



## Giunta Regionale della Campania

### DECRETO DIRIGENZIALE

DIRETTORE GENERALE/  
DIRIGENTE UFFICIO/STRUTTURA

DIRIGENTE UNITA' OPERATIVA DIR. /  
DIRIGENTE STAFF

dott.ssa Anna Martinoli

DECRETO N°	DEL	DIREZ. GENERALE / UFFICIO / STRUTT.	UOD / STAFF
<b>9</b>	<b>16/01/2018</b>	<b>6</b>	<b>15</b>

Oggetto:

***D. Lgs. n. 152/06 - art. 208 e art 211- Autorizzazione alla realizzazione ed esercizio di un impianto sperimentale di recupero rifiuti speciali non pericolosi ubicato nel Comune di Sarno, Traversa di Via Ingegno snc, Zona Industriale. Ditta PRT Srl Polyuteran Recycling Technology con sede legale nel Comune di Sarno, Via Ingegno snc.***

	Data registrazione	
	Data comunicazione al Presidente o Assessore al ramo	
	Data dell'invio al B.U.R.C.	
	Data invio alla Dir. Generale per le Risorse Finanziarie (Entrate e Bilancio)	
	Data invio alla Dir. Generale per le Risorse Strumentali (Sist. Informativi)	

## IL DIRIGENTE

**PREMESSO** che la ditta PRT Srl Polyuteran Recycling Technology , legale rappresentante in qualità di Amministratore Unico sig. Agovino Pasquale, nato a Sarno il 22.12.1966, in data 11.08.2017, prot. 551761, ha presentato istanza di autorizzazione alla realizzazione e gestione di un impianto sperimentale di recupero rifiuti non pericolosi, ai sensi dell'art. 211, del D.Lgs 152/06, da effettuarsi presso l'impianto ubicato nel comune di Sarno, Traversa di Via Ingegno snc;

- che la sperimentazione di durata di tre mesi prorogabile fino ad un massimo di due anni, di cui al comma 2, dell'art. 211 del D.Lgs 152/06 , consiste nel testare un processo di pirolisi termica di rifiuti di natura plastica in miscele di idrocarburi utilizzabili come combustibili, nello specifico il rifiuto da utilizzare oggetto della sperimentazione è il CER [191210] *Rifiuti combustibili (CDR: combustibile derivato da rifiuti)*;

**CONSIDERATO** che in data 30.11.2017 ed in data 15.12.2017 si sono tenute le sedute della Conferenza di Servizi, per il rilascio dell'autorizzazione prevista dall'art. 208 e dall'art. 211, del D.Lgs 152/06, conclusasi con l'approvazione del progetto per l'impianto presentato dalla ditta PRT Srl Polyuteran Recycling Technology;

**RITENUTO** poter procedere al rilascio dell'autorizzazione per la realizzazione ed esercizio dell'impianto de quo, ai sensi dell'art. 208 e dell'art. 211 del D. Lgs. 152/06;

**CONSIDERATO** che dal funzionario istruttore incaricato e dal Responsabile di Posizione Organizzativa competente, ing. Giovanni Galiano, non si rilevano motivi ostativi all'accoglimento della domanda;

### VISTO:

1. il D. Lgs. n. 152/06;
2. la D.G.R.C. n. 386/16;

### DECRETA

per le motivazioni espresse in premessa, che qui si intendono integralmente riportate e trascritte, di:

**AUTORIZZARE** la ditta PRT Srl Polyuretano Recycling Technology, legale rappresentante in qualità di Amministratore Unico sig. Agovino Pasquale, nato a Sarno il 22.12.1966, alla realizzazione e gestione di un impianto sperimentale di recupero rifiuti non pericolosi, ai sensi dell'art. 208 e dell'art. 211, del D.Lgs 152/06, da effettuarsi presso l'impianto ubicato nel comune di Sarno, Traversa di Via Ingegno snc;

### PRECISARE

- che la sperimentazione:
- avrà durata di mesi 3 (tre) prorogabile fino ad un massimo di due anni, di cui al comma 2, dell'art. 211 del D.Lgs 152/06;
  - dovrà essere svolta con le modalità descritte nella relazione tecnica (All1) e nella relazione scientifica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio (All 2) allegati al presente provvedimento;
- che la ditta PRT Srl Polyuretano Recycling Technology potrà effettuare presso l'impianto le operazioni di cui all'allegato C alla Parte IV del D. Lgs. 152/06, così come definite dalla vigente normativa in materia, per i codici CER, quantità e volumi riportati nella seguente tabella:

Codici CER	Descrizione	Peso Specifico	Quantità massime				Operazioni di recupero
		Kg/mc	t/die	mc/die	t/spe	mc/spe	
[191210]	Rifiuti combustibili (CDR: combustibile derivato da rifiuti)	200	1	0,2	90	18	[R13]
			0,72	0,14	90	13	[R3]

**STABILIRE** che:

- i lavori dovranno iniziare e concludersi entro i termini previsti dal D.P.R. n. 380/2001 e ss.mm.ii., avente ad oggetto disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia, previa comunicazione di inizio lavori all'U.O.D. - Autorizzazioni ambientali e rifiuti Salerno;
- la Ditta, al termine dei lavori, provvederà a darne comunicazione all'U.O.D. - Autorizzazioni ambientali e rifiuti Salerno, trasmettendo apposita perizia asseverata, da tecnico abilitato, attestante l'ultimazione dei lavori e la conformità degli stessi con il progetto approvato, così come modificato;
- in uno alla perizia dovrà essere presentata comunicazione della data di inizio esercizio, sottoscritta dal legale rappresentante, nonché polizza fidejussoria, conforme alla Parte V dell'Allegato alla delibera di Giunta Regionale n. 386/2016.

**PRECISARE**, altresì, che:

- a lavori ultimati e prima della messa in esercizio dell'impianto, la ditta dovrà presentare S.C.I.A. al Comando VV.F. di Salerno ai sensi del D.P.R. n. 151/2011;
- durante il periodo di sperimentazione, la Ditta dovrà effettuare un'indagine fonometrica finalizzata al rispetto dei limiti previsti dal Piano di Zonizzazione Acustica Comunale e delle norme di settore, trasmettendone le risultanze all'U.O.D. Autorizzazioni ambientali e rifiuti Salerno;
- in fase di esercizio dovranno essere adottate tutte le cautele per impedire la formazione di odori e la dispersione di aerosol e polveri;
- i rifiuti dovranno essere trattati e recuperati senza pericolo per la salute dell'uomo e senza usare procedimenti o metodi che potrebbero recare pregiudizio all'ambiente ed in particolare:
  - senza determinare rischi per l'acqua, l'aria, il suolo, nonché per la fauna e la flora;
  - senza causare inconvenienti da rumori o da odori;
- la ditta, per quanto non previsto nel presente Decreto, si dovrà attenere alla normativa vigente (nazionale e regionale) in materia di rifiuti e di gestione dell'attività;
- la Ditta, allo scadere della gestione, è tenuto a presentare un piano di ripristino ambientale, riferito agli obiettivi di recupero e sistemazione dell'area, in relazione alla destinazione d'uso prevista dall'area stessa. Il piano di ripristino ambientale dovrà avere la valenza di un piano di dismissione e riconversione dell'area previa verifica dell'assenza di contaminazione, ovvero in presenza di contaminazioni, dovrà prevedere la bonifica dell'area da attuarsi con le procedure e le modalità indicate dal D. Lgs. 152/06.

**PRENDERE ATTO** che il sistema degli scarichi idrici è così composto:

da una rete di raccolta acque nere e grigie proveniente dai servizi igienici recapitanti in vasca imof a tenuta, periodicamente svuotata da ditta autorizzata;

rete acque meteoriche provenienti dal dilavamento del piazzale e dalle coperture, recapitanti nella condotta Comunale ubicata su Via Ingegno, previo convogliamento in impianto di depurazione, ubicato nella restante parte del capannone adibito ad altra attività, regolarmente autorizzato con D.D. n. 88 del 19/09/2017;

**FAR PRESENTE** che avverso il presente decreto è ammesso, ai sensi dell'art. 3 comma 4 della L. n. 241/90 e ss.mm.ii., ricorso giurisdizionale al T.A.R. competente o, in alternativa, ricorso straordinario al Capo dello Stato, nei rispettivi termini di sessanta e centoventi giorni dalla sua notifica.

**NOTIFICARE** il presente decreto in modalità telematica alla ditta PRT Srl Polyuretan Recycling Technology.

**TRASMETTERE** copia del presente decreto alla Direzione Generale per l'Ambiente e l'Ecosistema della Regione Campania, al Sindaco del Comune di Mercato San Severino (Sa), all'Amministrazione

Provinciale di Salerno, all'A.R.P.A.C. di Salerno, all'ASL Salerno, all'Ente d'Ambito Sarnese Vesuviano, alla Rete Ferroviaria Italiana, alla Sezione Regionale Albo Gestori Ambientali c/o CCIAA di Napoli.

**INVIARE** il presente decreto al Settore Bollettino Ufficiale per la pubblicazione.

Avv. Anna Martinoli



**COMUNE  
DI SARNO  
PROVINCIA DI SALERNO**

**AUTORIZZAZIONE IMPIANTO DI  
RICERCA E SPERIMENTAZIONE DI  
PIROLISI TERMICA DI RIFIUTI NON  
PERICOLOSI DI NATURA PLASTICA**

(ai sensi degli artt. 208 e 211, D. L.vo 152/06)

**RELAZIONE TECNICA**

**ECOTIME**

CONSULENZA AMBIENTALE  
DR. DEL REGNO GIUSEPPE  
VIA V. ALFANO, 35 MERCATO SAN SEVERINO SA

PRT SRL  
POLYURETHAN RECYCLING TECHNOLOGY  
SEDE LEGALE: VIA INGEGNO, SNC - ZONA INDUSTRIALE  
SEDE IMPIANTO: VIA INGEGNO, 25 - ZONA INDUSTRIALE  
4047 - SARNO (SA)

FIRME

IL COMMITTENTE

---





Un piazzale di 548,0 mq, su cui interno è posizionata anche una cabina ENEL e provvisto di pavimentazione di tipo industriale completa l'area occupata dall'impianto; il tutto recintato sul perimetro esterno con muro sormontato da ringhiera, e separato dalla restante parte del lotto, anch'essa in uso alla PRT Srl, adibito ad attività estranea, come rappresentato nella Tav. n. 1 "Planimetria generale - lay-out - emissioni in atmosfera - antincendio".



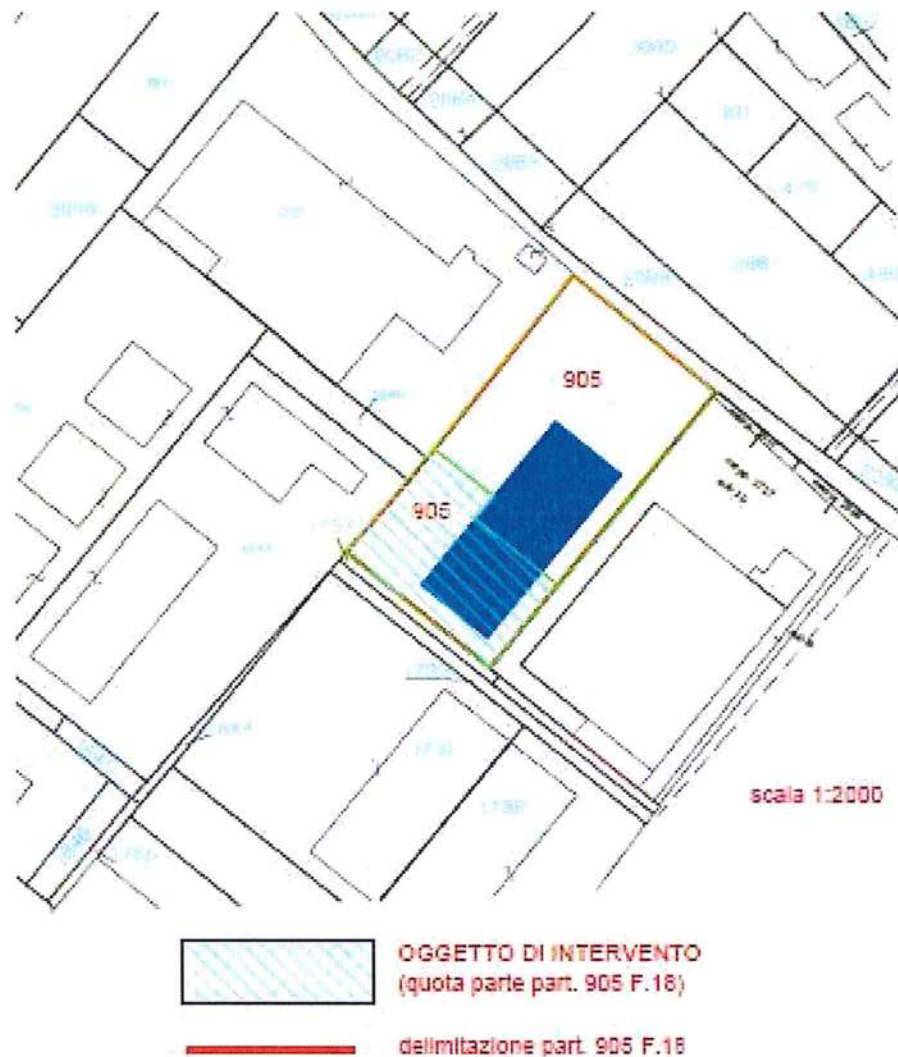
STRALCIO DA GOOGLE EARTH

### **Inquadramento urbanistico, edilizio e vincolistico**

L'area interessata dal progetto ricade in area destinata al Piano degli Insediamenti Produttivi per attività industriali ed artigianali, secondo il vigente Programma di Fabbricazione annesso al regolamento edilizio, adottato con delibera di C. C. del 10.07.1972 n. 107 e definitivamente approvato con DPGRC del 14.12.1977 n. 4631 e modificato con variante urbanistica approvata con decreto del Presidente della Provincia di Salerno n. 34706 del 22.09.1998.

L'intervento edilizio è stato assentito mediante Concessione Edilizia n. 707 del 24.07.2001 e successiva Segnalazione Certificata di Inizio Attività del 24.09.2012 Prot. 16019.

L'area totale occupata dall'impianto pari a 942,00 mq risulta in Catasto al foglio 18, quota parte della particella n. 905 del Comune di Sarno.



#### Stralcio catastale

La zona d'interesse, con riferimento alla Cartografia Ufficiale dello Stato, rientra nell'ambito della tavoletta topografica I.G.M. (III - NE) in scala 1:25.00 nella Tav. n. 185 "Salerno" ad una quota di circa 30 m s.l.m.m.) e non rientra tra:

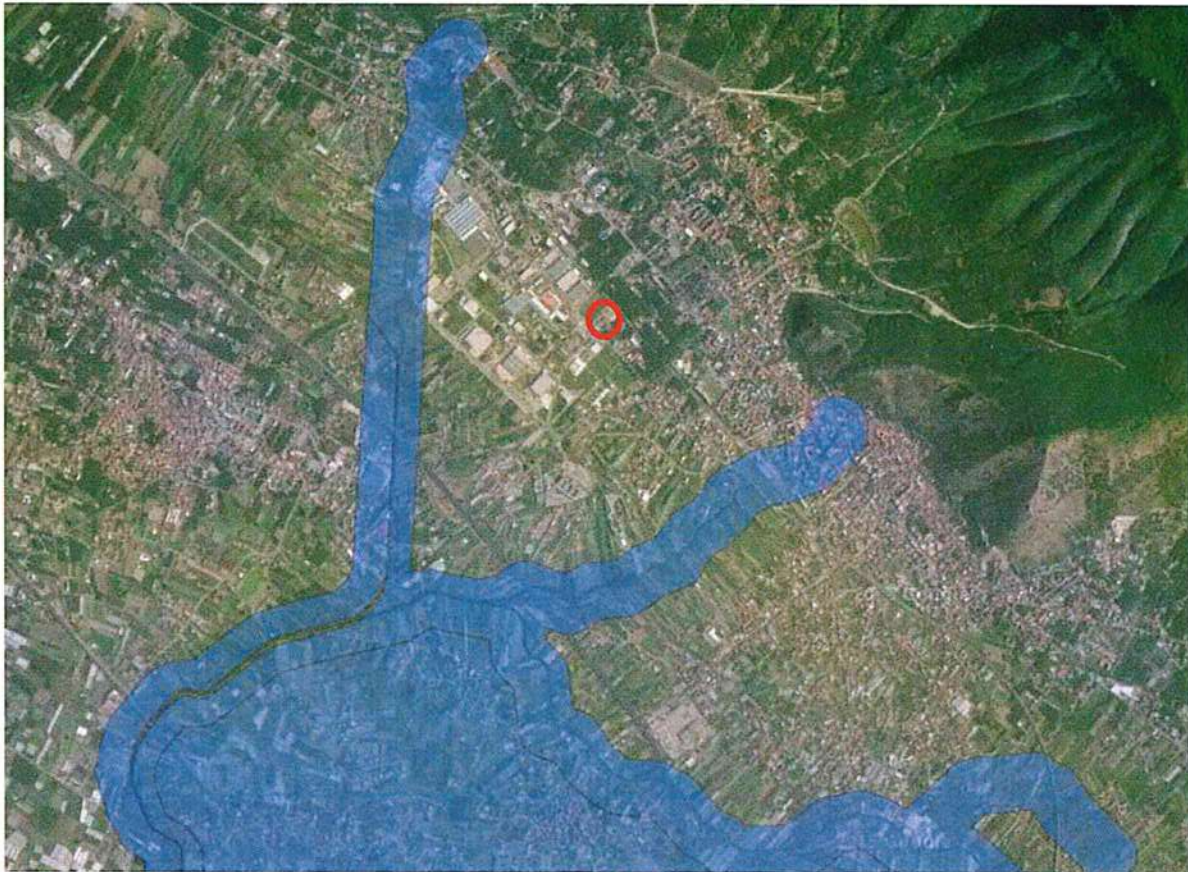
- I siti di interesse comunitario (S.I.C);
- Le zone di protezione speciale (Z.P.S.);
- I parchi e le riserve naturali;
- Le aree soggette a vincoli paesistici;
- Le aree percorse da incendi boschivi.



L'area dell'impianto è classificata secondo il Piano stralcio per l'assetto idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Sarno, ai sensi del punto 12 dell'art. 6 del Decreto 30.10.2001, come:

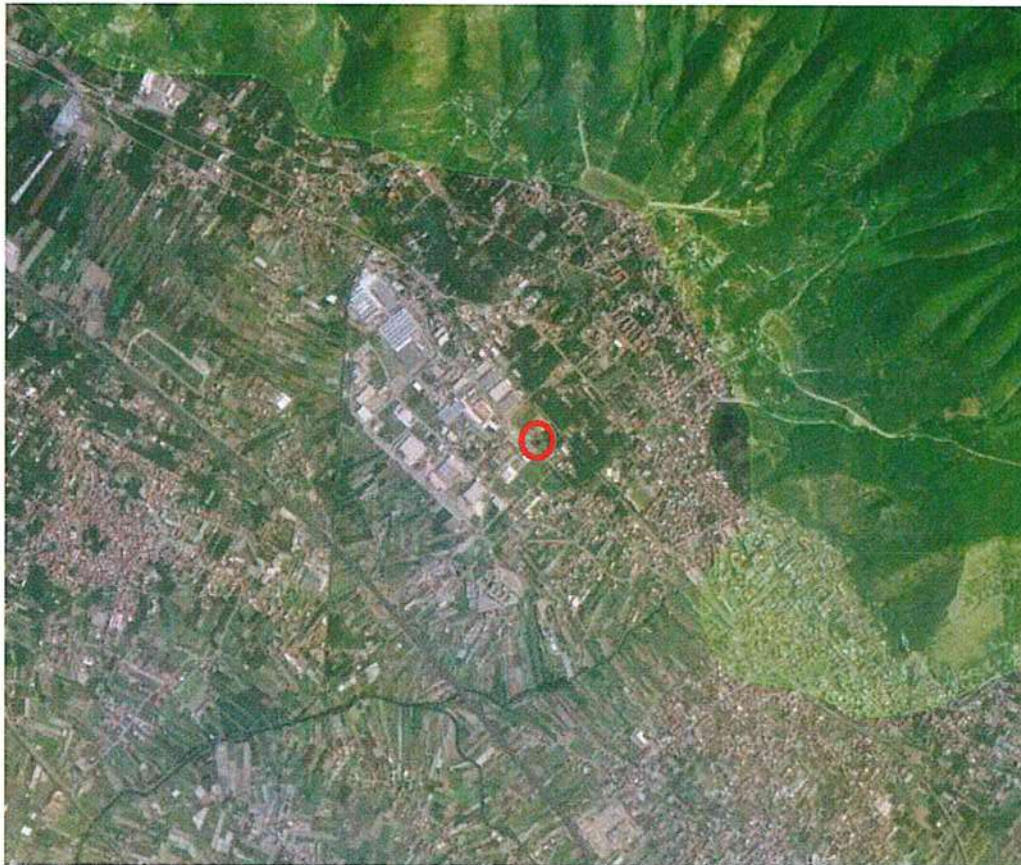
- Carta della pericolosità: Rischio non presente;
- Carta del rischio da frana: Rischio non presente;
- Carta delle aree a rischio: Rischio non presente;
- Carta delle fasce fluviali: Rischio non presente.

Inoltre l'area non è gravata da vincoli ambientali di cui alla Legge Regionale n. 33/93 "Ente Parco del Fiume Sarno".



Art. 142 del D. L.vo n. 42/2004 dal sito SITAP (<http://sitap.beniculturali.it>) - Aree di rispetto coste e corpi idrici.





Art. 142 del D. L.vo n. 42/2004 dal sito SITAP (<http://sitap.beniculturali.it>) - Boschi

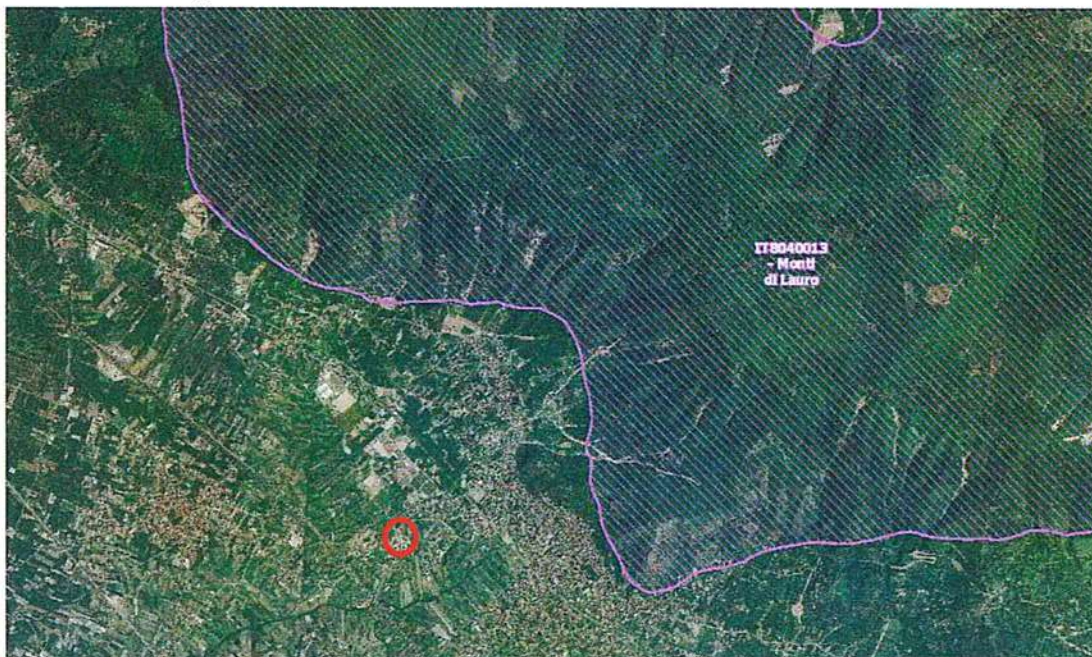


○ Ubicazione impianto



Distanza dalle Aree Naturali Protette (EUAP):

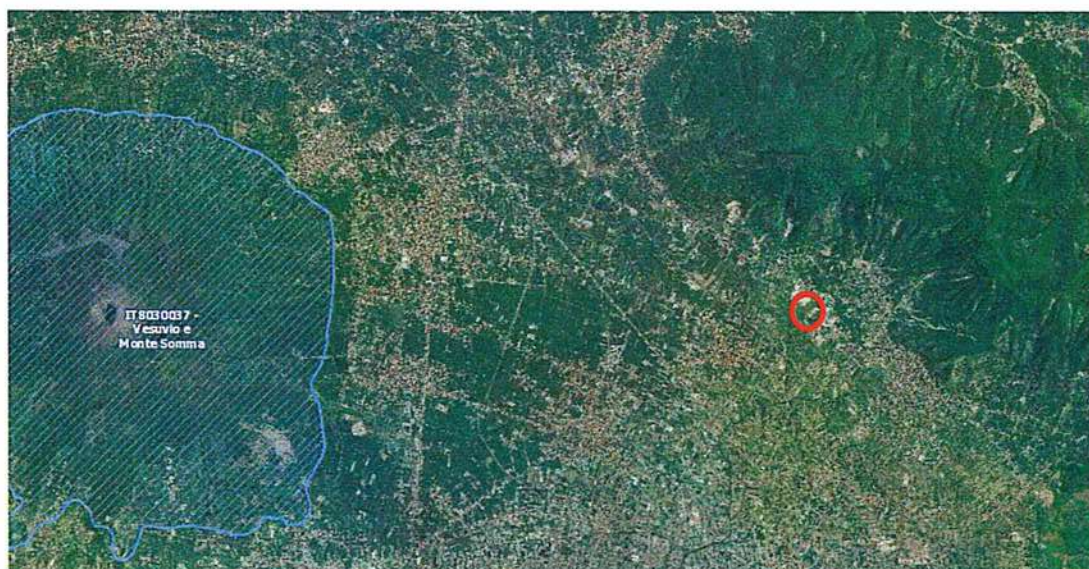
*EUAP 1210 Parco Regionale Bacino Fiume Sarno => 1 Km*



Ubicazione impianto

Distanza dai Siti di Importanza Comunitaria (SIC):

*IT 8040013 Monti di Lauro => 1,8 Km*

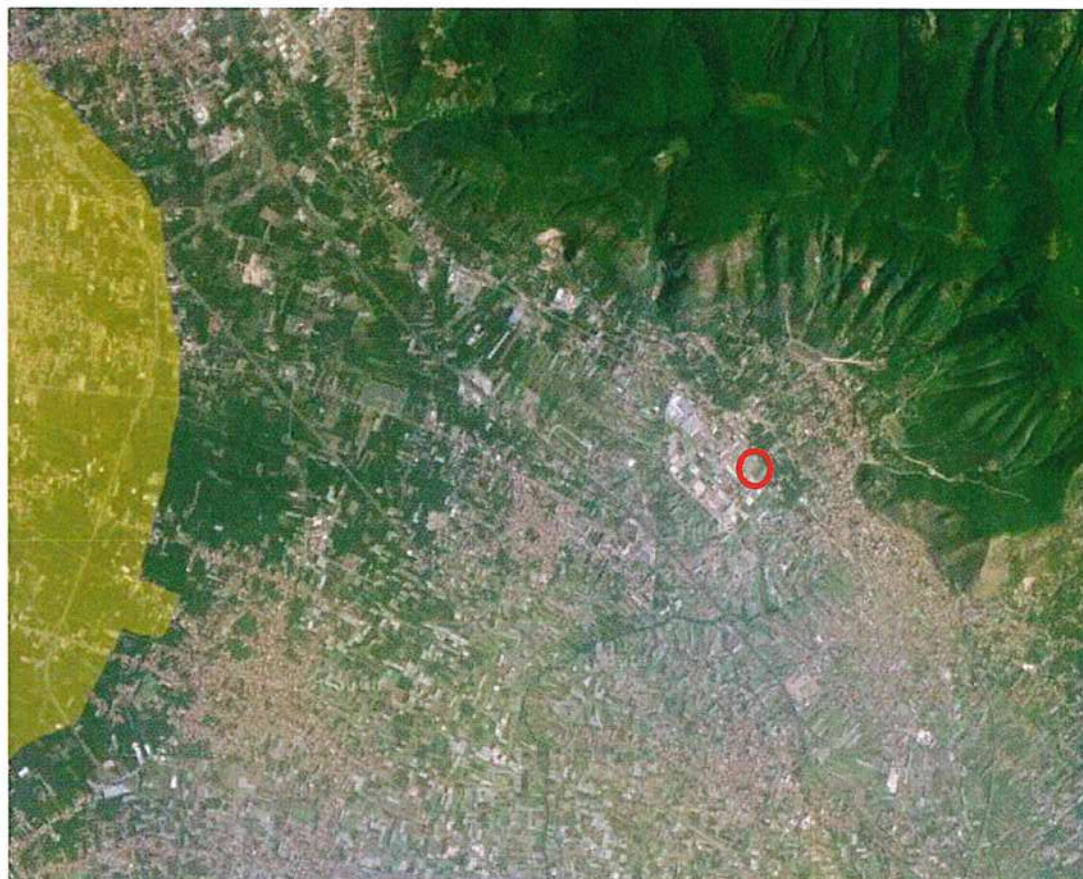


Ubicazione impianto

Distanza dalle Zone di protezione speciale (ZPS):

*IT 8030037 Vesuvio e Monte Somma => 11,0 Km*





Art. 136 del D L.vo n. 42/2004 dal sito SITAP (<http://sitap.beniculturali.it>) - Vincoli

## DESCRIZIONE DEL SITO

Come sopra descritto l'impianto sarà ubicato all'interno di un lotto di 3.000 mq preso in locazione dalla PRT Srl, al cui interno è presente un capannone industriale di 1.000 mq, alcuni manufatti minori per l'alloggiamento di impianti tecnologici ed un ampio piazzale con pavimentazione industriale.

Nel dettaglio l'impianto occuperà parte del piazzale e del capannone per una superficie complessiva di 942,00 mq così distribuita:

- 394 mq del capannone industriale di dimensioni 50x20 m = 1000 mq, del tipo prefabbricato, realizzato con pannelli precompressi con finitura esterna in grigio cemento e copertura con tegoloni prefabbricati con inserimento di superfici illuminanti modulari in policarbonato, impermeabilizzati con guaina esterna in fibrocemento con fibre di carbonio e privo di amianto;
- 548 mq di piazzale provvisto di pavimentazione tipo industriale posta su misto inerte costipato e compattato, realizzato mediante stesura di un massetto in



## DESCRIZIONE DEL PROCESSO

Il processo che la PRT Srl intende condurre consiste nel cracking termico, o pirolisi, della frazione poliolefinica del Combustibile Solido Secondario (CSS) di categoria 3/3/3 o superiore, codice **CER 191210**. Tale processo deriva dall'adattamento di un processo originariamente concepito dalla Get Energy per la conversione pirolitica di granulato di gomma derivante da pneumatici fuori uso in combustibile liquido, attualmente commercializzato con il nome di Pneus Gino<sup>1</sup>.

L'obiettivo del processo è la produzione di un olio combustibile a base d'idrocarburi, principalmente in vista di un suo utilizzo per la produzione di energia in motori stazionari. Oltre l'olio combustibile come sottoprodotti saranno ottenuti un gas, principalmente costituito da idrocarburi, e anch'esso combustibile, un solido, a base carboniosa (denominato coke di pirolisi), che sarà caratterizzato e, se del caso, smaltito come rifiuto.

Sebbene la capacità di trattamento del processo commerciale che s'intende sviluppare sarà di 500-700 kg/h di rifiuti a base di plastica, corrispondenti ad una potenzialità attesa in termini di energia elettrica prodotta di ca. 1 MW<sub>el</sub>, il proponente l'iniziativa ha deciso di sviluppare in una prima fase un impianto pilota di dimensioni ridotte. È infatti, del tutto evidente come in un impianto di dimensioni ridotte (ancorché significative) sarà più agevole condurre la sperimentazione oggetto della presente relazione, e i rischi connessi allo sviluppo del processo (sia in termini di sicurezza per gli operatori, sia di rischi dovuti ad eventuali ancorché improbabili emissioni nocive) saranno di molto ridotti.

---

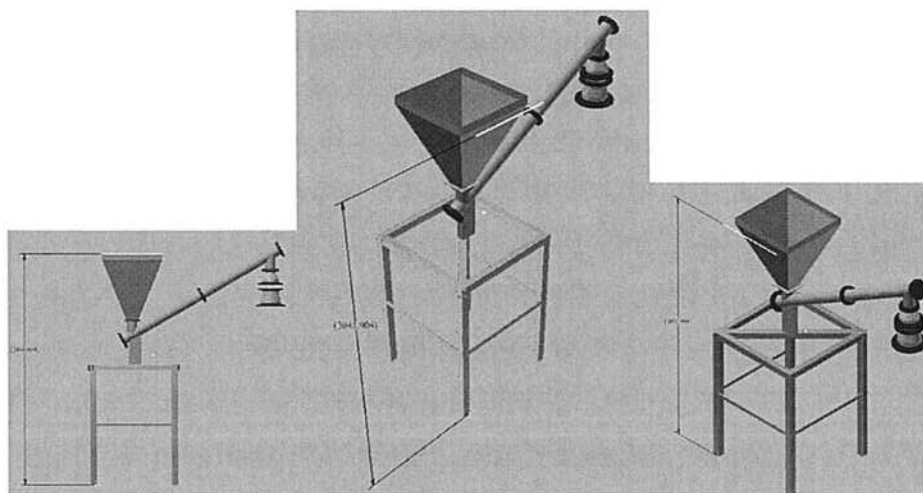
<sup>1</sup>La definizione di *materie plastiche* è, in una forma più o meno approssimata, ormai patrimonio comune. In termini rigorosi la IUAPC (Unione Internazionale di Chimica Pura e Applicata) definisce le plastiche come «*materiali polimerici che possono contenere altre sostanze finalizzate a migliorarne le proprietà o ridurre i costi*» (talí sostanze sono solitamente dette *cariche*, e svolgono varie funzioni, come ad esempio plastificanti, coloranti, antiossidanti, lubrificanti). A sua volta il termine *materiali polimerici*, nel quale *polimero* deriva dal greco, e significa «costituito di molte parti», rimanda al fatto che i costituenti essenziali delle plastiche sono molecole organiche ad altissimo peso molecolare (*macromolecole*), caratterizzate da una struttura con catene di atomi di carbonio, lineari o ramificate, in cui una o più unità elementari si ripetono varie migliaia di volte (e in particolare quando le unità elementari che si ripetono sono più d'una si parla più precisamente di *copolimeri*). Le molecole semplici a partire dalle quali si sintetizzano i polimeri sono dette *monomeri*.

L'impianto pilota che si sta sviluppando avrà una potenzialità di ca. 30 kg/h di rifiuti, corrispondenti a ca. 50 kW<sub>el</sub>. Tale impianto opererà in modalità continua (come peraltro si prevede di fare con l'impianto "industriale" da 1 MW<sub>el</sub>), e il suo cuore sarà un reattore tubolare cilindrico nel quale sarà introdotto il rifiuto finemente triturato. Il sistema di alimentazione del rifiuto al reattore sarà dotato di un sistema di valvole a ghigliottina operanti in mono da limitare l'ingresso di aria "parassita" e quindi da minimizzare il rischio di reazioni di ossidazione/combustione (peraltro il reattore sarà dotato di un sistema di sicurezza che provvederà all'insufflaggio di azoto qualora la concentrazione di ossigeno dovesse superare il 4% su base volumetrica). Il reattore internamente sarà dotato di un sistema elettrico di riscaldamento, la cui potenza - modulabile - consentirà il raggiungimento di temperature fino a 350°-400° C (la temperatura indicata come ottimale dalla Get Energy è 380° C). Sempre all'interno del reattore sarà presente una coclea, che provvederà all'avanzamento del rifiuto da trattare.

Il riscaldamento del materiale trattato provocherà a carico della frazione di plastiche, e in particolare delle poliolefine, una serie di reazioni chimiche che principalmente romperanno le lunghe catene idrocarburiche che costituiscono i polimeri presenti nel rifiuto trattato. La maggior parte del rifiuto sarà quindi convertito in una miscela d'idrocarburi a medio/basso peso molecolare che, alle temperature alle quali avvengono le reazioni di cracking, sarà in fase vapore. Una frazione di minore entità resterà invece in fase solida, andando a costituire lo scarto del processo. La corrente di vapore prodotta nel reattore di *cracking* sarà successivamente raffreddata, così da determinare la condensazione della sua frazione più pesante, che formerà un liquido prevalentemente costituito da idrocarburi aventi temperature di ebollizione (e quindi pesi molecolari) orientativamente comprese tra il taglio della benzina e quello del gasolio pesante. Viceversa, la frazione a minor peso molecolare resterà in fase gassosa anche a valle del raffreddamento, e costituirà quindi un ulteriore prodotto, distinto dal liquido sopra citato, composto in parte da prodotti leggeri derivanti dalle reazioni di cracking, come idrogeno molecolare (H<sub>2</sub>), idrocarburi leggeri (metano, CH<sub>4</sub>, etano, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, propano, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ecc.), e in parte da gas incondensabili derivanti dall'aria che inevitabilmente entra nell'impianto durante la fase di carico (e quindi fondamentalmente da azoto molecolare, N<sub>2</sub>, ossido di carbonio, CO, e anidride carbonica, CO<sub>2</sub>), oltre che, almeno in linea di principio, tracce di composti

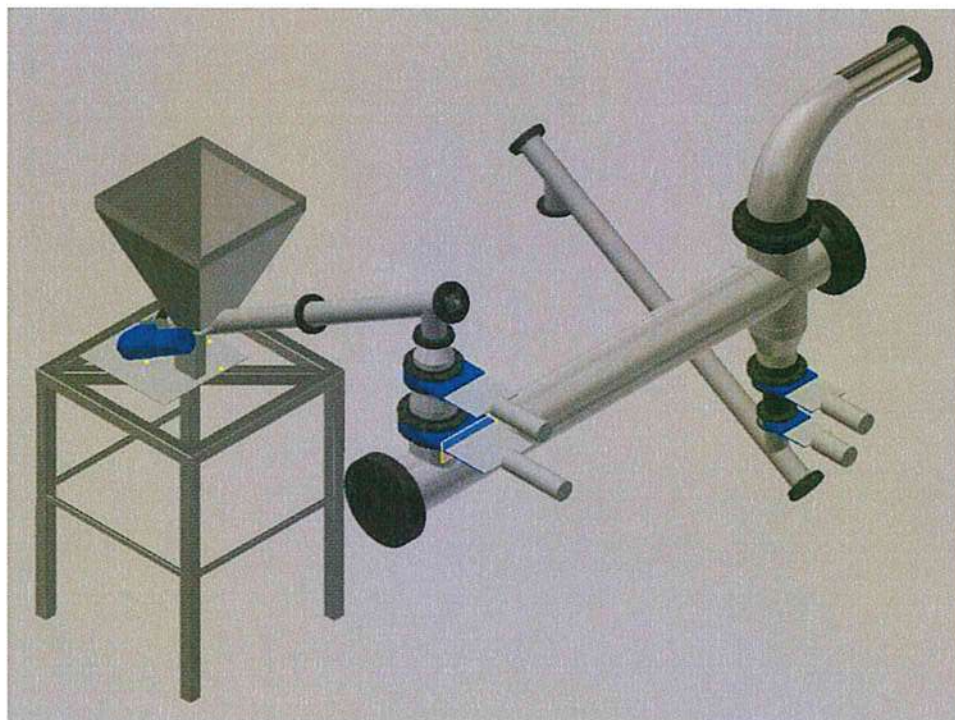
### *Sistema di alimentazione del rifiuto*

Il rifiuto utilizzato, CSS di categoria 3/3/3 o superiore, codice CER 191210, perverrà all'impianto triturato con dimensione massima 3x3 cm; esso tramite tramoggia, sarà avviato al sistema di alimentazione avrà la funzione di convogliare all'interno del reattore il rifiuto, facendo anche in modo di aumentarne la densità e di impedire, o comunque minimizzare, l'ingresso di aria nel reattore, visto che la reazione tra l'ossigeno e i vapori prodotti nel processo potrebbe avere effetti catastrofici. Il sistema di alimentazione sarà in particolare costituito da una tramoggia di carico e da un condotto di alimentazione all'interno del quale sarà una coclea a passo variabile, che trasporterà il CSS caricato nella tramoggia fino all'ingresso del reattore. La protezione del reattore dall'ingresso di aria parassita sarà garantita da un sistema di due valvole a ghigliottina, disposte tra il sistema a coclea e il reattore, in particolare predisposte in modo tale da funzionare in contrapposizione (aperta-chiusa/chiusa-aperta). Una visione schematica di tale sistema è riportata in Fig. 3.5, mentre in Fig. 3.6 è riportata una visione di assieme dell'impianto in cui sono bene evidenziate le valvole a ghigliottina.



*Figura 3.5. Rappresentazione tridimensionale del sistema di alimentazione del rifiuto al reattore di cracking.*





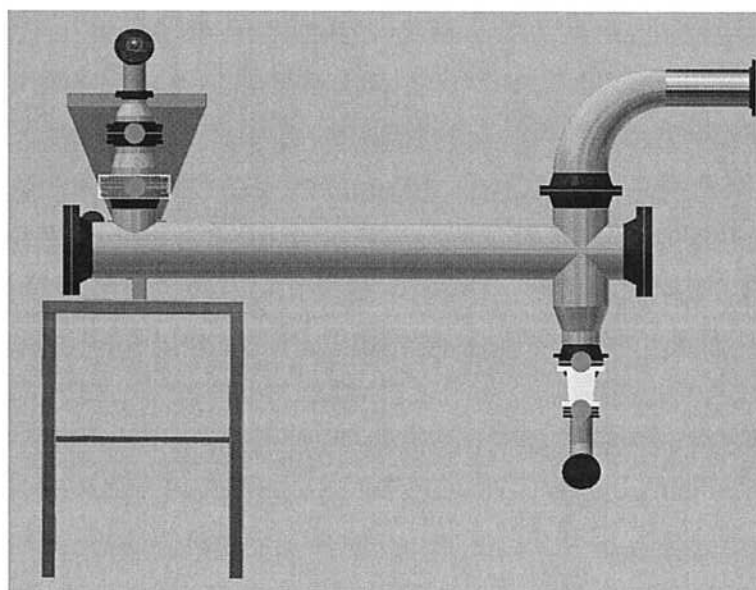
*Figura 3.6. Assonometria del sistema di alimentazione del rifiuto (a sinistra) con il reattore di cracking e il sistema di scarico del vapore e del solido (a destra).*

### **Reattore**

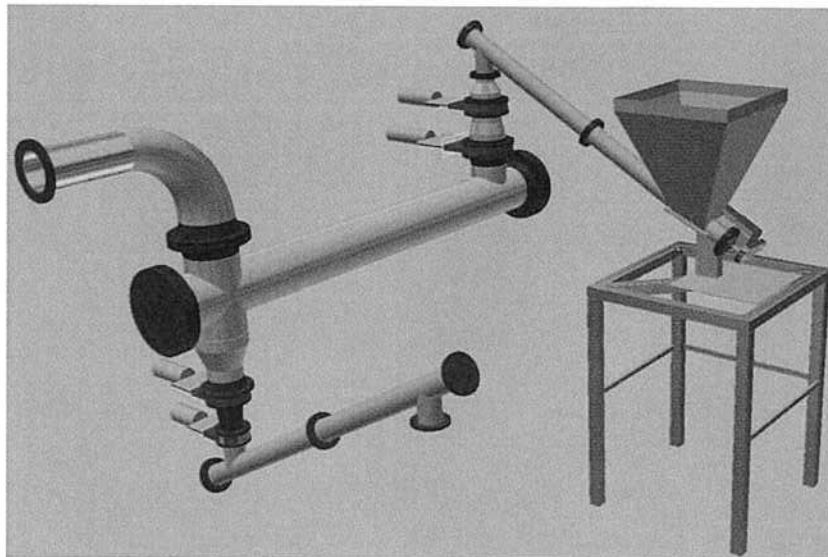
Il reattore sarà costruito in acciaio al carbonio, avrà forma cilindrica, con lunghezza utile di 3.300 mm (lunghezza totale di 4.100 mm) e diametro interno di 410 mm, per un volume utile di ca. 4.50l. Vista la temperatura operativa, il reattore sarà opportunamente coibentato al suo esterno. Esso sarà inoltre disposto in leggera pendenza (inclinazione di 10°-20°) per favorire il flusso delle plastiche in decomposizione. Il reattore sarà montato su una struttura metallica ad un'altezza dal suolo di 1.600 mm, e come d'obbligo sarà dotato di un sistema di messa a terra. Internamente al reattore sarà presente una resistenza elettrica opportunamente corazzata avente potenza di 40 kW (in realtà tale resistenza è stata dimensionata ampiamente per eccesso, essendo una potenza di 10 kW probabilmente sufficiente alle esigenze del reattore). Tale resistenza riuscirà a far raggiungere al materiale trattato la temperatura desiderata (350°-400° C, come indicato in precedenza) in un tempo stimato in ca. 20 min. Un opportuno numero di termocoppie e un sistema di gestione della potenza elettrica consentiranno la misura il controllo della temperatura operativa.

Esternamente alla resistenza (ma ovviamente all'interno del reattore) sarà poi presente una coclea a passo variabile che provvederà all'avanzamento del rifiuto da trattare. Vale la pena di osservare a tal proposito che il rifiuto entrerà nel reattore a temperatura ambiente, e quindi in forma solida; poi a causa del riscaldamento assumerà una consistenza pastosa, e poi per effetto delle reazioni di cracking progressivamente si farà via via più liquido e sarà convertito in vapore, mentre una parte, contenente gli inerti, andrà a formare il sottoprodotto solido (coke di pirolisi). La velocità di avanzamento della coclea di fatto regolerà sia il tempo di permanenza nel reattore del materiale trattato, sia il consumo di rifiuto. Premesso che il tempo di permanenza ottimale andrà determinato nell'ambito della sperimentazione, stime preliminari di Get Energy indicano che tale tempo sarà nell'ordine di 40-50 min.

Internamente al reattore saranno anche presenti delle sonde per la misura della concentrazione di ossigeno libero, nonché un sistema di insufflaggio di azoto che si attiverà in caso di concentrazione di ossigeno superiore al 4% su base volumetrica. Infine, nella zona terminale la tenuta della connessione con il sistema di scarico del coke sarà garantita da guarnizioni spirometalliche. Una vista di assieme del reattore, del sistema di alimentazione dei rifiuti descritto nella sezione precedente e del sistema di scarico del solido descritto nella sezione successiva è riportata nelle Figg. 3.7 e 3.8 seguenti.



*Figura 3.7. Vista laterale del reattore di cracking (al centro), del sistema di alimentazione del rifiuto (a sinistra) e del sistema di scarico del vapore e del solido (a destra).*



*Figura 3.8. Vista assometrica del reattore di cracking (al centro), del sistema di alimentazione del rifiuto (a destra) e del sistema di scarico del vapore e del solido (a sinistra).*

### ***Sistema di scarico del solido***

A valle dell'estremità inferiore del reattore è previsto un sistema di separazione e scarico del vapore a base d'idrocarburi, che sarà poi avviato alla condensazione, e delle scorie solide (principalmente *coke* di pirolisi). L'uscita delle scorie sarà gestita da un'ulteriore coppia di valvole a ghigliottina operanti in modalità contrapposta (aperta-chiusa/chiusa-aperta). A valle di tale sistema le scorie saranno dapprima allontanate dal reattore (e quindi anche raffreddate) in un condotto metallico inclinato verso l'alto e dotato internamente di una coclea in acciaio (cfr. la Fig. 3.5), e quindi scaricate in un "big bag", inserito in una struttura metallica e dotato di un opportuno sistema a tenuta, oltre che di un sistema di controllo in continuo del peso scaricato. Esternamente al "big bag" una cappa aspiratrice provvederà ed evitare la dispersione nell'ambiente di vapori e polveri.



### ***Torre di raffreddamento/condensazione***

I vapori provenienti dal reattore saranno inviati ad una torre di raffreddamento, denominata anche “dissipatore di energia”, costituita da un serbatoio verticale in acciaio al carbonio a doppia parete, avente volume di 1 m<sup>3</sup> (diametro di 800 mm e altezza di 2193 mm). Nell’intercapedine tra le due pareti passerà acqua proveniente da un chiller, la quale determinerà la condensazione della frazione a più elevato peso molecolare del vapore: dal fondo del reattore uscirà quindi l’olio di pirolisi, e dal “cielo” il gas.

La temperatura di esercizio di tale apparecchiatura sarà un elemento critico del processo, in quando da un lato una sua riduzione determinerà la condensazione di una frazione più elevata di vapori, e quindi un aumento della resa in prodotto liquido, ma dall’altro un suo eccessivo abbassamento potrà portare alla solidificazione di alcune delle componenti dell’olio. Secondo quanto indicato dalla Get Energy, il valore orientativo della temperatura di esercizio della torre sarà di 50° C. A valle della torre sono poi previste due unità di filtraggio per la rimozione di particelle solide grossolane (principalmente catrame); tali gruppi, ciascuno costituito da 8 cartucce “usa e getta” da sostituire periodicamente<sup>5</sup>, consentiranno la rimozione delle particelle aventi dimensioni superiori a 4 µm.

### ***Scrubber per il gas e unità di stoccaggio del gas e del liquido***

Il liquido sarà avviato ad un serbatoio cilindrico disposto orizzontalmente avente volume di 1 m<sup>3</sup> (diametro 800 mm e lunghezza 1993 mm), che sarà posizionato con opportuni piedi di sostegno e sarà dotato di una vasca di contenimento. Il gas sarà dapprima inviato prima inviato ad uno scrubber ad acqua per la rimozione di particelle grossolane, tar ecc. (lo scrubber sarà cilindrico e avrà diametro di 800 mm altezza di 2000 mm, per un volume di 1 m<sup>3</sup>, con caratteristiche tecniche conformi alla DGRC n. 243/2015), e quindi a due serbatoi verticali (anche questi cilindrici, con diametro di 800 mm e altezza di 1993 mm, per un volume di 1 m<sup>3</sup> ciascuno).

---

<sup>5</sup> I filtri costituiranno rifiuti pericolosi, ai quali verrà attribuito il codice CER 150202\* (“assorbenti, materiali filtranti (inclusi filtri dell’olio non specificati altrimenti), stracci e indumenti protettivi, contaminati da sostanze pericolose”).

## **Pulpito di comando**

L'intero impianto sarà dotato di un sistema informatico di automazione, che sarà gestito da un pulpito di comando, posto ad opportuna distanza dall'impianto. A tale pulpito perverranno le informazioni provenienti dai vari sensori (di temperatura, di concentrazione di ossigeno, ecc.), e saranno resi disponibili i comandi per una gestione efficiente e sicura del processo. In particolare sarà presente un rilevatore di O<sub>2</sub> interno al reattore che comanderà l'immissione di N<sub>2</sub>, due regolatori di pressione per modificare le pressioni tra dissipatore, condotte e serbatoi, un sistema di registrazione in continuo delle pressioni, e flussostati termici e meccanici per misurare e controllare la produzione di gas e olio.

## **Punti di emissione in atmosfera**

L'impianto pilota sarà dotato di due punti di emissione in atmosfera E<sub>1</sub> ed E<sub>2</sub>, entrambi di modestissima rilevanza, uno derivante dalla caldaia dove sarà bruciato il gas prodotto dal processo e l'altro dalla cappa aspirante posta sopra il "big bag".

Per quanto riguarda il primo punto di emissione, visti i valori riportati da Get Energy (potenzialità dell'impianto pari a 30-40 kg/h e "resa" in gas combustibile nell'ordine del 15% su base ponderale) la produzione di gas combustibile è stimabile in ca. 5 kg/h, e la portata generata dalla sua combustione non raggiungerà i 100 Nm<sup>3</sup>/h. Per avere un'idea del volume delle emissioni associate alla combustione di tale quantità di gas, sarà sufficiente considerare che un'ordinaria caldaia domestica di quelle scelte per soddisfare le esigenze di un'abitazione avente superficie di 100 mq ha una potenza di ca. 25 kWt=21.000 kcal/h, e consuma ca. 1.6 kg/h di metano: **in altri termini, la quantità di gas che sarà bruciata nella caldaia è circa il triplo di quella che viene ordinariamente bruciata in una caldaia domestica** (fermo restando che la natura delle emissioni associate a tale combustione potrà essere stimata solo quando sarà effettivamente nota la composizione di tale gas).

Per quanto riguarda il secondo punto di emissione, anche in questo caso le portate saranno minime, e si prevede di dotare il condotto che dalla cappa porta al camino di un filtro a cartucce "usa e getta" per la rimozione dei composti organici volatili e del particolato eventualmente presenti nelle emissioni con caratteristiche tecniche conformi a quanto previsto dalla DGRC n. 243/2015.

**Per entrambi i camini  $E_1$  ed  $E_2$  saranno rispettate le specifiche tecniche per l'accesso ai punti di prelievo ed il posizionamento e dimensionamento dei fori per i campionamenti previste dalla normativa nazionale e regionale vigente.**

### **Dispositivi di sicurezza**

Secondo quanto indicato dalla Get Energy, l'impianto sarà dotato una torcia di sicurezza «a fiamma nascosta» per la combustione del gas prodotto, la quale sarà attivata in caso di malfunzionamento della caldaia, e inoltre di un impianto antincendio a  $CO_2$ . Un altro presidio di sicurezza già menzionato sopra è costituito da un "pacco" di bombole di azoto il cui contenuto sarà utilizzato per inertizzare l'atmosfera interna al reattore nel caso in cui si dovesse superare il limite di concentrazione del 4% di ossigeno.



## CAPACITÀ, TIPOLOGIA E QUANTITÀ DEI RIFIUTI DA TRATTARE

### *Capacità*

L'impianto di ricerca e sperimentazione, ai sensi dell'art. 211 comma **1** lettera **b)** dovrà avere una potenzialità non superiore a 5 t/g, condizione pienamente soddisfatta tenuto conto che l'impianto pilota proposto ha una potenzialità di circa **30 kg/h** pari a circa 200 Kg/die, considerato che l'attività sarà svolta su un turno giornaliero. In ogni caso anche considerando un'attività del tutto teorica su tre turni (h 24) la capacità sarà di 0,72 t/g, valore nettamente inferiore alle 5 t/g.

### *Quantità massime di rifiuti da utilizzare*

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei quantitativi massimi stoccabili e trattabili in funzione della capacità impiantistica sopra riportata da autorizzare, ai sensi degli artt. 208 e 211 del D. L.vo n. 152/06.

Ai fini precauzionali, per eventuali malfunzionamenti, non perfetta omogeneizzazione del rifiuto in ingresso o altre cause allo stato non individuabili, si è ritenuto fissare il quantitativo massimo da autorizzare in R13 maggiorato di circa il 25% rispetto alla capacità effettiva dell'impianto pilota.

I quantitativi giornalieri sono fissati nella seguente tabella rispettivamente in tonnellate /giorno e tonnellate/sperimentazione (90 giorni):

Codice CER	Descrizione	Peso specifico	Quantità massime				Operazione di recupero
		Kg/mc	t/die	mc/die	t/spe	mc/spe	
[191210]	Rifiuti combustibili (CDR: combustibile derivato da rifiuti)	200	1	0,2	90	18	[R13]
			0,72	0,14	90	13	[R3]

Si evidenzia che il quantitativo calcolato su tutto il periodo di sperimentazione ipotizzato (90 giorni) è del tutto ipotetico, considerato che per la messa a punto dell'impianto tra una prova e l'altra si necessita di alcuni giorni, pertanto il periodo di sperimentazione potrebbe essere prolungato, fermo restando il termine massimo di due anni previsto dall'art.211 del TUA.

La superficie occupata dall'impianto (interna ed esterna) è dotata di pavimentazione industriale finalizzata alla protezione del suolo, del sottosuolo e delle falde idriche da eventuali percolamenti di liquidi (seppur nel caso in specie non vengono utilizzati liquidi nel ciclo lavorativo), tuttavia sarà allestita una postazione di sicurezza di materiale

assorbente adeguato, opportunamente segnalata, al fine di poter raccogliere e gestire correttamente eventuali sversamenti accidentali di liquidi che possano determinare inquinamento del suolo o scivolamenti del personale.

In particolare si utilizzeranno:

- *prodotti granulari in sacco* con capacità di assorbimento fino a 10 volte la loro massa, facili da utilizzare. La loro granulometria fine permette di entrare e di assorbire anche da piccole fessure e irregolarità di livello. Inoltre tali prodotti sono dotati di elevata resistenza antiscivolo anche in caso di raggiungimento del massimo grado di assorbimento del granulato;
- *panni assorbenti*.

### ***FASI OPERATIVE PER LA CONDUZIONE DELL'IMPIANTO E CAMPIONAMENTI PER LE ANALISI DI LABORATORIO***

Il primo aspetto da affrontare nella definizione della campagna sperimentale riguarda la modalità di esecuzione delle prove, e quindi la loro durata temporale. Come indicato sopra, l'impianto pilota ha dimensioni complessivamente modeste, e quindi le fasi di accensione e spegnimento saranno relativamente rapide.

#### ***1) VERIFICHE PRELIMINARI***

La prima fase della sperimentazione riguarderà la verifica della corretta costruzione dell'impianto pilota ed il suo collaudo operativo. Sarà quindi controllato il corretto funzionamento dei vari organi mobili (valvole, motori, clochee, ecc). In seguito saranno condotte alcune prove di tenuta, dapprima "a freddo" e poi "a caldo" per verificare la funzionalità delle valvole e delle guarnizioni. Infine saranno condotte alcune prove "a perdere", nella quali si tratterà CSS (o se ritenuto opportuno, plastica vergine) per verificare che i vari elementi dell'impianto funzionino correttamente.

Non si esclude, all'esito delle prove preliminari, potrà insorgere la necessità di apportare piccole modifiche all'impianto, delle quali si darà prontamente conto agli uffici regionali di Salerno: U.O.D. Autorizzazione Ambientali e Rifiuti.

#### ***2) FASE DI AVVIO***

Avvio dell'impianto freddo, con verifica delle principali unità e del sistema computerizzato di controllo e gestione del processo, e riscaldamento del reattore fino alla temperatura di esercizio di 350°-400°C (**durata prevista: 1 h**).

### **3) MODALITÀ E TIPOLOGIA ESECUZIONE DELLE PROVE**

Per ciascuna prova saranno prelevati, in condizioni di regime campioni dei prodotti liquidi, gassosi e solidi derivanti dal processo, per sottoporli successivamente ad analisi. Per il campionamento del liquido, l'impianto sarà dotato di un rubinetto di prelievo. Per il campionamento del gas sarà installata nel serbatoio di stoccaggio del gas o nel condotto in uscita, apposita valvola di spillamento; infine per il solido (coke pirolisi) si procederà semplicemente ad un prelievo dal *big bag* di raccolta.

Per quanto riguarda il prodotto liquido, la caratterizzazione dovrà innanzitutto riguardare la composizione elementare, mirando ad individuare le eventuale presenza di elemento "problematici" (quali, ad es. cloro, zolfo, azoto, metalli ecc.) che potrebbero creare emissioni indesiderate in fase di combustione. In vista dell'individuazione della modalità economicamente più vantaggiosa di utilizzo dei prodotti di processo, appare comunque opportuno realizzare, almeno per alcuni campioni, una caratterizzazione per quanto possibile completa (potere calorifico, contenuto di acqua e sedimenti, curva di ebollizione, acidità, distinzione tra idrocarburi aromatici e alifatici, ecc.). Tale caratterizzazione sarà affidata o ad un laboratorio di analisi accreditato o a Innovhub - Divisione Combustibili.

Anche per il gas occorrerà valutare, oltre alla composizione elementare, il potere calorifico e la composizione chimica dettagliata, in particolare allo scopo di verificare, l'eventuale presenza di composti chimici indesiderati dal punto di vista delle emissioni in atmosfera a valle della combustione.

Infine, per quanto riguarda il sottoprodotto solido, l'analisi dovrà, almeno in prima istanza, riguardare la sua composizione chimica, al fine di valutare le possibilità di reimpiego ovvero, in caso di necessità di smaltimento come rifiuto, la caratterizzazione con i codici "a specchio" 190111\* ("ceneri pesanti e scorie da incenerimento o pirolisi di rifiuti, contenenti sostanze pericolose") o 190112 ("ceneri pesanti e scorie da incenerimento o pirolisi di rifiuti, diverse da quelle di cui alla voce 190111") (**durata prevista: 2-3 h**).

Il completamento della prova si esaurisce, con arresto dell'alimentazione del rifiuto, svuotamento e pulizia del reattore, arresto dell'alimentazione elettrica alla resistenza interna e esecuzione delle operazioni di pulizia necessarie a riportare l'impianto pilota nelle condizioni ottimali per l'effettuazione di una nuova prova (**durata prevista: 1 h**).

Orientativamente quindi ciascuna prova impegnerà l'impianto per un'intera giornata lavorativa (sebbene non sia da escludere del tutto la possibilità di condurre due prove distinte in una singola giornata), e comporterà il consumo di ca. 150-200 kg di rifiuto. Resta peraltro inteso che non è da escludere che tra una prova ed un'altra siano necessari interventi di manutenzione tali da tenere fuori servizio l'impianto per alcuni giorni.

Lo svolgimento delle operazioni di campionamento saranno eseguite dal Responsabile tecnico dell'impianto pilota assistito da personale specializzato al prelievo dei campioni e personale della società PRT Srl, con l'invito a partecipare al Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio.

#### **4) PROCEDURA DI ARRESTO**

A conclusione della prova, si procederà allo spegnimento dell'impianto seguendo un iter che viene di seguito sintetizzato nei passaggi essenziali. La procedura di arresto ha inizio con la perfetta pulizia dei vari componenti e si concluderà con la fase di ispezione e controllo sullo stato dei materiali e dei componenti interni, che fungerà da base per la definizione di un protocollo di manutenzione delle macchine / attrezzature, e per un loro sviluppo progettuale, ponendo in luce le criticità degli apparati che le costituiscono.

### **EMISSIONI IN ATMOSFERA**

Le emissioni in atmosfera del processo principalmente deriveranno dallo scarico in atmosfera dei prodotti della combustione del gas di pirolisi in una caldaia da realizzare appositamente ( $E_1$ ). Vista la prevedibile composizione del gas, tali emissioni non dovrebbero contenere inquinanti degni di nota oltre concentrazioni trascurabili di ossido di carbonio, ossido di azoto e, possibilmente, acido cloridrico e ossidi di zolfo.

È comunque importante tenere presente che, trattandosi di un processo di combustione in fase gas, anche l'eventuale (e inattesa) presenza di concentrazioni significative di HCl non determinerà un rischio significativo di rilascio in atmosfera di composti pericolosi del cloro (diossine, furani, policlorobifenili, ecc): tali composti infatti sono inerentemente composti di "cattiva combustione", ovvero di combustione condotta a temperature relativamente basse e in presenza di qualitativi insufficienti di



ossigeno, e tali condizioni possono sì, essere talora raggiunte nei processi di combustione di combustibili solidi di cattiva qualità, come i rifiuti solidi, ma certo non possono essere raggiunte durante la combustione di un gas avente le caratteristiche di quello qui in esame, tanto più se la combustione viene condotta in una moderna caldaia dotata di fiamma pilota ecc. Analogamente sono da escludersi processi di formazione *de novo* (a valle, cioè, della camera di combustione) dei composti ora menzionati, visto che tali processi richiedono la presenza nei fumi di particolato solido, ovviamente da escludere nel caso della combustione di un gas “leggero” come quello qui in esame. Altre emissioni di minore importanza, che potranno ipoteticamente contenere concentrazioni non trascurabili di composti organici volatili e di particolato, saranno captate dalla cappa aspirante posta sopra la sezione di scarico del coke (residuo solido) nei “big bag” (E<sub>2</sub>), che tramite idonea canalizzazione saranno recapitare, previo passaggio in un sistema di abbattimento in atmosfera, tramite camino. Il sistema di abbattimento, in conformità alla DGRC n. 243/2015 e successiva DGRC n. 465/2017, sarà del tipo a carboni attivi con rattivazione esterna così caratterizzato:

Temperatura: preferibilmente  $\leq 45^\circ$  per i composti organici volatili;

Tipo di C.A.: di origine sia vegetale che minerale;

Per basse concentrazioni carboni a bassa attività:  $\geq 800 \text{ m}^2/\text{g}$  per concentrazioni di COV  $\leq 600 \text{ mg}/\text{m}^3$ ;

Altezza del letto:  $> 25 \text{ mm}$  (almeno 10 volte superiore al diametro del carbone utilizzato);

Velocità di attraversamento dell'effluente gassoso del C.A.:  $< 0.5 \text{ m/s}$ ;

Tempo di contatto:  $> 0,05 \text{ s}$ ;

$\leq 60\%$  per lo sfruttamento ottimale del letto;

Tasso di carico: 12% per COV;

Sistemi di controllo: flussi di massa di COV  $\geq 100 \text{ Kg/h}$ ;

Sostituzione del carbone esausto secondo quanto previsto dal tasso di carico;

Installazione a monte di un sistema di prefiltrazione;

Rigenerazione del carbone esausto presso soggetti esterni.

Le emissioni gassose saranno soggette a caratterizzazione secondo le norme vigenti in materia di emissioni in atmosfera, in particolare in sede di Conferenza di Servizi per il rilascio delle autorizzazioni ex art. 211 TUA sarà individuato un laboratorio accreditato al quale affidare le operazioni di prelievo ed analisi di tali emissioni.

## **EMISSIONI SONORE**

I principali riferimenti legislativi, predisposti con lo scopo di ridurre lo inquinamento acustico, sono rappresentati dalla legge n. 447 del 26.10.1995 - "Legge quadro sull'inquinamento acustico", che stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dal rumore, ai sensi e per gli effetti dell'art. 117 della Costituzione. La legge individua competenze, funzioni e compiti dello Stato, delle Regioni, delle Province e dei Comuni. Allo Stato competono principalmente le funzioni d'indirizzo, coordinamento o regolamentazione della normativa tecnica e l'emanazione di atti Legislativi su argomenti specifici.

Le Regioni promulgano apposite leggi che definiscono, tra le altre cose, i criteri per la suddivisione in zone del territorio comunale (zonizzazione acustica). Il comune di Sarno è dotato di Piano di zonizzazione acustica, ai sensi dell'art. 6 della legge n° 447/1995. L'area su cui insiste l'impianto di trattamento rifiuti ricade in quelle di cui alla Classe V "Aree prevalentemente industriale" ai sensi del DPCM 14.11.1997.

## **RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE**

La campagna di sperimentazione si concluderà con la predisposizione da parte del Responsabile Tecnico dell'impianto di una relazione sui risultati ottenuti, da trasferire al Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio, che provvederà a redigere una nuova relazione nella quale i risultati della sperimentazione saranno criticamente esaminati, in particolare in vista della realizzazione di un impianto su scala industriale per la pirolisi termica di rifiuti a base di plastiche e la produzione di idrocarburi liquidi.

## **SCARICHI IDRICI**

Le acque nere e grigie provenienti dai servizi igienici confluiranno in una vasca imhoff a perfetta tenuta prefabbricata, periodicamente svuotata da ditta autorizzata.

Le acque meteoriche provenienti dal dilavamento piazzale e dalle coperture, saranno convogliate, in uno a quelle della restante parte del capannone adibita ad altra attività, previo regimentate in un impianto di depurazione e da esso recapitate in condotta comunale ubicata su Via Ingegno, come rappresentato nella TAV. n. 2 "Schema smaltimento acque reflue". Si precisa che il piazzale sarà adibito solo alla sosta (per le attività di carico e scarico), al transito e/o al parcheggio delle maestranze.

## **VIGILI DEL FUOCO**

L'attività di sperimentazione, è stata inclusa nel progetto sottoposto con nota del 07.06.2017 prot 11061, al Comando dei Vigili del Fuoco di Salerno per acquisirne la preventiva valutazione (allegato), per l'attività 44.3.C individuata dal D. L.vo n. 151/2011. Il sistema antincendio, così come approvato dai Vigili del Fuoco con nota del 04.07.2017 (allegato), si compone di una vasca di riserva acqua, gruppo pompaggio ed attacco VV.F. UNI70 ubicati nella restante parte dell'opificio industriale sempre in uso alla PRT Srl, ma per altra attività, mentre risulta in comune la rete di idranti.

## **MEZZI ED IMPIANTI DI ESTINZIONE DEGLI INCENDI**

Le apparecchiature e gli impianti di estinzione saranno realizzati e installati a regola d'arte, conformemente alle vigenti norme di buona tecnica ed a quanto di seguito indicato.

## **ESTINTORI**

L'Attività sarà provvista di un numero adeguato di estintori di tipo approvato dal Ministero dell'Interno, con capacità estinguente non inferiore a 34A 144BC, installati in modo tale da essere raggiunti con un percorso inferiore a 30 m. il numero di detti estintori, in accordo con la tabella 1 del D.M. 10.03.1998, in relazione all'affettivo rischio d'incendio e la specifica area da proteggere.

Gli estintori saranno fissati a muro a 1,50 m dal pavimento in posizione segnalata, facilmente accessibile, in vicinanza di postazione presidiata e prevalentemente in corrispondenza delle uscite di sicurezza. Estintori a CO<sub>2</sub> saranno installati in prossimità di quadri e apparecchiature elettriche. La manutenzione sarà effettuata periodicamente secondo quanto stabilito al punto 5 nella Norma UNI 9994, da personale specializzato, che esegue altresì la revisione periodica secondo quanto previsto nelle corrispondenti schede contenute in appendice della Norma medesima.

## **IDRANTI**

L'attività sarà dotata d'impianto idrico antincendio composto da n° 3 idranti UNI 45 (di portata per ognuno non inferiore a 120 l/min). Gli idranti, conformi alla norma UNI EN 672-2, saranno posti nelle apposite cassette a muro, montate ad un'altezza da terra di circa 1,5 m e protette anteriormente da sportelli a vetro SAFE CRASH.

