

RevMat

Plastmaterialer og processer

Udfordringer med genanvendt plast i etablerede produktioner

Forfatterliste

Mikkel Dalsgaard Pedersen, AAU

Laura Viborg, FORCE Technology

Pia Brunn Poulsen, FORCE Technology

Brian Vejrum Wæhrens, AAU

December 2025



Indholdsfortegnelse

Introduktion	1
Baggrund for RevMat-projektet	1
Genanvendt plast	3
Definition af genanvendt plast	3
Post-industrial Recycled plast	3
Post-consumer Recycled plast	3
Markedet for genanvendt plast.....	4
Genanvenderen.....	5
Plastproducenten.....	5
Anskaffelse	6
Lovgivning og krav til genanvendt plast.....	7
REACH.....	7
Sikkerhedskrav for genanvendt plast til fødevarekontakt	7
Affaldsrammedirektivet - End of Waste	8
Transport	8
Lovgivningskravenes betydning.....	8
Foreslåede krav til genanvendt plast.....	8
Test af materialeegenskaber.....	11
Mekaniske egenskaber	11
Smeltemasseindeks (MFI)	11
Kapillærrheometri	11
Askeindhold.....	12
Massefylde	12
XRF og ICP - Elementaranalyse	12
Fugtmåling.....	12
Differential Scanning Calorimetry (DSC)	12
Oxidation Induction Time (OIT).....	13
Environmental stress cracking (ESC)	13
Gelindhold.....	13
Termomekanisk nedbrydning.....	13
Genanvendelse af plast.....	14
Kompatibilitet	14
Additiver.....	14
Genanvendt plast i produktionen	15
Letbek	15
Marius Pedersen A/S - RC Plast	16
Danish Fibres A/S	17
Handi Life Sport.....	17
Procestekniske tiltag.....	18
Procesudfordringer ved genanvendt plast	18
Indkøring ved genanvendt plast.....	18
Doseringssystemer	18
Afgasning	18
Blandingssiloer	18
Miksere	18
Regulering	18
Smeltepumper (Melt Pumps)	19
Konklusion	20
Refleksion.....	20
Fremtidssyn.....	20
Appendiks A: Nedbrydningsforløb for PP og PE.....	21
Referencer.....	22

Introduktion

Plastmaterialer er uundværlige i moderne forsyningskæder, hvor de både anvendes som inert pakkemateriale, og som råmateriale til utallige komponenter og fuldkomne produkter. Plastens alsidighed skyldes det store udvalg af polymerer og additiver, som gør det muligt at finjustere dets materialeegenskaber. Denne variation i kemisk sammensætning skaber udfordringer ved sortering og kategorisering af plastaffald til genanvendelse. De mange indbyrdes inkompatible polymerer kræver ofte forskellige forarbejdningsforhold, som yderligere kompliceres af plastens brugshistorik, fx miljøeksponering og anvendte additiver. Disse faktorer påvirker materialets egenskaber og dermed dets opførsel under processering.

Genanvendelse af plast er en kompleks udfordring. Den historiske udvikling inden for plastproduktion har bevæget sig mod stadig større effektivisering, hvor procesvinduer, materialeegenskaber og produktkrav er blevet strammet for at reducere omkostninger og sikre en høj og konsistent kvalitet af slutproduktet. I dette regime står genanvendt plast svagere end ny virgin (jomfruelig) plast, præget af et ry for variation i egenskaber, udsving i tilgængelighed samt ukendt materialehistorik og indhold. Integration af genanvendt plast kan dermed fremstå som en uoverskuelig byrde for mange virksomheder. Alligevel er der sket betydelige fremskridt. Det vidensgrundlag, der allerede er etableret, er tilstrækkeligt til at udvikle nye tilgange og udnytte eksisterende teknologier. Dermed kan både marked og produktionskæder forberedes på overgangen til en cirkulær økonomi.

Baggrund for RevMat-projektet

Markedet for genanvendt plast er i hastig udvikling, drevet af lovgivning og markedskrav, der i stigende grad forpligter producenter til at anvende genanvendt materiale i nye plastprodukter. Efterspørgslen overstiger imidlertid den tilgængelige og egnede genanvendelseskapacitet, og mange producenter peger på anskaffelse og specifikation af genanvendt råmateriale som den største barriere.

Udfordringen ligger ikke kun i de begrænsede mængder, men også i at sikre, at det indkøbte materiale opfylder de nødvendige produktkrav og proceskrav (rette mængde, i rette kvalitet, til rette tid). Materiale kvalitet, sporbarhed og leveringssikkerhed er derfor centrale faktorer i indkøbsleddet.

Projektet RevMat (Reverse Materials and Products Requirement Planning) blev etableret som et forsøg på at svare på disse udfordringer, som en del af den nationale InnoMission for Plast og Tekstiler (TRACE). Projektet har haft til formål at undersøge, hvordan stigende andele af genanvendt plast kan integreres i nye plastprodukter, og hvordan kravene til materialer, processer og marked kan tilpasses for at fremme denne udvikling. Projektet er en tværfaglig indsats mellem industrien og vidensinstitutioner i form af Letbek A/S, Danish Fibres A/S, Marius Pedersen A/S - RC Plast og Handi Life Sport, FORCE Technology og Aalborg Universitets Institut for Materialer og Produktion. Disse bidragsydere repræsenterer forskellige dele af videns- og leverance-systemet omkring genanvendt plast, og sætter fokus på forskellige problemstillinger og muligheder i forbindelse med skaleret industriel anvendelse af genanvendt plast.

Denne rapport har til formål at hjælpe virksomheder med at navigere i terminologi og lovgivning, processer og teknologi, samt operationelle realiteter, som definerer markedet for genanvendt plast. Med det formål introduceres markedets aktører og lovgivningsrammer, efterfulgt af en gennemgang af de vigtigste materialetest og kontrolkrav. Dernæst præsenteres erfaringer fra industrien samt udvalgte cases, der belyser markedets udfordringer, og hvordan disse aktuelt håndteres i praksis hos mellemstore plastproducenter og genanvendere.

Projektet er støttet af TRACE og Innovationsfonden



Projektet er en tværfaglig indsats mellem industrien og vidensinstitutioner i form af Letbek A/S, Danish Fibres A/S, Marius Pedersen A/S - RC Plast og Handi Life Sport, FORCE Technology og Aalborg Universitets Institut for Materialer og Produktion.



Figur 1: Søjlerne der definerer de aktuelle udfordringer for markedet for genanvendt plast.

Aktuelle udfordringer forbundet med produktion med genanvendt plast kan inddeles i tre søjler, som repræsenterer generelle rammebetingelser, materialerelaterede udfordringer og udfordringer relateret til produktionsprocessen (se Figur 1). Disse aspekter er vigtige at forstå hver især, men de påvirker også hinanden gensidigt:

- Skærpede lovkrav stiller højere krav til dokumentation og kvalitet, hvilket presser både genanvendere og producenter til at samarbejde tættere, om at øge deres samlede tekniske kapacitet indefor materialekvalificering.
- Materialekvalitet kan enten begrænse eller muliggøre produktinnovation, afhængigt af materialestrømmen.
- Materialestrømmens kvalitet kan afhænge af indsamlingsmetoder og -teknologier, fx hvor veludviklet den anvendte sortering og forbehandling er.
- Bearbejdningstrinnet fra plastaffald til genanvendt plast kan blive udfordret af gældende lovgivning. Dokumentationskrav kan være for tunge, så materialets værdi ikke kan bære omkostningerne forbundet med kvalificering af materialet.
- Produktionsprocesser kan kompensere for variation i materialets egenskaber gennem teknologier og proceskontrol.

Succesfuld integration af genanvendt plast kræver således systematisk koordination og vidensbaseret forståelse for markedets struktur og lovkrav, materialernes beskaffenhed samt de nødvendige procesmæssige tilpasninger i produktionen. Lovgivningen og markedskravene er eksternt fastsat, men påvirkes af industriens egne standarder og efterspørgsel. Materialer og processer er case-specifikke, men principperne er generelle: Variationen i genanvendt plast kræver, at processerne kompenserer gennem justeringer, additiver og kvalitetskontrol, eller at det valgte materiale kommer fra en materialestrøm af god kvalitet med en hensigtsmæssig rengørings- og bearbejdningsproces.

Kompetence- og vidensudvikling inden for hver af de tre dimensioner – rammebetingelser, materialer og processer – er nødvendige forudsætninger for industriel skalering med genanvendt plast. Ingen af dimensionerne kan i sig selv forventes at skabe et tilstrækkeligt grundlag. Derfor bliver samspillet mellem dem afgørende for succesfuld industriel skalering. Denne rapport giver et bud på udviklingen af de enkelte dimensioner og sætter samtidig fokus på, hvordan de interagerer og påvirker hinanden i praksis.

Genanvendt plast

Fabrikanter af plastprodukter er i dag stærkt afhængige af nyproduceret, virgin plast. Markedet for virgin plast er karakteriseret ved velkendte kemiske produktionsprocesser, som forløber under kontrollerede forhold. Ved at justere procesparametre kan plastens egenskaber tilegnes forbrugers behov. Prisen på virgin plast er primært drevet af olie- og energipriser, og varepartierne er typisk store og ensartede, hvilket gør det forholdsvis nemt at planlægge produktion og sikre en stabil forsyning.

Modsat er forsyningskæderne for genanvendt plast ofte præget af større variation i både kvalitet, tilgængelighed og partistørrelser. Hvor virgin plast kommer fra velorganiserede og ensartede forsyningskæder, stammer genanvendt plast ofte fra mange forskellige kilder. Det gør det vanskeligt at sikre konsistens i både materialeegenskaber og -mængder. Derfor er det ofte mere komplekst og tidskrævende at source store mængder genanvendt plast, især genanvendt plast med snævre tolerancer på materialeegenskaber.

Definition af genanvendt plast

Ifølge standarden EN 15343 om "Plast - Genvundet plast - Sporbarhed af plastgenvinding og vurdering af overensstemmelse og genvundet indhold" defineres genanvendt plast udelukkende som plast, der har været uden for fremstillingsvirksomheden, og er blevet anvendt af industrien eller forbrugere, eller blevet behandlet/processeret på anden vis, fx vasket eller sorteret.

Produktionsaffald, såsom afskær og fejlproduktion fra en virksomhed, der genanvendes direkte i egen plastfremstillingsproces, betegnes ikke som genanvendelse eller som genanvendt indhold, og tæller derfor ikke med i beregningen af genanvendelsesprocenten. Det Fælles Forskningscenter (JRC), et generaldirektorat under Europa Kommissionen, anvender en lignende definition. Dermed kan internt håndteret regenerat fra egen produktion ikke medregnes som genanvendt indhold.

Der er etableret forskellige certificeringsordninger (fx Recy-Class og SGS Global Service), der specielt har fokus på sporbarheden af plastmaterialet ift. at certificere, at der er tale om genanvendt plast. Disse certificeringer er særligt relevante for genanvendere, som ønsker at sælge deres regenerat som genanvendt råmateriale.

Der skelnes mellem den genanvendte plast fra hhv. industrien (PIR - Post Industrial Recycled) og fra forbrugere (PCR - Post Consumer Recycled), og der er stor forskel på sporbarheden

og dermed viden om den oprindelige kilde fra disse to typer af genanvendt plast. Dette har stor betydning ift. viden om indhold og egenskaber for det genanvendte materiale.

Post-industrial Recycled plast

Industrispild inden for plast har historisk set fundet anvendelse i den samme produktionssammenhæng, som det er blevet skabt ved. Ved sprøjtestøbning kan eksempelvis indløb og fejlproduktioner kværnes og genanvendes i samme proceskæde. I disse tilfælde er materialets indhold og historik veldefineret og styret af fabrikanten selv. Denne praksis falder dog uden for gældende definitioner af genanvendelse, og materialet regnes derfor ikke som genanvendt plast.

Der er dog mange andre kilder til PIR-plast, som kan regnes som genanvendt plast. Dette forekommer, når en genanvender behandler materialestrømmen, og dermed løfter materialet fra affald til værdifuld råvare. Disse materialestrømme inkluderer blandt andet emballage fra industrien og spild fra virksomheder, som ikke selv anvender regenerat.

