

# Modeling material flows through plastic recycling chains

Citation for published version (APA):

Lase, I. S. (2023). *Modeling material flows through plastic recycling chains*. [Doctoral Thesis, Maastricht University, Ghent University]. Maastricht University. <https://doi.org/10.26481/dis.20231204il>

## Document status and date:

Published: 01/01/2023

## DOI:

[10.26481/dis.20231204il](https://doi.org/10.26481/dis.20231204il)

## Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

## Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

## General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.umlib.nl/taverne-license](http://www.umlib.nl/taverne-license)

## Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[repository@maastrichtuniversity.nl](mailto:repository@maastrichtuniversity.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## SUMMARY

The unprecedented growth of plastic demand in our daily lives is inevitable because of its broad applications, such as for food and beverage packaging, home piping and insulation, lightweight automotive or electronic parts, and horticulture products (agriculture film or gardening pots). The broad application of plastic owes to its excellent performance, such as high moldability, light weight, resistance against chemical and mechanical degradation, low production cost, and excellent barriers against aspects like oxygen, water vapor, microorganisms, and carbon dioxide. Nevertheless, when becoming waste, plastic is often managed in unsustainable ways causing adverse environmental impacts. Plastic recycling rates are still low due to a lack of adequate waste management infrastructure such as separate waste collection at source (e.g., at households, schools, offices, restaurants, etc.), material sorting, and recycling. The low plastic recycling rates can also be caused by the fact that recycling plastic is challenging because of the complex material structures (e.g., different polymer grades, multimaterial products, contamination during the use phase, etc.), and mix of (Non) Intentionally Added Substances (NIAS), including inherited hazardous legacy chemicals (e.g., flame retardants), which affects recycled plastic quality. In addition, plastic recycling operations are not always economically feasible and self-sustaining, because recycled plastic has a low selling price due to its inferior quality compared to virgin plastic. However, in Europe, ambitious targets have been set out by the European Commission alongside voluntary pledges made by the European plastic industry, which aim to increase plastic recycling into high-value secondary materials suitable for broader end market applications. Thus, it is evident that there is an urgent need to improve the *status quo* of plastic waste management, starting by identifying the main bottlenecks, exploring technological options, and evaluating the economic and environmental aspects of the recycling chains.

In this PhD research, the potential improvements within plastic recycling chains in Europe are investigated by building and applying material flow analysis (MFA) models in combination with several circularity indicators, cost benefit analysis and life cycle assessment.

First, Chapter 1 of this PhD research provides a scientific literature review on the current state-of-the-art plastic waste management system (*status quo*) in Europe, including a

few key (provisional) regulations and pledges made by the European Commission and the plastic industry.

In Chapter 2 of this research, a MFA model is developed and used to investigate the current and (potential) future performance of plastic waste management in Europe. The main objective of the MFA model in Chapter 2 is to measure the contribution of various plastic recycling technologies to increase plastic circularity and achieve recycling targets in Europe. This research considers improvements within plastic recycling chains (e.g., improved mechanical recycling (MR) yield), as well as new emerging recycling technologies, including chemical recycling (CR) and solvent-based recycling (SBR). The analyses are done by tracing the flows of the ten most used plastic types in Europe in five key waste generating sectors in Europe. The ten polymers considered in this analysis are (Linear) Low-Density Polyethylene (LLDPE), High-Density Polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP), Polyethylene Terephthalate (PET), Polystyrene (PS), Expanded Polystyrene (EPS), Polyvinyl Chloride (PVC), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Polyurethane (PUR), and Polyamide (PA). The five key plastic waste generating sectors are packaging, building and construction, automotive, electronic, and agriculture sector. For the purposes of measuring potential improvements in the European plastic circularity, one baseline scenario (*status quo* in 2018, as the benchmark) and six future scenarios in 2030 are considered. One of the future scenarios (in 2030) only considers the improvement of source separation of plastic, sorting, and mechanical recycling (MR), while the remaining scenarios consider the combination of MR, CR, and SBR to deal with plastic waste in Europe. One of the future scenarios also investigates the impact of processing so-called 'missing plastic', i.e., plastic waste generated but not accounted for in statistics, towards achieving plastic recycling targets in Europe. Next, five evaluation indicators, namely end-of-life recycling rate (EoL-RR), plastic-to-plastic rate (P2P), plastic-to-chemical rate (P2C), and plastic-to-fuel rate (P2F), are selected to interpret and compare the MFA modeling results. Moreover, an uncertainty propagation analysis is carried out to measure the modeling output uncertainties (i.e., the mass balance and evaluation indicators). Lastly, the potential plastic recycled content is estimated by quantifying the ratio between the uptake of recycled plastic produced from MR, CR, and SBR (per sector) over the total projected plastic demand (per sector) in Europe in 2030. Given the modeling parameters and considered scenarios in the MFA model, it is evident that new emerging plastic recycling technologies such as CR and SBR positively contribute to plastic circularity and to achieve recycling targets in Europe. In

