

# FEEDSTOCK RECYCLING DI RIFIUTI COSTITUITI DA PLASTICHE MISTE MEDIANTE PIROLISI

Il tasso di crescita di rifiuti in plastica su scala mondiale è del 5%, ma la loro gestione sostenibile legata al riciclo meccanico è limitata dalla loro estrema eterogeneità. Il feedstock recycling termochimico, frammentando le lunghe catene polimeriche, offre indubbi vantaggi di flessibilità per il trattamento di miscele polimeriche complesse e/o caratterizzate da un forte grado di contaminazione di materiali estranei.



L'industria della plastica è un traino per l'economia mondiale con un ritmo di crescita annuale del 5% solo in parte rallentato dalla crisi del 2008 [1]. Come è possibile osservare dalla Fig. 1, il settore degli imballaggi ricopre la quota maggiore, risultando il principale responsabile di rifiuti generati e per il quale è stata concepita la "Direttiva Imballaggi" [2]. La grande maggioranza degli imballaggi, inoltre, diventa rifiuto nel giro di un anno da quando sono messi in commercio o dopo un singolo uso, in quanto spesso si tratta di prodotti "usa e getta". I polimeri maggiormente impiegati per il packaging sono: polietilene ad alta (HDPE) e a bassa densità (LDPE), polipropilene (PP), polistirene rigido (PS) ed espanso (EPS), polivinilcloruro (PVC) e polietilentereftalato (PET). L'obiettivo di riciclo del 2008 [2], pari ad appena il 22,5% non è stato raggiunto da tutti i Paesi dell'UE a 27 [3]. Ciò è dovuto da una parte alla complessità della miscela polimerica e dall'altra all'elevato grado di contaminazione da frazioni estranee. Occorre ricordare che il riciclo meccanico richiede un elevato grado di purezza delle singole frazioni polimeriche da separare [4, 5]. Come conseguenza, si genera un residuo del 45% a valle de-

gli impianti di trattamento e selezione [6]. Questo materiale è composto da un misto poliolefinico contaminato da scarti alimentari, carta, vetro, inerti ed è noto in Italia con la denominazione di "plasmix". La frazione in plastica presenta una composizione polimerica caratterizzata dai seguenti intervalli di variabilità: per il 40-50% da PE, per il 20-30% da PP, per il 10-20% da PS, per il 5-10% da PET e, infine, per il 2-4% da PVC [7-9]. Pur essendovi esempi di plasmix riciclato, risulta che le caratteristiche fisiche del manufatto finale sono inferiori a quelle ottenibili da polimeri vergini.

La valorizzazione della plastica è prevista anche per i rifiuti da beni durevoli (vedi Fig. 1). Per i rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) il D.Lgs. 49/2014 stabilisce entro il 2018 un obiettivo di recupero di almeno il 75% [10]. Di particolare interesse sono i dispositivi appartenenti al raggruppamento R4 (elettronica di consumo, telecomunicazioni, informatica, piccoli elettrodomestici) che contengono fino al 35% in peso di plastica, la cui composizione include oltre 15 tipologie diverse di polimeri e un impiego intensivo di additivi [11].

Oltre il 50% dei polimeri utilizzati nel settore è di natura stirenica (acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), polistirene ad alto impatto (HIPS), polistirene (PS)) soprattutto nella fabbricazione del rivestimento esterno della maggior parte dei dispositivi elettronici, ad eccezione dei telefoni cellulari, il cui involucro è spesso costituito da policarbonati; le plastiche sono presenti anche nelle schede elettroniche, principalmente politereftalati come il PBT (polibutilentereftalato) e poliammidi (PA), costituendone tra l'1 e il 3% del peso complessivo [11, 12].

Nelle plastiche da RAEE, soprattutto in quelle a contatto con i circuiti elettronici, non è infrequente la presenza di additivi ritardanti di fiamma a base di idrocarburi policiclici aromatici alogenati (PAH) e in combinazione con il triossido di antimonio. Nonostante la loro messa al bando, molte di queste sostanze sono presenti

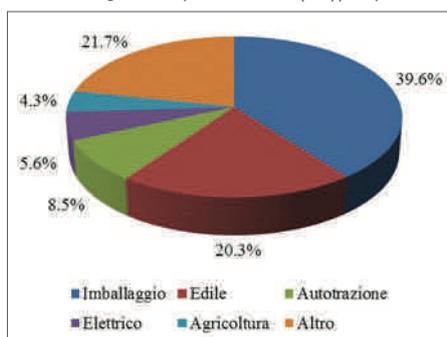


Fig. 1 - Distribuzione del mercato della plastica per settori di impiego (fonte: Plastics Europe 2015 [1])



ancora nei dispositivi elettrici ed elettronici fabbricati prima della Direttiva RoHS 2011/65/CE [13]. Anche in questo caso, eterogeneità, presenza di additivi e sostanze pericolose e dimensioni ridotte dei dispositivi rendono difficile se non impossibile il riciclo tradizionale.

Il riciclo meccanico, al di là delle questioni di eterogeneità delle plastiche da rifiuto, non può essere ripetuto per un numero di cicli indefinito poiché la macinazione, la parziale fusione e la successiva estrusione implicano la progressiva riduzione della massa molecolare, l'aumento di fenomeni di reticolazione e di disordine delle catene polimeriche, con la conseguente perdita delle proprietà chimico-fisiche rispetto al polimero vergine.

Un'alternativa è rappresentata dal *feedstock recycling* termico o pirolisi, che promuove la scissione delle catene polimeriche, in ambiente inerte, a composti chimici semplici disponibili per nuove sintesi o come miscela idrocarburica utilizzabile per produrre combustibile alternativo. Questa soluzione permette di superare le difficoltà legate all'eterogeneità e alla contaminazione iniziale.

Il Laboratorio tecnologie per la gestione integrata dei rifiuti dell'Enea, nell'ambito del progetto "Ecoinnovazione in Sicilia - Supporto allo sviluppo delle attività produttive del Sud: interventi pilota per la sostenibilità e la competitività", finanziato dal Ministero Istruzione Università e Ricerca [14], ha messo a punto un processo di pirolisi per la valorizzazione delle seguenti matrici: plastiche da RAEE (involucri esterni di apparecchi elettrici ed elettronici, componenti di schede elettroniche) e plasmix. I principali obiettivi hanno riguardato:

- 1) lo studio dell'influenza della temperatura di degradazione e di catalizzatori a base zeolitica sulle rese e sulla composizione dei prodotti di pirolisi: gas, olio e *char*;
- 2) l'individuazione delle condizioni che permettono di ottenere prodotti valorizzabili come materie prime seconde (*feedstock recycling*) o combustibili.

È anche illustrata brevemente un'applicazione particolare che riguarda l'impiego di ceneri da rifiuti come catalizzatori nella pirolisi di plastiche.

### Metodologia

La metodologia di lavoro si è articolata in quattro fasi distinte:

1. selezione del campione nei RAEE e nel plasmix;
2. caratterizzazione termochimica del campione (analisi TG-DSC, analisi elementare, analisi immediata, potere calorifico, cromatografia ionica per la determinazione di Cl e Br);
3. individuazione delle condizioni di processo (effetto della temperatura e dei catalizzatori sulle rese e sui prodotti di pirolisi, bilancio di energia);
4. caratterizzazione dei prodotti di pirolisi (potere calorifico, analisi elementare, GC-FID, cromatografia ionica per la determinazione di Cl e Br, analisi immediata, GC-TCD).

Sono state esaminate le plastiche presenti nella categoria R4 dei RAEE e il plasmix. Ai fini della riproducibilità dei risultati e per ciascuno dei due casi, è stata selezionata una miscela di polimeri rappresentativa del campione di rifiuti da esaminare.

Nel primo caso sono stati considerati ABS, HIPS e PBT con le proporzioni prese da analisi merceologiche svolte in letteratura [11, 12] e confermate da indagini svolte in campo presso impianti di selezione dei RAEE. Il campione è stato definito come "misto RAEE", ed è risultato così composto:

- 64% di ABS
- 33% di HIPS
- 3% di PBT

dove, in corrispondenza di ciascun polimero, è stato scelto un componente reale: scocche di dispositivi informatici (computer, stampanti, scanner) per ABS e HIPS e connettori di schede elettroniche per il PBT [15].

Nel caso del plasmix, il campione è stato preparato a partire da alcuni esempi di analisi merceologica presi dalla letteratura [7, 8] e da un modello matriciale sviluppato appositamente per la caratterizzazione merceologica del plasmix [16]. Tale modello tiene conto della composizione tipo delle plastiche da rifiuto di raccolta differenziata urbana in ingresso agli impianti e dell'efficienza di separazione delle apparecchiature di separazione/selezione adottate. In uscita si otterranno le tre correnti separate per i polimeri (PE, PP, PET), che saranno poi venduti alle aste telematiche, e la corrente di scarto, ovvero il plasmix. Sulla base di queste considerazioni, la composizione finale del campione rappresentativo, definito "plasmix sintetico", è stata la seguente:

- 45% di PE
- 30% di PP
- 20% di PS
- 5% di PET.

### Caratterizzazione del campione

In Tab. 1 si riportano i risultati delle analisi termo-chimiche condotte sui campioni di misto RAEE e plasmix sintetico. Nel caso del misto RAEE,

Contenuto (%)	Misto RAEE	Plasmix sintetico
C	85,3±0,7	85,9±0,3
H	7,8±0,1	14,20±0,08
N	3,4±0,1	n.d.
S	n.d.	n.d.
O	0,98±0,04	1,73±0,01
Cl	0,02±0,01	n.d.
Br	0,13±0,03	n.d.
PCI (MJ/kg)	37,7±0,2	41,6±0,1
Solidi volatili	97,0±0,9	98,01±0,1
Carbonio fisso	1,7±0,2	0,84±0,03
Ceneri	1,9±0,2	0,03±0,02
n.d. = non determinato		

Tab. 1 - Proprietà termochimiche del misto RAEE e del plasmix sintetico

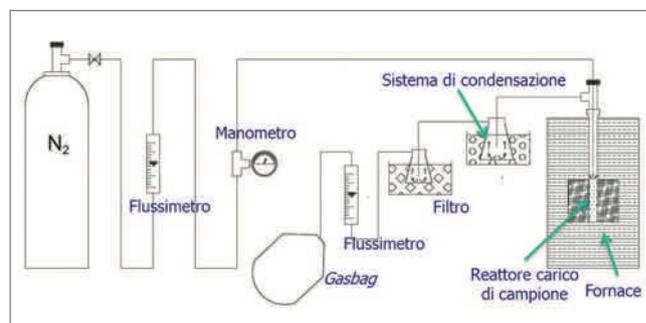


Fig. 2 - Schema dell'apparato sperimentale del processo di pirolisi

si osserva una composizione elementare coerente con quella di un plastica stirenica (il Cl e il Br rilevati derivano dal PBT che è direttamente a contatto con la scheda elettronica), mentre la composizione del plasmix si avvicina a quella di un'olefina; l'elevata percentuale di solidi volatili e il basso contenuto di ceneri e carbonio fisso sono la necessaria premessa affinché, nel corso della pirolisi, si possa massimizzare la produzione della miscela idrocarburica nelle forme più valorizzabili: le fasi liquida e gassosa. Il potere calorifico inferiore (PCI) di circa -40 MJ/kg, è prossimo a quello di un olio diesel commerciale.

**Pirolisi**

Le prove sono state condotte con un reattore da banco (Fig. 2) di tipo *semibatch* consistente in un tubo di quarzo del diametro interno di 20 mm e lunghezza di 200 mm, alloggiato in una fornace riscaldata con resistenza elettrica e mantenuto in atmosfera inerte di azoto. Il reattore è stato caricato con il campione in polvere con granulometria <0,5 mm, in presenza o meno di catalizzatore, e introdotto nella fornace alla temperatura operativa, conducendo quindi la cosiddetta *fast pyrolysis*. La configurazione adoperata per le prove può essere schematizzata in tre unità fondamentali: la prima caratterizzata dal reattore, caricato con la miscela a inizio prova; la seconda dedicata alla raccolta del prodotto liquido di processo e caratterizzata da due trappole fredde; la terza predisposta per la raccolta dei prodotti gassosi non condensabili mediante una *gas-bag*. I vapori prodotti sono fatti passare attraverso un sistema di condensazione a due stadi per la pirolisi del plasmix (T=0 e -20 °C), monostadio per quella del misto RAEE (T=0 o -20 °C, a seconda della temperatura di degradazione impostata nel reattore). Il misto RAEE è stato sottoposto a pirolisi a tre diverse temperature: 400 °C, con e senza catalizzatori, 600 e 800 °C, in assenza di catalizzatore. Per il plasmix, invece, sono state adottate due temperature: 450 e 650 °C, entrambe sia con che senza catalizzatore.

Per la pirolisi catalitica, in modalità *liquid phase contact*, sono stati selezionati due tipi di catalizzatori zeolitici già sperimentati in letteratura per reazioni di cracking [17]: le zeoliti HUSY e la HZSM-5 in rapporto 1:3 con il campione. Le due zeoliti sono state scelte per la diversa dimensione dei pori, pari a 8 Å per la HUSY e a 5-6 Å per la HZSM-5, e per il diverso rapporto molare silice-allumina (SAR): la HUSY presenta un SAR pari a 30 e la HZSM-5 pari a 1.500. Il rapporto silice-allumina influenza l'acidità del catalizzatore: zeoliti con un SAR elevato presentano un minor numero di siti acidi ma di forza maggiore e più elevata idrofobicità, rispetto a quelle caratterizzate da un SAR più basso. A nostra conoscenza non sono mai state usate in letteratura, allo scopo di condurre reazioni di pirolisi, zeoliti con un SAR così elevato come quello della HZSM-5 impiegata in questo lavoro.

**Risultati**

In Fig. 3 è rappresentata la distribuzione dei diversi prodotti della pirolisi dei campioni misto RAEE e plasmix (gas, olio, *char*) ottenuti per le diverse condizioni di processo, in funzione delle quali per il misto RAEE si osserva come la produzione di olio risulti prevalente, con percentuali minime pari all'82% nel caso di pirolisi catalitica con HUSY a 400 °C e con percentuali massime pari al 93% nel caso di pirolisi termica a 600 e 800 °C (non vi sono, infatti, significative differenze tra le due pirolisi termiche). La produzione di gas appare abbastanza costante con percentuali inferiori al 5% mentre la massima produzione di *char* si manifesta

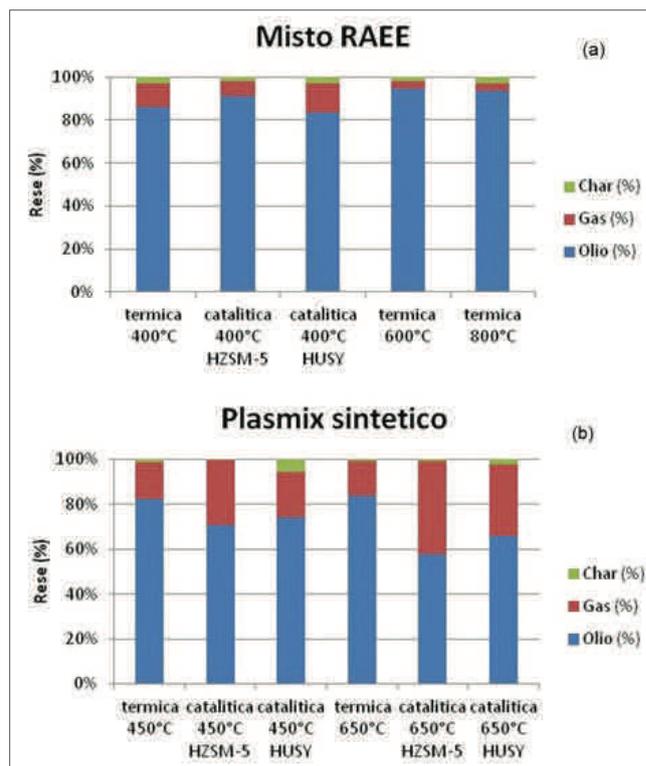


Fig. 3 - Distribuzione dei prodotti della pirolisi del misto RAEE (a) e plasmix sintetico (b) in funzione delle condizioni di processo

con la pirolisi catalitica con HUSY. La pirolisi catalitica con HZSM-5 determina un aumento di produzione di olio rispetto alla pirolisi termica del 5% a scapito del *char* e rese prossime a quelle da pirolisi a 600 e 800 °C. Come nel caso precedente, la frazione più abbondante per il plasmix sintetico è l'olio di pirolisi, anche se presenta valori inferiori (58-82%) compensati da una maggiore produzione di gas. L'aumento della temperatura, nel caso della pirolisi termica, favorisce la produzione della cera, a causa probabilmente del minor tempo di residenza nel reattore: mentre a 450 °C si ha una sospensione di cera nell'olio, a 650 °C si ottiene quasi esclusivamente cera. L'utilizzo del catalizzatore (HUSY o HZSM-5), riduce la produzione di olio e, cosa più importante, inibisce la formazione di cera che, comunque, è un prodotto tipico della pirolisi di poliolefine. Allo stesso tempo, utilizzando la zeolite HUSY, si osserva un sensibile incremento di *char* che diminuisce con la temperatura. Con l'impiego della zeolite HZSM-5 la produzione di olio diminuisce con la temperatura, scendendo a meno del 60% a 650 °C, senza contestuale formazione di *char* e con la massima produzione di gas.

L'effetto dell'impiego delle zeoliti si osserva anche da un esame visivo dei campioni di olio prodotti alle diverse condizioni (Fig. 4). Nel caso della pirolisi del misto RAEE, si può apprezzare la riduzione del contenuto di olio pesante, che produce un effetto di chiarificazione; nella pirolisi del plasmix sintetico si osserva la perdita di torbidità dovuta all'assenza di cera. Per quanto riguarda l'analisi dell'olio prodotto dalle due diverse matrici plastiche di partenza (Fig. 5), si osserva, nel caso del misto RAEE, che il solo aumento della temperatura, induce un incremento di composti monoaromatici: a 800 °C lo stirene raggiunge la massima produzione con

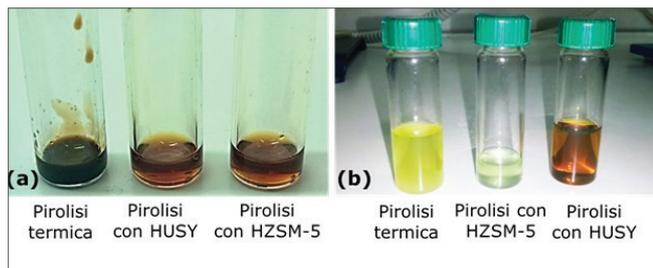


Fig. 4 - Oli ottenuti dalla pirolisi del misto RAEE a 400 °C (a) e del plasmix a 450 °C (b), con e senza catalizzatori

il 19%. Per il plasmix sintetico invece si ha l'andamento inverso: a 650 °C si ha una resa minore rispetto a 450 °C proprio a causa della maggiore presenza di cera. È interessante notare che anche nel plasmix sintetico, dove la quantità di PS è bassa, si hanno rese in monoaromatici che, in alcuni casi, sfiorano il 30%. Come rilevato in letteratura [18] questi fenomeni sono dovuti all'innesco di reazioni secondarie di ciclizzazione del tipo Diels-Alder da olefine.

L'impiego dei catalizzatori zeolitici aumenta la resa totale in monoaromatici: con la HZSM-5 si massimizza la produzione di stirene mentre con la HUSY si favorisce la generazione di etilbenzene, toluene e benzene. Questi composti costituiscono un valore perché rappresentano il punto di partenza per produrre, ad esempio, resine plastiche, fibre, tensioattivi, coloranti, pesticidi, solventi e farmaci [19].

In virtù dell'elevato potere calorifico (39 MJ/kg), l'olio di pirolisi può essere utilizzato in miscela con olio diesel commerciale; fino ad una quota del 20% [20].

L'attività dei catalizzatori è stata studiata anche sulla temperatura di degradazione e sul profilo TG di ciascuno dei componenti del plasmix sintetico e della miscela stessa. È stato osservato come la zeolite HUSY provochi un notevole abbassamento della temperatura di degradazione (fino a 80 °C per il PE) e con un profilo di decomposizione a due stadi dovuto a una fase di pre-cracking che avviene sui siti superficiali della zeolite [21, 22]. L'effetto dell'HZSM-5 sembra operare nel senso di un leggero incremento della temperatura di pirolisi, con la sola eccezione del PE per cui si ha una diminuzione di circa 50 °C. Nel caso di questa miscela polimerica, a base essenzialmente poliolefinica, sembrerebbe quindi più vantaggioso l'utilizzo della zeolite HUSY.

La quantità di calore necessaria alla degradazione termica è stata valutata attraverso la calorimetria a scansione differenziale (DSC) [9]. In particolare, è risultato che la pirolisi del misto RAEE richiede un consumo energetico pari a 1,6 MJ kg<sup>-1</sup>. Dalla Tab. 2 è visibile come nei casi della combustione di *char* ottenuto a 400 °C o del totale di *char* e gas ottenuti con la HUSY è possibile ottenere l'energia sufficiente a sostenere il processo di pirolisi, senza intaccare l'olio, che rappresenta la risorsa di maggiore pregio del processo. Nelle altre condizioni l'energia derivante dalla combustione di *char* e gas è invece solo di poco inferiore a quella necessaria per la degradazione.

Nel caso del plasmix sintetico è stato valutato che la pirolisi necessita di un apporto di energia di 2 MJ kg<sup>-1</sup> [9] che può essere soddisfatto dalla combustione del 5% del plasmix sintetico (PCI=41,6 MJ kg<sup>-1</sup>). Alternativamente si può in ogni caso sfruttare il calore sviluppato dalla combustione della frazione gassosa generata da 1 kg di plasmix: ad esempio per la pirolisi termica, pari a 2,9 MJ se condotta a 450 °C e pari a 4,1 MJ se

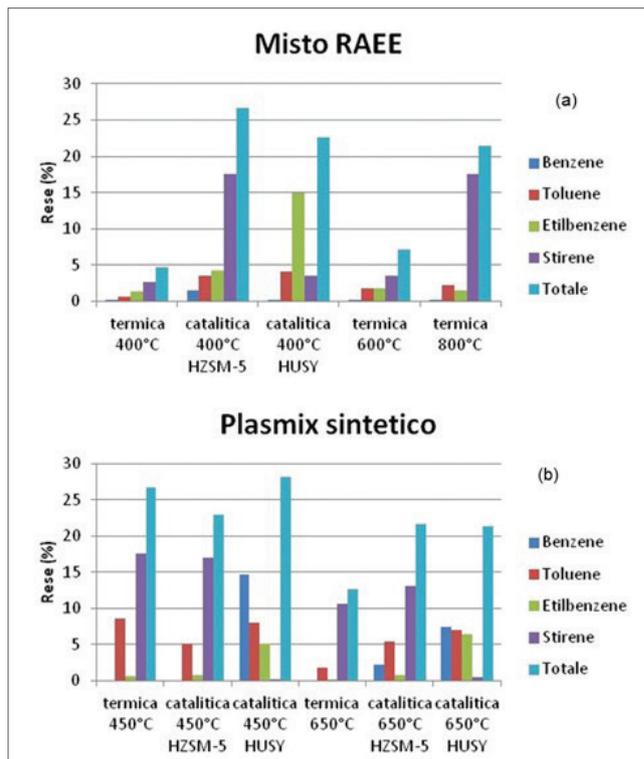


Fig. 5 - Analisi delle specie monoaromatiche presenti nell'olio di pirolisi di misto RAEE (a) e plasmix sintetico

Condizioni di pirolisi	Char (MJ)	Gas (MJ)	Totale (MJ)
Misto RAEE - 400 °C	2,7±0,1	0,5±0,2	3,2±0,3
Misto RAEE - 400 °C HZSM-5	0,48±0,07	0,3±0,2	0,8±0,2
Misto RAEE - 400 °C HUSY	1,34±0,04	0,8±0,2	2,1±0,3
Misto RAEE - 600 °C	0,5±0,2	0,7±0,3	1,2±0,3
Misto RAEE - 800 °C	0,4±0,1	1,01±0,05	1,4±0,1
Plasmix - 450 °C	0,47±0,07	2,9±0,1	3,4±0,1
Plasmix - 450 °C HZSM-5	0,02±0,01	8,7±0,1	8,7±0,2
Plasmix - 450 °C HUSY	1,4±0,1	5,9±0,1	7,3±0,2
Plasmix - 650 °C	0,29±0,06	4,1±0,2	4,4±0,2
Plasmix - 650 °C HZSM-5	0,05±0,01	16,3±0,3	16,4±0,3
Plasmix - 650 °C HUSY	0,40±0,04	10,2±0,1	10,6±0,1

Tab. 2 - Energia (MJ) dalla combustione di *char* e/o gas prodotti dalla pirolisi di 1 kg di misto RAEE o di plasmix sintetico

condotta a 650 °C. I valori di calore del *char* tengono conto anche della presenza delle ceneri e delle zeoliti.

#### Utilizzo di ceneri di rifiuti come catalizzatori alternativi

È noto come le ceneri di alcuni rifiuti urbani o speciali, abbiano una matrice di alluminio-silicati simile a quella delle zeoliti o una quantità di minerali e ossidi metallici in grado di favorire le reazioni di cracking [23]. Questa

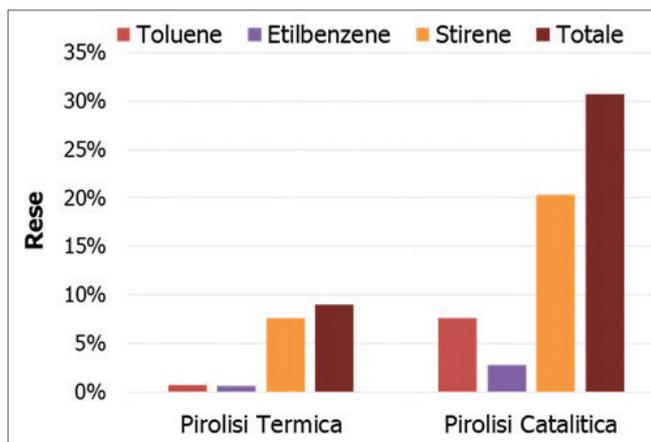


Fig. 6 - Confronto tra pirolisi termica e catalitica con cenere da rifiuto su ABS

considerazione ha dato il via ad una campagna di sperimentazione volta a testare la capacità di catalisi di queste tipologie di residui, al fine di valorizzare le ceneri, che di per sé costituiscono un rifiuto da smaltire. È stata quindi provata la pirolisi catalitica in presenza di diverse ceneri di origine diversa su un campione monopolimerico di ABS a 400 °C, adottando un rapporto in peso ABS/catalizzatore di 2:1. Dal confronto con la pirolisi termica, per alcune tipologie di ceneri è risultata invariata la ripartizione tra le varie correnti di materia (*char*, olio, gas), mentre si è rilevato una diminuzione della temperatura di degradazione fino a 10 °C e un incremento netto di idrocarburi monoaromatici nell'olio da pirolisi catalitica (in Fig. 6, un esempio).

Questi primi test hanno quindi mostrato l'effettiva possibilità di sfruttare le ceneri come catalizzatori e costituiscono un buon punto di partenza per proseguire su questa linea di sperimentazione.

### Conclusioni

Dalla campagna di sperimentazione condotta su diverse matrici di plastiche da rifiuto, è stato provato che la pirolisi è un processo adatto al trattamento di plastiche eterogenee, da cui è possibile ottenere composti idrocarburici valorizzabili come materie prime secondarie e come prodotti ad elevato contenuto energetico.

I catalizzatori zeolitici permettono di migliorare la qualità dell'olio prodotto, aumentando, ad esempio, la resa in monoaromatici, interagendo in modo diverso in funzione della matrice polimerica e delle caratteristiche chimico-fisiche della zeolite: quindi la scelta della zeolite più vantaggiosa in un certo processo pirolisi deve essere fatta anche in base alla composizione plastica del rifiuto di partenza. Alcune ceneri di rifiuti urbani e speciali hanno proprietà catalitiche nelle reazioni di scissione delle catene polimeriche; sono perciò valorizzabili come catalizzatori nella pirolisi delle plastiche ottenendo in questo modo un duplice recupero di materia e risparmiando sull'impiego di catalizzatori commerciali.

Le linee di attività saranno indirizzate a testare altri catalizzatori zeolitici con diverso rapporto Si/Al e struttura chimico-fisica, cui si associa un approfondimento sull'efficacia delle proprietà catalitiche delle ceneri da diverse matrici di rifiuto per la pirolisi sia di plastiche da RAEE che del plasmix. Infine, si intende passare da una scala di laboratorio ad una pilota per lo studio del controllo dei parametri di processo e il test su campioni reali da impianti di trattamento.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Association of Plastics Manufacturers, *Plastics - the Facts 2014-15. An analysis of European plastics production, demand and waste data*, 2016.
- [2] Direttiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, dell'11 febbraio 2004, sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio che modifica la direttiva 94/62/CE, *Gazzetta Ufficiale della Comunità Economica Europea*, L 47, 18/02/2004.
- [3] BIO Intelligence Service, *Plastics Recyclers Europe - Relazione finale, Studio sull'innalzamento dell'obiettivo di riciclaggio meccanico della plastica*, 2013.
- [4] A. Gahleitner, *Polym. Lett.*, 2016, **10**, 187.
- [5] J. Brandrup, *Recycling and Recovery of Plastics*, Hanser Publishers, 1996, 893.
- [6] S. Petriglieri, *Esperienza di COREPLA nel trattamento delle plastiche*, 2014.
- [7] A. Adrados *et al.*, *Waste. Manage.*, 2012, **32**, 826.
- [8] A. Lopez-Uribebarrenechea *et al.*, *Appl. Energ.*, 2012, **98**, 524.
- [9] L. Cafiero *et al.*, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2015, **121**, 1111.
- [10] D.Lgs. 14 marzo 2014, n. 49 relativo all'attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), *Gazzetta Ufficiale Serie Generale*, L73, 28/03/2014.
- [11] E. Dimitrakakis *et al.*, *J. Hazard. Mater.*, 2009, **161**, 913.
- [12] M. Schlummer *et al.*, *Chemosphere*, 2007, **67**, 1866.
- [13] Direttiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'8 giugno 2011 sulla restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche (Direttiva RoHS).
- [14] M. Peronaci *et al.*, *EAI*, 2014, **5**, 53.
- [15] L. Cafiero *et al.*, *Polym. Degrad. Stabil.*, 2014, **109**, 307.
- [16] S. Colantonio, risultati non pubblicati (Università degli Studi di Roma "La Sapienza", A.A. 2014-2015, Tesi di laurea).
- [17] P. Williams, R. Bagri, *Int. J. Energy Res.*, 2004, **28**, 31.
- [18] W. Kaminsky, H. Sinn, *Thermal Conversion of Solid Wastes and Biomass, ACS Symp. Series*, 1980, **130**, 423.
- [19] N. Antoniou, A. Zabaniotou, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2013, **20**, 539.
- [20] S. Frigo *et al.*, *Fuel*, 2014, **116**, 399.
- [21] A. Marcilla *et al.*, *Appl. Catal. A - Gen.*, 2006, **301**, 222.
- [22] G. Manos, *et al.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, **39**, 1198.
- [23] J.A. Chandler *et al.*, in *Studies in Environmental Science*, 1997, vol. 67.

### Feedstock Recycling of Mixed Plastics Waste by Pyrolysis

The worldwide growth rate of plastic waste is 5%, but their sustainable management by mechanical recycling is limited by their great heterogeneity. The thermochemical feedstock recycling fragmenting the long polymer chains offers undoubted advantages of flexibility for the treatment of complex polymer mixtures and/or characterized by a strong contamination of other materials. The purpose of this article is to provide an overview on the activities of the Enea Laboratory "Tecnologie per la gestione integrata di rifiuti, reflui e materie prime/seconde" about the pyrolysis of waste plastics.