Disse materialer, der kommer direkte fra industrien, er generelt under tilstrækkelig kontrol til direkte anvendelse i nye produkter. Indholdet i PIR-plast er typisk lettere at fastlægge og mere ensartet, end hvad der ses i PCR-plastmaterialestrømme. PIR-plast anvendes typisk som tilsætning til virgin plast (i forholdet 10-20%), da bearbejdningen har ændret plastens egenskaber. I 2023 udgjorde genanvendt plast produceret fra PIR 5,8% af den samlede plastråvareproduktion i EU (Plastics Europe, 2024).

Post-consumer Recycled plast

Tilsvarende den tidligere definition for PIR-plast, så defineres PCR-plast af JRC som plastaffald, der opstår efter brugen af plastprodukter på forbrugermarkedet (Eder & Villanueva, 2014). I 2024 udgjorde genanvendt plast produceret fra PCR 13,2% af den samlede plastråvareproduktion i EU (Plastics Europe, 2024). Yderligere henviser JRC til følgende som de primære kilder til PCR:

- Kommunalt fast affald (fra husholdnings- og erhvervsaffald, både småt og stort)
- Bygge- og nedrivningsaffald (C&D)
- Udtjente køretøjer (ELV)
- Affald fra elektrisk og elektronisk udstyr (WEEE)

Disse kategorier af affaldsstrømme er til dels associeret med forskellige udfordringer, bl.a. indeholder både ELV- og WEEE-affaldsstrømme ofte bromerede flammehæmmere og andre regulerede stoffer.

Genanvendelse af PCR-plast indebærer omfattende rengørings- og sorteringsprocesser, som har til formål at fjerne fysiske urenheder og adskille plasttyper. Disse processer reducerer forureningsniveauet af fysiske urenheder betydeligt, men er ikke fuldstændig effektive, hvilket betyder, at spor af uønskede stoffer eller fejlsorterede polymerer kan forblive i materialestrømmen. De sorterings- og rensningsmuligheder, som er økonomisk og energimæssigt hensigtsmæssige kan ikke garantere fuldkommen adskillelse eller rensning. Dermed vil der for PCR-plast i næsten alle sammenhænge forekomme varierende forurening, som kan påvirke materialeegenskaberne i det genanvendte plast.

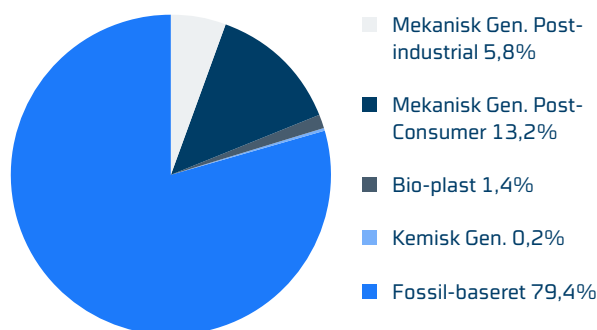
Markedet for genanvendt plast

Processer til genanvendelse af plast fandt først udbredt anvendelse som respons på stigende oliepriser, hvormed det blev et billigere alternativ til virgin plast. I dag er de tilgængelige metoder stadig stærkt påvirket af svingende el- og oliepriser, hvormed energieffektiviteten af en given metode er af stor betydning for dens økonomiske succes (Hundertmark, Mayer, McNally, Simons, & Witte, 2018).

Der forekommer i dag to udbredte metoder af genanvendelse: kemisk genanvendelse og mekanisk genanvendelse. Inden for kemisk genanvendelse forekommer der flere distinkte processer, som egner sig til forskellige plasttyper. Igennem processerne omdannes platten til syntetisk gas, pyrolyseolie og andre biprodukter. Nogle af disse råprodukter kan herefter omdannes til plast ad samme veje, som benyttes ved råolie. Det er dog ikke al plast, der kan omdannes via kemisk genanvendelse og afsættes til ny plastproduktion, idet nogle additiver er uønskede til produktion af ny plast, såsom bromerede flammehæmmere fra især elektronikaffald.

Ved mekanisk genanvendelse bliver platten først opskåret, hvorefter den ekstruderes og skæres til granulat. Mekanisk genanvendelse kan kun håndtere termoplaster, som dog udgør den største fraktion af plast i omløb (se Figur 3, grå nuancer). Både kemisk og mekanisk genanvendelse forudsætter sortering af plasttyper samt vask (rensning) af restplaster/plastaffaldet. Da kemisk genanvendelse involverer flere processer end mekanisk genanvendelse, er procesomkostningerne betydeligt højere. Samlet set udgør kemisk genanvendelse kun en minimal fraktion (0,2 %) af genanvendt plast, se Figur 2. Ud af de 54 megaton plast produceret i EU27+3 lande i 2023, stammede 10,3 megaton fra mekanisk genanvendelse (13,2 %) (Sick, 2024).

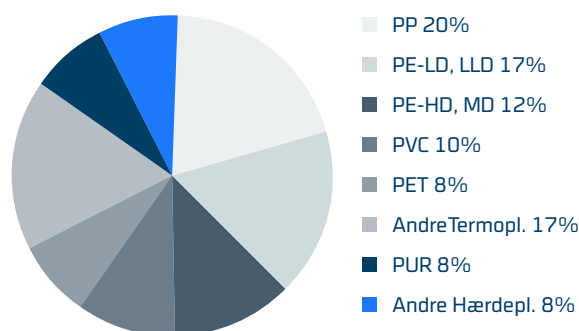
EUROPÆISK PLASTPRODUKTION 2023



Figur 2: Plastproduktion i EU27+3, 2023. Total 54 megaton. Baseret på Plastics Europe's statistik (Plastics Europe, 2024)

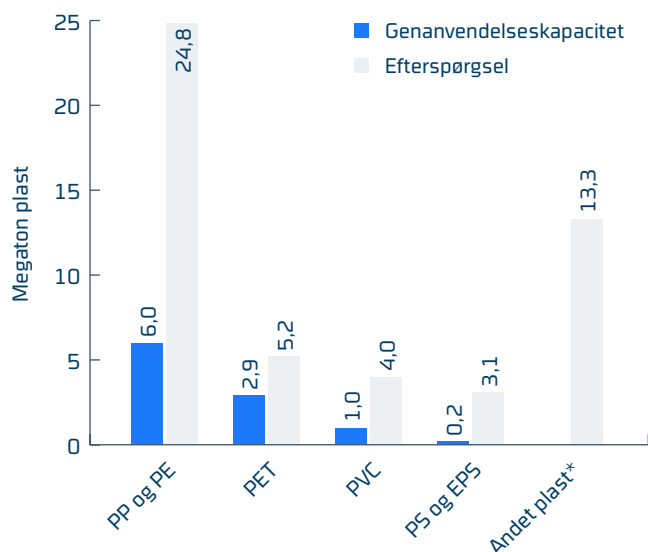
Størstedelen af genanvendt plast i cirkulation udgøres af polyolefiner og andre termoplaster. Dette er i overensstemmelse med det europæiske plastforbrug, hvor termoplaster udgør den største fraktion. Jævnfør en 2022-rapport fra Plastics Europe udgør termoplaster 84 % af efterspørgslen, hvoraf polyolefinerne polypropylen (PP) og polyethylen (PE) udgør den største fraktion, se Figur 3 (Plastics Europe, 2022). Disse plastsorter finder især bred anvendelse som emballage og engangsplast.

PLAST EFTERSPØRGSEL I EU27+3



Figur 3: Grafik over efterspørgsel i EU27+3 for 2021. Fraktionerne er beregnet ud fra data fra Plastics Europe (Plastics Europe, 2022). Termoplaster er angivet i blå nuancer, og hærdeplaster i grå.

EU27+3 PLAST 2021



Figur 4: Plast efterspørgsel og genanvendelseskapacitet, opdelt efter polymerer. *Manglende data på kapacitet for resterende polymerer. (Plastics Recyclers Europe, 2023)

Efterspørgslen af polyolefiner kan med fordel sammenlignes med den samlede genanvendelseskapacitet i Europa, som rapporteres af European Plastic Converters, se Figur 4. Igen dominerer PP, PE, og Polyethylenterephthalat (PET), mens de fleste andre polymertyper ikke er dokumenteret, da de kun genanvendes i begrænset omfang. Det er vigtigt at bemærke, at tallene angiver kapacitet og ikke faktisk genanvendte mængder.

Europæisk genanvendelseskapacitet er steget siden 2021, men er fortsat domineret af PP, PE og PET. Der er stadigvæk behov for at øge den europæiske kapacitet, både inden for disse udbredte polymerer og for de resterende, hvor efterspørgslen stadig er i vækst.

Genanvenderen

Genanvenderen spiller en central rolle i økosystemet for cirkulær plast ved at omdanne plastaffald til brugbare materialer og dermed reducere behovet for ny plastproduktion. Genanvenderens arbejde begynder med indsamling og sortering af plastaffald. Afhængig af genanvenderen, kan det være enten PIR-plast eller PCR-plast, eller en kombination af begge.

Genanvenderen sikrer, at plasttyper og kvaliteter adskilles korrekt gennem sorteringsprocesser, bl.a. mekanisk sortering,

massefyldeseparation og optisk sortering. Dette er essentielt for at opretholde høj kvalitet af det genanvendte materiale.

Forsyningssikkerheden for en genanvender afhænger i høj grad af stabile og pålidelige indsamlingstransporter samt faste aftaler med forskellige industripartnere og kommunale affaldshåndteringssystemer. Disse aftaler sikrer en kontinuerlig strøm af plastaffald til genanvendelsesfaciliteterne, hvilket er nødvendigt for at kunne imødekomme efterspørgslen på genanvendt plast og opretholde en stabil produktionsproces.

Udfordringen for genanvenderen består i at levere materialer, der kan indgå i et produktionssystem baseret på den historisk dominerende industrielle driftsmodel. Hvor industrien typisk forventer homogene materialer og faste maskinindstillinger, må genanvenderen håndtere råvarer med stor iboende variation. Det stiller høje krav til forsyningskæder, forædlingsprocesser og kvalitetskontrol for at reducere variationen til et niveau, der er acceptabelt for industrien.

Samtidig er genanvenderen udfordret af, at markedsstandarder og lovgivningskrav ofte er tilpasset virgine materialer, hvilket skaber barrierer for genanvendt plast. Genanvenderen spiller derfor en central rolle i at sikre, at genanvendelses-systemet kan levere materialer af tilstrækkelig kvalitet til et system, der er optimeret til effektivitet og stabilitet frem for fleksibilitet.

Plastproducenten

Som næste led i værdikæden modtager producenten det genanvendte råmateriale og integrerer det i en produktionsproces. Disse processer er ofte udviklet og optimeret til virgin materiale med snævre tolerancer, hvilket kan gøre integrationen af genanvendt plast mere kompleks. Ved anvendelse af genanvendt plast kan der være behov for at justere på procesindstillinger, tilføje additiver eller anvende yderligere udstyr og kontrolsystemer, så processen kan holdes i kontrol.

Kravene til råmateriale dækker typisk parametre, som beskriver plastens flydeegenskaber, renhed, fugtindhold, farve og meget mere. Disse krav kræver en tæt dialog mellem producent og genanvender for at sikre, at materialet lever op til de nødvendige specifikationer. I nogle tilfælde kan det være nødvendigt, at produktdesignet gentænkes, så det bedre kan rumme variationer i råmaterialet, fx ved at lempe på krav til overfladefinish eller farve, mens de funktionelle egenskaber bevares. Denne fleksibilitet kan ikke alene lette integrationen af genanvendt plast, men også styrke markedets tillid til materialet som et pålideligt alternativ til virgine polymerer.

Anskaffelse

Mange plastproducenter oplever, at de største udfordringer opstår allerede ved anskaffelsen af genanvendt plast. Det er vanskeligt for dem at finde genanvendt plast i de mængder og med de egenskaber, som de søger. De aktuelle markedsbetingelser betyder, at det ikke er garanteret, at en given kilde vil vare ved eller vil kunne imødekomme øget efterspørgsel. I det tilfælde ville det ofte være svært at lokalisere en materialestrøm med lignende egenskaber. Selv inden for samme leverandør og materialestrøm kan det genanvendte materiale variere i sammensætning over tid.



Effektiv brug af genanvendt materiale er ikke blot et spørgsmål om materialets beskaffenhed, men også den planlægningsproces, som kobler materialestrømmen til produktionsprocessen. Denne planlægningsproces varetages ofte i en MRP (Material Requirements Planning) kontekst. Et historisk fokus på optimering af produktionseffektivitet har betydet, at materiale- og procesvinduet er blevet meget snævert og har gjort produktionsprocessen intolerant overfor variation i materialeplatformen.

Her udfordrer usikkerhed fra genanvendelsesmarkedet og råmaterialernes egenskaber produktionskæden på flere niveauer. Genanvendte plastmaterialer er præget af stor variation i kvalitet, sammensætning og leveringstid. Denne usikkerhed gør det svært at planlægge optimale bestillingsmængder og genopfyldningstider i MRP, hvilket øger risikoen for produktionsafbrydelser og ineffektiv lagerstyring.

Flere studier har undersøgt muligheden for nye MRP-strategier (Stingl, Omair, & Wæhrens, 2025; Marchello, Jessica, Gozali, & Ali, 2022; Zhu, Li, & Zhang). Omair et al. har foreslået en række MRP-tiltag, der er specielt designet til usikker tilgængelighed i kontekst af genanvendt plast (Stingl, Omair, & Wæhrens, 2025):

1. Sikkerhedslagre (safety stock) for at modvirke variation i leveringstid og kvalitet.
2. Optimeringsalgoritmer til adaptiv justering af bestillingsmængder og genbestillingsspunkter.
3. Alternative bill of materials (BOM), der tillader fleksible materialevalg, hvis den primære materialestrøm ikke er tilgængelig.

Disse metoder kan hjælpe virksomheder med at navigere i de usikre forsyningsstrømme og skabe mere robusthed i både planlægning og drift. Det stiller dog også øgede krav til håndtering, planlægning, forståelse af materialeegenskaber mv. Alt dette peger på behov for opkvalificering og kompetenceudvikling - og potentielt også et opgør med drivende produktionsparadigmer i plastindustrien.

Lovgivning og krav til genanvendt plast



Genanvendelse af plast som en udfordring er i høj grad forbundet med dokumentation og overholdelse af lovgivningskrav. For mange genanvendere er det ikke de tekniske processer, der er den største barriere, men snarere de omfattende krav til sporbarhed, sikkerhedsdatablade og dokumentation for fravær af problematiske stoffer. Disse krav er nødvendige for, at genanvendt plast kan anvendes lovligt og sikkert i nye produkter, men de medfører også betydelige omkostninger, som især PCR-materialer har svært ved at bære. Dette afsnit præsenterer nogle af de relevante lovgivninger for genanvendere og plastproducenter. Yderligere redegøres der kort for de foreslåede krav til genanvendt plast fra den Europæiske Kommission, udarbejdet af JRC.

REACH

EU's forordning vedr. registrering, vurdering og godkendelse af samt begrænsninger for kemikalier – REACH-forordningen (EF) 1907/2006 – stiller krav om, at alle kemiske stoffer produceret eller importeret til EU i mængder over 1 ton per år skal registreres. Polymerer er dog undtaget fra denne regel, mens monomerer og additiver skal registreres.

REACH-forordningen stiller også krav om, at der skal udarbejdes sikkerhedsdatablade for kemiske stoffer og blandinger, der er klassificeret som farlige eller indeholder farlige kemiske stoffer i visse mængder. Sikkerhedsdatabladet anvendes i leverandørkæden frem til produktionen af plastprodukter for den anvendte kemiske blanding (polymer med diverse additiver).

Selvom REACH-forordningen primært stiller krav til registrering, vurdering og godkendelse af kemiske stoffer, stilles der også i REACH-forordningen krav til fysiske fremstillede produkter (i REACH-terminologi kaldet "artikler"). Bilag XVII i REACH indeholder en række begrænsninger til indhold af uønskede kemiske stoffer, som kan være relevante for plastprodukter, herunder begrænsninger for visse phthalater, flammehæmmere, PAH'er (polycykliske aromatiske hydrocarboner), tungmetaller m.m., afhængig af produkterne, der produceres. Desuden gælder oplysningspligten vedr. indhold af særligt problematiske stoffer for alle såkaldte artikler (fysiske produkter): Det er et krav at oplyse videre i leverandørkæden om indhold af såkaldte kandidatlistestoffer (SVHC – Substances of Very High Concern), hvis indholdet overstiger 0,1 % (vægtprocent) i en homogen enkelt-del af artiklen (oplysningspligten i REACH).

REACH gælder for kemiske stoffer, kemiske blandinger og artikler (fysiske produkter), men gælder ikke for affald. Dermed er det vigtigt, hvornår en given materialestrøm skifter klassificering fra affald til råvare.

Problematikken ved brug af genanvendt plast – især genanvendt plast med længere levetid – er, at der kan være kommet nye stoffer på kandidatlisten i REACH, siden den genanvendte plast blev produceret. De kan være nødvendige at redegøre for / have viden om som genanvender.

Sikkerhedskrav for genanvendt plast til fødevarekontakt

Forordning (EU) 2022/1616, som trådte i kraft den 20. september 2022, fastsætter reglerne for brugen af genanvendt plast i fødevareemballage. Den sigter mod at sikre, at genanvendt plast, som bruges i kontakt med fødevarer, er sundhedsmæssigt sikkert og overholder strenge dekontamineringskrav. Reglerne omfatter både mekaniske og kemiske genanvendelsesteknologier og bygger videre på kravene i den tidligere forordning (EF) nr. 282/2008. Den kræver, at genanvendelsesteknologier og -processer skal godkendes af Den Europæiske Fødevarerikkerhedsautoritet (EFSA), og at produktionen skal overholde høje standarder for affaldsindsamling, dekontaminering og sporbarhed. For at plastaffald kan anvendes, skal det fx være indsamlet separat og opfylde specifikke kvalitetskrav.

I forordningen skelnes der mellem forskellige typer plastmaterier som PET, PE og PP, især i relation til hvordan de genanvendes, og hvilke teknologier der anvendes til at sikre fødevarer sikkerhed. Grundlæggende er det lovligt at genanvende PET med oprindelse i EU til nye plastprodukter af fødevarer kvalitet, hvis det kan dokumenteres, at 95% af den PET, som indgår i varen, oprinder fra PET af fødevarer kvalitet.

For genanvendt PP og PE gælder, at fødevarer kvalitet kun kan bevares, hvis bestanddelene er indsamlet i et lukket system. Ved definitionen for et lukket system er det forstået, at plasten er indsamlet i en kontrolleret kæde, som udelukker forbrugeren. Varen skal altså til enhver tid være i producentens, mellemleverandøren eller den indsamlede instans besiddelse.

Affaldsrammedirektivet - End of Waste

EU's affaldsrammedirektiv (98/2008) med ændringer (851/2018) beskriver, hvad affald er, og hvordan affald skal behandles. Affaldsrammedirektivet beskriver dog også, hvornår affald ophører med at være affald, og beskriver de såkaldte End-of-Waste (EoW)-kriterier. Bl.a. skal affaldet (her plastaffaldet) anvendes til specifikke formål, der skal være en efterspørgsel, og ikke mindst skal det kunne leve op til de tekniske krav til det specifikke formål, samt leve op til gældende lovgivning vedr. produkter. Det skal vel at mærke forstås som gældende lovgivning på det tidspunkt, hvor det nye produkt med genanvendt plast sættes på markedet (og ikke den lovgivning, der var gældende, da den genanvendte plast blev produceret). Dette er væsentligt, da der kan være kommet nye begrænsninger (fx arbejdes der i EU på en større begrænsning af brug af PFAS i alle produkter), men der vil også være kommet flere stoffer på kandidatlisten (som opdateres to gange årligt).

Det er således væsentligt at vide, hvilke indholdsstoffer den genanvendte plast indeholder, for at kunne leve op til gældende lovgivning. De nedenfor beskrevne EoW-kriterier fra JRC er netop et forslag til sådanne krav til, hvad genanvendt plast skal kunne leve op til, for at kunne blive anvendt til nye produkter. Affaldsrammedirektivet fastslår, at farligt affald ikke må blandes med det ene formål at fortynde dets indhold af forurenende stoffer, så det falder under fastsatte grænseværdier. Den bevidste fortynding af farligt plastaffald med dette formål er udtrykkeligt forbudt i henhold til artikel 18(1). Undtagelser kan kun ske under særlige betingelser.

Transport

I Danmark skal alle virksomheder, der transporterer affald, herunder plastaffald til genanvendelse, være registreret som transportør eller indsamlingsvirksomhed i Affaldsregisteret. Plastaffald i rene fraktioner, dvs. indeholdende samme plasttype og et minimum af fysiske urenheder, hører under såkaldt grøntlistet affald, der kan transporteres uden forhåndsgodkendelse i Danmark. En affaldsblanding af flere plasttyper hører også under grøntlistet affald, så længe der er tale om en blanding af ikke-halogenerede polymerer.

Ifølge EU's eksisterende transportforordning 1013/2006 om overførsel af affald, må grøntlistet affald, herunder plastaffald i forholdsvis rene fraktioner, transporteres mellem EU-lande, hvis der foreligger en aftale om nyttiggørelse af affaldet i modtagerlandet med et godkendt affaldsnyttiggørelsesanlæg, dvs. en kontrakt mellem afsender og modtager. Er der derimod tale om blandinger af forskellige plasttyper, herunder PP og PE iblandet fx PVC, vil det kræve en anmeldelse og forhåndsgodkendelse af transporten, før den kan foretages lovligt imellem EU-lande.

EU har vedtaget en ny transportforordning (EU) 2024/1157, der træder i kraft i maj 2026. Her gælder samme regler som i dag vedr. transport af grøntlistet affald: Transporten mellem EU-lande kræver ikke tilladelse, men der skal foreligge en kontrakt mellem afsender og affaldsnyttiggørelsesanlægget i modtagerlandet om nyttiggørelse hos en godkendt oparbejder. Desuden skal transporten indberettes elektronisk til Affaldsdatasystemet, både ved forsendelse og ved modtagelse af plastaffaldet til genanvendelse.

Lovgivningskravenes betydning

Producenter af plastprodukter (artikler) skal kunne dokumentere, at produkterne overholder lovgivningen, herunder krav til indhold af problematiske stoffer i REACH og i andre lovgivninger såsom POP-forordningen (persistente organiske miljøgifte). Det betyder, at producenter af plastprodukter naturligt vil efterspørge dokumentation for, at lovgivningskravene er overholdt, samt dokumentation for evt. indhold af kandidatlistestoffer eller mangel på samme (for at kunne leve op til oplysningspligten i REACH).

Dette kan imidlertid være et problem for genanvenderen, især med hensyn til PCR-materiale, hvor kilden til det genanvendte plast ofte er ukendt. Det vil ofte være langt nemmere for genanvenderen at skaffe dokumentation og sikre sporbarheden for PIR-materiale. Det vil derfor ofte kræve flere typer af kemiske analyser at dokumentere fravær af problematiske stoffer og overholdelse af lovgivningskrav for PCR-materiale, hvorimod dokumentation for PIR-materialet ofte kan skaffes hos PIR-producenten.

Foreslåede krav til genanvendt plast

Det Fælles Forskningscenter (JRC) har i et omfattende teknisk forslag udarbejdet kriterier, der præcist definerer overgangen fra plastaffald til genanvendt plastråvare. Disse EoW-kriterier er et forslag til at fastsætte de tekniske, miljømæssige og lovgivningsmæssige betingelser, som skal være opfyldt, før plastaffald juridisk kan betragtes som en værdifuld ressource i den cirkulære økonomi.

Formålet er at sikre, at genanvendt plast opnår en kvalitet, der gør det sikkert og hensigtsmæssigt at anvende i produktionen af nye produkter – uden at udgøre en risiko for miljø eller sundhed. Kriterierne i dette forslag omfatter hele værdikæden – fra indsamling og behandling af affald til fremstilling af nye plastprodukter – og er inddelt i fem hovedkategorier (listet nedenfor).

For at fremskynde udarbejdelsen af generelle EoW-kriterier har JRC afgrænset sig til processer, der kan processere plastaffald uden bevidst at ændre polymerstrukturen (Pierri, Egle, Milios, & Saveyn, 2024).

Dette er effektivt en afgrænsning fra pyrolyse og andre kemiske genanvendelsesmetoder, som omdanner plasten til en anden type råvare, såsom monomerer, gas og olie.

Årsagen til denne afgrænsning er den store variation i både teknologiernes modenhed og kvaliteten af outputmaterialer. Hertil kommer, at kemiske processer ofte producerer mellemprodukter frem for færdige polymerer, hvilket skaber juridisk usikkerhed om, hvornår affald ophører med at være affald. Denne afgrænsning skal derfor sikre en mere ensartet og hurtigere implementerbar ramme.

1. Krav til inputmaterialer

For at plastaffald kan genanvendes under EoW-kriterierne, skal følgende betingelser være opfyldt:

Tilladte kilder:

- Alle termoplastiske polymerer (fx PET, PE, PP, PS) er tilladt, uanset om de kommer fra husholdningsaffald, emballage, WEEE (elektronikaffald), ELV (biler) eller byggeri.
- Blandinger af termoplast (fx PE/PP-blend) kan også behandles, forudsat at processen adskiller dem eller opnår et rent output.

Regulerede og farlige materialer:

- **Farligt affald:** Plast indeholdende farlige stoffer, såsom tungmetaller eller persistente organiske forurenende stoffer (POPs), må kun anvendes, hvis behandlingen sikrer, at det endelige materiale ikke klassificeres som farligt i henhold til CLP-forordningen (EF nr. 1272/2008) og samtidig overholder kravene i REACH-forordningen (EF nr. 1907/2006). (Dog må farligt plastaffald ikke fortyndes med ikke-farligt plastaffald).

- **Sundhedsaffald:** Kun ikke-farlig plast (fx ren emballage) fra sundhedssektoren må anvendes – og kun hvis den er kildesorteret for at undgå kontaminering.
- **Absorberende hygiejneprodukter (fx bleer):** Er udelukket på grund af risiko for biologisk kontaminering.

Særlige krav til problematiske strømme:

- Plast fra WEEE og ELV skal først undergå obligatorisk fjernelse af farlige stoffer (fx bromerede flammehæmmere) i henhold til gældende EU-direktiver.
- Plast med høje koncentrationer af POPs skal forbehandles, så indholdet reduceres til under grænseværdierne i bilag IV til POP-forordningen (EU-forordning nr. 2019/1021).

2. Krav til behandlingsprocesser og teknikker

- **Separat opbevaring af inputmaterialer:** Inputmaterialer skal opbevares adskilt fra ikke-egnet plast for at forhindre kontaminering.
- **Separat opbevaring af outputmaterialer:** Outputmaterialer, der har opnået EoW-kriterierne, skal opbevares adskilt fra materialer, der ikke overholder EoW-kriterierne.
- **Genanvendelsesprocessens omfang:** Genanvendelsesprocessen skal omfatte alle de behandlingsskridt, der er nødvendige for at forberede outputmaterialet til anvendelse som input i produktionen af plastprodukter eller artikler, der indeholder plastdele.
- **Regulerede stoffer:** Materialer fra alle kilder, der er egnede som input, skal behandles, så:
 - Det resulterende plast ikke klassificeres som farligt i henhold til CLP-forordningen (EF nr. 1272/2008)
 - Stoffer og blandinger overholder REACH-forordningen (EF nr. 1907/2006), herunder autorisationskrav (bilag XIV) og restriktioner (bilag XVII)
 - Stoffer og blandinger opfylder kravene til persistente organiske forurenende stoffer (POP) i forordning (EU) nr. 2019/1021.

3. Krav til outputkvalitet

Den genanvendte plast skal opfylde følgende krav:

- **Sikkerhed:** Det færdige materiale må ikke klassificeres som farligt og skal overholde REACH-, CLP- og POP-forordningerne.
- **Renhed:**
 - *Inden for EU:* Maksimalt 2 vægtprocent fremmedmaterialer (efter fjernelse af fugt). Fremmedmaterialer omfatter ikke-plastiske komponenter (fx metaller, papir, glas) samt uønskede plasttyper.
 - *Ved eksport uden for EU:* Maksimalt 0,5 vægtprocent fremmedmaterialer. Outputtet skal bestå af én termoplastisk polymer (med undtagelse af PE/PP/PET-blandinger).
- **Standardoverensstemmelse:** Den genanvendte plast skal dokumenterbart overholde gældende lovkrav samt relevante kundespecifikationer, branchespecifikationer eller standarder for anvendelse i plastprodukter.

4. Kvalitetssikring og dokumentation

- **Kvalitetsledelsessystem (QMS):** Behandlingsanlægget skal have et certificeret QMS, som dokumenterer overholdelse af EoW-kriterierne – herunder rutinemæssig prøveudtagning og analyser.
- **Uafhængig verifikation:** Systemet skal minimum hvert tredje år revideres af en akkrediteret tredjepart med ekspertise i plastindustrien.

5. Informationspligt og overensstemmelseserklæring

- **Erklæring om overensstemmelse:** Producenten eller importøren skal for hver sending udstede en standardiseret erklæring, som bekræfter:
 - At output opfylder alle relevante EoW-kriterier (input, proces og kvalitet).
 - At materialet ikke klassificeres som farligt og overholder kravene i REACH-, CLP- og POP-lovgivningen.
 - At der anvendes et godkendt kvalitetsledelsessystem.

- **Dokumentationspligt:** Erklæringen skal sendes til modtageren af sendingen og opbevares i minimum tre år. Den skal kunne fremvises ved forespørgsel fra relevante myndigheder.
- **Elektronisk format:** Anbefales for at fremme sporbarhed og gennemsigtighed.

JRC-rapporten anvender en række europæiske og internationale standarder og lovgivninger som grundlag for disse krav til plastgenanvendelse (Pierri, Egle, Milios, & Saveyn, 2024). Det er essentielt et forsøg på at forene de forskellige systemer, som er dannet på nationalt plan, under én fælles standard.

Blandt de nævnte standarder er EN 15347 til klassifikation af sorteret plastaffald baseret på fysiske, kemiske og mekaniske egenskaber, samt standardserien EN 153421-5348 og EN 18064, der specificerer kvalitetskrav til genanvendte polymerer som PE, PP, PET, PVC, PS og ABS. Derudover indgår kvalitetsledelsesstandarder som EN 15343 (sporbarhed og overholdelse) og ISO 9001/14001 (kvalitets- og miljøledelse). Der er ved disse standarder forskel på hvilke materialedata, der er påkrævet oplyst og hvilke, der er valgfri at oplyse. Yderligere henvises der til relevante standarder til bestemmelse af hver materialeegenskab, hvorvidt denne er påkrævet eller valgfri. Hvilke af de valgfri materialedata, der kræves oplyst, aftales mellem leverandør og forbruger.

Dette udkast til forenede europæiske krav skal medvirke til at forsimple den komplekse juridiske proces, der kan være involveret i håndteringen af affald og plast, og sænke barrieren til internationalt samarbejde om genanvendelse af plast. Disse krav og gældende lovgivning øger behovet for indsigt i materialer og hvordan de karakteriseres, specielt med hensigt på at identificere problematiske stoffer. Udover dette aspekt er materialestrømmenes mekaniske, termiske og flydeegenskaber alle af stor relevans for, hvor og hvordan de bedst anvendes.

Test af materialeegenskaber

Til at vurdere de mekaniske og termiske egenskaber af plastmaterialer er det muligt at anvende en række standardiserede tests, herunder træktest, slagsejhedsmålinger, smeltemasseindeks (MFI), differentiell scanning calorimetry (DSC), oxidation induction time (OIT) og dynamisk mekanisk analyse (DMA). Nedenfor beskrives de anvendte metoder og formålet med hver test. For genanvendt plast vil egenskaber typisk være oplyst som et interval, hvis egenskaben har tendens til at variere.

Frekvensen af test for genanvendt plast i henhold til JRC's End-of-Waste-kriterier afhænger både af materialets anvendelsesområde og variationen i indgangsmaterialet. Generelt fastlægges testhyppigheden ud fra en risikovurdering, hvor formålet er at sikre, at de producerede partier kontinuerligt overholder de tekniske specifikationer og lovgivningsmæssige krav. For stabile processer med ensartet input kan test udføres med længere intervaller, mens materialestrømme med større variation kræver hyppigere kontrol for at fange afvigelser i kvaliteten.

Grundlaget for fastsættelsen af testfrekvensen er derfor en kombination af historiske testdata, proceskontrolniveau og den tilsigtede slutbrugers krav til materialet. JRC anbefaler, at testhyppigheden dokumenteres i et kvalitetsledelsessystem (QMS) og løbende revideres på baggrund af resultater og eventuelle ændringer i proces eller råmateriale. På den måde sikres det, at kravene til End-of-Waste-status ikke blot opfyldes på et givent tidspunkt, men kontinuerligt over tid.

Mekaniske egenskaber

Ved en træktest bestemmes flyde- og brudstyrke, brudforlængelse samt elasticitetsmodul (E-modul). Denne test udføres på standardiserede prøvestykker, hvor spænding og tøjning måles. For PVC-P-granulat er brudstyrken påkrævet oplyst i henhold til EN 15346.

Slagstyrken beskriver materialets evne til at modstå brud ved pludselige belastninger, fx ved stød eller slag. Den er særlig relevant for produkter, der kan blive tabt eller udsat for dynamiske kræfter. For glasklart polystyren (GPPS) og slagfast polystyren (HIPS) er oplysning af slagstyrken påkrævet i EN 15342, og målingen udføres efter EN ISO 179-1, EN ISO 179-2 eller EN ISO 180.

Hårdheden angiver modstandsdygtigheden mod permanent deformation, fx ridser eller indtryk. For PVC-P er hårdhedsmålinger påkrævet i henhold til EN 15346, og testen foretages efter EN ISO 868.

3-punktsbøjning anvendes til at bestemme bøjningsstyrke og stivhed. Denne test er påkrævet for PVC-U-granulat, når det sælges som færdigt produkt, og udføres efter EN ISO 178 og EN ISO 21306-2.

Mekaniske egenskaber er afgørende for, at slutproduktet fungerer som tiltænkt. Ændringer i styrke, sejhed eller stivhed kan både give problemer i produktionen og forringe produktets holdbarhed. Ifølge JRC's forslag til EoW-kriterier bør hyppigheden af sådanne tests fastlægges ud fra materialestrømmens variation, historiske målinger og den tilsigtede anvendelse. Det betyder, at egenskaberne ikke nødvendigvis måles på hvert parti, men at stikprøver eller løbende test indgår, hvor risikoen for variation er høj. I praksis vælger mange producenter dog at dokumentere mekaniske egenskaber regelmæssigt som god kvalitetssikring. Dette har også været en nødvendighed for at øge tilliden blandt kunder og samarbejdspartnere til genanvendt plast som et pålideligt alternativ til virgin plast.

Smeltemasseindeks (MFI)

MFI (Melt Flow Index) anvendes til at kvantificere et materiales viskositet i smeltet tilstand. Metoden består i at presse det smeltede polymermateriale gennem en standardiseret dyse under en defineret belastning. Resultatet angives som en enkelt værdi, der beskriver materialets flydeevne og dermed dets bearbejdélighed ved den givne temperatur og forskydningshastighed. MFI-målinger kan også indikere ændringer i polymerstrukturen, som kan påvirke både forarbejdnings- og produktionsprocesser, og er derfor en vigtig parameter i kvalitetskontrollen og materialevalg.

Målingen af MFI bør udføres i overensstemmelse med standarderne EN ISO 1133-1 og EN ISO 1133-2. Ifølge EN 15342-15348 er oplysning om MFI påkrævet for PS, PET, PE, PP og PVC.

Metoden er relativt simpel, billig og hurtig at udføre, og værdien er let at kommunikere. Til gengæld afspejler MFI kun de reologiske egenskaber ved én, relativ lav, forskydningshastighed og ved én temperatur. For at undersøge materialets adfærd under højere forskydningshastigheder anvendes derfor typisk et kapillærviskosimeter eller rotations-/oscillatorisk rheometri.

Kapillærreometri

For at opnå mere præcise og detaljerede oplysninger om plastmaterialers viskositet end det, der kan opnås med MFI, anvendes ofte kapillærreometri.

Kapillærreometri giver, i modsætning til MFI, indsigt i materialets viskositetsadfærd over et bredt område af forskydnings-spændinger (shear stresses) og forskydningshastigheder (shear rates). Forskydningshastighederne, som kan opnås under kapillærreometri, er højere end ved rotations- og oscilatorisk rheometri, hvilket er relevant for bl.a. sprøjtestøbning, hvor der kan forekomme høje forskydningshastigheder.

De data, der genereres ved kapillærreometri, er af stor betydning for både kvalitetskontrol og vurdering af materialets bearbejdelighed. Derudover anvendes de til at fastlægge de optimale procesbetingelser i forbindelse med plastforarbejdning. Målingerne fra rheometri forsøg er meget følsomme overfor små ændringer i udførsel. Det er derfor essentielt, at målinger, der skal sammenlignes, er udført ens og af samme operatør.

Askeindhold

Bestemmelse af askeindhold bruges til at kvantificere mængden af uorganiske komponenter – ofte i form af fyldstoffer – i genanvendt plast. Dette er vigtigt, da fyldstoffer kan påvirke plastens mekaniske egenskaber samt dens bearbejdelighed i produktionsprocessen. Askeindhold er påkrævet oplyst for HDPE, jf. EN 15344.

Askeindholdet kan bestemmes ved:

1. Direkte foraskning, jf. standarderne ASTM D2584, ASTM D5630 og ISO 3451. Her opvarmes plastmaterialet til over 500 °C, og forskellen i vægt før og efter forbrænding anvendes til at beregne askeindholdet.
2. Termogravimetrisk analyse (TGA), jf. standarderne ASTM E1131 og ISO 11358. Denne metode måler masseændringen som funktion af temperaturen og tiden under kontrolleret opvarmning, hvilket giver en mere detaljeret profil af nedbrydningen og mængden af uorganiske komponenter, hvis der er flere forskellige til stede.

Massefylde

Massefylde (også benævnt densitet) er ifølge EN 15344 og EN 15345 påkrævet oplyst for henholdsvis PE og PP. Den kan bestemmes ved immersion, med pyknometer eller ved titrering, jf. EN ISO 1183-1. Kendskab til polymerers massefylde er særligt relevant ved massefyldeseparation, hvor saltvand anvendes til at adskille plasttyper efter vægt.

XRF og ICP - Elementaranalyse

Elementaranalyse af genanvendt plast er særlig relevant for at identificere urenheder og problematiske stoffer. Ifølge JRC's forslag til End-of-Waste-kriterier skal materialet overholde grænseværdier for bl.a. tungmetaller og stoffer reguleret under REACH- og POP-forordningerne, hvilket kræver præcise analyser.

Røntgenfluorescens (XRF) er en metode til bestemmelse af den elementære sammensætning og kan identificere tung-

metaller, tilsætningsstoffer og fyldstoffer. XRF bruges ofte til at måle bromindhold, som typisk stammer fra bromerede flammehæmmere.

Dette er relevant, da flere bromholdige stoffer er omfattet af begrænsninger under REACH- og POP-forordningerne. Ifølge JRC's forslag til EoW-kriterier må plast med koncentrationer over de fastsatte POP-grænseværdier kun anvendes, hvis der foreligger en effektiv forbehandling, der reducerer niveauet under de lovpligtige grænser. På den måde bidrager brommålinger via XRF direkte til at sikre, at genanvendt plast opfylder både kemikalielovgivningens krav og kriterierne for at opnå EoW-status.

Inductively coupled plasma (ICP)-teknikker anvendes til at detektere spormetaller i plastmaterialet, herunder bly, cadmium og nikkel. Disse stoffer er kontrolleret under REACH, og kan forekomme i plast, særligt i PVC fra C&D.

Begge teknikker kan fungere som del af den dokumentation og kvalitetssikring, der ifølge JRC skal være en integreret del af kvalitetsledelsessystemet for at sikre, at genanvendt plast opfylder kravene til End-of-Waste-status. For andre stoffer, fx visse grupper af PFAS eller visse ftalater ift. lovgivningen i bl.a. REACH- og POP-forordningerne, skal der anvendes andre specifikke typer af kemiske analyser for at kunne redegøre for et manglende indhold af disse.

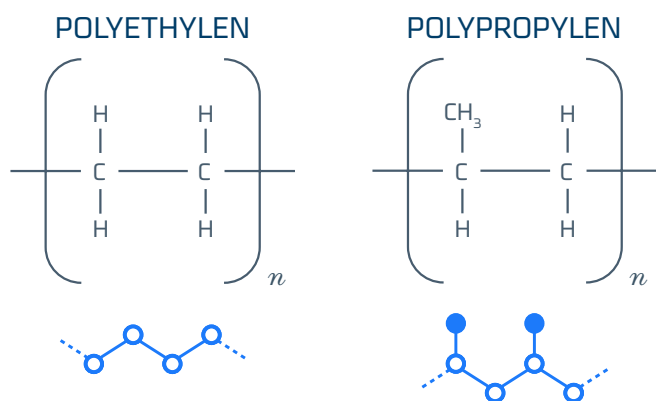
Fugtmåling

Fugtmåling af genanvendt regenerat er en vigtig kontrolparameter, da resterende fugt i materialet kan føre til problemer i de efterfølgende bearbejdningsprocesser, fx sprøjtestøbning. Forhøjet fugtindhold kan bl.a. påvirke materialets kvalitet, indfarvning og ydeevne negativt. Ved at måle fugtindholdet tidligt i processen kan man identificere behov for tørring og dermed sikre en mere stabil og ensartet produktion og undgå afvigelser.

Differential Scanning Calorimetry (DSC)

DSC kan anvendes til at bestemme de termiske egenskaber af genanvendt plast. Under analysen opvarmes og afkøles prøverne under kontrollerede betingelser, mens varmeflowet til eller fra prøven måles. Den resulterende DSC-kurve kan bruges til at identificere bl.a. glasovergangstemperaturen (T_g), krystallisationstemperatur (T_c) og smeltepunktet (T_m). Udover at kunne bestemme termiske overgange, så kan DSC også anvendes til at beregne krystallinitet ud fra smelteentalpien og bestemme varmekapaciteten.

DSC kan også benyttes til at identificere tilstedeværelsen af fremmede polymerer. I standarden DS/EN 15345 for PP henvises der direkte til standarderne EN ISO 11357-1, EN ISO 11357-2 og EN ISO 11357-3. Det skal bemærkes, at DSC kun kan give et estimat af størrelsen på den enkelte fraktion og ikke en præcis kvantificering. Alternativt kan lysbaserede metoder som FT-IR anvendes. Gennem EN 15344 anbefales begge metoder også for PE til identifikation af forurening med PP.



Figur 5: Grafisk gengivelse af molekylestrukturen på polyethylen og polypropylen

Netop PP og PE forekommer typisk i samme materialestrømme, hvor de kan være udfordrende at separere. De anvendes ofte sammen i produkter, hvor PP anvendes til plastfilm, og PE anvendes til bakker og anden hård plast, hvor de to kan være sammenføjet med lim. De to plasttyper har en densitet og molekylærstruktur, der ligner hinanden meget, se Figur 5. Dermed kan densitetsseparation ikke anvendes til frasortering af én fraktion fra den anden.

For PE- og PP-blandinger kan sådanne forureninger medføre, at materialet bliver hårdere og sprødere, og dermed bryder end forventet for en ren eller virgin plast. Yderligere agerer nogle additiver forskelligt på PE, end de gør for PP. Et eksempel på dette er peroxider, hvor disse i PE vil fremme tværbinding, som øger stivhed og sænker MFI, mens de i PP fører til nedbrydning og kortere kæder, hvilket reducerer styrken og øger MFI. Dermed kan peroxider ikke antages at have ens effekt på materialestrømme med variable PE/PP-fraktioner.

Oxidation Induction Time (OIT)

OIT bruges til at vurdere materialernes oxidative stabilitet. Under kontrollerede temperatur- og iltbetingelser måles den tid, det tager for materialet at begynde at oxidere. En længere OIT indikerer en bedre modstandsdygtighed over for nedbrydning under iltpåvirkning, hvilket er særligt relevant for materialer, der skal have en lang levetid eller anvendes i krævende miljøer.

Typisk har DSC-maskiner et atmosfærisk kontrolsystem og kan således anvendes til OIT-målinger.

OIT-målinger er mest relevante for langtidsholdbare produkter, såsom ekstruderede rør og andre applikationer, som påkræver høj oxidationsstabilitet. Der er fx angivet minimumskrav til OIT for underjordiske elkabler dækket af PE og PP i EN 50626-2.

Environmental stress cracking (ESC)

Environmental stress cracking (ESC) er forekomsten af revner i en plast, som opstår ved kontakt med en væske- eller damp-påvirkning kombineret med mekanisk spænding. Selv plast, der normalt er kemisk bestandig, kan blive sprød og revne under disse forhold. Spændingerne kan ofte forekomme som restspændinger og/eller indre spændinger fra produktionen af produktet, fx ved støbeporten.

ESC testes bl.a. jf. standarderne ISO 4599 og ASTM D1693, hvor prøven udsættes for spændinger neddyppet i en stress-cracking agent.

ESC kan være særlig relevant for genanvendt plast, da materialets sammensætning og historik ofte er ukendt. Tidligere belastninger, kemikaliepåvirkning eller varmebehandling kan have indført usynlige restspændinger, som svækker materialets holdbarhed og øger risikoen for revnedannelse.

Gelindhold

Opløselighedsforsøg anvendes til at bestemme gelindholdet i tværbundne polyolefiner som PE og PP. Gelindholdet angiver graden af tværbinding i materialet, hvilket har stor betydning for dets mekaniske styrke, kemiske resistens og forarbejdningsegenskaber. En høj grad af tværbinding kan forbedre varmebestandighed og dimensionsstabilitet, men reducerer samtidig materialets bearbejdelighed.

Metoden, beskrevet i bl.a. ISO 10147 for PE-X og ASTM D2765-16 for ethylenbaserede plasttyper, indebærer opløsning af prøven i et egnet opløsningsmiddel, hvorefter den uopløselige rest tørres og vejes. Restens masse i procent af den oprindelige prøve svarer til gelindholdet.

Genanvendelse af plast

Termomekanisk nedbrydning

Mekanisk genanvendelse af termoplaster involverer typisk både opskærings, rensnings og ekstruderingsprocesser. Under disse trin udsættes plasten for høj varme og mekanisk belastning, hvilket medfører ændringer i polymerstrukturen. Hvordan polymeren ændrer sig afhænger af den specifikke plastics kemiske struktur. Graden af ændring i materialets egenskaber kan yderligere påvirkes af procesindstillingerne og af additiver, såsom stabilisatorer og antioxidant. Disse ændringer kan have konsekvenser for slutproduktets integritet og produktion. Det er derfor essentielt at forstå, hvordan plasten påvirkes af termomekanisk genanvendelse.

Som eksempel er der markant forskel på, hvordan PP og PE ændrer egenskaber ved termomekanisk påvirkning. Ved gentagen udsættelse for opskæring og ekstrudering falder molekylvægten af PP, og materialet bliver tyndtflydende, mens dets mekaniske styrke forringes. For PE gælder det generelt, at materialet bliver mere tyktflydende og sejere at bearbejde, mens dets duktilitet falder. For en mere detaljeret gennemgang af PP og PE's nedbrydning ved termomekanisk påvirkning, se appendiks A.

Dette betyder, at der både teoretisk og i praksis er et maksimalt antal gange, plasten kan genanvendes uden tilsætning af virgin plast, pga. nedbrydning af kulstofkæderne i plasten, hvis de mekaniske og termiske egenskaber skal forblive anvendelige.

I praksis udgør produkter produceret fra 100% genanvendt plast kun en lille fraktion af nye plastprodukter. Genanvendt plast fortyndes i hovedreglen med ny virgin plast under produktionen af nye produkter, hvilket modvirker konsekvenserne ved at bruge et mere nedbrudt materiale.

Kompatibilitet

Udover at kunne påvirkes af tilsætningsstoffer, er mange plastsorter også følsomme over for forurening med fremmedplast. Følsomheden varierer afhængigt af de egenskaber, der vurderes. I plastindustrien er det i virkeligheden almindelig praksis at blande forskellige plasttyper for at kombinere deres egenskaber, men kun få polymerblandinger er naturligt kompatible uden brug af tilsætningsstoffer. Denne kombination af plasttyper kan imidlertid vanskeliggøre genanvendelsen af plastproduktet, da inkompatible polymerer kan føre til uforudsigelige variationer i materialets egenskaber og forringe kvaliteten af det genanvendte materiale.

En polymerblanding anses som kompatibel, hvis den udviser ønskede egenskaber, hvilket i praksis ofte hænger sammen med høj blandbarhed. Høj blandbarhed kendetegnes typisk ved, at

blandingen kun har én glasovergangstemperatur, T_g , mens lav blandbarhed ofte viser sig som tydelig faseadskillelse. Faseadskillelse betyder, at de to polymerer danner adskilte domæner med begrænset interaktion, hvilket kan reducere materialets styrke og sejhed.

Hvornår en blanding er kompatibel afhænger af blandingsforhold, tilsatte kompatibilitetsfremmere samt de involverede polymerers kemiske natur. For genanvendt plast er vurdering af kompatibilitet vigtig, da en høj grad af inkompatibilitet kan føre til uforudsigelige variationer i plastens egenskaber.

Additiver

Der udvikles i stigende grad kompatibilitetsfremmende additiver, der muliggør genanvendelse af blandede polyolefiner som PE og PP. Disse additiver fungerer som en form for 'lim', der forbedrer blandingerne homogenitet og mekaniske egenskaber, hvilket er afgørende for at sikre et stabilt og pålideligt slutprodukt. Ved at reducere uønsket faseadskillelse og forbedre smelteegenskaber giver de mulighed for højere genanvendelsesindhold uden at gå på kompromis med kvaliteten. Dette åbner døren for bæredygtige løsninger, selv i krævende applikationer som bilindustrien og fødevareremballage, hvor materialestabilitet er afgørende.

For at undgå termomekanisk nedbrydning under processering og sikre slutproduktets levetid, kan det være nødvendigt at anvende antioxidant og varmestabilisatorer. Mangel derpå kan resultere i defekter, øget sprødhed og et svagere produkt. Oxidering, drevet af frie radikaler, initieres af varme, mekanisk stress eller katalysatorrester, og fører til en selvforstærkende nedbrydningsproces (autooxidation). Dette kan forårsage kædebrud (ofte kaldt chain-scission) eller netværksdannelse (tværbinding), hvilket bl.a. ændrer polymerens molekylvægt og mekaniske egenskaber. Især PP er modtagelig for chain-scission, mens PE har tendens til netværksdannelse.

Uden stabilisering kan polymeren udvikle overfladefejl, farveændringer eller nedsat smelteflow, hvilket er særligt kritisk for produkter med stor overflade som film og fibre. Ved langtidsvarmebelastning kan materiale uden stabilisatorer blive sprødt og miste sine funktionelle egenskaber, hvilket understreger nødvendigheden af effektive antioxidant og varmestabilisatorer i polyolefiner som PP og PE.

Udover de ovennævnte additiver findes der et utal af andre additiver i plastprodukter, såsom antistatiske midler, pigmenter og brandhæmmere, som også kan påvirke genanvendelsen af plasten. Disse er ikke beskrevet i denne rapport.

Genanvendt plast i produktionen

RevMat-projektet har haft til formål at øge mængden af genanvendt plast i nye produkter. I samarbejde mellem FORCE Technology, Aalborg Universitets Institut for Materialer og Produktion samt de øvrige RevMat-partnere blev der udført undersøgelser af produktionsprocesserne hos danske aktører inden for genanvendelse af plast. Formålet har været at identificere og håndtere de udfordringer og løsninger, der findes i hele værdikæden fra affaldsstrømme til færdige produkter.

Letbek A/S

Letbek har siden 1973 arbejdet med genanvendelse af plast og har i dag en bred portefølje af produktionsudstyr, herunder sprøjestøbning samt ekstrudering af rør, plader og profiler. Virksomheden producerer bl.a. vinduesprofiler, rør og køreplader.

Køreplader

Letbek producerer bl.a. køreplader af genanvendt LDPE. Letbek erfarede, at kørepladerne kunne knække under brug, hvilket kun var observeret i de kolde måneder. Letbek havde en formodning om, at det skyldtes et for høj indhold af PP i det genanvendte LDPE. Blandingsforholdet mellem genanvendt LDPE og PP er ikke altid dokumenteret fra leverandørernes side. Desuden kan materialet komme fra forskellige kilder og leverandører, hvilket betyder at blandingsforholdet svinger. Det kan dog accepteres i forbindelse med produkter der ikke har høje tekniske krav som en køreplade.

For at få klarhed over problemet blev materialet undersøgt af FORCE Technology som en del af RevMat-projektet. FORCE Technology gennemførte analyser ved hjælp af TGA og DSC. Mange plastproducenter, herunder Letbek, råder ikke nødvendigvis over det nødvendige udstyr hertil.

Analyserne sammenlignede materialet fra kørepladerne, der var knækket, med materialet fra pladerne, der havde holdt til belastningen på 10 tons akseltryk. Resultaterne viste, at plader med et PP-indhold over 10 % typisk knækkede, mens kørepladerne der havde et PP-indhold på 6 % ikke knækkede. Dermed blev Letbeks formodning bekræftet, og virksomheden fik et konkret tal for, hvornår PP-indholdet gør materialet for sprødt og derved ikke kan anvendes til køreplader.

På baggrund af resultaterne har Letbek nu indført skærpede krav til deres leverandører: Genanvendt PE til køreplader må maksimalt indeholde 5 % PP. Dette tiltag forventes at reducere antallet af reklamationer og sikre en mere stabil produktkvalitet.



Fra insulinpenne til designerstole

Letbek producerer ryg og sæde til Wehlers designstole R.U.M (Re-Used Materials). I den forbindelse er de begyndt at bruge Pharmalit, hvilket er plastaffald fra medicinalindustrien (primært insulinpenne), til at producere R.U.M-stolen i "Pharma Blue".

Pharmalitmaterialet er PCR-plast, men da kilden er kendt og separeret ved indsamling, er der mindre variation og usikkerhed i materialestrømmen end ved gængse PCR-kilder. Engangsprodukter fra medicinalindustrien er dog sjældent designet til en lang levetid eller til at modstå miljøpåvirkning som sollys og oxidation af materialet, hvilket R.U.M-stolene udsættes for.

På den baggrund har FORCE Technology i RevMat-projektet undersøgt, hvordan Pharmalitmaterialet kan optimeres gennem tilsætning af additiver, da det også er et ønske at anvende materialet i andre produkter. Fokus har været på holdbarhed og styrke, hvorved et single-use produkt med kort levetid kan genanvendes til et multiple-use produkt.

Prøverne til OIT analysen blev taget fra støbte tensile prøver af Pharmalit materialet. Resultaterne viste, at Pharmalit materialet uden nogen tilsætning af antioxidant, havde en lavere oxideringstid end forventet. Resultaterne viste, at materialet mangler beskyttelse mod oxidation efter at have været igennem flere processtrin ved forarbejdning til genanvendelse.

Ved tilsætning af forskellige mængder antioxidant i materialet gennem en master batch, blev der ikke observeret en markant forskel på oxideringstiden i forhold til det oprindelige materiale.

Dette gav anledning til en diskussion af om antioxidanten i prøven distribueres optimalt i forhold til de ønskede krav til det færdige produkt.

Derfor arbejdes der videre med at finde en løsning på distribueringen og den rigtige mængde af antioxidant i forhold til at opnå den ønskede levetid.

Dokumentation og udfordringer

De største udfordringer for Letbek ift. produktion af produkter af genanvendt plast har primært at gøre med dokumentation ift. at kunne redegøre for fravær af indhold af problematiske stoffer ift. lovgivningen. Udfordringen er at kunne skaffe den nødvendige dokumentation, enten i form af erklæringer eller sikkerhedsdatablade på den genanvendte plast. Materialet kan ofte ikke bære den ekstra omkostning, det giver ift. dokumentation af overholdelse af krav vedr. problematiske stoffer.

Marius Pedersen A/S - RC Plast

Siden 1981 har Marius Pedersen A/S - RC Plast specialiseret sig i genanvendelse af plast, med fokus på PIR-plast fra tekstiler i hygiejne- og medicinalindustrien. I forbindelse med et nyt projekt arbejder Marius Pedersen A/S - RC Plast på at begynde processering af PCR-plast fra ReSource Danmark - landets første storskalasorteringsanlæg for plastaffald.

Som genanvender omdanner Marius Pedersen A/S - RC Plast plastaffaldsstrømme til regranulat, der anvendes i produktionen af nye plastprodukter. For at imødekomme materialestrømme med varierende oprindelse og sammensætning, anvender Marius Pedersen A/S - RC Plast et rense- og sorteringsanlæg.

Dokumentationskrav

Marius Pedersen A/S - RC Plast har oplevet et skift i efterspørgslen fra hovedsageligt PIR-plast til en større efterspørgsel efter PCR-plast. Dette skyldes bl.a. krav om en højere grad af genanvendelse fra EU's side, men formentlig også et større offentligt fokus på genanvendelse af forbrugerfraktionen. Dette giver dog tydelige udfordringer ift. dokumentationen, idet virksomhederne, der efterspørger genanvendt PCR-materiale, kræver de samme oplysninger om indhold ift. lovgivningskrav og dokumentation som fra virgin plast. Marius Pedersen A/S - RC Plast oplever således krav til dokumentation ift. indhold af kemiske stoffer til overholdelse af REACH, oplysningspligt m.m. Når kilden er ukendt, som den ofte er for PCR-plast, er den primære vej til viden om indhold af evt. problematiske kemiske stoffer, brug af omkostningstunge kemiske analyser, som vil være relevant for hver enkel batch, da der ikke er garanti for ensartetheden i genanvendte materialer.

Producenter af produkter med genanvendte materialer skal derfor være villige til at bære den ekstra omkostning, det er at dokumentere fravær af evt. problematiske kemiske stoffer, som er påkrævet via lovgivningen.

Certificering - RecyClass

Marius Pedersen A/S - RC Plast oplever en øget efterspørgsel ift. dokumentation af, at der er tale om genanvendt plast. Dette

kan løses ved europæiske certificeringsordninger, fx RecyClass, hvor det både er muligt for genanvenderen at få certificeret selve genanvendelsesprocessen og for plastproducenten at få certificeret andelen af genanvendt plast, der er anvendt til fremstilling af plastprodukterne. I begge tilfælde er der lagt vægt på sporbarheden af det genanvendte materiale. I det hele taget er sporbarheden af materialestrømmene essentiel for genanvendt plast, også for at kunne overholde lovgivningskrav vedr. indhold af evt. problematiske stoffer.

Grænse for urenheder i genanvendt plast

I RevMat-projektet undersøgte Marius Pedersen A/S - RC Plast i samarbejde med Aalborg Universitet en materialestrøm af polypropylen-copolymer (PP-co). For at forbedre bearbejdigheden blev materialet tilsat peroxid under bearbejdning, som nedbryder polymerkæder og øger smeltmasseindekset (MFI). Processen viste sig dog vanskelig at styre, idet der opstod store udsving i MFI samt uventet sprødhed i de færdige materialer. En hypotese om varierende PE-indhold gav anledning til en nærmere undersøgelse.



For at afdække årsagerne til variationen blev der produceret en række blandinger af PP-co og rPE-LLD samt to additiver, peroxid og antioxidant. Disse blev analyseret ved hjælp af MFI, træktest, DSC, OIT og DMA. Resultaterne viste, at peroxid i rent PP-co konsekvent øgede MFI, mens rPE-LLD uden peroxid ligeledes havde en positiv effekt. Når de to komponenter blev kombineret, opstod der derimod en negativ og mængdeafhængig effekt på MFI, hvilket tydede på konkurrerende reaktioner mellem de to polymerfraktioner. Træktestene underbyggede denne tolkning, idet materialer med kombinationen af PP-co, rPE-LLD og peroxid udviste reduceret brudforlængelse og en tydeligere tendens til sprødhed sammenlignet med både rent PP-co og blandinger uden peroxid.

Disse observationer stemmer overens med den kendte virkning af peroxider i polyolefinsystemer. I PP reducerer peroxider molekylvægten gennem såkaldt vis-breaking, hvilket øger MFI og forbedrer bearbejdéligheden. I PE fremmes derimod tværbinding, som øger stivhed og varmebestandighed, men reducerer duktilitet. Når de to materialer blandes, resulterer de modsatte reaktioner i en forringelse af materialets mekaniske integritet, herunder lavere brudforlængelse og øget sprødhed. På baggrund af disse analyser kunne Marius Pedersen A/S - RC Plast fastsætte en øvre grænse for PE-indholdet i materialet for at undgå de uønskede effekter.

Danish Fibres A/S

Danish Fibres A/S er en global leverandør af specialfremstillede PP-fibre til tekniske og industrielle formål. Virksomheden producerer højkvalitetsfibre til en række anvendelser, herunder betonarmering, brandsikring, filtrering og jordstabilisering.



Danish Fibres A/S fokuserer på kontinuerlig udvikling af nye fiberløsninger, der imødekommer de stadigt skiftende krav i bygge- og industrisektoren. Virksomhedens mål er at være en førende global aktør inden for specialiserede PP-produkter.

I forbindelse med bæredygtighedsindsatsen arbejder virksomheden aktivt med at integrere genanvendte materialer i produktionen. Produktionsaffaldet håndteres ved at sende det til genanvendelse hos Marius Pedersen A/S - RC Plast, som returnerer det som granulat. Marius Pedersen A/S - RC Plast accepterer dog kun produktionsaffald i mængder på mindst 5 tons. Da Danish Fibres har et relativt lavt produktionsspild, tager det lang tid at opnå denne mængde. Derfor har de indgået en aftale med en nærliggende virksomhed, som også producerer PP-fibre, om at modtage deres produktionsaffald. Dette samarbejde har fremmet genanvendelsen og er et glimrende eksempel på, hvordan tværgående samarbejde kan fremme genanvendelse af plast.

Danish Fibres har et ambitiøst mål om at øge andelen af genanvendt plast i deres fiberproduktion til 20 %, uden at gå på kompromis med kvaliteten. I øjeblikket tilsætter de 12 % genanvendt plast til fibre.

FORCE Technology har udført træktests på Danish Fibres' fibre med 12 % genanvendt plast. Der blev testet fire forskellige fibertyper. Målsætningen er at opnå en trækstyrke på minimum 600 MPa. Dette vil medføre, at Danish Fibres kan reducere fibermængden pr. m³ beton betydeligt, hvilket bidrager til øget eksport.

Tre ud af fire fibertyper opnåede tilfredsstillende resultater og sælges nu. Den fjerde fiber, som ikke opnåede tilstrækkelig trækstyrke, indeholdt - i modsætning til de andre - kridt som additiv. Danish Fibres arbejder nu på at optimere denne fiber baseret på testresultaterne.

På baggrund af de positive resultater med 12 % genanvendt plast er der udviklet nye PP- og PE-fibre med 15 % og 20 % genanvendt plast. Dette er et vigtigt skridt mod målet om 20 % genanvendt plast i produktionen - uden at gå på kompromis med de mekaniske egenskaber.

FORCE Technology har også udført træktests på disse PP- og PE-fibre med 15-20 % genanvendt plast og varierende mængder additiv. Fibrene viste generelt trækstyrker en smule under det ønskede niveau på 600 MPa. Resultaterne har dog givet Danish Fibres værdifuld indsigt i, hvordan fibrene kan optimeres for at opnå den ønskede styrke.

Mens Danish Fibres udvikler videre på at forbedre trækstyrken af fibrene med 20 % genanvendt plast, vil de i mellemtiden fortsætte med at anvende fibre med 12 % genanvendt plast. Alt i alt, er Danish Fibres godt på vej mod deres ambitiøse mål om at anvende 20 % genanvendt plast i produktionen.

Handi Life Sport

Handi Life Sport producerer bl.a. bocciabolde og har et ønske om, at indholdet i boldene (POM (polyoxymethylen) og PA granulat) skal bestå af genanvendt materiale. Udfordringerne er dels, at boldene skal have det korrekte fyld mht. både udformning, størrelse og densitet, og dels at POM ikke er en specielt anvendt plasttype. Produktionen af POM udgør formentlig under 0,5 % af den samlede plastproduktion i Europa. Dette gør det derfor også svært at finde anvendelige fraktioner af genanvendt POM.

En yderligere udfordring er, at stort set ingen danske virksomheder bearbejder genanvendt POM pga. udfordringer med frigivelse af det kræftfremkaldende og flygtige formaldehyd, som giver arbejdsmiljømæssige udfordringer.

Det har været undersøgt på teoretisk plan om andre typer af genanvendt plast (fx PP eller PE) kunne anvendes som alternativer, hvis fyldstoffer blev tilføjet af hensyn til øgning af densiteten. Dog har de specifikke kravspecifikationer til granulatet i boldene - fx størrelse og udformning - vist sig at være en større hæmsko end forventet. Flere granulatproducenter har ikke maskineri til at imødekomme kravene. Endelig betyder den begrænsede efterspørgsel efter denne type genanvendt granulat, at det for granulatproducenter ikke er en attraktiv investering.

Procestekniske tiltag

For at kunne inkorporere genanvendt plast i produktionen, er der for både genanvenderen og plastproducenten et behov for kontrol over deres processer og materiale. I forsøget på at opnå denne kontrol, anvendes der erfaringer og teknologier, som tilsammen gør det muligt at genanvende plast, der ellers ville være for krævende. De følgende afsnit gennemgår de teknologier, som har relevans for granulering og for plastproducentens produktionsprocesser, såsom ekstrudering, sprøjtestøbning og blæsestøbning.

Procesudfordringer ved genanvendt plast

Anvendelsen af genanvendt plast i produktionsprocesser som ekstrudering og sprøjtestøbning medfører særlige udfordringer. Fremmedpartikler og urenheder kan øge slid på maskineriet og i kritiske applikationer som fiber- og filmekstrudering forårsage brud eller fejl i produktet. For at minimere disse risici benytter mange genanvendere filtreringssystemer, der fastsætter en øvre grænse for partikelstørrelser i materialestrømmen.

Derudover kan variationer i materialekvalitet påvirke stabiliteten af procesparametre som temperatur, tryk og flydeevne. Dette kan kræve løbende tilpasninger for at opnå ensartet kvalitet, hvilket behandles nærmere i det næste afsnit om indkøring.

Indkøring ved genanvendt plast

Ved opstart af nye processer kræves der ofte indkøring for at tilpasse maskinindstillingerne og sikre et stabilt output. For virginmaterialer er dette normalt en sjælden hændelse, der ofte er forbundet med skift af leverandør, materiale eller maskin-komponenter.

Ved genanvendt plast er variationen i råvarekvalitet ofte større, hvilket kan gøre hyppigere indkøring nødvendig. I visse tilfælde kan der kræves justeringer ved hver leverance, især hvor produktkravene er stramme. Justeringerne kan omfatte fx temperatur, tryk, cyklustid og køleprofil.

Ved sprøjtestøbning anvendes typisk observationer af emnevægt og dimensioner som indikatorer for processtabilitet. En stabil emnevægt tyder på, at processen er under kontrol, mens udsving kan indikere behov for yderligere optimering.

Doseringssystemer

Additiver tilsættes typisk umiddelbart inden plasten indgår i produktionsprocessen for at justere materialets egenskaber.

De mest almindelige systemer benytter skruer til at transportere og fordele materialet, mens simple løsninger til bulk-materialer kan anvende transportbånd.

Blandt præcisionsudstyr til additiver skelnes der primært mellem volumetriske og gravimetriske doseringssystemer: Volumetrisk dosering regulerer materialetilførslen ud fra volumen, fx gennem en doseringsskrue. Metoden er relativt enkel og billig, men for lave doseringsstørrelser, som ved reaktive additiver, kan den være for upræcis.

Gravimetrisk dosering måler i stedet materialets vægt, hvilket giver en markant højere nøjagtighed og stabilitet. Sådanne systemer justerer automatisk for variationer i materialeegenskaber og kan opnå doseringsnøjagtighed helt ned til $\pm 0,05$ %.

Afgasning

Systemer til afgasning fjerner fugt, luft og flygtige stoffer fra polymersmelten under ekstrudering. Dette forbedrer materialekvaliteten ved at reducere porøsitet, bobler og uønskede indeslutninger. For genanvendte plaststrømme kan der forekomme højere fugtindhold eller forureningsgrad, fx fra mærkater og lim. Processen udføres typisk ved vakuum, hvor trykket er afhængigt af materialetype og krav. Det er også muligt at have afgasning uden vakuum, dvs. ved atmosfærisk tryk.

Blandingssiloer

Specialdesignede blandingssiloer sikrer ensartet kvalitet i genanvendte plastmaterialer. Disse siloer kommer både som aktive og passive systemer, og fungerer ved at homogenisere granulatstrømme. Det sikrer en jævn blanding af forskellige granulatkvaliteter i én batch, hvilket mindsker risikoen for materialesegmentering og uensartethed. Passive systemer anvender tyngdekraften ved på- og aflæsning af granulat, mens aktive systemer anvender mekaniske løsninger som snegleskruer og lignende til at sikre en effektiv omrøring/blanding.

Miksere

Miksere bruges til at homogenisere materialestrømme, især når der tilføjes additiver før videre forarbejdning. Valg af mikser afhænger af materialets form og viskositet. Fx kan nogle modeller håndtere pulver, andre granulat og andre flydende eller viskøse blandinger.

Miksere kan muliggøre anvendelsen af materialer eller blandinger, som kræver længere blandings tid end muligt på tilgængeligt produktionsudstyr, eller som oplever ujævn dosering af additiver.

Regulering

Moderne sprøjtestøbe- og ekstruderingsudstyr anvender regulering for at sikre stabile procesforhold og høj produktkvalitet. Reguleringen sker typisk i lukket sløjfe (closed-loop), hvor sensorer måler centrale procesparametre som formtemperatur, smeltetryk og skruens position. På baggrund af disse målinger justeres maskinens input automatisk for at kompensere for afvigelser. Et eksempel er smeltepumper, hvor trykfaldet kontinuerligt overvåges, og pumpens rotationshastighed reguleres for at opretholde det ønskede smeltetryk.

Denne form for feedback-baseret regulering gør processerne mere robuste over for variationer i råvarer og omgivelser, hvilket er særligt vigtigt ved anvendelse af genanvendt plast, hvor materialeegenskaberne ofte varierer mere end ved virginpolymerer. Åben sløjfe (open-loop) styring, som udelukkende baserer sig på forudindstillede parametre, anvendes stadig i enklere systemer, men mangler evnen til at korrigere for procesforstyrrelser som temperaturdrift eller variation i materialestrømme.

Disse systemer har dog begrænsninger. Simple reguleringssystemer egner sig kun til processer, som er lineære, hvilket ikke er tilfældet for sprøjtestøbning. Der findes dog mange tilgange, som tillader regulering af selv ikke-lineære processer.

Smeltepumper (Melt Pumps)

Smeltepumper installeres ved smeltezonen for at sikre et stabilt materialeflow. Ved at holde trykket i smeltezonen konstant kan der kompenseres for variationer i materiales flydeegenskaber, og sikres en mere stabil emnevægt og beskaffenhed.

Smeltepumper kan anvendes til rør-, folie-, plade- og kabeleks-trudering, og kan også anvendes til coekstrudering. Yderligere anvendes de ofte, hvis den tilgængelige snekke ikke kan opnå det ønskede tryk.

Selvom det ideelle er at holde trykket i formen konstant, er det med smeltepumper trykket i smeltezonen, som måles og justeres.



Konklusion

RevMat-projektet har afdækket, hvordan integrationen af genanvendt plast i produktionskæder påvirkes af tre centrale søjler: Marked og lovgivning, materialer og opkvalificering, samt produktion og processer.

Markedet er præget af kompleks lovgivning, regulering og standarder, som - sammen med historisk stramme krav til materialer fra plastproducenter - har været med til at sætte høje barrierer for, hvilken kvalitet materialestrømme skal kunne omdannes til. Disse krav udgør fundamentet for kvalitet og sikkerhed, men kan samtidig begrænse fleksibiliteten og hæmme udviklingen af forsyningskæden.

Markedet for genanvendt plast er domineret af polyolefiner (PP og PE) samt PET, hvor mekanisk genanvendelse udgør langt størstedelen af kapaciteten. Variation i kvalitet og manglende sporbarhed forbliver en væsentlig barriere for en bredere anvendelse. Projektets cases har illustreret, at markedets udvikling i høj grad hæmmes af indkøbsudfordringer. Efterspørgslen på genanvendt plast er større end udbuddet, og de materialestrømme, der i dag bearbejdes, kan ikke dække alle behov.

Procesmæssigt kræver integrationen af genanvendt plast øget fokus på proceskontrol og kan i visse tilfælde kræve redesign af produkter eller værktøjer. Ikke alle produktionsprocesser er lige modtagelige over for alle materialestrømme, men der udvikles løbende nye teknikker til at regulere og styre processerne med henblik på at øge robustheden over for variation.

Refleksion

Erfaring fra RevMat viser, at markedet for genanvendt plast befinder sig i en overgangsfase. Genanvendere, der har en historisk baggrund i affaldshåndtering, er i færd med at transformere sig til materialeleverandører. Hvor genanvendt plast tidligere primært blev betragtet som et affaldsprodukt, ses

det nu i stigende grad som en mangelvare i høj efterspørgsel. Denne udvikling er drevet af nye lovkrav, der stiller krav om øget anvendelse af genanvendt plast i nye plastprodukter, et øget fokus fra medierne og politiske målsætninger om at øge mængden af genanvendt plast i værdikæden.

Denne omstilling stiller højere krav til leveringssikkerhed, sporbarhed og kontrol over materialer. Disse opgaver skal løses bedst muligt hos genanvenderen for at skabe en stabil grobund for markedets modning. Samtidig må producenter acceptere en højere grad af variation og tilpasse deres processer derefter, både teknisk og organisatorisk - samt indstille sig på øget efterspørgsel efter indhold eller fravær af problematiske stoffer pga. lovgivningskrav.

Fremtidssyn

Fremadrettet peger erfaringerne på to centrale udviklingsspor:

1. **Styrket koordinering mellem de tre søjler:** Mere standardiserede kvalitetsparametre (jf. JRC's forslag), øget datadeling og formaliserede samarbejder kan reducere friktionen mellem marked, materialer og processer.
2. **Opkvalificering af materialestrømme:** Investeringer i avanceret sorterings-, indsamlings- og forbehandlings-teknologi kan gøre genanvendt plast mere forudsigelig og dermed øge værdien skabt hos genanvenderen og reducere udfordringerne hos producenten.

RevMat-projektet viser, at fundamentet for denne udvikling allerede er lagt: Teknologierne findes, markedsinteressen er stigende, og opdateringer af plastregulering skubber i retning af øget cirkularitet. Den næste fase består i at skabe en mere dynamisk og forudsigelig koordinering mellem aktørerne.



Appendiks A:

Nedbrydningsforløb for PP og PE

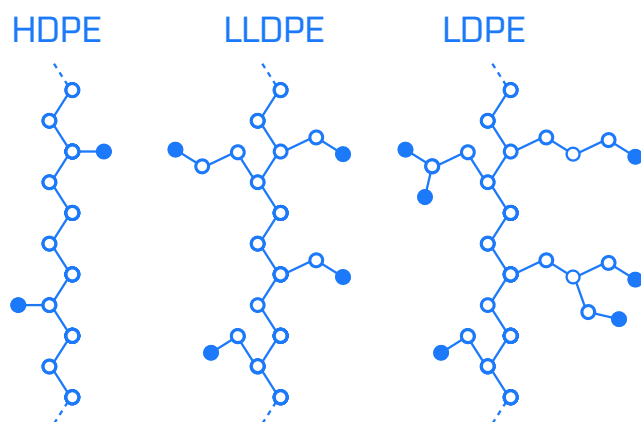
Ved degraderingen af PP forekommer almen kædebrud som den dominerende reaktion. Her medfører den mekaniske belastning og tilgængelige varme, at polymerkæden 'klippes', hvormed den gennemsnitlige molekylærvægt falder. Generelt medfører fald i molekylærvægt en øget flydeevne og en reduktion i plastens styrke.



Figur 6: Termomekanisk nedbrydning af PP

PP's nedbrydning over 19 ekstrusionsscykluser ved forskellige dysetemperaturer blev analyseret i to separate studier med forskellige udgangs-MFI [González, Neira-Velazquez, & Angulo-Sánchez, 1998; Helson, Valéria, & Márcia, 2007]. I et studie, der anvendte PP med en MFI på 3,48 g/10 min, blev det vist, at kædebrud og molekylvægttab var stærkt temperaturafhængige. Antallet af kædebrud mere end fordobledes fra 240 til 245 °C ved 12 cyklusser, og MFI steg markant fra 3,5 g/10 min til henholdsvis 14,7 g/10 min (240 °C) og 33,4 g/10 min (245 °C) ved 19 cyklusser [González, Neira-Velazquez, & Angulo-Sánchez, 1998].

Et andet studie, der undersøgte PP med en MFI på 1,5 g/10 min, fokuserede på materialets mekaniske egenskaber. Ved dysetemperaturer på 260 og 270 °C faldt PP's brudforlængelse drastisk fra over 500 % ved 12 cyklusser til under 30 % ved 19 cyklusser, hvilket indikerer en overgang fra duktil til sprød opførsel. Flydespændingen forblev dog relativt stabil og faldt kun fra 21 til 19 MPa [Helson, Valéria, & Márcia, 2007].



Figur 7: Grafisk repræsentation af PE-varianters molekylestruktur. Sidekædelængder er ikke retvisende.

For PE er materialets opførsel under genanvendelse afhængige af polymerens molekylestruktur, og skiftende med antallet af ekstrusionsscykluser. Som det fremgår af Figur 7, varierer polymerstrukturen markant imellem de tre mest gængse varianter, nemlig HDPE, LLDPE og LDPE.

To studier analyserede nedbrydningen af henholdsvis HDPE og LDPE over 100 ekstrusionsscykluser. Forsøgene anvendte ens procesparametre for alle cyklusser, med en omdrejningshastighed og en smeltetemperatur på henholdsvis 150 RPM og 240 °C. [Oblak, Gonzalez-Gutierrez, Zupančič, Aulova, & Emri, 2015] [Jin, Gonzalez-Gutierrez, Oblak, Zupančič, & Emri, 2012].

I HDPE-studiet blev en virgin HDPE med en MFI (190 °C, 2,16 kg) på 7,5 g/10 min anvendt. Fra første cyklus faldt MFI eksponentielt, hvorefter den stabiliserede sig omkring 0,1 g/10 min. Ligeledes steg den komplekse viskositet ved lavfrekvent belastning markant. Udviklingen var mindre markant ved højfrekvent belastning. Yderligere blev der i studiet først observeret tværbinding efter 70 cyklusser. [Oblak, Gonzalez-Gutierrez, Zupančič, Aulova, & Emri, 2015].

Stigningen i kompleks viskositet ved lave forskydningshastigheder kan påvirke materialets opførsel i en formgivningsproces. Effektivt bliver materialet i større grad forskydningsfortyndende, hvilket kan kræve ændringer i procesparametre såsom temperatur og omdrejningshastighed. I nogle tilfælde er kraftigere udstyr nødvendigt, hvilket også kan medføre øget slid. [Oblak, Gonzalez-Gutierrez, Zupančič, Aulova, & Emri, 2015].

Ved LDPE-studiet blev der anvendt en jomfrueligt LDPE med en MFI på 2,25 g/10 min. Studiet fandt en lignende udvikling i flydeegenskaber. Foruden flydeegenskaberne forekom LDPE'ens andre materialeegenskaber stabile op til 40. cyklus. Mærkværdigt forekom der i højere grad tværbinding, allerede målbart ved 10. cyklus. [Jin, Gonzalez-Gutierrez, Oblak, Zupančič, & Emri, 2012].

I et separat studie, hvor der i stedet vurderes på basis af blandingstid i en mixer, blev lignende konklusioner draget. LDPE oplevede primært tværbinding tidligt i processeringen, mens både HDPE- og LLDPE-forsøgernes nedbrydningsproces var domineret af kædebrud. Yderligere efterviste studiet, at stabilisatorer kan øge mængden af termomekanisk påvirkning, der er påkrævet, før molekylerne begynder at nedbryde. [Felgel-Farnholz, Schweighuber, Klampfl, & Fischer, 2023].

Referencer

- Ajitha Anthickamalil Ramachandran, A. R. (2020). Chapter 2 Role of Functional Polymers in the Compatibilization of Polymer Blends. I T. J. Gutiérrez (Red.), *Reactive and Functional Polymers Volume Two* (s. 5-21). Springer.
- Braun, D., Richter, S., Hellmann, G., & Rätzsch, M. (1998). Peroxy-initiated chain degradation, crosslinking, and grafting in PP-PE blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 68(12), 2019-2028.
- Eder, P., & Villanueva, A. (2014). End-of-waste criteria for waste plastic for conversion. Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Seville, Spain.
- Felgel-Farnholz, A., Schweighuber, A., Klampfl, C. W., & Fischer, J. (Juli 2023). Comparative study on the degradation of HDPE, LLDPE and LDPE during multiple extrusions. *Polymer Degradation and Stability*, 8.
- Forum for cirkulær plastemballage. (2019). Designguide: Genbrug og genanvendelse af plastemballage til private forbrugere.
- González, V., Neira-Velazquez, M., & Angulo-Sánchez, J. (04 1998). Polypropylene chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusion. *Polymer Degradation and Stability*, 60, 33-42.
- Helson, M., Valéria, D., & Márcia, G. (2007). Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*, 26, 676-684.
- Hubo, S., Ragaert, K., Leite, L., & Martins, C. (2014). Evaluation of post-industrial and post-consumer polyolefin-based polymer waste streams for injection moulding. Hentet fra <https://backoffice.biblio.ugent.be/download/5797247/5797248>
- Hundertmark, T., Mayer, M., McNally, C., Simons, T. J., & Witte, C. (2018). How plastics-waste recycling could transform the chemical industry. McKinsey&Company, Chemicals. McKinsey.
- Jin, H., Gonzalez-Gutierrez, J., Oblak, P., Zupančič, B., & Emri, I. (November 2012). The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 97(11), 2262-2272.
- Krause, S. (1978). Chapter 2 - Polymer-Polymer Compatibility. I D. P. Newman (Red.), *Polymer Blends* (s. 15-113). Academic Press.
- Marchello, D., Jessica, Gozali, L., & Ali, A. (2022). Analysis of Raw Material Planning with Optimal Cost Consideration Using Safety Stocks, Material Requirement Planning, and Lot Sizing Methods at Plastic Jar Company. *Proceedings of the 3rd Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Johor Bahru, Malaysia. IEDM Society International.
- Oblak, P., Gonzalez-Gutierrez, J., Zupančič, B., Aulova, A., & Emri, I. (April 2015). Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 114, 133-145.
- Pierri, E., Egle, L., Milios, L., & Saveyn, H. (2024). EU-wide end-of-waste criteria for plastic waste. European Commission, Joint Research Centre. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Hentet fra <https://data.europa.eu/doi/10.2760/9234350>
- Plastics Europe. (2022). Hentet 2024 fra plasticseurope.org: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/12/PE-PLASTICS-THE-FACTS_FINAL_DIGITAL.pdf
- Plastics Europe. (2023). *Plastics - the fast Facts 2023*. Hentet fra *Plastics - the fast facts 2023*: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2023/10/Plasticsthefastfacts2023-1.pdf>
- Plastics Europe. (2024). *Plastics - the fast facts 2024*. Hentet fra <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Plastics Recyclers Europe. (2023). *Plastics Recycling Industry in Europe: Mapping of Installed Plastics Recycling Capacities - Data 2021*. Brussels.
- Plastindustrien. (2024). Hentet 2024 fra [Plast.dk](https://plast.dk/): <https://plast.dk/>
- Sick, C. (2024). Kemisk genanvendelse af plastik. *Plastics Change*.
- Stingl, V., Omair, M., & Wæhrens, B. V. (2025). Circular Economy of Plastic: Revisiting Material Requirements Planning Practices for Managing Uncertain Supply. *Sustainability*, 17(1)(112). doi:<https://doi.org/10.3390/su17010112>
- Zhu, B., Li, Y., & Zhang, F. (u.d.). A Credibility-Based MPS/MRP Integrated Programming Model Under Complex Uncertainty. *International Journal of Fuzzy Systems*, 23(5), 1414-1430. doi:<https://doi.org/10.1007/s40815-020-01041-2>