PE particles

No.	Materiale	Amount
	Redivers 900 Heat seal Primer	
1	0059-AB	10 kg (vandbaseret)
2	Redivers 300 weldingacquer 0113-AB	12 kg Trykkes på 2 gange tykt lag (solventbaseret)
3	Revalux 156 Gul P123520	10 kg ARLA LOGO. (vandbaseret)
4	Revalux 156 Grøn P036120	10 kg ARLA LOGO. (vandbaseret)
5	Revalux 156 Barriere lak 0130	10 kg Overtrykslak til ARLA LOGO. (vandbaseret)

FIGUR 33. Materialer brugt i forsøg

Recycling experiment

CMPP - Aniloxvalser / Farveoverførsel

Tryk	Farve	Anilox [g/m ²]	Ca. overført farve våd [g/m ²]
Aria Logo	Grøn	3,5	1,2
Aria Logo	Gul	3,5	1,2
Lak	klar	8	2,6
Primer	Klar	8	2,6
Svejselak	Transp hvid	30	9,9
Svejselak	Transp hvid	30	5,0

Konditioner:

Trykkehastighed 75 m/min
Svejselak viskositet 15s
Ovn temp. 60 gr. Celsius

Bemærkninger:

Ved trykning af svejselak 2. gennemløb, vurderes at kun den halve mængde overføres grundet lakkens egenskaber.

Slagelse, d. 14/02, PA

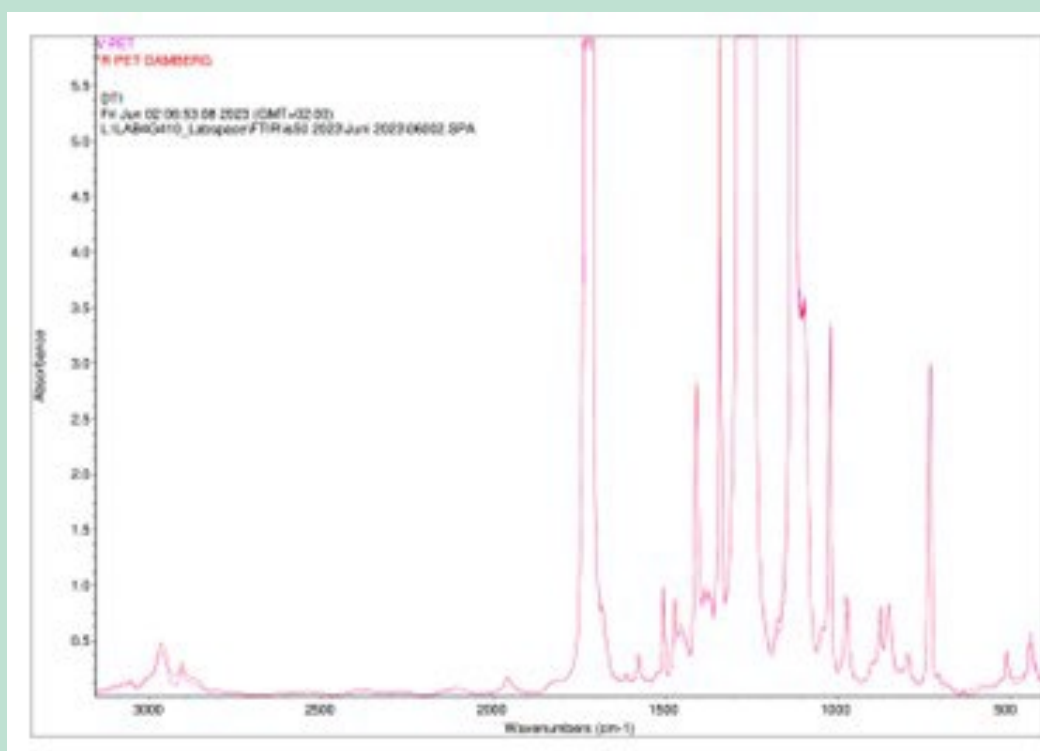
FIGUR 34. Trykke parametre for flexotryk



FIGUR 35. Klichéer til flexotryk



FIGUR 36. Trykning ved partner Nilpeter



FIGUR 37. FTIR transmissionsspektre af 23 μm PET-folie før (V-PET) og efter genanvendelse (R-PET Damberg) gennem partner Boeras (Damberg). Der ses ingen markante forskelle mellem de to spektre og ingen nye toppe.

4.5 Konklusion

Konklusionen er, at genanvendelse er mulig med et monolag PET, hvor der er brugt vandbaserede farver og solventbaseret partikelblæk.

Svejsningen er et problem og manglende lagtykkelse ved flexoprint svækker styrken. Lag-tykkelser bør være 8-10 g/m² for at give en stærk svejsning og flexoprint lægger 0,1 til 3 g/m² på. Flexoprint er industristandard i fødevareemballage branchen og er derfor valgt i eksperimenterne. Men metoden har udfordringer når tykkere lag af svejseblæk skal påføres. Alternative trykmetoder som dybtryk og inkjet tryk kan vælges. Partikelstørrelsen vil medføre tekniske udfordringer for specielt inkjet-tryk. Tykkere lag vil også have betydning, når filmen rulles op. Hvis svejselagene overlapper, fx langsgående på filmen, så bygges der en større og større højde forskel mellem områder på rullen op jo længere den oprullede bane er. Det kan gøre det vanskeligt at afrulle og oprulle filmen præcist.

Forsegling af de tynde lag, som kan påføres ved flexotryk, sætter krav til svejseudstyret. Typisk er fødevareindustriens pakkelinjer udstyret med svejseudstyr, hvor svejsekæberne er stive. Det betyder, at små skævheder i svejsekæberne vil resultere i områder med dårlige svejsninger. Grunden er at kæberne ikke kan lægge et ensartet pres over hele svejseområdet, hvilket resulterer i dårlig varmeoverførsel i de berørte områder. Dagens multilagsfolier har svejsefilm, der er 40 – 80 µm tykke. De kan fordele mindre skævheder i kæberne fordi svejsematerialet LDPE typisk er tilstrækkeligt føjeligt til at flyde ud og fylde huller. Med tynde svejselag bør kæberne i stedet udformes sådan, at de er så elastiske, at de selv kan tilpasse sig filmens overflade og give et ensartet pres og dermed ensartet varmeoverførsel. En sådan løsning vil kræve tilpasning af dagens forseglingsudstyr.

5. Trykte svejselag med PETG-partikler

5.1 Introduktion

Projektet har undersøgt de forskellige udfordringer, der er forbundet med at etablere en teknologisk løsning til at levere svejsmateriale i et forudbestemt mønster og opnå en robust og holdbar svejsning ved hjælp af dette. PETG er valgt, fordi materialet kemisk er tæt på PET. Da svejselakken kun skal anvendes i minimale mængder, er materialet til genvinding næsten udelukkende PET, men i modsætning til de andre muligheder, så er den eventuelle kemiske forurening kemisk tæt på PET.

Arbejdet har været opdelt i følgende hovedopgaver:

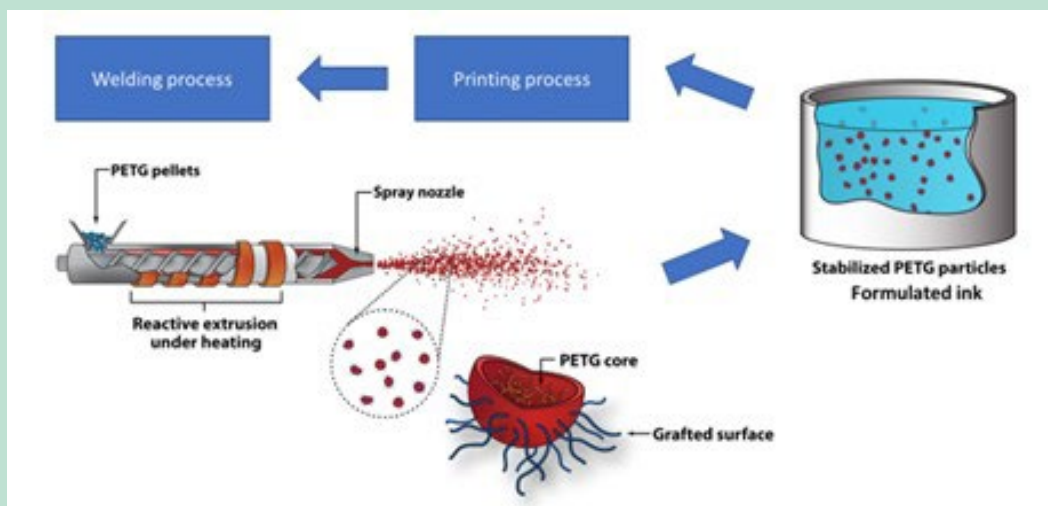
- Fremstilling af partikler, der kan bruges som svejsmateriale
- Formulering af stabile blækformuleringer af disse partikler, der muliggør levering i vand eller miljømæssigt mindre skadelige organiske opløsningsmidler såsom ethanol.
- Test af simpel svejsning med partiklerne i og uden formulering
- In-line test til svejsning på rulle-til-rulle systemer.

Disse opgaver er blevet forfulgt i hovedprojektet, og vi har rapporteret fremskridteneseparat separat i hvert WP-spor udførligt. Her har vi opsummeret de vigtigste resultater fra hver opgave og konklusionerne fra hver del. I sidste ende har vi opsummeret den overordnede konklusion og anbefalinger til løsning af eventuelle resterende problemer samt eventuelle afhængigheder mellem dem.

5.2 Partikelpræparation

I projektet og et samarbejdende Innovationsfondsprojekt, Circular Mono Plastic Packaging, er der udarbejdet en række partikler baseret på PE og PETG. Udviklingen af svejsemetoder for PE-partikler er beskrevet i afsnit 4.

For svejsemetoder med PETG-partikler er der udviklet en ny proces, der muliggør fremstilling af partikler og hurtig og effektiv overflademodifikation ved in-situ kemisk modifikation og efterfølgende oprensning og udfældning til separate mikropartikler. Processen er skalerbar og vil kunne bruges til at producere større mængder partikler, hvis en partner med de rigtige faciliteter kunne identificeres, hvilket dog er blevet vurderet uden for projektets rammer. De opnåede partikler har en størrelse på $<10\mu$ i alle tilfælde og på tværs af alle forskellige modifikations-scenarier. Der blev udviklet forskellige partikler med forskellig stabilitet i vand, hvor de bedst dispergerende blev produceret med en PVA-modifikation på PETG-overfladen.



FIGUR 38. Fremstilling af PETG-partikler til svejselag

5.3 Test af svejseegenskaber

Validering af hypotesen om, at partikler kan anvendes som et lokaliseret svejsmateriale, blev udført gennem en række tests på alle de fremstillede partikler. Det blev vist, at simpel spredning af partiklerne (ved hjælp af opløsningsmidler, vand eller bare spredning af dem på overfladen) muliggjorde svejsning i laborietests.

5.4 Formulering af vandige og alkoholbaserede systemer

For at kunne trykke et svejsmønster, der kan forsegles i pakkelinjen, er det et krav, at der skal udarbejdes et formuleret system, der kan levere partiklerne. Disse formulerede systemer kan betragtes som blæk, der sikrer den korrekte viskositet, forhindrer blandingen i at tørre ud under processen og har den langsigtede stabilitet, der kræves for at levere partiklerne i industrielle omgivelser. Derfor er en bred vifte af tests af forskellige formuleringssystemer blevet undersøgt gennem arbejdet mellem Resino, Teknologisk Institut og DTU.

De modificerede PETG-partikler (m-PETG) kan dispergeres i vand. En række tests med forskellige formuleringer blev udført i alkoholbaserede bindemiddelsystemer såvel som vandige systemer. Det blev vist, at det var muligt at finde stabile formuleringer af m-PETG-systemer, der forhindrede for tidlig udfældning af partikler. Mere stabile formuleringer var ønsket til langtidstest, men systemerne var tilstrækkeligt stabile til, at en vurdering af deres svejseevne kunne finde sted.

5.5 Svejsetest af formulerede systemer og in-line-test af bearbejdning

Det fremgik klart af de omfattende tests udført på de formulerede systemer, at alle formulerede systemer, manglede den krævede svejsestyrke. Dette blev undersøgt i flere tilfælde, og både PET-foliens overflade og synergierne mellem partikler, bindemiddelsystem og dispergeringsmiddel blev taget i betragtning. Det blev konkluderet, at udfordringerne var en kombination af virkninger, der stammer fra de meget komplekse blandinger, som formuleringerne repræsenterer. Det var tydeligt, at alle additiverne i formuleringen var vigtigere end de specifikke partikler i blandingen, hvor selv formulering af partikler, der svejser alene, resulterede i ikke-svejsende film efter påføring af partiklerne i formuleringen.

Derudover viste test af in-line-overførselssystemerne, at dispergerede partikler var vanskelige at overføre i en tilstrækkelig mængde til at sikre en tilstrækkelig mængde partikler på de ønskede svejsesteder. Her blev de største udfordringer identificeret som in-line-nedbør i systemerne, da Flexo-print blev anvendt. Generelt var det overordnede billede af svejs materiale leveret in-line, at materialerne ikke blev leveret i tilstrækkelig mængde og koncentration til at muliggøre en stærk og effektiv svejsning.

For at undersøge dette nærmere blev et par alternative doseringsløsninger uden for projektets oprindelige omfang evalueret som mulige alternative løsninger:

- 1) Brug af en kommercielt tilgængelig svejselak, der ikke ville have nedbørsproblemet
- 2) Overførsel af en polymersmelte direkte til PET-filmens overflade

Den kommercielt tilgængelige svejselak blev testet på den kommercielle in-line-trykmaskine. Det fungerer betydeligt bedre med hensyn til overførsel og lokalisering af materialet. Som forudset allerede i det oprindelige projektgrundlag overføres der imidlertid ikke tilstrækkeligt svejs materiale til at sikre en stabil og robust svejsning. Dette førte til diskussioner om svejsmaskinerne og deres tilsvarende opvarmede kæber. Det blev fastslået, at der kunne etableres bedre kontakt ved ændring af det industrielle svejseudstyr. Det ville lette en potentiel vej, hvor betydeligt lavere mængder svejs materialer kunne bruges i processen. Det blev imidlertid anset for utilstrækkeligt til at kompensere for den utilstrækkelige mængde materiale, der blev leveret til svejseområdet.

Med hensyn til den anden mulighed for at overføre en polymersmelte under in-line-behandlingen blev det under projektet indset, at dette kunne være en potentiel alternativ vej til levering af materiale til svejsezonen. Denne metode er potentielt mulig at inkorporere i in-line-behandlingsudstyret, selvom den også ligger uden for projektets oprindelige anvendelsesområde, da det ville kræve en betydelig genopbygning af behandlingslinjerne. Denne tilgang blev ikke desto mindre undersøgt gennem filamentaflejningsmodellering additiv fremstilling, hvor en PETG-filament blev anvendt til at teste muligheden for at deponere co-polymeren på overfladen af PET-filmen uden at beskadige substratet og levere en tilstrækkelig mængde materiale til efterfølgende svejsning. Disse hurtige undersøgelser viste, at det faktisk var muligt at levere en tilstrækkelig mængde materiale til PET-substratet uden at beskadige det (se bilag B). Enkle laboratorietest af den efterfølgende svejsning af lagene viste, at det var muligt at opnå stærke svejselag ved med PETG-materialet på PET-filmen til både PETG fra en anden film, såvel som mod den uberørte PET-film.

