

Tecnologie per il riciclo/recupero sostenibile dei rifiuti

I rifiuti rappresentano un'enorme opportunità di crescita sostenibile in termini di riduzione del consumo di risorse naturali e di sviluppo ed implementazione di tecnologie per il riciclo di materia ed il recupero di energia. Nell'articolo, alcuni esempi di approcci tecnologici per sfruttare le potenzialità dei rifiuti nell'ottica della *green economy*

■ Claudia Brunori, Lorenzo Cafiero, Danilo Fontana e Fabio Musmeci

L'industria legata ai rifiuti è stata tra le più floride negli ultimi decenni e, indubbiamente, tra quelle con il fatturato più rilevante nel campo dell'industria ambientale. Sebbene possa sembrare una contraddizione, i rifiuti rappresentano attualmente una delle maggiori opportunità di crescita sostenibile per il sistema Europa e per il nostro Paese, carente di risorse primarie, in particolare. I rifiuti costituiscono infatti una enorme riserva di risorse che, se opportunamente gestita e valorizzata, può garantire un approvvigionamento sostenibile e continuo negli anni di materiali ed energia. Secondo un recente rapporto UNEP [1], gli obiettivi di riciclo per il 2050 nell'ottica di una economia verde prevedono percentuali di riciclo del 15% per rifiuti industriale, 34% per rifiuti urbani e addirittura 100% per rifiuti elettronici. Inoltre, è previsto che la frazione organica sia interamente recuperata per la produzione di compost o per il recupero di energia. Inoltre, sempre secondo stime dell'UNEP [1], il riciclaggio dei rifiuti è uno dei settori più importanti in termini di potenzialità di sviluppo di occupazione; è stato stimato infatti che il settore del riciclo crea un numero 10 volte maggiore di posti di lavoro rispetto ai settori dello smaltimento e dell'incenerimento.

L'Unione Europea si è mossa già da tempo in questa direzione con una serie di provvedimenti e normative inerenti la gestione integrata dei rifiuti. Con la recente Direttiva Quadro sui Rifiuti 2008/98/EC [2], viene imposta agli Stati membri una soglia minima di recupero rifiuti al 50% mediante raccolta differenziata, orientando meccanismi di produzione sempre più indirizzati al virtuosismo ed al recupero. La norma stabilisce un quadro giuridico per il trattamento dei rifiuti, inclusa la definizione di materia seconda e sottoprodotto, stabilendo regole più semplici per il loro riutilizzo. Nella Direttiva viene esplicitata a livello europeo una gerarchia nelle azioni che devono essere espletate nella gestione dei rifiuti, che può essere tradotta in maniera semplificata nella regola delle quattro R in ordine di scelta preferenziale (Figura 1): **R**iduzione dei rifiuti prodotti, **R**iuso dei rifiuti (ad es. apparecchi elettronici ancora funzionanti o che possono essere riparati), **R**iciclo con la conversione di rifiuti in prodotti utili, **R**ecupero di altro tipo (ad es. termovalorizzazione con produzione di energia). Con DLgs n° 205/2010 in materia di rifiuti [3], l'Italia ha recepito la Direttiva 98/2008 con 6 mesi di anticipo rispetto alle scadenze prefissate a livello UE.

In armonia con un percorso iniziato anni fa, anche nella recente Comunicazione della Commissione Europea in preparazione della conferenza delle Nazioni Unite sullo sviluppo sostenibile che si terrà a Rio de Janeiro il prossimo giugno 2012 [4], viene ribadito come una

■ Claudia Brunori, Lorenzo Cafiero,
Danilo Fontana e Fabio Musmeci
ENEA, Unità Tecnica Tecnologie Ambientali

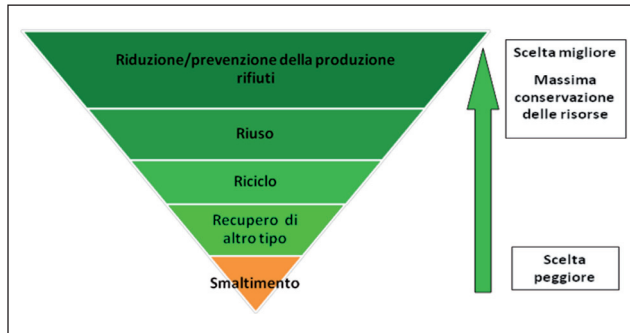


FIGURA 1 Gerarchia nella gestione dei rifiuti
Fonte: ENEA

corretta gestione dei rifiuti possa minimizzare il loro impatto ambientale nel contempo promuovendo l'uso efficiente delle risorse e aumentando la disponibilità di nuove risorse da materiali riciclati.