the most positive scenario, the highest EoL-RR is achieved at 80%, in which 61% is P2P and 19% is P2C. In all scenarios, the P2F ranges from 3–6%. The mass balance accounting of the uptake of recycled plastic (per sector) over the projected plastic demand in 2030 suggests that closed-loop recycling, processing the ‘missing plastic’, and emerging plastic recycling technologies (CR and SBR) will be necessary to achieve the recycled content targets.

Next to building and developing a prospective MFA at the European level (as the system boundary), the MFA model is also applied to assess potential improvements in plastic recycling from two key sectors (as case studies) in Europe, namely the electronic sector and packaging sector. In Chapter 3, the MFA model is applied to quantify the amount of recycled plastic production in Belgium and The Netherlands from three selected electrical and electronic equipment (EEE) within the small household appliances (SHA) group, namely vacuum cleaners, coffee machines, and electric shavers. The three products are selected because of their high plastic content in EEE. For the chosen EEE, a multivariate input-output analysis (MIOA) model is developed and applied to better estimate the amount of waste electrical and electronic equipment (WEEE), which is later combined with MFA to estimate the potential recycled plastic production from WEEE. The MIOA model is chosen because it considers the dynamic interconnection between EEE placed on the market (sales), stock flows (i.e., EEE accumulation in the market), and product lifespan distribution. In addition to combining MIOA and MFA, a sensitivity analysis is also carried out to identify the main bottlenecks and potential improvements within the WEEE recycling chains. Through mass balance accounting and analyzing WEEE composition, the following facts were studied: i) the amount of recycled plastic released from the selected WEEE recycling, ii) recycled content availability for the selected (W)EEE, and iii) the inherited hazardous legacy chemicals content from the selected (W)EEE. The model results indicate that improving the selective collection of WEEE and pre-processing steps to recover plastic from WEEE (dismantling, shredding, and material sorting) are key to reaching the EEE recycling target. Moreover, the model predicts that the inherited hazardous legacy chemicals from WEEE can still be found in 2030 (up to 5% by weight), albeit the restriction of hazardous substances has been put into force since 2006. This can be explained by observing the lifespan distribution of the selected EEE products and MIOA results, which suggest that a considerable amount of (W)EEE (up to 10% by weight) purchased from 1990 – 2006 could still be discarded by 2030.

The next case studies presented in this research investigate the recycling performance (from technical and economic perspectives) of the so-called difficult-to-recycled plastic packaging formats: flexible packaging waste. Specifically, this PhD research investigates potential improvements in flexible packaging waste management from households (e.g., individual houses) and non-household sectors (e.g., stores, warehouses, factories, etc.). Chapter 4 of this PhD investigates the recycling performance (from technical and economic perspectives) of an improved mechanical recycling process for flexible packaging waste from households. For this purpose the recycling performance of an improved mechanical recycling process developed (and proposed) by the industry called Quality Recycling Process (QRP) is investigated, and compared with a conventional mechanical recycling process for flexible packaging waste in Europe. The developed MFA starts from two sorted bales (e.g., bales rich in PE film or polyolefin film) after household waste sorting at a German material recovery facility (MRF), which can be recycled either through QRP or a conventional mechanical recycling process. The MFA model is used to trace the flows of materials such as flexible packaging waste and non-flexible packaging waste (e.g., rigid packaging or residue). The MFA results are assessed by applying four evaluation indicators related to quantity (process yield and net recovery indicators) and quality (polymer grade and transparency grade). Next, the economic performance of QRP and conventional mechanical recycling is estimated by combining the MFA results (mass balances) and economic modeling parameters such as utility consumption (e.g., electricity, fuel, water, etc.), capital investment, and regranulate sales. Moreover, sensitivity analyses are carried out to assess potential variations of the selected modeling parameters toward the model results (i.e., evaluation indicators and economic balance). This research indicates that QRP for flexible packaging waste from households performs similarly to conventional mechanical recycling, yet QRP produces a higher regranulate quality. From an economic perspective, QRP improves the economic balance of flexible packaging waste recycling, and QRP can be important in increasing plastic circularity for flexible packaging.

Next to household waste, the economic feasibility study of collecting and mechanical recycling for flexible packaging waste from non-household sector is investigated in Chapter 5. The economic feasibility is assessed by building a cost benefit analysis (CBA) model starting with a logistic simulation of selective collection, followed by a MFA of mechanical recycling, and its associated economic aspects (i.e., capital investment, annual costs and regranulate

sales). Particularly, this research considers urban areas of the City of Ghent in Belgium, and its twelve neighboring municipalities as a case study (system boundary). The CBA of flexible packaging from non-household sectors starts by characterizing the composition and estimating the waste quantity generated per business activity (also called NACE sector in Europe) in the considered urban areas in this study. The waste quantity is estimated by real sampling in 2018 in the City of Ghent, combined with extrapolation with Orbis databases that provides data on the number of companies per region. The waste compositions are characterized during real sampling campaigns between December 2021 – February 2022. The waste sampling campaigns cover five key non-household sectors, such as Wholesale (e.g., NACE G.46), Retail (e.g., NACE G.47), Construction (e.g., NACE F.41), Logistics (e.g., NACE H.49), and 'other' sectors (e.g., NACE C. 10, NACE C.18, etc.). Once the waste composition and quantity have been estimated, the annual costs of selective collection costs in three different collection frequencies (weekly, fortnightly, and monthly) are estimated using the OptiFlow© software. Furthermore, the material flows and economic balance of mechanical recycling of non-household flexible packaging waste are investigated, including the estimated revenue from regranulates sales. Lastly, the carbon footprint associated with collecting and mechanical recycling of non-household flexible packaging waste is estimated, and compared with the baseline scenario (i.e., virgin PE granulate production with incineration as EoL treatment). This research suggests that collecting and mechanical recycling of non-household flexible packaging waste strategy is contingent upon waste collection frequencies, achieving minimum waste quantity, and maintaining high-quality feedstock (waste quality to be processed through mechanical recycling).

In chapter 6 of this PhD research, a preliminary assessment of recycled content availability for flexible packaging (household and non-household) in Europe is conducted, assuming 100% closed-loop recycling from flexible packaging waste back into new flexible packaging. The new proposed Packaging and Packaging Waste Regulations (PPWR) consists of mandatory minimum recycled content targets for flexible packaging, i.e., setting the ambition at 35% recycled content target for non-contact-sensitive and 10% recycled content target for contact-sensitive flexible packaging in 2030. For the purpose of assessing the feasibility to meet the recycled content target, a MFA model is developed to trace the fate of flexible packaging waste throughout the end-of-life treatment and regranulates production in Europe in 2030. The MFA model is built assuming that the in 2030 the flexible packaging

design will be improved (e.g., from multi- to mono-material flexible packaging), more selective collection for flexible packaging (e.g., more P+MD collection in Europe), sorting techniques will perform better (e.g., 'smart' sorting techniques using digital watermarks or artificial intelligence), and better mechanical recycling and pyrolysis yield (e.g., advanced mechanical recycling like QRP or catalytic pyrolysis). Furthermore, for the purpose of modeling future end-of-life treatment, five scenarios are developed and investigated, consisting only mechanical recycling for flexible packaging as well as mechanical recycling and pyrolysis as complementary techniques to reach the recycled content target set out in Europe. Furthermore, the capital investment with achieving the recycled content targets are estimated, which is developed based on the MFA model results combined with economic factors (in €/tonne) found in literature. The MFA results suggest that the recycled content targets can be achieved by using mechanical recycling and pyrolysis as complementary techniques to deal with flexible packaging waste. In the most positive scenarios, €7.7 – 8.8 billion of capital investment would be needed to build mechanical recycling and pyrolysis infrastructure, including pretreatment and hydrotreatment for pyrolysis. The MFA results also indicate a trade-off between achieving higher-quality of regranulates to meet 10% recycled content target for flexible packaging (assuming pyrolysis would become a more dominant technique to achieve the target), and annual regranulates production (i.e., quantity of secondary materials). As results, the overall end-of-life recycling rate for flexible packaging could drop when the contact-sensitive recycled content targets are achieved, assuming that pyrolysis would become a more dominant technology to produce higher-quality regranulates suitable for contact-sensitive applications in Europe such as for example for food packaging.

Finally, in the last Chapter 7, the general conclusion of this PhD research is presented, including the future perspective on improving the developed MFA model and plastic circularity. The importance of expanding the system boundaries to other regions (e.g., other countries within or beyond Europe), product categories (e.g., other EEE), and sectors (e.g., automotive sector) are highlighted. The applied MFA model can be improved by developing more scenarios (e.g., implementing new designs or business models like repair or reuse) and more detailed material composition characterization. In addition, the quantity-based MFA models presented in this PhD research can be improved by linking in more quality aspects of the regranulates, which becomes an important step considering a wide range of technical

requirements for end market applications. Finally, the remaining challenges and opportunities for further research around the sustainability aspects of plastic are discussed.

Overall, this PhD research shows that plastic circularity needs to improve in Europe. MFA can serve as a tool to assess the status quo and measure potential improvements within the European plastic recycling chain by developing potential circularity scenarios. MFA can provide insights into how significant the improvements could be (compared to the baseline scenario) and potential extra capital investment and costs. Finally, the MFA presented in this PhD research can be used to formulate plastic recycling strategies (e.g., minimum recycled content targets) based on science-based projections as well as to monitor the attainment of the plastic recycling targets (e.g., plastic recycling rates) in Europe.



## SAMENVATTING

De ongekende toename van de behoefte aan plastics in ons dagelijks leven is onvermijdelijk door het uitgebreide gebruik van kunststoffen in verschillende domeinen, waaronder verpakkingen van voedingsmiddelen en dranken, leidingen en isolatie voor huishoudelijk gebruik, automobiel- en elektronische componenten, maar ook tuinbouwproducten zoals landbouwfolie of tuinpotten.

Het uitgebreide gebruik van polymeren wordt toegeschreven aan hun opmerkelijke functionaliteit, waaronder opmerkelijke buigzaamheid, licht gewicht, weerstand tegen chemische en mechanische degradatie, lage productiekosten en uitstekende barrière-eigenschappen voor zuurstof, waterdamp, micro-organismen en kooldioxide. Toch worden plastics na hun gebruik vaak op een niet-duurzame manier behandeld, wat nadelige gevolgen heeft voor het milieu. Recyclagecijfers voor plastics zijn nog steeds laag door een gebrek aan adequate infrastructuur voor afvalbeheer, zoals afvalcollectie aan de bron (bv. bij huishoudens, scholen, kantoren, restaurants, enz.), sortering en recyclage. De lage recyclagepercentages van kunststoffen kunnen ook te wijten zijn aan het feit dat het recycleren van kunststoffen een uitdaging is omwille van de complexe materiaalstructuren (bv. verschillende polymeerqualiteiten, producten die bestaan uit verschillende materialen, vervuiling tijdens de gebruiksfase, enz.) en de aanwezigheid van niet-intentioneel toegevoegde stoffen (*non intentionally added substances*, NIAS), waaronder historisch toegevoegde gevaarlijke chemische stoffen (bv. vlamvertragers), die de kwaliteit van gerecycleerde kunststoffen beïnvloedt. Bovendien zijn bepaalde recyclageprocessen niet altijd economisch haalbaar, omdat gerecycleerd plastics een relatief lage verkoopprijs hebben door de inferieure kwaliteit in vergelijking met nieuwe plastics. In Europa heeft de Europese Commissie echter ambitieuze doelen vooropgesteld, samen met niet-bindende doelstellingen van de Europese kunststofindustrie, om meer plastics te recycleren tot hoogwaardige secundaire materialen die geschikt zijn voor bredere eindmarkttoepassingen. Het is dus duidelijk dat de status quo van het beheer van kunststofafval dringend moet worden verbeterd, te beginnen met het identificeren van de belangrijkste knelpunten, het onderzoeken van technologische opties en het evalueren van de economische en milieuaspecten van de recyclageketens.

In dit doctoraatsonderzoek worden de potentiële verbeteringen binnen plasticrecyclageketens in Europa onderzocht door het bouwen en toepassen van materiaalstroomanalyse (MFA) in combinatie met verschillende circulariteitsindicatoren, kosten-batenanalyses en levenscyclusanalyses.

Allereerst wordt in hoofdstuk 1 van dit doctoraatsonderzoek een wetenschappelijke literatuurstudie gegeven over het huidige systeem voor plastic afval (*status quo*) in Europa, inclusief enkele belangrijke (voorlopige) regelgevingen en toezeggingen van de Europese Commissie en de kunststofindustrie.

In hoofdstuk 2 van dit onderzoek wordt een MFA-model ontwikkeld en gebruikt om de huidige en (potentiële) toekomstige prestaties van het recyclagesysteem in Europa te onderzoeken. Het hoofddoel van het MFA-model in hoofdstuk 2 is het meten van de bijdrage van verschillende kunststofrecyclagetechnologieën aan het vergroten van de circulariteit en het behalen van de recyclagedoelstellingen in Europa. Dit onderzoek houdt rekening met verbeteringen in plasticrecyclage (bv. verbeterd rendement van mechanische recyclage (MR)), maar ook met nieuwe opkomende recyclagetechnologieën, waaronder chemische recyclage (CR) en solvent-gebaseerde recyclage (SBR). De analyses zijn gedaan door de stromen van de tien meest gebruikte plastics in Europa te traceren in vijf belangrijke afvalproducerende sectoren in Europa. De tien polymeren die in deze analyse worden meegenomen zijn (lineair) lagedichtheidpolyethyleen (LLDPE), hogedichtheidpolyethyleen (HDPE), polypropyleen (PP), polyethyleentereftalaat (PET), polystyreen (PS), geëxpandeerd polystyreen (EPS), polyvinylchloride (PVC), acrylnitril-butadien-styreen (ABS), polyurethaan (PUR) en polyamide (PA). De vijf belangrijkste kunststofafvalproducerende sectoren zijn de verpakingssector, de bouwsector, de automobielen sector, de elektronica-sector en de landbouwsector. Om de potentiële verbeteringen in de Europese kunststofcirculariteit te meten, worden één basisscenario (*status-quo* in 2018, als benchmark) en zes toekomstscenario's in 2030 bestudeerd. Een van de toekomstscenario's (in 2030) beschouwt alleen de verbetering van bronscheiding van plastics, sortering en mechanische recyclage (MR), terwijl de overige scenario's de combinatie van MR, CR en SBR beschouwen om kunststofafval in Europa te behandelen. Een van de toekomstscenario's onderzoekt ook de impact van de verwerking van zogenaamde 'ontbrekende kunststoffen', d.w.z. kunststofafval dat wordt geproduceerd maar niet in de statistieken wordt opgenomen, op het behalen van de doelstellingen voor plasticrecyclage in Europa. Vervolgens worden vijf evaluatie-

indicatoren geselecteerd, namelijk het recyclagepercentage aan het einde van de levensduur (EoL-RR), het percentage plastic naar plastic (P2P), het percentage plastics naar chemicaliën (P2C) en het percentage plastics naar brandstof (P2F), om de resultaten van de MFA-modellering te interpreteren en te vergelijken. Bovendien wordt een onzekerheidsanalyse uitgevoerd om de onzekerheden in de modeluitvoer te meten (d.w.z. de massabalans en evaluatie-indicatoren). Tot slot wordt de potentiële hoeveelheid aan gerecycleerde plastics geschat door de verhouding te kwantificeren tussen de opname van gerecycleerde plastics geproduceerd uit MR, CR en SBR (per sector) en de totale verwachte vraag naar plastic (per sector) in Europa in 2030. Gezien de modelparameters en de beschouwde scenario's in het MFA-model is het duidelijk dat nieuwe opkomende recyclagetechnologieën zoals CR en SBR positief bijdragen aan de circulariteit van plastics en aan het behalen van de recyclagedoelstellingen in Europa. In het meest positieve scenario wordt de hoogste EoL-RR bereikt van 80%, waarin 61% P2P en 19% P2C is. In alle scenario's varieert de P2F van 3 tot 6%. De massabalans van de opname van gerecycleerde plastics (per sector) ten opzichte van de verwachte vraag naar plastics in 2030 suggereert dat “closed loop” recyclage, verwerking van de “ontbrekende plastics” en opkomende recyclagetechnologieën (CR en SBR) nodig zullen zijn om de streefcijfers voor de gerecycleerde content te halen.

Naast het bouwen en ontwikkelen van een prospectieve MFA op Europees niveau (als de systeemgrens), wordt het MFA-model ook toegepast om potentiële verbeteringen in plasticrecyclage van twee belangrijke sectoren (als casestudies) in Europa te beoordelen, namelijk de elektronica-sector en de verpakkingsector. In hoofdstuk 3 wordt het MFA-model toegepast om de hoeveelheid aan gerecycleerde plastics in België en Nederland te kwantificeren van drie geselecteerde elektrische en elektronische apparaten (EEE) binnen de groep kleine huishoudelijke apparaten (SHA), namelijk stofzuigers, koffiezetapparaten en elektrische scheerapparaten. De drie producten zijn geselecteerd vanwege hun hoge gehalte aan plastics in EEE. Voor de gekozen EEA wordt een multivariate input-outputanalyse (MIOA)-model ontwikkeld en toegepast om de hoeveelheid afgedankte elektrische en elektronische apparatuur (*waste electrical and electronic equipment, WEEE*) beter in te schatten, dat later gecombineerd wordt met MFA om de potentiële productie van gerecycleerde plastics uit WEEE in te schatten. Het MIOA-model is gekozen omdat het rekening houdt met de dynamische relatie tussen EEE die op de markt wordt gebracht (verkoop), voorraadstromen (d.w.z. de accumulatie van EEE op de markt) en de distributie over de levensduur van

producten. Naast het combineren van MIOA en MFA wordt er ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de belangrijkste knelpunten en mogelijke verbeteringen binnen de WEEE-recyclageketen te identificeren. Door middel van massabalansberekeningen en het analyseren van de samenstelling van WEEE werden de volgende feiten bestudeerd: i) de hoeveelheid gerecycleerde plastics die vrijkomt uit de geselecteerde WEEE-recyclage, ii) de beschikbaarheid van gerecycleerde plastics voor de geselecteerde (W)EEE, en iii) het inherente gehalte aan gevaarlijke oude chemische stoffen uit de geselecteerde (W)EEE. De modelresultaten geven aan dat het verbeteren van de selectieve inzameling van WEEE en de voorbereidingsstappen om kunststof terug te winnen uit WEEE (ontmantelen, shredden en sorteren van materialen) essentieel zijn om het recyclagedoelstellingen voor EEE te halen. Bovendien voorspelt het model dat de historische gevaarlijke oude chemische stoffen uit WEEE in 2030 nog steeds kunnen worden aangetroffen (tot 5 gewichtsprocent), hoewel de beperking van gevaarlijke stoffen sinds 2006 van kracht is. Dit kan worden verklaard door te kijken naar de levensduurverdeling van de geselecteerde EEE-producten en de MIOA-resultaten, die suggereren dat een aanzienlijke hoeveelheid (W)EEE (tot 10% in gewicht) die tussen 1990 en 2006 is gekocht, in 2030 nog steeds kan worden weggegooid.

De volgende casestudies in dit onderzoek onderzoeken de recyclageprestaties (vanuit technisch en economisch perspectief) van de zogenaamde moeilijk te recycleren plastic verpakkingen: flexibel verpakkingsafval. Specifiek onderzoekt dit promotieonderzoek potentiële verbeteringen in het beheer van flexibele verpakkingsafval van huishoudens (bijv. individuele huishoudens) en niet-huishoudelijke sectoren (bijv. winkels, magazijnen, fabrieken, enz.). Hoofdstuk 4 van dit proefschrift onderzoekt de recyclageprestaties (vanuit technisch en economisch perspectief) van een verbeterd mechanisch recyclageproces voor flexibel verpakkingsafval van huishoudens. Hiervoor worden de recyclageprestaties onderzocht van een verbeterd mechanisch recyclageproces, *Quality Recycling Process* (QRP) genaamd, ontwikkeld (en voorgesteld) door de industrie, en vergeleken met een conventioneel mechanisch recyclageproces voor flexibel verpakkingsafval in Europa. De ontwikkelde MFA vertrekt van twee gesorteerde balen (bv. balen rijk aan PE-folie of polyolefinen-folie) na het sorteren van huishoudelijk afval in een Duitse sorteerinstallatie (*material recovery facility*, MRF), die kunnen worden gerecycleerd via QRP of een conventioneel mechanisch recyclageproces. Het MFA-model wordt gebruikt om de materiaalstromen te traceren, zoals flexibel verpakkingsafval en niet-flexibel verpakkingsafval

(bijv. harde verpakkingen of residu). De MFA-resultaten worden beoordeeld aan de hand van vier evaluatie-indicatoren met betrekking tot kwantiteit (procesrendement en netto terugwinningsindicatoren) en kwaliteit (polymeerkwaliteit en transparantieniveau). Vervolgens worden de economische prestaties van QRP en conventionele mechanische recyclage geschat door de MFA-resultaten (massabalansen) te combineren met economische modelparameters zoals het verbruik van nutsvoorzieningen (bijv. elektriciteit, brandstof, water, enz.), kapitaalinvesteringen en de verkoop van regranulaat. Bovendien worden gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om mogelijke variaties van de geselecteerde modelparameters in de modelresultaten te beoordelen (d.w.z. evaluatie-indicatoren en economische balansen). Dit onderzoek geeft aan dat QRP voor flexibel verpakkingsafval uit huishoudens vergelijkbaar presteert met conventionele mechanische recyclage, maar dat QRP een hogere kwaliteit regranulaat oplevert. Vanuit een economisch perspectief verbetert QRP de economische balans van de recyclage van flexibel verpakkingsafval, en QRP kan belangrijk zijn bij het vergroten van de circulariteit voor flexibele verpakkingen.

Naast huishoudelijk afval wordt in hoofdstuk 5 de economische haalbaarheid onderzocht van de inzameling en mechanische recyclage van flexibel verpakkingsafval uit de niet-huishoudelijke sector. De economische haalbaarheid wordt beoordeeld door het bouwen van een model voor kosten-batenanalyse (*cost benefit analysis*, CBA), beginnend met een logistieke simulatie van selectieve inzameling, gevolgd door een MFA van mechanische recyclage, en de bijbehorende economische aspecten (d.w.z. kapitaalinvestering, jaarlijkse kosten en verkoop van regranulaat). In het bijzonder beschouwt dit onderzoek stedelijke gebieden van de stad Gent in België en haar twaalf naburige gemeenten als een casestudy (systeemgrens). De CBA van flexibele verpakkingen uit niet-huishoudelijke sectoren begint met het karakteriseren van de samenstelling en het schatten van de hoeveelheid afval die wordt geproduceerd per bedrijfsactiviteit (in Europa ook NACE-sector genoemd) in de stedelijke gebieden die in deze studie worden beschouwd. De afvalhoeveelheid wordt geschat door reële steekproeven in 2018 in de stad Gent, gecombineerd met extrapolatie met Orbis-databases die gegevens verschaffen over het aantal bedrijven per regio. De afvalsamenstellingen worden gekarakteriseerd tijdens analysecampagnes tussen december 2021 en februari 2022. De campagnes bestrijken vijf belangrijke niet-huishoudelijke sectoren, zoals Groothandel (bv. NACE G.46), Detailhandel (bv. NACE G.47), Bouwnijverheid (bv. NACE F.41), Logistiek (bv. NACE H.49), en 'andere' sectoren (bv. NACE C. 10, NACE C.18, enz.). Zodra

de afvalsamenstelling en -hoeveelheid zijn geschat, worden de jaarlijkse kosten van selectieve inzameling in drie verschillende inzamel frequenties (wekelijks, tweewekelijks en maandelijks) geschat met behulp van de OptiFlow©-software. Verder worden de materiaalstromen en de economische balans van mechanische recyclage van niet-huishoudelijk flexibel verpakkingsafval onderzocht, inclusief de geschatte inkomsten uit de verkoop van regranulaat. Tot slot wordt de koolstofvoetafdruk van de inzameling en mechanische recyclage van flexibel verpakkingsafval van niet-huishoudens geschat en vergeleken met het basisscenario (d.w.z. productie van nieuw PE-granulaat met verbranding als EoL-behandeling). Dit onderzoek suggereert dat de strategie voor het inzamelen en mechanisch recycleren van flexibel niet-huishoudelijk verpakkingsafval afhankelijk is van de frequentie waarmee het afval wordt ingezameld, het bereiken van een minimale hoeveelheid afval en het handhaven van de kwaliteit van de grondstof (de kwaliteit van het afval dat mechanisch wordt gerecycled).

In hoofdstuk 6 van dit doctoraatsonderzoek wordt een voorlopige beoordeling uitgevoerd van de beschikbaarheid van gerecycleerde content voor flexibele verpakkingen (huishoudelijk en niet-huishoudelijk) in Europa, uitgaande van 100% gesloten kringlooprecyclage van flexibel verpakkingsafval terug naar nieuwe flexibele verpakkingen. De nieuwe voorgestelde regelgeving voor verpakking en verpakkingsafval (*packaging and packaging waste regulations*, PPWR) omvat verplichte minimumdoelen voor gerecycleerde content voor flexibele verpakkingen, d.w.z. een ambitie van 35% gerecycleerde content voor niet-contactgevoelige en 10% gerecycleerde content voor contactgevoelige flexibele verpakkingen in 2030. Om te beoordelen of het haalbaar is om de doelstelling voor gerecycleerde content te halen, is een MFA-model ontwikkeld om het lot van flexibel verpakkingsafval tijdens de verwerking aan het einde van de levensduur te traceren en de productie in 2030 in Europa te regranuleren. Het MFA-model is opgebouwd in de veronderstelling dat het ontwerp van flexibele verpakkingen in 2030 verbeterd zal zijn (bijv. van multi- naar mono-materiaal flexibele verpakkingen), dat flexibele verpakkingen selectiever ingezameld zullen worden (bijv. meer P+MD-inzameling in Europa), dat sorteertechnieken beter zullen presteren (bijv. 'slimme' sorteertechnieken met behulp van digitale watermerken of kunstmatige intelligentie) en dat mechanische recyclage en pyrolyse een beter rendement zullen opleveren (bijv. geavanceerde mechanische recyclage zoals QRP of katalytische pyrolyse). Voor het modelleren van de toekomstige verwerking aan het einde

van de levensduur worden vijf scenario's ontwikkeld en onderzocht, die alleen bestaan uit mechanische recyclage voor flexibele verpakkingen en mechanische recyclage en pyrolyse als aanvullende technieken om de doelstelling voor gerecycleerde content te halen die in Europa is vastgesteld. Verder wordt er een schatting gemaakt van de kapitaalinvestering die gepaard gaan met het behalen van de doelstellingen voor gerecycleerde content, die is ontwikkeld op basis van de resultaten van het MFA-model in combinatie met economische factoren (in €/ton) uit de literatuur. De resultaten van het MFA-model suggereren dat de streefcijfers voor gerecycleerde content kunnen worden gehaald door mechanische recyclage en pyrolyse als complementaire technieken te gebruiken om flexibel verpakkingsafval te verwerken. In de meest positieve scenario's zou er €7,7 – 8,8 miljard aan kapitaalinvesteringen nodig zijn om infrastructuur voor mechanische recyclage en pyrolyse te bouwen, inclusief voorbehandeling en hydrotreatment voor pyrolyse. De resultaten van de MFA wijzen ook op een wisselwerking tussen het bereiken van regranulaat met een hogere kwaliteit om de doelstelling van 10% gerecycleerde content voor flexibele verpakkingen te halen (ervan uitgaande dat pyrolyse een dominantere techniek wordt om de doelstelling te halen), en de jaarlijkse productie van regranulaat (d.w.z. de hoeveelheid secundaire materialen). Als gevolg hiervan zou het totale recyclagepercentage aan het einde van de levensduur voor flexibele verpakkingen kunnen dalen wanneer de streefcijfers voor contactgevoelige gerecycleerde content worden gehaald, ervan uitgaande dat pyrolyse een dominantere techniek zou worden om regranulaat van hogere kwaliteit te produceren dat geschikt is voor contactgevoelige toepassingen in Europa, zoals bijvoorbeeld voor voedselverpakkingen.

In het laatste hoofdstuk 7 wordt de algemene conclusie van dit doctoraatsonderzoek gepresenteerd, inclusief het toekomstperspectief op het verbeteren van het ontwikkelde MFA-model en plastic circulariteit. Het belang van het uitbreiden van de systeemgrenzen naar andere regio's (bijv. andere landen binnen of buiten Europa), productcategorieën (bijv. andere EEA) en sectoren (bijv. automobiel sector) wordt benadrukt. Het toegepaste MFA-model kan worden verbeterd door meer scenario's te ontwikkelen (bijv. het implementeren van nieuwe ontwerpen of bedrijfsmodellen zoals reparatie of hergebruik) en een meer gedetailleerde karakterisering van de materiaalsamenstelling. Daarnaast kunnen de kwantiteitsgebaseerde MFA-modellen die in dit doctoraatsonderzoek worden gepresenteerd, worden verbeterd door meer kwaliteitsaspecten van het regranulaat te koppelen. Tot slot

worden de resterende uitdagingen en mogelijkheden voor verder onderzoek naar de duurzaamheidsaspecten van plastics besproken.

In het algemeen toont dit promotieonderzoek aan dat de circulariteit van plastics in Europa moet verbeteren. MFA kan dienen als hulpmiddel om de status quo te beoordelen en potentiële verbeteringen binnen de Europese plasticrecyclageketen te meten door potentiële circulariteitsscenario's te ontwikkelen. MFA kan inzicht geven in hoe significant de verbeteringen zouden kunnen zijn (vergeleken met het basisscenario) en potentiële extra kapitaalinvesteringen en kosten. Tot slot kan de MFA die in dit doctoraatsonderzoek wordt gepresenteerd, worden gebruikt om plasticrecyclagestrategieën te formuleren (bijv. doelstellingen voor minimale gerecycleerde content) op basis van wetenschappelijk onderbouwde prognoses en om het behalen van de plasticrecyclagedoelstellingen in Europa te monitoren.