5.6 Konklusioner baseret på testene

Den overordnede konklusion er, at det er vigtigt at levere en tilstrækkelig mængde rent materiale til det potentielle svejseområde.

- 1) Partikler med forskellig overfladekemi kan fremstilles, og de rene partikler har vist sig at svejse PET-filmene. De kan dog ikke leveres i trykte mønstre under industrielle forhold uden at formulere dem i blæk. Der er fremstillet blæk, men alle test har afsløret utilstrækkeligt overførsel af materiale til svejseområdet for alle de formulerede systemer.
- 2) Der er identificeret løsninger til forbedring af svejskæbernes effektivitet, hvor fx fleksible kæber anses for at kunne resultere i forbedret kontakt, hvilket muliggør et lavere materialekrav i svejseområdet. Dette kræver dog stadig, at der leveres mere materiale til området, før en sådan løsning vil være effektiv.
- 3) Heat-seal-lakker fungerer godt til lokal dosering og levering, men igen overføres der ikke tilstrækkeligt materiale til svejsmønstret og bliver for nuværende ikke betragtet som et muligt alternativ for flexoprint.
- 4) Smelteprocesser til overførsel af en smeltet PETG-polymer til overfladen som svejs materiale viste sig at være en effektiv metode til at levere en tilstrækkelig mængde materiale til svejseområdet. Dette skal dog undersøges realistisk for in-line-udstyr, før den endelige validering af denne proces kan bekræftes.

Som en anbefaling til det fremtidige arbejde vil det være spændende at vurdere muligheden for at anvende en smelteoverførselsløsning på in-line-udstyr for at sikre en høj belastning og levering af nok materiale til svejsezonen. Denne løsning er også den bedste i betragtning af det oprindelige projekts overordnede mål om at producere en monomaterialeløsning, der ville muliggøre mere ligetil og direkte genanvendelse af de svejsede film efter brug som emballagemateriale.

BILAG (sidst i rapporten)

Del A: Generelle overvejelser vedrørende infrastruktur, begrænsninger i emballagelinjens design, svejsemaskiners design og mulige ændringer.

Del B: Undersøgelse af smelteoverførsel som en potentiel tilgang til pålagte svejselag.

6. Trykte svejselag med svejselak

6.1 Introduktion

Der er også blevet arbejdet med en teknologi, hvor det trykte svejselag alene er baseret på en kommerciel vandbaseret svejselak fra partner Resino. Filmene er ikke blevet genanvendt, men den trykte og sammensvejste emballage er efterfølgende rengjort i laboratoriet med samme metoder, som bruges industrielt. Også her er resultatet at madrester, tryk på ydersiden af filmen og svejselakken er rensset helt væk og kun ren PET er tilbage. Det gælder også, hvor sammensmeltet svejselak ligger mellem to lag PET.

6.2 Svejselak

Lak anvendt: Redivers 300 Heat seal Primer 0059-AB fra Resino A/S.
Et billede af trykkeeksperiment hos partner Nilpeter er vist i Figur 39.



FIGUR 39. Trykning af PET-film hos Nilpeter af svejselag baseret på svejselak

Figur 40 viser film efter svejsning hos partner Arla.



FIGUR 40. Film efter svejsning. Oprulning af den trykte film er særdeles løs og et problem skabt af de langsgående striber af svejselak. For design m.m., se afsnit 4.

7. Alternative svejseløsninger

Udenfor dette projekts formål er der nogle alternative løsninger til at anvende trykte svejselag:

1. Svejsning af PET uden svejselag
2. Alternativ plasttype end PET

Der findes sikkert andre alternativer, men denne rapport beskriver kun disse to muligheder.

7.1 Svejsning af PET uden svejselag

Som beskrevet i afsnit 2.3 og 3.1.1, er PET en termoplast, der kan svejdes sammen ved høje temperaturer. Almindelige pakkemaskiner svejser ved temperaturer mellem 120-190°C, hvilket er meget lavere end 220-300°C, som det kræver for at lave brugbare svejsninger på PET og rPET.

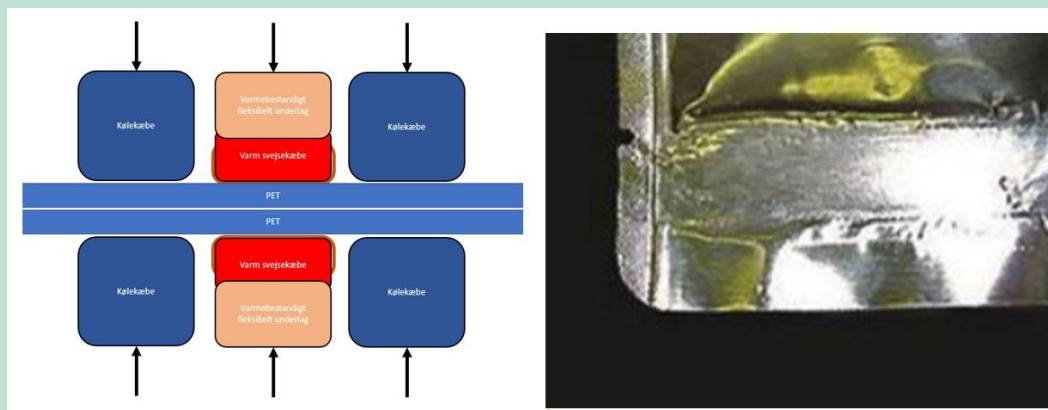
Flere større koncerner har allerede indført den politik at investere i de lidt dyrere pakkelinjer, som også svejser PET – og især rPET.

Det er ikke alene en udfordring at konstruere svejsekæberne til at svejse ved de højere temperaturer. PET/rPET er også væsentlig tyndere film, der kræver en større mekanisk nøjagtighed for at opnå en tæt forsegling af posen – se følgende kapitel om pakkemaskiner.



FIGUR 41. Svejserynkninger på metalliseret PET-film

Endelig er der den yderligere udfordring ved alle blæste mono-film, der svejdes, at ved siden af svejsningerne rynker filmen. For at emballageposen skal kunne præsentere sig i salget skal man anvende svejsekæber, der langs den varmezone ved svejsningen har en kold zone, der holder plastmaterialet nede på en så lav temperatur, at plasten ikke "husker" sin oprindelige form og rynker.



FIGUR 42. Tegning og foto af svejsning med sidekøling på svejsekæber.

7.2 Alternativ plasttype end PET

En anden mulighed er at anvende en plastfilm af en anden plasttype end PET. Det er en indlysende mulighed, hvis man ikke skal pakke fødevarer. 50-70% af alle plastfilm til emballage anvendes til fødevareemballage, derfor er det vigtigt for de fleste film, at de overholder EU-forordning EU-2022/1616, der generelt kræver brug af PET for genanvendelse af brugt plast til nye produkter med fødevarekontakt.

EU-forordning EU-2022/1616 har dog mulighed for at få godkendt andre cirkulære plastforløb end PET. Under reglerne for "novel methods" bør andre plasttyper kunne godkendes i fremtiden. Der arbejdes pt. på at kunne genanvende brugt PP til nye fødevareemballager, men endnu har ingen fået noget cyklisk forløb godkendt. Det virker sandsynligt, at også HDPE og LDPE kan blive accepteret.

Også disse film kræver at svejsekæberne modvirker rynkning.

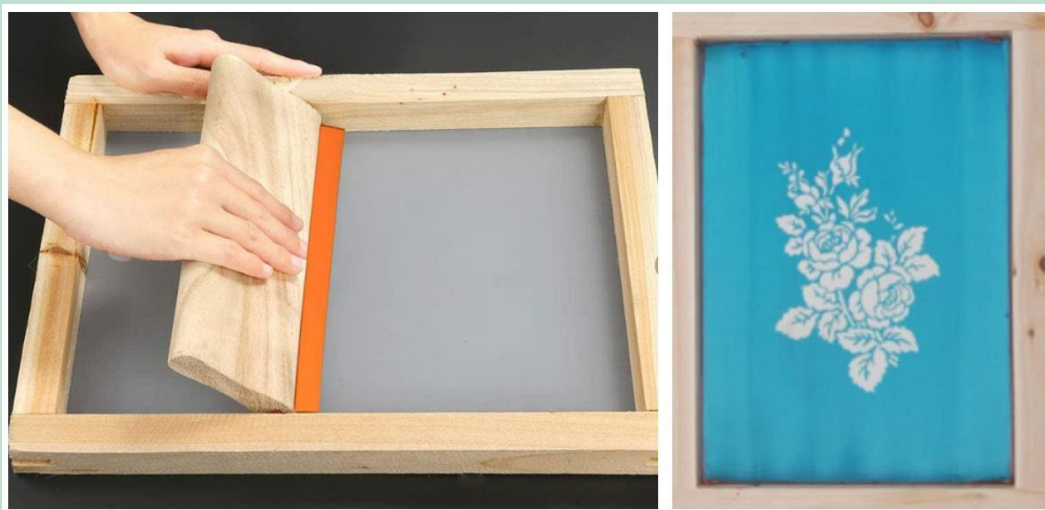
8. Trykteknologier

Disse svejselag kan trykkes på emballagefilmen med en af følgende trykteknologier:

4. Silketryk
5. Flexografi
6. Offset
7. Dybtryk
8. Inkjet

8.1 Silketryk

Silketryk/Serigrafi er en trykteknik, hvor et net bruges til at overføre farven til et substrat. De steder, der ikke skal påføres et blæk, er på nettet blokeret af en belægning. En gummiskraber placeret på tværs af nettet bruges til at skubbe blæk gennem de åbne områder. Maskens tykkelse og finhed bestemmer mængden af det overførte blæk.



FIGUR 43. Silketryk til manuel trykning. Nettet er blokeret med en blå belægning. Farven trænger kun igennem det hvide net.

Lagtykkelse af blæk er mellem 10 - 30 μm vådt blæk. Dette vil tørre ind til en reduceret tykkelse af den færdige og udtørrede lag, der senere skal svejses.

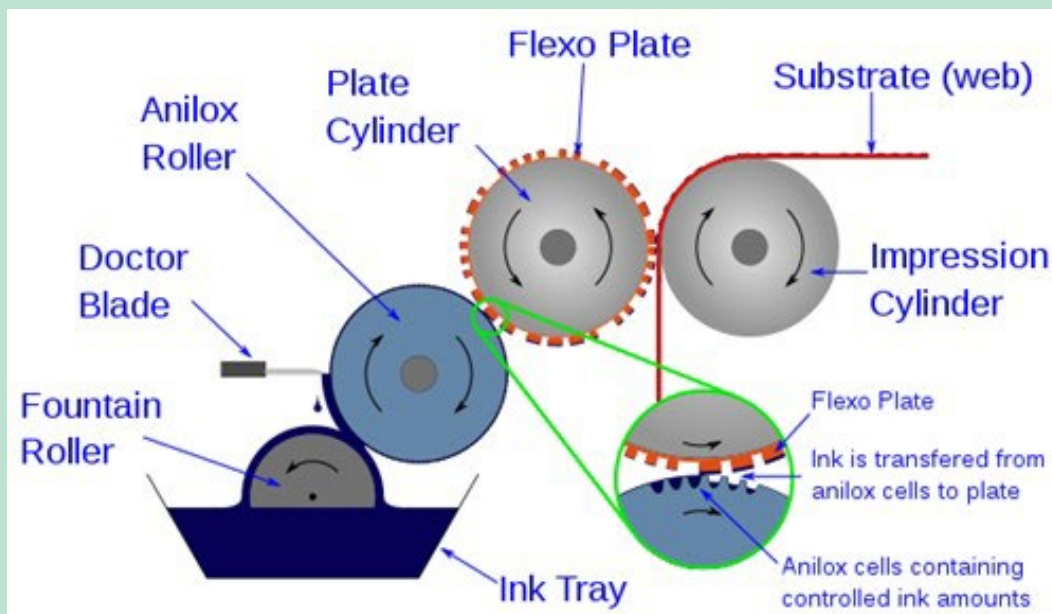
Da blækket skal passere gennem nettets åbninger, er denne teknik følsom over for partikelstørrelser.

Silketryk/Serigrafi er den ideelle proces, når der kræves høj dækning og farvestyrke for at opnå strålende billedeffekter af høj kvalitet. I dag er det almindeligt at se silketrykapplikationer brugt i både billedkunst og i kommerciel trykning. Teknologien er alsidig og giver mulighed for udskrivning på underlag af enhver form, tykkelse og størrelse. Der kan også påføres en større tykkelse af blækket på substratet, end det er muligt med andre trykteknikker, hvilket giver mulighed for at skabe effekter såsom taktile og blindeskrifteffekter, matte og blanke effekter, glitter, ridser og forhøjet tekst. Guld og sølv skærmbæk bruges også i stedet for folie.

Processen består af tre elementer: skærmen, som er billedbæreren; gummiskraber; og blæk. Ved roterende silketryk/serigrafi formes skærmen til en cylinder. Når blæk indføres på gummiskraber, roterer cylinderen, og blækket skubbes ud af skærmen på det bevægelige substrat.

8.2 Flexografi

Flexografi (ofte forkortet til flexo) er en trykproces, der anvender en fleksibel reliefplade. Trykfarven overføres til trykpladens høje punkter via en graveret rulle. Graveringens dybde og design bestemmer mængden af blæk, der overføres.



FIGUR 44. Principtegning af flexotryk-teknologi

Der er forskellige designs af blækenheder:

1. Åbn blækspand med gummirulle, der presser blækket ind i aniloxvalsen.
2. Åbn blækkammer, hvor aniloxvalsen fyldes ved hjælp af hydraulisk tryk.
3. Lukket blækkammer, hvor aniloxvalsen også fyldes ved hjælp af hydraulisk tryk.
4. Hybrid af 1 og 2.



FIGUR 45. Flexotryk-linje. Hver farve overføres fra hver sin trykstation.

Der overføres vådt blæk i en lagtykkelse mellem 3 – 8 μm . Dette vil tørre ind til en reduceret tykkelse af det færdige og udtørrede lag, der senere skal svejdes.

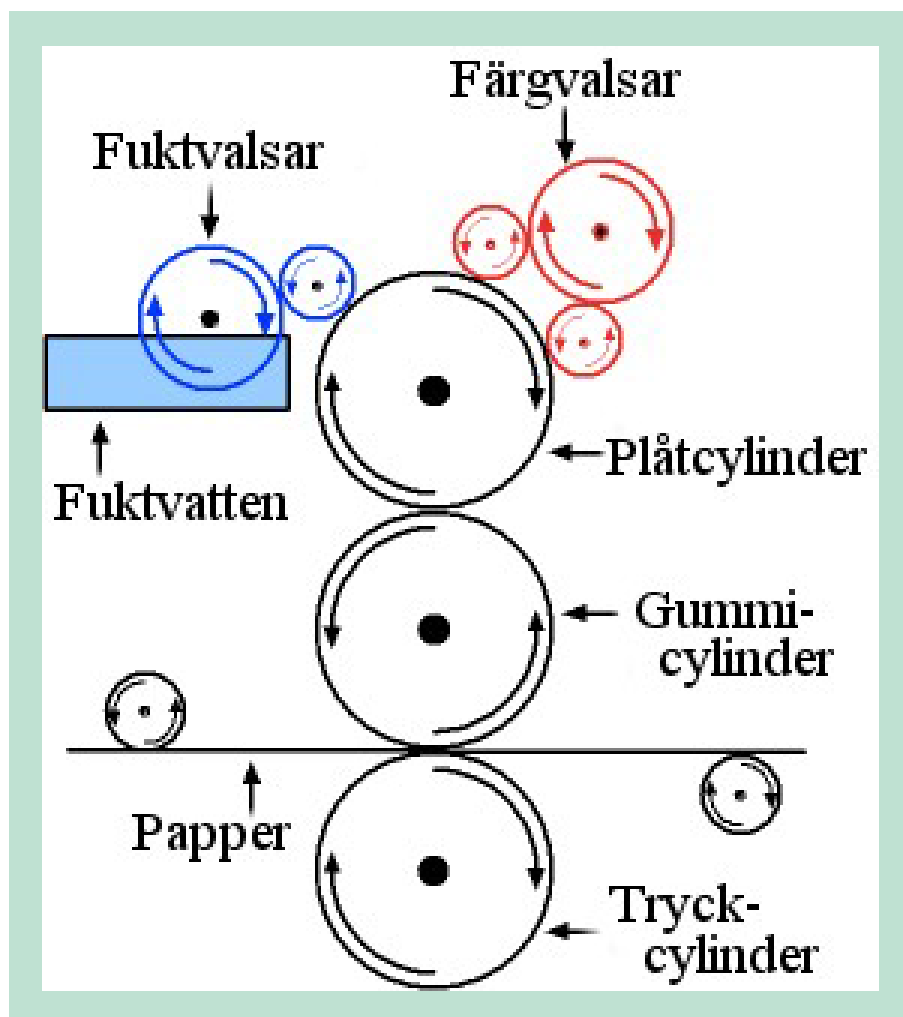
Flexotryk bruges til en række formål fx emballage. Den anvender fleksible reliefplader og kan bruges til udskrivning på næsten alle typer underlag, inklusive polymerfilm, metalfilm og papir. Flexo-processen er også velegnet til print af store områder med ensfarvede farver. Typiske produkter trykt ved hjælp af flexografi omfatter bølgepapkasser, fleksibel emballage inklusive detail- og indkøbsposer, mad- og hygiejneposer og sække, mælke- og drikkevarekartoner, fleksibel plast, selvklæbende etiketter, engangskopper og -beholdere, kuverter og tapeter. Flexografisk tryk kan bruges til en række materialer, og kræver kun korte trykforberedelsestider, er billigt og leverer rene prints.

Generelt anvender flexotryk en flexografisk plade (lavet af polymer eller gummi) med et hævet billede eller tekst, der er fastgjort til en cylinder.

Der er tre hovedtyper af blæk, der anvendes til flexotryk: vandbaseret, opløsningsmiddelbaseret og UV-hærdende blæk. Flexografisk blæk har generelt en lav viskositet, hvilket muliggør hurtigere hærdning.

8.3 Offset

Offsettryk er udviklet fra litografi (stentryk) og som dette ud fra det litografiske princip, at trykfarve med (vegetabilsk) olie som bindemiddel afviser vand.



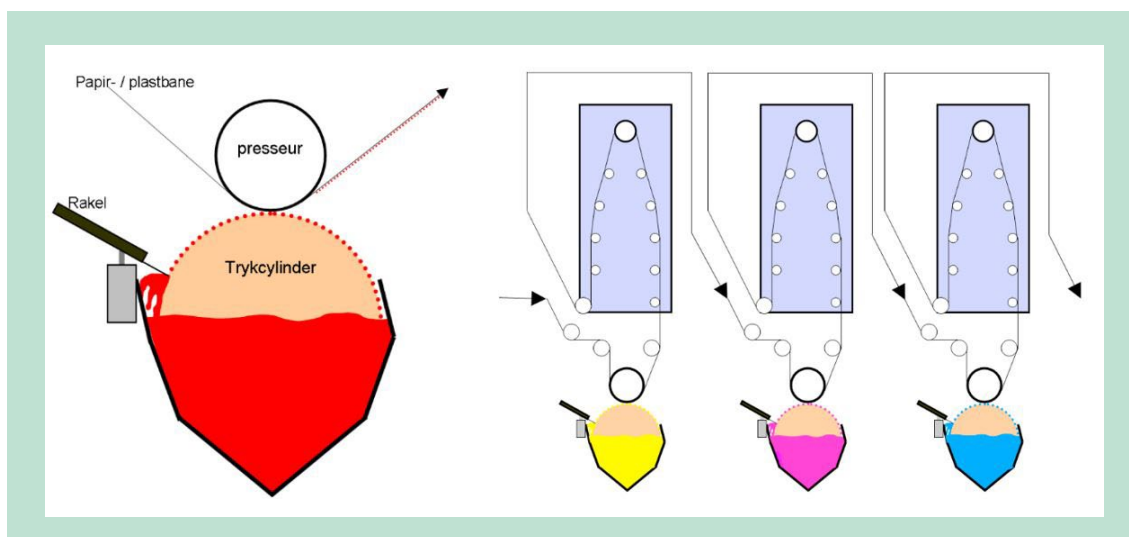
FIGUR 46. Offset-trykteknologi.

Den maksimale farvelagstykkelse af vådt blæk er 1-2 μm . Dette vil tørre ind til en reduceret tykkelse af det færdige og udtørrede lag, der senere skal svejses.

Når der er behov for fremragende kvalitet, er offset det foretrukne valg. Takket være moderne servomaskiner, den høje grad af standardisering, lave pladeomkostninger og en fordelagtig produktionspris, bruges offset mere og mere, også til relativt simple emballager. En moderne servomaskine er i stand til at reducere opsætningstider og spild betydeligt. I de sidste par år har disse forbedringer været så betydelige, at offset nu ofte er i stand til effektivt at konkurrere med flexotryk.

8.4 Dybtryk

Dybtryk (gravure) er en trykmetode, hvor trykelementerne på trykformen graveres ind i formen, så de niveaumæssigt er lavere end de ikke-trykbare områder. En meget tynd flydende trykfarve "hældes" over trykformen, så hele trykformen dækkes med farve, hvorefter en skraberkniv skraber overfladen ren, så trykfarven kun efterlades i de indgravede dele af form. Dybden og designet af indgravede områder bestemmer mængden af overført blæk. Teknologien er udviklet til brug af opløsningsmiddelbaseret blæk.



FIGUR 47. Principperne i dybtryk (gravure).

Dybtryk pålægger op til 10 µm vådt blæk. Dette vil tørre ind til en reduceret tykkelse af det færdige og udtørrede lag, der senere skal svejses.

Ved dybtryk ætzes et billede på overfladen af en metalplade eller cylinder, hvorved det billede, der skal trykkes, forsænkes. Fordybningerne fyldes derefter med blæk, mens den hævede (ikke-trykkende) del af pladen eller cylinderen tørres eller skrubes fri for blæk. Substratet presses mod den farvede plade eller cylinder, og billedet overføres. Dybtryk kan producere fine, detaljerede billeder.

8.5 Ink-jet

Ink-jet kendes fra billige printere til vores hjemme PC. Mange små ventiler kaster små dråber af blæk ned på et substrat fx plastfilm, papir osv. Ventilen styres af en computer, mens substratet kører forbi. Der er en række dyser/ventiler for hver farve. Svejseblæk vil derfor skulle have sin egen række af små ventiler. Hver farve skal have sin egen række.



FIGUR 48. Ink-jet

Ink-jet pålægges som små dråber blæk, der flyder sammen. Med vådt blæk kan:

- En række hoveder kan generere 50 μ lagtykkelse ved 50 m/min.
- To rækker hoveder kan generere 100 μ lagtykkelse ved 50 m/min
- To rækker af hoveder kan generere 50 μ lagtykkelse ved 100 m/min
- Osv.

Dette vil tørre ind til en reduceret tykkelse af det færdige og udtørrede lag, der senere skal svejdes.

Dette er baseret på UV-applikationer, så med vandbaseret/opløsningsmiddelbaseret vil mængden af vand/opløsningsmiddel/tørstof naturligvis påvirke resultatet. Kun en producent af ink-jet-hoveder kan arbejde med en viskositet i området 7-25 cPs (og måske højere). Da blæk-
ket skal passere gennem åbningen i hovedet, er denne teknik følsom over for partikelstørrelser. Det er ikke muligt at tilføje PE eller PETG-partikler i vandbaserede produkter, hvor PE-partikler: $D = 6-10 \mu\text{m}$ og PETG-partikler: $D = 1,6 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$.

8.6 Oversigt over trykteknologier

TABEL 4. Sammenligning af trykteknologier

	Silketryk	Flexotryk	Offsettryk	Dybtryk	Ink-jet-tryk
Image transfer	Direkte	Direkte	Indirekte	Direkte	Ingen kontakt
Opløsning i tryk Linjer/cm	50	60	100-200	100	60-250
Linje bredde μm	50-150	20-50	10-15	10-50	1-20
Blæk viskositet $\text{Pa}\cdot\text{s}$	>1-50	0,05-0,5	40-100	0,05-0,2	0,007-0,025
Trykkets tykkelse¹⁾ μm	10-30	3-8	1-2	<0,1-10	50
Trykhastighed m/min.	Op til 100	100-500	200-800	100-1000	15-500

¹⁾ Tykkelsen er angivet for det våde lag, så tykkelsen vil blive reduceret ved tørring.

9. Svejseforsøg

9.1 Brancheekutyme og formål

Når man bestiller plastlaminater med delvist PET, køber man i branchen typisk en film, hvor der er et LDPE svejselag på min. 40 μ . Det betyder nogle gange at styrken i filmen ligger i et tyndt lag PET fx 12 μ , mens svejselaget er betydeligt tykkere og tungere på 40 μ LDPE eller LLDPE. Styrkelaget udgør derfor kun 31% af massen.

Når man ser på trykteknologierne (kapitel 8), så ses det, at det er vanskeligt at trykke op til 40 μ på en film.

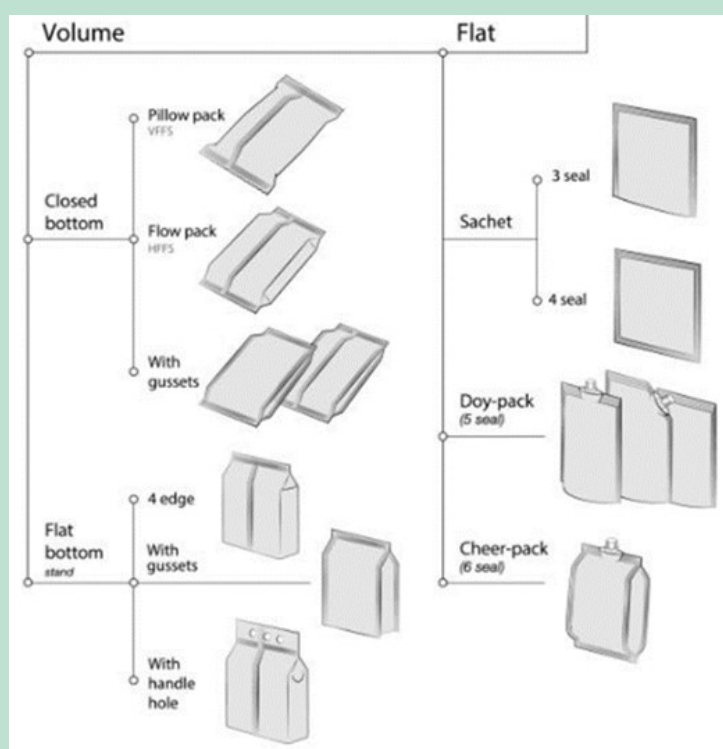
Hertil kommer at en film på 15 μ med et partielt påtryk på op til 40 μ slet ikke kan blive rullet op til en stabil rulle.

Derfor er formålet med forsøgene at finde frem til hvor tynd kan svejselaget være for stadig at have tætte og godt forseglede poser.

9.2 Forsøgsplan

Posetyper

Plastemballage fremstilles ved at folde plastfilm og svejse filmens kanter. Der findes forskellige typer emballagedesign afhængigt af specifikke applikationer som vist i figur 49.



FIGUR 49. Forskellige måder at forme plastfilm til fleksible poser.

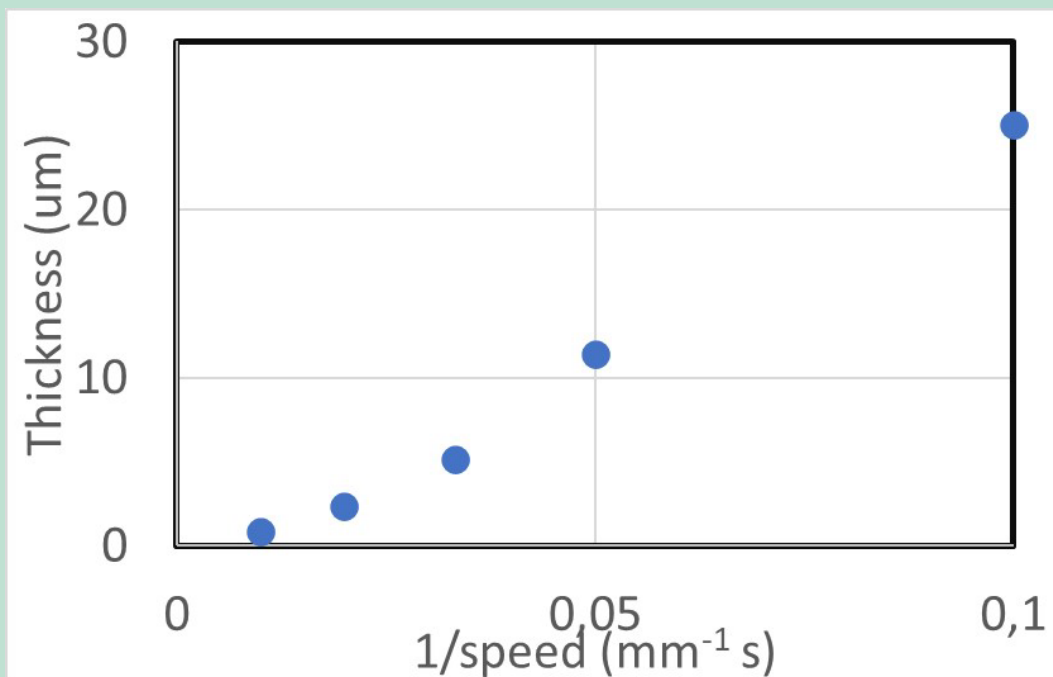
I forsøgene er anvendt pudepakninger (Pillow Pack) og flowpakninger med et eller to indstik (gussets), fordi dette er de mest almindelige fleksible emballager.

Sveiseblæk

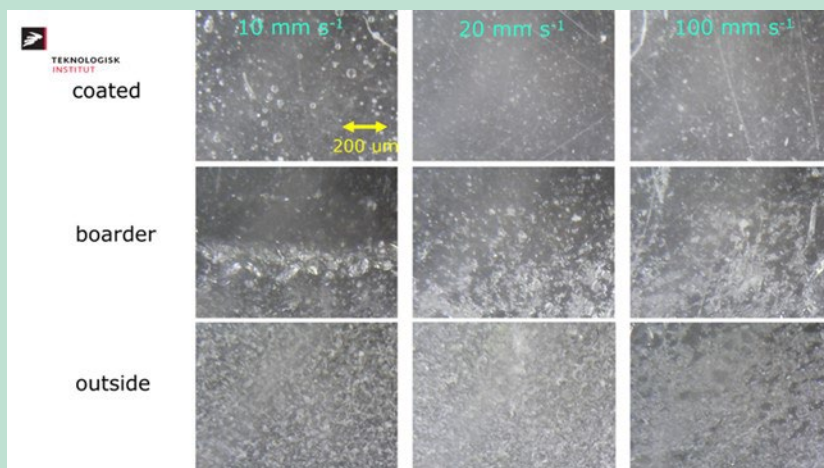


FIGUR 50. Sprøjtepistol og svejselak brugt forsøgene

Til vores forsøg er anvendt en vandbaseret varmemeforseglingslak 3000059-XX (Figur 50), som sveiseblæk. På samme figur er vist den sprøjtepistol, der blev brugt til at applicere svejselakken på en 23 μ PET-film. Sprøjtepistolen er placeret på en mekanisk arm, hvor det er muligt at styre hastigheden, således tykkelsen af svejselaget kan produceres ensartet i et jævnt lag med samme tykkelse.



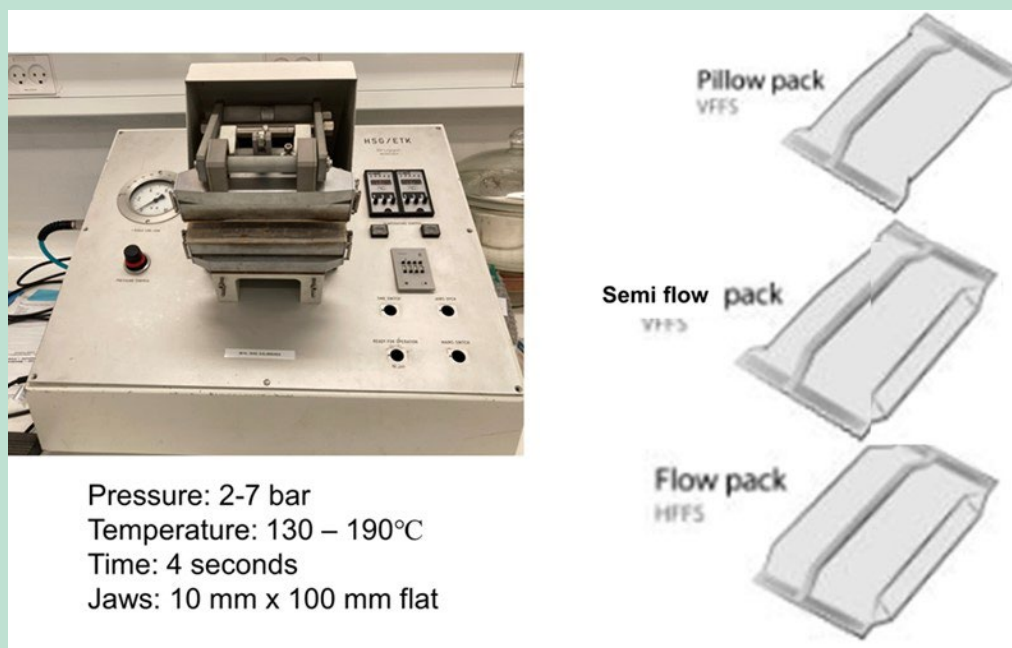
FIGUR 51. Sammenhæng mellem sprøjtepistolens hastighed og det pålagte lag på filmen.



FIGUR 52. Figuren viser mikroskop-foto af pålægningerne

Figur 52 viser foto fra et mikroskop af de coatede lag og nær disse. Når hastigheden var på 10 mm/s med det tykke lag, blev der observeret mange luftbobler. Eksistensen af boblerne var ikke indlysende for de coatede lag ved hastigheder på 20 og 100 mm/s. Uanset hastigheden blev der konsekvent observeret ujævne aflejringer uden for belægningslaget. Under sprøjteprocessen blev der genereret tåger. Aflejringerne menes at være de resterende stoffer i de aflejrede tåger. Den målte tykkelse af området er typisk mindre end detektionsgrænsen på 1 μ. Ved grænserne mellem det coatede lag og ydersiden sås ekstra aflejringer især ved en hastighed på 10 mm/s. Under sprøjteprocessen skubbede luftstrømmen den belagte væske til siden af den coatede zone. Dette er sandsynligvis grunden til, at den målte tykkelse afviger fra forventningen, da hastigheden var højere. Dette gælder kun for forsøgene. Senere skal svejselagene appliceres med trykning og ikke sprøjtetelakering.

Svejsning med varmforsegling



FIGUR 53. Svejsning af fleksible poser

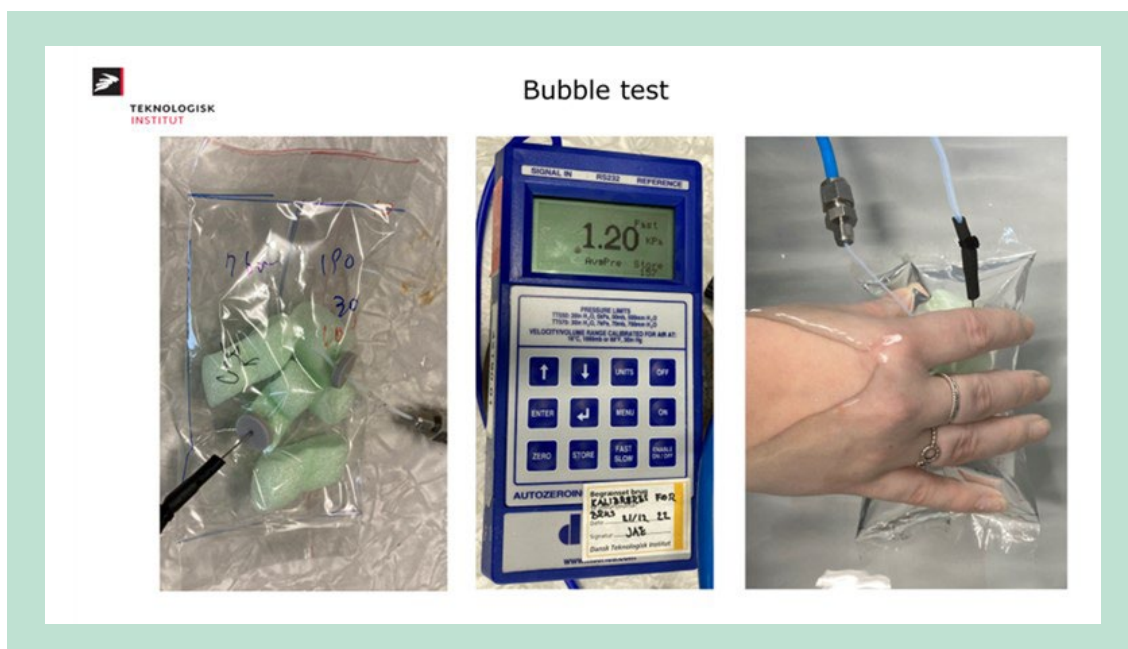
Emballagerne i disse forsøg blev fremstillet ved hjælp af en varmemeforsegler (svejsmaskine) som vist i figur 53. Kæberne (10 mm x 100 mm) har en flad geometri med en temperaturstyring mellem 130-190°C og trykkes sammen med trykluft med forskellige tryk. Trykområde er mellem 2 og 7 bar. Da cylinderens diameter er 20 mm, anslås trykket ved kæberne at være mellem 0,06 og 0,2 MPa. Det vurderes, at fremstillingen af pakkerne ved hjælp af denne varmemeforsegler, kan give en idé om den laveste standard for de industrielle varmemeforseglingsforhold.

Posedesign

Tre forskellige pakkedesign blev overvejet – pudepakker (uden indstik), samt flowpakker med henholdsvis et eller to indstik (figur 53). Størstedelen af prøverne var pudepakker uden indstik. Produktion af flowpakker med indstik blev forsøgt, men på grund af vanskeligheden ved laboriemaskinens størrelse blev pudepakker også fremstillet med indstik på kun den ene side. På nogle få prøvepakninger havde flowpakken indstik på begge sider.

Vores laborietest af pudepakker viste, at den målte tykkelse på 1-2 μ var tilstrækkelig til at demonstrere tætningsgenskaber. Derfor blev de fleste PET-folier belagt med ca. 1 μ tykt svejselag svarende til hastigheden ved 100 mm/s.

Tæthedsmåling med bobletest



FIGUR 54. Bobletest

Efter produktion af emballage blev bobletest udført. Figur 54 viser en procedure for bobletesten. Først blev der skabt to huller, og nåle blev indsat. Den ene blev brugt til at føde luft, og den anden var til at måle trykket inde i emballagen. For det andet blev emballagen nedsænket i vand i et vandbad. Ved at indføre luft og/eller placere emballagen et dybere sted blev trykket inde i emballagen øget. Trykket blev justeret mellem 1,1 og 1,2 bar. For det tredje blev generering af bobler nøje observeret. Det blev undersøgt om der enten ikke blev observeret nogen bobler (Pass), eller der var kontinuerlig generering af bobler (Fail).

9.3 Forsøgsresultater

De rå data for bobletestresultaterne er angivet i tabel Y. Blandt 38 undersøgte prøvepakninger har kun 8 bestået testen.

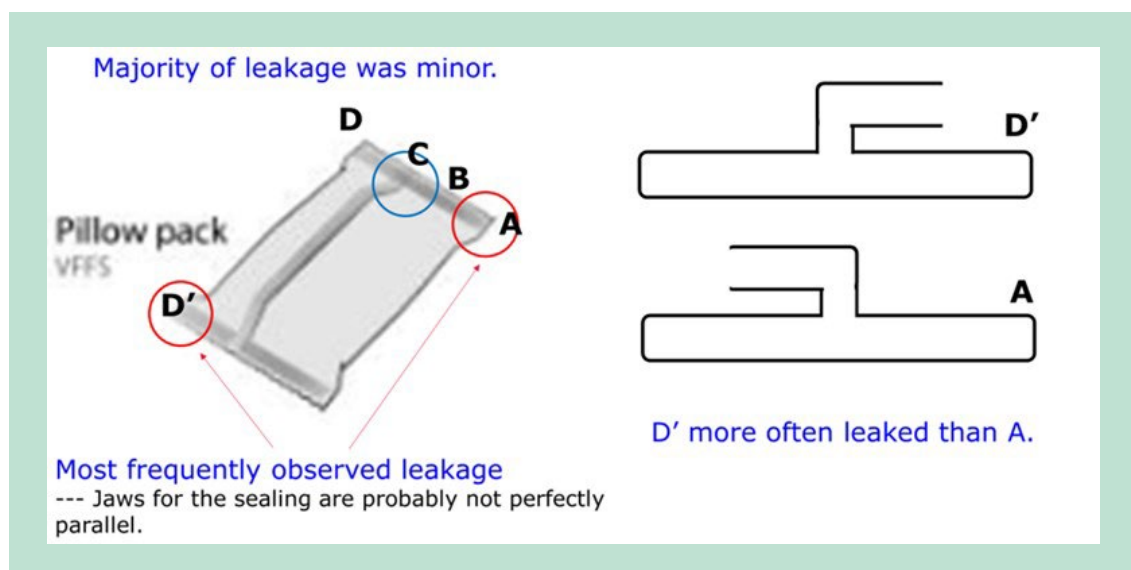
TABEL 5. Bobletestresultater. Udført for pudepakningsdesign den 26. maj 2023 (venstre) og den 2. juni 2023 (højre). "Pillow" er pudepakninger uden indstik. "Flow" er pudepakninger med to indstik og "Semiflow" har kun et indstik.

sealing condition table

20230526				
nr.	speed mm/s	Pressure bar	temp degree	comments
1 a	100	2	130	all leaks
b				
2 a	100	2	190	
b				
3 a	100	7	130	
b				
4 a	100	7	150	
b				
5 a	100	7	170	
b				
6 a	100	7	190	
b				
7 a	50	2	130	no leaks
b				
8 a	50	7	190	
b				
9 a	30	2	130	
b				
10 a	30	7	190	
b				
11 a	30	5	130	
b				
12 a	30	2	150	
b				

20230602						
nr.	speed mm/s	Pressure bar	temp degree	P	F	comments
13 a	pillow	100	3	190	✓	very bad
b					✓	very weak right
14 a	pillow	100	5	190	✓	
b					✓	
15 a	pillow	30	3	130	✓	2 corners
16 a	pillow	30	3	190	✓	1 corner
17 a	pillow	30	4	190	✓	1 corner 1 corner
18 a	pillow	30	7	190	✓	
19 a	semiflow	100	7	190	✓	4 corners
b					✓	small bit?
c					✓	flow side x 2
d					✓	3 corners
20 a	flow	100	7	190	✓	many
b					✓	"
c					✓	"

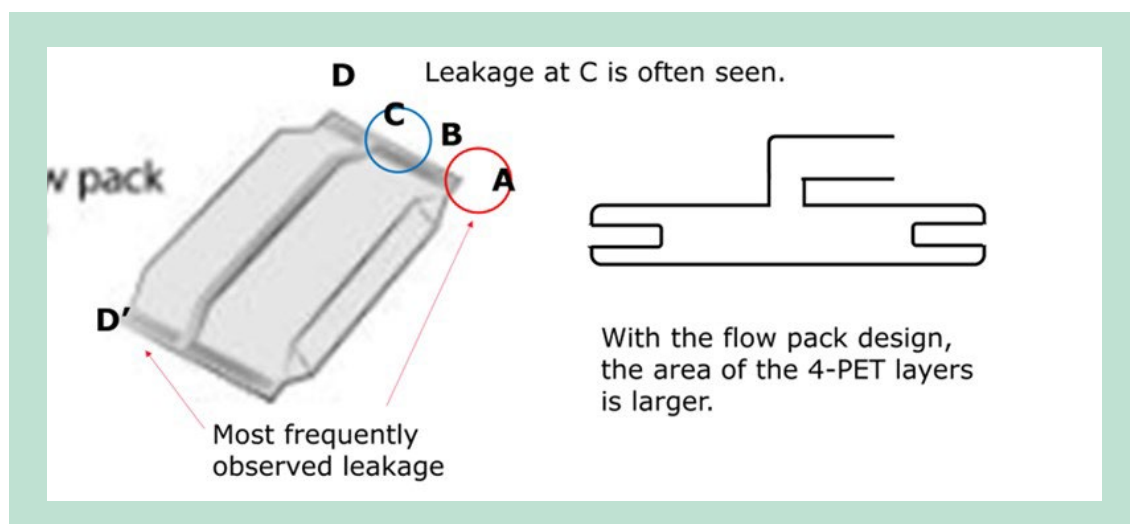
Fejltyper på pudepakninger uden indstik



FIGUR 55. Resultater af bobletest for pudepakninger

I mange tilfælde var luftlækagen meget lille. Da lækagen blev opdaget, var det hyppigst på hjørnerne A og/eller D' i figur 55, hvor der var fejl. Under tætningsprocessen var disse hjørner altid placeret på højre side af kæberne. Det foreslås derfor, at kæberne ikke er perfekt justeret til at være parallelle, og at trykket på denne side altid er lavere end i venstre side. Blandt dem blev D lækket oftere end A. Det skyldes igen forskellen i trykket under tætning. C blev lejlighedsvis lækket, men meget færre gange end A eller D.

Fejltyper på flowpakninger

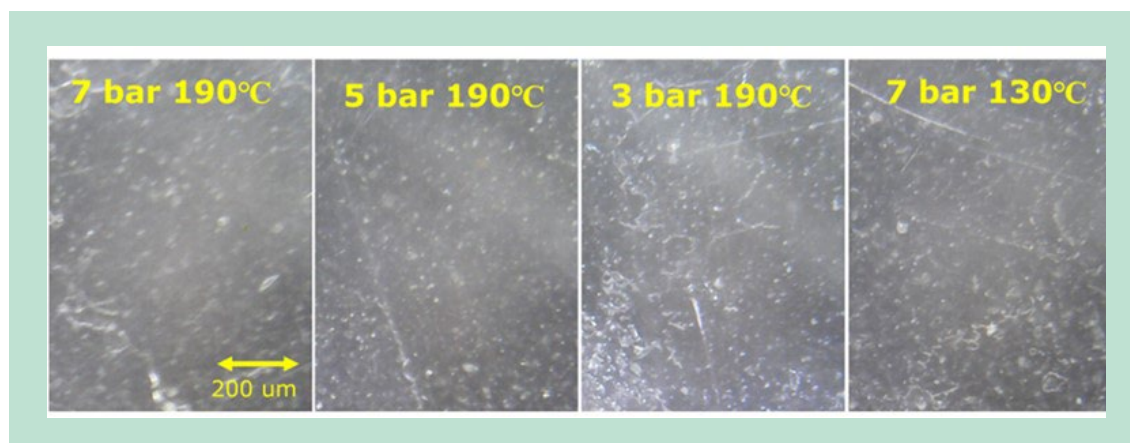


FIGUR 56. Resultater af bobletest med flowpakker

Lækage af flowpakkens design er mere signifikant end pudepakken. Igen blev lækagerne hyppigst set i hjørnerne af A og D (figur 56). Placeringen C blev ofte utæt, men sjældnere end A eller D. I tilfælde af flowpakkedesign er tætningsarealet for 4-lags-PET (ca. 40-50% af trykområdet) større end flowpack-designet (ca. 20-25% af trykområdet). Derfor blev det faktiske højtryk, der blev påført 4-lags-PET halvdelen, hvilket forårsagede hyppigere lækage. Under de industrielle forhold skal forholdet mellem tætningsarealet for 4-lags-PET imidlertid være mindre, og dette problem kan derfor være signifikant mindre.

Observationer i mikroskop

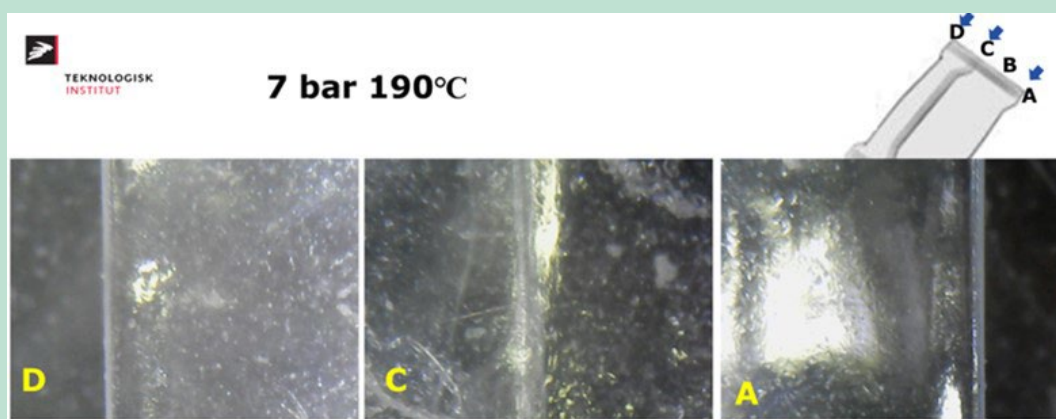
Der blev udført optisk mikroskopisk observation for positionerne "B", "D", "C" og "A" (se figur 56) i pudeposen fremstillet ved forskellige tryk og temperaturer.



FIGUR 57. Foto fra mikroskop fra position B i pudepakninger

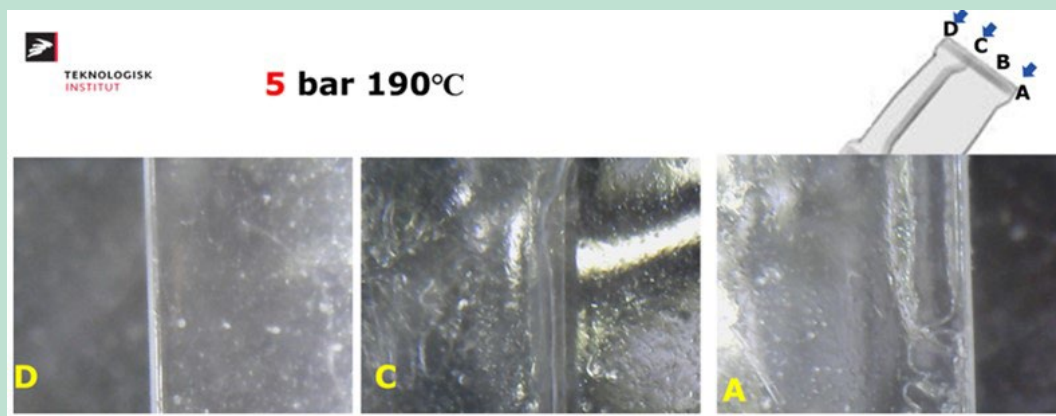
Figur 57 viser foto af position "B" på pudepakken. Temmelig glatte strukturer af svejselagene blev set. Ved lavere tryk eller temperatur virker de mindre homogene. Effekten af temperaturen er imidlertid meget mindre signifikant.

Nedenfor er forstørrelsen af fotobilleder den samme som i figur 55. Billederne af placeringerne "D", "C" og "A" sammenlignes.



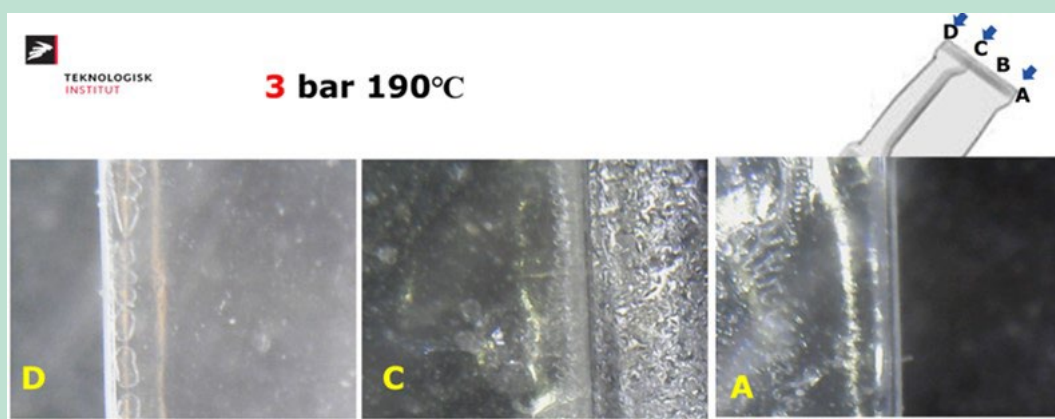
FIGUR 58. Foto fra mikroskop fra position D, C og A i pudepakninger

Når trykket var på 7 bar, og temperaturen var på 190 °C, blev tætningslaget jævnt fordelt, og der blev ikke observeret kontinuerlige defekter som vist i figur 58. Det bemærkes, at prøven i denne tilstand bestod bobletesten (se tabel 4).



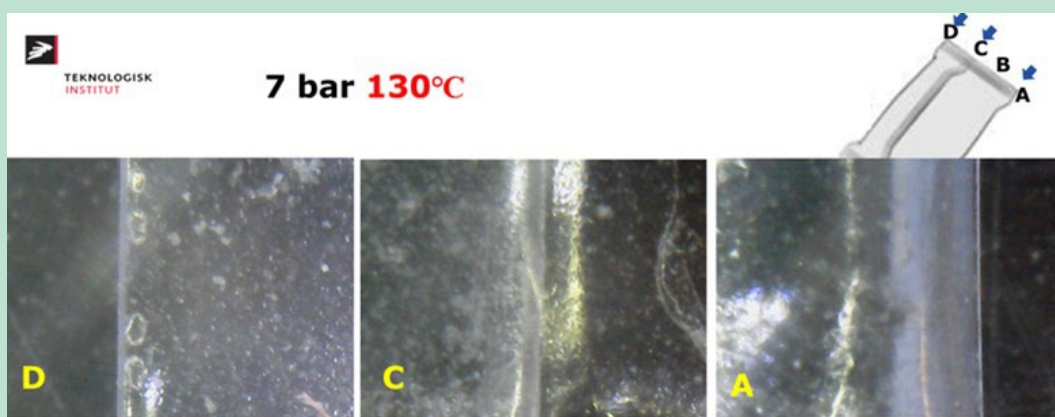
FIGUR 59. Foto fra mikroskop fra position D, C og A i pudepakninger fremstillet ved reduceret tryk (5 bar)

Når trykket var reduceret til 5 bar, og temperaturen forblev på 190 °C, var tætningslaget relativt jævnt fordelt (figur 59). Luftbobler ses, men der var ingen kontinuerlige defekter.



FIGUR 60. Foto fra mikroskop fra position D, C og A i pudepakninger fremstillet ved reduceret tryk (3 bar)

Når trykket reduceres yderligere til 3 bar, og temperaturen var på 190°C, ses de mange luftbobler som vist i figur 60.



FIGUR 61. Foto fra mikroskop fra position D, C og A i pudepakninger fremstillet ved reduceret temperatur (130°C)

Når trykket var på 7 bar, og temperaturen var på 130°C, blev luftboblerne observeret (figur 61). Tætningslaget ser dog glattere ud end det i figur 60.

Vurderinger

Det bekræftes, at højt tryk og høj temperatur kan give bedre tætningsegenskaber, og trykket giver højere påvirkning end temperaturen.

En pakkemaskineproducent anbefaler, at tætningstrykket skal være 0,1-0,2 kg/mm² (1-2 MPa). Især ved tætning af flere lag vil overgangen fra 4 til 2 lag kræve mindst 0,2 kg/mm² for at sikre svejsede overgange. Tætningskæbe til tværgående forsegling - savtakket med profillinjer parallelt med strømningsretning vil sandsynligvis give det bedste resultat, men den ternede profil kan være en mulighed. Generelt er tætningslag mellem 2-4 µ tilstrækkelige, men ved særlige lejligheder er der behov for op til 6 µ. Tætningslag på 1,2 µ er bestemt i den lave ende.

Bemærkninger

Tykkelse på 1 μ er nok til Teknologisk Instituts bobletest. Højt tryk og høj temperatur er ønskeligt. Tryk er en primært vigtig parameter. Selv under begrænsede forhold for Teknologisk Instituts varmemeforsegler (lavt tryk op til 0,2 MPa, flad geometri) kan tætning demonstreres for 1 μ lag. Tætning i det industrielle miljø med designede kæber ved højt tryk kan sikre acceptabel tætning.

Bobletest eller simpel mikroskopisk observation anbefales til enkel og hurtig screening.

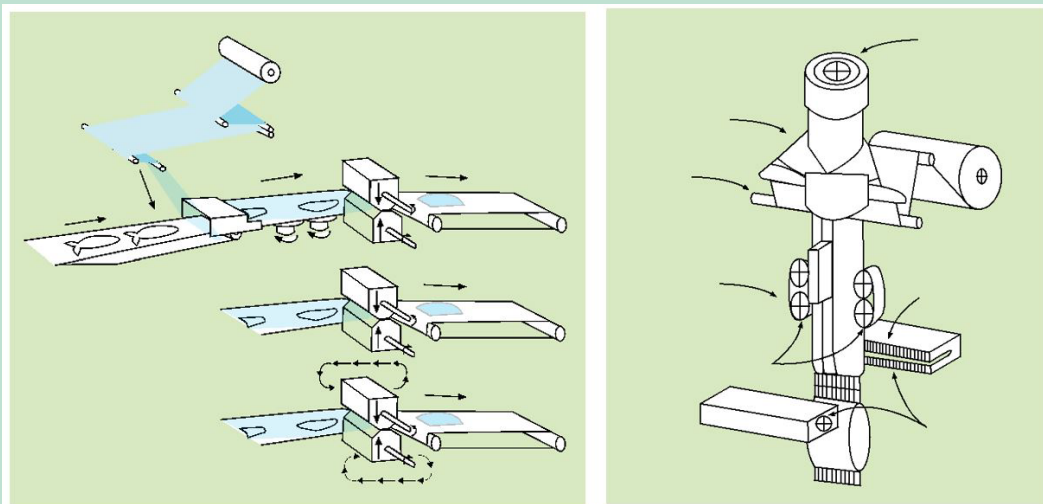
10. Svejseudfordringen i pakkemaskinerne

10.1 Svejseudstyr på flowpakkemaskiner



FIGUR 62. Horisontal flowpakkelinje

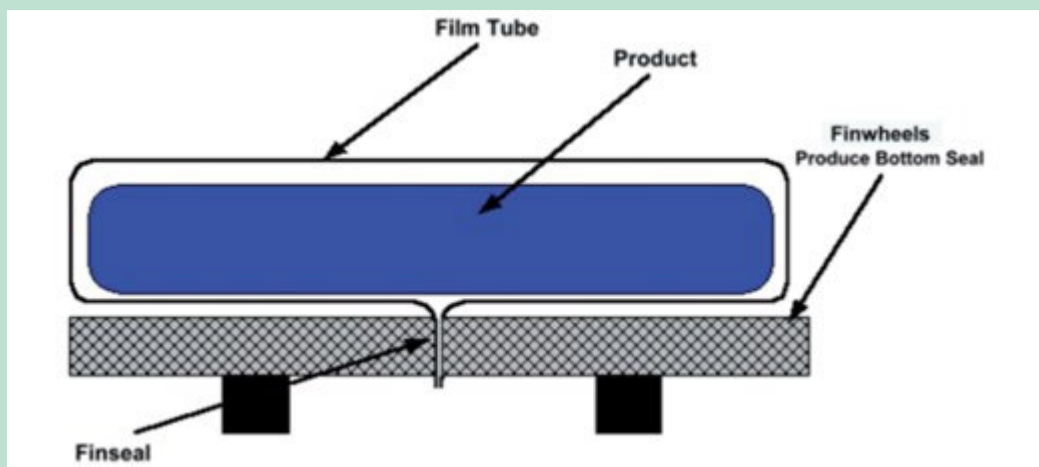
Flowpakkemaskiner konverterer en rulle plastfilm til poser ved at svejse plasten sammen i to retninger: En langsgående svejsning og med svejsekæber til en top- og bundsvejsning. Svejsekæberne er normalt udstyret med en kniv der klipper filmen over til enkelpakninger.



FIGUR 63. Principtegninger af horisontal og vertikale flowpakkelinjer

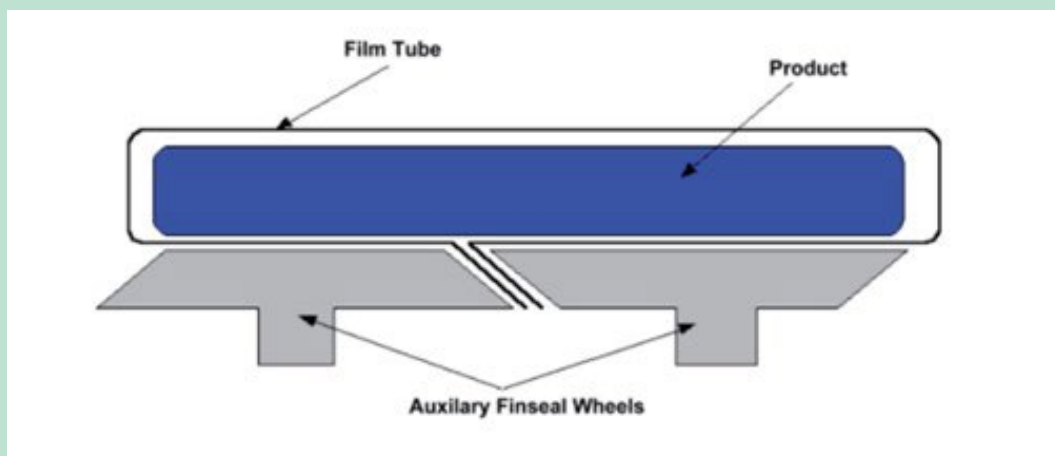
Disse maskiner findes i versioner, der enten kører stop-go eller kontinuerligt. De maskiner, der stopper, gennemfører kun den langsgående svejsning når filmen fremføres og top- og ende-svejsningerne når filmen står stille. De kontinuerlige maskiner arbejder hurtigere, men svejskæberne er bevægelige.

10.1.1 Langsgående svejsning



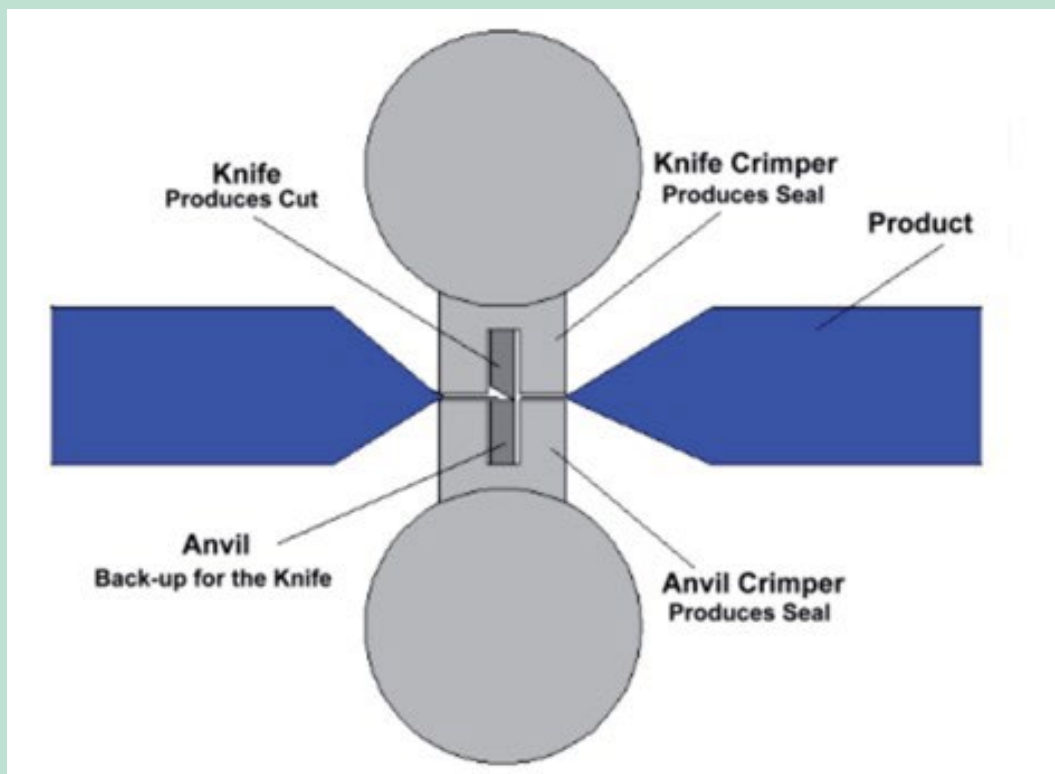
FIGUR 64. Roterende svejskæber til langsgående svejsninger

Den langsgående svejsning udføres af to roterende hjul, der presses hårdt mod hinanden. Der gennemføres derfor en løbende punktsvejsning, hvor alle kræfter koncentrereres om kun et punkt. Skulle der komme en foldning el. øges kræfterne i dette punkt. Derfor er utætheder sjældne og der vil ikke være behov for at trykke et særligt tykt svejselag på de langsgående svejsninger, der altid kommer til at ligge yderst på en rulle film. Forsøgene viste 1-3 μ , hvilket nogenlunde er det samme som produktionsunøjagtighederne på en almindelig plastfilm. Den færdige rulle vil derfor, i praksis, ikke blive så skævt oprullet.



FIGUR 65. Roterende svejsekæber der placerer den langsgående finsvejsning ned mod posen

10.1.2 Tværgående svejsninger (Top og bund)

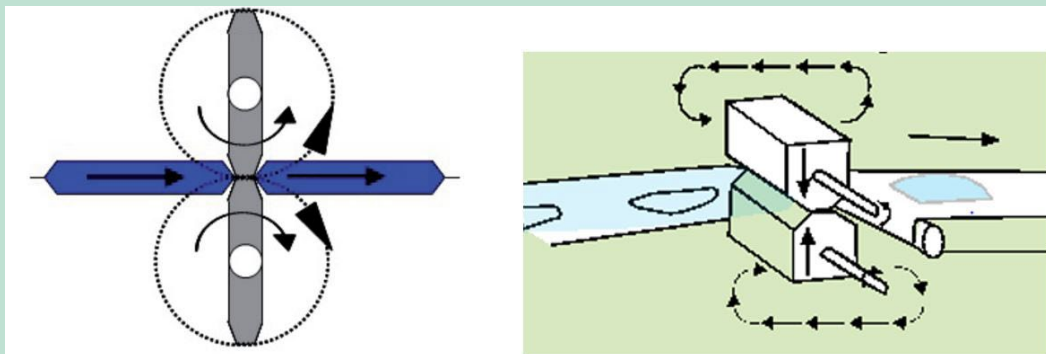


FIGUR 66. Top-/bund-/endesvejsninger

Som det ses af tidligere afsnit omkring tæthedsforsøg, så er det omkring top, bund- eller endesvejsningerne, der er tæthedsudfordringer. Årsagerne til dette er mange:

- Der er her et forskelligt antal lag skal samles, så trykket på filmlagene varierer.
- Der er her mange foldninger, hvor filmen skal trykkes hårdt sammen for der ikke skal opstå huller.

- Svejsekæberne er svære at producere, så kæberne er helt parallelle. Dette gælder i særlig grad på de kontinuerligt kørende maskiner, hvor svejsekæberne "flyver" hen over filmen.



FIGUR 67. Roterende svejsekæber til endesvejsninger

Som det ses i afsnittet om tæthedsforsøg, har selv en omhyggeligt produceret laboratoriesvejsmaskine en sådan skævhed. Dette er selvfølgelig værre i industrien. Så hvor skæve kæber kan man forvente?

10.2 Indkøb af film

Når man indkøber plastlaminater til flowpakkemaskiner, er hovedreglen i emballagebranchen, at man skal bruge et svejselag på min. 40 μ . Det gælder også for film, hvor styrken skabes med en 12 μ PET-film, så skal man alligevel bruge 40 μ LLDPE som svejselag.

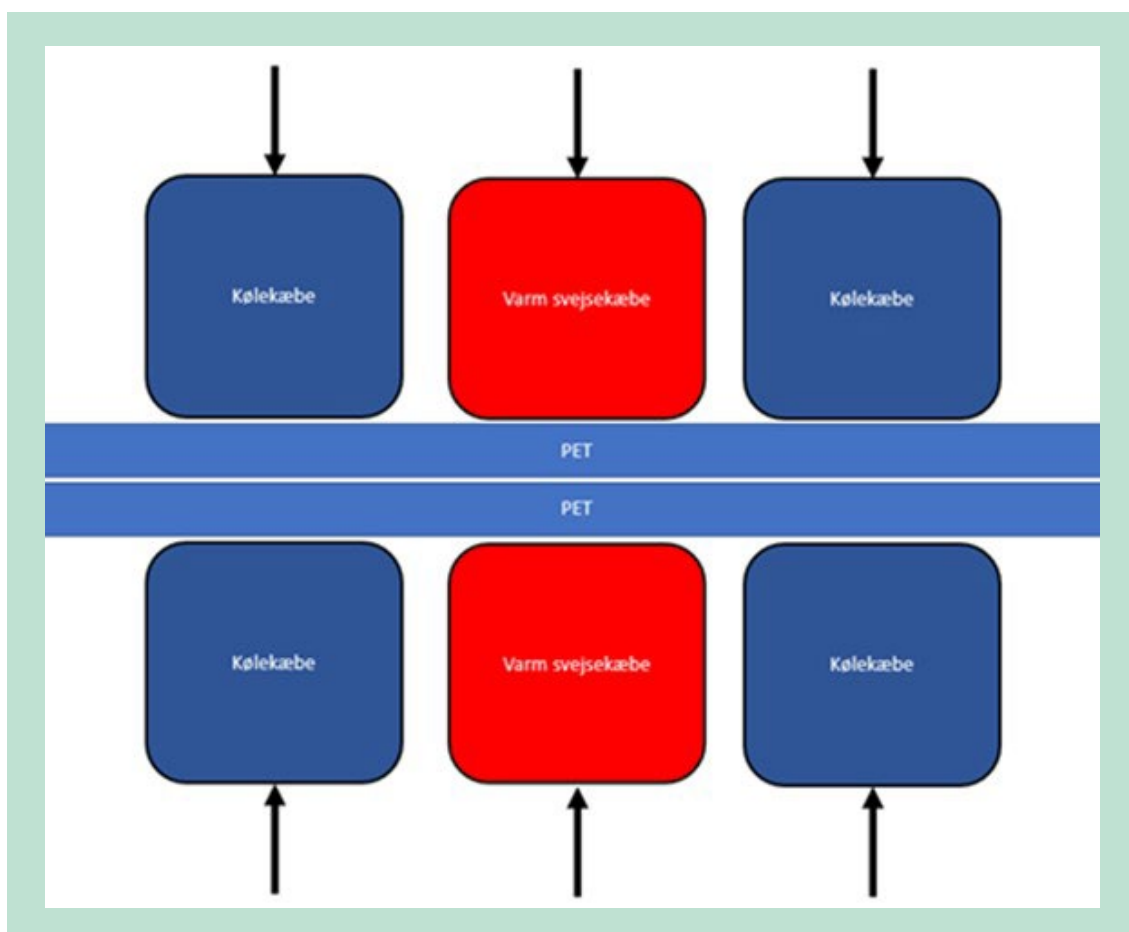
Det kan derfor konkluderes, at industrielt accepteres skævheder omkring svejsekæberne op til 80 μ (=0,08 mm). Det virker meget sandsynligt når man ser på, hvor komplekse mekanismer disse svejsekæber er placeret på.

10.3 Udfordringen med svejsekæber til top- og bundsvejsninger

I de kommende år vil der blive krævet cirkulær materialeøkonomi – også for emballageposer. Målsætningen er at udvikle en plastfilm i et monomateriale, der kan bruges på de eksisterende pakkelinjer. Dette materiale skal være cirkulært, hvilket midt i projektet er blevet afgrænset til rPET efter EU-forordning 2022/1616 trådte i kraft ultimo 2022. Hvilke muligheder er der:

10.3.1 Andre plastmaterialer

EU-forordning 2022/1616, der trådte i kraft ultimo 2022, åbner op for andre fødevarekontaktmaterialer end PET efter såkaldte "Nowell methods". Der arbejdes allerede fra flere sider på at få godkendt rPP og måske også rPE. Disse film vil under alle omstændigheder blive fremstillet tykkere, hvilket vil løse udfordringerne med svejsekæberne. Der vil dog opstå nye udfordringer, idet "krøl" tæt på svejsningerne vil komme igen, hvilket nok vil give udfordringer på posens udseende.



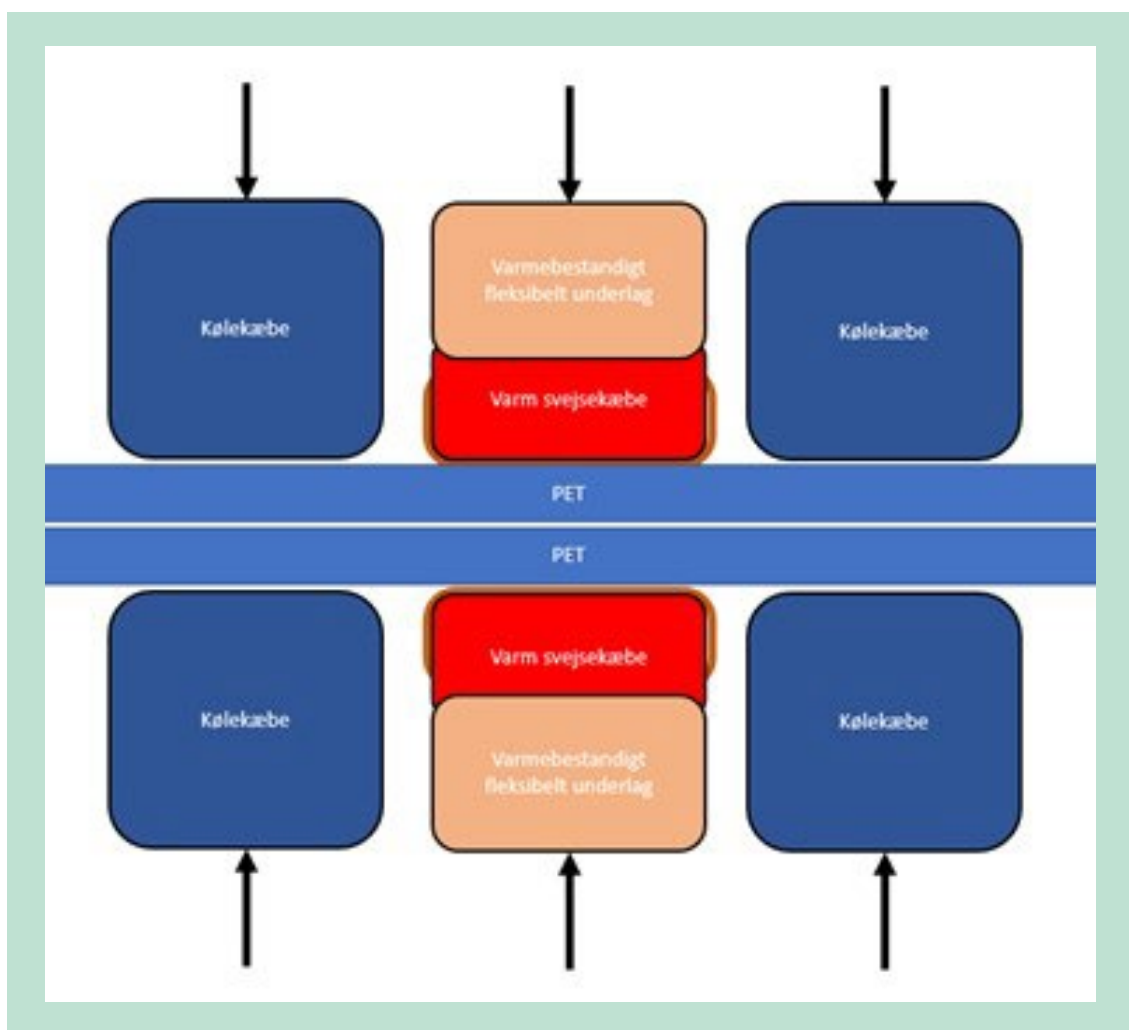
FIGUR 68. Kølekæber ved svejsekæben modvirker at filmen krøller

10.3.2 PET-svejsning uden svejselag

Det er en udbredt misforståelse at PET ikke kan svejses. PET svejser bare ved meget høje temperaturer, der ligger betragteligt højere end det normale pakkelinjer kan præstere. Der findes allerede virksomheder, der har som politik kun at købe nye pakkelinjer, der kan arbejde i PET-monofilm. Disse pakkelinjer er lidt dyrere, men er forberedt til cirkulær materialeøkonomi. Udfordringen er, at ligesom ved andre mono-film, at der skal være kølekæber for at minimere "krøl".

10.3.3 Fleksible svejsekæber

Man skal nok konkludere, at med de komplicerede mekaniske mekanismer, som svejsekæberne er ophængt i, er så komplicerede, at det nok ikke muligt at justere kæberne til at være meget mere parallelle.

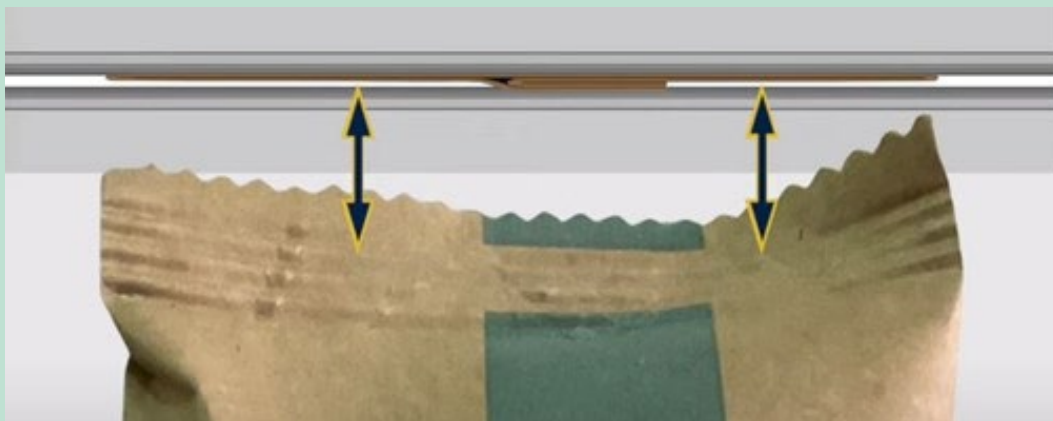


FIGUR 69. Fleksible svejsekæber følger emballagen og selvjusterer skævheder

Det foreslås derfor at foretage en ombygning af flowpakkelinjerne, så det yderste på svejsekæberne bliver fleksible, så de former sig efter materialets overside. Denne løsning har flere fordele. De varierende skævheder bliver automatisk justeret ind. Desuden vil svejsekæberne forme sig efter plastunderlaget og være delvist uafhængig af om plasten ligger i 2, 4 eller 6 lag.

Løsningen ligger lidt udenfor projektets oprindelige målsætning omkring at kunne bruge pakkelinjerne som de er, men der er stadig tale om mindre ombygninger, hvor hovedparten af pakkelinjen i øvrigt er uændret. Svejsekæber til PET uden pålagt svejselag skal både kunne svejse ved meget høje temperaturer (280°C++) og have placeret nogle kølezoner tæt på svejselinjen. Det gælder for både den langsgående og tværgående svejsning. Skal kæberne til endesvejsning også gøres fleksible gøres opgaven yderligere vanskelig, men ikke umulig.

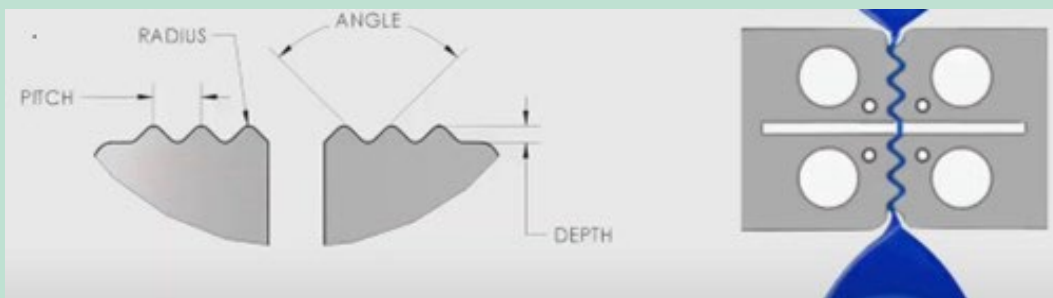
10.3.4 Svejsekæber formgivet efter emballagen



FIGUR 70. Emballagens varierende tykkelse fører til dårlige svejsninger, hvor emballagen er tyndest

For at modvirke variationen i emballagens tykkelse, kan svejsekæberne udformes efter emballagens formgivning, og på denne måde kan trykkes fordeles jævnt, så svejsningerne bliver gode.

10.3.5 Bølgeformede top- og bundsvejsninger



FIGUR 71. Bølgeformede endesvejsninger

Ved at gøre svejsningerne bølgeformede kompenserer man til dels for skævheder.

10.4 Styling af PET-materialets struktur

Svejsforsøgene med alle tre typer af svejseblæk viser alle en større udfordring. Svejsningerne fungerer tilsyneladende helt som de skal, men når man trækker lagene hårdt fra hinanden, så opstår der sprækker og rivninger lige ved siden af svejsningen. Disse svækkelser af filmen er så kraftige, så hvis man ikke løser denne udfordring, så skal der benyttes tykkere PET-film, end der ellers er påkrævet. Derfor er der gennemført en undersøgelse af, hvad der forårsager disse svækkelser. Den første mistanke var at varm-svejsningen ændrer den krystallinske i PET-filmen på samme måde som man ser ved svejsning i metaller.

11. Forsøg med rengøring af brugte emballager

11.1 Forsøgsplan

Der er i dette og et samarbejdende projekt gjort forsøg med rengøring af brugte emballager.

Forsøgene er gennemført på følgende måde:

- Tryk på PET-film af både farvet dekoration og svejselag
- Svejsning af film til fleksible poser
- Opskæring af brugte emballager i strimler i en shretter
- Rengøring af strimler i en kraftig ludvask
- Granulering af rengjort brugt plast
- Blæsning og strækning i to retninger til regenereret BoPET
- Denne cyklus er gentaget to gange

Disse forsøg er gennemført med samme batch PET i to parallelle forsøgsrækker. Der er anvendt samme PET og PE-partikler. Efter hver cyklus er materialekvaliteten analyseret kemisk.

11.2 Resultater af de cykliske forsøg

Vores forsøg har vist følgende resultater:

- Den kraftige ludvask fjerner alt på de brugte emballagerester i strimler. Der fjernes:
 - Alle madrester
 - Hele den trykte dekoration, hvis dette er trykt på yder- eller indersiden.
 - Det trykte svejselag vaskes væk – også der hvor filmen har været svejst sammen
- De brugte emballager kan konverteres videre til en brugbar rBoPET
- De kemiske analyser viser kun en marginal forskel på nye og brugte råvarer
- Endnu ikke er der foretaget analyser på om den regenererede rBoPET er egnet til fødevarereemballering jf. EU-forordning 2022/1616. Alle komponenter er egnet til fødevarekontakt, men de endelige analyser mangler.
- De cykliske forsøg er gennemført på samme batch. Det repræsenterer ikke den reelle situation, hvor plastemballagerne samles ind i en fælles beholder med alle andre plastemballager og drikkekartoner. Når genvinding implementeres i fuld skala, vil der være en risiko for at brugte plastemballager af andre typer plast vil blive blandet sammen med brugt PET. Hvis disse fejlemner bliver blandet sammen med PET, vil det blive mellem meget vanskeligt til umuligt at strække plast kraftigt i to retninger, fordi fejlemnerne vil være flydende, mens PET kun er blødgjort.

Nye regler vil gøre det muligt i fremtiden. I EU's oplæg til en ny forordning om emballage og emballageaffald foreslås en digital mærkning af alle emballager, der skal gøre det muligt at sortere emballagerne efter hvad de har været anvendt til. Den nye forordning vil pålægge virksomhederne at anvende 50-65% genanvendt materiale i alle emballager. Også gældende EU-forordning 2022/1616 vil få glæde af dette, fordi det her er et krav at nye fødevarereemballager skal være fremstillet af mindst 95% brugte fødevarereemballager eller ny plast. Hvis dette skal kunne lade sig gøre, er det nødvendigt at udvide indsamlingen af brugte fødevarereemballager i plast til meget mere end den nuværende PET-flaskeindsamling. Dette igen vil kræve, at disse emballager kan genvindes – altså skal de være fremstillet af mono-plast – og ikke som sammensatte emballager.

12. Vurdering af projektets resultater

12.1 Evaluering af projektets målsætning

Projektets oprindelige mål var at fremstille en monoplastfilm med trykte svejselag, der kunne fungere på alle almindelige pakkemaskiner og som skulle kunne genanvendes til fødevareemballage mange gange.

Den målsætning har det kun delvist været mulig at opfylde. For en række pakkemaskinetyper har det været mulig at fremstille film med trykte svejselag, der fungerede fint. MEN for en række meget populære pakkemaskiner fx vandrette og lodrette flowpakkemaskiner har det vist sig vanskeligt at fremstille monoplastfilm med trykte svejselag, der kan fungere på maskinerne, som de nu er i dag.

Projektet har vist, at for fx flowpakkemaskiner skal der ske enten mindre eller lidt større tilpasninger eller ombygninger før det er muligt at fremstille fødevareemballage med monoplast, der er genanvendt, og som efter brug også kan genanvendes.

Udfordringen for fx flowpakkemaskinerne er, at de nuværende pakkemaskiner er bygget på en sådan måde, at skævheder ved top- og bundsvejsningerne kompenseres af et meget tykt svejselag.

Disse udfordringer kan løses på en række meget forskellige måder. Se de følgende afsnit, hvor metoderne gennemgås en for en.

12.2 Mulighederne for at fremstille fleksible emballager i monoplast

I det følgende er beskrevet hvordan målsætningen om at anvende monoplastfilm, der kan genvindes igen og igen, alligevel kan opnås:

12.2.1 Svejsekæber formet efter emballagens overflade

Rapporten dokumenterer, at ved en mindre ombygning af svejsekæberne til top- og bundsvejsningerne, kan svejsekæberne følge emballagens overflade og dermed give gode svejsninger, når det påtrykte svejselag er på 1-2 μ . Samtidigt skal man ved denne ombygning sikre, at svejsekæberne lukker parallelt.

12.2.2 Elastiske svejsekæber

Rapporten dokumenterer, at ved en mindre ombygning af svejsekæberne til top- og bundsvejsningerne med et elastisk underlag, vil svejsekæberne naturligt følge emballagens overflade og samtidigt kompensere for manglende parallelle kæber. Dette gør det muligt at anvende, fordi de påtrykte svejselag kun er på 1-2 μ .

12.2.3 Svejsekæber med kølezoner

Rapporten dokumenterer, at anvender man svejsekæber med kølezoner tæt på svejsekæberne både til den langsgående, samt til top- og bundsvejsningerne, er påtrykte svejselag slet ikke nødvendige. Samtidigt skal svejsetemperaturen sættes betydeligt op, så PET svejser

sammen og man må leve med rynkninger mellem svejse- og kølezonen. Da PET-filmen normalt er ganske tynd, skal man sandsynligvis samtidigt anvende løsningerne fra enten afsnit 12.2.1 eller 12.2.2.

12.2.4 Alternative plastmaterialer

Indtil nu har vi forudsat, at monoemballagen fremstilles i PET, fordi EU-forordning 2022/1616 gør dette til den primære løsning for genanvendt materiale til fødevareemballage. Der er dog andre muligheder:

- **Nonfood emballage**

Nonfood emballager skal slet ikke opfylde de strenge krav fra EU-forordning 2022/1616.

Disse emballager kan derfor fremstilles i andre plastmaterialer, der fint svejser i de eksisterende pakkemaskiner. Normalt vil man her anvende lidt tykkere PE- eller PP-film, der uden problemer arbejder ved maskinernes nuværende skævheder. Der skal dog tages hensyn til rynkning ved svejsezonen.

- **PP-PE-kombinationer**

I disse år er det blevet populært at anvende laminater af PP-LDPE. Disse to materialer kan genanvendes, men til et materiale af relativ lav værdi. Foreløbigt kan dette genanvendte materiale ikke anvendes til fødevareemballage.

- **Lukkede kredsløb**

EU-forordning 2022/1616 giver mulighed for at genanvende plastmateriale i meget lukkede kredsløb, der slet ikke involverer de almindelige forbrugere. Denne mulighed har derfor kun marginal interesse.

- **Nowel-systemer for genanvendt materiale til fødevarekontakt**

EU-forordning 2022/1616 rummer mulighed for at andre plastmaterialer eventuelt kan godkendes i kontrollerede kredsløb, der er godkendt af EFSA og EU. Der arbejdes allerede på denne opgave.

12.3 Industriel implementering

Projektet opfyldte ikke alle sine mål, fordi ikke alle pakkemaskiner umiddelbart kan anvende den nye film. Dog kan også disse pakkemaskiner anvendes, hvis pakkemaskinernes svejsekæber ombygges for 30-100.000 kr. pr. pakkelinje. Tages det i betragtning, at de nye film er væsentlig tyndere, vil der kunne foretages besparelser i materialeindkøb, der bør kunne tilbagebetale dette beløb på skønsmæssigt ½-1 år. Samtidigt kan CO2-belastningen reduceres meget betydeligt.

12.4 Udfordringer for genvindingssystemerne

Den største udfordring for at gennemføre dette projekt i praksis er faktisk de nuværende genvindingssystemer.

I dag indsamles stort set kun brugte PET-flasker – svarende til 10-20% af plastemballagemarkedet. Allerede rPET fra disse udvalgte emballager viser sig ikke at være helt rent PET. Det kan konstateres på flere måder. Analyser af emballager fremstillet af dette rPET viser sig kemisk at være forurenet med andre plasttyper. Denne råvare kan heller ikke blæses til de tynde rPET emballager på grund af denne blandede sammensætning og forskellige smeltetemperaturer.

Da projektet to gange kørte det samme batch PET gennem to fulde cykler, kunne vi både blæse ny film, og vi fandt kun marginale forureninger

Skal man i fremtiden have en voldsom udvidelse af genanvendt materiale af vores brugte emballager, så skal man have meget mere styr på indsamling, sortering og rensning af brugte plastemballager.

12.5 Overordnet konklusion

Projektet har vist, at endda er tre forskellige teknologier til at trykke svejselag på og genvundne rene PET-film. Desuden er det dokumenteret, at samme PET-film kan gøres mere gastætte end metalliseret film ved brug af en coating, der påføres i samme trykproces. Men der er tre hovedforhindringer til straks at implementere disse teknologier i praksis:

- A. Teknologierne er eftervist i et laboratoriemiljø, der ligger tæt på et produktionsmiljø. Hele udviklingen af de konkrete svejsekæber er fortsat en udviklingsopgave for industrien. Det alene er en ret stor opgave og vil tage tid.
- B. Der mangler en videreudvikling af pakkemaskinernes svejsekæber før teknologien kan implementeres på de mest almindelige pakkemaskiner til posepakning (Flowpakning).
- C. Projekterne har eftervist, at kvaliteten af genvinding af samme batch er særdeles god. Men projektets analyser af tykke rPET film viser at kvaliteten af genvundet rPET kan være dårlig. Der skal derfor ske en fortsat udvikling i indsamlings- sorterings-, rense- og fremstillingsprocesserne for at etablere et åbent cirkulært kredsløb.

Positivt er det, at dette projekts samarbejdende projekt har dokumenteret meget store miljøforbedringer – og i de fleste tilfælde også bedre økonomi, der også bør kunne betale for en opgradering af de eksisterende pakkelinjer.

Bilag 1. PETG-baseret forsegling af PET-folie, resumé

Bilag 1.1 Forberedelse og svejsning af PETG-baserede partikler

Indledningsvis blev glycolmodificerede poly(ethylterephthalat) (PETG) partikler med en diameter på mindre end 10 µm fremstillet gennem stabilisering med en monomethoxypolyethylenglycol (PEG) med molekylvægt 5000 g/mol.

De resulterende partikler blev let dispergeret i vand, i isopropanol og i en vandig primer tilvejebragt af Resino.

De resulterende partikler gav ikke nogen yderligere styrke til en svejsning sammenlignet med en svejsning baseret på primeren alene.

Dispergerbarhed af PETG-partikler i opløsningsmidler og primere

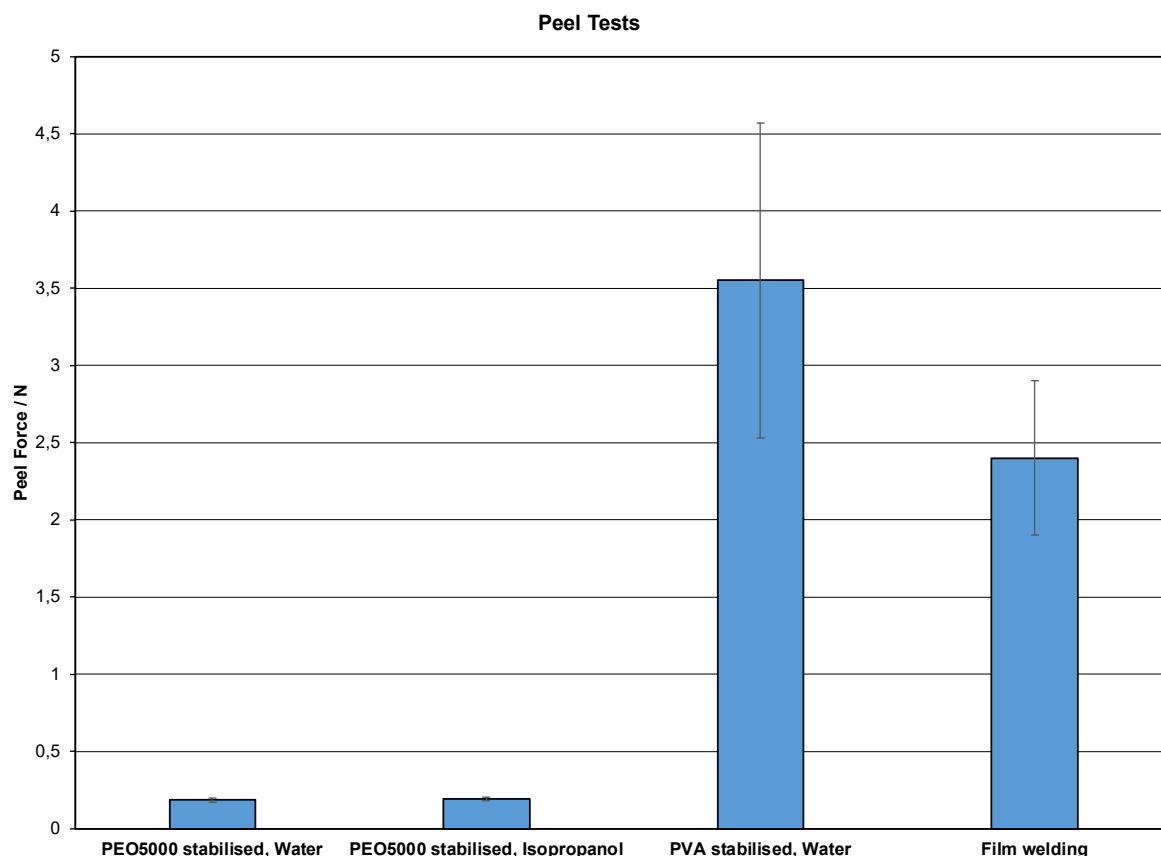
Partikeldispergeringsmiddel	Vand	Isopropanol	Vandig primer	Ikke-vandig primer (IPA-baseret?)
PEG-PETG	Spredes, dårlig svejsestyrke	Spredes, dårlig svejsestyrke	Spredt, primer bestemmer styrke	Ikke testet
PVA-PETG	Spredt sig, god svejsestyrke	Dårlig spredning	Ikke testet	Dårlig spredning

Det blev spekuleret i, at partiklernes overfladeegenskaber styrede vedhæftningsegenskaberne, hvorfor effekten af forskellige partikelstabilisatorer blev testet. Af primær relevans for dette projekt er en stabilisator baseret på poly (vinylalkohol) (PVA). Det blev konstateret, at en 80 % hydrolyseret PVA fungerede godt til stabilisering af PETG, hvilket resulterede i partikler under 10 µm som med PEG.

De resulterende partikler dispergeres godt i vand, men aggregerede i isopropanol. Dette er i overensstemmelse med den dårlige opløselighed af PVA i sidstnævnte opløsningsmiddel. Forsøg på at sprede partiklerne i en ikke-vandig primer førte også til dårlig dispersion. Svejs-PET dækket med partikler dispergeret fra en vandig opløsning gav meget stærke svejsninger med en styrke, der kan sammenlignes med den, der observeres fra en direkte svejset film (se *Figur 1*).

Dette illustrerer, at partiklernes overflade er signifikant i at give styrke til svejsningen, på trods af dens lave tykkelse (PVA-indholdet er i størrelsesordenen 2% w/w).

På trods af de lovende svejseresultater blev andre partikler, der krævede mindre opløsningsmiddel at producere, forfulgt i projektet.

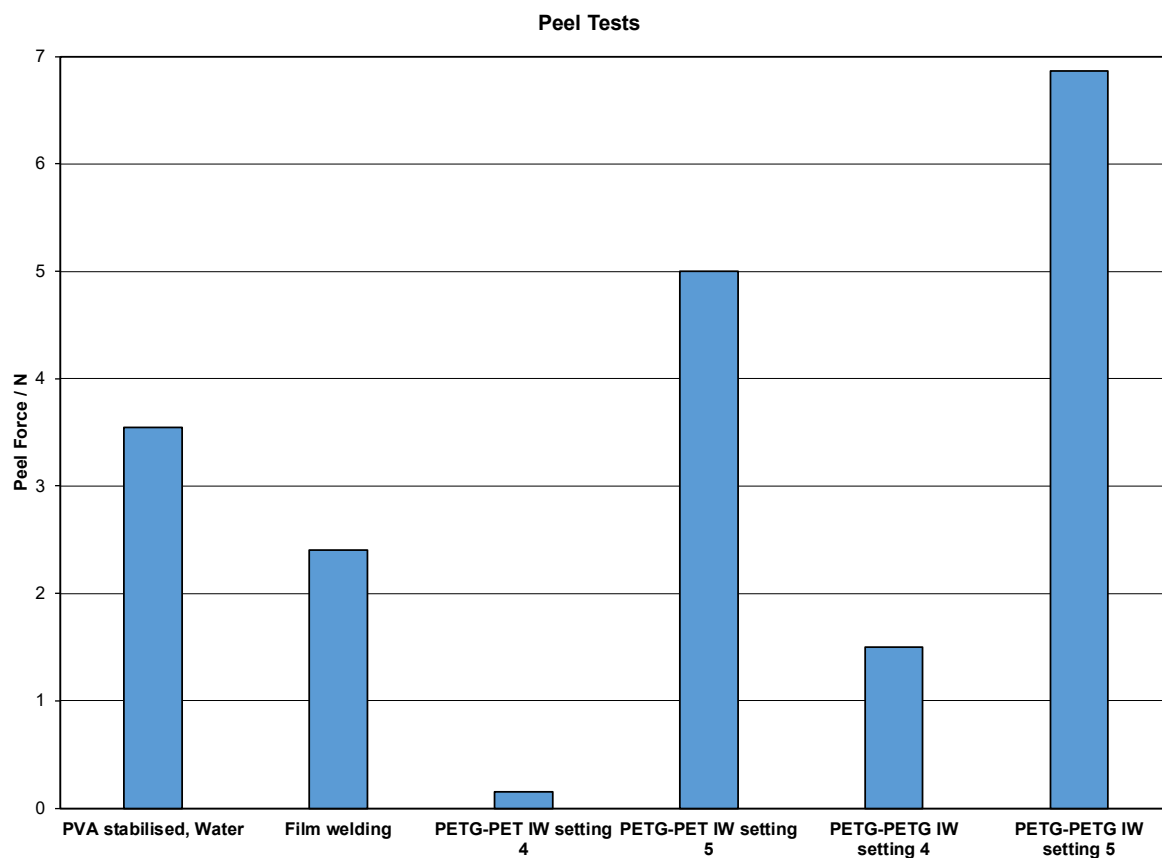


Figur 1: Skrælttest af svejsninger baseret på partikler stabiliseret med enten PEO5000 eller PVA. Filmsvejsningen er en kontrol baseret på rettet fusion af PET-filmen uden partikler

Bilag 1.2 Print af PETG på PET-folie og svejsning

For at teste, om direkte påføring af PETG på PET-folierne kunne være en enkel måde at forberede effektive tætninger på ved lavere temperaturer, blev der anvendt en 3D-printer til at udskrive et enkelt lag PETG på PET-folien. Måling af 3D-printfilmtykkelsen ved hjælp af en diasmåler (i gennemsnit fire forskellige positioner) gav en tykkelse på **0,11 mm**, dvs. betydeligt tykkere end selve filmen. Dette er tykkere end målrettet, men afspejler sandsynligvis grænserne for den billige 3D-printeropsætning, muligvis kombineret med en vis usikkerhed på det sidste ciffer i den anvendte måler. Det trykte lag blev brugt i forbindelse med en impulsvejser ved indstillinger, hvor PET-filmen ikke svejsede. Specifikt viste PET-filmen sig at svejse mod PET ved en indstilling på 6, mens 4 og 5 ikke førte til svejsning (men let deformation af filmen).

Resultaterne af skrælttestene af de resulterende svejsninger er vist i *Figur 2*, hvor det kan ses, at det er muligt at svejse PETG, både mod PET (PETG-PET) og mod et andet PETG-lag (PETG-PETG). Ikke uventet giver højere indstillinger af svejseren, svarende til højere temperaturer, stærkere svejsninger. Det ser ud til at være muligt at generere svejsninger med en styrke, der overstiger partiklernes og den direkte svejsede film. Det skal dog tages i betragtning, at den større tykkelse giver yderligere styrke.



Figur 2: Peeling test af svejsning baseret på direkte udskrivning af et PETG-lag på PET-filmen sammenlignet med svejsning baseret på PVA-stabiliserede partikler og direkte svejsning af filmen (ved højere impulsvejerindstilling = højere temperatur). PETG-PET betegner den trykte PETG-svejsning mod uberørt PET-film. PETG-PETG betegner den trykte PETG-svejsning mod trykt PETG. IW-indstilling henviser til impulsvejerindstillingen. PET-film svejsede ikke ved hjælp af nogen af disse indstillinger.

Genanvendelige emballager af monoplast

Plastlaminater har unikke egenskaber, som både er ressourcebesparende og tilbyder optimal beskyttelse af produkter. Genanvendelse af laminater er vanskelig, fordi lagene i laminatet ikke kan adskilles. Vælges monoplast af PET er det muligt at give emballagen en høj barriere med plasmacoating, men PET kan ikke svejses i almindelige pakkemaskiner. Målet med dette projekt er at udvikle et tyndt svejselag, der kan trykkes på filmen på de steder, hvor emballagen skal forsegles. Hermed skabes en mulighed for at fremstille emballager af PET på virksomhedernes eksisterende produktionsanlæg, som har en genanvendelseskvalitet, så det kan blive til ny PET emballage.

Dette projekt er en videreudvikling af et tidligere projekt, hvor flerlags-plastfilm blev erstattet med en coatet monoplastfilm fremstillet i samme plasttype. I dette projekt videreudvikles resultater fra laboratorieniveau til demonstration i et industrielt miljø, hvor det efterfølgende slutmål var at udvikle industrielt udstyr til at fremstille genanvendelige plastfilm i monoplast til fleksibel emballage.

Projektet har demonstreret tre forskellige teknologier til at trykke svejselag, som resulterede i materiale som kan genanvendes til helt rene PET-film. Desuden er det dokumenteret, at samme PET-film kan gøres mere gastætte end metalliseret film ved brug af en coating, der påføres i samme trykproces. Projekt har dokumenteret meget store miljøforbedringer – og i de fleste tilfælde også bedre økonomi, der også bør kunne betale for en opgradering af de eksisterende pakkelinjer.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk