



Udvikling af oparbejdningslinje til optimal genanvendelse af indsamlet plast fra husstande set i et cirkulært perspektiv

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Bo R. Jacobsen, Aage Vestergaard Larsen A/S

Anne Riis, I/S Reno-Nord

Ida Leisner, I/S Amager Ressource Center

Carsten Zaar Hansen, Nomi4S i/s

Michael Kristensen, SKY-LIGHT A/S

Jan Verny Hansen, AL-2 Teknik A/S

Bjørn Malmgren-Hansen, Teknologisk Institut

Kathe Tønning, Teknologisk Institut

Grafiker/bureau: Teknologisk Institut

Fotos:

Aage Vestergaard Larsen A/S

I/S Amager Ressource Center

Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-288-5

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.	Forord	5
2.	Sammenfatning og konklusion	6
3.	Introduktion	13
4.	Sortering af husstandsindsamlet plast på sorteringsanlæg	16
4.1	Deltagende sorteringsanlæg	16
4.1.1	I/S Reno-Nord	16
4.1.1.1	Indsamlingsområde for materialer fra Reno-Nords leverandørområde	17
4.1.1.2	Indsamlingsområde for materialer fra Dansk Affald A/S' leverandørområde	17
4.1.2	Nomi4s	17
4.1.2.1	Indsamlingsområde	18
4.1.3	ARC	18
4.2	Testproduktion nr. 1	19
4.3	Metode til karakterisering af sammensætning	20
4.4	Resultater af karakteriseringer	21
4.5	Sammenstilling af karakteriseringsresultater fra de fire sorteringer	23
4.5.1	Sammenstilling af polymerrenhed opnået ved de fire sorteringer	23
4.5.2	Sammenstilling af resultater for sort plast	24
4.5.3	Indhold af glas	25
4.5.4	Indhold af plastfolie og affald	25
5.	Udvikling af procesenheder til oparbejdning af plast	27
5.1	Koncept	27
5.2	Fremstilling af procesenheder	28
5.2.1	Vaskeenhed	28
5.2.2	Densitetssortering	29
5.2.3	Rensning af spildevand	31
5.3	Udviklingsforsøg med procesenheder	33
5.3.1	Oparbejdningsskema	34
5.3.2	Oparbejdning af HDPE og PP	34
5.3.2.1	Udbytte og tab af HDPE og PP ved oparbejdning	35
5.3.2.2	Omsmeltningsgrad af flakes af HDPE og PP samt kvalitet af piller	37
5.3.3	Oparbejdning af PET	40
5.3.3.1	Udbytte og tab af PET ved oparbejdning	40
5.3.4	Spildevand fra vaske- og tørreprocesser	42
5.3.5	Separation af partikler i spildevand med båndfilter	44
5.3.6	Densitetssortering	46
5.3.7	Omsmeltningsgrad af PET ved SKY-LIGHT	46
5.3.8	Sort plast	53
5.3.9	Test med lugtrensning	54
6.	Opbygning og test af oparbejdningsskema	56
6.1	Opbygning	56
6.1.1	Rensning af spildevand	58

6.2	Test og demonstration af oparbejdningslinje	60
6.2.1	Vaskeenheder	60
6.2.2	Test af densitetssortering	60
6.2.3	Test af spildevandsrensning	63
6.2.4	Performancetest og demonstration af oparbejdningslinjen samt kvalitet af produceret HDPE og PP	63
6.2.5	Fremstilling af testemne af HDPE	68
7.	Undersøgelse af udenlandske erfaringer med oparbejdning af PET-fraktioner	69
7.1	WRAP-rapport: Developing End Markets For PET Pots, Tubs and Trays	69
7.2	Sortering af PET-bakker fra PET-flasker	70
7.3	Oparbejdning af bakker	70
7.4	Fremstilling af bakker af genanvendt PET hos Færch	70
8.	Aktiviteter ved sorteringsanlæg	71
8.1	Reno-Nord	71
8.2	Nomi4s	76
8.3	ARC	79
9.	Vurdering af effekt på genanvendelse og businesscases	82
9.1	Afsætning af materialer, herunder PET og sort plast	82
9.2	Vurdering af genanvendelseseffekt ved etablering	82
9.3	Businesscases	84
9.3.1	Anlæg til oparbejdning af HDPE og PP	84
9.3.2	PET-oparbejdning	84
9.3.3	Sort plast	85
9.3.4	Synergi mellem sortering og oparbejdning	85
Bilag 1.	Testproduktion samt karakterisering	87
Bilag 1.1	Testproduktion hos Reno-Nord	87
Bilag 1.2	Testproduktion hos Nomi4s	93
Bilag 1.3	Testproduktion hos ARC	95
Bilag 2.	Fotodokumentation	98
Bilag 2.1	Fraktioner sorteret hos Reno-Nord og indsamlet i Reno-Nords leverandørområde, Nordjylland	98
Bilag 2.2	Fraktioner sorteret hos Reno-Nord og indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde	99
Bilag 2.3	Fraktioner sorteret hos Nomi4s og indsamlet i Nomi4s' leverandørområde	101
Bilag 2.4	Fraktioner sorteret hos ARC og indsamlet i Københavns Kommune	103
Bilag 3.	Neddelingsforsøg	105
Bilag 4.	Beregning af separations-effektivitet i densitetssortering	106
Bilag 4.1	Densitetssortering af sort plast	106
Bilag 4.2	Densitetssortering oparbejdningslinje	109

1. Forord

Projektet "Udvikling af oparbejdningslinje til optimal genanvendelse af indsamlet plast fra husstande set i et cirkulært perspektiv" er gennemført i perioden fra 15. januar 2018 til 30. maj 2020.

Det overordnede formål med projektet har været at udvikle en robust og fleksibel oparbejdningslinje til husstandsindsamlet (kildeopdelt/kildesorteret) hård plast af polyethylen (HDPE) og polypropylen (PP). Endvidere er der arbejdet med udvikling af løsninger til oparbejdning af sort plast og vanskeligt genanvendelige PET-produkter (bakker og multilagskonstruktioner), der p.t. i overvejende grad mistes til forbrænding.

Udviklingen er sket i tæt samspil mellem Aage Vestergaard Larsen A/S, Teknologisk Institut, danske sorteringsanlæg og teknologileverandører for at kunne udvikle et lokalt produceret høj kvalitetsregranulat, der kan indgå som en global handelsvare med veldefinerede tekniske egenskaber til produktion af nye plastprodukter og dermed bidrage til den cirkulære økonomi.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem Aage Vestergaard Larsen A/S, I/S Reno-Nord, I/S Amager Ressource Center, Nomi4S i/s, SKY-LIGHT A/S, AL-2 Teknik A/S, Teknologisk Institut og Miljøstyrelsen.

Projektets styregruppe har bestået af:

- Bo Rørbæk Jacobsen, Aage Vestergaard Larsen A/S
- Anne Riis, I/S Reno-Nord
- Ida Leisner, I/S Amager Ressource Center
- Carsten Zaar Hansen, Nomi4S i/s
- Michael Kristensen, SKY-LIGHT A/S
- Jan Verny Hansen, AL-2 Teknik A/S
- Bjørn Malmgren-Hansen, Teknologisk Institut
- Jesper Skovby Jørgensen, Miljøstyrelsen.

2. Sammenfatning og konklusion

I projektet er der udviklet en prototype af en oparbejdningsslinje til oparbejdning af polymersorteret, husstandsindsamlet hård plast. Oparbejdningsslinjen er udviklet til primært at oparbejde HDPE og PP, som i Danmark udgør ca. halvdelen af den hårde plast i husstandsindsamlet plast, men herudover er der arbejdet med oparbejdning af PET og sort plast, hvilket i alt svarer til ca. 95 % af den hårde plast (HDPE+PP+PET+sort plast).

For at teste robustheden af oparbejdningsteknologien er der udsorteret polymerer fra et bredt spekter af indsamlingssystemer med forskellige sorteringskriterier. Herudover er det undersøgt, hvad polymerrenheden betyder for oparbejdningen.

Kilder til den hårde plast omfatter:

- Indsamling med folie og metal (I/S Reno-Nords og Nomi4s i/s' leverandørområder)
- Indsamling med folie (Københavns Kommune)
- Indsamling med metal og glas (Dansk Affald A/S' leverandørområde).

De benyttede sorteringsanlæg til polymersortering

- I/S Reno-Nords sorteringsanlæg i Aalborg med sigtning, frasortering af folie og metal samt fire NIR-sorterere, som separerer via trykluftdrevne dyser
- Et forsøgsanlæg placeret ved I/S Amager Ressource Center med frasortering af folie og metal, samt en NIR-sorterer, som separerer via trykluftdrevne dyser
- Nomi4s i/s' anlæg i Holstebro, som frasorterer metal og separerer plast i polymerer ud fra NIR-detektion og separation med robotter.

Det er ved fremstillingen af den polymersorterede hårde plast blevet fremstillet materialer med forskellige polymerrenheder ved at lade materialerne blive udsorteret (oprenset) henholdsvis en eller to gange ved brug af I/S Reno-Nords NIR-sorterere.

Den polymersorterede plast er karakteriseret inden udviklingen af oparbejdningsteknologierne for at skaffe data til at kunne designe og udvikle en robust proces, som kan håndtere de forskellige former for materialer. Resultaterne er summeret i nedenstående tabel.

Sammenstilling af den opnåede renhed ved normal drift på sorteringsanlæg

Geografisk område	HDPE, %	PP, %	PET, %
I/S Reno-Nords leverandørområde	96	84	61 ¹
Dansk Affald A/S' leverandørområde	98	97	67 ²
Nomi4s i/s' leverandørområde	86	61 ³	93

¹ Renheden af PET er lav, da PET er udtaget som en ikke tilstrækkeligt oprenset restfraktion. Ved to gange udsortering på sorteringsanlægget udgjorde den registrerede renhed 91 %

² Renheden af PET er lav, da PET er udtaget som en ikke tilstrækkeligt oprenset restfraktion. Ved to gange udsortering forventes en renhed over 90 %

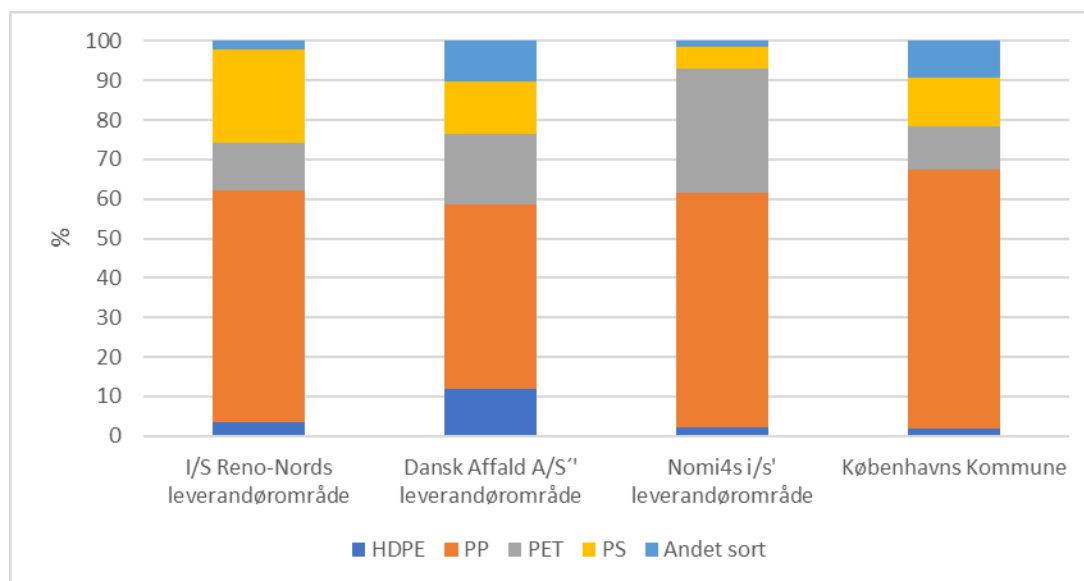
³ Urenheder omfatter 17 % folie og affald (der er efterfølgende etableret folieseparation inden fremledning til robotsorterer ved Nomi4s)

Resultaterne viser en lav polymerrenhed for en del af materialerne, som for HDPE og PP's vedkommende primært skyldes indhold af folie og affald.

Ved én gang udsortering med I/S Reno-Nords NIR-sorterer faldt renheden for PE til 85 % og renheden for PP til 66 % (Reno-Nord sorterer i daglig drift to gange).

Karakteriseringen omfatter også PVC, der blev konstateret i et indhold på op til 0,4 % i PP og op til 0,2 % i PET.

Resultaterne af karakteriseringen af sort plast, som var blevet manuelt udsorteret fra tilført materiale til sorteringsanlæggene, er vist på figuren herunder.



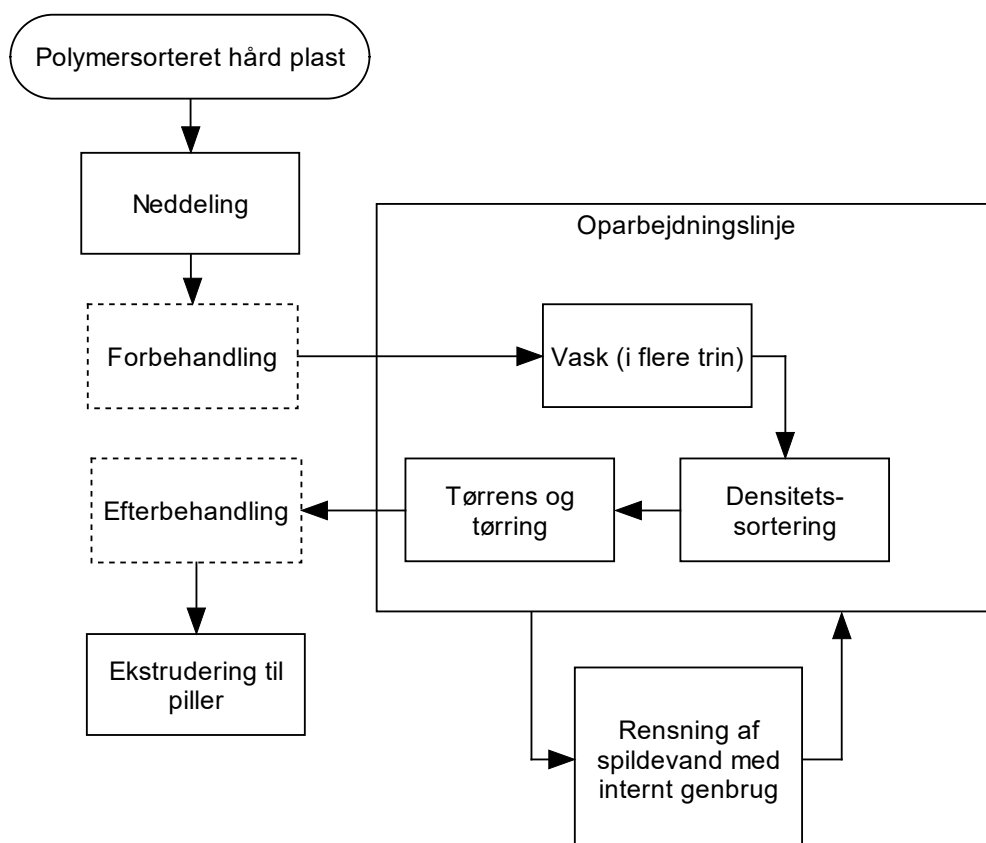
Indholdet af polyolefiner (HDPE+PP) var mellem 59 % og 68 % og domineret af PP.

Oparbejdningen af den hårde plast

Den polymersorterede hårde plast blev benyttet til udviklingen af de enheder til vask og densitetssortering, som blev benyttet i oparbejdningslinjen ved Aage Vestergaard Larsen A/S

Konceptet for oparbejdningslinjen er vist nedenstående.

⁴ Den lave renhed skyldtes, at foliesuget ikke var aktivt. Efterfølgende blev HDPE tilbageført og folierenset dog uden at genkarakterisere renheden



Ved oparbejdningen behandles de polymersorterede materialer med følgende procestrin:

- Neddeling: Plasten neddeles til flakes i en størrelse på ca. 14 mm
- Forbehandling: Flakes udsættes om nødvendigt for forbehandlingsprocesser, fx foliefjernelse
- Vask: Plastflakes vaskes i en vaskeenhed, hvor plasten kan vaskes i den samme vaskeenhed i flere trin afhængigt af tilsmudsningsgraden
- Densitetssortering: De vaskede flakes densitetssorteres
- Fjernelse af vand: Plasten slutrenses og tørres
- Efterbehandling: Plasten kan efterbehandles med fx flakeoprensning, med fraseparation af uønskede polymerer, fraseparation af uønskede farver af flakes eller med metoder til fjernelse af lugt.

Det store folieindhold i en række af de modtagne materialer betød, at det var nødvendigt at etablere en løsning til at fraseparere folieindhold ved Aage Vestergaard Larsen A/S. Løsningen fungerede tilfredsstillende, men blev ikke færdigudviklet til fuld kapacitet.

I løbet af udviklingen blev oparbejdningsteknologi og oparbejdningsslinje modificeret flere gange for at opnå så små tab som muligt med en samtidig høj kvalitet af de oparbejdede polymermaterialer.

Der blev også arbejdet med en metode til rensning for lugt, fx parfume fra vaskemidler mv. Metoden viste sig effektiv med en reduktion på 98 % i koncentrationen af limonen efter behandling af flakes.

Performance af oparbejdningsslinje

Et af målene i udviklingen af oparbejdningsslinjen var at opnå en høj kvalitet af oparbejdede materialer og samtidig fastholde et begrænset plasttab.

Plasttabet ved oparbejdningen til vaskede og tørrede flager er estimeret til.

- 5-9 % for HDPE
- 8-12 % for PP.

Oparbejdningsslinjen er ikke udviklet til behandling af PET, men der blev udviklet en metode, som indikerer, at PET kan oparbejdes med et tab på mindre end 15 %.

Et andet mål i projektet var at udvikle en oparbejdningsslinje med et lille vandforbrug. Sammenlignet med udenlandske, moderne oparbejdningsanlæg, som har et vandforbrug på 2-3 liter/kg plast, blev målet nået, da vandforbruget blev bestemt til ca. 0,8 liter/kg plast.

Kvalitet af omsmeltet HDPE og PP

De vaskede og tørrede plastflakes af HDPE og PP blev ekstruderet til piller med brug af smeltefilter. Det var ikke nødvendigt at skifte smeltefilter ved ekstruderingen i processeringen af den mængde, der blev anvendt i forsøget. Til sammenligning ville en udskiftning af smeltefilter nogle gange være nødvendigt ved ekstrudering af samme mængde ikke-vasket industriplast. Der konstateredes ingen sortsværtning af filteret, hvilket viser, at fiberrester fra emballagen var effektivt fjernet.

Resultater fra laboratorietest af HDPE og PP viste en høj polymerrenhed fra 87 % til 99 %. Urenheder bestod i PE i PP henholdsvis PP i PE.

Smelteindexet for PP varierede mellem 9 og 25 svarende til en kvalitet egnet til sprøjttestøbning, mens smelteindexet for HDPE varierede mellem 1,2 og 1,5, hvilket gør materialet egnet til blæsning af flasker og ekstrudering.

Ud fra vurdering af styrkeegenskaber og kvalitet af sprøjttestøbt streng blev alle materialer vurderet som salgbare i god kvalitet som en del af Aage Vestergaard Larsen A/S' produktprogram. Det betyder, at alle testede polymaterialer af HDPE og PP uanset indsamlingskilde eller sorteringsteknologi kan oparbejdes til høj kvalitetsmaterialer. Årsagen til, at der opnås en høj kvalitet uafhængigt af kilde, vurderes at være den udviklede, effektive oparbejdningsteknologi, som omfatter metoder til både folieseparation, effektiv vask og densitetsseparation. Teknologien sikrer effektiv fjernelse af urenheder som sand og glas samt overfladetilsmudsning, etiketter og de fleste uønskede polymerer.

Kvalitet af PET

Oparbejdningsslinjen er ikke designet til at oparbejde PET, men for at teste teknologiens renseeffektivitet og mulighederne for at begrænse tab af materiale blev der foretaget oparbejdning af PET i mindre skala ved Aage Vestergaard Larsen A/S, og forskellige kvaliteter blev omsmeltet ved SKY-LIGHT A/S, ligesom kvaliteten blev vurderet.

For en manuelt udsorteret fraktion af PET-flasker fra I/S Reno-Nord var det muligt at tilsætte 50 % af materialet og opnå brugbare folier i en testproduktion.

Der blev også testet oparbejdning af blandet PET, som vil indeholde multilagsmaterialer fra fx pålægsbakker. Her var det nødvendigt at omsmelte plasten først for at fjerne PVC-rester, som dekomponerer ved den temperatur, hvor PET smelter, idet der ikke var udstyr til rådighed i projektet til at fjerne PVC, fx ved NIR-sortering i en flakesorterer. Det lykkedes at fremstille folier med op til 20 % tilsætning. Her blev det vurderet, at brug af forbedret oprensning for PVC, metal og smeltefiltrering ville kunne have forbedret resultatet.

Kvalitet af sort plast

I projektet blev der foretaget en oparbejdning i mindre skala af den sorte plast, hvor tunge plasttyper som PET og PS blev frasorteret fra PP og PE med densitetssortering.

Kvaliteten af blandingsproduktet af PP og PE (75 % PP) var en god, salgbar kvalitet med et smelteindex på ca. 13 svarende til en sprøjttestøbekvalitet.

Det blev også forsøgt at udsortere PET med densitetsseparation i saltvand, hvilket dog ikke lykkedes, da der i den modtagne blandede, sorte plast blev konstateret gummi, som havde en densitet, der overlappede densiteten af den sorte PET.

Udviklingsaktiviteter ved sorteringsanlæg

Der er foretaget supplerende aktiviteter sammen med sorteringsanlæggene.

I/S Reno-Nord

I/S Reno-Nord foretog i løbet af projektet en ombygning af sorteringsanlægget. For at undersøge effekten af dette er der foretaget et sorteringsforsøg på sorteringsanlægget med 1.000 kg tilført materiale fra enfamilieboliger og rækkehuse, hvor alle outputs fra anlægget er vejjet og karakteriseret.

Resultatet viser et lidt højere samlet plastindhold i tilførte materialer på 61,9 % end et sorteringsforsøg i 2017⁵, hvor plastindholdet var 57,8 %, mens folieindholdet er nogenlunde det samme med ca. 22 % ud af den samlede tilførte mængde.

Sammensætningen af udsorteret HDPE, PP og PET er vist nedenfor.

Indhold	HDPE 2X ⁶	PP 2X ⁶	PET 1X ⁷
HDPE	90,4	2,2	1,0
PET	0,5	3,7	82,6
PP	1,6	79,5	4,2
PS	0,1	0,0	0,5
Andet	7,4	14,6	11,7

Renhederne af udsorteret hård plast af HDPE (90,4 %) og PP (79,5 %) er lidt lavere end i 2017 ikke mindst på grund af et 4-5 % højere folieindhold i den udsorterede plast, mens renheden af PET (82,6 %) er forbedret efter ombygningen af sorteringsanlægget. Det er estimeret, at polymerrenheden af HDPE og PP efter oparbejdning ved Aage Vestergaard Larsen A/S vil være over 96 %.

Nomi4s i/s

Ved Nomi4s i/s er udført et sorteringsforsøg på restfraktionen fra sorteringsanlægget for at undersøge, hvad der findes af genanvendelige materialer, som evt. vil kunne udnyttes.

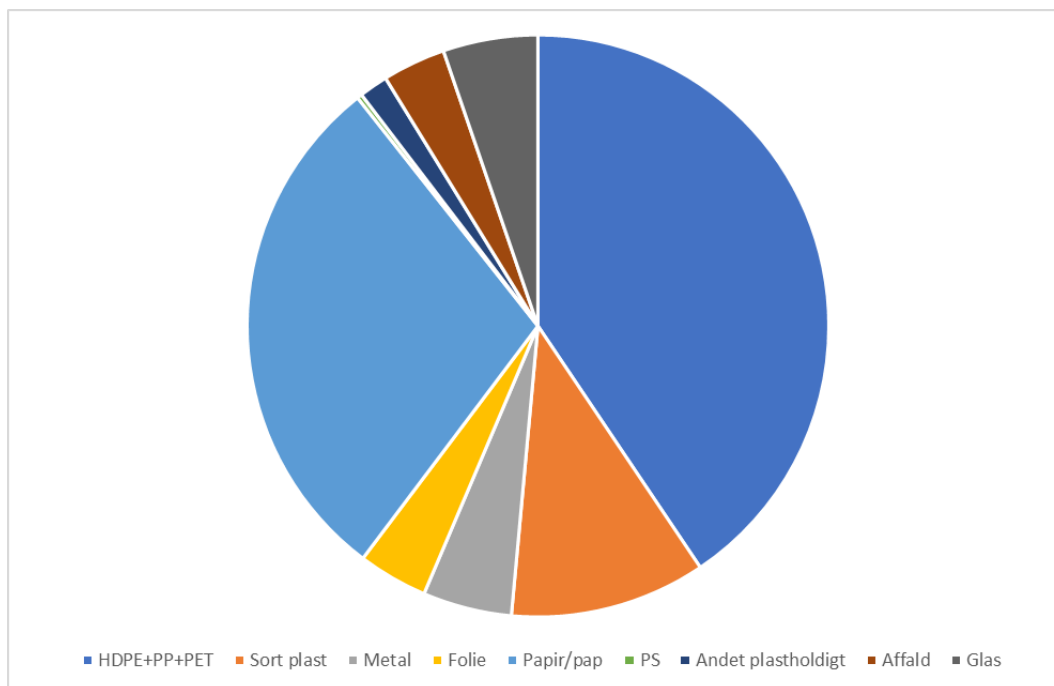
Resultatet viste, at restfraktionen indeholdt 40,6 % HDPE+PP+PET, 10,9 % sort plast, 5 % metal og 43,6 % andet, som omfatter affald, folie, papir/pap, PS og anden plast samt glas.

Figuren nedenfor viser vægtfordelingen af materialer i restfraktionen. Det skal bemærkes, at aviserne var meget våde og derfor udgør en høj vægtandel.

⁵ Flexisort: Udvikling af regionalt cirkulært genanvendelseskoncept til indsamlet hård plast, plastfolie og metal i Nordjylland, MUDP-rapport, april 2019

⁶ Dobbelttoprenset

⁷ Enkelttoprenset



I/S Amager Ressource Center

Der er i projektet arbejdet med udnyttelse af de vaskede HDPE-flakes fra husstandsindsamlet plast til nye typer produkter. Aage Vestergaard Larsen A/S har oparbejdet den husstandsindsamlende HDPE og efterfølgende udført en efterbehandling af de vaskede flakes.

I/S Amager Ressource Center har i den forbindelse betalt for fremstillingen af to forskellige siddemøbler/legemøbler - typerne Mabel og Annie - designet af firmaet Small Revolution. Stolene er egnede til udendørs brug.

Fremstillingsprocessen er baseret på rotationsstøbning, som er udført af Dansk Rotationsplastic ApS. Rotationsstøbning er normalt baseret på plastpulver, men i nærværende design indgår også plastflager.

Et af siddemøblerne fremstillet med HDPE fra projektet er vist nedenfor.



Fremstilling af testemne af HDPE

Kvaliteten af HDPE er også demonstreret i slutningen af projektet ved fremstilling af et flaskeblæst testemne i form af en dunk. Resultatet af demonstrationen viste, at materialets mekaniske egenskaber var tilfredsstillende.

En dunk som den fremstillede vil dog kun have en begrænset anvendelse til enkelte kemiske produkter som motorolie og væsker til teknisk anvendelse. For at anvende materialet til bredere formål som fx til emballage til rengøringsmidler og evt. kosmetik skal der udvikles teknologi til yderligere rensning af materialet, og fremstillede emballager skal gennemgå forskellige migrationstests, hvilket ikke var muligt i nærværende projekt

Eksempel på den fremstillede dunk.



Konklusion

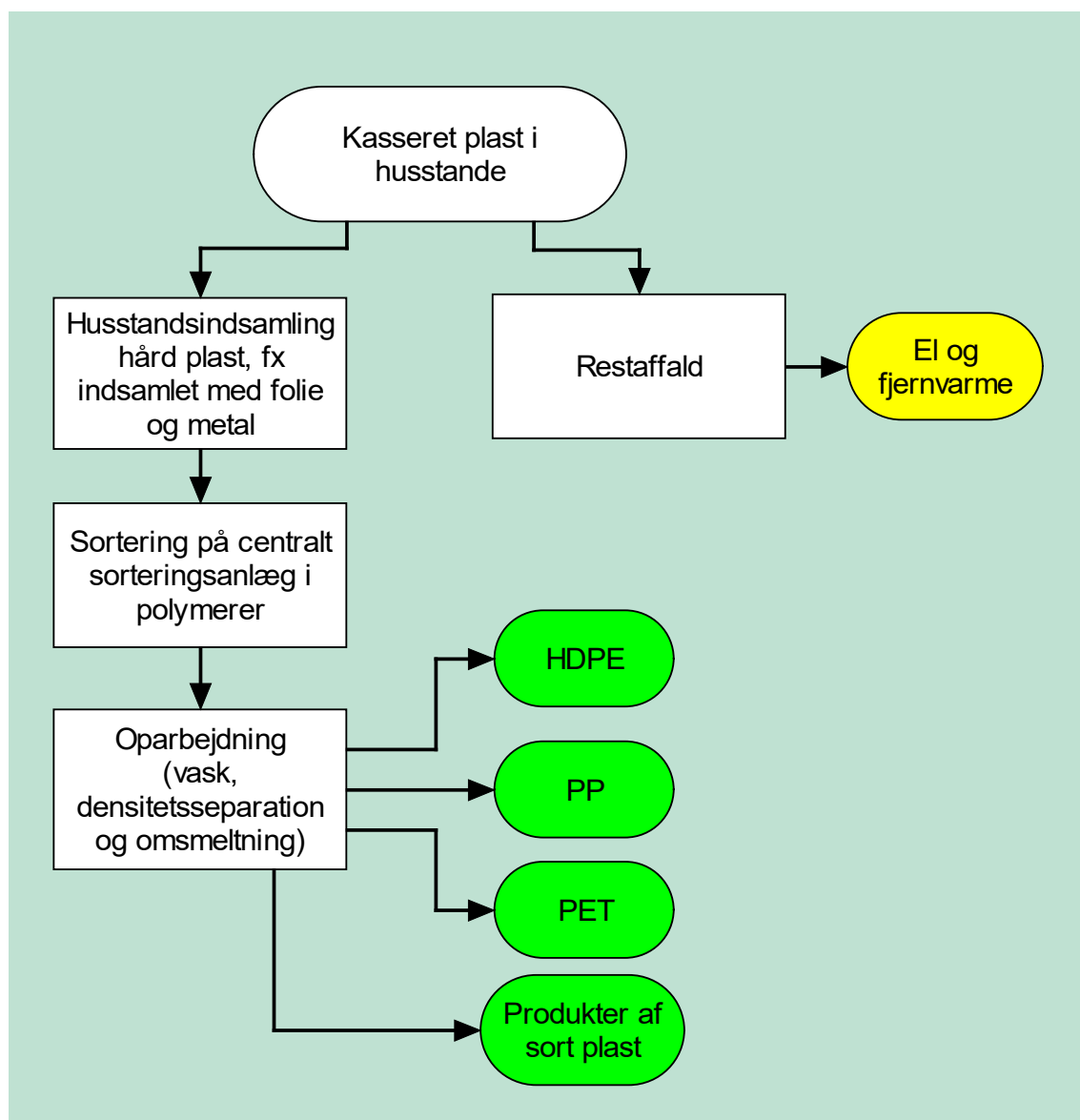
Der er i projektet udviklet en prototype af en oparbejdningslinje ved Aage Vestergaard Larsen A/S, som:

- Er fleksibel og robust over for forskelle i tilført materialesammensætning
- Har et lille tab af plast ved oparbejdning
- Har et lille vandforbrug
- Oprenses materialer af HDPE og PP til høj kvalitetsmaterialer
- Kan rense PET for urenheder, men ikke er designet med alle trin til fuldstændig oparbejdning af PET
- Kan oprense blandet sort plast og udvinde PE- og PP-andelen til genanvendelse, mens udvinding af PET er vanskelig.

Der har vist sig muligheder for synergi mellem oparbejdningsanlæg og sorteringsanlæg i forbindelse med fraseparering af folie. Når der på sorteringsanlæggene ikke suges så kraftigt i folieseparatoren, følger der mere folie med den polymersorterede, hårde plastfraktion. Til gengæld er materialetabet lavere end ved et kraftigere sug fra folieseparatoren. Når den polymersorterede plastfraktion, der indeholder op til 5-10 % restfolie, er neddelt til flakes hos Aage Vestergaard Larsen A/S, har det vist sig nemmere at separere folie fra hård plast, end hvis folieseparationen udføres ved sorteringsanlægget. Et højt indhold af affald og folie medfører forhøjede behandlingsomkostninger, da et højt indhold af affald og folierester sænker kapaciteten på anlægget og medfører udgifter til bortskaffelse ved forbrænding.

3. Introduktion

I projektet er der ved Aage Vestergaard Larsen A/S (herefter AVL) udviklet en oparbejdningsproces, som oprenser polymersorteret, husstandsindsamlet hård plast til højkvalitetsmaterialer. FIGUR 1 viser de trin, som den hårde plast skal igennem, før den kan genanvendes til nye produkter. Først skal plasten indsamles i den rigtige beholder i husstanden (dvs. beholderen til emballage og ikke beholderen til restaffald). Dernæst skal plasten udsorteres i polymerer på sorteringsanlæg, og til sidst skal plasten oparbejdes ved vask, densitetssortering og omsmeltnings (ekstrudering) enten til piller eller direkte til nye produkter.



FIGUR 1. Genanvendelsestrin for husstandsindsamlet hård plast.

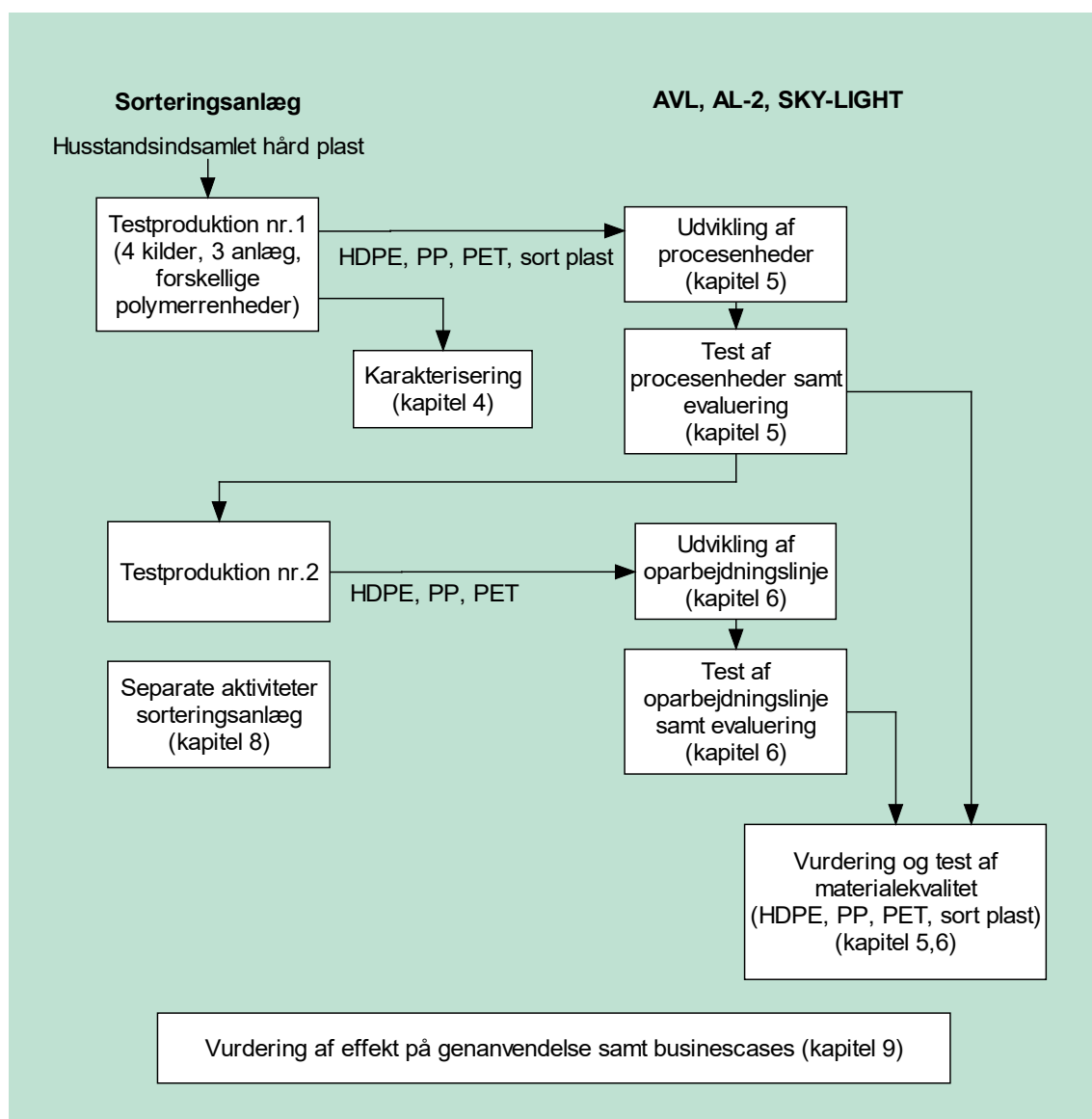
I projektet deltog sorteringsanlæggene I/S Reno-Nord (herefter Reno-Nord) og Nomi4s i/s (herefter Nomi4s) samt et forsøgsanlæg ved I/S Amager Ressource Center (herefter ARC). På anlæggene blev plasten udsortet i polymererne HDPE, PP og PET i forskellige renhedsgrader. Endvidere blev sort plast udsortet manuelt til brug for oparbejdningsfor- søg.

Ved AVL blev der udviklet ny oparbejdningsteknologi til vask og densitetsseparation, som indbygges i en oparbejdnings- linje. I linjen indgår spildevandsrensningsteknologi udviklet af AL-2 Teknik A/S (herefter AL-2).

HDPE, PP, PET og sort plast blev vasket og oprenset ved AVL.

Plast af HDPE og PP blev omsmeltet og testet for kvalitet ved AVL, mens PET blev omsmeltet og testet ved SKY-LIGHT A/S (herefter SKY-LIGHT).

Projektets aktiviteter og udviklingsforløb er illustreret på FIGUR 2.



FIGUR 2. Aktiviteter i projektet.

Projektet blev indledt med testproduktion nr. 1. Denne omfattede produktion og karakterisering af polymersorteret materiale fra forskellige kilder med forskellige teknologier og med forskellige renhedsgrader. Plasterne herfra blev benyttet til udvikling og test af procesenheder til oparbejdningslinjen.

Baseret på resultater af udviklingstesten blev der planlagt en testproduktion nr. 2. Denne omfattede produktion af materialer ved sorteringsanlæggene. Materialerne blev benyttet til udvikling og test af oparbejdningslinjen.

Efterfølgende blev der foretaget vurdering og test af materialekvalitet og vurdering af effekt på genanvendelse samt opstilling af businesscases.

Sideløbende blev der udført separate aktiviteter for sorteringsanlæggene. Aktiviteterne bidrager til øget genanvendelse og udnyttelse af polymermaterialerne på anlæggene.

4. Sortering af husstandsindsamlet plast på sorteringsanlæg

Målet med aktiviteten var at producere materialer i en tilstrækkelig god kvalitet til fremstilling af høj kvalitetsmaterialer ved AVL.

For at teste robustheden af oparbejdningsteknologien var det nødvendigt at udsortere polymerer fra et bredt spekter af indsamlingssystemer med forskellige sorteringskriterier. Herudover er det undersøgt, hvilken betydning polymerrenheden har for oparbejdningen.

Plasten er produceret i 2 testproduktioner:

Testproduktion nr. 1

Ved planlægning af testproduktionen blev der fokuseret på at oparbejde polymersorteret plast med:

- Forskellige tilsmudsningsgrader
- Forskellige indsamlingssystemer (fx med/uden folie, med/uden glas)
- Forskellige typer sorteringsteknologi
- Forskellige grader af polymerrenhed.

Herudover blev der produceret manuelt frasorterede fraktioner af den sorte plast, som ender i restfraktionerne fra anlæggene.

De udsorterede plastfraktioner blev karakteriseret for at bestemme sammensætningen af plasten. Resultatet af karakteriseringen blev efterfølgende benyttet ved udvikling af en oparbejdningsteknologi til at bedømme, om der krævedes ekstra oprensning, fx til at fraseparere folie, og til at bedømme den forventede forekomst af restfraktioner (tab).

Plastfraktionerne blev anvendt i test af de udviklede procesenheder ved AVL.

Testproduktion nr. 2

Baseret på resultaterne af 18 gennemførte udviklingstests (afsnit 5.3) blev valgt de sorteringsmetoder, som skulle anvendes ved sorteringsanlæggene til produktion af materialer til testproduktion nr. 2. I testproduktion nr. 2 blev der produceret HDPE, PP og PET til test af den udviklede oparbejdningsslinje (Kapitel 6).

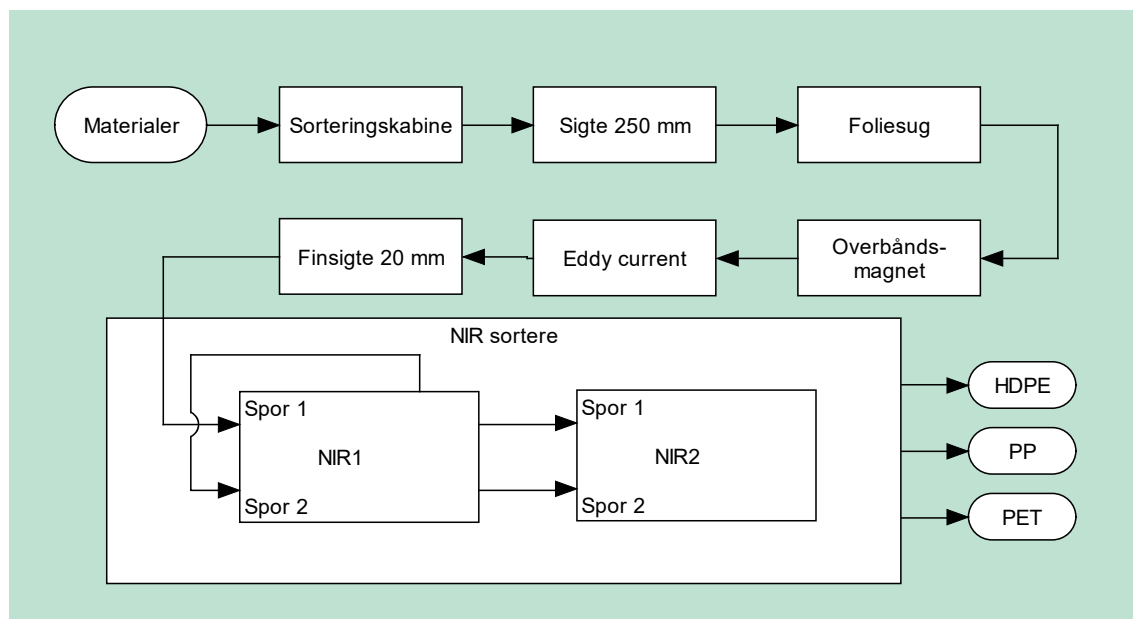
4.1 Deltagende sorteringsanlæg

4.1.1 I/S Reno-Nord

Opbygningen af anlægget ved Reno-Nord er vist på FIGUR 3. Anlægget er opbygget med følgende sorteringsenheder, som de modtagne materialer passerer:

- Indfødningsgrav, hvorfra materialerne føres til en poseåbner/fordeler (ikke vist).
- Sorteringskabine, hvor materialer, der ikke ønskes tilført anlægget, fjernes manuelt. Det drejer sig fx om store folier, materialer emballeret i poser, dagrenovation, papir, elektronik, spraydåser og andet problemaffald samt stort metal og materialer generelt, der kan blokere anlægget, fx store tæpper/presenninger.
- En sigte fraseparerer emner >250 mm, som fx papstykker og større plastemner. Dette er nødvendigt for funktionen af de efterfølgende sorteringsenheder. Store emner af fx plast kan efterfølgende ledes til en neddelers og tilføres anlægget igen.

- Et foliesug, som fjerner de mindre folier, der ikke er frasorteret i sorteringskabinen. Foliesuget er en vindsigte, som suger lette materialer op (materialer med stor overflade som papir og plastfolier) og fraseparerer tungere materialer (mere tredimensionelle materialer som metaldåser, plastflasker og plastbeholdere).
- En overbåndsmagnet fraseparerer jern, mens en eddy current-separator fraseparerer aluminium og andre ikke-magnetiske metaller som kobber og messing.
- En finsigte med 20 mm hulstørrelse, som fraseparerer mindre emner og småaffald.
- To NIR-sortere med splittere. Ved brug af splittere opnås fire enkelte NIR-sortere ved brug af to sorteringsmaskiner. Ved normal drift er sortererne koblet, så der foretages en dobbelt udsortering af PE og PP. Herved opnås der høje renheder af de to polymerer. For PET-fraktionen sorteres der kun en gang, hvilket resulterer i en lavere polymerrenhed.



FIGUR 3. Opbygning af sorteringsanlæg ved Reno-Nord.

4.1.1.1 Indsamlingsområde for materialer fra Reno-Nords leverandørområde

I forsøgene er der benyttet materialer, som løbende tilføres anlægget fra Reno-Nords leverandørområde, der omfatter kommunerne Aalborg, Mariagerfjord, Jammerbugt, Hjørring og Rebild.

4.1.1.2 Indsamlingsområde for materialer fra Dansk Affald A/S' leverandørområde

I forsøgene er der benyttet materialer, som løbende tilføres sorteringsanlægget ved Dansk Affald A/S (herefter Dansk Affald) i Vojens.

Materialerne er kørt igennem Dansk Affalds sorteringsanlæg i Vojens. Ved Dansk Affald blev affald, jern, aluminium og glas udsortet fra de indsamlede materialer på Dansk Affalds sorteringsanlæg. Herefter blev den resterende plastfraktion udsortet i polymerer ved Reno-Nord.

4.1.2 Nomi4s

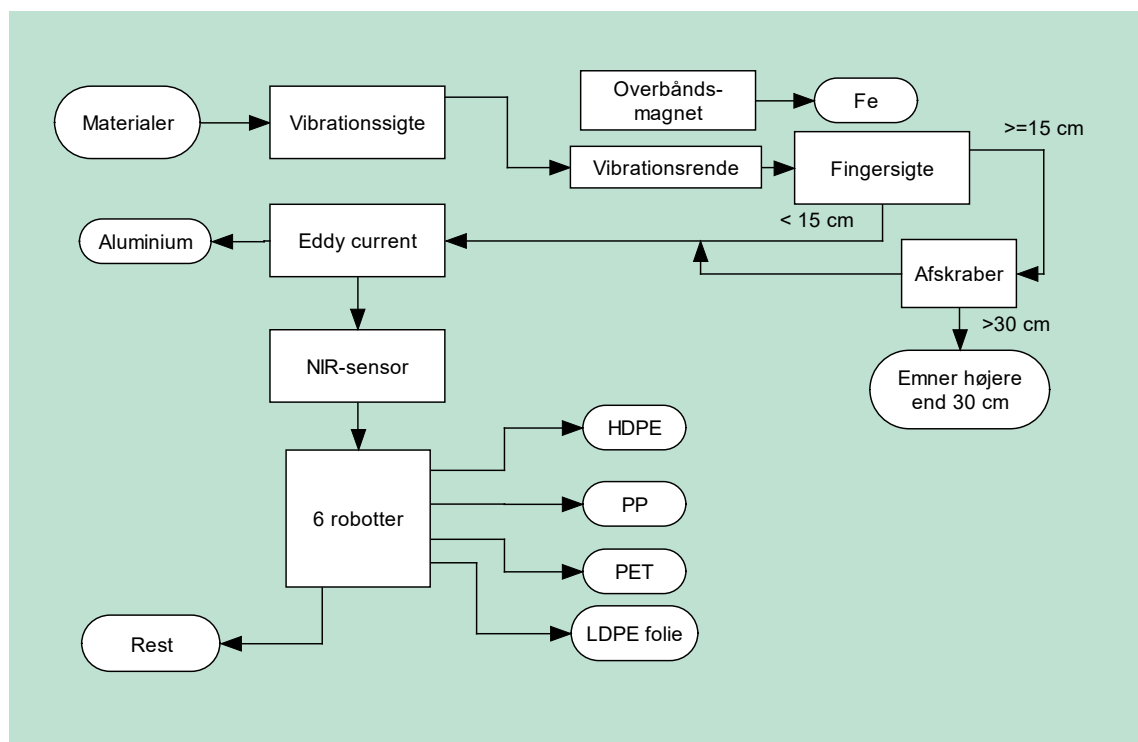
Opbygningen af anlægget ved Nomi4s er vist på FIGUR 4.

Anlægget er opbygget med følgende sorteringsenheder, som de modtagne materialer passerer:

- Vibrationssigte til fordeling af materialer.
- Vibrationsrende med overbåndsmagnet til fraseparering af jern. I enden af vibrationsrenden er monteret en fingersigte, som fraseparerer emner >15 cm.

- Emner med en højde på over 30 cm detekteres af en lysbro og frasepareres fra fraktionen >15 cm med en afskraber. Herefter ledes fraktionen >15 cm sammen med fraktionen <15 cm.
- Aluminium frasepareres med eddy current-separation.
- Materialerne ledes til et hyperspektralt NIR-detektionssystem, der registrerer polymertype og position for alle emner. Efterfølgende sorterer seks robotter i HDPE, LDPE-folie, PP og PET.

Produktfraktionerne eller restfraktionen fra robotsorteringen kan om nødvendigt tilbageføres til indgangen af anlægget, hvorefter produktfraktioner kan oprenses yderligere, eller der kan udsorteres efter andre polymerer fra restfraktionen.



FIGUR 4. Opbygning af sorteringsanlæg ved Nomi4s.

4.1.2.1 Indsamlingsområde

I forsøgene er benyttet materialer, som løbende tilføres anlægget fra Nomi4s' leverandørområde (kommunerne Holstebro, Lemvig, Skive og Struer).

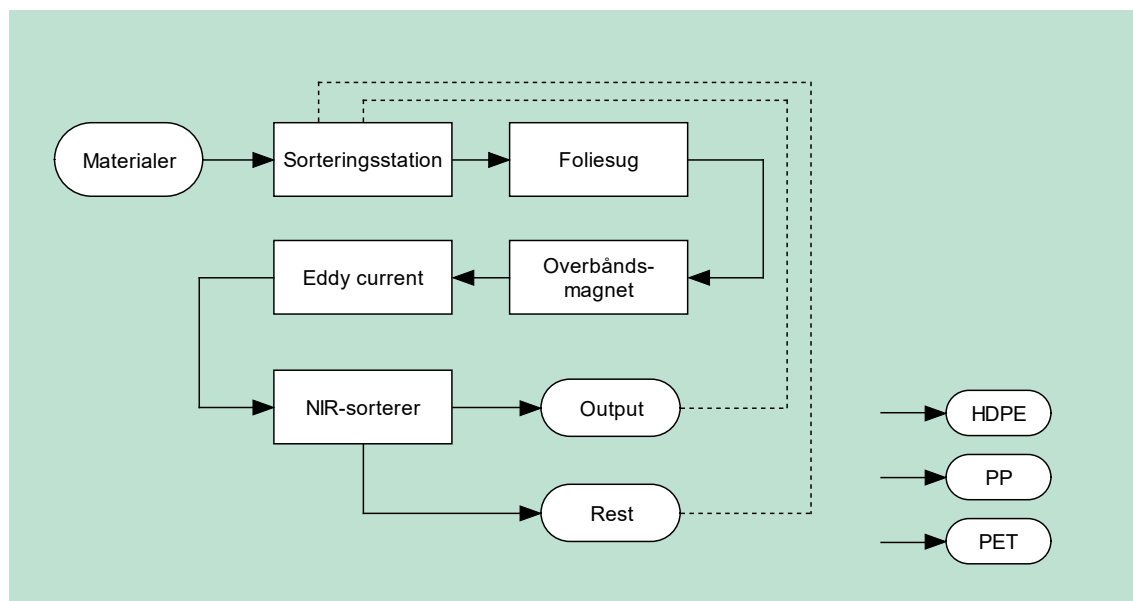
4.1.3 ARC

Opbygningen af anlægget ved ARC er vist på **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** Anlægget er opbygget med følgende sorteringsenheder, som de modtagne materialer passerer:

- Indfødningsbeholder (ikke vist).
- Sorteringsstation, hvor materialer, der ikke ønskes tilført anlægget, fjernes manuelt.
- Et foliesug som fjerner de mindre folier, der ikke er frasorteret i sorteringsstationen. Foliesuget er en vindsigte, hvor lette materialer (materialer med stor overflade som papir og plastfolier) suges op og frasepareres tungere (mere tredimensionelle) materialer som metaldåser, plastflasker og plastbeholdere.
- En overbåndsmagnet fraseparerer jern, mens en eddy current-separator fraseparerer aluminium og andre ikke-magnetiske metaller som kobber og messing.
- En sorteringsenhed med NIR-kamera og farvekamera, som kan sortere tilført plast efter polymertype og/eller farve.

Produktfraktionerne eller restfraktionen fra NIR-sorterereren kan tilbageføres til indgangen af anlægget, hvorefter produktfraktioner kan oprenses yderligere, eller der kan udsorteres efter andre polymerer fra restfraktionen.

ARC's sorteringsanlæg er beliggende ved omlastestationen for al indsamlet plast fra husholdninger i Københavns Kommune. Anlægget er et forsøgsanlæg, som er godkendt til at udtage og behandle 1.000 tons blandet plast pr. år.



FIGUR 5. Sorteringsanlæg ved ARC. Stiplede linjer viser muligheden for at tilbageføre enten output (den polymer, der sorteres efter) eller rest.

Indsamlingsområde

I forsøgene er benyttet materialer, som er indsamlet i Københavns Kommune.

4.2 Testproduktion nr. 1

I TABEL 1 er vist de testproduktioner, som blev udført ved de respektive anlæg.

TABEL 1. Oversigt over testproduktioner.

Sorterings-anlæg	Kilde	Sortering PE	Sortering PP	Sortering PET	Sortering Sort plast
Reno-Nord	Blandet plast Reno-Nords leverandørområde ⁸	Én gang oprenset og to gange oprenset	Én gang oprenset og to gange oprenset	Én gang oprenset og to gange oprenset	Manuelt frasorteret blandet sort plast
Reno-Nord	Blandet plast fra Dansk Affalds leverandørområde ⁹	To gange oprenset	To gange oprenset	Én gang oprenset	Manuelt frasorteret blandet sort plast
Nomi4s	Blandet plast fra Nomi4s' leverandørområde ¹⁰	En gang (robot)	En gang (robot)	En gang (robot)	Manuelt frasorteret blandet sort plast

⁸ Tilførte materialer til sorteringsanlæg er kildeopdelt hård og blød plast samt metal

⁹ Tilførte materialer til sorteringsanlæg er kildeopdelt hård plast, metal og glas

¹⁰ Tilførte materialer til sorteringsanlæg er kildeopdelt hård plast og metal

Sorterings-anlæg	Kilde	Sortering PE	Sortering PP	Sortering PET	Sortering Sort plast
ARC	Blandet plast fra Københavns Kommune ¹¹	To gange oprenset	To gange oprenset	To gange oprenset	Manuelt frasorteret blandet sort plast

Som tidligere nævnt var der ved planlægning af forsøgene fokus på at oparbejde sorteret plast med forskellige tilsmudsningsgrader fra forskellige typer af indsamlingssystemer og med anvendelse af forskellige typer af sorteringsteknologi og forskellige grader af polymerrenhed.

Forskellige tilsmudsningsgrader

I forbindelse med planlægning af sorteringsforsøgene var det ikke umiddelbart muligt at få planlagt indsamling fra områder med et spænd i forventet tilsmudsningsgrad. Imidlertid viste det sig ved sorteringerne, at der var en udtalt forskel i tilsmudsningsgraden af materialerne. Tilsmudsningsgraden er nedenstående beskrevet i forbindelse med gennemgangen af de enkelte forsøg.

Forskellige indsamlingssystemer

I TABEL 1 er beskrevet, hvilke materialer der indsamles fra de 4 kilder. Der er tale om kildesorteret plast, kildeopdelt plast og metal samt kildeopdelt plast, metal og glas.

Forskellige sorteringsteknologier

Der er tale om henholdsvis et forsøgsanlæg med én NIR-sorterer, et fuldskaalanlæg med flere NIR-sorterere og et fuldskaalanlæg baseret på robotteknologi.

Forskellig polymerrenhed

Som det fremgår af TABEL 1, er der foretaget sorteringsforsøg med henholdsvis enkeltoprensede og dobbeltoprensede materialer.

4.3 Metode til karakterisering af sammensætning

Ved gennemførelsen af testproduktion nr. 1 blev alle udtagne fraktioner ved de enkelte anlæg vejede, hvorefter fraktionerne eller delprøver heraf blev analyseret for sammensætningen af materialerne og for plastics vedkommende opdelt i polymer typer. Fraktionerne fra anlægget blev opsamlet fra samtlige sorteringstrin på anlæggene.

Materialerne/læssene blev indført i de enkelte sorteringsanlæg. Output blev efterfølgende manuelt sorteret med henblik på at bestemme renheden af de forskellige produktfraktioner og for at bestemme tab i anlægget.

Materialer fra hvert sorteringstrin/hver fraktion blev efterfølgende manuelt sorteret i følgende fraktioner:

- HDPE
- PET
- PP
- PS
- PVC
- Sort plast
- Uidentificeret plast, sammensatte materialer, teknisk plast og andet ikke-sort plast
- Plastfolie
- Metal
- Affald (fx organisk affald, papir, tekstiler).

¹¹ Tilførte materialer til sorteringsanlæg er kildesorteret hård og blød plast

4.4 Resultater af karakteriseringer

Resultaterne af karakteriseringerne er vist i TABEL 2 til TABEL 5.

Resultaterne af karakteriseringerne er gennemgået detaljeret i Bilag 1.

TABEL 2. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner ved Reno-Nord fra materialer indsamlet i Reno-Nords leverandørområde.

Indhold	HDPE 1X ¹²	HDPE 2X ¹³	PP 1X ¹²	PP 2 2X ¹³	PET 1X ¹⁴	PET 2X ¹³
HDPE	85,1	96,1	0,5	0,6	20,5	0,3
PET	1,4	1,3	4,0	2,0	60,9	91,3
PP	2,4	0,9	66,2	83,5	3,6	0,3
PS	0,2	0,0	0,0	0,1	0,6	0,4
PVC ¹⁵			0,9	0,4	1,2	0,1
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	1,6	0,6	4,0	3,2	2,1	1,7
Sort plast	0,9	0,2	2,8	2,3	3,0	2,2
Plastfolie	7,2	0,4	11,5	5,5	3,1	2,1
Metal	0,2	0,5	0,6	0,4	0,6	0,2
Affald	1,0	0,0	9,6	2,1	4,4	1,5
Sum	100	100	100	100	100	100
Renhed	85,1	96,1	66,2	83,5	60,9	91,3

¹² Én gang udsortering på sorteringsanlæg

¹³ To gange udsortering på sorteringsanlæg. Normal procedure for sortering på sorteringsanlægget er to gange udsortering for PP og HDPE og én gang udsortering for PET. For at sortere PET 2 gange er PE erstattet af PET i sorteringsprogrammeringen

¹⁴ Én gang udsortering på sorteringsanlæg efter særlig sorteringsmetode se Bilag 1.1

¹⁵ Inkl. blød PVC

TABEL 3. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner ved Reno-Nord fra materialer indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde.

Indhold	HDPE 2X ¹³	PP 2X ¹³	PET 1X ¹⁴
HDPE	98,1	0,8	29,2
PET	1,5	0,6	66,5
PP	0,1	96,7	3,0
PS			0,0
PVC ¹⁵			0,1
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	0,2	1,6	0,7
Affald og plastfolie ¹⁶	0,1	0,3	0,5
Sum	100	100	100
Renhed	98,1	96,7	66,5

TABEL 4. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner fra materialer indsamlet i Nomi4s' leverandørområde.

Indhold	HDPE	PP	PET
HDPE	86,3	6,0	0,7
PET	1,0	7,7	92,7
PP	1,2	60,8	1,2
PS	0,0	0,4	0,1
PVC ¹⁵		0,1	
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	0,2	1,1	1,1
Sort plast	1,0	5,0	0,4
Plastfolie	7,8	10,1	1,5
Metal	0,4	1,6	0,4
Affald	2,2	7,2	2,0
Sum	100	100	100
Renhed	86,3	60,8	92,7

¹⁶ Plastfolie indgår ikke i sorteringskriterierne for fraktionen, der består af hård plast, metal og glas. I dette indsamlingssystem indgår plastfolien i en fraktion bestående af papir, pap og plastfolie.

TABEL 5. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner ved ARC fra materialer indsamlet i Københavns Kommune.

Indhold	HDPE ¹⁷	HDPE ekskl. plastfolie ¹⁸	PP	PET
HDPE	66,4	92,0	1,2	0,1
PET	1,4	1,9	1,1	94,6
PP	0,9	1,3	81,7	0,4
PS	0,1	0,2	0,0	0,1
PVC	0,1	0,1	0,1	0,2
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	0,7	1,0	0,9	0,1
Sort plast	0,8	1,1	1,0	0,8
Affald	1,8	2,5	2,1	0,7
Plastfolie	27,8		11,8	2,9
Sum	100	100	100	100
Renhed	66,4	92,0	81,7	94,6

4.5 Sammenstilling af karakteriseringsresultater fra de fire sorteringer

4.5.1 Sammenstilling af polymerrenhed opnået ved de fire sorteringer

Af TABEL 6 fremgår den opnåede renhed ved sortering af de indsamlede materialer fra henholdsvis Reno-Nords leverandørområde, Dansk Affalds leverandørområde, Nomi4s' leverandørområde og Københavns Kommune.

Materialerne indsamlet i Reno-Nords leverandørområde og Dansk Affalds leverandørområde er sorteret på det samme sorteringsanlæg – Reno-Nord i Aalborg. Materialerne indsamlet i Nomi4s' leverandørområde er sorteret på Nomi4s' robot-sorteringsanlæg i Holstebro, mens materialerne indsamlet i Københavns Kommune er sorteret på ARC's forsøgsanlæg i København.

De opnåede renheder ved kørsel på Reno-Nords anlæg (Nordjylland og Dansk Affalds leverandørområde) er fremkommet ved kørsel, der svarer til normal drift for anlægget, dvs. to gange udsortering på sorteringsanlægget for HDPE og PP og én gang udsortering for PET. Også renhederne registreret for Nomi4s' leverandørområde er fremkommet ved normal drift på robotsorteringsanlægget. Renhederne registreret på ARC's forsøgsanlæg er fremkommet ved to gange udsortering for alle tre polymerfraktioner.

Sorteringskriterierne for plast indsamlet i Reno-Nords leverandørområde og Københavns Kommune indeholder alt plast, mens fraktionen fra Nomi4s' leverandørområde og Dansk Affalds leverandørområde ikke indeholder plastfolie, men alene hård plast.

¹⁷ Registreret ved karakteriseringen

¹⁸ Teoretisk beregning ekskl. plastfolie

TABEL 6. Sammenstilling af den opnåede renhed (opgjort i procent) ved normal drift på sorteringsanlæg.

Geografisk område	HDPE	PP	PET
Reno-Nords leverandørområde	96	84	61 ¹⁹
Dansk Affalds leverandørområde	98	97	67 ²⁰
Nomi4s' leverandørområde	86	61	93
Københavns Kommune	66 ²¹	82	95

Der blev foretaget en sortering af mængder indsamlet i Reno-Nords leverandørområde og sorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg i Aalborg. Ved sorteringen gennemgik alle materialerne kun én gang udsortering på anlægget. Resultaterne af dette fremgår af TABEL 7.

Vedrørende PET blev det observeret, at fx æggebakker og vindruebakker er forholdsvis sprøde, hvilket kan have betydning for eventuelle tab, som måtte opstå ved efterfølgende oparbejdning, idet sprøde materialer nemmere ender som finpartikulært materiale ved neddeling.

TABEL 7. Renheder opnået ved én gang udsortering (opgjort i procent) på sorteringsanlæg.

Geografisk område	HDPE	PP	PET
Reno-Nords leverandørområde	85	66	61

Resultaterne viser en lav polymerrenhed for en del af materialerne, som primært skyldes indhold af folie og affald, hvilket gennemgås nærmere i afsnit 4.5.4.

4.5.2 Sammenstilling af resultater for sort plast

I TABEL 8 er resultaterne af de karakteriseringer, der er gennemført på de tre sorteringsanlæg, sammenstillet. Materialerne indsamlet i Reno-Nords leverandørområde og Dansk Affalds leverandørområde er sorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg i Aalborg. Materialerne indsamlet i Nomi4s' leverandørområde er sorteret på Nomi4s' robotsorteringsanlæg i Holstebro, mens materialerne indsamlet i Københavns Kommune er sorteret på ARC's forsøgsanlæg i København.

TABEL 8. Sammenstilling af fordeling (opgjort i procent) i sort plast fra de fire indsamlingsområder (tre sorteringsanlæg).

Indhold	Reno-Nords leverandørområde	Dansk Affalds leverandørområde	Nomi4s' leverandørområde	Københavns Kommune
HDPE	3,6	11,8	2,2	1,9
PET	11,9	17,9	31,4	11,0
PP	58,7	46,9	59,4	65,6
PS	23,8	13,2	5,5	12,1
Uidentificeret teknisk plast	0,1	9,0	0,0	4,5
Andet	1,9	1,2	1,5	4,9
Sum	100	100	100	100

¹⁹ Ved to gange udsortering på sorteringsanlægget udgjorde den registrerede renhed 91 %

²⁰ Ved to gange udsortering forventes en renhed over 90 %

²¹ Den lave renhed skyldtes, at foliesuget ikke var aktivt. Efterfølgende blev HDPE tilbageført og folierenset dog uden at genkarakterisere renheden

Som det fremgår af TABEL 8, er der i de sorterede fraktioner betragtelige forskelle på fordelingen af de fire største plasttyper (HDPE, PET, PP og PS) i den sorte plastfraktion. Dog er det entydigt PP, der udgør den største andel af den sorte plast. Andelen af PP varierer fra 47 % til 66 %. Det ses endvidere af tabellen, at PE udgør mellem 2 % og 12 % af den sorte plastfraktion. Da densitetsseparation ikke umiddelbart kan adskille PP og HDPE, medfører dette, at en udvundet PP-fraktion via densitetsseparation vil blive et blandingsprodukt af PP med et indhold på mellem ca. 3 % og 25 % HDPE.

Herudover ses et meget varierende indhold af PS på mellem 5,5 % og 24 % og af PET på mellem 11 % og 31 %. Indhold af PS kan være sæsonafhængigt, idet blomsterbakker fremstilles i PS.

4.5.3 Indhold af glas

Da der var forventninger om, at indholdet af glasskår kunne være større i polymerfraktionerne fra Dansk Affalds leverandørområde (hvor glas indsamles sammen med metal og plast), blev andelen af skår bestemt ved karakteriseringen af polymersorteret plast²². Indholdet af glasskår var meget lavt (fra 0,001 % til 0,006 %), hvilket delvis kan skyldes passage af en ekstra sigte. Ved karakteriseringen af PP-fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde (hvor glas ikke indgår i sorteringskriterierne) blev andelen af skår ligeledes bestemt. Her kunne registreres en andel af glasskår på 0,014 %, hvilket er væsentligt højere end den andel af skår, der blev registreret i de polymersorterede fraktioner indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde. Der blev i den polymersorterede plast fra Dansk Affald konstateret lidt glasstøv på fedtede overflader af glas. Glasstøvet var dog ikke trængt ind i overfladen og vil ligesom sand blive fjernet i vaskeprocessen. Der blev således konstateret et meget lille indhold af uorganisk materiale (glas, sand) på smeltefiltre ved omsmelting af alle oparbejdede fraktioner af polymersorteret HDPE og PP ved AVL. Det skal bemærkes, at et forhøjet indhold af slidende materialer som sand, jord og glas i den polymersorterede plast vil afkorte driftstiden for neddelingsudstyr, før knive skal skiftes/slibes. Indsamling af plast sammen med glas med de metoder, Dansk Affalds sorteringsanlæg anvender, vurderes ud fra resultaterne ikke at have betydning for indholdet af glasskår i plastfraktionen.

4.5.4 Indhold af plastfolie og affald

I TABEL 9 er vist indhold af plastfolie og affald i samtlige udsorterede polymerfraktioner.

TABEL 9. Opgørelse af andelen af plastfolie og affald i udsorterede polymerer (opgjort i procent).

Fraktion	Plastfolie	Affald	Sum af plastfolie og affald
Reno-Nords leverandørområde HDPE 1X	7,2	1,0	8,2
Reno-Nords leverandørområde HDPE 2X	0,4	0	0,4
Dansk Affalds leverandørområde HDPE 2X	-	-	0,1 ²³
Nomi4s' leverandørområde HDPE	7,8	2,2	10,0
Københavns Kommune HDPE 2X	27,8 ²⁴	1,8	29,0
Reno-Nords leverandørområde PP 1X	11,5	9,6	21,1
Reno-Nords leverandørområde PP 2X	5,5	2,1	7,6
Dansk Affalds leverandørområde PP 2X	-	-	0,3 ²³
Nomi4s' leverandørområde PP	10,1	7,2	17,3
Københavns Kommune PP 2X	11,8	2,1	13,9

²² Materialet fra Dansk affald blev først kørt gennem Dansk Affalds anlæg i Vojens, hvor affald, jern, aluminium og glas blev udsorteret. Herefter blev den blandede hårde plast udsorteret i polymerer ved Reno-Nord. Løse glasskår vurderes at blive frasepareret i Reno-Nords sigtesystem, hvorfor fundne glasskår fra polymersortering af plast fra såvel Dansk Affalds som Reno-Nords leverandørområde vil være fanget i emballagernes hulrum. Det er dog muligt, at passagen af den ekstra sigte ved Reno-Nord kan fraseparere lidt flere glasskår, end der blev frasepareret i Dansk Affalds sigtesystem.

²³ Da indholdet af plastfolie og affald i polymerfraktionerne var meget begrænset, blev der kun foretaget en samlet opgørelse

²⁴ Efterfølgende blev plastfolien fjernet ved en ekstra kørsel med vindsigten

Fraktion	Plastfolie	Affald	Sum af plastfolie og affald
Reno-Nords leverandørområde PET 1X	3,1	4,4	7,5
Reno-Nords leverandørområde PET 2X	2,1	1,5	3,6
Dansk Affalds leverandørområde PET 2X	-	-	0,5 ²³
Nomi4s' leverandørområde PET	1,5	2,0	3,5
Københavns Kommune PET 2X	2,9	0,7	3,6

Af TABEL 9 fremgår et lavere indhold af plastfolie og affald ved to gange udsortering i forhold til én gang udsortering.

Det fremgår endvidere af TABEL 9, at der blev registreret meget lave indhold af både plastfolie og affald i de udsorterede polymerfraktioner indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde. Det skal bemærkes, at det alene er hård plast, der indgår i sorteringskriterierne for den sorterede fraktion.

Det vurderes nødvendigt at fraseparere folien ved fx at frasuge lette materialer for at oparbejde fraktioner med et plastfolieindhold på mere end ca. 3 %.

Bortset fra materialet indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde havde alle PP-fraktioner et plastfolieindhold på mere end 5 %.

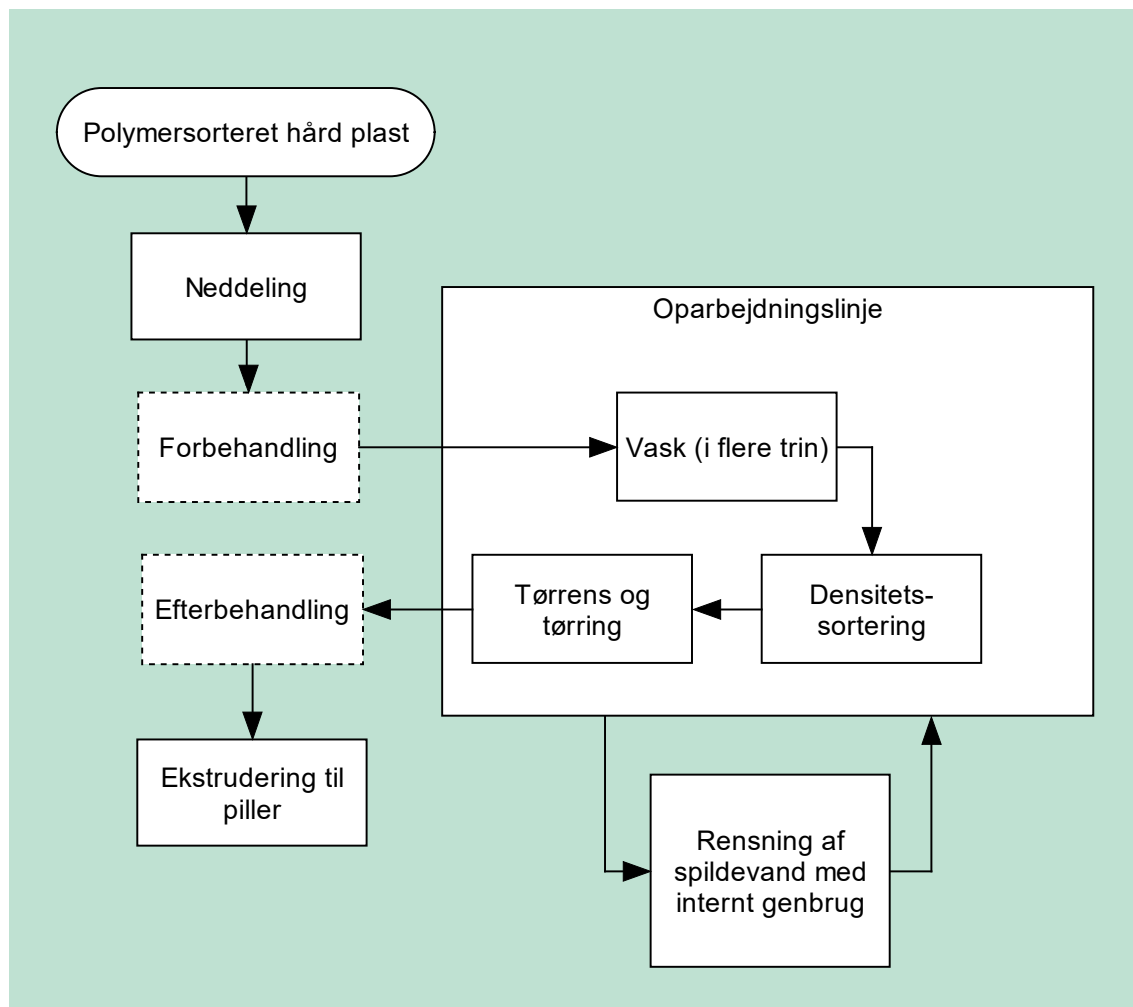
Herudover indeholdt HDPE-fraktionerne fra Nomi4s leverandørområde og fra Københavns Kommune ligeledes over 5 % plastfolie.

Det vurderes indledende ud fra polymersammensætningen, at alle fraktioner vil kunne oparbejdes til brugbare råvarer under forudsætning af, at folien kan frasuges inden oparbejdningen.

5. Udvikling af procesenheder til oparbejdning af plast

5.1 Koncept

På FIGUR 6 er vist konceptet til oparbejdning af polymersorteret plast ved AVL.



FIGUR 6. Koncept til oparbejdning af hård plast.

Ved oparbejdningen behandles de polymersorterede materialer med følgende procestrin:

- Neddeling: Plasten neddeles til flakes i en størrelse af ca. 14 mm
- Forbehandling: Flakes udsættes om nødvendigt for forbehandlingsprocesser, fx foliefjernelse
- Vask: Plastflakes vaskes i en vaskeenhed, hvor platten kan vaskes i den samme vaskeenhed i flere trin, afhængigt af tilsmudsningsgrad
- Densitetssortering: De vaskede flakes densitetssorteres
- Platten tørres og tørres
- Efterbehandling: Platten kan efterbehandles med fx flakeoprensning, med fraseparation af uønskede polymerer, fraseparation af uønskede farver af flakes eller behandles med metoder til fjernelse af lugt.

I projektet er der arbejdet med udvikling af procesenheder til vask og densitetsseparation. Herudover er der arbejdet med indledende udvikling af metoder til forbehandling og efterbehandling.

5.2 Fremstilling af procesenheder

Projektets hovedformål har været at udvikle en robust og fleksibel oparbejdningslinje til oparbejdning af husstandsindsamlet (kildeopdelt/kildesorteret) hård plast af polyethylen (HDPE) og polypropylen (PP), hvor der sættes på kvalitet frem for kvantitet i de udviklede procesenheder.

Ud over at udvikle procesenheder til fremstilling af højkvalitetsregenerat fra husstandsindsamlet plast har det også været intentionen at nedsætte vandforbruget i processen og ligeledes forenkle hele procesforløbet. Formålet er at gøre anlægget mere rentabelt, hvilket vil være en gevinst for både virksomheder og miljø.

Da der var tale om nyudvikling, blev det valgt at opbygge et antal pilotenheder for at afprøve teknologiernes effektivitet enkeltvis.

5.2.1 Vaskeenhed

Vaskeenheden, som er en central enhed i anlægget, blev først opbygget som en pilotenhed med en begrænset kapacitet på ca. 30 kg hård plast pr. vask. Efter flere ombygninger af vaskeenhedens design og specielt vaskeværktøjets udformning lykkedes det at få enheden til at vaske tilfredsstillende, dvs. at materialerne kan vaskes tilfredsstillende rene med et minimumforbrug af tid og vand.

Den nyudviklede vaskeenhed blev testet i en række udviklingsforsøg på de forskellige udsorterede polymermaterialer af HDPE, PP og PET fra sorteringsanlæggene for at få klarlagt, hvordan vaskeenheden processerede under forskellige forhold (se afsnit 5.3). I disse udviklingsforsøg stod det hurtigt klart, at et for stort indhold af folier (blød plast) gav problemer i processen, ikke for selve vaskeprocessen, men i håndteringen til og fra vaskeenheden. Vaskeenheden kunne godt vaske med et højt indhold af folie, med det stod klart, at materialets risleevne²⁵ var så ringe, at det ville give store problemer i det endelige anlæg. Derfor var det nødvendigt at foretage folierensning²⁶ ved hjælp af eksisterende udstyr hos AVL. Det eksisterende udstyr blev ombygget og var herefter i stand til at rense tilførte flakes for folie. Udstyret havde dog en meget lavere kapacitet end den, som er nødvendig i et kontinuert flow i den endelige oparbejdningslinje. I forbindelse med udviklingsforsøgene (afsnit 5.3) blev de vaskede flakes manuelt densitetssorteret, tørret, ekstruderet til piller og testet på laboratoriet for at vurdere den opnåede produktkvalitet som beskrevet i afsnit 5.3.

For at opnå en så høj vaskeeffekt som muligt blev der udviklet forskellige algoritmer til enhedens PLC. Disse algoritmer styrer selve vaskeprocessen ud fra en række målte parametre for processen og ud fra forudindstillede konstanter, så processen kører optimalt med så lavt et vand- og energiforbrug som muligt.

Resultaterne af udviklingsforsøgene med vaskeenheden er beskrevet i afsnit 5.3.

²⁵ Risleevnen er et materiales evne til at løbe ud af fx en beholders fraførselskanal. Hvis risleevnen er ringe, løber materialet ikke frit, og der opstår risiko for tilstopninger

²⁶ Med folierensning forstås her, at folie fjernes fra den hårde plast



FIGUR 7. Vaskeenhed i pilotskala.

5.2.2 Densitetssortering

Densitetssortering fungerer ved, at materialer med forskellige densiteter tilføres en væske, hvorefter materialer med en densitet lavere end væsken vil flyde, og materialer med en densitet højere end væsken vil synke. Der er heraf det engelske udtryk "Swim-Sink" stammer.

Udviklingen af en densitetssorteringsenhed er baseret på generelle principper for at opnå en tilfredsstillende separation. Disse principper omfatter:

1. At luftbobler fjernes fra materialet så godt som muligt, da tunge partikler ellers kan blive fejlspareret sammen med lette partikler
2. At separationen foregår med så lidt turbulens som muligt, fordi materialer med en densitet tæt på væskens densitet vil blive trukket i en forkert retning af opstået turbulens
3. At materialetætheden i væsken ikke bliver koncentreret til nogle enkelte områder, men i stedet bliver spredt ud i hele væsken, så de enkelte partikler ikke kan påvirke hinandens retning i væsken.

Til densitetssortering benyttes i projektet almindeligt rent vand, som har en densitet på $1,0 \text{ g/cm}^3$, hvilket betyder, at materialer som HDPE og PP med en densitet på under $1,0 \text{ g/cm}^3$ vil flyde op til overfladen og materialer som PET, PS, ABS, PVC og lignende synker, da de har en densitet over $1,0 \text{ g/cm}^3$. Densitetsseparation kan også udføres ved højere densiteter i saltblandinger, men dette er kun testet i mindre skala i projektet.

Med densitetssortering kan man adskille og sortere forskellige materialetyper, hvilket er et grundlæggende trin i oparbejdning af hård plast for at få fraseret fx rester af PET fra HDPE og PP samt rester af PE og PP fra PET. Densitetssortering kan dog ikke separere alle polymerer, da mange materialer har en densitet, som ligger tæt op ad hinanden. Samtidig

ændrer additiver (typisk fyldstoffer) også på materialets densitet, hvilket bevirker, at fx PE eller PP med meget fyldstof kan ende i synkefraktionen sammen med PET.

Indledende forsøg viste, at idé og design for princippet til densitetssorteringsenheden så så lovende ud, at det blev besluttet at udvikle densitetssorteringsenheden i fuldskala til oparbejdningslinjen uden at udvikle en enhed i mindre skala først.

Densitetssorteringsenheden blev opbygget som en kontinuerlig enhed, der kører med et konstant inputflow. Fra bufferbeholderen i toppen ledes materialet via snegle ned midt i beholderen, som er fyldt med væske, og her starter separationen, ved at materiale med en densitet under $1,0 \text{ g/cm}^3$ flyder mod toppen, og materiale med en densitet over $1,0 \text{ g/cm}^3$ synker mod bunden. Materialet fra toppen ledes over i en centrifuge, som slynger væsken af materialet, og materialet i bunden pumpes til et slamfilter, hvor materiale og væske adskilles.

For at opnå den ønskede sortering med høj nøjagtighed var det gennem forløbet nødvendigt at foretage mange ændringer; bl.a. blev transportsneglene specialdesignet, så materialet afleveres jævnt i væsken, og så materialet samtidig ikke hænger sammen. Ligeledes var der store udfordringer, specielt med at få materialet ud af bunden af densitetssorteringsenheden.

Et specialudviklet PLC-program styrer processen, så processen selvstændigt kan fungere under drift, og ligeledes styres start og stop efter en forudbestemt sekvens.



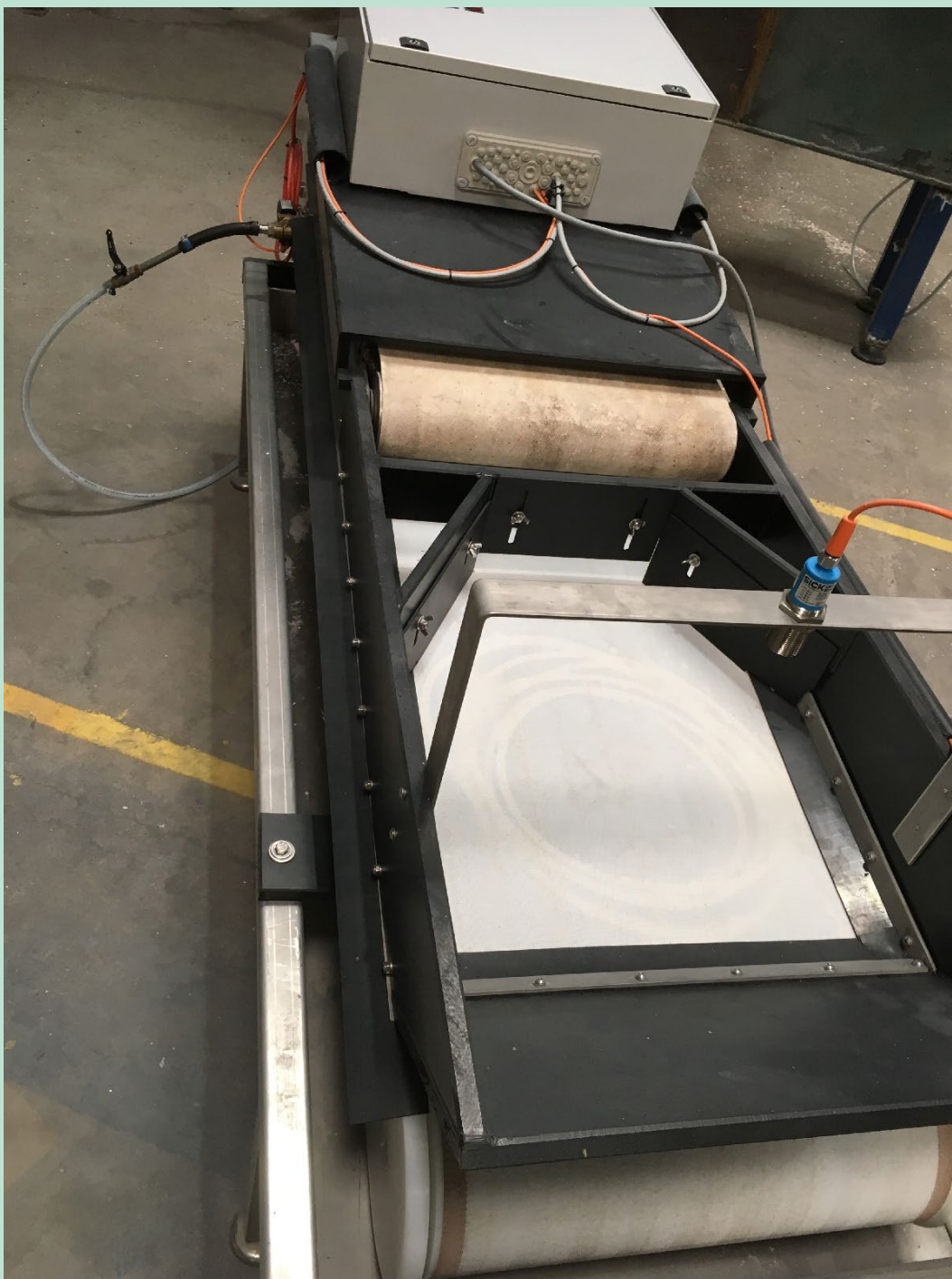
FIGUR 8. Udviklet densitetssorteringsenhed.

5.2.3 Rensning af spildevand

Ved oparbejdning af hård plast opstår der spildevand i forbindelse med vask af plasten. Spildevandet vil således indeholde det afrensede indhold fra emballage, fx organisk affald fra bakker, bøtter, rester af væsker som fx rengøringsmidler samt indhold i fibre fra fjernede etiketter. Herudover vil plastpartikler, som er mindre end vaskeenhedens sigtehuller, passere til spildevandet.

For at rense spildevandet for partikler er det valgt at benytte båndfilterteknologi fra AL-2, som er udviklet til brug i anlægget i projektet.

I et båndfilter tilføres væske/spildevandspulp i et kammer og filtreres på en filterdug, som kan leveres med forskellig maskevidde. I det udviklede system reguleres fremdriften af båndfilteret ved brug af følere, og filterdugen holdes ren ved brug af lidt spulevand.



FIGUR 9. Båndfilter til indledende forsøg.

5.3 Udviklingsforsøg med procesenheder

Der er gennemført en række udviklingsforsøg med vaskeenheden i pilotskala, hvor designet er blevet ændret undervejs. Forsøgene er udført på polymersorteret plast (HDPE, PP og PET) modtaget fra de deltagende sorteringsanlæg og forskellige kilder.

TABEL 10. Kilde, sorteringsanlæg og indhold af andre materialer end hård plast.

Kilde	Sorteringsanlæg	Blød plast	Metal	Glas
Reno-Nords leverandørområde	Reno-Nord	X	X	
Dansk Affalds leverandørområde	Reno-Nord		X	X
Nomi4s' leverandørområde	Nomi4s		X	
Københavns Kommune	ARC	X		

En oversigt over udviklingsforsøgene er vist i TABEL 11.

TABEL 11. Udviklingsforsøg.

Forsøg nr.	Kilde ²⁷	Polymer	Vaskeenhed type ²⁸
1	Nomi	PP	1
2	DA	HDPE 2X	1
3	R-N	PET 2X	1
4	Nomi	PET	1
5	R-N	HDPE 2X	1
6	Nomi	HDPE	1
7	DA	PP 2X	1
8	DA	PP 2X	2
9	R-N	PET 1X	2
10	DA	HDPE 2X	2
11	R-N	PP 1X	2
12	R-N	HDPE 1X	2
13	R-N	PP 2X	2
14	DA	PET 1X	2
15	ARC	PET 2X	2
16	ARC	PP 2X	2
17	ARC	HDPE 2X	2
18	Nomi	PET	2

²⁷ Nomi: Hård plast fra Nomi4s' leverandørområde; DA: Hård plast fra Dansk Affalds leverandørområde polymersorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg; R-N: Plast fra Reno-Nords leverandørområde sorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg; ARC: Plast fra Københavns Kommune sorteret på testanlæg ved ARC

²⁸ 1: Første version af vaskeenhed, 2: Forbedret version af vaskeenhed

5.3.1 Oparbejdningmetode

Konceptet for oparbejdning blev vist i afsnit 5.1.

Den oparbejdningmetode, som er benyttet i udviklingsforsøg med procesenhederne i projektet, omfatter følgende processer:

- Neddeling
- Forbehandling: Foliefjernelse ved indhold over ca. 3 %
- Vask i flere trin (samme vaskeenhed)
- Densitetsseparation, hvor flydefraktionen er polyolefinproduktet
- Evt. tørrens samt tørring
- Ekstrudering til piller (kun HDPE og PP).

Neddeling

Der blev i projektet udført neddelingsforsøg med forskellige soldstørrelser (se Bilag 3). Ud fra resultaterne blev valgt en optimal soldstørrelse på 14 mm, som blev anvendt i resten af forsøgene.

Forbehandling

For at kunne processere plasten på vaskeenheden har det været nødvendigt at bortrense folie, hvis indholdet var over ca. 3 %, da der ellers opstår tilstopninger i transportsystemer på grund af foliens lave densitet. Det var nødvendigt at bortrense folie for alle PP-fraktioner undtagen materialer indsamlet fra Dansk Affalds leverandørområde. For HDPE var det nødvendigt at bortrense folie for ca. 50 % af fraktionerne. Det har været muligt at processere PET-fraktionerne uden folierensning.

Til folierensning er der blevet anvendt en metode, som er etableret i lille skala ved AVL.

Vask

Til vask blev der benyttet den udviklede vaskeenhed i pilotskala. Enheden blev undervejs forbedret, således at en del af forsøgene er udført med den første version af vaskeenheden (vaskeenhed type 1), mens de resterende forsøg er udført med en forbedret version (vaskeenhed type 2).

Densitetsseparation

Densitetsseparationen blev udført manuelt i kar, hvilket vurderes at medføre en lidt ringere separationseffektivitet end den i projektet udviklede densitetsseparationsenhed.

Tørrensning og tørring

Til tørrensning og til den afsluttende tørring blev benyttet den udviklede vaskeenhed i pilotskala.

Ekstrudering til piller

Ekstrudering er udført på eksisterende ekstrudere med smeltefilter ved AVL.

I forsøgene er bestemt tab i form af tørstof og tab i form af plast ud fra vejninger og analyser af alle fraførte strømme.

5.3.2 Oparbejdning af HDPE og PP

Materialer af HDPE og PP er oprenset ved AVL med metoden beskrevet i afsnit 5.3.1. Oprensningen er foretaget i en serie af udviklingsforsøg, som omfatter test af materialer fra alle anlæg og kilder samt test af forskellige renheder af udsorterede polymerer.

Kvaliteten af de færdigvaskede flakes af HDPE og PP er for hovedparten af forsøgene testet ved ekstrudering til piller med brug af smeltefiltrering.

Ved ekstruderingen er frekvensen af filterskift observeret. Skiftede smeltefiltre er inspiceret for forekomst af tilbageholdte partikler.

Ud fra pillerne er der fremstillet sprøjtestøbte testemner til gennemførelse af mekaniske test (trækstyrke mv.) samt måling af smelteindex. Der er endvidere foretaget analyser, som kan vurdere renheden af den omsmeltede plast som DSC (differential scanningkalorimetri) og FTIR (Fourier-transformeret infrarød spektroskopi).

5.3.2.1 Udbytte og tab af HDPE og PP ved oparbejdning

Resultaterne af udviklingsforsøgene er vist i TABEL 12. Tabellen viser for hvert udviklingsforsøg:

- **Kilde:**
 - Nomi4s: Hård plast fra Nomi4s' leverandørområde
 - DA: Hård plast fra Dansk Affalds leverandørområde polymersorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg
 - R-N: Plast fra Reno-Nords leverandørområde sorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg
 - ARC: Plast fra Københavns Kommune sorteret på testanlæg ved ARC
- **Polymer:** PP eller HDPE med angivelse af, om der er polymersorteret en gang (1X) eller 2 gange (2X) med NIR
- **Vaskeenhedstype:** Type 1 er første udgave af vaskeenheden. Type 2 er en videreudvikling af vaskeenhed type 1 som giver mindre plasttab.
- **Tørstofudbytte – produktfraktion, %:** Beregnes som $100\% \times \text{vægt af tørstof i produktfraktion divideret med vægt af tørstof i input}$
- **Udbytte af hård produktplast, %:** Beregnes som $100\% \times \text{plastmængde i produktfraktionen på tørstofbasis divideret med sum af alle frførte, hårde plastmængder på tørstofbasis}$
- **Tab af plast i vaske-/tørretrin:** Tab af plast er analyseret i spildevandsslam fra henholdsvis vaskeprocessen og tørreprocessen. Der er her tale om plast, som er slået i stykker til så små partikler, at de kan passere vaskerens sigtehuller. Plaster frasepareres sammen med frasepareret organisk og uorganisk materiale i anlæggets spildevandsrensning i en slamkage.

TABEL 12. Resultater for HDPE og PP.

Forsøg nr.	Kilde ²⁷	Polymer	Folie-rens	Vaskeenhedstype	Tørstofudbytte - produktfraktion %	Udbytte af hård plast i produktfraktion %	Tab af plast i vaske-/tørretrin %
1	Nomi	PP	X	1	57	72	26
2	DA	HDPE 2X		1	85,5	90,8	5,3
5	R-N	HDPE 2X		1	84,9	87,3	11
6	Nomi	HDPE	X	1	75,6	91,1	10,3
7	DA	PP 2X		1	65,4	70,2	25,9
8	DA	PP 2X		2	82	87,7	8,4
10	DA	HDPE 2X		2	91,3	93,9	4
11	R-N	PP 1X	X	2	60	80,9	2,9
12	R-N	HDPE 1X	X	2	79,8	94,4	2
13	R-N	PP 2X	X	2	74,5	90,5	3,9
16	ARC	PP 2X	X	2	81,8	93,2	7,3
17	ARC	HDPE 2X		2	88,5	95,3	3,9

Tabellen illustrerer de forbedringer, der er opnået i udviklingsforløbet.

De første forsøg blev således gennemført med vaskeenhed type 1. Her blev observeret et ret lavt udbytte af PP (udbytte af hård plast i produktfraktion) på 70-72 % (se forsøg nr. 1 og 7), mens udbyttet plast af HDPE (hård plast) var 87-91 % (se forsøg 2, 5 og 6).

Efter en videreudvikling af vaskeren til type 2 blev udbyttet for PP øget til 88-93 % (se forsøg 8,13 og 16), mens udbyttet for HDPE blev øget til ca. 95 % (se forsøg 10 og 17).

Tabene²⁹ for PP er således reduceret til ca. 100-90 % = 10 % og for HDPE til ca. 100-95 % = 5 %. Disse tab inkluderer tab af tung fraktion i densitetsseparationen. Tabet af hård plast er afhængigt af renheden af den tilførte polymer, idet et højt indhold af fx PET i PE vil medføre et højt tab (mindre udbytte af hård plast) i densitetssorteringstrinnet.

I tabellen er der også foretaget en beregning af tabet i selve vaske-/tørretrinnet (hvor tab ved densitetssortering ikke er omfattet). Hvis man ser på tab i vaske-/tørretrin, er disse reduceret fra ca. 26 % for PP med vaskeenhed type 1 til <8,5 % for vaskeenhed type 2 og for HDPE fra 10-11 % for vaskeenhed type 1 til ca. 4 % for vaskeenhed type 2.

Tabene vurderes med type 2 af vaskeenheden at være reduceret til et niveau, som er absolut tilfredsstillende.

Eksempler på plast fra oparbejdningstrin af HDPE og PP er vist på FIGUR 10 og FIGUR 11.



FIGUR 10. Udviklingsforsøg nr. 6 HDPE Nomi4s. Fra venstre mod højre: Input, vasket, densitetssorteret og tørret HDPE-produkt.

²⁹ Tab i % = 100 % minus udbytte i %



FIGUR 11. Udviklingsforsøg nr. 13 PP 2X Reno-Nord. Fra venstre mod højre: Input, hård plast (folierenset), folie, vasket plast, densitetssorteret tørret PP-produkt.

5.3.2.2 Omsmeltning af flakes af HDPE og PP samt kvalitet af piller

De vaskede og tørrede plastflaskes blev ekstruderet til piller med brug af smeltefilter. Det var ikke nødvendigt at skifte smeltefilter ved ekstruderingen i processeringen af den mængde, der blev anvendt i forsøget. Til sammenligning ville en udskiftning af smeltefilter nogle gange være nødvendigt ved ekstrudering af samme mængde ikke-vasket industriplast hos AVL. Der blev observeret en meget lille mængde partikulært materiale på det benyttede filter uden rest af forkullet materiale fra fx etiketter. Partiklerne på filtrene vurderes at være plast, som smelter ved et højere smeltepunkt end HDPE, PP eller krydsbundet plast, fx PEX (som ikke kan smelte).



FIGUR 12. Smeltefilter (mesh 40) fra ekstrudering af PP Nomi4s (forsøg nr. 1).



FIGUR 13. Ekstruderede piller af PP (forsøg nr. 1).



FIGUR 14. Smeltefilter (mesh 14/88) fra ekstrudering af HDPE fra Reno-Nord.

Resultater af mekaniske test af pillerne er vist i TABEL 13

TABEL 13. Mekaniske analyser af piller fra udviklingsforsøg.

Nr.	Forsøg	MFI ³⁰ g/10 min	E-modul MPa ³¹	Træk- styrke ved flyde- punkt MPa	Trækstyrke ved brud MPa	Længde- udvidelse %	Slag- styrke kJ/m ²	Indikativ renhed DSC, %	Renhed modelleret fra input, % ³²	Vurdering streng ³³
11	PP 1X, R-N, type 2 ³⁴	16	1050	25,8	20,9	26,8	6,8	87,0	94,6	2
13	PP 2X, R-N, type 2	23,5	1023	26,0	21,7	21,8	6,5	97,5	96,4	2
8	PP 2X, DA, type 2	25	978	25,3	16,1	228,0	9,0	99,0	98,4	1
7	PP 2X, DA type 1	17,5	987	25,5	15,2	225,0	9,4	99,1	98,4	2
1	PP Nomi, type 1	8,7	1043	24,0	22	10,0	6,8	88,8	87,7	2
16	PP 2X ARC, type 2	24,7	1178	27,6	22,9	23,8	5,8	98,0	97,3	1
10	HDPE, 2X DA, type 2	1,4	648	23,9	15,8	114,8	20,4	93,0	99,8	1
12	HDPE 1X, R-N, type 2	1,5	629	23,0	15	81,0	19,1	96,9	95,9	1
6	HDPE, Nomi, type 1	1,2	666	24,0	21	58,0	25,5	97,6	98,1	1

Det ses, at MFI er 9-25 for PP svarende til en letløbende plast egnet til sprøjtestøbning, mens MFI er omkring 1,2-1,5 for HDPE, hvilket indikerer, at plasten er bedst egnet til ekstrudering eller flaskeblæsning. Trækstyrker er nogenlunde ens for de forskellige test af henholdsvis PP og HDPE, mens længdeudvidelsen før brud varierer meget, særligt for PP. Slagstyrken er på samme niveau for henholdsvis HDPE og PP. Der er ud fra DSC-analyser bestemt en indikativ polymerrenhed, som indikerer en polymerrenhed af PP på over 87 % og af HDPE på over 93 %.

Herudover er der foretaget en modellering af forventet renhed ud fra data for karakteriseringen i kapitel 4. Der ses overordnet god overensstemmelse mellem indikativ, ren DSC og renhed modelleret fra input i %. Vurdering af kvaliteten af prøvestrengen viser den bedste kvalitet (1=uden defekter) for PP nr. 8 og for alle 3 test af HDPE (nr. 6, 10 og 12). Men alle testede materialer vurderes at kunne anvendes i AVL's produktsortiment. Materialerne kan anvendes til en lang række produkter, fx ekstruderede rør, som ikke anvendes til drikkevand, produkter til bilindustrien, transportkasser og urtepotter. Det forventes ud fra analyserne, at HDPE- og PP-plasten kan anvendes med 100 % tilsats. Det vil dog ikke være

³⁰ MFI: Melt Flow Index (smelteindex). For PP er MFI målt ved 2,16 kg, 230 °C. For HDPE er MFI målt ved 5 kg, 190 °C

³¹ Elasticitetsmodul eller Youngs modul

³² Modelleret fra inputdata af Teknologisk Institut for AVL's oparbejdningstrin

³³ AVL's bedømmelsesskala 1: Pæn glat streng med et minimum af overfladefejl. Massivt tværsnit. 2: Nogenlunde pæn streng med et helt massivt tværsnit uden at være opkogt. 3: Grim streng, opkogt

³⁴ 1X betyder en gennemkørsel ved sortering, hvor 2X betyder to gennemkørsler. Type refererer til vaskeenhedstype

R-N: Reno-Nord, Nomi: Nomi4s, ARC: Amager Ressource Center

Type 1: Vaskeenhed type 1. Type 2: Vaskeenhed type 2

muligt at fremstille lyse kulører, da HDPE- og PP-materialerne er blandede farver. Fremstilling af produkter i lyse kulører kræver, at der etableres farvesortering på de rensede flakes til at udsortere fx hvide flakes eller flakes i naturfarve.

For at PP- og HDPE-plast ikke skal blive oxideret under ekstrudering, tilsættes virgint plast fra leverandørens side antioxidant. Da antioxidant er meget dyrere end polymeren, tilsættes typisk kun nok til, at plasten kan holde til de nødvendige omsmeltningsstrin. Det indikative indhold af antioxidant kan måles ved en OIT-analyse (oxidative induction time)³⁵. Der er foretaget OIT-analyser af PP og HDPE, som viser et meget lille restindhold af antioxidant svarende til mindre end 3 minutter for HDPE og <1 minut for PP. Dette er meget korte tider for termisk stabilitet af plasten, hvilket betyder, at det kan være nødvendigt at tilsætte antioxidant, hvis plasten skal genanvendes flere gange.

Resume af resultater vedrørende muligheder for oparbejdning af HDPE og PP baseret på forsøg i pilotskala

- Det var nødvendigt at etablere en folierensningsmetode for at kunne oparbejde især PP-fraktioner og til dels HDPE-fraktioner, som var indsamlet sammen med plastfolie.
- Det lykkedes at udvikle en vaskeenhed og en vaskemetode, som kan rense plasten til en så høj renhed, at der er meget få skift af smeltefilter svarende til situationen ved industrielt processpild.
- De ekstruderede plastpiller har en høj polymerrenhed og en høj kvalitet, som er afsættelig indenfor AVL's produktsortiment af HDPE og PP.
- Tabet af hård plast ved vask og densitetssortering var lille, hhv. ca. 5 % for HDPE og 10 % for PP.
- Der blev ikke konstateret nogen umiddelbar forskel på kvaliteten af HDPE og PP oparbejdet fra forskellige kilder, hvilket vurderes at skyldes den udviklede effektive oparbejdningsproces.
- En analyse af indikativt indhold af antioxidant viser et lavt indhold, hvilket kan gøre det nødvendigt at tilsætte antioxidant til plasten, hvis den skal genanvendes flere gange.
- Ved oparbejdning af plast, hvor der kun er udført 1X polymersortering, er polymerrenheden lidt lavere end ved 2X polymersortering, og der opstår væsentligt større mængder af restprodukter (folie og synkefraktion) ved oparbejdningen ved AVL.

5.3.3 Oparbejdning af PET

Materialer af PET fra de deltagende anlæg er oprenset ved AVL med metoden beskrevet i afsnit 5.3.1. PET er videreoparbejdet ved AVL og testet med ekstrudering og foliefremstilling ved SKY-LIGHT.

PET har en vægtfylde på ca. 1,35 g/cm³ og vil derfor indgå i synkefraktionen ved densitetssortering i oparbejdningen sammen med metal og andet materiale med vægtfylde >1 g/cm³.

Da PET kan indeholde rester af metal, er der foretaget en fjernelse af metal, inden plasten er sendt til test ved SKY-LIGHT - se afsnit 5.3.7.

5.3.3.1 Udbytte og tab af PET ved oparbejdning

Resultaterne af udviklingsforsøgene er vist i TABEL 14. Tabellen viser for hvert forsøg:

- **Kilde:**
 - Nomi: Hård plast fra Nomi4s' leverandørområde
 - DA: Blandet hård plast fra Dansk Affalds leverandørområde polymersorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg
 - R-N: Plast fra Reno-Nords leverandørområde sorteret på Reno-Nords sorteringsanlæg
 - ARC: Plast fra Københavns Kommune sorteret på testanlæg ved ARC)
- **Polymer:** PET med angivelse af, om der er polymersorteret en gang (1X) eller 2 gange (2X) med NIR
- **Vaskeenhedstype:** Type 1 er første type af vaskeenheden. Type 2 er en videreudvikling af vaskeenheden, som giver mindre plasttab

³⁵ Ved en OIT-analyse opvarmes plasten, så den er smeltet ved en given temperatur med brug af differentiell scanningskalorimetri. Når varmeflowet er stabiliseret, tilsættes ilt. Ved analysen måles, hvor lang tid der går, inden plasten bliver nedbrudt af ilt, hvilket ses som en ændring i varmeflow. Målingen giver herved et mål for indholdet af antioxidant

- **Behandlingsmetode:** 1 er den behandlingsmetode for PET, som blev anvendt i starten af forsøgene. 2 er en forbedret behandlingsmetode
- **Tørstofudbytte – produktfraktion, %:** Beregnes som $100\% \times \text{vægt af tørstof i produktfraktion divideret med vægt af tørstof i input}$
- **Udbytte af PET, %:** Beregnes som $100\% \times \text{PET-mængde i produktfraktionen på tørstofbasis divideret med sum af alle fraførte plastmængder på tørstofbasis}$
- **Udbytte af hård plast, %:** Beregnes som $100\% \times \text{hård plast-mængde i produktfraktionen på tørstofbasis} / (\text{sum af alle fraførte plastmængder på tørstofbasis})$
- **Tab af plast i vaske/tørre trin %:** Tab af plast er analyseret i spildevandsslam fra vaske- hhv. tørreprocessen. Der er her tale om plast, som er slået i stykker til så små partikler, at de kan passere vaskeenhedens sigtehuller. Plasterne frasepareres sammen med frasepareret organisk og uorganisk materiale i anlæggets spildevandsrensning i en slamkage.

TABEL 14. Resultater for PET.

Forsøg nr.	Kilde	Polymer	Vaskeenhedstype	Behandlingsmetode	Tørstofudbytte – produktfraktion, %	Udbytte af PET, %	Udbytte af hård plast i produktfraktioner, %	Tab af plast i vaske-/tørretrin, % ³⁶
3	R-N	PET 2X	1	1	46,7	49,0	Ikke analyseret	Ikke analyseret
4	Nomi	PET	1	1	39,8	44,9	71,2	35,0
9	R-N	PET 1X	2	1	41,7	46,5 ³⁷	87,7	16,8
14	DA	PET 1X	2	1	31,4	33,3 ³⁷	94,8	6,6
15	ARC	PET 2X	2	2	79,7	86,9	98,0	5,5
18 ³⁸	Nomi	PET	2	2	80,6	84,4	95,5	4,5

I udviklingsforløbet blev der udviklet en forbedret vaskeenhed (type 2), som mindskede tabet af plast ved vask (se udbytte af hård plast nr. 4 (71 %) i forhold til hård plast nr. 9 (88 %) og nr. 14 (95 %).

Senere i udviklingsforløbet blev den samlede behandlingsmetode med vask og densitetssortering ændret, så tab af PET i densitetssortering blev mindsket - se udbytte af PET i % i forsøg nr. 4 (45 %) sammenlignet med forsøg nr. 15 (87 %) og forsøg nr. 18 (84 %). Tabet af PET blev således bragt ned fra ca. 55 % til ca. 15 % med den ændrede vaskeenhed og behandlingsmetode.

Et eksempel på materialer fra oparbejdningstrin for PET er vist i FIGUR 15.

³⁶ Beregning er baseret på analysemetoden, som er beskrevet i afsnit 5.3.4

³⁷ Udbyttet af PET er lavt, da der udsorteres med en metode, som medfører forurening af PET-fraktionen med HDPE

³⁸ For forsøg nr. 18 er tab i tørretrin baseret på resultater for nr. 15 (antaget samme forhold mellem tab i tørretrin og vasketrin i nr. 18 som i nr. 15)



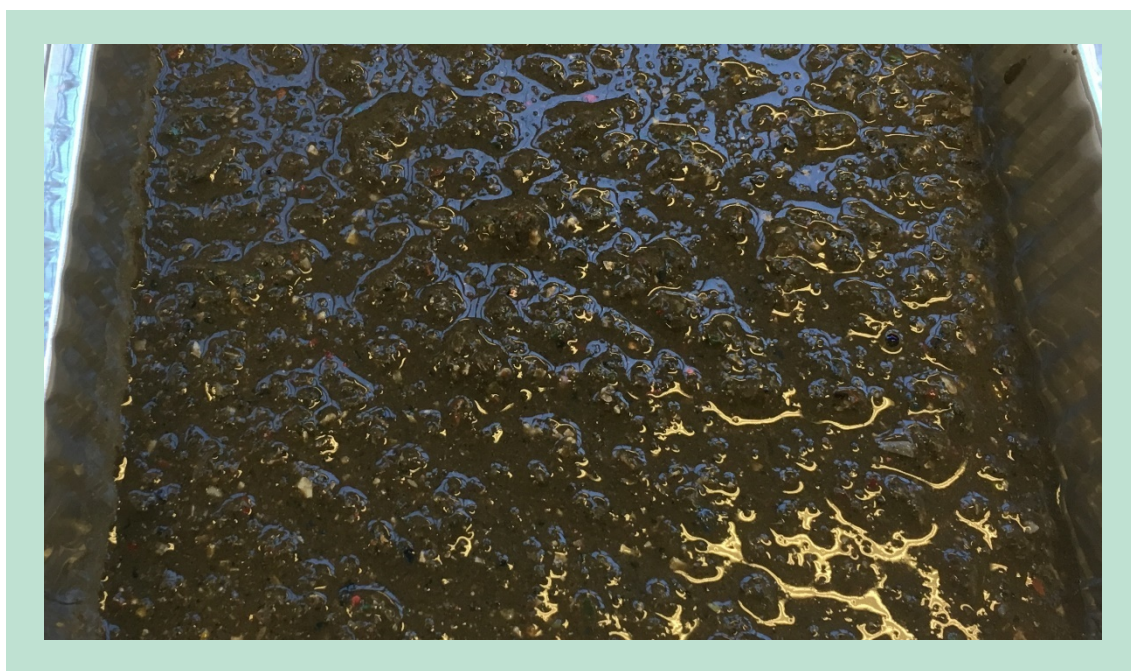
FIGUR 15. Forsøg nr. 15, PET 2X ARC. Til venstre mod højre: Input, vasket PET, densitetssorteret og tørrenset/tørret PET.

Resume af resultater vedrørende muligheder for oparbejdning af PET baseret på forsøg i pilotskala

- Udviklingsforsøgene i pilotskala med PET viste, at det var muligt at udvikle metoder til at vaske PET med forholdsvis lavt tab (ca. 15 %)
- Oparbejdning af PET til en endelig kvalitet forventes at kræve en modificeret densitetsseparationsenhed samt etablering af metoder til fraseparation af metal, som ender sammen med PET-fraktionen
- PET-materialet forventes ud fra analyser i kapitel 4 at indeholde mindre mængder PVC, som det vil være nødvendigt at reducere.

5.3.4 Spildevand fra vaske- og tørreprocesser

I forbindelse med analyserne af plast i alle afgående strømme fra anlægget er der foretaget analyser af indhold af plastpartikler i spildevandsslammet, som ledes til rensning fra vaskeenheden. Der opstår spildevand med indhold af plast ved selve vaskeprocessen og ved tørringen efter densitetssortering.



FIGUR 16. Spildevandsslam produceret ved vask af hård plast.

Analyserne er foretaget ved hjælp af en udviklet hurtig metode, hvor tørret spildevandsslam behandles på Teknologisk Institut, så der opstår 3 fraktioner af spildevandsslammet:

A: En fraktion over 710 μm

B: En fraktion mellem 355 μm og 710 μm

C: En fraktion under 355 μm .

Fraktionerne A og B består primært af plast³⁹, mens fraktionen C primært består af uorganisk materiale, fx sand jord /og organisk materiale (fx rester af tørrede fødevarer samt papirfibre fra etiketter).⁴⁰

Ved beregning af plastindhold regnes plastindholdet som summen af det fundne plastindhold i fraktion A og B.

Der er foretaget dobbelt- eller tripelbestemmelse af plastindholdet på prøver fra 12 af udviklingsforsøgene hvoraf der for ni forsøg opnås en relativ standardafvigelse på 1-5 % og for tre forsøg opnås en relativ standardafvigelse på 7-13 %.

Da der er usikkerheder vedrørende både repetition (inhomogenitet i prøver) og bestemmelse af det præcise indhold af plast i hver fraktion (indhold af plast i A- og B-fraktionerne overestimeres lidt, og indhold af plast i fraktion C negligeres), skal metoden opfattes som et hurtigt estimat af det omtrentlige plastindhold i spildevandet med en vurderet relativ usikkerhed på i størrelsesordenen 15-30 %. Præcisionen er dog tilstrækkelig til at vurdere effekten af udviklingstiltag med anvendelse af forskellige typer vaskeenheder og af forskelle i tab af plast for de forskellige oprensede polymerer.

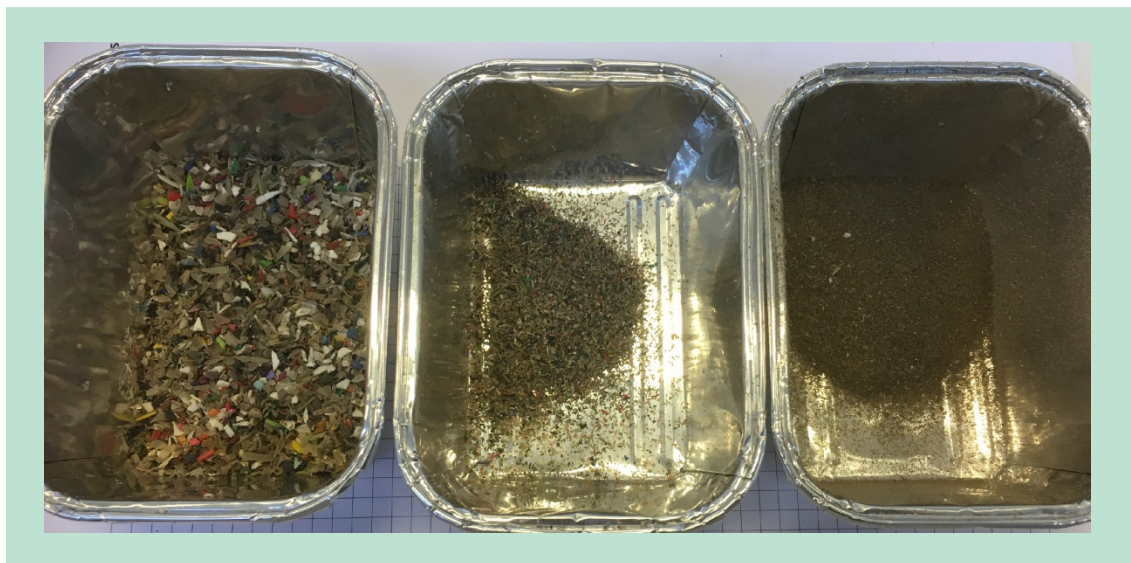
Nedenfor er vist eksempler på fraktioner i spildevandsslam ved vask af HDPE, PP og PET.



FIGUR 17. Separeret slam fra vask af HDPE ARC 2X, type 2. Fra venstre mod højre: A: >710 μm , B: 355-710 μm , C: <355 μm (bestemt plastindhold = 47 % ud af TS).

³⁹ Plastindholdet i fraktionerne A og B er ud fra billedanalyse anslået til over 90 %

⁴⁰ Plastindholdet i fraktion C er ud fra billedanalyse anslået til under 20 %



FIGUR 18. Separeret slam fra vask af PP Nomi 2X, type 1. Fra venstre mod højre: A: $>710\ \mu\text{m}$, B: $355\text{-}710\ \mu\text{m}$, C: $<355\ \mu\text{m}$ (bestemt plastindhold = 72 % ud af TS).



FIGUR 19. Sorterede fraktioner af tørret slam PET 2X ARC, type 2. Fra venstre mod højre A: $>710\ \mu\text{m}$, B: $355\text{-}710\ \mu\text{m}$, C: $<355\ \mu\text{m}$ (bestemt plastindhold = 40 % ud af TS).

Indholdet af plastfibre fra etiketter og andet tørstof i spildevandet er i anlægsdesignet planlagt til at skulle frafiltreres med båndfilter.

5.3.5 Separation af partikler i spildevand med båndfilter

Spildevandet fra vaskeren separeres med et båndfilter fra AL-2 med en maskestørrelse i dugen på $300\ \mu\text{m}$.

I et indledende forsøg blev der foretaget en separation af spildevandet fra den pilotvasker ved vask af PET 2X Reno-Nord, hvor der blev gennemført en vaskesekvens af 27 kg plast med tilsætning af i alt 15 liter vand.



FIGUR 20. Indledende forsøg med båndfilter. Til højre: Tilført spildevandspulp. Til venstre: Fraseparere filterkage.

Input og output blev analyseret for tørstof:

- Input, TS-spildevand: 19,5 %
- Output, TS-filterkage: 33,7%
- Filtreret spildevand TS: 0,4 %

Forsøget kørte med en for høj mængde skyllevæske i forhold til mængden ved forventet drift. Forsøget viste dog, at det var muligt at afvande filterkagen til et ret højt tørstofindhold. Efterfølgende blev båndfilterteknologien etableret som led i testlinjen – se kapitel 6 og afsnit 6.2.3 vedrørende håndtering af det producerede spildevand ved Mariagerfjord Vand.

5.3.6 Densitetssortering

I udviklingsforsøgene med vaskeenheden blev densitetssortering udført manuelt i kar med vand og vending af materialet samt henstand inden fraseparering af flydefraktion. Det var nødvendigt at anvende den manuelle metode for at undgå tab på de forholdsvis små prøvemængder i den udviklede vaskeenhed i pilotskala, som kun processerer ca. 25-30 kg hård plast pr. vask.

Der blev herudover foretaget et indledende forsøg på et mindre, kontinuert densitetssorteringsanlæg ved AVL med densitetssortering af vasket PP. I forsøget blev udtaget prøver af input og den fraførte flydefraktion, som blev analyseret for indhold af henholdsvis flydefraktion og synkefraktion ved at foretage en separation i et monolag med grundig befugtning af alle flakes, så luftbobler blev fjernet.

Indholdet af synkefraktion i input blev bestemt til 15,6 %, og efter separationen var indholdet i flydefraktionen (PP) 1,34 %. Der blev således fjernet $(15,6 - 1,34) / 15,6 * 100 = 91,4$ % af den tunge fraktion ved separationen. Dette blev vurderet som tilfredsstillende.

Herefter blev det valgt at fortsætte udviklingen af densitetsseparationen i større skala på en enhed, som blev opbygget på oparbejdningslinjen - se afsnit 6.1.1 og afsnit 6.2.3.

5.3.7 Omsmeltningstest af PET ved SKY-LIGHT

Omsmeltningstest 1 (blandet, oprenset PET):

I omsmeltningstest 1 blev 16 kg PET oprenset fra udviklingsforsøg 3 (PET 2X fra Reno-Nord, TABEL 14) separeret med en metalseparator ved AVL. Efterfølgende resterede 7,1 kg rensat PET. Da metalseparatoren fjernede hele portioner af PET, hvis der blev identificeret et stykke metal, opstod et højt tab. Ved kommerciel etablering ville man i stedet benytte anden teknologi, fx overbåndsmagnet til jern og eddy current til ikke-jern-metaller eller systemer med metaldetektorer og trykluftdrevne dyser, hvorved tabet vil kunne mindskes.

Ved SKY-LIGHT blev der foretaget indledende ekstruderingsforsøg på en forsøgsekstruder.



FIGUR 21. Ekstrudering af PET i laboratorieekstruder ved SKY-LIGHT.

Der blev opstartet på virgin PET fulgt af tilsats af den rensede PET i koncentrationerne 100 %, 50 % og 25 %. Ved forsøget blev der produceret ukurante strenge, som ikke kunne granuleres (stregene har ikke ens tykkelse, knækker eller lign.).

Omsmeltningsforsøg 2 (blandet, oprenset PET)

Til omsmeltningsforsøget blev der ved AVL produceret en større portion oprenset PET fra de forskellige kilder. Den oprensede PET blev separeret for metal med brug af metalseparator, hvorefter der resterede 47,5 kg til forsøg ved SKY-LIGHT.

Da den oparbejdede, blandede PET kan indeholde mindre mængder PVC, som vist ved karakterisering i kapitel 4, blev det valgt at varmebehandle plasten først, hvorved PVC dekomponerer. Efterfølgende blev PET'en neddelt og igen tilført laboratorieekstruderen ved SKY-LIGHT til fremstilling af folie.

De fremstillede folier er vist på FIGUR 22.



FIGUR 22. Fremstillede folier af blandet, oprenset PET. Fra venstre mod højre: 5 %, 10 % og 20 % tilsats af oparbejdet PET fra husstandsindsamlet plast.

Resultatet viser:

- Ved 5 % tilsats oplevedes ingen problemer med at ekstrudere folien. Der sås en svag gulning og enkelte urenheder
- Ved 10 % tilsats skulle der justeres lidt på dysen, før folien stabiliserede sig og blev pæn. Der var øget gulning og flere sorte urenheder
- Ved 20 % tilsats skulle der igen justeres lidt på dysen. Folien blev brunlig og der var mange urenheder.

Resultatet vurderes at kunne forbedres med brug af smeltefilter. Gulning kan dels skyldes PVC-afbrænding, dels at der indgår flerlagsmateriale i den blandede PET-fraktion.

Det skal bemærkes, at man ved etablering af oprensningsteknologi til PET typisk vil reducere PVC-indholdet ved benyttelse af NIR-baserede flakesorterere til oprensning af de vaskede PET-flager.

Omsmeltningsforsøg 3

I dette forsøg blev benyttet PET-flasker udtaget manuelt ved Reno-Nord - i alt 75 kg. Flaskerne blev neddelt til en mængde på 68 kg. Det blev valgt at foretage en intensiv vask for at rense så godt som muligt. Efter vask med pilotvaskeenheden resterede 62 kg. Efter manuel densitetsseparatoring og slutrensning/tørring resterede ca. 28 kg. Der var således et stort tab ved densitetsseparatoringen (på tørstofbasis blev PET-udbyttet beregnet til 45,6 % med 51,4 % tab i let fraktion og 3 % tab via spildevand fra vaskeenheden).



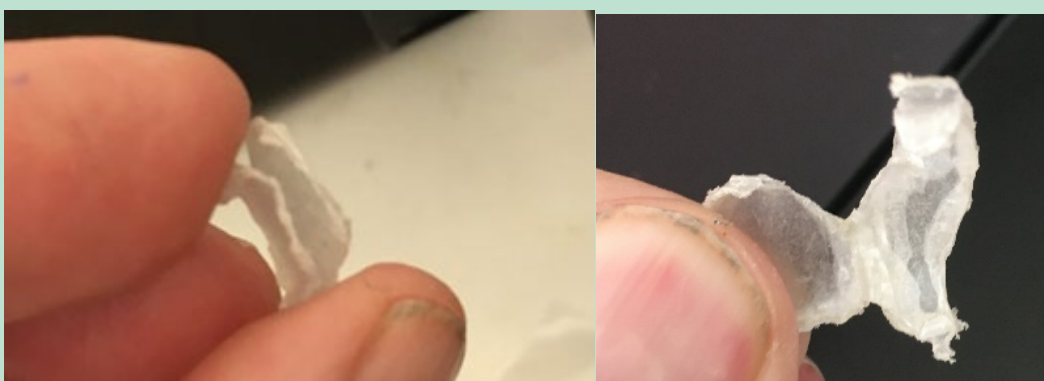
FIGUR 23. Input, PET-flasker.



FIGUR 24. Til venstre: Vaskede flakes. Til højre: Input.

Tabet i densitetssorteringen blev undersøgt nærmere i laboratoriet ved Teknologisk Institut på en udtaget delprøve.

Det viste sig, at flydefractionen af flakes fra densitetsseparationen af PET var delvist delamineret (flagerne blev identificeret som PET med FT-IR). Delamineringen medfører, at luftbobler holder flagerne oppe i densitetsseparationen.



FIGUR 25. Delamineret flakes i flydefraktion.

De delvist delamineret flager i delprøven blev herefter separeret ved at trække lagene fra hinanden, hvorefter der nu kunne opnås en separation i en tung fraktion af PET og en let fraktion, som blev vurderet til at bestå af plast fra låg på flaskerne.



FIGUR 26. Separation af tung PET (tv) og let plast (th) efter manuel separation af lag i delvist delaminerede PET-flager.

Ud fra forsøgene blev det beregnet, at 84,7 % af den lette fraktion var delvist delamineret PET, mens 15,3 % var en "ægte" let fraktion fra låg med densitet $<1 \text{ g/cm}^3$). Såfremt delaminering af PET i vaskeprocessen undgås, kan der beregnes et opnået udbytte af PET på 87 %. Observeringen af tabet medførte, at der blev ændret behandlingsmetode for forsøg 15 og 18.

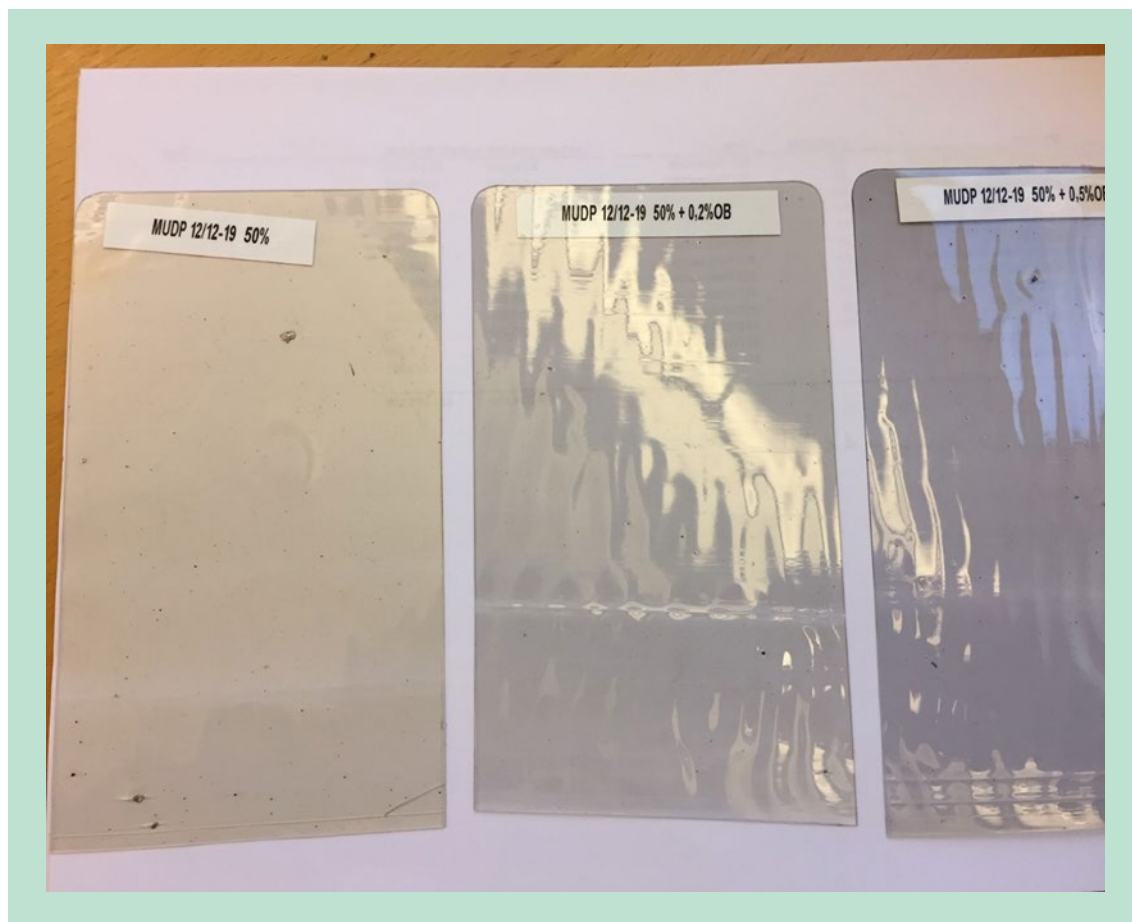
Fraktionen fra densitetsseparationen med densitet $>1 \text{ g/cm}^3$ (PET) blev benyttet til en testfremstilling ved SKY-LIGHT.

Resultatet af foliefremstilling er vist på FIGUR 27.

SKY-LIGHT konkluderede ud fra inspektion af de fremstillede folier, at:

- Tilsats af den rensede flaske-PET i op til 50 % var mulig
- Materialet gulner lidt, sandsynligvis grundet indhold af multilagsmateriale
- Der ses lidt urenheder i filmen, da materialet ikke er smeltefiltreret.

Overordnet set var resultatet positivt.



FIGUR 27. Test af oprenset flaske-PET fra Reno-Nord. Til venstre er folie vist uden tilsætning af optisk blåt, mens der i midten er tilsat 0,2 % og til højre 0,5 % optisk blåt, hvilket reducerer gulningen, så folien fremstår mere "klar".

Omsmeltningsforsøg 4

PET fra udviklingsforsøg 18 (TABEL 14), hvor der blev benyttet en mere skånsom oprensning end den benyttede til omsmeltningsforsøg nr. 2 og 3, blev renset for metal ved AVL og sendt til oparbejdning og test ved SKY-LIGHT.

Kvaliteten af PET blev vurderet til at være på et lidt højere niveau end PET anvendt til omsmeltningsforsøg nr. 2. Dog sås stadig en del urenheder og stærk gulning. Kontaminering vurderes at skyldes flerlagsmateriale, metal/alu og andre polymerer.

Vurdering af anvendelsesmuligheder

Kvaliteterne fra omsmeltningsforsøg 2 og omsmeltningsforsøg 4 (blandet PET) kan ikke anvendes til fremstilling af fødevareremballage med den nuværende lovgivning, så applikationer skal findes på nonfoodmarkedet. Transportbakker, kasser, pottebakker, fiber, strapping, opskummet PET til bygningsindustrien, emballage til kemikalier og emballage til rengøringsmidler er de produktgrupper, der vurderes at være de mest interessante anvendelser for nærværende. Transportbakker og kasser kan produceres med en lidt ringere kvalitet af PET end beholdere, til hvilke der stilles højere krav til tæthed.

Skal kvaliteterne fra omsmeltningsforsøg 2 og omsmeltningsforsøg 4 anvendes, som de er i dag, skal det være med en meget lille tilsætning, fx 10-20 %, og dette stadig med forbehold, idet langtidsvirkningerne af kørsler med materiale indeholdende flerlagsmaterialer ikke kendes ved SKY-LIGHT. Det vurderes, at der kan være en risiko for, at de forskellige smeltetemperaturer vil betyde en ophobning i cylinder og mixerzone af fx PP/PS/PE, som vil rive sig løs fra tid til anden og ødelægge produktionen.

Kvaliteten fra omsmeltningsforsøg nr. 3 (flasker) er noget bedre end kvaliteten fra omsmeltningsforsøg 2 og 4 og kan derfor anvendes med højere tilsætning. Således vil der kunne tilsættes op til 30-40 % i en normal blanding til transportbakker.

Muligheder for forbedrede kvaliteter

Kvaliteterne fra omsmeltningsforsøg 2 og 4 vurderes af SKY-LIGHT at kunne anvendes med langt større tilsætning, hvis de opkvalificeres. Det vil herunder kunne medføre en bedre PET-kvalitet, hvis det er muligt at udsortere multilagsmaterialer ved brug af tilpasset NIR-sorteringsudstyr. En sådan bedre sortering vurderes af SKY-LIGHT at ville kunne øge tilsætningen af genanvendt PET yderligere med i hvert fald 10 %.

For at preform-, fiber- og strappingproducenter skulle kunne anvende kvaliteterne, skal de oprensnes yderligere. Dette skal gøres på ekstruderingsudstyr, hvor IV-fald⁴¹ undgås. Sådanne anlæg findes i rigt antal rundt om i Europa. Til orientering har SKY-LIGHT haft kontakt til Cumapol i Holland. Cumapol skal have 350 €/ton for at omdanne det vaskede PET til regranulat med en IV på 0,8 (SSP – solid state polymerisation) – som er samme IV som for virgin PET. I denne proces fjernes der yderligere kontaminering, da der anvendes højteknologiske smeltefiltre.

5.3.8 Sort plast

Der er foretaget oparbejdning af sort plast fra Reno-Nord og ARC. Plasten er blevet neddelat og vasket i pilotvaskeren på samme vis som HDPE og PP.

Karakteriseringen af sort plast i kapitel 4 viste, at sort plast består af ca. 60 % PP fra fødevarebakker og urtepotter og lidt PE, som forventes primært at have en vægtylde $<1 \text{ g/cm}^3$. Herudover indeholder plasten PS, PET fra fødevarebakker eller blomsterbakker samt diverse teknisk, sort plast, hvor alle typer forventes at have en densitet over 1 g/cm^3 . PS vil typisk have en densitet på $1,02\text{-}1,04 \text{ g/cm}^3$ og PET en densitet på ca. $1,35 \text{ g/cm}^3$.

Det er derfor valgt at foretage en 2-trinsdensitetssortering, hvor der foretages separation i vand ved 1 g/cm^3 og i en saltopløsning ved en densitet på $1,12 \text{ g/cm}^3$.

Forsøgene er beskrevet nærmere i Bilag 4.1. Ved forsøgene blev separationsnøjagtigheden af densitetssortering bestemt ud fra en laboratoriemetode.

TABEL 15. Separationsudbytte og separationsnøjagtighed af let fraktion $<1 \text{ g/cm}^3$ og tung fraktion $>1,12 \text{ g/cm}^3$ (opgjort i procent).

Fraktion	ARC	Reno-Nord
Separationsudbytte, let fraktion $<1 \text{ g/cm}^3$	83,0	92,4
Separationsudbytte, tung fraktion $>1,12 \text{ g/cm}^3$	99,3	96,2
Separationsnøjagtighed, let fraktion $<1 \text{ g/cm}^3$	99,7	99,4
Separationsnøjagtighed, tung fraktion $>1,12 \text{ g/cm}^3$	99,3	99,7

Separationsnøjagtighederne er høje, hvilket dog ikke betyder, at fx den tunge fraktion med densitet over $1,12 \text{ g/cm}^3$ har en høj polymerrenhed af PET, da der kan være andre tunge plasttyper til stede. Ligeledes vil PP-fraktionen indeholde forurensninger af PE-materiale.

Det ses, at separationsudbyttet af den lette fraktion er 83-92 %, hvilket skyldtes, at der var en del PP med fyldstof til stede, som endte i synkefraktionen fra separation i vand.

⁴¹ IV = Intrinsic Viscosity. Dette er et viskositetsindex, som relaterer sig til molekyl længden i PET. Hvis kædelængden i PET bliver for kort til en given applikation, kan kædelængden genopbygges via polykondensation

Analyse af kvaliteten af PP i laboratoriet viste, at der er tale om et blandingsprodukt af PP (75 %) og PE (25 %). Det ret høje indhold af PE kan dels skyldes indholdet af ca. 12 % HDPE (Dansk Affalds leverandørområde, TABEL 8), dels folielag på bakker (LDPE). Analyse med DSC indikerer et indhold af både LDPE og HDPE. Kvaliteten af materialet er brugbar med en kvalitet 2-bedømmelse af streng.

TABEL 16. Mekaniske analyser af piller fremstillet af oparbejdet, sort PP-fraktion.

Materiale	MFI g/10 min	E-modul [MPa]	Brudstyrke Yield MPA	Brudstyrke brud MPA	Længdeudvi- delse, %	Slag- styrke [kJ/m ²]	Indikativ renhed DSC, %	Vurdering, streng
Sort PP	12,8	852	22,8	20,8	19,7	8,0	75	2

PP-renheden kan formentlig øges via en indledende folieseparation efter neddeling.

Inspektion af fraktionen med densitet $>1,12 \text{ g/cm}^3$ viste et indhold af metal. Samtidig blev der konstateret et indhold af gummi, herunder noget, der lignede rester fra et cykeldæk. Metal kunne fjernes med metalseparator, mens fjernelse af gummi viste sig meget vanskelig. Laboratorieforsøg viste, at gummi var til stede med flere densiteter. En let fraktion af gummi kunne frasepareres ved densiteter $<1,27 \text{ g/cm}^3$, mens en tung fraktion af gummi kunne frasepareres ved densiteter over $1,43 \text{ g/cm}^3$ (med brug af CaCl_2). Imidlertid var en del af PET-plasten delamineret grundet kraftig rensning ligesom ved omsmeltningsforsøg 3 i afsnit 5.3.7, hvorfor det ikke var muligt at foretage separationen uden et stort tab.

Det blev valgt ikke at gå videre med udsortering og oparbejdning af sort PET grundet kontamineringen med gummi.

Diskussion vedrørende muligheder for udsortering og oparbejdning af sort plast

Hvis man udsorterer en blandet fraktion af sort plast med en Steinert Black Eye eller en udviklet metode baseret på udsortering ud fra farve, vurderes det, at:

- Separation af PP-andelen af den sorte plast er mulig med brug af densitetsseparation i vand (fraktionen vil indeholde rester af PE)
- Udsortering af PET og evt. PS med densitetsseparation i saltblandinger vil kræve, at der ikke er gummi og andet plast med overlappende densitet til stede i den sorte plast.

Andre muligheder for udsortering af sort plast omfatter etablering af:

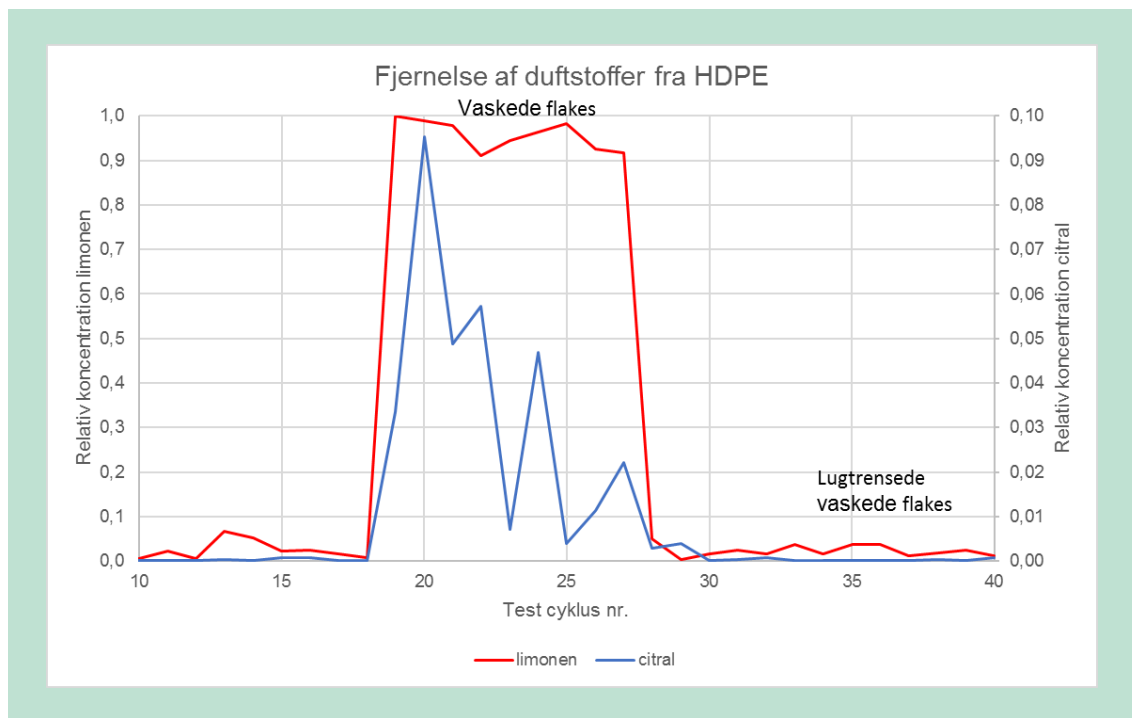
- Teknologier baseret på MIR (MidInfrared detektion) detektion, idet disse teknikker kan detektere sort plast
- Mærkningssystemer eller metoder, der kan genkende emballagen ud fra dens form/fysiske karakteristika og herved fraseparere emballagen.

5.3.9 Test med lugtrensnings

Der er i projektet udført indledende forsøg med termisk lugtrensnings. Fokus har været på rensning af HDPE, som indeholder mange blæste flasker/dunke, der fx anvendes til rengøringsmidler med parfume. Derfor dufter rensed HDPE-plast tydeligt af parfume. Parfume er fordampelige olier som fx limonen. De vil derfor kunne fjernes ved opvarmning enten af granulater eller piller. Idéen er her at fjerne duftstofferne fra rensede flakes, inden de omsmeltes, da stofferne primært bør befinde sig i overfladen på den side af en flake, der har vendt indad i emballagen. Hvis plasten først er omsmeltet, bliver duftstofferne fordelt i al plasten og bliver vanskeligere at fjerne, da der vil være en længere diffusionsvej (fjernelse styres af Ficks 1. lov $J = -D \cdot dc/dx$, hvor J er flux, D er temperaturafhængig diffusionskoefficient, dc er koncentrationsændring hen over laget, hvor duftstoffet findes, og dx er tykkelsen af laget).

Der blev udført et indledende forsøg med termisk rensning af henholdsvis vaskede HDPE-flakes og termisk rensning af fremstillede ekstruderede piller fra vaskede flakes med valgte rensbetingelser (temperatur, opholdstid mv.)

Test af lugtrensnings-effekt blev målt af Teknologisk Institut med en udviklet hurtigmetode baseret på PTR-MS og en headspaceanalyse.



FIGUR 28. Test af lugtrensningseffekt med PTR-MS.

Figuren viser en kraftig reduktion i koncentrationen af limonen efter lugtbehandling af vaskede flakes. Citral viser en tilsvarende effekt i reduktion ved lugtbehandling, men her er koncentrationen ca. 10 gange lavere, hvorfor der er mere støj på målingerne.

Reduktionen i koncentrationen af parfumestofferne limonen og citral ved termisk lugtbehandling af flakes blev beregnet til 97-99 % og af ekstruderede piller til 89-90 %.

Videreudvikling af lugtrensningsteknologi forventes at kunne udvide anvendelsesområderne af plasten betragteligt, fx som emballage til fx rengøringsmidler og vaskepulver og om muligt også til kosmetik.

6. Opbygning og test af oparbejdningslinje

6.1 Opbygning

Opbygningen af oparbejdningslinjen er baseret på udviklingen af procesenheder som beskrevet i kapitel 5. I projektet var det planlagt at opbygge en oparbejdningslinje med en størrelse, så der kunne opstilles en realistisk businesscase, samtidig med at effektiviteten af de nyudviklede enheder kunne verificeres. Oparbejdningslinjen er en prototype eller "testoparbejdningslinje", hvor de udviklede metoder til oparbejdning kan testes i fuld skala.

Anlægget blev bygget op efter princippet vist på FIGUR 29. Ideen var kun at udvikle udstyr til selve vaske- og densitets-sorteringsprocessen, da de øvrige processer, som kræves for at oparbejde plast, findes ved AVL som enkeltprocesser med mulighed for at afprøve forskellige driftsformer for hver delproces (fx neddeling og ekstrudering). Flowet i anlægget er, som principskiten viser, at det forurenede materiale først vaskes for så derefter at blive densitetssorteret og til sidst blive tørrenset og tørret.

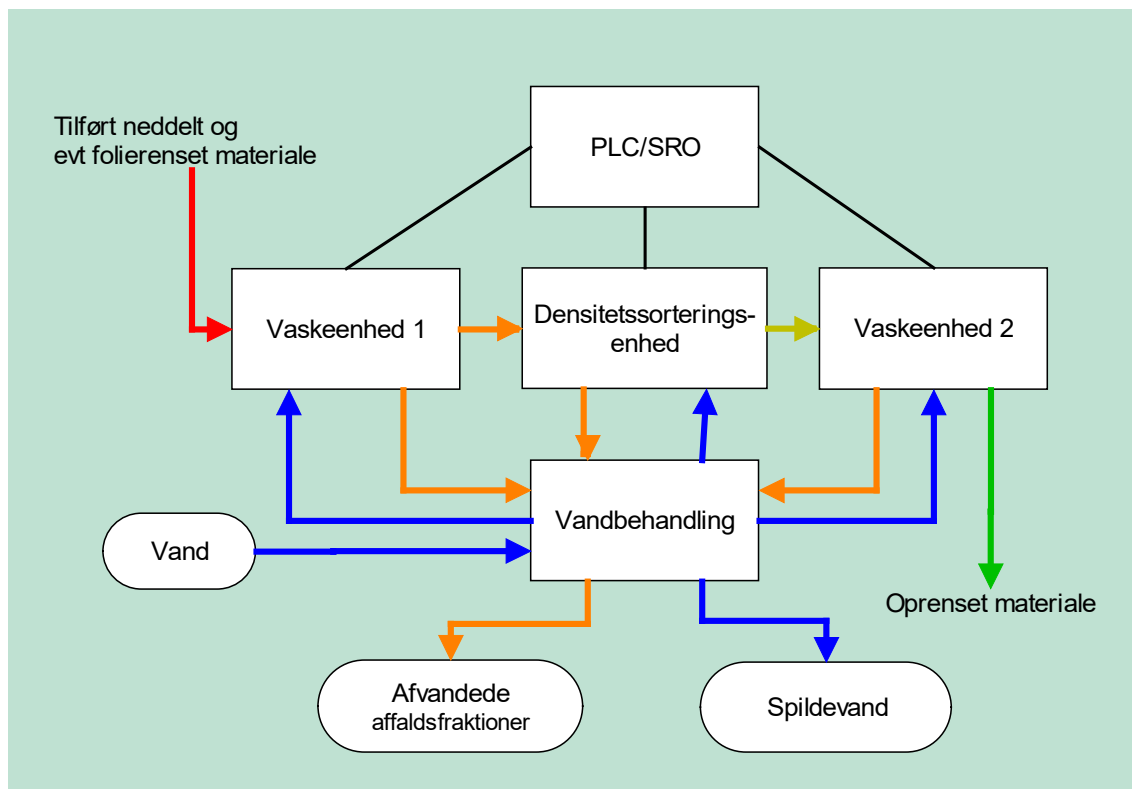
Den udviklede pilotvasker (se kapitel 5) blev opskaleret til en kapacitet på nogle få hundrede kg pr. time ud fra de tidligere opnåede resultater. Under videreudviklingen blev der foretaget flere ændringer i design af de enkelte komponenter.

Udviklingen af densitetssorteringsenheden skete som led i etableringen testanlægget - se nærmere i afsnit 5.2.2.

Oparbejdningslinjen blev opbygget af tre hovedkomponenter i vaskeenhed 1, densitetssorteringsenhed og vaskeenhed 2, som via interne transportsystemer bevirker, at det kan fungere som et samlet anlæg. Se FIGUR 30 og FIGUR 31. Herudover er udviklet en integreret spildevandsrensning.

De enkelte enheder blev designet som lukkede enheder, hvilket vil sige, at processerne sker i lukkede kamre, så udledning af lugt, dampe og eventuelle mikroorganismer begrænses mest muligt af hensyn til arbejdsmiljøet. Vandbehandlingen, som baseres på bæltefiltre fra AL-2 er tilkoblet procesenhederne med lukkede transportsystemer til og fra anlægget for at fjerne eksponeringen af bl.a. mikroorganismer til omgivelserne. Der er i forbindelse med etableringen af testanlægget ansøgt en miljøgodkendelse ved Mariagerfjord Kommune.

Der blev udviklet en central PLC-styring med en overordnet SRO og flere udviklede algoritmer til at styre og regulere anlægget, så det kan fungere som en samlet enhed, der processerer materialet selvstændigt.



FIGUR 29. Princip i oparbejdningslinje. Rød pil er det urensede input, orange pile er delvist rensset materiale eller affald. Grønne pile er rensset eller næsten færdigrensset materiale. Blå pile er vandige strømme.



FIGUR 30. Oparbejdningslinje.



FIGUR 31. Oparbejdningsslinje.

6.1.1 Rensning af spildevand

Fra vaskeprocessen opstår slam og væske, som skal håndteres inden bortledning som henholdsvis spildevand og brændbart affald. Fra densitetssorteringen opstår ligeledes frasorteret materiale i form af en synkefraktion, som også skal håndteres. I samarbejde med AL-2 blev der udviklet et setup til dette formål (se også afsnit 5.2.3 og afsnit 5.3.5 vedrørende udstyr og indledende test).

For at udnytte vandforbruget på bedst mulig måde blev der udviklet et system med et vandflow, som ledes modsat materialestrømmen i anlægget. På denne måde tilsættes rent vand i outputenden, hvorefter vandet bevæger sig mod flowretningen mod inputenden på anlægget.

Til rensning af vand, som recirkuleres i anlægget, og rensning af spildevand inden udledning, blev der opbygget et filterarrangement bestående to båndfiltre fra AL-2.



FIGUR 32. Filtrering af slam fra vaskeprocessen (tv). Frafiltrering af væske fra synkefraktion fra densitetssortering (th).

Efter endt udvikling og installation af spildevandsrensningen blev de forskellige materialestrømme testet i fuldskala på oparbejdningslinjen.

Ved oparbejdningen af HDPE og PP viste anlægget gode resultater både med hensyn til kvalitet og forbrug af el og vand. Resultaterne af test er beskrevet i afsnit 6.2.

Oparbejdningslinjen er ikke designet til håndtering af PET, hvorfor PET i projektet primært oparbejdes med brug af vaskeenheden i pilotskala og med manuelle densitetsseparationsmetoder. Behandling af PET blev dog alligevel testet på oparbejdningslinjens vaskeprocesser, som fungerede tilfredsstillende, mens densitetssorteringen ikke var designet til at kunne håndtere, at hovedfraktionen er en synkefraktion som ved densitetssortering af PET. Det var dog muligt at processere PET-plasten, om end med meget lavt output.

6.2 Test og demonstration af oparbejdningslinje

Enhederne i oparbejdningslinjen blev testet individuelt inden samlet test af oparbejdningslinjen.

6.2.1 Vaskeenheder

Vaskeenhed 1 blev indledningsvis testet som kombineret vaske- og tørreenhed, inden den blev sammenkoblet med resten af anlægget.

Testen omfattede vask og tørring af ca. 2*200 kg HDPE fra Nomi4s på vaskeenheden for at bestemme tab af tørstof med spildevandet. Tabet var så lille, at det ikke var målbart inden for usikkerheden (henholdsvis 1,4 % tab og -0,5 % tab).

Der blev herefter opbygget en vaskeenhed 2 efter samme principper som vaskeenhed 1, men med fokus på at skulle benyttes til tørrensning og tørring.

6.2.2 Test af densitetssortering

Densitetssortering af PP

Der er udført en separat test af densitetssorteringsenheden med to gange oprenset PP fra Reno-Nord, som blev vasket på oparbejdningslinjens vaskeenhed 1 inden overførsel til densitetssorteringsenheden.

Der blev udtaget prøver af input til densitetssorteringsenheden samt af de fraseparerede flyde- og synkefraktioner.

I TABEL 17 er vist bestemmelse af separationsnøjagtighed og separationsudbytte med metoden beskrevet i Bilag 4.2. Tabellen viser, at der er 87,5 % af det tilførte materiale (input), som kan flyde i vand i en laboratorietest. Af flydefractionen fra densitetssorteringsenheden er 98,7 % en fraktion med densitet $<1 \text{ g/cm}^3$, mens 1,3 % er en fraktion med densitet $>1 \text{ g/cm}^3$, som er partikler, der blevet revet med af den opadgående strøm af lette partikler i densitetssorteringsenheden. På samme vis er det ved analyse fundet, at 92 % af synkefraktionen er partikler med densitet $>1 \text{ g/cm}^3$, mens 8 % er med densitet $<1 \text{ g/cm}^3$, som er blevet medrevet af de nedadgående partikler i densitetsseparationen.

TABEL 17. Bestemmelse af separationsnøjagtighed ved separation af PP udført ved en densitet på 1 g/cm^3 hos AVL (opgjort i procent).

Fraktion	Input	Flydefraktion	Synkefraktion
$< 1 \text{ g/cm}^3$	87,5	98,7	8,0
$> 1 \text{ g/cm}^3$	12,5	1,3	92,0

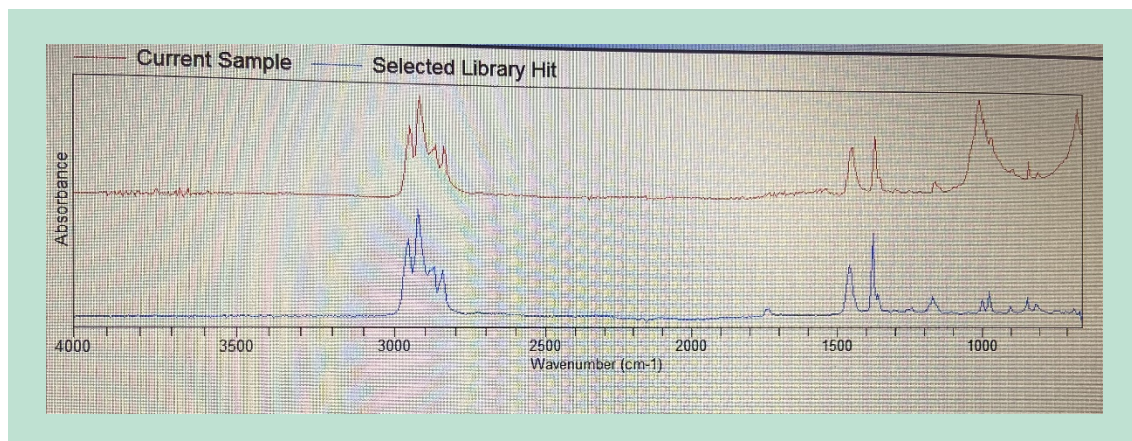
I TABEL 18 er vist beregnet separationsudbytte og separationsnøjagtighed - se definition og beregninger i bilag 3.2.

TABEL 18. Separationsudbytte og separationsnøjagtighed af flydefraktion $< 1 \text{ g/cm}^3$ og synkefraktion $>1 \text{ g/cm}^3$.

Fraktion	PP R-N 2X %
Separationsudbytte, flydefraktion $<1 \text{ g/cm}^3$	98,9
Separationsudbytte, synkefraktion $>1 \text{ g/cm}^3$	90,8
Separationsnøjagtighed, flydefraktion	98,7
Separationsnøjagtighed, synkefraktion	92,0

Separationsnøjagtigheden af produktfraktionen (flydefractionen) bestemt ud fra metoden til kontrol af densitetssortering (Bilag 4.2) er høj (98,7 %), ligesom separationsudbyttet er højt (98,9 %).

Sammensætningen af synkefraktionen blev estimeret ud fra FTIR (et eksempel for PP er vist på FIGUR 33).



FIGUR 33. FTIR-analyse af hvid PP-flake fra synkefraktion. Der observeres indhold af fyldstof (talkum), se rød kurve øverst ved peak omkring 1000 og 700 cm⁻¹.

De 8 % flydefraktion (<1 g/cm³) består hovedsageligt af små partikler af PP, mens de 92 % i synkefraktionen (>1 g/cm³) består af ca. 53 % PET, 24 % PP med fyldstofindhold (se FIGUR 33), 4 % PS, 3 % metal og ca. 15 % anden plast.

Ud fra data er det i Bilag 4.2 beregnet, at der mistes 4,3 % polyolefiner af enten HDPE eller PP, hvoraf 75 % skyldes, at nogle producenter tilsætter fyldstof i emballagerne. Det konstateres således, at man anvender fyldstof i nogle PP-emballager, hvorved disse mistes i densitetssorteringen.

På FIGUR 34 er vist de frasorterede PP-partikler med fyldstof. De mørkegrønne partikler vurderes at være fra en fødevarerebakke.



FIGUR 34. Frasorteret PP med fyldstoffer fra tung fraktion.

Densitetssortering af PET

Densitetssorteringsenheden er ikke designet til oparbejdning af PET som hovedprodukt. Der blev dog foretaget et forsøg med densitetssortering af vasket PET fra udviklingsforsøg nr. 18 - se kapitel 5.3.3. Forsøget blev gennemført med kraftigt sænket fødningshastighed for at kunne gennemføre testen.

Analyseresultater af udtagne prøver er vist i Tabel 22.

TABEL 19. Bestemmelse af separationsnøjagtighed ved separation af PET ved 1 g/cm³ ved AVL (opgjort i procent).

Fraktion	Input	Flydefraktion	Synkefraktion
< 1 g/cm ³	11,5	99,7	1,1
> 1 g/cm ³	88,5	0,3	98,9

I TABEL 20 er vist beregnet separationsudbytte og separationsnøjagtighed - se definition og beregninger i Bilag 4.2.

TABEL 20. Separationsudbytte og separationsnøjagtighed af flydefraktion < 1 g/cm³ og synkefraktion >1 g/cm³.

Fraktion	PET NOMI4s udviklingsforsøg nr. 18 i %
Separationsudbytte, flydefraktion <1 g/cm ³	92,3
Separationsudbytte, synkefraktion >1 g/cm ³	99,97
Separationsnøjagtighed, flydefraktion	99,7
Separationsnøjagtighed, synkefraktion	98,9

Det ses, at separationsudbytte og separationsnøjagtighed for produktfraktionen PET er meget høj. Det skal her bemærkes, at det var nødvendigt at operere med væsentligt reduceret hastighed for at kunne foretage densitetssorteringen af PET, hvorfor udbytte og separationsnøjagtighed forventes lidt lavere ved drift ved normal tilførselshastighed.

6.2.3 Test af spildevandsrensning

Der er foretaget en test på det spildevand, som passerer filterdugen i spildevandsrensningen efter en stabil driftsperiode med rensning af tilført plast.

Analysen viser et tørstofindhold på 0,8 % med et askeindhold på 45 % på tørstofbasis. Heraf kan estimeres et organisk indhold i spildevandet på ca. 0,4 % (indholdet er primært organisk smuds som ketchup, mayonnaise, olier og små partikler, som passerer filterdugen, herunder små partikler af plast <300 µm).

I forbindelse med projektet ansøgte AVL Mariagerfjord Komme (MFK) om miljøgodkendelse til gennemførelse af projektet, da der i projektet arbejdes med affald. I den forbindelse blev det aftalt med MFK, at AVL skulle foretage en spildevandsanalyse af spildevandet fra oparbejdningslinjen ud fra specifikationer fastsat af MFK. Disse analyser er sendt til Mariagerfjord Vand (MFV), som driver det lokale rensningsanlæg i området. Konklusionen af analyserne er, MFV kan håndtere spildevandet, men der foregår en løbende dialog med MFV vedrørende mulighederne for etablering af yderligere rensning.

6.2.4 Performancetest og demonstration af oparbejdningslinjen samt kvalitet af produceret HDPE og PP

Der er foretaget en række driftstest samt performancetest på oparbejdningslinjen med behandling af henholdsvis HDPE og PP fra de forskellige kilder og sorteringsanlæg.

For HDPE og PP er udført performancetest på opbygningslinjen, hvor strøm og vandforbrug blev målt for en given mængde fremstillet tørret plastgranulat. I det samlede strømforbrug er indregnet AVL's normale energiforbrug ved neddeling, således at strømforbruget dækker den fulde oparbejdning til rensede flakes.

Data fra performancetest er vist i TABEL 21.

TABEL 21. Resultat af performancetest.

Parameter	HDPE	PP
Outputmængde af produkt, kg	831	1.144
Beregnet samlet strømforbrug til oparbejdning kW/ton output	209,7	210,5
Vandbrug liter/kg plast	0,76	0,84

Vandforbruget er omkring 0,8 liter pr. kg plast, hvilket vurderes lavt i forhold til typiske, moderne udenlandske anlæg⁴².

Der er foretaget ekstrudering til piller med smeltefilter, mesh 14/88 (ca. 150 µm maskevidde) af den oparbejdede HDPE og PP.

Pillerne blev analyseret i laboratoriet ved AVL med henblik på bedømmelse af materialekvaliteten. Resultater af analyserne er summeret i Tabel 22.

DSC-kurver⁴³ er vist på FIGUR 35 og FIGUR 36, mens FTIR-kurver⁴⁴ er vist på FIGUR 37 og FIGUR 38. Det ses, at der kun er små spor af henholdsvis PE-forurening i PP og PP-forurening i PE.

Tabel 22 Analyser af piller fra performancetest med HDPE og PP fra de deltagende anlæg.

Forsøg	MFI g/10 min	E-modul MPa	Brudstyrke Yield MPA	Brudstyrke brud MPA	Længdeudvi- delse i %	Slagstyrke kJ/m ²	OIT min	Indikativ renhed DSC, %	Vurdering, streng
HDPE Mix ⁴⁵	1,5	498	12,9	22,2	171	22,9	0,7	95	2
PP Mix ⁴⁶	15	913	21,0	25,7	21	7,4	1,7	98	2

I Tabel 22 er også vist OIT-målinger⁴⁷, som viser en meget lille restkapacitet af iltabsorbenter. Dette betyder, at plasten formentlig skal tilsættes iltabsorbenter, hvis den skal recirkuleres flere gange uden at blive nedbrudt, men dette er også muligt mod en mindre meromkostning ved oparbejdningen.

På FIGUR 35 og FIGUR 36 ses DSC-kurver, hvorfra er estimeret renhed i Tabel 22.

⁴² I J. Hopewell et al., Phil.Trans.R.Soc.B (2009), v364,p.2115-2126 angives et typisk vandforbrug på 2-3 l/kg plast for moderne vaskeanlæg

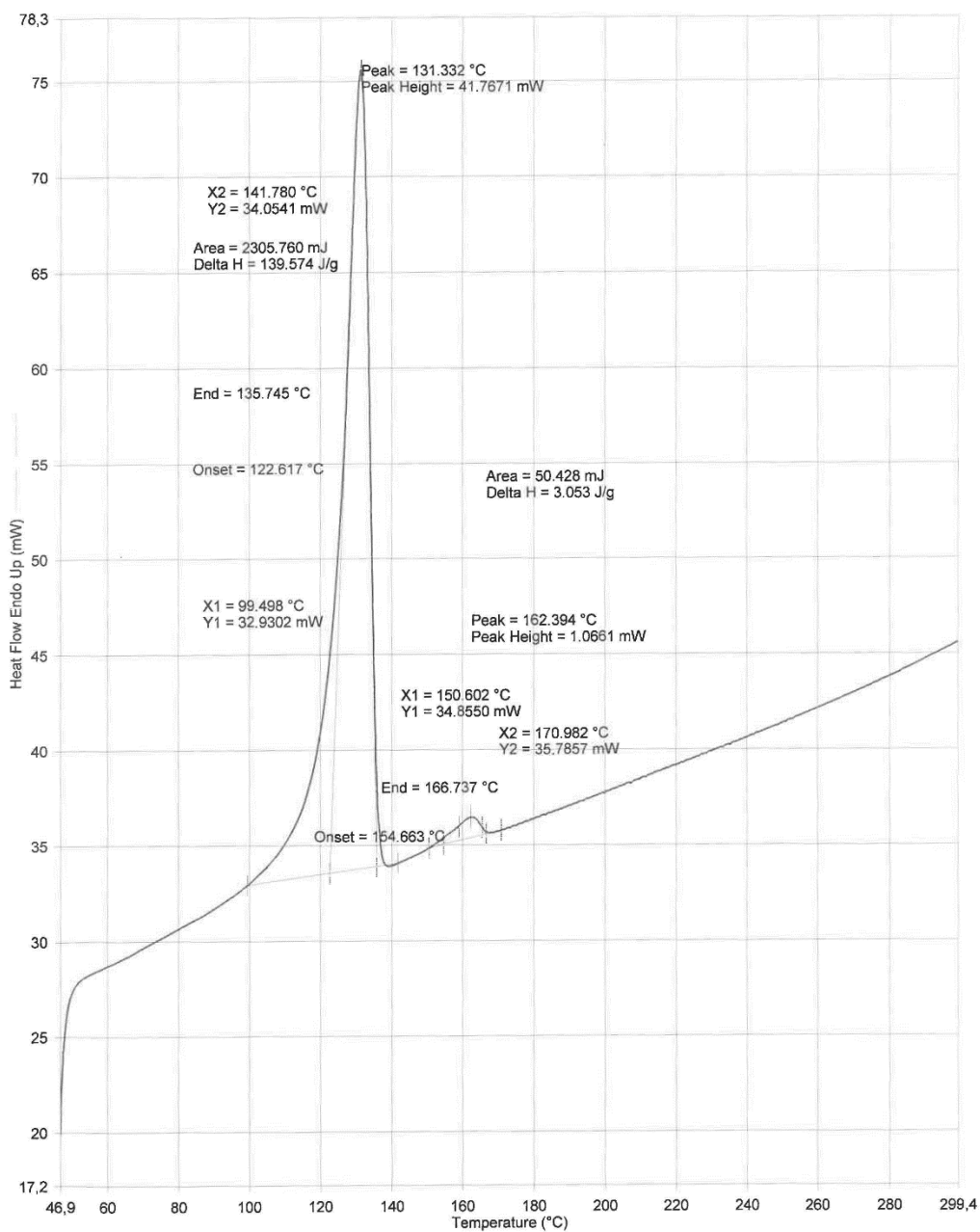
⁴³ Differentiel skanningskalorimetri

⁴⁴ Fourier transformeret infrarød spektroskopi

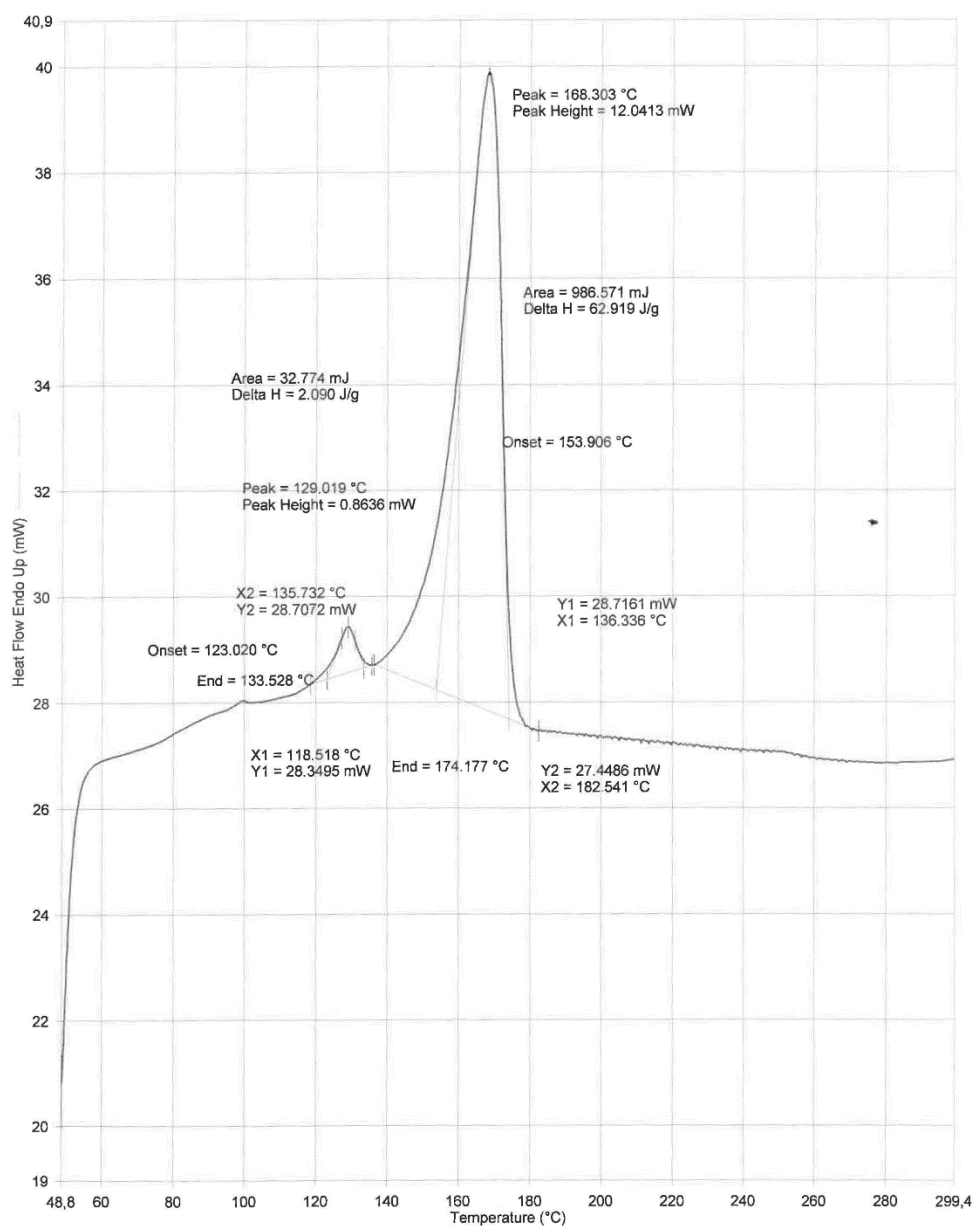
⁴⁵ Producerede piller af HDPE er en blanding af ekstruderet oprenset HDPE fra de enkelte anlæg

⁴⁶ Producerede piller af PP er en blanding af ekstruderet oprenset PP fra de enkelte anlæg

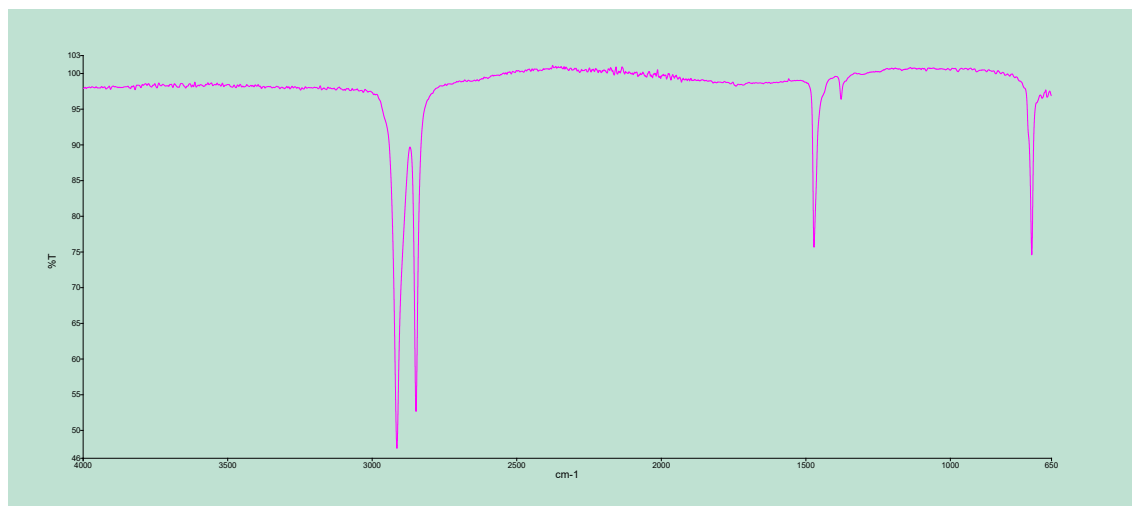
⁴⁷ Oxidation induction time



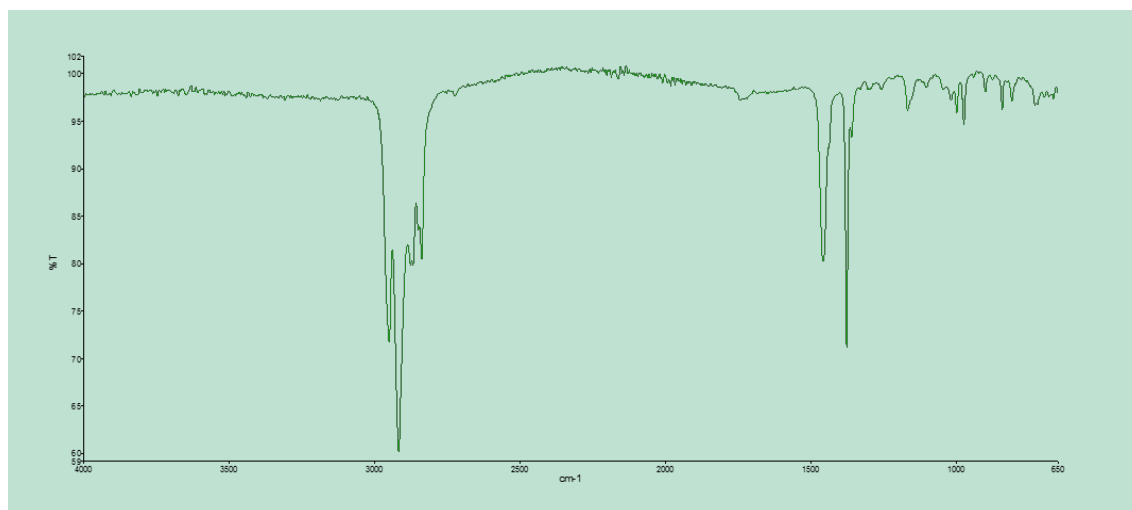
FIGUR 35. DSC-analyse for HDPE. Den høje peak ved 131 °C er HDPE. Der ses lidt PP ved den lille peak ved 162 °C (estimeret til 5 % hvoraf beregnes en renhed af HDPE på 95 %).



FIGUR 36. DSC-analyse for PP. Den høje peak ved 168 °C er PP. Der er lidt PE ved den lille peak ved 130 °C (estimeret til 3 %, hvoraf beregnes en renhed af PP på 97 %).



FIGUR 37. FTIR-analyse for HDPE. Der ses en lille forurening med PP ved 1370 cm⁻¹.



FIGUR 38. FTIR-analyse for PP. Der ses en lille forurening af PE ved 720 cm⁻¹.

I TABEL 23 er vist estimerede udbytter for oparbejdningslinjen baseret på udviklingsforsøgene samt test af tab for vaskeenhed 1 og densitetssorteringsenhed i oparbejdningslinjen.

TABEL 23. Estimerede udbytter for oparbejdningslinje ved behandling af polymeroprenset HDPE og PP fra de deltagende anlæg.

Parameter	HDPE	PP
Udbytte af polyolefin af tilført mængde, %	91-95	88-92
Renhed af polyolefiner ⁴⁸ , %	93-98	87-99

⁴⁸ Renheden er angivet som den bestemte variation opnået ved oparbejdning for de deltagende anlæg. Urenhederne er udelukkende PE i PP eller PP i PE

Det skal bemærkes, at udbytte i tabellen opgøres ud fra indhold af hård plast (uden forurening og vand) i tilført neddelt materiale.

Man kan også foretage en beregning af, hvor stort et tab der opstår fra indvejet vægt til slutprodukt, hvilket dog ikke er direkte relateret til plastudbyttet, da indhold af vand og organiske urenheder indgår. Beregning medtages her for at illustrere, hvor meget der forsvinder af det tilførte materiale, hvis man kun ser på den indvejede, modtagne mængde. Baseret på forsøgsresultater estimeres det, at der sker et vægttab fra de neddelte, fugtige, urensede plastflakes til slutproduktet (vaskede tørrede flager) på ca. 15 % for HDPE og 20 % for PP. Vægttabet omfatter tab af fugt, organisk forurening, finpartikulær plast, som frasepareres i spildevandsrensning, og tung plast, som frasepareres i densitetssorteringen. Selve plasttabet ved oparbejdningen til vaskede, tørrede flakes vurderes ud fra resultaterne at være ca. 4 % for HDPE og ca. 7 % for PP.

Vandforbruget til oparbejdningen har samtidig kunnet holdes på ca. 0,8 l/kg, hvilket er et meget tilfredsstillende resultat.

6.2.5 Fremstilling af testemne af HDPE

Kvaliteten af det producerede HDPE fra oparbejdningsslinjen er demonstreret i slutningen af projektet ved fremstilling af et flaskeblæst testemne i form af en dunk. Resultatet af demonstrationen viste, at materialets mekaniske egenskaber var tilfredsstillende.

En dunk som den fremstillede vil dog kun have en begrænset anvendelse til enkelte kemiske produkter som motorolie og lignende. For at anvende materialet til et bredere formål skal materialet yderligere renses og gennem forskellige migrations-tests, hvilket ikke var muligt i nærværende projekt



FIGUR 39. Fremstillet testemne i form af dunk.

7. Undersøgelse af udenlandske erfaringer med oparbejdning af PET-fraktioner

I dette kapitel opsummeres udenlandske erfaringer med oparbejdning af fx bakke-PET, PET til tekniske emballager og multilagsemballager, hvori PET indgår.

Det er en udfordring at udnytte alle PET-fraktioner. PET fra flasker er i mange år blevet indsamlet og oparbejdet på særlige anlæg i Europa, mens der har manglet oparbejdningstilbud for fraktionen af bakker.

Der er gennem årene sket og sker fortsat en stigning i anvendelsen af PET til emballage. Hermed er der også sket en stigning i PET-mængderne i affald fra husholdningerne.

7.1 WRAP-rapport: Developing End Markets For PET Pots, Tubs and Trays

I en WRAP-rapport⁴⁹ har man undersøgt mulighederne for at oparbejde bakkefraktionen, og man har fokuseret på oparbejdning af klare bakker fra husholdningsaffald.

I et forsøg ved Closed Loop Recycling, hvor der blev forsøgt oparbejdet 2 tons materiale, blev der konstateret et meget lavt udbytte på 25 %. Det lave udbytte tilskrives i rapporten, at materialet sammenlignet med flaske-PET er mere sprødt og neddeles til finpartikulært materiale, som medfører tab i alle oparbejdningstrin og specielt i neddelings- og vasketrin.

Ifølge rapporten er lignende observationer gjort ved forsøg i Frankrig og Italien, hvilket indikerer, at den vaskemetode, der normalt anvendes til PET-flasker, skal modificeres ved vask af PET-bakker for at reducere tab i vaskeprocessen.

Endvidere blev der konstateret håndteringsproblemer under vask/oprensning, idet noget materiale fra bakker er mere tyndvægget (folielignende) end plast fra flasker.

Endelig var det nødvendigt at foretage ekstra oprensning for PVC, da indholdet var 2.600 ppm, hvilket vurderedes at kunne medføre misfarvning og beskadige oparbejdningssystemet. Indholdet blev reduceret til 600 ppm ved brug af flake-sorterer, som fraseparerer indhold af PVC ud fra NIR-detektion.

IV-indekset (Intrinsic Viscosity) blev hævet til ca. 0,82 med en SSP-proces (Batch Solid Polymerisation), som er opvarmning af PET i kvælstofatmosfære til en temperatur, hvor polymerisering forløber. Målet var at opnå en egnet kvalitet til fremstilling af både film og flasker.

Semifleksibel folie

Forsøg hos firmaet Anson viste, at man kunne producere semifleksibel folie med 10 % og 25 % tilsats af regenerat. Ved 10 % tilsats af regenerat kunne der konstateres en mindre ændring af gennemsigtighed og gulning af folien. Ved 25 % tilsats af regenerat var den manglende gennemsigtighed og gulningen mere udtalt, og folien er således mindre velegnet til fremstilling af klare emballager.

⁴⁹ Wrap Developing End Markets For PET Pots, Tubs and Trays March 2015

Blæsestøbning

I projektet blev også fremstillet sorte, blæsestøbte beholdere til fødevarerindustrien med 25 % tilsats i tilfredsstillende kvalitet ved firmaet RPC, Blackburn. Beholderen er dog ikke egnet til direkte fødevarekontakt, og fødevarerne skal derfor emballeres i fx plastfolie, inden de placeres i beholderen.

Fibre til geotekstil

Der blev hos firmaet Wellman i Irland fremstillet geotekstil i en tilfredsstillende kvalitet; dog kun med brug af en tilsats af oprenset PTT⁵⁰ PET på 2 %.

Ekstrudering til rør

Der blev hos firmaet Polypipe fremstillet ekstruderede afløbsrør med 70 % regenereret-PET, 20 % HDPE fra genanvendte HDPE-flasker og 10 % kompatibilizer. Rørene overholdt dog ikke helt de ønskede krav. De krav, der ikke kunne overholdes, omhandler blandt andet slagfasthed ved 0 °C.

Fremstilling af letvægtspaller

Hos firmaet MBM i Tyskland blev paller med blandinger af regenereret PET, regenereret HDPE og kompatibilizer fremstillet i tilfredsstillende kvalitet.

7.2 Sortering af PET-bakker fra PET-flasker

Der er i dag udviklet sorteringsmaskiner, som kan sortere PET-flasker fra PET-bakker. Et sådant udstyr kan fx leveres af Tomra (Tomra Sharp Eye) og Steinert Unisort PR med hyperspektralt kamera-teknologi. Steinert har siden 2015 haft teknologien (baseret på små forskelle i NIR-spektre) installeret ved fx et SUEZ-sorteringsanlæg i Rotterdam.

7.3 Oparbejdning af bakker

På den hollandske virksomhed 4PET RECYCLING ejet af Færch A/S (herefter benævnt Færch) er i 2018 etableret en linje til oparbejdning af PET-bakker, som fx leveres fra anlæg som Suez i Rotterdam.

Produktet er et rensat, omsmeltet granulat med justeret IV-index til brug for produktion af fx nye bakker.

7.4 Fremstilling af bakker af genanvendt PET hos Færch

I perioden december 2017 til februar 2018 blev der gennemført et forsøg med oparbejdning af genanvendt PET til bakker.⁵¹

Københavns Kommune indsamlede og NIR-sorterede husstandsindsamlet PET inklusive farvet PET (ca. 300 kg).

Materialet blev vasket og neddelt hos AVL, hvorefter materialet blev oparbejdet hos Færch, hvor det blev processeret på en normal produktionslinje, som har en ydelse på 2.000 kg pr. time. Den indsamlede og NIR-sorterede mængde på 300 kg var imidlertid så lille, at det var nødvendigt at tilsætte Færchs normalt anvendte PET-råvare, der består af regenereret PET – primært fra flasker. Det fremgår ikke af notatet⁵¹, hvor stor en andel af det materiale, der blev oparbejdet til bakker, der udgøres af flaske-PET.

Testmaterialets kvalitet hindrede en effektiv produktion. Materialet indeholdt for store mængder papirlabels og metal.

Erfaringer fra dette forsøg viser, at for at kunne producere i større skala skal sorteringen hos Københavns Kommune og rensningen af PET hos AVL forbedres.

⁵⁰ PTT: Pots, Tubs and Trays

⁵¹ Arbejdsgruppe 5: Genanvendelse af plast fra husholdninger, Forum for cirkulær plastemballage

8. Aktiviteter ved sorteringsanlæg

Der er udført særskilte aktiviteter som skal støtte op om indsatsen for at øge udsorteringen og genanvendelsen af polymaterialer hos sorteringsanlæggene.

8.1 Reno-Nord

Reno-Nord blev idriftsat november 2016. I MUDP-projektet Flexisort⁵², april 2019 blev der arbejdet med udvikling af ny teknologi og nye metoder i forbindelse med etableringen af anlægget. I begyndelsen af nærværende projekt blev der foretaget udsortering af materialer med det oprindeligt leverede anlæg. I 2019 blev der foretaget en ombygning og tilpasning af anlæg og drift, så sorteringen kunne udføres med den af anlægsleverandøren lovede kapacitet og med færre driftsudgifter.

Ombygningerne omfatter:

- Aflæsningsforhold for plast/metal er forbedret indendørs med større kapacitet. Der læsses af på gulvet for inspektion af uønskede materialer og doseres i silo med truck.
- Poseåbneren er udskiftet til en anden model, som fungerer væsentligt bedre og skaber et bedre flow gennem anlægget.
- Det er muligt at justere hastigheden på bånd til sorteringskabinen.
- I sorteringskabinen er der etableret mulighed for at aktivere et kort stop, så uønskede emner kan fjernes fra transportbåndet.
- Metaltragte til manuel frasortering er foret med gummi for at minimere støj.
- Skivefilteret efter sorteringskabinen er ændret til mindre skiver på den første del. Nedenunder er der et magnetbånd, der frasorterer småt, magnetisk materiale (kapsler, søm, skruer, patroner m.m.). Udtagning af de små metaldele minimerer ødelæggelsen af bånd videre i processen.
- Windshifter til fjernelse af plastfolie (plastposer mv.) er ændret til en større model.
- Neddeler er ændret til en større model. Det neddelte materiale føres direkte tilbage til linjen uden at optage kapacitet i siloen igen.
- Derudover er der sat flere sensorer på båndene, så propper undgås, og driftstiden optimeres. Restaffald/fejlsortering fra NIR-scannerlinjen kører nu direkte til autokomprimator med fuldmeldersystem, så der kan køres med anlægget, selvom containeren tømmes. Dette sparer desuden en del tømninger af containere. Der er også foretaget en ombygning af NIR-sorterernes afgang.
- Derudover er en række bånd udskiftet til metalbånd, som kræver mindre vedligehold.

Der er i nærværende projekt arbejdet med bestemmelse af renhed og udbytte for de forskellige procesenheder på den ombyggede linje.

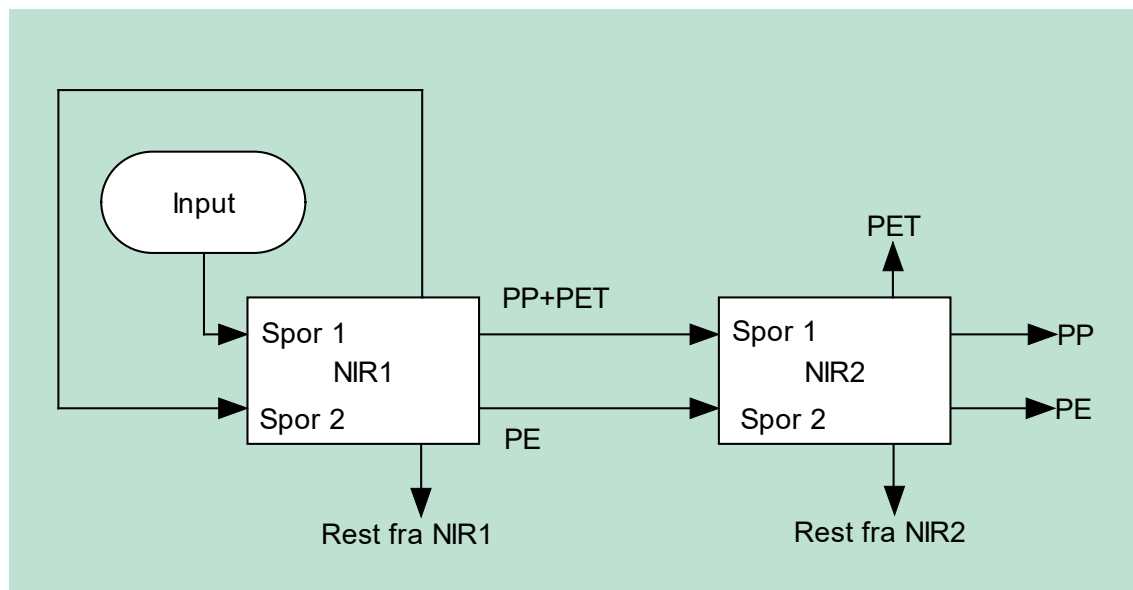
For at kunne bestemme udbytte og renhed blev der udført et sorteringsforsøg i november 2019 med 1.000 kg tilførte materialer fra et område med enfamilieboliger og rækkehuse i Aalborg og Gug (i alt 428 husstande). Inden forsøget blev gennemført, blev anlægget rengjort, og alle outputfraktioner fjernet eller afspærret, så alle outputs fra sorteringsforsøget kunne opsamles.

⁵² Flexisort: Udvikling af regionalt cirkulært genanvendelseskoncept til indsamlet hård plast, plastfolie og metal i Nordjylland, MUDP-rapport, april 2019



FIGUR 40. Tilførte materialer.

Ved sorteringsforsøget blev der benyttet en anden opsætning af NIR-sortererne end under den indledende karakterisering (kapitel 4) Opsætningen er vist på FIGUR 41 og i TABEL 24. Materialet tilføres NIR1, spor 1, hvor der udsorteres på PP og PET i NIR1. Ved NIR2, spor 1 udsorteres PP. Restfraktionen fra NIR2, spor 1 er PET-fraktionen, som ledes direkte ud for sig. Dette kunne ikke lade sig gøre i den tidligere opbygning, hvor resten fra NIR1, spor 1 blev ledt sammen med rest fra NIR2, spor 2. Restfraktionen fra NIR1, spor 1 ledes til NIR1, spor 2, hvor der udsorteres PE, efterfulgt af udsortering af PE i NIR2, spor 2.



FIGUR 41. Kobling af NIR-sorterere.

TABEL 24. Opsætning af NIR-sorterere ved Reno-Nord.

NIR1 (spor)	Udsortering NIR1	NIR2 (spor)	Udsortering NIR2	Produkter
Spor 1	PP+PET	Spor 1	PP	PP 2X
Spor 2	PE	Spor 2	PE	PE 2X

Alle fraførte fraktioner fra anlægget blev vejet og analyseret for indhold af materialer med deltagelse af Teknologisk Instituts materialeeksperter. Der blev sorteret i fraktionerne:

- HDPE (ikke-sort)
- PET (ikke-sort)
- PP (ikke-sort)
- PS (ikke-sort)
- PVC (ikke-sort)
- Sort plast
- Uidentificeret plast (ikke-sort)
- Sammensat/teknisk plast (ikke-sort)
- Plastfolie
- Jern
- Aluminium
- Kobber/messing etc.
- WEEE
- Papir/pap
- Affald <20 mm (fx organisk affald og tekstiler)
- Affald >20 mm (fx organisk affald og tekstiler).

Der blev genfundet 961 kg, hvilket er i overensstemmelse med de tilførte 1.000 kg, inden for 4 %. Ud fra karakteriseringen af alle outputs kan der beregnes følgende sammensætning af det tilførte materiale.

TABEL 25. Beregnet sammensætning af tilført materiale i 2019 sammenholdt med undersøgelsen gennemført i 2017.

Indhold	% (november 2019)	% (enfamilieboliger marts 2017, Flexisort ⁵²)
Folie	22,5	21,9
Jern	19,3	16,8
Aluminium	5,7	5,9
Kobber/messing	0,5	
WEEE	1,8	1,2
HDPE	7,6	6,8
PET	13,3	12,5
PP	6,7	6,7
PS	0,5	0,5
PVC	0,3	0,3
07-mærket plast	0,1	
Uidentificeret plast	0,3	
Sammensat/teknisk plast	4,5	3,4
Sort plast	6,0	5,7
Papir/pap	1,1	3,8
Affald <20 mm	8,3	3,7
Affald >20 mm	1,5	10,8
Sum	100	100
Sum af al plast	61,9	57,8

Folie udgør en stor del af den indsamlede mængde, ligesom det også blev observeret i MUDP-projektet Flexisort⁵². Indhold af folie, HDPE, PET, PP samt sort plast afviger hver især mindre end 1 % fra indholdene registreret i det tidligere forsøg i Flexisort.

Folien udgør 36,3 % ud af al plast i 2019, hvor indholdet i 2017 var på samme niveau (37,9 %). I TABEL 26 er vist sammensætning af de udsorterede fraktioner HDPE, PP og PET.

TABEL 26. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner fra materialer indsamlet i Reno-Nords leverandørområde.

Indhold	HDPE 2X	PP 2X	PET 1X
HDPE	90,4	2,2	1,0
PET	0,5	3,7	82,6
PP	1,6	79,5	4,2
PS	0,1	0,0	0,5

Indhold	HDPE 2X	PP 2X	PET 1X
PVC ⁵³	0,0	0,2	0,2
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	1,0	1,0	2,5
Sort plast	0,0	0,0	0,1
Plastfolie	5,4	9,1	3,2
Metal	0,2	0,6	0,8
Affald	0,8	3,8	4,8
Sum	100	100	100
Renhed	90,4	79,5	82,6
Estimeret renhed af oparbejdet plast efter fjernelse af affald, metal og folie, og oparbejdning med densitetsseparation ved AVL	97,1	96,2	96,3

Renhederne af HDPE og PP er lidt lavere end ved karakteriseringen ved testproduktion nr. 1 i starten af projektet (TABEL 2), hvilket primært skyldes, at folieseparatoren fjernede mindre folie (foliemængderne er 4-5 % højere for HDPE og PP end i den indledende karakterisering). Dette skyldes primært, at kapaciteten på anlægget med ombygningerne og driftsjusteringerne er blevet ændret, så den kapacitet, der er lovet af anlægsleverandøren (4,2 ton i timen) kan overholdes. PET-renheden ved en enkelt passage er til gengæld steget fra ca. 60 % til 82,6 %, hvilket vurderes at skyldes, at restfraktionerne fra NIR2 efter ombygningen er adskilt i to strømme, hvor PET udtages fra den første. Af tabellen ses et indhold af PVC i PP og PET (0,2 %) som konstateret ved testproduktion nr. 1 (kapitel 4). Det er nødvendigt at fjerne PVC fra PET med fx særlige NIR-sorterere til flakes ved oparbejdningsanlægget for PET for at kunne omsmelte PET.

Af tabellen fremgår en estimeret renhed af omsmeltede, rensede piller ved AVL, idet det forudsættes, at anlægget ved AVL fraseparerer folie, affald og metal og derudover fjerner en del uønskede polymerer ved densitetsseparation (PET og PVC fra PE og PP samt PE og PP fra PET).

Det ses, at de estimerede renheder efter oparbejdning ved AVL er høje med over 96 % renhed for alle polymerer. Det vurderes derfor, at den lidt højere mængde folie og affald ikke påvirker kvaliteten af slutproduktet. Dog vil en højere andel af folie og affald betyde, at der opstår større mængder restaffald af frasorteret, tung plast og folie ved AVL, som skal håndteres i forbindelse med oparbejdningen.

Ved testen ved Reno-Nord blev udbyttet bestemt af de 3 hovedtyper af plast med en analyse af samtlige tab inkl. tab i sigtefraktioner <2 cm.

Udbyttet af HDPE blev af Teknologisk Institut beregnet til 56,0 %, PET 40,5 % og PP 34,0 %, hvilket er ret lavt. Tabene opstår primært i vindsigten (omkring 5,0 % for HDPE, 19,5 % for PET og 18,0 % for PP) samt i restfraktionerne (22-29 %).

Der har ikke ved tidligere beregninger af udbytte været regnet på tab af plast med sigtefraktioner under 2 cm. Undtages disse tab, er udbyttet 63 % for HDPE, 43 % for PET og 39 % for PP.

Det vurderes, at en del af det ret høje tab med restfraktionen skyldes den forhøjede foliemængde i den hårde plast. At opnå en god separation af folie fra hård plast har således vist sig at være vanskelig, som det også blev vist i MUDP-projektet Flexisort⁵², idet mange hårde emballager har en folielignende karakter, fx bakker. Folielignende, hård plast som en

⁵³ Inkl. blød PVC

fladklemt bakke eller et låg risikerer derfor at ende sammen med folier i vindsigten, hvis der suges for meget. Hvis man suger for lidt, mistes mindre mængder af hård plast i vindsigten, men så stiges mængden af folie i hård plast til NIR-sortering. Et højere indhold af folie i den hårde plast medfører en større urenhed i udsorterede materialer fra NIR-sortererne og en ringere sorteringseffektivitet, da NIR-sortererne så belastes hårdere, og andelen af fejlskud øges.

Udviklingsmuligheder

Ved Reno-Nord arbejdes der løbende på udvikling af teknikker, der kan reducere foliemængden i den hårde plast tilført NIR-sortererne uden samtidig at miste for meget hård plast i foliesorteringen. Arbejdet sker via en handlingsplan med en række indsatser, der skal arbejde på at forøge udbyttet og renheden af fraktionerne. Forbedret udbytte og renhed skal dog holdes op imod, hvilken betydning det har for driftseffektiviteten af anlægget, og de økonomiske investeringer, det kræver.

8.2 Nomi4s

Nomi4s udsorterer på deres anlæg hård plast med robotbaseret separation ud fra detektion af PE, PP og PET med NIR.

Restfraktionen fra sortering indeholder en del plast, som i nærværende aktivitet er blevet karakteriseret for at vurdere mulighederne for udnyttelse af plastindholdet.

I forsøget er sorteret en restfraktion på 1.820 kg.



FIGUR 42. Restfraktion til sortering placeret i longpile.

Restfraktionen blev placeret i en longpile (se FIGUR 42). Restfraktionen indeholder den sorte plast, som ikke kan identificeres med NIR, samt en række emballageemner, som robotsystemet ikke har nået at fraseparere, eller som er for små til at kunne frasepareres med de sugekopper, robotterne benytter til fraseparation af plastemnerne.

Longpilen blev delt i 2, og der blev efterfølgende kun arbejdet med sortering af fraktionen i forgrunden af foto vist i FIGUR 42 (en mere repræsentativ metode ville have været at sortere 3 delportioner – en fra midten og en fra hver af de to ender af longpilen).

Sorteringen foregik i 3 trin:

- Fraktion 1: Sortering af store emner fra hovedfraktion
- Fraktion 2: Sortering af delprøve af usorteret rest fra trin 1
- Fraktion 3: Sortering af delprøve af usorteret rest fra trin 2.

Fraktion 1: Sortering af store emner

De store emner (ca. 10 cm og opefter) fra halvdelen af longpilen blev udsorteret og opdelt i:

- Ikke-sort plast (HDPE, PP og PET)
- Sort plast
- Metal
- Affald.

Affaldet blev yderligere underinddelt i:

- Folie
- Papir/pap
- PS
- Andet plastholdigt (fx plastprodukter af WEEE, sammensatte plastprodukter, opskummet plast)
- Glas
- Affald (restaffald inkl. bleer, sko mv.)
- Ikke-sorteret rest til sortering i fraktion 2. Fraktion 2 udgør 448,5 kg.

Fraktion 2: Sortering af delprøve (448,5 kg)

Der blev nu udtaget 2 delprøver (i alt 98,5 kg) af fraktion 2 fra hver ende af bunken til videre sortering. Fraktionen på 98,5 kg blev igen opdelt i:

- Ikke-sort plast (HDPE, PP og PET)
- Sort plast
- Metal
- Affald.

Affaldet blev yderligere underinddelt i:

- Folie
- Papir/pap
- PS
- Andet plastholdigt
- Glas
- Affald
- Ikke-sorteret rest til sortering i fraktion 3. Fraktion 3 er en finfraktion på 27,9 kg med partikelstørrelse under ca. 2 cm.

Fraktion 3: Sortering af delprøve (27,9 kg)

Af fraktion 3 blev udtaget 2 delprøver på 4,64 og 3,48 kg til yderligere sortering i:

- Ikke-sort plast (HDPE, PP og PET)
- Sort plast
- Metal
- Affald.

Affaldet blev yderligere underinddelt i:

- Folie
- Papir/pap
- PS
- Andet plastholdigt
- Glas
- Affald
- Ikke-sorteret rest.

Den sidste, ikke-sorterede rest i delprøven blev antaget at indeholde de samme materialer som den sorterede del af fraktion 3.

Karakterisering

Resultatet af sorteringen er vist i TABEL 27.

TABEL 27. Sammensætning af restfraktion fra sortering på anlægget.

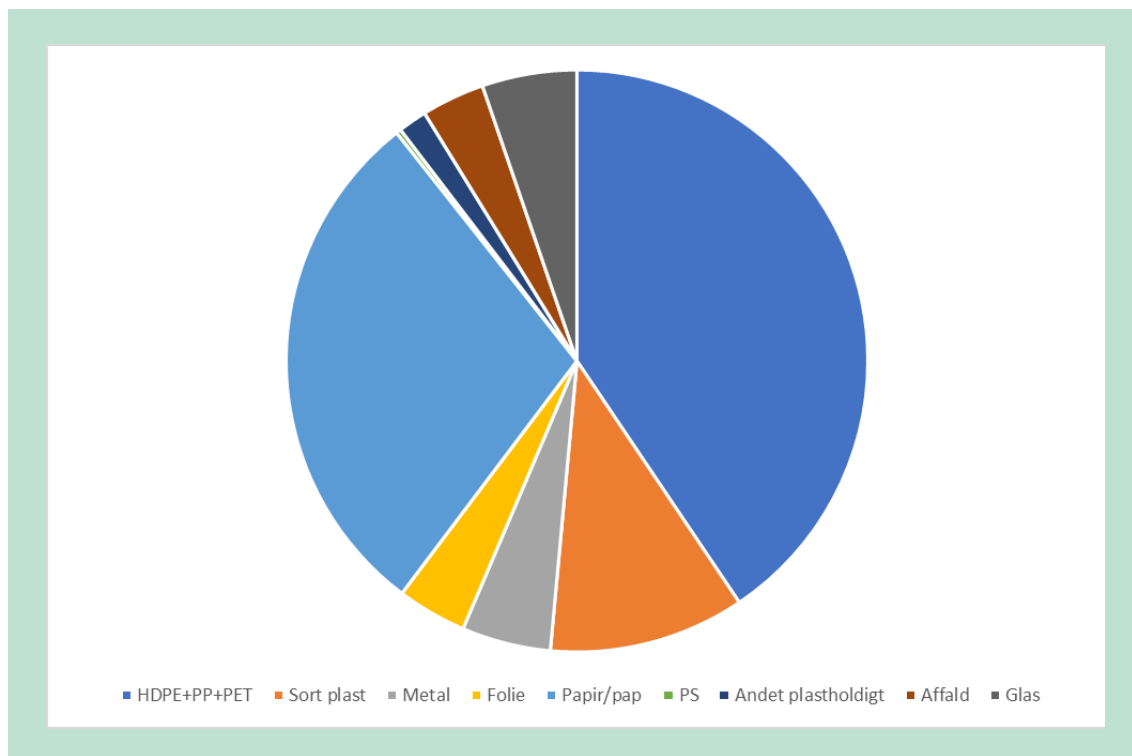
Materialer	Fraktion 1 (store emner) Kg	Fraktion 2 (>2cm) Kg	Fraktion 3 (<2 cm) kg	Sum = (restfraktion)	%
HDPE+PP+PET	464,2	208,0	66,3	738,5	40,6
Sort plast	134,5	54,2	9,4	198,2	10,9
Metal	28,2	50,1	11,7	90,0	5,0
Affaldsrest ⁵⁴	269,1	350,0	174,2	793,4	43,6
SUM	896,1	662,3	261,6	1820,0	100

Sammensætning af affaldsrest

Folie	48,6	18,0	3,9	70,5	8,9
Papir/pap ⁵⁵	164,8	289,2	75,0	529,0	66,7
PS	2,9	2,1		5,0	0,6
Andet plastholdigt	26,5	2,6		29,1	3,7
Glas	22,5	29,0	12,4	63,9	8,1
Affald	3,9	9,2	82,9	96,0	12,1
Sum	269,1	350,0	174,2	793,4	100

⁵⁴ Sum af folie, papir/pap, PS, andet plastholdigt, glas, affald

⁵⁵ Det skal bemærkes, at en stor andel af papir/pap-fraktionen var meget våd



FIGUR 43. Sammensætning af restfraktion. Det skal bemærkes, at papir/pap-fraktionen var meget våd.

Det ses, at restfraktionen indeholder ca. 41 % ikke-sort plast (HDPE, PP og PET), som ikke er udsorteret. Herudover indeholder fraktionen 11 % sort plast, hvoraf over 50 % forventes at være PP.

Fraktionen indeholder derudover 5 % metal.

Af affaldsresten udgør vådt papir/pap den største andel med ca. 67 % af affaldsresten eller 29 % af restfraktionen. Hvis papiret havde været tørt, havde vægtandelen dog været meget mindre. Glas udgør den næststørste del af affaldsresten med ca. 12 % af affaldsresten eller 5 % af restfraktionen. Det skal bemærkes, at glas ikke indgår i sorteringskriterierne.

Plast under 2 cm vil dog være meget vanskelig at udsortere. Hvis man beregner plastindholdet for emner over 2 cm, udgør ikke-sort plast (HDPE+PP+PET) ca. 37 % og sort plast ca. 10 % - i alt 47 % af restfraktionen.

Udviklingsmuligheder

For at udsortere de større plastemner kan det være en mulighed at recirkulere restfraktionen uden for normal driftstid til sortering på robotanlægget.

En del emner er dog forholdsvis små og kan formentlig nemmere udsorteres ved hjælp af trykluftdrevne, dysebaserede NIR-sorterere, som vurderes at have en højere kapacitet til udsortering af små emner end robotbaserede systemer.

8.3 ARC

Der er i projektet arbejdet med udnyttelse af de vaskede HDPE-flakes fra husstandsindsamlet plast til nye typer produkter. AVL har oparbejdet den husstandsindsamlede HDPE og efterfølgende udført en efterbehandling af de vaskede flakes.

ARC har i denne forbindelse betalt for fremstilling af sidemøbler/legemøbler designet af firmaet Small Revolution i de to typer Mabel og Annie. Stolene er egnede til udendørsbrug.

Fremstillingsprocessen er baseret på rotationsstøbning, som er udført af Dansk Rotationsplastic ApS. Rotationsstøbning er normalt baseret på plastpulver, men i nærværende design indgår også plastflager.

Stolene er fremstillet i 100 % genanvendte plastmaterialer, hvoraf HDPE-flakes oparbejdet ved AVL fra husstandsindsamlet plast udgør ca. 50 %. De resterende ca. 50 % udgøres af anden genanvendt PE-plast i pulverform.

Ved rotationsstøbning placeres plastmateriale, som skal smeltes, i en særlig fremstillet form for hvert design. Formen med plastmateriale roteres i en ovn. Formen roteres i 3 dimensioner i et særligt mønster, så plasten fordeler sig jævnt.

Ved rotationsstøbningen er det lykkedes at indstøbe HDPE-flagerne på ydersiden af stolen. Dette opnås da ydersiden vender mod formen, og rotationen bevirker, at flagerne vil fortrænge pulveret og søge mod formens overflade.

Herved opnås et særligt farvespil og et unikt udseende fra de forskelligfarvede flakes, som associerer til cirkus, hvorfor kollektionen fra Small Revolution er opkaldt efter kvindelige cirkusartister.



FIGUR 44. Rotationsstøbt møbel af typen Mabel.



FIGUR 45. Rotationsstøbt møbel af typen Annie.

Overfladeeffekten med "indstøbte farvede flakes" kan tænkes anvendt i en række andre rotationsstøbte emner, hvor dette ønskes, fx borde og andet inden- og udendørs interiør.

9. Vurdering af effekt på genanvendelse og businesscases

9.1 Afsætning af materialer, herunder PET og sort plast

Der er undersøgt priser for afsætning af materialer. I den forbindelse er det oplyst af Reno-Nord og af formidlere, at salgsprisen for HDPE har været i størrelsesordenen 1-2 kr./kg, mens prisen for PP har været 0,5-1 kr./kg frem til Coronakrisen.

Blandet flaske- og bakke-PET oplyses at have en positiv pris, som er afhængig af flaskeandelen.

Herudover er afsætningen afhængig af, at der indsamles tilstrækkeligt store mængder, hvilket typisk vil kræve, at flere danske anlæg går sammen om afsætningen.

En sort blandet fraktion forventes ikke at kunne afsættes, mens polymersorteret sort plast formentlig kan afsættes til en positiv pris.

Det skal bemærkes, at Coronakrisen har medført et fald i priserne.⁵⁶

9.2 Vurdering af genanvendelseseffekt ved etablering

Muligheden for oparbejdning af HDPE og PP ved AVL til høj kvalitetsplast giver mulighed for afsætning af plast til en lang række kunder, som efterspørger materialer i høj kvalitet (renhed).

Prototypen af oparbejdningslinjen er opbygget i en skala, som forventes at kunne producere med en kapacitet på nogle få hundrede ton per år. Oparbejdningsslinjen producerer som vist i projektet plastflakes af en høj renhed målt ved et meget lavt indhold af partikler, som fjernes ved smeltefiltrering. Det vurderes, at mængden af partikler, der passerer smeltefiltret efter behandling i oparbejdningsslinjen, formentlig vil være mindre end for oparbejdningssprocesser med mindre effektiv rensning. Når der passerer en mindre mængde partikler gennem smeltefiltrene, vil plasten indeholde mindre fyldstof (fx sand eller forkullet materiale) og kunne anvendes til plast med højere krav til mekanisk styrke end plast, der ikke er rensat så effektivt.

Der er p.t. en stor efterspørgsel på genanvendt HDPE- og PP-plast, som er oprenset til en høj renhed. Da udbuddet i Europa er mindre end efterspørgslen, kan producenter p.t. ikke få dækket deres behov for genanvendt plast af høj kvalitet og må fortsætte med brug af virgin plast. Etableringen af oparbejdningsslinjen ved AVL har således en positiv indflydelse på genanvendelseseffekten i Danmark.

Afsætning af plasten vurderes derfor ikke at være noget problem. Da producenter som udgangspunkt har vanskeligt ved at skaffe genanvendt plast i den rette kvalitet, vil hvert ton produceret høj kvalitetsregenerat kunne erstatte en tilsvarende mængde virgin plast og dermed spare miljøet for udledningen af ca. 2,5 tons CO₂ ved at undgå forbrænding.⁵⁸

Den store effekt opstår, når plasten oparbejdes til en høj kvalitet og dermed kan genanvendes på et højt niveau flere gange.

⁵⁶ Ifølge EUWID Recycling and Waste Management nr. 10, 13. maj 2020, p. 13 skyldes dette en kombination af mindre efterspørgsel og lave oliepriser

Eksempel

I den følgende er opstillet hypotetiske eksempler, som illustrerer den CO₂-besparende effekt ved genanvendelse af kasseret plast henholdsvis en og fem gange.

Beregning 1 – genanvendelse 1 gang

Det antages, at der udsorteres plast fra husstandsindsamlet plast med et indhold på 1 ton med et tab på 25 %⁵⁷, hvorved der opnås 0,75 ton oprenset plast. Plasten oparbejdes til et lavkvalitetsprodukt i en kvalitet fyldt med fyldstoffer og uønskede polymerrester, som bevirker, at materialet kun kan genanvendes én gang. Det antages, at der spares 2,5 ton CO₂⁵⁸ pr. ton plast, som genanvendes, i forhold til forbrænding.

Herved spares ca. $0,75 \cdot 2,5 = 1,9$ ton CO₂ i forhold til forbrænding ved en gang genanvendelse

Beregning 2 – genanvendelse 5 gange

I det følgende antages det, at platten udsorteres og oparbejdes til et højkvalitetsmateriale som antages at kunne genanvendes i alt 5 gange udsorteret med 75 %⁵⁹ udbytte hver gang. Heraf opnås følgende CO₂ besparelser:

	Ton besparet CO ₂
Genanvendelse 1: $0,75 \cdot 2,5 =$	1,9
Genanvendelse 2: $0,75 \cdot 0,75 \cdot 2,5 =$	1,4
Genanvendelse 3: $0,75 \cdot 0,56 \cdot 2,5 =$	1,1
Genanvendelse 4: $0,75 \cdot 0,42 \cdot 2,5 =$	0,8
Genanvendelse 5: $0,75 \cdot 0,32 \cdot 2,5 =$	0,6
Sum	5,8

Det vil sige, at der samlet opnås 5,8 ton besparet CO₂ pr. ton plast, der til start blev indsamlet til genanvendelse - altså 3 gange højere besparelse end ved én gangs genanvendelse.

Hvis platten kan bevares i det cirkulære kredsløb, kan man således opnå langt større CO₂-besparelse end ved en enkelt gangs genanvendelse. Muligheden for recirkulering af platten forbedres, hvis platten renses til en højere renhed i oparbejdningen, som det sker i den udviklede oparbejdningsslinje.

AVL har på baggrund af de resultater, der er opnået i nærværende projekt, valgt at etablere en oparbejdningsslinje, der forventes driftsklar i 2021. Driftslinjen opbygges ud fra de udviklede teknologier i prototypen af oparbejdningsslinjen.

Muligheder for udvikling af forbedret oparbejdningsteknologi og muligheder for udvidelser

Flakes fra platten er rensat for overfladeforurening, men indeholder stadig rester af fx parfumestoffer, som i indledende test har vist sig at kunne fjernes delvist med teknologi til termisk lugtrensning.

Anlægget vurderes derfor at kunne udvikles til et endnu højere rensningsniveau med udvikling af supplerende renseteknologi, der kan give en så høj kvalitet af platten, at den kan anvendes til højkvalitetsemballager, fx HDPE til nye dunke til rengøringsmidler og om muligt forskellige former for emballage til personlige plejeprodukter.

⁵⁷ Der er regnet med en effektiv sortering og oparbejdning med kun 25 % tab (til sammenligning antages 15 % tab for centralsorteringsanlæg i Miljøprojekt 2059, februar 2019)

⁵⁸ Tallet er en tilnærmet værdi. Som angivet i Basisfaktaark om plastaffald, Miljøstyrelsen, 2016 er besparelsen ved genanvendelse af plast i forhold til forbrænding mellem 1,5 og 2,7 kg CO₂/kg plast afhængigt af antagelserne. Her er til beregningsbrug anvendt en besparelse på 2,5 kg CO₂/kg plast

⁵⁹ Der er regnet med et fremtidigt meget effektivt indsamlings-, sorterings- og oparbejdningssystem med kun 25 % tab – dvs. at plast skal genanvendes både fra separat indsamling af plast ved husstanden og fra et eftersorteringsanlæg til hård plast inden forbrænding af restaffald

Selve processen er skalerbar, og kapaciteten kan udvides ved at etablere flere oparbejdningslinjer, når behovet opstår.

9.3 Businesscases

9.3.1 Anlæg til oparbejdning af HDPE og PP

I det følgende er der foretaget et estimat af behandlingsøkonomien for et oparbejdningsanlæg til polymersorteret HDPE og PP med en kapacitet på 5.000 ton/år. Estimatet omfatter alt nødvendigt neddelings- og forbehandlingsudstyr, vaskeenhed, densitetssortering, tørrensning/tørreenhed, elinstallation, ventilation og opbygning.

Der er antaget 5 % rente, og en afskrivningsperiode på 5 år. Desuden er der foretaget et estimat af investeringsomkostningerne. Driftsudgifter er estimeret ud fra data fra oparbejdningslinjen og anvendt udstyr ved AVL.

Der er estimeret et energiforbrug på mindre end 500 kW pr. ton producerede rensede flakes og et vandforbrug på mindre end 2 l pr. kg plast (der er i projektet opnået 0,8 l/kg). Strømprisen er sat til 70 øre pr. kWh, og vandprisen er sat til 50 kr. pr. m³. Bemandingen udgør 2 personer pr. skift med 3 skift til at producere 5.000 ton/år.

Der afsat beløb til vedligehold og andre driftsudgifter. Der er regnet med bortskaffelse af 10 % materiale til forbrænding (folieseparation, filterkage og affald af fraseparerede, tunge plastfraktioner som fx PET-rester).

Samlet opnås inkl. 25 % overhead en oparbejdningspris på mindre end 3 kr. pr. kg plast ved behandling af 5.000 ton pr. år. Der indgår ikke udgift til etablering af bygning/hal i behandlingsprisen.

Udgift til omsmelting af de rensede flakes udgør mindre end 2 kr. pr. kg, hvorfor den samlede oparbejdningspris inkl. omsmelting vurderes at udgøre ca. 5 kr. pr. kg plast, hvortil kommer indkøb af plasten.

Det skal her bemærkes, at man formentlig vil supplere anlægget med flakesortere og udvikling af en lugtrensningsproces, som ikke er medtaget i ovenstående estimat.

Salgspris for piller af HDPE og PP vurderes at være i størrelsesordenen 6-9 kr. pr. kg, afhængigt af den ønskede kvalitet og dokumentation som fx en REACH-test og et efterfølgende certifikat.

Estimatet viser samlet, at der bør kunne foretages en oparbejdning af HDPE- og PP-plast med produktion af højkvalitets-HDPE og -PP til en konkurrencedygtig pris, da polymersorteret PE- og PP-plast handles til priser på 1-2 kr. pr. kg (salgspris: >6 kr. minus omkostning 5 kr. = >1 kr. i indkøbspris).

9.3.2 PET-oparbejdning

I projektet var det kun muligt at teste oparbejdningen af PET i mindre omfang på oparbejdningslinjen og med lav kapacitet, da densitetssorteringsenheden er designet til oparbejdning af polyolefiner (HDPE, PP) som hovedprodukt.

Densitetssorteringsenheden vurderes at kunne udvikles til behandling af PET, hvilket dog kræver særskilt udvikling.

Forsøgene indikerede, at det var muligt at oparbejde PET med et begrænset tab på ca. 15 %, hvilket er lavt i forhold til de refererede forsøg i afsnit 7.1⁴⁹, hvor der blev observeret tab på op til 75 %.

Herudover vil oparbejdning med de udviklede teknologier ved AVL kræve etablering af udstyr til fjernelse af metal fra synkefraktionen, ligesom der vil skulle investeres i udstyr til polymer- og evt. farvesortering af PET-flakes (fraseparering af PVC og udsortering af farvede flakes fra klare flakes).

Det er vist i projektet, at der ved fremstilling af folie vil kunne tilsættes oparbejdede kvaliteter med blandet PET i mængder på op til 20 %, hvilket er på niveau med testresultater angivet i afsnit 7.1⁴⁹.

Som nævnt i afsnit 5.3.7 vil der kunne opnås en bedre PET-kvalitet ved af frasortere multilags-PET fra den samlede PET-fraktion samt evt. supplere med lugtrensning og IV-justering⁴¹ via polykondensation. Principperne i oparbejdningslinjen vil formentlig kunne videreudvikles til at producere en fødevarekvalitet, hvilket dog vil kræve en dedikeret linje.

Ifølge SKY-LIGHT vil de oparbejdede PET-fraktioner formentlig (efter etablering af metalrensning, PVC-fjernelse mv.) kunne anvendes til diverse tekniske produkter, fx i fiberindustrien hos Fibertex. Fiberindustrien er underleverandører til en række potentielle aftagere, som fx producenter af sko, beklædningsindustrien og automobilindustrien. Producenter af strapping kan muligvis også anvende kvaliteterne. De anvender i dag farvet flaskescrap, som koster omkring 500 €/ton. Producenter af opskummet PET til bygningsindustrien kan også være en afsætningsmulighed, men her stilles også krav til renheden af produktet, idet den opskummede cellestruktur skal kunne bære.

Ved anvendelse til folier vurderer SKY-LIGHT, at materialerne fra oparbejdning af blandet PET primært vil kunne anvendes i gennemfarvede folier og folier, hvor der tolereres massiv gulning samt en del urenheder i form af afbrændte partikler. Dette marked eksisterer, men omfanget af markedet kendes ikke.

Hvis kvaliteterne af blandet, oparbejdet PET skal anvendes i en sort folie, vil prisen på materialet skulle afstemmes med markedsprisen på sort scrap plus en evt. merpris for "den gode historie". Sort scrap handles ifølge SKY-LIGHT til op til 2 kr. pr. kilo. Hvis kvaliteten kan anvendes i ikke-sort, specifikke farver, vil værdien være højere, muligvis 3-4 kr. pr. kilo.

Lovgivningen⁶⁰, som specificerer, at der i 2025 skal være minimum 25 % genanvendt materiale i bl.a. PET-preform, er med til at presse på omstillingen til cirkulær økonomi, og det har allerede bevirket en solid underkapacitet på markedet for food grade-regranulat, som i dag handles til 1.300 € pr. t (virgint materiale koster 750 € pr. t).

SKY-LIGHT påpeger dog, at ikke alle producenter er parate til at betale en evt. merpris (op til 75 øre pr. kg for flaske-scrap, forår 2020) for "den gode historie". Derudover oplyser SKY-LIGHT, at der er yderligere tiltag på vej i andre europæiske lande, som fx Italien, hvor producenter, som udelukkende anvender virgine råvarer, vil blive pålagt et gebyr på 450 € pr. t. Producenter, som anvender genanvendte materialer og/eller biomaterialer, skal alene betale gebyr for den del af produktet, der er af virgint materiale.

9.3.3 Sort plast

Oparbejdning af sort plast kræver, at plasten udsorteres via særlige teknologier, som etableres på sorteringsanlæggene. Disse teknikker kan fx udsortere en blandet sort fraktion med fx Steinert Black Scan eller udsortere polymersorteret plast med teknikker, som fx benytter MIR (MidInfrared detektion).

Det blev i projektet valgt at teste oparbejdning af blandet sort plast, som ville kunne være produceret, fx ved etablering af en Steinert Black Scan. Fraktionen af blandet sort plast blev i projektet udsorteret manuelt. Plasten blev neddelt, vasket og densitetssorteret. Herved fremkom en polyolefinfraktion domineret af PP. Fraktionen var i en god, afsættelig kvalitet, som var sammenlignelig med andre producerede, ikke-sort PP-materialer i projektet. Oparbejdning af PET blev forsøgt udført med densitetsseparation i saltopløsninger, men oparbejdningen viste sig at være vanskelig, da der blev konstateret et indhold af gummi, som havde overlappende densitet.

Det er således kun muligt at oparbejde 50-60 % af den sorte plast med den testede metode. Der vil herved opstå 40-50 % affald, som skal bortskaffes til forbrænding, hvilket medfører en dårligere businesscase end ved oparbejdning af ikke-sort PP, hvor tabet til forbrænding er ca. 10 %.

9.3.4 Synergi mellem sortering og oparbejdning

Der er vist muligheder for synergi mellem oparbejdningsanlæg og sorteringsanlæg i forbindelse med fraseparering af folie. Når der på sorteringsanlæggene ikke suges så kraftigt i folieseparatoren, følger der mere folie med den polymersorterede,

⁶⁰ Direktiv 2019/904 om reduktion af visse plastprodukters miljøpåvirkning, Artikel 6, punkt 5

hårde plastfraktion. Til gengæld er materialetabet lavere end ved et kraftigere sug fra folieseparatoren. Når den polymer-sorterede plastfraktion, der indeholder op til 5-10 % restfolie, er neddelte til flakes hos AVL, har det vist sig nemmere at separere folie fra hård plast. Et højt indhold af affald og folie medfører forhøjede behandlingsomkostninger.

Ved at udnytte synergieffekterne vurderes det, at der kan opstilles en businesscase, som giver en bedre økonomi for både sorteringsanlæg og oparbejdere.

Bilag 1. Testproduktion samt karakterisering

I det følgende er vist resultater af karakteriseringerne i forbindelse med gennemførelse testproduktion nr. 1.

Bilag 1.1 Testproduktion hos Reno-Nord

Fremstilling af materialer hos Reno-Nord blev gennemført april-juni 2018, og selve karakteriseringen af udsorterede materialer blev udført den 28. og 29. maj 2018.

Fremstilling af materialer

Materialerne fra Reno-Nords leverandørområde er sorteret ved at programmere NIR-sortererne som angivet i de 3 opsætninger i TABEL 28.

TABEL 28. Opsætning af NIR-sorterere ved Reno-Nord.

Opsætning nr.	NIR1 (spor)	Udsortering NIR 1	NIR2 (spor)	Udsortering NIR2	Produkter
1	Spor 1	PE	Spor 1	Alt ⁶¹	PE 1X ⁶²
	Spor 2	PP	Spor 2	Alt ⁶¹	PP 1X
2	Spor 1	PE	Spor 1	PE	PE 2X ⁶³
	Spor 2	PP+PET	Spor 2	PE	PP 2X, PET 1X* ⁶⁴
3	Spor 1	PET	Spor 1	PP	PET 2X
	Spor 2	PE+PP	Spor 2	PET	

I opsætning nr. 1 udsorteres PE (positiv sortering) i NIR1, spor 1. For at få materialet ud af NIR2 er det nødvendigt at sortere efter alle polymertyper i NIR2, spor 1 (dvs. PE, PP, PET, PS og PVC).

Tilsvarende udsorteres PP i NIR1, spor 2. For at få PP-materialet ud af NIR2 er det nødvendigt at sortere efter alle polymertyper i NIR2, spor 2.

I opsætning nr. 2 anvendes den normale driftsmetode på I/S Reno-Nords sorteringsanlæg, hvor PE oprenses 2 gange i NIR1, spor 1 og NIR2, spor 1. Herefter udsorteres PP og PET på restfraktionen fra NIR1, spor 1, og i NIR2, spor 2 udsorteres PP. PET 1X* er den kombinerede restfraktion fra NIR2, spor 1 og NIR2, spor 2. PET-fraktionen er således ikke udsorteret på samme vis som PE 1X og PP 1X.

⁶¹ Da anlæggets normaldrift er to gange oprensning af PE- og PP-fraktionerne, har det været nødvendigt for at opnå en én gang oprensning af PE-fraktionen at omprogrammere NIR2 til at udsortere alle polymertyper

⁶² 1X angiver, at fraktionen er oprenset én gang

⁶³ 2X angiver, at fraktionen er oprenset to gange

⁶⁴ PET 1X* angiver, at fraktionen er oprenset én gang ved at bortskyde PP

I opsætning nr. 3 anvendes den normale driftsmetode, men hvor PE er erstattet af PET i NIR1, spor 1 og spor 2.

Ved sortering af materialer fra I/S Reno-Nords leverandører i Nordjylland er benyttet alle tre opsætninger for at fremstille fraktionerne PE 1X, PP 1X, PE 2X, PP 2X, PET 1X* og PET 2X.

Ved sortering af materialer fra Dansk Affald er benyttet opsætning nr. 2 for at fremstille fraktionerne PE 2X, PP 2X og PET 1X*.

Det skal bemærkes, at der ved opsætning nr. 2 udsorteres PP og PET i første trin, hvorfor der forventes et lidt højere indhold af PET i PP 2X end i PE 2X.

Udsortering af sort plast er foretaget ved manuel udsortering fra materialestrømmen i sorteringskabinen.

Resultater af karakterisering

I det følgende er resultater af de gennemførte karakteriseringer hos Reno-Nord gennemgået. Der er gennemført registreringer for genanvendelige fraktioner indsamlet i to områder; henholdsvis:

- Reno-Nords leverandørområde
- Dansk Affalds leverandørområde.

Materialer indsamlet i Reno-Nords leverandørområde – sorteret på Reno Nord anlæg i Aalborg

Af TABEL 29 fremgår den procentvise fordeling af mængder registreret ved affaldskarakteriseringen. Mængderne er indsamlet i Reno-Nords leverandørområde. Hård og blød plast samt metal indgår i sorteringskriterierne for denne fraktion. Der er sorteret i alt 489,8 kg plast.

TABEL 29. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner fra materialer indsamlet i Reno-Nords leverandørområde.

Indhold	HDPE 1X ⁶⁵	HDPE 2X ⁶⁶	PP 1X ⁶⁵	PP 2 2X ⁶⁶	PET 1X* ⁶⁷	PET 2X ⁶⁶
HDPE	85,1	96,1	0,5	0,6	20,5	0,3
PET	1,4	1,3	4,0	2,0	60,9	91,3
PP	2,4	0,9	66,2	83,5	3,6	0,3
PS	0,2	0,0	0,0	0,1	0,6	0,4
PVC ⁶⁸			0,9	0,4	1,2	0,1
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	1,6	0,6	4,0	3,2	2,1	1,7
Sort plast	0,9	0,2	2,8	2,3	3,0	2,2
Plastfolie	7,2	0,4	11,5	5,5	3,1	2,1
Metal	0,2	0,5	0,6	0,4	0,6	0,2
Affald	1,0	0,0	9,6	2,1	4,4	1,5
Sum	100	100	100	100	100	100
Renhed	85,1	96,1	66,2	83,5	60,9	91,3

Polymerfraktionerne indeholdt også en smule glas. Mængden er kun opgjort for fraktionen PP 2X, hvor der blev registreret et glasindhold på 0,014 %.

Som det fremgår af TABEL 29, er der en væsentlig forskel på renheden ved henholdsvis én gang udsortering og to gange udsortering på anlægget. For HDPE's vedkommende stiger renheden af den udsorterede fraktion fra 85,1 % til 96,1 %. For PP's vedkommende er der tale om en stigning fra 66,2 % til 83,5 %, og for PET's vedkommende en stigning fra 60,9 % til 91,3 %.

For HDPE og PP's vedkommende er der først og fremmest tale om en reduktion af folieandelen ved to gange udsortering på anlægget, mens der for PET's vedkommende først og fremmest er tale om en kraftig reduktion af HDPE-mængden ved to gange udsortering (som tidligere angivet er PET 1X* ikke sorteret på samme måde som PE 1X og PP 1X, hvorfor renhed af PET 1X* ved én gang udsortering ikke er sammenlignelig med renheden for henholdsvis PE og PP ved én gang udsortering.

I alt blev 489,8 kg sorteret og karakteriseret. Heraf udgjorde:

- HDPE, 1 gang udsortering på sorteringsanlæg: 87,7 kg
- PP, 1 gang udsortering på sorteringsanlæg: 95,5 kg
- PET, 1 gang udsortering på sorteringsanlæg: 68,8 kg

⁶⁵ Én gang udsortering på sorteringsanlæg

⁶⁶ To gange udsortering på sorteringsanlæg. Normal procedure for sortering på sorteringsanlægget er to gange udsortering for PP og HDPE og én gang udsortering for PET. For at sortere PET 2 gange er PE erstattet af PET i sorteringsprogrammeringen

⁶⁷ Én gang udsortering på sorteringsanlæg efter særlig sorteringsmetode, se TABEL 28, metode 2

⁶⁸ Inkl. blød PVC

- HDPE, 2 gange udsortering på sorteringsanlæg: 82,7 kg
- PP, 2 gange udsortering på sorteringsanlæg: 86,0 kg
- PET, 2 gange udsortering på sorteringsanlæg: 69,1 kg.

Fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde var væsentlig mere tilsmudset end fraktionen indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde. Der blev i fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde (til trods for at glas ikke indgår i sorteringskriterierne) registreret glasskår på niveau med indholdet i materialerne indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde. Der blev registreret glasskår i stort set alle fraktioner.

Sort plast

Der blev manuelt frasorteret 33,5 kg sort plast fra fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde. Denne mængde blev karakteriseret, og den procentvise fordeling af polymerer mv. fremgår af TABEL 30.

TABEL 30. Procentvis fordeling af indholdet i udsorteret sort plast fra materialer indsamlet i Reno-Nords leverandørområde.

Indhold	Procent
HDPE	3,64
PET	11,87
PP	58,67
PS	23,79
ABS	0,08
Uidentificeret plast (primært teknisk plast)	0,13
Plastfolie	1,11
Metal (primært dåser)	0,35
Affald bestående af plastfolie og papir	0,36
SUM	100

Som det fremgår af TABEL 30, udgjorde PP knap 60 % (59 %) af den sorterede mængde sort plast. PS udgjorde knap en fjerdedel af den sorterede sorte plast (24 %), PET udgjorde 12 %, og HDPE udgjorde 4 %.

Indhold af PVC ved sortering af materialer fra Reno-Nords leverandørområde

I TABEL 31 er vist det analyserede indhold af PVC i sorterede fraktioner af PP og PET fra materialer fra Nordjylland sorteret hos Reno-Nord.

TABEL 31. Indhold af PVC i udsorterede fraktioner fra Reno-Nords leverandørområde.

Fraktion	PVC ppm	Forventet PVC-indhold i oprenset polymer ppm
PET 1X*	11.620	19.133
PET 2X	911	998
PP 1X	9.076	
PP 2X	4.292	

Ud over det registrerede indhold af PVC i de sorterede fraktioner er i TABEL 31 også vist det forventede indhold af PVC i polymeren efter oprensning med friktionsvask og densitetsseparation. Beregningen er foretaget ved at antage, at lette plasttyper (densitet <1 g/cm³) og affald fjernes ved den videre oparbejdning.

Indholdet af PVC i PP- og PET-fraktioner, der er oprenset én gang, er 0,9-1,2 % (9.076-11.620 ppm). Indholdet af PVC i PET-fraktionen PET 2X er væsentligt reduceret til et indhold på <1.000 ppm. Indhold af PVC i PET vil gulfarve klar PET, så denne ikke kan benyttes til klare applikationer - se flere detaljer i afsnit 7.1.

Sammensætning af PP-folie fra materialer indsamlet i Reno-Nords leverandørområde og sorteret på Reno-Nords anlæg i Aalborg

I TABEL 32 er vist resultatet af analyse af 3,1 kg plastfolie udsorteret fra fraktionen PP 2X.

TABEL 32. Sammensætning af plastfolie i PP 2X.

Fraktion	Procent
PE (LD+HD)	29,86
PP	60,42
PET	4,69
Ikke bestemt	4,41
PVC ⁶⁸	0,63
Sum	100

Det ses, at folien fra PP-fraktionen indeholder ca. 60 % PP. Renheden er formentlig for lav til, at folien kan afsættes som en PP-folie, ligesom der formentlig også vil være en del PP-multi-lagsemballager med PP på ydersiden og PE på indersiden.

Materialer indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde – sorteret på Reno-Nords anlæg i Aalborg

Af TABEL 33 fremgår den procentvise fordeling af mængder registreret ved affaldskarakteriseringen. Mængderne er indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde. Hård plast, metal og glas indgår i sorteringskriterierne for denne fraktion. Der er sorteret i alt 231,1 kg plast.

TABEL 33. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner fra materialer indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde.

Indhold	HDPE 2X ⁶⁶	PP 2X ⁶⁶	PET 1X ⁶⁷
HDPE	98,1	0,8	29,2
PET	1,5	0,6	66,5
PP	0,1	96,7	3,0
PS			0,0
PVC ⁶⁸			0,1
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	0,2	1,6	0,7
Affald og plastfolie ⁶⁹	0,1	0,3	0,5
Sum	100	100	100

⁶⁹ Plastfolie indgår ikke i sorteringskriterierne for fraktionen, der består af hård plast, metal og glas. I dette indsamlingssystem indgår plastfolien i en fraktion bestående af papir, pap og plastfolie.

Indhold	HDPE 2X ⁶⁶	PP 2X ⁶⁶	PET 1X ⁶⁷
Renhed	98,1	96,7	66,5

Polymerfraktionerne indeholdt også en smule glas i form af glasskår. Der blev registreret et glasindhold på 0,006 % i HDPE-fraktionen. I PP-fraktionen blev der registreret 0,003 %, og i PET-fraktionen blev der registreret 0,001 % glasskår.

Som det fremgår af TABEL 33, er der med en renhed af HDPE-fraktionen på 98,1 % tale om en renhed, der svarer til HDPE-fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde (96,1 % - se TABEL 29). Renheden af PP-fraktionen indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde udgør derimod 96,7 % mod 83,5 % i fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde. Renheden af PET-fraktionen udgør 66,5 % mod 60,9 % i fraktionen indsamlet i Reno-Nords leverandørområde (begge resultater for PET er opnået ved én gang udsortering på sorteringsanlægget svarende til normaldrift på anlægget).

Fraktionerne indsamlet i henholdsvis Reno-Nords leverandørområde og i Dansk Affalds leverandørområde er sorteret på det samme anlæg ved Reno-Nord i Aalborg. Det skal her bemærkes, at materialerne fra Dansk Affalds leverandørområde er udtaget efter passage af Dansk Affalds sorteringsanlæg i Vojens, uden at der er foretaget NIR-sortering, dvs. at metaller samt eventuelt mindre indhold af folier er frasorteret. Dette giver NIR-sortererne ved Reno-Nord optimale arbejdsbetingelser.

I alt blev 231,1 kg sorteret og karakteriseret. Heraf udgjorde:

- HDPE: 2 gange udsortering på sorteringsanlæg 83,2 kg
- PP: 2 gange udsortering på sorteringsanlæg 70,2 kg
- PET: 1 gang udsortering på sorteringsanlæg 77,7 kg.

Fraktionen indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde indeholder, i modsætning til de øvrige fraktioner, der indgår i nærværende projekt, glas. Ved sorteringen blev der registreret lidt overfladeglasstøv på nogle fedtede emballager, men intet fastklemt glas og kun ganske få glasskår.

Der var et forholdsvis højt indhold af PE på 29 % i fraktionen PET 1X*. (Som angivet ovenfor er PET 1X* ikke sorteret på samme måde som PE 1X og PP 1X, hvorfor renheden af PET ved én gang udsortering ikke er sammenlignelig med renheden for henholdsvis PE og PP ved én gang udsortering).

Sort plast

Der blev manuelt frasorteret 42,4 kg sort plast fra fraktionen indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde. Denne mængde blev karakteriseret, og den procentvise fordeling af polymerer mv. fremgår af TABEL 34.

TABEL 34. Procentvis fordeling af indholdet i sort plast indsamlet i Dansk Affalds leverandør-område og fraserteret manuelt på Reno-Nords anlæg i Aalborg.

Indhold	Procent
HDPE	11,8
PET	17,9
PP	46,9
PS	13,2
Uidentificeret plast, primært teknisk plast	9,1
Metal, primært dåser	0,5
Affald bestående af plastfolie og papir	0,7
Sum	100

Som det fremgår af TABEL 34, udgjorde PP knap halvdelen (47 %) af den sorte plast. PET udgjorde ca. 18 %, PS ca. 13 % og HDPE ca. 12 %.

Den sorte HDPE-plast udgjordes primært af tekniske produkter. Der blev desuden registreret PVC-lignende fødevareemballage i den sorte plastfraktion.

Bilag 1.2 Testproduktion hos Nomi4s

Fremstilling af materialer ved Nomi4s blev gennemført april-juni 2018, mens selve karakteriseringen af udsorterede materialer blev udført den 17. og 18. april 2018.

Fremstilling af materialer

Sortering af materialer indsamlet fra Nomi4s' leverandørområde.

Materialerne er udsorteret ved at gennemføre en for anlægget normal sortering, hvor NIR-sensoren identificerer HDPE, PP og PET samt LDPE (dog har programmet til LDPE været delvis ude af funktion i testperioden). Seks robotter udsorterer herefter polymererne.

Udsortering af sort plast er foretaget ved manuel udsortering fra materialestrømmen på båndet.

Resultater af karakterisering

Af TABEL 35 fremgår den procentvise fordeling af mængder registreret ved affaldskarakteriseringen. Mængderne er indsamlet i Nomi4s' leverandørområde. Hård plast og metal indgår i sorteringskriterierne for denne fraktion.

TABEL 35. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner fra materialer indsamlet i Nomi4s' leverandørområde.

Indhold	HDPE	PP	PET
HDPE	86,3	6,0	0,7
PET	1,0	7,7	92,7
PP	1,2	60,8	1,2
PS	0,0	0,4	0,1
PVC ⁶⁸		0,1	
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	0,2	1,1	1,1
Sort plast	1,0	5,0	0,4
Plastfolie	7,8	10,1	1,5
Metal	0,4	1,6	0,4
Affald	2,2	7,2	2,0
Sum	100	100	100
Renhed	86,3	60,8	92,7

Som det fremgår TABEL 35, er der tale om en renhed af HDPE-fraktionen på 86 %. Renheden af PP-fraktionen udgør kun 61 %, mens renheden af PET-fraktionen er høj (93 %).

Metalindholdet i PET-fraktionen bestod primært af aluminiumsdåser, som var presset sammen om PET-materialer.

For PP-fraktionen blev det bemærket, at en del aluminiumsdåser var fanget i PP-bøtter.

Det skal bemærkes, at foliefraktionerne i udsorteret PP og PET ikke blev undersøgt for evt. indhold af PVC-folie.

I alt blev 306,9 kg sorteret og karakteriseret. Heraf udgjorde

- HDPE: 101,5 kg
- PP: 94,7 kg
- PET: 110,6 kg.

Sort plast

Der blev manuelt frasorteret 31,3 kg sort plast fra fraktionen indsamlet i Nomi4s' leverandørområde. Denne mængde blev karakteriseret, og den procentvise fordeling af polymerer mv. fremgår af TABEL 36.

TABEL 36. Procentvis fordeling af indholdet i sort plastmængde indsamlet i Nomi4s' leverandørområde.

Indhold	Procent
PET	31,42
PP	59,41
PS	5,51
HDPE	2,19
PC	0,03
PA	0,37
ABS	0,35
PVC	0,05
PVC/polyvinylacetat	0,05
Ekspanderet PE/PET	0,07
PP-EPDM	0,55
Sum	100

Som det fremgår af TABEL 36, udgjorde PP knap 60 % (59 %) af de sorterede mængder sort plast. PET udgjorde godt 31 %, PS udgjorde 6 % og HDPE 2 %.

PP-andelen af den sorte plast bestod primært af PP-bakker og PP-kasser, mens der var forholdsvis få PP-urtepotter.

Bilag 1.3 Testproduktion hos ARC

Fremstilling af materialer hos ARC blev gennemført april-juni 2018, mens selve karakteriseringen af udsorterede materialer blev udført den 20. og 21. juni 2018.

Fremstilling af materialer

Da anlægget kun indeholder én NIR-sorterer, blev sorteringen udført på følgende måde:

- Anlægget blev indstillet til positiv udsortering af polymer 1 (fx HDPE).
- Restfraktionen fra udsortering af polymer 1 blev sendt retur til indgangen, hvorefter NIR-sorteren blev indstillet til positiv udsortering af polymer 2 (fx PP). Restfraktionen blev ledt retur, og NIR-sorteren blev indstillet til sortering af polymer 3 (fx PET).
- Herudover blev de tre produktfraktioner oprenset ved at køre dem igennem anlægget med negativ sortering, dvs. at NIR-sorteren blev indstillet til at skyde alt bort, der ikke er den valgte polymer. Ved oprensning af HDPE blev NIR-sorteren således indstillet til at udsortere PP, PET, PS og PVC.

Udsortering af sort plast er foretaget ved manuel udsortering fra materialestrømmen i forsøringsstationen.

Resultater af karakterisering

Af TABEL 37 fremgår den procentvise fordeling af mængder registreret ved affaldskarakteriseringen. Mængderne er indsamlet i Københavns Kommune. Hård og blød plast indgår i sorteringskriterierne for denne fraktion.

TABEL 37. Procentvis fordeling af indhold i udsorterede fraktioner fra materialer indsamlet i Københavns Kommune.

Indhold	HDPE ⁷⁰	HDPE ekskl. plastfolie ⁷¹	PP	PET
HDPE	66,4	92,0	1,2	0,1
PET	1,4	1,9	1,1	94,6
PP	0,9	1,3	81,7	0,4
PS	0,1	0,2	0,0	0,1
PVC	0,1	0,1	0,1	0,2
Uidentificeret plast, sammensatte materialer og andet ikke-sort plast	0,7	1,0	0,9	0,1
Sort plast	0,8	1,1	1,0	0,8
Affald	1,8	2,5	2,1	0,7
Plastfolie	27,8		11,8	2,9
Sum	100	100	100	100
Renhed	66,4	92,0	81,7	94,6

Materialerne er oprenset to gange som beskrevet i begyndelsen af Bilag 1.3.

Som det fremgår af TABEL 37, er der tale om en renhed af HDPE-fraktionen på 66 %. Renheden af PP-fraktionen er 82 %, mens renheden af PET-fraktionen er 95 %. Der er her tale om to gange udsortering på sorteringsanlægget for alle tre polymertyper.

Andelen af folie i HDPE-fraktionen var meget høj. Årsagen hertil var en delvis tilstopning af vindsigten. Efter at have konstateret det høje folieindhold blev det valgt at foretage en oprensning for folie for den del af HDPE-fraktionen, der ikke indgik i karakteriseringen. Dette blev gjort ved at køre HDPE-fraktionen igennem anlægget igen med vindsigten i drift, så folierne blev frasuget. Da HDPE-materialerne hovedsageligt er ret tykvæggede emballager i form af flasker/beholdere, frasuges disse ikke i nævneværdig grad.

PP-fraktionen var meget ren. Der var eksempelvis ikke fødevarerester i bøtter etc., som det ofte ses for denne fraktion.

Der blev registreret mange mindre plastflager og fx små låg, øjenskylleemballage etc. Dette skyldes sandsynligvis, at der ikke på sorteringsanlægget hos ARC indgår en 20 mm sigte som på de øvrige anlæg.

I alt blev 240,0 kg sorteret og karakteriseret. Heraf udgjorde

- HDPE: 95,2 kg
- PP: 76,7 kg
- PET: 68,1 kg.

⁷⁰ Registreret ved karakteriseringen

⁷¹ Teoretisk beregning ekskl. plastfolie

Sort plast

Der blev manuelt frasorteret 37,8 kg sort plast fra fraktionen indsamlet i Københavns Kommune. Denne mængde blev karakteriseret, og den procentvise fordeling af polymerer m.v. fremgår af TABEL 38.

TABEL 38. Procentvis fordeling af indholdet i sort plast indsamlet i Københavns Kommune.

Fraktion	Procent
HDPE	1,9
PET	11,0
PP	65,6
PS	12,1
PVC	0,3
PA	0,5
Uidentificeret plast, primært teknisk plast	4,5
Plastholdig WEEE	3,0
Affald	1,1
SUM	100

Som det fremgår af TABEL 38, udgør PP 66 % af den sorte plast. PS udgør 12 %, PET 11 % og HDPE 2 %.

Renheden af den sorte plast var høj, og der var næsten ingen fødevarerester eller tilsmudsede bakker. Den sorte plast var heller ikke særlig støvet.

Indhold af PVC ved sortering af materialer fra Københavns Kommune

I TABEL 39 er vist det analyserede indhold af PVC i sorterede fraktioner af PE, PP, PET og sort plast.

TABEL 39. Indhold af PVC i sorterede fraktioner fra Københavns Kommune.

Indhold	PVC i ppm	Estimeret PVC i oprenset polymer ppm
PET	1.746	1.845
PP	1.400	
PE	700	
Sort plast	3.400	

Ud over det registrerede indhold af PVC i de sorterede fraktioner er i TABEL 39 også vist det forventede indhold af PVC i polymeren efter oprensning med friktionsvask og densitetsseparation. Beregningen er foretaget ved at antage, at lette plasttyper (densitet $<1 \text{ g/cm}^3$) og affald fjernes ved den videre oparbejdning.

Bilag 2. Fotodokumentation

Bilag 2.1 Fraktioner sorteret hos Reno-Nord og indsamlet i Reno-Nords leverandørområde, Nordjylland



FIGUR 46. HDPE én gang oprenset med en del indhold af folie

Bilag 2.2 Fraktioner sorteret hos Reno-Nord og indsamlet i Dansk Affalds leverandørområde



FIGUR 47. HDPE.



FIGUR 48. PP.



FIGUR 49. PET.



FIGUR 50. HDPE-flaske med glasstøv.

Bilag 2.3 Fraktioner sorteret hos Nomi4s og indsamlet i Nomi4s' leverandørområde



FIGUR 51. HDPE



FIGUR 52. PP.



FIGUR 53. PET.

Bilag 2.4 Fraktioner sorteret hos ARC og indsamlet i Københavns Kommune



FIGUR 54. HDPE inkl. folie.



FIGUR 55. PP.



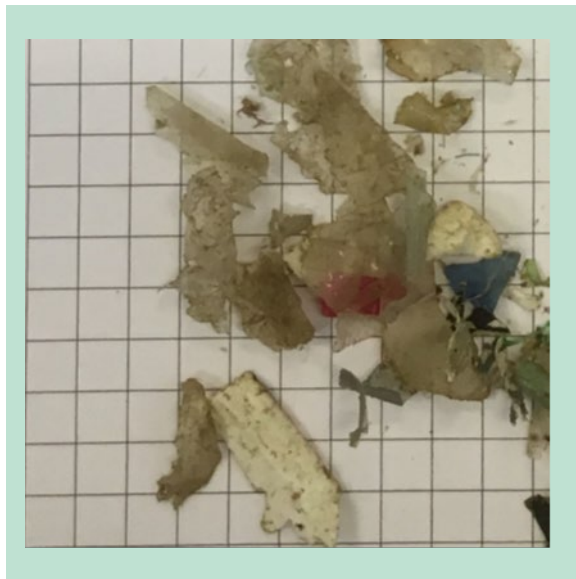
FIGUR 56. HDPE efter fjernelse af folier.



FIGUR 57. Folier fra oprensning af HDPE.

Bilag 3. Neddelingsforsøg

Der er udført neddelingsforsøg med henholdsvis 10 og 14 mm sold. På FIGUR 58 og FIGUR 59 er vist eksempler. Mængden af buk, som kan fange luftbobler, var acceptabel ved laboratorietest af PP (<2 %), hvorfor det blev valgt at benytte 14 mm sold, som vil medføre dannelse af lidt færre mindre partikler (små partikler tabes i vaskeprocessen).



FIGUR 58. Materiale neddelt med brug af 14 mm sold



FIGUR 59. Materiale neddelt med brug af 10 mm sold

Bilag 4. Beregning af separations-effektivitet i densitetssortering

Bilag 4.1 Densitetssortering af sort plast

Det blev valgt at gennemføre separation ved $1,12 \text{ g/cm}^3$ først. Forsøget blev udført på en mindre densitetsseparationsenhed ved AVL, hvor der kan foretages densitetsseparation i saltblandinger.

Der blev densitetssorteret på 196 kg vasket/tørret, sort plast fra ARC og 158 kg fra Reno-Nord.

Prøver blev udtaget af det tilførte materiale (input) samt af flyde- og synkefraktionen separeret ved $1,12 \text{ g/cm}^3$.

Flydefraktionen blev herefter skyllet og densitetssorteret i vand (1 g/cm^3). Prøver blev udtaget af synkefraktionen (plast med densitet mellem 1 og $1,12 \text{ g/cm}^3$) og af flydefraktionen (plast med densitet $< 1 \text{ g/cm}^3$).

Der er i alt 4 fraktioner:

- I: Input
- L: Let fraktion (densitet $< 1 \text{ g/cm}^3$)
- M: Mellem fraktion (densitet $1-1,12 \text{ g/cm}^3$)
- T: Tung fraktion (densitet $>1,12 \text{ g/cm}^3$)

Inputfraktionen er analyseret for indhold af fraktioner med densitet $<1 \text{ g/cm}^3$, $1-1,12 \text{ g/cm}^3$, $>1,12 \text{ g/cm}^3$.

Herudover er synke- og flydefraktionerne fra densitetsseparation ved $1,12 \text{ g/cm}^3$ og 1 g/cm^3 analyseret ved samme densiteter for at undersøge, om der er synke- eller flydefraktioner til stede, som ikke har nået at blive fuldstændig separeret i de dynamiske separationsprocesser.

Analysen er udført af Teknologisk Institut ved at foretage densitetsseparation af flakes placeret i monolag i et kar, hvor der manuelt blev udført befugtning af flakes, så luftbobler blev fjernet. Efter omrøring/boblefjernelse henstod kar, indtil materialet var separeret, hvorefter flydefraktionen blev skimmet af.

Analyseresultaterne er vist i TABEL 40 til TABEL 42.

TABEL 40. Fordeling af sort plast i inputfraktioner ud fra densitetsseparation i laboratorium.

Fraktion	ARC	Reno-Nord
< 1 g/cm ³	43,4	55,9
1-1,12 g/cm ³	30,8	21,5
> 1,12 g/cm ³	25,8	22,6

TABEL 41. Bestemmelse af separationsnøjagtighed ved separation ved 1,12 g/cm³ ved AVL

Fraktion	ARC	Reno-Nord
Flyde <1,12 g/cm ³	99,74	98,90
Flyde >1,12 g/cm ³	0,26	1,10
Synke <1,12 g/cm ³	0,74	0,35
Synke >1,12 g/cm ³	99,26	99,65

TABEL 42. Bestemmelse af separationsnøjagtighed ved separation ved 1 g/cm³ ved AVL

Fraktion	ARC	Reno-Nord
Flyde <1 g/cm ³	99,65	99,40
Flyde >1 g/cm ³	0,35	0,60
Synke <1 g/cm ³	19,26	16,75
Synke >1 g/cm ³	80,74	83,25

Som angivet i begyndelsen af dette afsnit blev der analyseret følgende masseandele af Input:

$X_{L,I}$ andelen af let fraktion - densitet <1 g/cm³

$X_{M,I}$ andelen af mellem fraktion - densitet 1-1,12 g/cm³

$X_{T,I}$ andelen af tung fraktion - densitet >1,12 g/cm³

For prøven udtaget fra densitetssortering ved 1,12 g/cm³ som flydefraktion blev masseandelen analyseret:

$X_{L+M(F)}$ andelen af flydefraktion i udtaget prøve

$X_{L+M(S)}$ andelen af synkefraktion i udtaget prøve

For prøven udtaget fra densitetssortering ved 1,12 g/cm³ som synkefraktion blev masseandelen analyseret:

$X_{T(F)}$ andelen af flydefraktion i udtaget prøve

$X_{T(S)}$ andelen af synkefraktion i udtaget prøve

For prøven udtaget fra densitetssortering ved 1,0 g/cm³ som flydefraktion blev masseandelene analyseret:

$X_{L(F)}$ andelen af flydefraktion i udtaget prøve

$X_{L(S)}$ andelen af synkefraktion i udtaget prøve

For prøven udtaget fra densitetssortering ved 1,0 g/cm³ som synkefraktion blev masseandelen analyseret:

$X_{M(F)}$ andelen af flydefraktion i udtaget prøve

$X_{M(S)}$ andelen af synkefraktion i udtaget prøve

Beregning af masseandelen af flyde- og synkefraktioner i de 3 fraktioner let, mellem og tung blev foretaget med metoden beskrevet i Bilag 4.2 i to trin, idet der først blev beregnet for separationen ved 1,12 g/cm³ og dernæst for separationen ved 1,0 g/cm³.

Resultatet af beregningen er vist i TABEL 43.

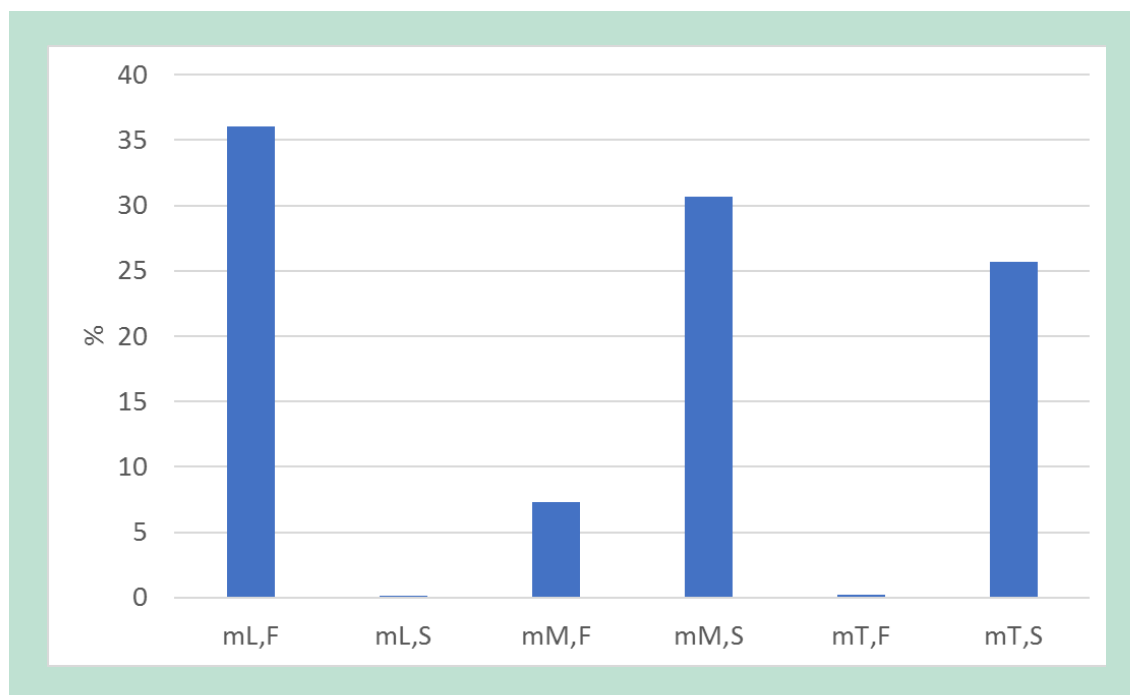
TABEL 43. Flyde og synke fraktioner i let, mellem og tung fraktion (ud af 100 %).

Fraktion ⁷²	ARC	Reno-Nord	Bemærkning
mL,F	36,1	52,2	PP
mL,S	0,12	0,32	Tung plast (urenheder) i PP
mM,F	7,3	4,3	PP med fyldstof
mM,S	30,7	21,4	PS mm.
mT,F	0,19	0,08	Let plast (urenheder) PET
mT,S	25,65	21,7	PET

Fraktionen mL,F er PP med rester af PE, som er hovedfraktionen, der blev oparbejdet (ca. 50 % af totalmængden).

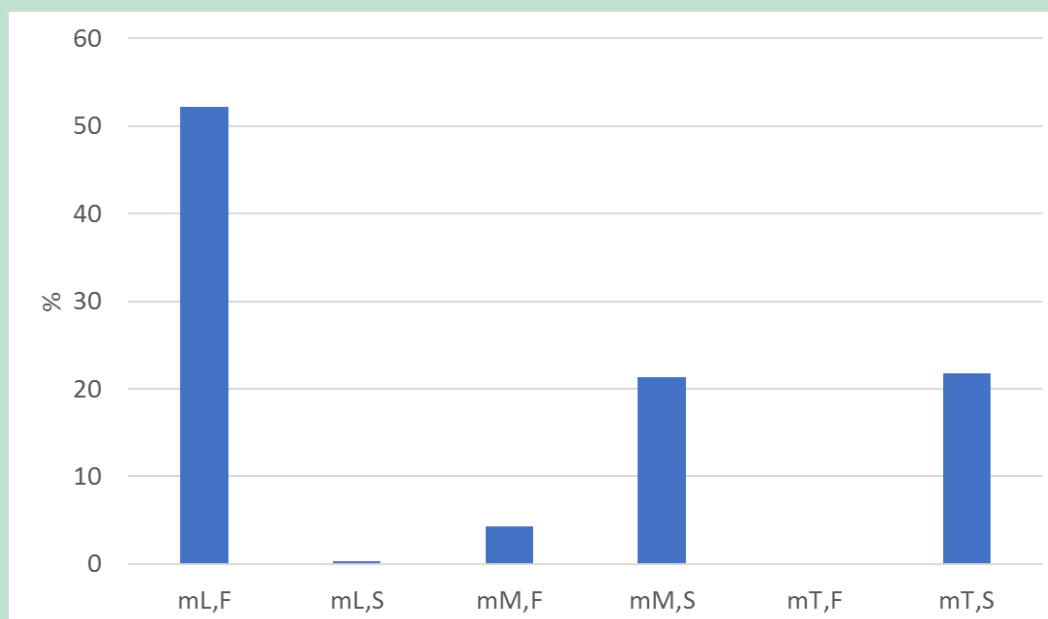
Rækkefølgen af fraktioner begynder med materiale med lavest densitet og slutter med materiale med højest densitet.

Resultaterne i TABEL 43 er vist på FIGUR 60 og FIGUR 61.



FIGUR 60. ARC. Flyde- og synkefraktioner i let, mellem og tung fraktion.

⁷² F er flydefraktion S er synkefraktion L er let fraktion, M er mellem fraktion og S er synkefraktion Eksempel: mL,F er % andelen af flydefraktion (F) i den lette fraktion (L)



FIGUR 61. Reno-Nord Flyde- og synkefraktioner i let, mellem og tung fraktion.

TABEL 44. Udbytte og separationsnøjagtighed af let fraktion $< 1 \text{ g/cm}^3$ og tung fraktion $> 1,12 \text{ g/cm}^3$.

Fraktion	ARC	Reno-Nord
Udbytte let fraktion $< 1 \text{ g/cm}^3$	83,2	92,4
Udbytte tung fraktion $> 1,12 \text{ g/cm}^3$	99,3	96,2
Separationsnøjagtighed let fraktion $< 1 \text{ g/cm}^3$	99,7	99,4
Separationsnøjagtighed tung fraktion $> 1,12 \text{ g/cm}^3$	99,3	99,7

Bilag 4.2 Densitetssortering oparbejdningelinje

I det følgende er beskrevet den anvendte metode til bestemmelse af separationsudbytte ved densitetssortering i vand i oparbejdningelinjen.

I metoden antages det, at densitetssorteringsenheden ved anvendt kapacitet fejlsorterer en mindre mængde partikler, således at:

1. plastpartikler med høj densitet $> 1 \text{ g/cm}^3$ medrives sammen med de lette partikler i flydelaget, fx på grund af at de ikke er helt separeret, eller hvis partikler med høj densitet indeholder buk, der kan opsamle luftbobler
2. plastpartikler med lav densitet $< 1 \text{ g/cm}^3$ synker ned sammen med tunge partikler, fx hvis der ligger en tung partikel oven på en let.

Herefter udtages en prøve af tilført materiale samt af flydefraktion (kaldet let fraktion L her) og synkefraktionen (kaldet tung fraktion T her), og herefter bestemmes i laboratoriet, hvor meget af hver fraktion der flyder eller synker. Dette sker ved at sikre en grundig befugtning, at partikler findes i et monolag, og at væsken er i ro.

For prøven for Input analyseres masseandelene:

$X_{L,i}$ andelen af let fraktion - densitet $< 1 \text{ g/cm}^3$

$X_{T,i}$ andelen af tung fraktion - densitet $> 1 \text{ g/cm}^3$

For prøven udtaget fra densitetssortering ved 1,0 g/cm³ som flydefraktion analyseres masseandelene:

$X_{L(F)}$ andelen af flydefraktion i udtaget prøve

$X_{L(S)}$ andelen af synkefraktion i udtaget prøve

For prøven udtaget fra densitetssortering ved 1,0 g/cm³ som synkefraktion analyseres masseandelene

$X_{T(F)}$ andelen af flydefraktion i udtaget prøve

$X_{T(S)}$ andelen af synkefraktion i udtaget prøve

Herefter kan opstilles følgende formler til beregning af separationsudbytte og separationsrenhed:

$$mind = \text{tilført mængde} \quad (1)$$

Den tilførte mængde er summen af al analyseret flydefraktion (F) og al analyseret synkefraktion (S) i de to fraførte strømme af let og tung fraktion

$$mind = mF_{tot} + mS_{tot} \quad (2)$$

Det vides, at al flydefraktion i Input er:

$$mF_{tot} = X_{L,I} * mind \quad (3)$$

Og ligeledes for synkefraktionen i input:

$$mS_{tot} = X_{S,I} * mind \quad (4)$$

Massen af fraført let fraktion er m_L og af fraført tung fraktion m_T .

For mF_{tot} :

$$mF_{tot} = m_L * X_{L,F} + m_T * X_{T,F} \quad (5)$$

og for mS_{tot} :

$$mS_{tot} = m_L * X_{L,S} + m_T * X_{T,S} \quad (6)$$

gælder det:

$$m_L + m_T = mind \quad (7)$$

Der benyttes 3, 5 og 7 og fås:

$$X_{L,I} * mind = m_L * X_{L,F} + (mind - m_L) * X_{T,F} \quad (8)$$

Og isolerer m_L (massen af den lette outputfraktion -flydefraktion):

$$m_L = \frac{mind(X_{L,I} - X_{T,F})}{X_{L,F} - X_{T,F}} \quad (9)$$

Formel 7 giver således massen af den tunge fraktion (synkefraktionen).

Herefter kan man bestemme masserne af flydefraktion i de lette og tunge outputfraktioner og tilsvarende mængden af synkefraktion i de lette og tunge outputfraktioner:

$$m_{L,F} = X_{L,F} * m_L \quad (10)$$

$$m_{T,F} = X_{T,F} * m_T \quad (11)$$

$$m_{L,S} = X_{L,S} * m_L \quad (12)$$

$$m_{T,S} = X_{T,S} * m_T \quad (13)$$

Separationsudbyttet for den lette fraktion beregnes herefter:

$$100 * \frac{m_{L,F}}{m_{L,F} + m_{T,F}} \quad (14)$$

Og for den tunge fraktion:

$$100 * \frac{m_{T,S}}{m_{T,S} + m_{L,S}} \quad (15)$$

Separationsnøjagtighed let fraktion:

$$X_{L,F} * 100 \quad (14)$$

Separationsnøjagtighed tung fraktion:

$$X_{T,S} * 100 \quad (15)$$

Beregning for densitetsseparation af PP i afsnit 6.2.2

Baseret på data i TABEL 17 haves:

$$x_{L,l} = 0,875$$

$$x_{S,l} = 0,125$$

$$x_{L,F} = 0,987$$

$$x_{L,S} = 0,013$$

$$x_{T,F} = 0,079$$

$$x_{T,S} = 0,920$$

Med mind=1 beregnes massefordelingen af flyde- (F) og synkeandel (S) i henholdsvis den lette outputfraktion (L) og den tunge outputfraktion (T):

$$m_L = 0,877$$

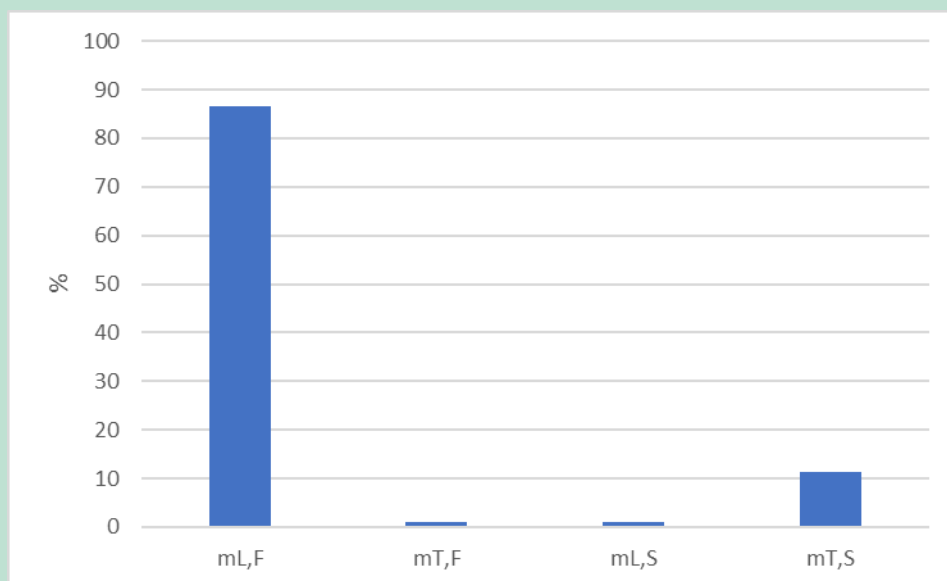
$$m_{L,F} = 0,865$$

$$m_{T,F} = 0,010$$

$$m_{L,S} = 0,011$$

$$m_{T,S} = 0,114$$

Fordelingen er vist på FIGUR 62.



FIGUR 62. Massefordelingen af flydeandel (F) og synkeandel (S) i henholdsvis let outputfraktion (L) og tung outputfraktion (T).

Herefter beregnes separationsudbytte for let fraktion med formel 14 til 98,7 % og for den tunge fraktion med formel 15 til 92,0 %

I afsnit 6.2.2 er angivet et indhold på 24 % tung PP med fyldstoffer i den tunge andel af synkefraktionen.

Dette svarer til $0,114 \cdot 24 = 2,8$ % af den tilførte masse.

Herudover var der 1 % let fraktion i synkefraktionen, hvilket = $1 + 2,8 = 3,8$ % tab af den lette fraktion.

Der er 87,5 % produkt af hovedsageligt PP med lidt PE.

De 3,8 % tab svarer til et tab på $3,8 / 87,5 \cdot 100 = 4,3$ % af produktfraktionen, hvilket hovedsageligt skyldes, at nogle emballageproducenter har anvendt fyldstof i emballagen.

Udvikling af oparbejdningslinje til optimal genanvendelse af indsamlet plast fra husstande set i et cirkulært perspektiv

I projektet er der udviklet en prototype af en oparbejdningslinje til oparbejdning af polymersorteret, husstandsindsamlet hård plast. Oparbejdningslinjen er udviklet til primært at oparbejde HDPE og PP, som i Danmark udgør ca. halvdelen af den hårde plast i husstandsindsamlet plast, men herudover er der arbejdet med oparbejdning af PET og sort plast, hvilket i alt svarer til ca. 95 % af den hårde plast.

For at teste robustheden af oparbejdningsteknologien er der udsortet polymerer fra et bredt spekter af indsamlings-systemer med forskellige sorteringskriterier. Herudover er det undersøgt, hvad polymerrenheden betyder for oparbejdningen.



Miljøstyrelsen
Tolderundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk