



Luca Campadello
Project and Innovation Manager
ERION Compliance Organization
luca.campadello@erion.it

LA SFIDA DEL RECUPERO DELLE PLASTICHE

Nell'articolo si affronta il tema del recupero della plastica contenuta nei RAEE, processo reso difficoltoso dalla presenza di additivi e ritardanti di fiamma. Viene presentato quindi l'approccio che il progetto di ricerca europeo NONTOX adotta per affrontare questa sfida e che prevede lo sviluppo di tecnologie innovative nell'ambito del riciclo chimico e termochimico.

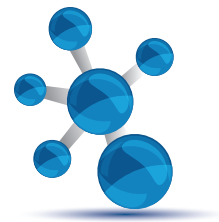


Come sottolineato dai dati messi a disposizione dal **Parlamento Europeo**, i Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) sono considerati uno dei flussi di rifiuti in più rapida crescita: su scala globale, negli ultimi cinque anni, si è registrato un aumento della generazione di RAEE pari al 21%.

Il report elaborato annualmente dall'Università delle Nazioni Unite e pubblicato con il titolo **Global E-Waste Monitor**, fornisce dettagli aggiuntivi. Secondo questo documento, nel 2019, il mondo ha generato 53,6 Mt di RAEE, corrispondenti a una produzione pro-capite di 7,3 kg/abitante. Dal 2014, anno in cui i RAEE generati sono stati 9,2 Mt, il quantitativo di rifiuti ha continuato a crescere; si stima infatti, che nel 2030 saranno generate 70 Mt di RAEE a livello globale. Il proliferare di RAEE non è omogeneo tra i vari continenti, si concentra principalmente in Asia (24,9 Mt), America (13,1 Mt) ed Europa (12 Mt), mentre quantitativi minori si registrano in Africa (2,9 Mt) e Oceania (0,7 Mt). Nel 2019, solo 9,3 Mt dei RAEE complessivamente generati (corrispondenti al 17,4% del totale) sono state formalmente documen-

tate come raccolte e riciclate: si stima che il flusso non documentato venga esportato o sia smaltito attraverso canali non appropriati (per esempio tramite i sistemi di raccolta dei rifiuti urbani indifferenziati). In Europa, meno del 40% dei RAEE viene correttamente raccolto e riciclato, il quantitativo restante è smaltito nell'indifferenziato.

Il 2019 è stato anche l'anno in cui, in Europa, è stata registrata una domanda complessiva da parte dei trasformatori di materie plastiche pari a 50,7 Mt, di cui più di 3 Mt (corrispondenti al 6,2% del fabbisogno totale europeo) sono state richieste per soddisfare le esigenze del settore elettrico ed elettronico. Secondo quanto registrato dall'associazione europea dei Produttori di Materie Plastiche **Plastics Europe**, a livello globale, la produzione di materie plastiche è in continuo aumento, anche se a un ritmo più lento rispetto a quello degli anni precedenti. Nonostante in Europa il volume complessivo di rifiuti plastici inviati a riciclo dal 2006 a oggi sia raddoppiato, il 25% dei rifiuti plastici post-consumo è ancora inviato a discarica. Nell'Unione Europea, infatti, solo il 32,5% del quantitativo di rifiuti plastici post-consumo raccolti è inviato a riciclo; in molti Paesi, il recupero energetico e la discarica sono ancora la prima o la seconda opzione di trattamento. Questi numeri sono ancora troppo modesti se si considera il piano di azione sviluppato dall'Unione Europea per raggiungere entro il 2050 la neutralità climatica. Le Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) non solo sono state identificate come uno dei flussi chiave nel **Piano d'Azione dell'Unio-**



ne Europea per l'economia circolare, ma costituiscono anche una fonte rilevante di plastica, che quota circa il 25% in peso dei RAEE.

Lo studio condotto dalla società internazionale di consulenza e gestione di progetti di sostenibilità Sofies, restituisce una descrizione accurata della parte plastica dei RAEE, della sua gestione e delle criticità ad essa connesse. Ogni anno in Europa vengono generate circa 2,6 milioni di tonnellate di plastica post-consumo provenienti dai RAEE; circa la metà di tutta la plastica contenuta nei RAEE prodotta in Europa non è documentata dai canali ufficiali di raccolta dei RAEE, ma è lavorata in strutture di riciclo di scarso livello o esportata al di fuori dell'Europa.

