

Produzione di green fuel gassoso e liquido attraverso termolisi a ciclo chiuso da residui derivanti dalla raccolta differenziata - Parte II: impianto COMPACT

Il presente studio sviluppa un'applicazione concreta per la produzione di green fuel mediante termolisi a ciclo chiuso di rifiuti residui provenienti dalla raccolta differenziata. Focalizzandosi su un impianto modulare denominato COMPACT (COmbustibili da Materiali Poveri Applicando Chimica e Termolisi), il lavoro analizza la valorizzazione di tre categorie di rifiuti: plasmix, frazione secca residua e scarti legnosi. Il sistema prevede un doppio stadio di termolisi che separa fisicamente la fase di pirolisi da quella di cracking, ottimizzando rendimento energetico e minimizzando le emissioni nocive. I risultati evidenziano la fattibilità tecnica e ambientale della proposta, suggerendo un'alternativa sostenibile ai termovalorizzatori tradizionali.

PRODUCTION OF GASEOUS AND LIQUID GREEN FUEL THROUGH CLOSED-CYCLE THERMOLYSIS FROM RESIDUES DERIVED FROM SEPARATE WASTE COLLECTION. PART II: COMPACT PLANT

This study develops a practical application for the production of green fuel through closed-cycle thermolysis of residual waste from separate collection. Focusing on a modular plant called COMPACT (COmbustibili da Materiali Poveri Applicando Chimica e Termolisi), the work analyzes the recovery of three categories of waste: plasmix, dry residual fraction, and wood waste. The system features a double-stage thermolysis process that physically separates the pyrolysis phase from the cracking phase, optimizing energy efficiency and minimizing harmful emissions. The results highlight the technical and environmental feasibility of the proposal, suggesting a sustainable alternative to traditional waste-to-energy incineration plants.

SVILUPPO DI UN'IPOTESI APPLICATIVA CONCRETA

Per dare concretezza alle configurazioni prese in esame nella Parte I [1] e per esprimere valutazioni realistiche in merito, si è scelto di definire un caso corrispondente a situazioni effettive di un territorio di riferimento anche in connessione con i processi decisionali in atto per attualizzare alcune scelte strategiche in materia di gestione rifiuti. Il presente rapporto si focalizza su tre tipologie di materiali da trattare:

- plasmix cioè le plastiche miste negli scarti del riciclo (scartati in quanto materiale non adatto a un efficace riciclo meccanico);
- frazione residua proveniente dalla raccolta differenziata di RSU e relativo riciclo per riutilizzo; questa tipologia comprende sia il flusso corrente dell'attuale gestione dei rifiuti, sia gli stock accumulati per l'insufficiente capacità di smaltimento di questi materiali residui e le cosiddette ecoballe;
- cippato e scarti legnosi.

Il trattamento inizia con un processamento meccanico del materiale per ottenere una pezzatura omogenea ed eventualmente miscelarla con additivi necessari per tamponare i componenti acidi. Il trattamento termico può essere di sola termolisi primaria o sola crackizzazione (termolisi secondaria) o combinando i due processi (Figura 1). In tutte le soluzioni conviene trattare quantità non rilevanti per evitare che le disomogeneità di composizione possano dar luogo a variazioni che il sistema di controllo dei parametri di lavoro non

riesca a gestire attraverso la portata in ingresso e l'immissione dei gas di copertura. In questa proposta, la versione suggerita è avviare i gas e vapori ottenuti dalla termolisi primaria alla termolisi secondaria per produrre combustibile costituito da green fuel arricchito in H_2 e liquido equiparabile a gasolio. Alla fine del trattamento gran parte del materiale in ingresso diventa materia seconda. Le scorie che restano della prima termolisi, costituite da metalli, carbone, ceneri ed inerti, previa staccatura per la selezione dei metalli, sono vagliate e selezionate per recuperare il char e gli inerti.

In Figura 2 è mostrato in maniera schematica un modulo dell'impianto COMPACT, COmbustibili da Materiali Poveri Applicando Chimica e Termolisi. Il carattere innovativo dell'impianto consiste:

- nel tenere distinte la fase di termolisi da quella di cracking che avvengono in contenitori separati: la termolisi è effettuata in un contenitore inertizzato, riscaldato mediante uno scambiatore a tubi radianti, alimentato dai gas provenienti dalla reazione di cracking (termolisi secondaria); il rifiuto da trattare è posto su un nastro trasportatore che preleva il rifiuto opportunamente condizionato e lo espone a un campo di temperature di circa 480°C che opera la selezione a caldo attraverso la termolisi dei materiali organici.
- nel convogliare gas e vapori in uscita dalla termolisi nel reattore di cracking per la termolisi secondaria; l'energia necessaria per innescare l'intero processo viene introdotta nello scambiatore mediante un riscaldatore alimentato con i liquidi condensati,

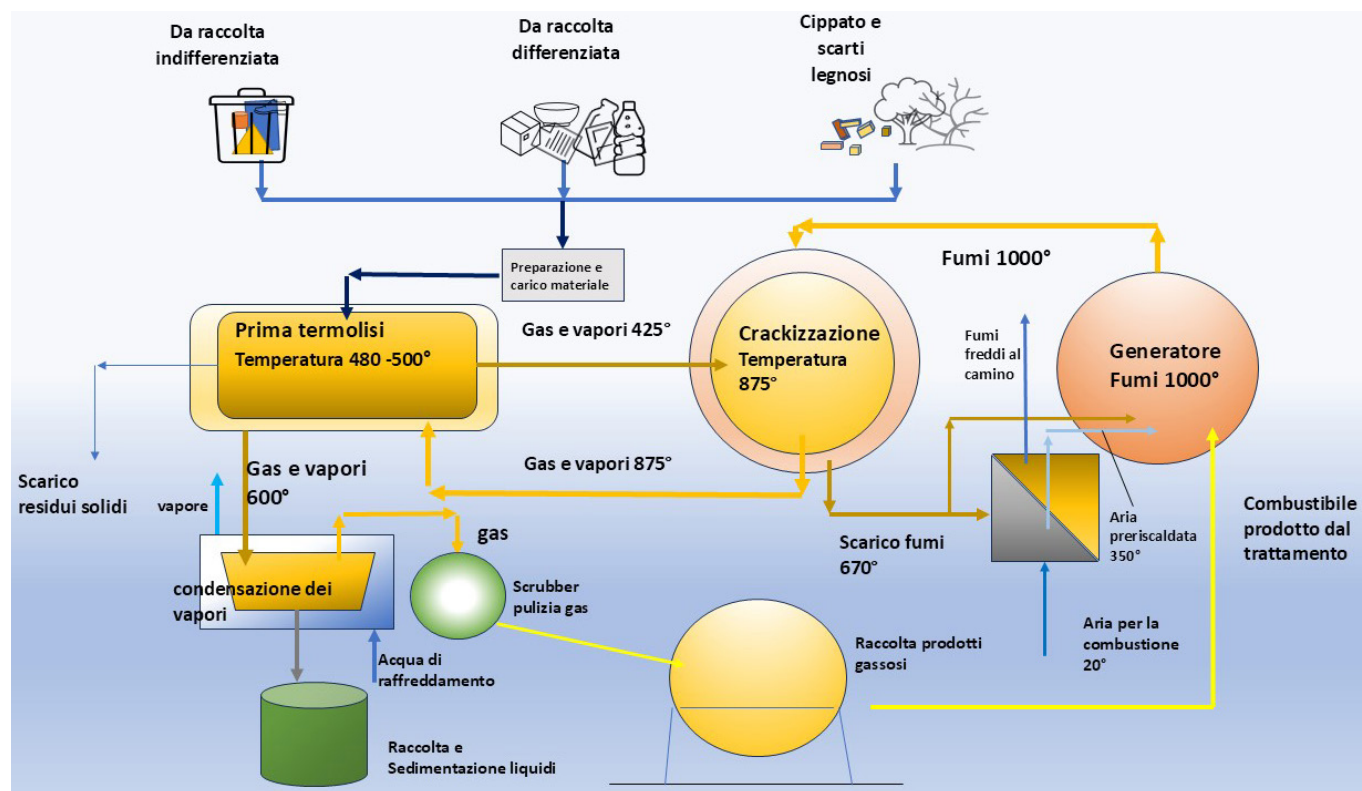


FIGURA 1 - Schema indicativo di correlazione tra materiali in ingresso e prodotti in uscita

opportunamente puliti.

- Il sistema è concepito a "flussi separati" ovvero i prodotti di pirolisi sono sempre separati dai flussi caldi che sostengono il riscaldamento che avviene mediante un generatore di fumi

Si noti che molti processi di trattamento, anche con parziale separazione delle due fasi, solitamente espongono il rifiuto da trattare al contatto diretto con lo stadio di alimentazione energetica (combustione di una porzione del rifiuto stesso o del rifiuto frammisto ad altro combustibile). Questa scelta genera le condizioni, stante l'eterogeneità dei materiali in trattamento, per l'immissione di inquinanti pericolosi di difficile rimozione.

QUANTITÀ, CARATTERISTICHE E POTENZIALITÀ DEL MATERIALE DA TRATTARE

Si considera il caso di 1 milione di abitanti dove si producono, su base annua, 500 mila di tonnellate di rifiuto. Di queste vengono effettivamente riciclate una parte. Il resto è costituito da residui secchi e materiale di ritorno dai conferimenti a riciclo nei quali prevalgono le plastiche. Conseguentemente sono disponibili per la produzione di green fuel circa 220 mila tonnellate di materiale residuo (Tabella 1). I valori scelti sono coerenti con quanto emerge dal recente rapporto ISPRA sulla situazione dei Rifiuti Urban2023 [2]. Il calcolo che porta al 70 % la percentuale di plastica è stimato tenendo conto che della plastica prodotta in Italia il 59 % è avviato a discarica o ad incenerimento e il 41 % è avviato a riciclo [3]. Considerato che solo la metà di questa ultima quota è effettivamente

riciclata per riuso come plastica, si ha attualmente la necessità di smaltire il 70 % della plastica originariamente presente nei rifiuti. Il miglioramento della raccolta differenziata si auspica sposti le percentuali sul totale dei rifiuti fino a 45 % avviato a discarica o combustione e 55 % destinata al riuso. Se si applicano le stesse percentuali alla plastica il valore 70 % come sopra definito diventa 72,5 %. Separando le parti inerti che sono associate ai materiali con contenuto energetico si ha un potere calorifico medio di 31 MJ/kg. L'inerte è stimato il 23% ed è composto da vetro, inerti e metalli. I valori sono desunti dal rapporto di Adrados et al. [4] e da quello di Wong et al. [5]. Risultano pertanto potenzialmente utilizzabili 7740 milioni di MJ (corrispondenti a 2,15 milioni di MWh).

La composizione media usata nei calcoli e relativo potere calorifico di ciascuna frazione, considerando 1000 kg di materiale da trattare, corrisponde a:

- 600 kg di rifiuti plastici da imballaggi, con potere calorifico pari a 42 MJ/kg;
- 167 kg di materiali plastici vari, carta, cartone, ecc, con potere calorifico pari a 35 MJ/kg;
- 180 kg di vetro e inerti;
- 53 kg di materiali metallici.

PRODOTTI IN USCITA OTTENIBILI AL VARIARE DEI MATERIALI IN INGRESSO E DEI TRATTAMENTI TERMICI ESEGUITI

Utilizzando la termolisi si ottengono le rese esposte in Tabella 2. La termolisi a media temperatura è già sufficientemente sviluppata;

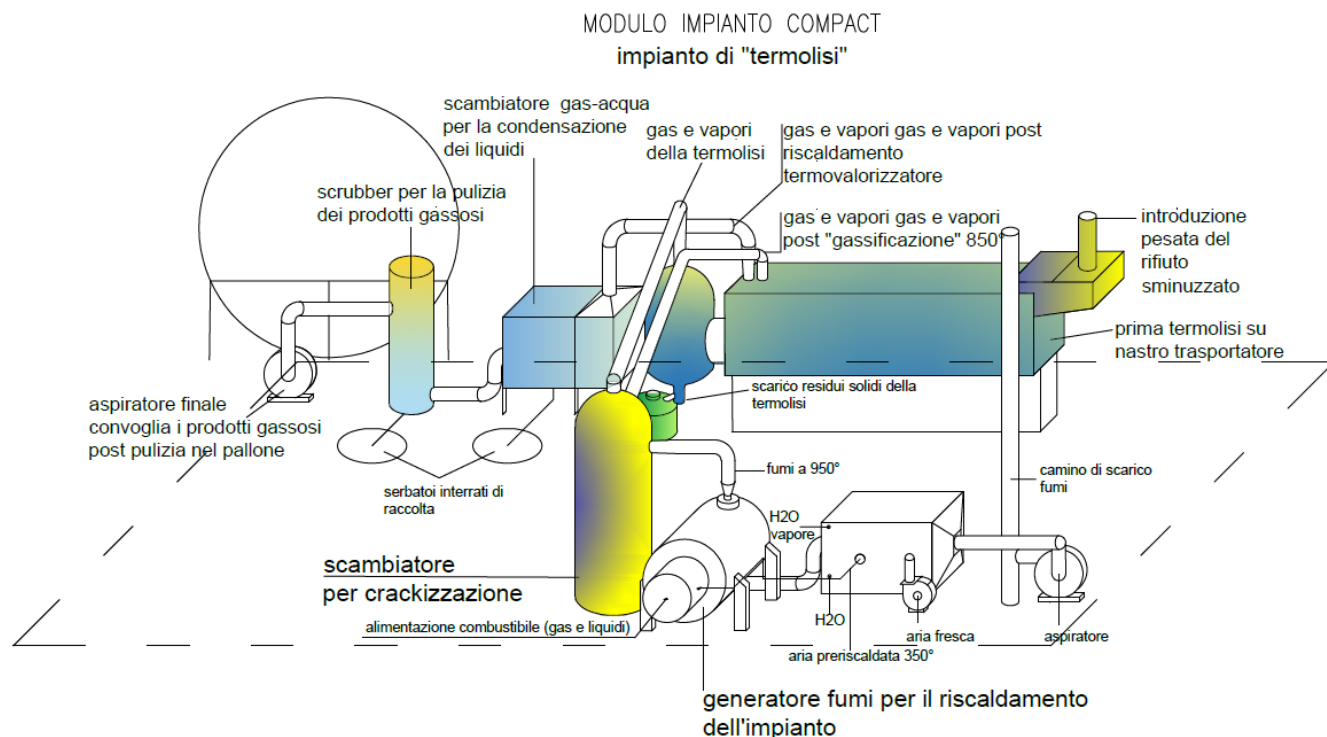


FIGURA 2 - Rappresentazione schematica di un modulo d'impianto COMPACT

tuttavia, trattandosi di materiali in ingresso con alta presenza di inerti, occorre scegliere tra i metodi menzionati, quello che genera meno inconvenienti, evitando soprattutto rimescolamenti, che possono originare particolato in sospensione. Scartata la pirolisi a batch per la scarsa produttività, la scelta più opportuna è quella a letto mobile, per la quale si può utilizzare la tecnologia, consolidata ampiamente, utilizzata nei forni "a passaggio" per i trattamenti termici. Con l'impiego di questa tecnologia, risulta anche facile cospargere, in fase di deposizione, il materiale da trattare con sostanze che contrastino gli effetti negativi legati alla presenza di plastiche con cloro. L'uso del catalizzatore è concettualmente possibile, ma pone difficoltà dovute allo stato "sporco" del materiale da trattare; è invece più agevole per il processo di termolisi secondaria alimentato dai gas e vapori di termolisi. Il gas e il liquido risultanti dalla termolisi possono, previa opportuna separazione per raffreddamento, essere utilizzati direttamente come combustibile per usi termici (ivi inclusa la produzione di vapore) o come carburante in motori per propulsione o produzione di elettricità.

Per quanto riguardano gli effetti della termolisi secondaria l'introduzione di un secondo stadio alimentato dai gas e vapori della termolisi e comprensivo di opportuno riscaldatore che innalza la temperatura della miscela intorno a 900°C porta ai seguenti vantaggi.

Rispetto alla tradizionale gassificazione diretta:

- dal punto di vista del rendimento energetico del processo un incremento dovuto alla maggiore efficienza nella fase di riscaldamento
- minori volumi da portare ad alta temperatura quindi minore presenza di azoto nel gas finale con conseguente incremento del potere calorifico;

- dal punto di vista ambientale, minore rischio di messa in circolo nei vapori di sostanze nocive contenute nella quota solida perché questa opera in assenza di ossigeno.

Rispetto all'uso diretto dei gas e vapori da termolisi:

- si allarga l'elenco degli usi che nel caso dell'impiego diretto è di fatto limitato alla combustione in caldaia.

Si osserva che la progettazione e la gestione dell'impianto di termolisi da utilizzare come secondo stadio sono molto più semplici oltre che portare a rendimento più elevato; questo sia per considerazioni di volumi e geometrie sia perché la miscela di gas e vapori introdotta ha un contenuto di particolato di gran lunga inferiore. Nella stessa direzione va la possibilità di adottare in questo caso soluzioni modulari. Si tenga presente che le reazioni di steam reforming, che hanno luogo nello stadio di seconda termolisi, possono essere stimulate dall'impiego di catalizzatori anche in vista dell'obiettivo di aumentare la quota di idrogeno contenuta nel gas (rendimenti che possono superare il 70%vol [6]). Quest'ultimo obiettivo può essere conseguito fino ad ottenere quasi esclusivamente H_2 tramite opportuni accorgimenti impiantistici e di gestione. L'adozione di uno schema d'impianto a moduli consente un miglior controllo del processo soprattutto a far fronte ad eventuali importanti disomogeneità del materiale in ingresso suddividendolo con accortezza, tra i vari moduli.

STIMA DEL GREEN FUEL PRODOTTO

In base ai calcoli di bilancio di massa ed energia e di cinetica delle reazioni chimiche, integrati con l'analisi di dati disponibili

Materiale da inviare al trattamento termochimico dell'anno 2021 per milione di abitanti	Produzione italiana QR (tx106)	Produzione pro-capite QR (t/ab)	Produzione per milione di abitanti QR (t/106ab)	Percentuale di rifiuto da inviare al trattamento termochimico (%)	Quantità di rifiuto da inviare al trattamento termochimico (t)
Frazione organica (umido + verde)	7.387	0.125	124974	0%	0
Carta e cartone	3.613	0.061	61123	10%	6112
Vetro	2.250	0.038	38070	0%	0
Plastica	1.676	0.028	28356	70%	19849
Metallo	0.372	0.006	6287	0%	0
Legno	1.006	0.017	17016	0%	0
RAEE	0.290	0.005	4911	0%	0
Ingombranti misti a recupero	0.958	0.016	16205	45%	7292
Rifiuti da C&D	0.364	0.006	6163	0%	0
Spazzamento stradale a recupero	0.499	0.008	8444	0%	0
Tessili	0.154	0.003	2609	20%	522
Selettiva	0.057	0.001	969	0%	0
Altro	0.328	0.006	5541	0%	0
Totale RD	18.955	0.321			33775
Indifferenziato secco	10.778	0.182	182333	100%	182333
Totale RU	29.732				216109

TABELLA 1 - Suddivisione del rifiuto trattabile derivante da raccolta su un bacino di 1 milione di abitanti dati ISPRA

in letteratura e nonché di risultati direttamente acquisiti attraverso prove sperimentali su impianti pilota di varia taglia, dei quali il più significativo è stato denominato ERPICE, sono stati ricavati i dati elencati in Tabella 3 sulla produzione di green gas e sulla resa della trasformazione. I valori sopra riportati sono da considerare come una "best estimate". Anche se non è semplice quantificare con precisione quali possano essere gli intervalli di variazione di queste grandezze in correlazione con puntuali scelte, sia costruttive sia di esercizio. In questa valutazione è necessario tenere conto che l'intervallo di variazione possa essere intorno al 20% in meno e un 10% in più sul potere calorifico e conseguentemente sulla frazione di energia originariamente associata ai residui, che può essere recuperata nei combustibili ottenuti.

Trattamento residui finali ed emissioni

Le scorie, allo scarico del nastro trasportatore, sono convogliate

in un apposito contenitore metallico inertizzato. Periodicamente il recipiente viene sostituito ed avviato alle operazioni di trattamento, questa operazione che può essere effettuata al di fuori del sito operativo consiste in vagliatura atta a separare gli elementi metallici, quindi, seguono setacciature per recuperare il char separandolo da ceneri ed inerti quest'ultimi potranno essere recuperati se interessanti.

A valle della seconda termolisi si devono raccogliere le polveri dal ciclone, le melme dai depositi delle acque reflue dello scrubber e dalla filtrazione dei liquidi. Anche dal trattamento di questi scarti possono essere recuperate materie quali cere e polvere di carbonio. La proposta a doppio stadio di termolisi, salvo per la fase di avvio, non comporta emissioni gassose.

Stima economica

Con riferimento a un modulo COMPACT in grado di processare 3

TABELLA 2 - Produzione di combustibili per termolisi a temperatura medio alta (430° - 500° C) [4] [5]

G: gas; L: liquido; W: cere; S: interti, C: carbone, A: cenere

Materiale in ingresso	Termolisi (%vol)		
	Letto fisso a batch	Letto fluido e letto mobile	Letto conico (a getto)
Frazione residua della raccolta differenziata di RSU e relativo riciclo per riutilizzo	G: 25, L: 34, W: 6, S: 28, C: 5, A: 2	G: 29, L: 37, S: 28, C: 5, A: 2	G: 20, L: 38, W: 8, S: 28, C: 5, A: 2
Plasmix	G: 32, L: 43, W: 12, S: 6, C: 5, A: 2	G: 36, L: 46, W: 5, S: 6, C: 5, A: 2	G: 30, L: 49, W: 8, S: 6, C: 5, A: 2
Cippato e scarti legnosi	G: 34, L: 29, C: 34, A: 3	G: 24, L: 49, C: 24, A: 3	G: 13, L: 72, C: 12, A: 3

Elementi e composti chimici	kg di prodotto/t di rifiuto	Volume Nm ³	Potere calorifico MJ/kg	Energia prodotta MJ	Energia prodotta MWh	Energia prodotta dai liquidi MWh	Energia prodotta dai gas MWh
H ₂	14.8	165.76	120	1776	0.49	-	0.49
CO	71.9	57.52	10.05	723	0.20	-	0.2
CO ₂	145.3	73.97	0	0	0	-	0
CH ₄	13.1	18.34	50	655	0.18	-	0.18
C ₂ -C ₄	177.5	93.11	48.0	8514	2.37	-	2.37
C ₅ -C ₉	338	-	42	14196	3.94	3.94	-
C ₁₀ -C ₁₃	32.8	-	42	1378	0.38	0.38	-
Totale	793.4	408.71	-	27241	7.57	4.32	3.24

TABELLA 3 - Composizione media del gas post termolisi secondaria (Impianto Erpice, dati ricavati da sperimentazioni effettuate privatamente)

t/h si è proceduto a una stima dei costi totali articolati su tre voci indicative: parti meccaniche (3.7 milioni di euro), impianto elettrico (0,65 milioni di euro) e la sezione di automatizzazione e controllo (0,15 milioni di euro) giungendo a un totale di costi stimati per il modulo pari a circa 4,5 milioni di euro.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Pur nella consapevolezza del margine di incertezza associato ai diversi valori stimati, si può ipotizzare che l'operazione risulti certamente remunerativa. Dall'analisi condotta risulta che l'efficacia del processo, l'elevato livello delle tariffe in vigore per lo smaltimento di rifiuti di questo tipo (anche per effetto degli elevati costi di trasporto) e i prezzi crescenti e instabili dei combustibili tradizionali di origine fossile (quali metano e gasolio) rendono economicamente attraente l'iniziativa ipotizzata nel senso che non solo si raggiunge l'equilibrio economico ivi inclusa la remunerazione del capitale investito, ma si ha, in linea di principio, la possibilità di agire favorevolmente sia sull'entità delle attuali tariffe per il ritiro dei rifiuti, sia sui costi di produzione dell'impresa manifatturiera diretta utilizzatrice dei combustibili prodotti, sia, in alternativa, sui prezzi praticabili in caso di cessione a terzi dei combustibili prodotti.

Ferma restando la convinzione che i termovalorizzatori a combustione con fiamma della tipologia attualmente in funzione siano una tecnologia consolidata e abbiano un ruolo decisivo nella soluzione delle problematiche connesse con lo smaltimento dei rifiuti, emergono elementi significativi (tra i quali l'elevata efficienza, la possibilità di produrre combustibili green in quanto non legati ad estrazione di minerali, la ridotta emissione di effluenti, la flessibilità della taglia attraverso soluzioni modulari) sull'opportunità di utilizzare in adeguati contesti anche impianti basati su tecnologie che rientrano nella categoria combustione senza fiamma e in particolare termolisi.

L'evoluzione tecnologica e soprattutto la dinamica dei mercati quanto a prezzi e disponibilità dei combustibili motivano un rilancio

anche in Italia di soluzioni di questo tipo che sono del resto ampiamente utilizzate in altri Paesi, tra i quali la Cina, la Germania, il Giappone e alcuni Paesi dell'America Latina.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano esprimere profonda gratitudine al prof. Fabio Pistella che li ha invitati a intraprendere tale studio a cui ha contribuito con preziosi suggerimenti.

RIFERIMENTI

1. G. Pasquale, E. Arato, C. Moliner. Produzione di green fuel gassoso e liquido attraverso termolisi a ciclo chiuso da residui derivanti dalla raccolta differenziata - Parte I: contesto e stato dell'arte. La Termotecnica. Giugno 2025, 58-62 (2025)
2. <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-urbani-edizione-2023>. Data accesso: 2/7/2025
3. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Programma Nazionale per la Gestione dei Rifiuti. <https://www.mase.gov.it/portale/programma-nazionale-per-la-gestione-dei-rifiuti>. Data accesso: 2/7/2025
4. A. Adrados, I. de Marco, B.M. Caballero, A. López, M.F. Laresgoiti, A. Torres. Pyrolysis of plastic packaging waste: A comparison of plastic residuals from material recovery facilities with simulated plastic waste. Waste Management, 32(5), 826-832 (2012)
5. S. L. Wong, N. Ngadi, T.A.T. Abdullah, I.M. Inuwa. Current state and future prospect of plastic waste source of fuel: A review, Renewable and sustainable energy reviews, 50 (2015)
6. S. Scaccia, G. Vanga, L. Pagliari, M. Nobili, S. Stendardo. Studio della reazione di steam reforming del metano (SMR) con Sorption Enhanced (SE) mediante materiale bi-funzionale con elevate prestazioni catalitiche e proprietà adsorbenti. Ricerca di Sistema Elettrico Report Rds/PAR2016/195 (2017).