Per quanto riguarda il riciclo dei rifiuti, il panorama attuale può essere suddiviso in filiere già consolidate (vetro, carta, metallo, legno, plastica) e filiere ancora in embrione (rifiuti elettronici, inerti, frazione organica, *car fluff*, pannelli fotovoltaici, etc.), per le quali si intravedono enormi potenzialità di sviluppo. Un esempio di settore con grandi prospettive è rappresentato dai rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), la cui raccolta e gestione sono regolati in Italia dal DLgs n. 151/2005, in recepimento della Direttiva Comunitaria WEEE 2002/96/CE [5], attualmente in fase finale di revisione [6], e della Direttiva Comunitaria sulla restrizione delle sostanze pericolose 2002/95/CE [7], entrambe risalenti al 2003 ed emesse con la finalità di prevenire la produzione di RAEE e promuoverne il riutilizzo ed il riciclaggio.

Nei prossimi paragrafi saranno presentati alcuni esempi di tecnologie di riciclo/recupero in differenti settori e campi di applicazione.

Tecnologie di idrometallurgia per il riciclo di metalli ad elevato valore aggiunto

Il termine "idrometallurgia" comprende l'insieme delle tecniche chimiche e chimico-fisiche di trattamento in fase liquida di residui provenienti da lavorazioni

industriali o di reflui di varia natura, mirate al recupero dei metalli in essi presenti. Tali tecnologie trovano campo di applicazione con enormi potenzialità di espansione ad esempio nel recupero di materiali critici (terre rare, metalli preziosi ecc.) da RAEE.

A scopo semplificativo può essere distinta in due diversi momenti:

- 1) **dissoluzione del solido**, detta *leaching* (lisciviazione), che consiste nel processo di estrazione solido/liquido che avviene facendo reagire il solido da trattare con un'opportuna soluzione capace di dissolvere alcuni (o tutti) i componenti e renderli stabili nella soluzione stessa.
- 2) **separazione e purificazione del metallo**: dal processo di lisciviazione si ricava una soluzione contenente ioni metallici e molte altre impurezze: può essere necessario trattare in maniera opportuna tale soluzione (ad esempio tramite una filtrazione per rimuovere eventuali solidi sospesi o variando alcuni parametri operativi quali la temperatura o il pH della soluzione stessa) prima di procedere alle fasi successive del recupero del metallo.

Le operazioni di recupero e purificazione possono essere completate tramite operazioni di:

- precipitazione/cristallizzazione;
- scambio ionico;
- estrazione con solvente;
- elettrodeposizione.

In particolare l'**estrazione con solvente**, o estrazione liquido-liquido, è un processo mediante il quale una sostanza (nel nostro caso lo ione metallico) è trasferita da una fase liquida ad un'altra con essa immiscibile. Solitamente le due fasi sono rispettivamente acquosa e organica. Per realizzare questa operazione viene utilizzato un *estraente*, cioè una molecola avente proprietà complessanti che, reagendo secondo vari meccanismi con una sostanza disciolta nella fase acquosa, è in grado di estrarla. Di solito, per migliorare le proprietà chimico-fisiche dell'estraente, esso viene disciolto in un *diluente* che, in genere, non ha proprietà estrattive. Il diluente, insieme all'estraente, costituisce la cosiddetta fase organica.

La soluzione acquosa sottoposta all'estrazione di uno o più soluti costituisce il *raffinato*, mentre la fase orga-

nica caricata con il soluto dopo l'estrazione si chiama estratto.

Le peculiarità di questa tecnica estrattiva sono:

- l'alta selettività che permette quindi la separazione di metalli con proprietà molto simili;
- possibilità di trattare scarti e residui industriali;
- elevati fattori di separazione che consentono di ottenere prodotti con un grado di purezza estremamente elevato;
- impiantistica semplice, flessibile e facilmente automatizzabile;
- impianti con impatto ambientale contenuto (i solventi sono continuamente riciclati e si opera prevalentemente a temperatura ambiente);
- basso consumo energetico;
- possibilità di trattare matrici contenenti basse concentrazioni di metalli per i costi di processo contenuti.

Quale esempio di applicazione di tecniche idrometallurgiche, qui di seguito (Figura 2) viene illustrato un caso recentemente studiato da ENEA [8], nell'ambito della problematica riguardante i cosiddetti "materiali critici": il recupero del cobalto e manganese contenuto nei catalizzatori esausti provenienti dalla sintesi industriale dell'anidride trimellitica (un plastificante).

Attraverso questo processo si valorizza il rifiuto recuperando i metalli di elevato valore aggiunto e di critico approvvigionamento e si riduce contemporaneamente la quantità e la pericolosità dei materiali da conferire in discarica.

Tecnologie per il riciclo frazione organica

Il compostaggio è un processo biologico aerobico, accelerato e controllato, che porta alla produzione di *compost* a partire da residui organici mediante l'azione di batteri e funghi. Il *compost* viene poi utilizzato come ammendante in agricoltura e nella florovivaistica.

Il compostaggio sta occupando un posto di rilievo nel trattamento dei rifiuti. Nel 1993 esistevano circa 10 impianti industriali di compostaggio mentre, nel 2008, si contano 290 impianti e per il 2019 se ne dovrebbero aggiungere un altro centinaio [9].

Gli impianti industriali di compostaggio sono suddivisibili in impianti a ciclo continuo (ove il materiale viene quotidianamente caricato) e in sistemi *batch*, ove il materiale viene caricato in lotti, tipicamente in biocelle, e rimane chiuso per poco più di una setti-

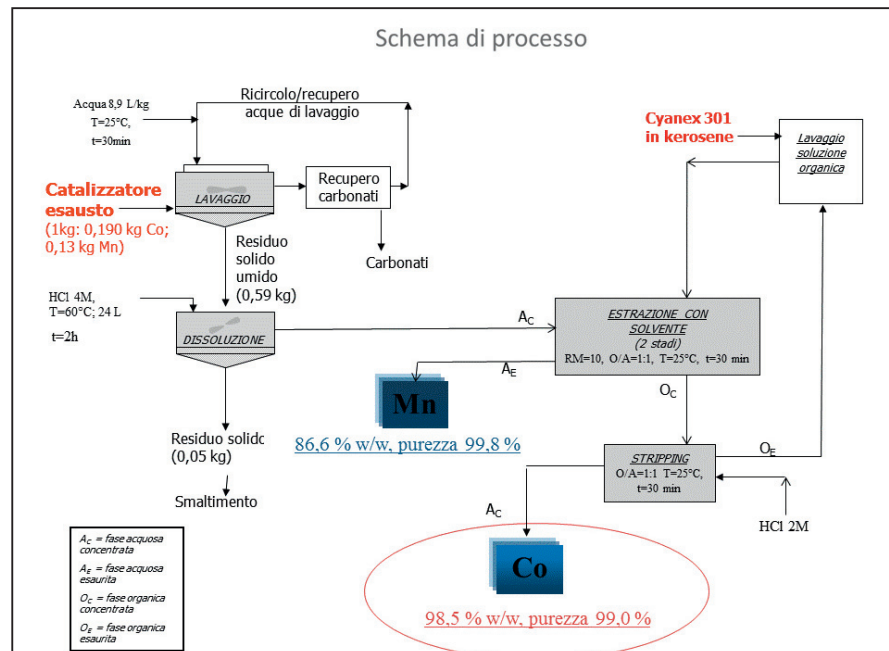


FIGURA 2 Un'applicazione delle tecnologie idrometallurgiche: il processo per il recupero di cobalto e manganese da catalizzatori esausti
Fonte: D. Fontana, F. Forte [8]



mana prima di terminare il processo in platee. È importante segnalare il ruolo positivo della pratica del compostaggio, nel riciclo dei rifiuti urbani, per il sequestro del carbonio nel terreno che avrebbe invece generato metano, qualora il destino del rifiuto fosse stato la discarica.

Parallelamente agli impianti di compostaggio si stanno sviluppando anche sistemi di digestione anaerobica della frazione organica. In questi impianti viene estratto gas (tipicamente metano) e conseguentemente è possibile accedere ai contributi relativi alle fonti rinnovabili o assimilate. Il materiale digerito dovrebbe comunque essere avviato ad impianti di compostaggio.

I costi della filiera industriale del compostaggio e/o della digestione anaerobica sono piuttosto elevati. L'accettazione sociale di impianti di grandi dimensioni sui territori rimane un problema sempre "caldo". Il recepimento italiano della Direttiva 2008/98/CE [3] introduce il concetto di "auto compostaggio", come il compostaggio degli scarti organici dei propri rifiuti urbani, effettuato da utenze domestiche, ai fini dell'utilizzo in situ del materiale prodotto.

L'auto compostaggio, noto anche come "compostaggio domestico", si pone come importante integrazione alla raccolta separata dell'organico in particolare quando si è in presenza di case sparse. In questi contesti la raccolta dell'organico diviene economicamente proibitiva e il compostaggio domestico diventa complementare ai sistemi di raccolta basati sul "porta a porta". Il compostaggio domestico è attuato normalmente con l'ausilio di compostiere domestiche o con le tecniche del cumulo, del silo o della semplice buca. L'auto compostaggio è importante anche perché viene interpretato come tecnica di riduzione dei rifiuti a monte (non conferendo al sistema di gestione) e quindi come riferimento alla prima delle priorità europee nella gestione rifiuti [2].

Alcuni comuni stanno supportando la diffusione del compostaggio domestico attraverso l'istituzione di un "Albo Comunale Compostatori" finalizzato a fornire, oltre alle compostiere, sconti tariffari e supporto tecnico. D'altro canto anche molte utenze non domestiche producono rifiuti assimilabili agli urbani come nel caso di strutture turistiche o nel caso di mense scolastiche o aziendali.

Tra il grande impianto e quello domestico si colloca l'attività di auto compostaggio di "comunità" che prevede l'utilizzo di macchine di dimensioni ridotte adatte al trattamento in loco di frazioni organiche prodotte da un condominio, da una mensa, da un hotel, da comunità isolate ecc. Questi impianti servono decine o anche centinaia di famiglie equivalenti. Si noti che questa tipologia di macchine è ancora poco conosciuta in Italia e pone delle problematiche tecniche e normative nuove.

Sul mercato esistono pochi prodotti tipicamente di produzione nord europea. È ipotizzabile che questa soluzione possa trovare in Italia una futura notevole diffusione. Una sperimentazione presso il Centro dell'ENEA Casaccia (http://www.enea.it/it/enea_informa/news/astro-il-progetto-innovativo-per-il-compostaggio-di-comunita), iniziata a dicembre 2011, prevede la predisposizione di una attività di compostaggio di comunità con l'utilizzo di un impianto pilota che tratta parte dei rifiuti organici (mensa aziendale) e della frazione verde (gestione del verde) prodotti nel Centro; il fine è quello di ottimizzare il processo per la produzione di compost di qualità e supportare l'analoga esperienza dimostrativa di compostaggio di comunità sulle Egadi (vedi articolo *Un caso pilota per un approccio integrato alla green economy: il Progetto Eco-innovazione Sicilia*).

Tecnologie per il riciclo delle plastiche

Le plastiche dei rifiuti urbani sono costituite da materiali polimerici e classificate come resine termoplastiche e resine termoindurenti; solo le prime sono riciclabili.

Il processo di riciclo può avvenire per via meccanica, per riottenere la macromolecola di partenza, o per via chimica o termica, per ottenere il monomero o altre materie prime (*feedstock recycling*): nel primo caso, applicabile solamente alle resine termoplastiche, i manufatti vengono selezionati per tipo di polimero (manualmente, con lettori ottici o a raggi X, per via densimetrica), lavati, asciugati mediante centrifugazione, triturati e sottoposti a formatura per estrusione o stampaggio. La buona riuscita del processo dipende dal grado di separazione e purezza del polimero di partenza, che consente alle macromolecole di rico-



struire la struttura originale, garantendo le proprietà meccaniche del prodotto finale. Le resine termoplastiche utilizzate invece nella componentistica elettronica non possono essere riciclate mediante i tradizionali processi meccanici a caldo, a causa della difficoltà di rimozione dei metalli presenti come circuiti e dei ritardanti di fiamma (composti organo bromurati) da cui si possono sviluppare emissioni gassose nocive. Il riciclo per via chimica avviene tramite l'azione di un solvente (solvolisi) o per via termica (pirolisi), tramite quella del calore. I limiti del feedstock recycling sono legati ai bassi rendimenti dei prodotti finali, alla conseguente elevata percentuale di frazioni di scarto e al consumo di solventi e di energia. Le resine termoindurenti non sono riciclabili perché si degradano, rendendo impossibile la ricostituzione delle catene polimeriche o dei singoli monomeri. Infine, esistono dei tentativi di utilizzare lo scarto di plastiche miste da raccolta differenziata come agente riducente negli altoforni industriali [10].

Esempi di riciclo meccanico della plastica

In Italia il riciclo meccanico da imballaggi permette il recupero e la vendita dei seguenti polimeri attraverso il Consorzio Recupero Plastiche da imballaggio (COREPLA): Polietilentereftalato (PET, suddiviso nelle qualità azzurro, trasparente, colorato), Polietilene alta densità (HDPE), Polietilene bassa densità (LDPE).

Altri polimeri presenti nella raccolta differenziata urbana non sono riciclati per motivi squisitamente economici in quanto associati a piccole quantità (come il caso del polivinilcloruro, le cui percentuali variano tra lo 0,5 e lo 0,7) [11] o all'eccessivo grado di impurezze, come gli scarti alimentari (è il caso del polistirene). Il riciclo dello scarto poliolefinitico della raccolta differenziata (*plasmix*) porta allo stampaggio di prodotti con valore commerciale inferiore.

Tipologia di riciclo	Società proprietaria	Processo	Prodotti
Riciclo meccanico	Progetto Utilgreen Società Revet SpA	Riciclo eterogeneo dello scarto poliolefinitico della raccolta differenziata degli imballaggi in plastica (<i>plasmix</i>)	Contenitori rigidi
	Corepla Montello SpA		Granulato per edilizia
<i>Feedstock recycling</i> (Riciclo chimico)	KodaK Co.	Depolimerizzazione del PET mediante solvolisi con metanolo	dimethyl ester of terephthalic acid eglicol etilenico
	BASF, Rhone Poulenc, SNIA	Depolimerizzazione della poliamide 6 per idrolisi acida	Caprolattame
	Du Pont	Depolimerizzazione alcalina della poliamide 6-6	Acido adipico e Sali di esametildiammina
	BASF, Rhone Poulenc,	Depolimerizzazione acida della poliamide 6-6	Acido adipico e Sali di esametildiammina
<i>Feedstock recycling</i> (Pirolisi)	Deutsche Babcock-Anlagen	Tamburo rotante, riscaldamento indiretto 450-500 °C	syngas
	Ebara	Letto fluido a due stadi, con il secondo di ossidazione	syngas
	Kobe Steel	Tamburo rotante, riscaldamento indiretto 500-700 °C	Olio, syngas
	BASF	Fusione, riscaldamento indiretto 300-450 °C	Olio destinato a <i>steam-cracking</i>

TABELLA 1 Esempi di riciclo di plastiche
Fonte: Brandrup, 1996 [14]



Esempi di *feedstock recycling*

Il *feedstock recycling* [12] in Italia è meno diffuso di quello meccanico e riguarda per lo più attività di ricerca. Ad esempio [13], il COREPLA ha sostenuto un progetto finalizzato alla depolimerizzazione del PET mediante idrolisi (acida, alcalina, basica) per la produzione di acido tereftalico (2001-2005, Progetto di ricerca finanziato da Co.Re.Pla., M&G, Dow ed Ecosol, depolimerizzazione del PET *bottle to bottle*). Per quanto riguarda la pirolisi, si possono citare alcuni processi applicati con successo su scala industriale in Germania e Giappone. La tabella 1 illustra alcuni esempi di riciclo applicato alle plastiche, sviluppati su varie scale e in diversi ambiti.

Tecnologie per il recupero di energia da plastiche

Le tecnologie di recupero di energia si classificano in base al rapporto tra comburente e combustibile: nella pirolisi si ha una degradazione termica in assenza di comburente; nella gassificazione il comburente è in quantità sottostechiometrica; nella combustione diretta, o incenerimento, il comburente è in quantità stechiometrica o in eccesso. Le plastiche, in quanto prodotto derivato dal petrolio, hanno un potere calorifico che può andare da un minimo di 18 MJ/kg (poliuretano) fino a superare i 40 MJ/kg (poliolefine), valore quest'ultimo pari a circa 4 volte quello di un rifiuto urbano indifferenziato [15].

Incenerimento

L'incenerimento (850-1100 °C) è associato esclusivamente al recupero di energia (termica, elettrica o cogenerativa). Il processo, condotto con eccesso stechiometrico di comburente, produce volumi di effluenti gassosi molto maggiori della pirolisi e della gassificazione; ciò comporta oneri rilevanti nelle apparecchiature di controllo delle emissioni gassose. D'altra parte, essendo una tecnologia matura nel campo del trattamento di ogni tipologia di rifiuti, è robusta e affidabile

nel contenimento dell'inquinamento gassoso e nella resistenza agli aspetti della corrosione del processo. In Italia al 2008 [16] risultavano presenti sul territorio nazionale 51 impianti di incenerimento di rifiuti urbani (incluso il trattamento di plastiche) per una capacità complessiva di circa 6 milioni di t/anno e una potenza elettrica installata di 587 MW; la tecnologia più diffusa è quella del forno a griglia mobile, seguita dal letto fluido bollente circolante.

Gassificazione

La gassificazione agisce mediante la parziale ossidazione dei composti organici ad alta temperatura (800-1300 °C). Le tecnologie impiegate per la gassificazione differiscono per l'agente gassificante (O₂, aria, vapore d'acqua), la tipologia di reattore e la pressione di funzionamento. Il reagente gassificante influenza il potere calorifico del gas prodotto, che può variare da un minimo di 4-7 MJ/Nm³ per l'aria a un massimo di 10-18 MJ/Nm³ per l'ossigeno, passando per il 14-17 MJ/Nm³ per il vapore. La gassificazione trova a livello nazionale un esempio di sviluppo in scala industriale nell'impianto di Malagrotta (RM); vengono trattate 8 t/h di Combustibile Solido Secondario (CSS) mediante gassificazione e successiva combustione del gas prodotto. Il syngas prodotto è di 9000 Nm³/h e il suo potere calorifico è di 9,7 MJ/Nm³.

Pirolisi

La pirolisi è un processo endotermico (400-800 °C) in atmosfera di gas inerte, il cui principale vantaggio è nella produzione di volumi di effluenti gassosi fino a 20 volte inferiori rispetto all'incenerimento [14] e nella possibilità di concentrare le specie dannose per l'ambiente nei sottoprodotti solidi e liquidi. L'applicazione del processo al trattamento delle plastiche richiede tuttavia consumi rilevanti a causa della loro bassa conducibilità e dell'elevata energia di degradazione delle macromolecole. Il grado di sviluppo in Italia si limita ad esperienze che non vanno oltre la scala di impianto pilota.



- [1] UNEP, 2011, *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication*, www.unep.org/greeneconomy, ISBN: 978-92-807-3143-9.
- [2] Waste Framework Directive, or Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste.
- [3] DLgs 205/2010 in materia di rifiuti, entrato in vigore il 25 dicembre 2010 (pubblicato nel S.O. n. 269/L della G.U. 10 dicembre 2010).
- [4] Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Parliament and social committee of the Regions, *Rio+20: verso un'economia verde e una migliore governance*, (COM(2011)363 del 20/6/2011).
- [5] Direttiva Comunitaria WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment) 2002/96/CE.
- [6] January 2012 on the Council position at first reading with a view to the adoption of a directive of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (Recast) (07906/2/2011 – C7-0250/2011 – 2008/0241(COD)).
- [7] Direttiva Comunitaria RoHS - Restriction of Hazardous Substances 2002/95/CE.
- [8] *Cobalt and manganese recovery from spent catalysts*. D. Fontana, F. Forte - Proceedings of Ecomondo 2011, pp. 880-885. 9th-12 November 2011, Rimini, Italy, Maggioli Editore.
- [9] FISE, Fondazione Sviluppo Sostenibile, *L'Italia del riciclo*, Roma 2011.
- [10] COREPLA. *Dati di produzione 2008*, su www.corepla.it.
- [11] Petriglieri, F. (2011), *Il sistema di raccolta, valorizzazione, riciclo e recupero degli imballaggi in plastica* – Convegno AIDIC 21 ottobre 2011.
- [12] Vijaykumar Sinha & Mayank R. Patel & Jigar V. Patel, *Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review*, J Polym Environ (2010) 18:8-25.
- [13] Equipolymers, (2005). *Equipolymers obtains initial funding approval from CIPE for the construction of a state-of-art PET production facility in Ottana (Italy)*. www.equipolymers.com
- [14] Brandrup. (1996). *Recycling and Recovery of Plastics*. Muenchen, Vienna, New York: Hanser Publishers.
- [15] ISPRA (a cura di) (2009), *Rapporto Rifiuti 2008*.
- [16] ENEA-Federambiente (2009), *Rapporto sulle Tecniche di Trattamento dei Rifiuti in Italia*.