La grande sfida legata al recupero delle plastiche dei RAEE si basa su diversi fattori che rendono il trattamento molto complesso e oneroso. Le sfide che i riciclatori devono affrontare per aumentare il quantitativo di plastica post-consumo riciclato e reimpresso nel mercato sono legate alla composizione fortemente eterogenea delle plastiche (presenza di più tipologie di polimeri nel singolo prodotto) e alla presenza di un ampio range di additivi, come - ad esempio - i ritardanti di fiamma, le cariche e gli stabilizzanti che incidono sulle prestazioni delle attività di riciclo. Inoltre, nell'ampio spettro degli additivi utilizzati per conferire certe caratteristiche chimico-fisiche al materiale plastico, vi sono anche additivi vietati nel corso degli anni dalla legislazione a causa della loro pericolosità per l'ambiente e la salute umana. Tra i polimeri utilizzati nella produzione di AEE vi sono comunemente l'acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), polistirene (PS) e polistirene ad alto impatto, dall'inglese High Impact PolyStyrene (HIPS), polipropilene (PP), policarbonato/acrilonitrile-butadiene-stirene (PC-ABS): tali polimeri costituiscono il 75% in peso di tutta la plastica generata dal trattamento dei RAEE. Il rimanente 25% è composto da vari polimeri, tra cui polivinilcloruro (PVC), poliuretano (PU) e poliammidi (PA). Mediante una combinazione di tecnologie basate sulla differenza di densità, sulla conduttività elettrica o sulla spettrometria a infrarossi, i riciclatori sono in grado di riciclare il 50-60% del materiale in ingresso; la restante parte è inviata a incenerimento (con recupero energetico nella quasi totalità dei casi) e più raramente in discarica. Tra gli additivi vietati vi sono gli ftalati a

basso peso molecolare (diottilftalato - DEHP, benzilbutilftalato - BBP, dibutilftalato - DBP e diisobutilftalato - DIBP usati come plastificanti), metalli pesanti (come il piombo e composti del cadmio usati come stabilizzanti) e alcuni ritardanti di fiamma bromurati (ottabromodifenil etere - octaBDE, decabromodifenilettere - decaBDE, esabromociclododecano - HBCD).

È evidente che il processo di riciclo della plastica proveniente dai RAEE è un'attività estremamente complessa che deve affrontare sia difficoltà tecniche sia economiche e normative. È quindi urgente il bisogno di individuare innovazioni nell'ambito del riciclo in grado di ridurre l'impatto che i polimeri contenuti nei RAEE hanno sull'ecosistema e limitare i rischi per la salute dell'uomo [1].

In questo contesto così complesso è nato il progetto **Removing hazardous substances to increase recycling rates of WEEE, ELV and CDW plastics - NONTOX**. NONTOX è un progetto finanziato dal programma dell'Unione Europea per la Ricerca e l'Innovazione Horizon 2020 e ha come obiettivo quello di identificare soluzioni innovative per aumentare la purezza e la qualità delle materie plastiche recuperate dal riciclo di tre specifici flussi di rifiuti: RAEE, veicoli a fine vita e rifiuti da costruzione e demolizione. Il progetto ha come finalità ultima quella di ridurre la frazione di plastiche riciclate contenente additivi vietati e potenzialmente soggetti a restrizioni o attualmente destinata alla discarica o all'incenerimento, promuovendo lo sviluppo e l'adozione di nuove tecnologie per il riciclo e il recupero di materiali e di energia. Il partenariato di progetto è costituito da enti di ricerca, istituti accademici e attori industriali che operano a livello internazionale. Attualmente, per il recupero dei materiali plastici oggetto delle attività di ricerca condotte dal progetto NONTOX, vengono adottati processi di riciclo meccanico, chimico e termochimico.

Il riciclo meccanico non cambia la struttura base del materiale e consiste nell'effettuare una serie di trattamenti che trasformano la forma e le proprietà macroscopiche della plastica ottenendo un nuovo materiale. Tra i trattamenti vi sono: raccolta, separazione delle varie frazioni di plastiche, lavaggio, macinazione, fusione ed estrusione della plastica [1]. Il processo ha varie limitazioni in quanto ogni

polimero risponde in maniera diversa al processo e i vari contaminanti e additivi che esso può contenere condizionano la qualità del riciclo stesso e del prodotto riciclato finale [2]. Inoltre, il riciclo meccanico può essere impiegato efficacemente principalmente su plastiche quali PET (polietilene tereftalato) e polietilene (polietilene a bassa densità, dall'inglese low-density polyethylene - LDPE, polietilene lineare a bassa densità, dall'inglese linear low-density polyethylene - LLDPE, polietilene ad alta densità, dall'inglese high-density polyethylene - HDPE) che rappresentano tra il 9% e il 37% della plastica annualmente prodotta [3].

Il riciclo chimico consiste in una serie di processi in grado di rompere i legami chimici presenti nel materiale plastico: porta quindi ad ottenere dei monomeri a partire da polimeri, mediante un processo di depolimerizzazione. In questo modo è quindi possibile produrre nuovi polimeri a partire dai monomeri ottenuti.

Tra i processi termochimici vi è la combustione, che prevede l'ossidazione completa dei polimeri in un'atmosfera ricca di ossigeno. In questo modo è possibile bruciare polimeri con un elevato contenuto di additivi o ritardanti di fiamma. Questo processo viene spesso utilizzato per il recupero di energia da residui di frazioni di plastica derivanti dallo smistamento. Un altro processo termochimico è la pirólisi, che può essere condotta sia senza sia con un catalizzatore, necessario se si vuole ridurre il tempo e la temperatura del processo e restringere la distribuzione dei prodotti ottenuti. Il processo consiste nella rottura dei legami della catena polimerica, senza ossidanti, mediante alte temperature (da 350-550 °C fino a 900 °C) e consente di ottenere catene più corte. Questo processo può essere usato per trattare polimeri quali PET, LDPE, HDPE, PP e PS, ottenendo prodotti liquidi o gassosi che necessitano un ulteriore trattamento per essere usati come combustibile [4].

Un altro processo termochimico è la gassificazione, che converte la plastica in gas combustibile, detto syngas, mediante una reazione che avviene ad alte temperature (900-1100 °C). Il processo rompe le catene polimeriche ottenendo catene più semplici e può essere usato per varie applicazioni che hanno come scopo la generazione di energia e la produ-

zione di vettori di energia; come agente gassificante si può usare aria, aria ricca di ossigeno, vapore o diossido di carbonio (CO₂).

Tra le tecnologie emergenti per quanto riguarda il riciclo chimico e fisico vi è la solvolisi, usata per trasformare alcuni polimeri come l'EPS (polistirene espanso sintetizzato) in monomeri, con il supporto di un solvente; si effettua poi una separazione a base solvente durante la quale la plastica è appunto dissolta in un solvente per purificare i polimeri e separarli da additivi e altri contaminanti; si effettua, infine, l'estrazione supercritica mediante fluido (SFE) (si tratta di un'estrazione di componenti indesiderati utilizzando fluidi supercritici e sfruttando le loro caratteristiche tra cui la densità, la viscosità e la diffusività) [5].

Tra i processi di riciclo, si menziona infine l'idropirolisi, che permette di produrre nafta di buona qualità

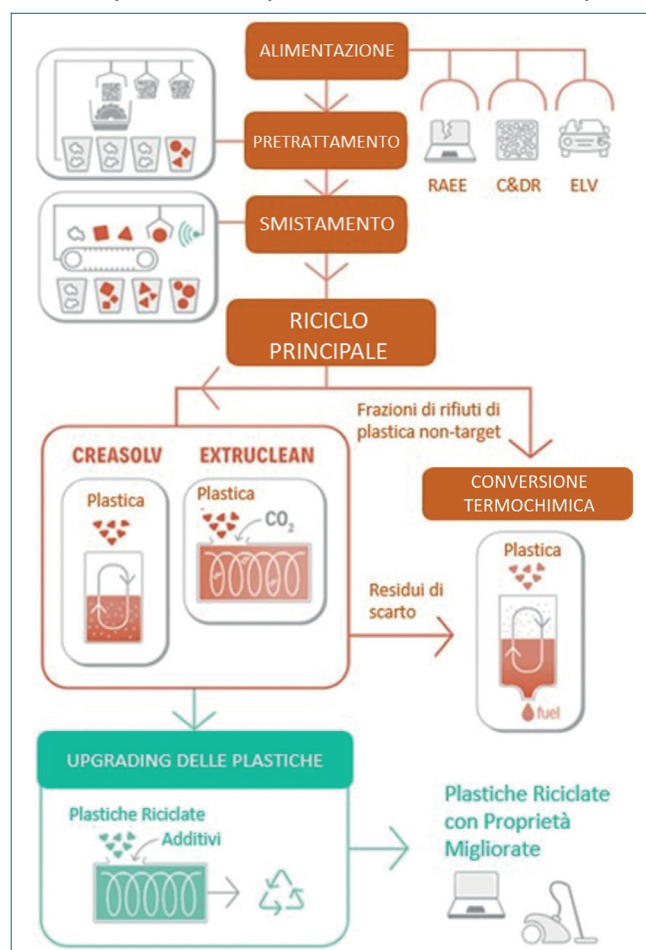


Fig. 1 - NONTOX

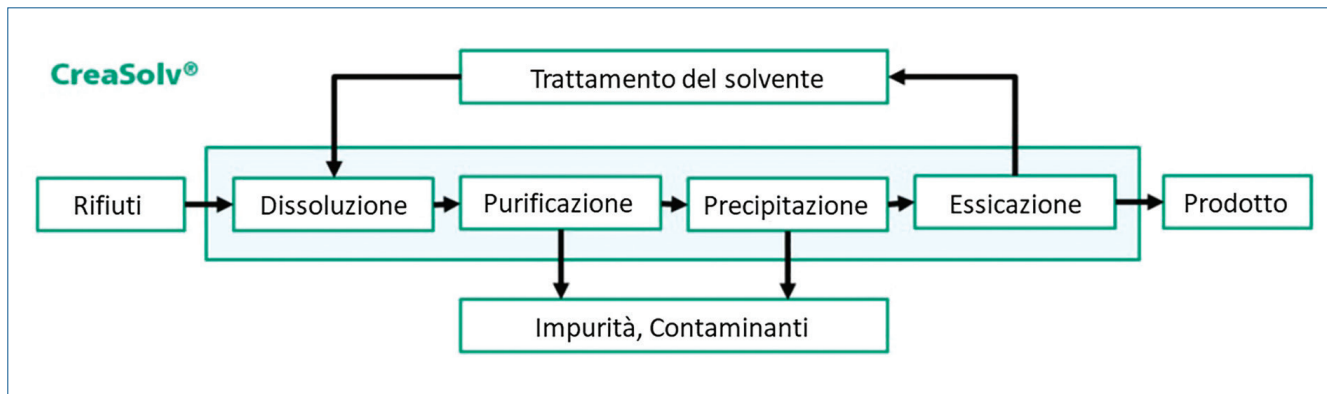
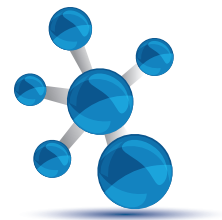


Fig. 2 - CreaSolv

mediante la rottura termica dei legami dei polimeri in un'atmosfera ricca di idrogeno e con l'uso di un catalizzatore [1].

Nell'ambito del progetto NONTOX sono state studiate tecnologie emergenti, come Creasolv®, Extruclean, MODIX, e l'ottimizzazione di processi termochimici, descritti precedentemente, per la gestione dei flussi non valorizzabili e dei sottoprodotti in uscita dagli altri processi. Queste tecnologie sono particolarmente adatte a trattare polimeri quali ABS, HIPS e PP. L'intero processo di trattamento delle plastiche proposto dal progetto NONTOX è rappresentato in Fig. 1.

CreaSolv® (Fig. 2) è un processo sviluppato dal **Fraunhofer Institute for Process Engineering and Packaging IVV** ed è una tecnologia, classificata come un processo di dissoluzione con un approccio solvente/anti-solvente, in grado di recuperare polimeri da rifiuti di plastica a base bromo: un solvente è selezionato per dissolvere un polimero, mentre un anti-solvente fa precipitare il polimero per il recupero. Dopo la dissoluzione nel solvente, la

miscela di plastiche viene pulita tramite uno step di filtrazione per separare i materiali di scarto (polimeri non-target, pigmenti e impurità). In seguito, è prevista una fase di precipitazione mediante l'aggiunta di un anti-solvente da cui si ottiene un polimero puro con un contenuto di bromo inferiore allo 0,1% e una soluzione ricca di impurità solubili; tale soluzione è sottoposta a un processo di distillazione per separare le impurità [6], mentre il polimero è sottoposto ad una fase di estrusione finale [7]. La soluzione di solvente/anti-solvente può essere recuperata per essere riutilizzata e i ritardanti di fiamma estratti sono invece sottoposti a processi termochimici o recuperati [4]. Il processo CreaSolv® è stato già testato con successo per l'EPS (polistirene espanso sinterizzato) e XPS (polistirene espanso estruso) contenenti tracce di bromo.

Il processo **Extruclean** (Fig. 3), sviluppato da **AIM-PLAS**, Istituto Tecnologico per le Materie Plastiche spagnolo, è una tecnologia basata sull'estrusione con simultanea attività di decontaminazione tramite CO₂ supercritica, eccellente solvente per composti

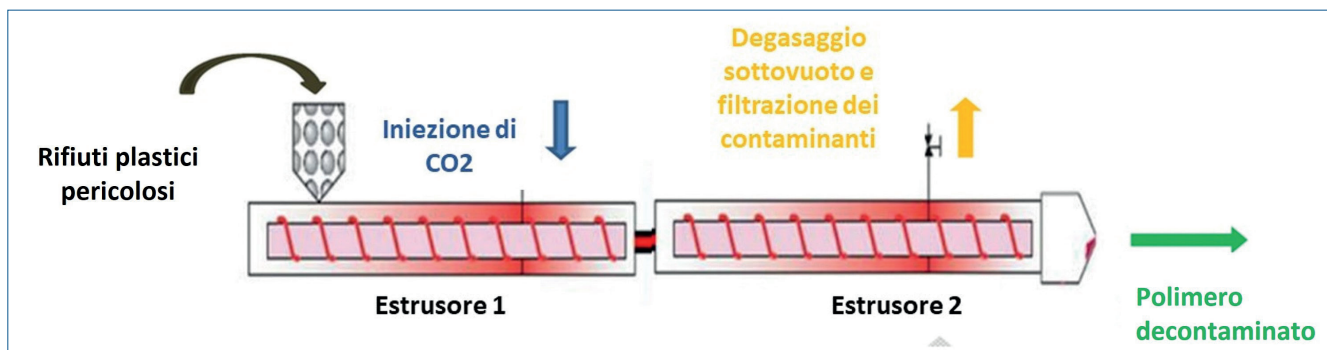


Fig. 3 - Extruclean

polari non organici. La tecnologia è composta da due estrusori connessi in serie. Il primo, dispone di una porta di iniezione del gas per l'iniezione di CO₂. Le condizioni di temperatura e pressione all'interno dell'estrusore mantengono la CO₂ in condizioni supercritiche (sc-CO₂), che consentono la diffusione del gas nella matrice polimerica. La porta di iniezione deve essere posizionata dopo la fusione del polimero all'interno del cilindro. Una volta all'interno, il gas viene diffuso nella fase fusa del polimero. Il secondo estrusore dispone di una porta di degasaggio per la rimozione dei composti volatili, che può essere collegata a un sistema di degasaggio forzato come una pompa per vuoto, e di uno speciale filtro per trattenere i contaminanti tossici diffusi sul gas. Questa tecnica è in grado di rimuovere componenti volatili mediante evaporazione, che assicurata dalla temperatura, e garantisce un buon miscelamento dei polimeri.

Infine, MODIX (Fig. 4) è un miscelatore ad estrusione ideato dal centro finlandese di Ricerca Tecnica VTT. Il processo si basa sull'utilizzo di un estrusore cilindrico con diametro superiore a quello di estrusori con la stessa capacità: tale caratteristica consente di fornire, in ingresso alla macchina, materiale eterogeneo di varie dimensioni, densità e forma. Il

processo può essere sfruttato a monte del riciclo meccanico, fisico e chimico e permette la separazione di composti alogenati. Il processo MODIX non è analizzato in dettaglio in questo articolo, in quanto è ad uno stadio iniziale di sviluppo.

Descritte le tecnologie innovative introdotte dal progetto NONTOX, passiamo ad analizzare l'intero processo di trattamento delle plastiche che il progetto propone e che è mostrato schematicamente in Fig. 1. I processi sopra descritti sono pensati per essere alimentati da flussi di rifiuti contenenti grandi quantità di ritardanti di fiamma insieme a polimeri quali ABS e PS, contenenti anch'essi bromo. I prodotti generati in uscita sono flussi di monomateriali di qualità molto più elevata rispetto a quella dei monomateriali in ingresso. I materiali in ingresso sono quindi principalmente frazioni di plastica pesante (con densità maggiore di 1,1 kg/l) derivanti dal processo di smistamento di diverse plastiche: da RAEE, da veicoli arrivati a fine vita e da rifiuti da costruzione e demolizione. Le frazioni plastiche derivanti dal trattamento dei rifiuti sopra elencati ma con densità minore hanno già valore per il mercato e quindi non è necessario un upgrade delle tecnologie attualmente in uso per il loro recupero.

Il flusso di materiali oggetto delle attività di ricerca portate avanti dal progetto NONTOX è inviato prima

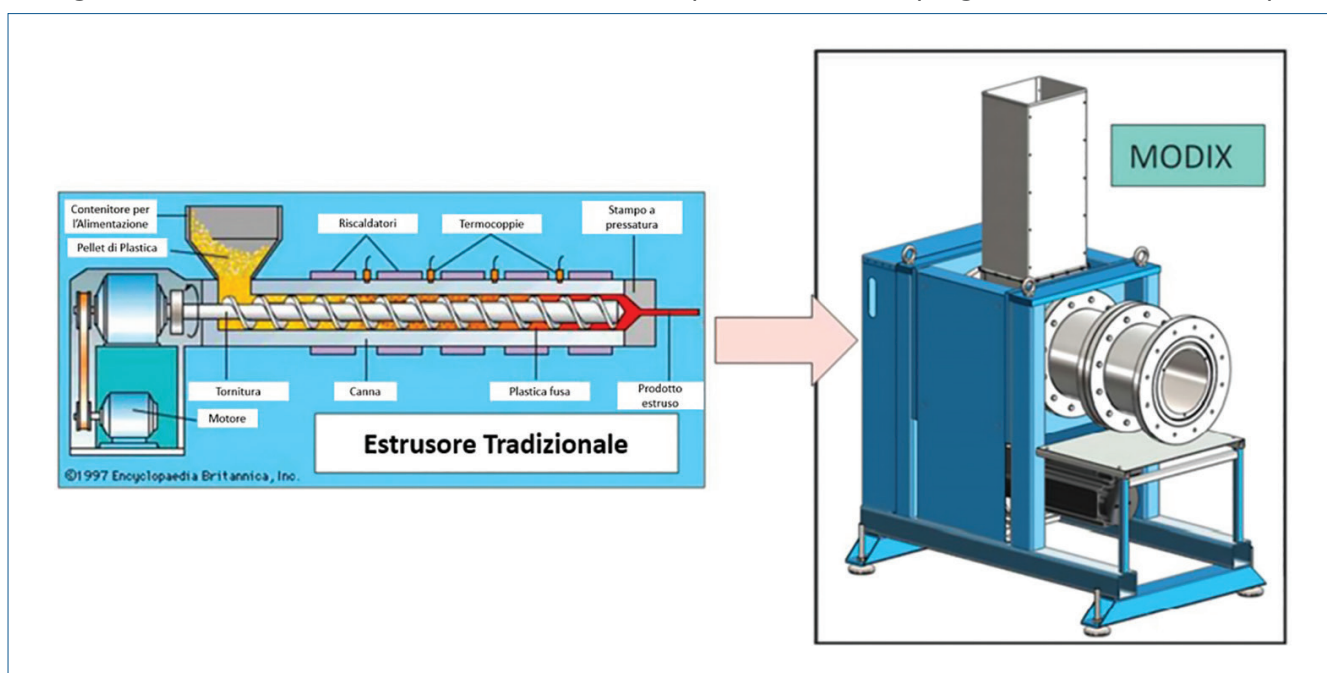
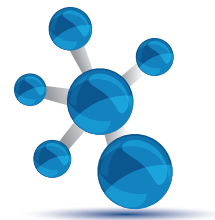


Fig. 4 - MODIX



di tutto ad uno smistatore ottico, al fine di separare gli altri materiali dai polimeri che poi verranno inviati a CreaSolv® (quali ABS, PS, PC). In seguito, il flusso di ABS, PC e PS uscente da CreaSolv® è indirizzato ad una unità di upgrade e poi al processo Extruclean insieme a flussi di monomateriali quali ABS e PS; questo è finalizzato ad abbassare ulteriormente il contenuto di bromo aumentando quindi valore e sicurezza dei polimeri che si vogliono recuperare. A questo punto, i materiali che non sono stati trattati dal selettore ottico, da CreaSolv® e da Extruclean, così come i fanghi e le polveri, sono mandati ad una unità di pirolisi per rimuovere il bromo rimanente e produrre così dell'olio di pirolisi.

Mediante i processi sperimentati da NONTOX è quindi possibile migliorare la qualità delle plastiche in ingresso come rifiuti, convertendole in prodotti utilizzabili per applicazioni in diversi settori, quali produzione di beni di consumo, trasporto, elettronica e costruzione. Dopo una valutazione iniziale del processo e l'analisi dei risultati di alcuni studi preliminari effettuati durante l'attività di ricerca, è possibile dichiarare che il 93% dei materiali derivanti dai RAEE, quelli che attualmente vengono mandati a termovalorizzazione o inviati in discarica, possono, mediante le innovazioni proposte da NONTOX, essere convertiti in nuovi prodotti. A livello europeo questo permetterebbe di produrre 376,2 kt all'anno di polimeri riciclati, olio da pirolisi e carbone. Inoltre, tramite il processo Extruclean, sarebbe possibile produrre 29,7 kt all'anno di polimeri riciclati di alta qualità e contenenti un basso quantitativo di bromo. Sottraendo ai costi operativi variabili (legati quindi al costo delle materie prime, dei prodotti chimici utilizzati e delle utenze) i guadagni (quelli che si ottengono migliorando la qualità del materiale in uscita dal processo di riciclo rispetto alla qualità del materiale in ingresso), si ottiene il potenziale economico del processo proposto da NONTOX, pari a 400 M€/anno a livello europeo. Questo valore è estremamente positivo ed indica che è potenzialmente possibile anche coprire quei costi variabili che non sono stati considerati per mancanza di dati in questa analisi iniziale, così come i costi fissi, cioè quelli legati all'investimento iniziale, al costo del lavoro e al mantenimento. Si specifica che in questa valutazione iniziale, per mancanza di dati, non sono

state considerate la tecnologia MODIX, la pirolisi (è stato considerato solo il costo del catalizzatore) e l'upgrade delle plastiche. Per quanto riguarda Extruclean, è stato considerato solo il costo della CO₂, senza considerare il suo riciclo che ridurrebbe ulteriormente i costi e l'impatto ambientale.

I risultati preliminari ottenuti dal progetto NONTOX indicano quindi che le tecnologie sviluppate sono promettenti sia a livello economico sia in termini di miglioramento della qualità delle plastiche e di riduzione dell'impatto che queste hanno sull'ecosistema, incentivando il loro riciclo e la loro reimmissione in nuovi cicli produttivi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.F. Cardamone, F. Ardolino, U. Arena, *Waste Manag.*, 2021, **126**, 119.
- [2] S.M. Al-Salem *et al.*, *Waste Manag.*, 2009, **10**, 2625.
- [3] J.M. Garcia, M.L. Robertson, *Science*, 2017, **358**, 870.
- [4] I. Vollmer *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2020, **59**, 15402.
- [5] S. Manjare, K. Dhingra, *Materials Science for Energy Technologies*, 2019, **2**, 463.
- [6] M. Schlummer, F. Wolff, A. Mäurer, Recovery of PC/ABS from WEEE plastic shred by the CreaSolv® process, 2016, Electronics Goes Green 2016+ (EGG), 1.
- [7] K. Freegard, G. Tan, R. Morton, Develop a Process to Separate Brominated Flame Retardants from WEEE Polymers, 2006, Final Report Waste & Resources Action Programme (WRAP), p. 335.

The Plastic Recycling Challenge

This article addresses the issue of recycling the plastic contained in WEEE flows, a difficult process due to the presence of additives and flame retardants. The approach that the European research project NONTOX adopts to address this challenge, and which involves the development of innovative technologies in the field of chemical and thermochemical recycling, is then presented.