Considerando un raggio di azione di ogni idrante pari a 20 metri (UNI 45), la distribuzione prevista in progetto consentirà di raggiungere ogni punto dell'attività (rif. 7.5.1 della UNI 10779). La struttura sarà dotata di un impianto idrico antincendio mantenuto in pressione da un'elettropompa di compensazione delle perdite alimentata da una riserva idrica di adeguate capacità; il gruppo di pompaggio sarà costituito da n° 2 pompe ad asse orizzontali uno di riserva all'altro opportunamente dimensionato in base alla richiesta idrica dell'impianto. La riserva idrica è realizzata in vasca interrata in c.a. alimentata da acquedotto pubblico. La tubazione di alimentazione della vasca sarà provvista di due valvole a squadra fornite di galleggiante e complete delle relative valvole d'intercettazione e by-pass manuale, dimensionate in modo tale che il reintegro della vasca non superi le 36 ore. L'alimentazione idrica degli idranti sarà indipendente da quella relativa ai servizi sanitari o di altri impianti e tale da assicurare l'alimentazione agli idranti per un tempo non inferiore a 60 min. Il percorso delle tubazioni sarà parte interrato e parte a vista, sarà tenuto in debita considerazione l'affidabilità richiesta dell'impianto in caso di manutenzione, per cui lo schema distributivo sarà progettato in modo tale che le valvole di intercettazione inserite limiteranno il numero di apparecchi messi simultaneamente in disservizio (rif. 7.1 UNI 10779). La rete sarà realizzata con tubazioni di acciaio di opportuno diametro di tipo Fe350, quelle interrate a norma UNI 6363-84 serie B (PN16), esternamente protette contro la corrosione, senza saldature, quelle fuori terra saranno conformi alla norma UNI 8863 serie leggera, ben ancorate con staffe poste a distanza non inferiore a 3 m e protette dal gelo. La rete idrica antincendio, progettata e realizzata secondo la norma UNI 10779.

## **IMPIANTO RILEVAZIONE ED ALLARME INCENDIO**

Nell'attività tutte le aree saranno protette da impianto fisso di rilevazione e segnalazione automatica degli incendi, progettato, installato, collaudato e gestito secondo le norme di buona tecnica vigenti in grado di rilevare e segnalare a distanza un principio d'incendio. Sarà installato apposito impianto rilevazione incendi con sensori di tipo puntiforme e/o lineare. Esso sarà realizzato in conformità alla C.M.I. n° 24 del 26.01.1993, e quindi conforme alle norme UNI 9795 / 2013.



## **Caratteristiche tecniche**

La segnalazione di allarme proveniente da uno qualsiasi dei rilevatori utilizzati determinerà una segnalazione ottica ed acustica di allarme incendio nella centrale di controllo e segnalazione.

L'impianto consentirà l'azionamento automatico dei dispositivi di allarmi posti nell'attività entro i seguenti tempi:

- a) 2 min dall'emissione della segnalazione allarme proveniente da due o più rilevatori o dall'azionamento di un qualsiasi pulsante manuale di segnalazione incendio;
- b) 5 min dall'emissione di una segnalazione di allarme proveniente da un qualsiasi rilevatore, qualora la segnalazione presso la centrale non sia tacitata dal personale preposto.

Lungo le vie di esodo, saranno installati dei dispositivi manuali di attivazione del sistema di allarme, questi saranno installati sottovetro in contenitore ben segnalato, sarà altresì installato un martelletto per permettere l'agevole rottura del vetro di protezione del pulsante di attivazione manuale del sistema di allarme. L'impianto sarà interconnesso a quello dell'intera attività.

## **ILLUMINAZIONE DI EMERGENZA E DI SICUREZZA**

L'illuminazione di emergenza sarà del tipo ad alimentazione autonoma con autonomia non inferiore a 120 min e tale da garantire lungo le vie di esodo, passaggi, scale, androne un'illuminazione non inferiore a 5 lux continui misurati ad un metro dal pavimento in assenza di illuminazione ordinaria. Le lampade del tipo (Bechelli o similari) alimentati da apposito circuito disinseribile manualmente in caso di manutenzione o prolungata assenza della tensione di rete così come previsto dalla normativa vigente.

## **SEGNALETICA DI SICUREZZA**

La segnaletica di sicurezza affissa alle pareti secondo il D. L.vo 81/2008 smi titolo V, richiamerà l'attenzione sui divieti, limitazioni e prescrizioni, segnalerà il percorso delle vie di esodo. In particolare le vie di esodo saranno tracciate a terra con fasce di rispetto con vernice di colore giallo/arancione. Saranno affissi cartelli monitori, con caratteristiche ben visibili sul divieto di fumare.

All'ingresso saranno installati cartelli monitori atti a segnalare i divieti e le norme comportamentali derivate dalle limitazioni previste dalla normativa vigente. La posizione dei mezzi di estinzione (estintori, idranti e attacco VV.F.) sarà indicato a mezzo di un cartello segnaletico.

## **MISURE ORGANIZZATIVE E PROCEDURALI**

Sono predisposte misure organizzative con i responsabili per il rispetto della pulizia, del controllo delle misure di sicurezza e per l'informazione dei lavoratori. L'addetto alla prevenzione incendio effettua regolare controllo sui luoghi di lavoro al fine dell'accertamento del rispetto delle misure di sicurezza antincendio. Il sistema di vie di uscita è adeguato essendo ogni luogo di lavoro provvisto di via d'uscita alternativa. Tutte le vie di fuga/uscita sono indipendenti l'una dall'altra e distribuite in modo adeguato per l'allontanamento ordinato. Le stesse sono disposte a una distanza minore di 30 m, per un'evacuazione massima di 1 minuto per il raggiungimento del luogo sicuro. Per la natura dell'attività con possibilità d'incendi di materie plastiche sono state predisposte attrezzature tipo estintori e idranti idonei per tali incendi. Gli estintori sono stati predisposti in prossimità delle vie di uscita ben visibili e accessibili onde consentire di raggiungere ogni punto della superficie da proteggere. Tali apparecchiature sono quotidianamente sorvegliate e mantenute in efficienza dal responsabile incaricato. Tutti i percorsi destinati a vie d'uscita sono controllati per assicurare che siano liberi da ostruzioni per un'effettiva disponibilità in caso di esodo.

## **ALTRE MISURE DI SICUREZZA**

In posizione ben visibile saranno posti i seguenti cartelli segnaletici di pericolo e divieto:

- a) Materiale infiammabile;
- b) Divieto di avvicinamento al deposito da parte di estranei;
- c) Divieto di fumare e di usare fiamme libere.

Un apposito cartello fisso con l'indicazione delle norme di comportamento, i recapiti dei Vigili del Fuoco e dell'assistenza tecnica da contattare in caso di emergenza, completeranno la segnaletica.

## **SICUREZZA E SALUTE DEI LAVORATORI**

L'attività comporterà per i lavoratori addetti, rischi infortunistici collegati alla presenza di mezzi in arrivo e partenza, dei mezzi operativi in movimento (muletto, ecc.), dall'utilizzo di attrezzature per la lavorazione e la movimentazione manuale dei carichi.

Al fine di ridurre i rischi e prevenire incidenti o danni per la salute, il personale impiegherà attrezzature e dispositivi di protezione individuale (DPI) quali elmetto, guanti, mascherine, otoprotettori, indumenti di lavoro protettivi, calzature antinfortunistiche, ecc, conformi alle norme sulla sicurezza ed igiene negli ambienti di lavoro, come prescritto dal documento di valutazione del rischio redatto ai sensi del D. L.vo 81/08. Inoltre in caso saranno messe in essere tutte le procedure previste dal Piano di emergenza, di evacuazione e di pronto soccorso redatto in conformità della Legge n. 81/2008 al fine di ridurre le conseguenze di un incidente, in ambito aziendale, mediante il razionale impiego di risorse umane e materiali.

Inoltre saranno messe in essere tutte le misure tecniche e organizzative imposte dalla legge, finalizzate in ogni caso a ridurre le situazioni di rischio e la probabilità del verificarsi di infortuni, in particolare è prevista:

- La sensibilizzazione e la consultazione dei rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza, nonché l'informazione dei lavoratori operanti;
- La fornitura, la dotazione e le modalità d'uso dei mezzi di protezione individuale a disposizione del personale (DPI);
- Il costante mantenimento in piena efficienza dei macchinari e dei mezzi d'opera in uso presso il sito;
- Il rispetto delle norme relative a distanze minime, divieti d'accesso o transito, delimitazioni e segnalazioni;
- Installazione di idonea segnaletica di sicurezza, con l'apposizione di cartelli con segnali di avvertimento, divieto e di pericolo, conformi al D. L.vo n. 81/08 e relativi allegati con successive modifiche ed integrazioni;
- Il mantenimento della zona di trattamento rifiuti in condizioni di generale salubrità e ordine.

## **RIPRISTINO AMBIENTALE**

Il ripristino ambientale dell'area sede dell'impianto sarà attuato in conformità di quanto previsto dall'art. 240, lettera q) della parte IV del D. L.vo 152/06, mediante la esecuzione di interventi atti a recuperare il sito all'effettiva e definitiva fruibilità per la destinazione d'uso prevista dal vigente strumento urbanistico, assicurando la salvaguardia delle matrici ambientali. Al termine dell'attività occorrerà procedere alle seguenti operazioni:

- Asportazione e conferimento ad aziende specializzate di tutti i rifiuti e dei loro contenitori ancora giacenti sull'area;
- Pulizia dei luoghi di lavoro e delle aree adibite a stoccaggio dei materiali;

L'attività avverrà, esclusivamente su superfici pavimentate, per cui non saranno possibili dispersioni d'inquinanti nell'ambiente. Episodi accidentali saranno oggetto d'immediato intervento di contenimento degli inquinanti che non potranno raggiungere le matrici ambientali limitrofe all'impianto.

Per il ripristino ambientale a fine attività non è necessario provvedere ad interventi straordinari poiché gli accorgimenti previsti prescritti dalla normativa garantiscono la tutela del suolo e dell'acqua.

## **IMPATTO AMBIENTALE**

Gli impatti sull'ambiente che l'attività può provocare nei confronti delle varie componenti ambientali, sono da ritenersi non rilevanti, considerato che la sperimentazione avverrà utilizzando rifiuti speciali non pericolosi in quantità esigua e che la struttura edilizia all'interno della quale sarà installato l'impianto è esistente.

L'attenuazione del rumore è assicurata dall'utilizzo per le lavorazioni si svolgeranno all'interno del capannone e quindi in ambiente chiuso, pertanto si deduce che non vi sono sorgenti di rumore che creano disturbi nell'ambiente circostante.

La zona in cui ricade l'impianto, non subirà trasformazioni dal punto di vista infrastrutturale essendo le vie di comunicazioni esistenti più che sufficienti a garantire la funzionalità senza intralciare il traffico ordinario.



## ASSOGGETTABILITÀ a V.I.A.

La capacità produttiva giornaliera dell'impianto di ricerca e sperimentazione non supera la soglia di cui all'Allegato IV alla Parte II del D. L.vo 152/2006 e smi.

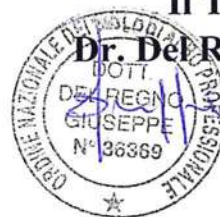
Allegato IV, punto 7.z.b): *Impianti di smaltimento e recupero di rifiuti non pericolosi, con capacità complessiva superiore a 10 t/giorno, mediante operazioni di cui all'allegato C, lettere da R1 a R9, della parte quarta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n° 152.* Ne consegue che il progetto in esame, pur usufruendo della deroga, di cui all'art. 211, comma 1, lettera b, non supererà mai la quantità di 10 t/die, per tale motivo l'impianto non deve essere sottoposto alla procedura di Verifica di Assoggettabilità a VIA.

Inoltre, essendo l'impianto localizzato all'esterno e distante da Siti di Importanza Comunitaria (SIC) e su Zone di Protezione Speciale (ZPS) così come definite dalle Direttive 92/43/CEE "Habitat" e 79/409/CEE "Uccelli", l'intervento progettuale non è assoggettato a valutazione d'incidenza.

**Mercato San Severino, 09.08.2017**

**Il Tecnico**

**Dr. Del Regno Giuseppe**



*del Regno*



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL SANNIO  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA**

**Convenzione di ricerca tra  
PRT – Polyurethan Recycling Technology srl e  
Dipartimento di Ingegneria**

**Relazione scientifica inerente l'avvio dell'attività di  
sperimentazione *ex art. 211 D.Lgs. 152/2006***

**Responsabile scientifico: Prof. Ing. Francesco Pepe**

Agosto 2017

## Indice

<b>0. Premessa</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>2. Descrizione del processo di pirolisi termica di rifiuti speciali non pericolosi di natura plastica</b>	<b>16</b>
2.1. Descrizione di massima del processo	16
2.2. Caratteristiche dei rifiuti alimentabili al processo	19
2.3. Caratteristiche attese per il prodotto liquido	20
2.4. Caratteristiche del prodotto gassoso	20
2.5. Caratteristiche del sottoprodotto solido	21
2.5. Considerazioni riassuntive sul processo	22
<b>3. Descrizione dell'impianto pilota</b>	<b>24</b>
3.1. Sistema di alimentazione del rifiuto	28
3.2. Reattore	29
3.3. Sistema di scarico del solido	32
3.4. Torre di raffreddamento/condensazione	32
3.5. Scrubber per il gas e unità di stoccaggio del gas e del liquido	33
3.6. Pulpito di comando	33
3.7. Punti di emissione in atmosfera	34



3.8. Dispositivi di sicurezza	35
<b>4. Descrizione dell'attività sperimentale prevista</b>	<b>36</b>
4.1. Verifiche preliminari dell'impianto	37
4.2. Modalità di esecuzione delle prove	38
4.3. Individuazione delle condizioni operative ottimali per il processo	39
4.4. Procedura per il campionamento e la caratterizzazione dei prodotti del processo	40
4.5. Valutazione previsionale delle emissioni dal processo (e indicazioni sugli approcci per la misura di tali emissioni)	41
<b>5. Considerazioni sui possibili utilizzi dei prodotti del trattamento</b>	<b>43</b>
5.1. Caratterizzazione e valorizzazione energetica del prodotto liquido	43
5.2. Cessazione della qualifica di rifiuto	45
5.3. Caratterizzazione dell'olio di pirolisi e assimilazione all'olio combustibile commerciale	47
5.4. Valorizzazione energetica del prodotto gassoso	49
5.5. Possibili utilizzi dello sottoprodotto solido	50
<b>6. Conclusioni</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>

## Indice delle tabelle e delle figure

Tabella 2.1. Sintesi delle principali grandezze operative relative all'impianto pilota e all'ipotetico impianto a scala industriale.	23
Figura 3.1. Schema concettuale del processo di pirolisi di plastiche per la produzione di olio combustibile.	25
Figura 3.2. Planimetria del capannone con vista dell'impianto.	26
Figura 3.3. Vista assonometrica d'assieme dell'impianto.	27
Figura 3.4. Vista aerea del capannone occupato dall'impianto.	27
Figura 3.5. Rappresentazione tridimensionale del sistema di alimentazione del rifiuto al reattore di cracking.	28
Figura 3.6. Assonometria del sistema di alimentazione del rifiuto con il reattore di cracking e il sistema di scarico del vapore e del solido.	29
Figura 3.7. Vista laterale del reattore di cracking, del sistema di alimentazione del rifiuto e del sistema di scarico del vapore e del solido.	31
Figura 3.8. Vista assonometrica del reattore di cracking, del sistema di alimentazione del rifiuto e del sistema di scarico del vapore e del solido.	31
Figura 5.1. Tabella tratta dalla Sezione I ("Combustibili liquidi") della Parte II ("Caratteristiche merceologiche dei combustibili e metodi di misura") dell'All. X alla parte V del TUA.	48

## 0. Premessa

La presente relazione scaturisce dalla convenzione di ricerca sottoscritta tra il Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio e PRT – Polyurethan Recycling Technology srl (di seguito, per brevità: PRT) nel mese di luglio 2017, relativa al supporto da fornire per lo sviluppo di un processo di pirolisi termica di rifiuti speciali non pericolosi, volto a trasformare rifiuti di natura plastica in miscele di idrocarburi utilizzabili come combustibili. Tale processo verrà condotto in un impianto pilota che la PRT intende far realizzare a Sarno (SA).

Poiché in tale impianto si prevede di utilizzare (anche se non necessariamente) rifiuti, in particolare a base di materie plastiche, il suo esercizio sarà regolato dalle vigenti norme in materia di gestione dei rifiuti, e in particolare dalla *Parte Quarta* del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152, “Norme in materia ambientale” (spesso citato come “Testo Unico Ambientale”, o semplicemente “TUA”). In considerazione delle previsioni di tale Decreto, e in considerazione del carattere fortemente innovativo del processo che si intende sviluppare, la presente relazione è intesa come parte integrante della domanda di “autorizzazione per impianti di ricerca e sperimentazione” per il trattamento di rifiuti, che la PRT presenterà alla Regione Campania, U.O.D. Autorizzazioni Ambientali e Rifiuti di Salerno, ai sensi dell’art. 211 del TUA. Il testo di tale articolo, così come vigente a luglio 2017, è riportato di seguito:

### ***Art. 211 - Autorizzazione di impianti di ricerca e di sperimentazione***

*[1] I termini di cui agli articoli 208 e 210 sono ridotti alla metà per l'autorizzazione alla realizzazione ed all'esercizio di impianti di ricerca e di sperimentazione qualora siano rispettate le seguenti condizioni:*



a) le attività di gestione degli impianti non comportino utile economico;

b) gli impianti abbiano una potenzialità non superiore a 5 tonnellate al giorno, salvo deroghe giustificate dall'esigenza di effettuare prove di impianti caratterizzati da innovazioni, che devono però essere limitate alla durata di tali prove.

[2] La durata dell'autorizzazione di cui al comma 1 è di due anni, salvo proroga che può essere concessa previa verifica annuale dei risultati raggiunti e non può comunque superare altri due anni.

[3] Qualora il progetto o la realizzazione dell'impianto non siano stati approvati e autorizzati entro il termine di cui al comma 1, l'interessato può presentare istanza al Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, che si esprime nei successivi 60 giorni di concerto con i Ministri delle attività produttive e dell'istruzione, dell'università e della ricerca. La garanzia finanziaria in tal caso è prestata a favore dello Stato.

[4] In caso di rischio di agenti patogeni o di sostanze sconosciute e pericolose dal punto di vista sanitario, l'autorizzazione di cui al comma 1 è rilasciata dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, che si esprime nei successivi 60 giorni, di concerto con i Ministri delle attività produttive, della salute e dell'istruzione, dell'università e della ricerca.

[5] L'autorizzazione di cui al presente articolo deve essere comunicata, a cura dell'amministrazione che la rilascia, all'ISPRA che cura l'inserimento in un elenco nazionale, accessibile al pubblico, degli elementi identificativi di cui all'art. 208, c. 16, senza nuovi o maggiori oneri per la finanza pubblica.

[5-bis] La comunicazione dei dati di cui al c. 5 deve avvenire senza nuovi e maggiori oneri a carico della finanza pubblica tra i sistemi informativi regionali esistenti, e il Catasto telematico secondo standard condivisi.

La relazione in particolare avrà l'obiettivo di:

- inquadrare da un punto di vista scientifico il processo proposto, anche con riferimento allo stato dell'arte e alla più recente letteratura scientifica in materia;
- descrivere e presentare le principali caratteristiche del processo e dell'impianto pilota, anche con riferimento agli impatti ambientali previsti, nonché –per quanto possibile- le caratteristiche dei prodotti e sottoprodotti che si prevede di ottenere;

- presentare un programma della sperimentazione che si intende condurre nell'impianto pilota da realizzare nel sito di Sarno, evidenziando le questioni che si intendono affrontare per mezzo dell'attività sperimentale;
- esaminare alcuni possibili utilizzi dei prodotti liquidi e gassosi derivanti dall'esercizio dell'impianto, alla luce della legislazione vigente in materia di recupero di rifiuti e di combustibili (cfr. in particolare gli artt. 184-ter, "Cessazione della qualifica di rifiuto", e 293, "Combustibili consentiti" del TUA).

Si segnala, da ultimo, che –secondo quanto convenuto nella citata convenzione tra Dipartimento di Ingegneria e PRT- i risultati della sperimentazione che si intende condurre nell'ambito delle previsioni dell'art. 211 saranno trasferiti, a cura del Responsabile Tecnico della PRT, al Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio, che provvederà a redigere una relazione conclusiva.

Tali risultati poi, qualora ritenuti positivi dalla committenza, saranno funzionali alla proposizione di una domanda per l'esercizio ordinario di un impianto a scala industriale. L'impianto sarà sviluppato sulla base dell'impianto pilota descritto nella presente relazione, e il suo esercizio sarà regolamentato dalla normativa vigente (art. 208, "Autorizzazione unica per i nuovi impianti di smaltimento e di recupero dei rifiuti", o titolo III-*bis*, "L'Autorizzazione Integrata Ambientale", del TUA).

## 1. Introduzione

La gestione dei rifiuti, e in particolare dei rifiuti urbani (RU), rappresenta un problema assai complesso, a causa da un lato dell'ammontare continuamente crescente della quantità di tali rifiuti, e dall'altro delle sempre più forti restrizioni, sia di carattere normativo che, più in generale, di carattere sociale che gravano su tale attività. Nell'ambito dei RU, una quantità significativa è rappresentata dai rifiuti costituiti da materie plastiche<sup>1</sup>. Secondo l'ultima edizione del *Rapporto Rifiuti Urbani* (ISPRA, 2016), nel 2014 in Europa sono state prodotte ca. 240 milioni di tonnellate di RU, poco più del 10% delle quali, 25.8 milioni di tonnellate, costituite da plastiche, in massima parte provenienti da imballaggi (PlasticEurope, 2015). Tale percentuale è in linea con quelle fornite da analisi globali: secondo la World Bank (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012) infatti le plastiche rappresentano tra l'8% e il 12% dei rifiuti urbani. In Italia nel 2015 la produzione di RU è stata di ca. 30 milioni di tonnellate, corrispondenti a ca. 3 milioni di tonnellate di plastiche. Se si considera la Campania, la produzione di RU nel 2015 è stata di oltre 2.5 milioni di tonnellate per cui, ipotizzando ancora un peso delle materie plastiche approssimativamente pari al 10% del totale, la produzione di

---

<sup>1</sup> La definizione di *materie plastiche* è, in una forma più o meno approssimata, ormai patrimonio comune. In termini rigorosi la IUPAC (Unione Internazionale di Chimica Pura e Applicata) definisce le plastiche come «*materiali polimerici che possono contenere altre sostanze finalizzate a migliorarne le proprietà o ridurre i costi*» (tali sostanze sono solitamente dette *cariche*, e svolgono varie funzioni, come ad esempio plastificanti, coloranti, antiossidanti, lubrificanti). A sua volta il termine *materiali polimerici*, nel quale *polimero* deriva dal greco *πολυμερος*, e significa «costituito di molte parti», rimanda al fatto che i costituenti essenziali delle plastiche sono molecole organiche ad altissimo peso molecolare (*macromolecole*), caratterizzate da una struttura con catene di atomi di carbonio, lineari o ramificate, in cui una o più unità elementari si ripetono varie migliaia di volte (e in particolare quando le unità elementari che si ripetono sono più d'una si parla più precisamente di *copolimeri*). Le molecole semplici a partire dalle quali si sintetizzano i polimeri sono dette *monomeri*.

plastiche da RU è risultata pari a ca. 250 000 tonnellate. Peraltro, non va trascurato il fatto che quantità ingenti di rifiuti a base di materie plastiche si generano anche da varie filiere produttive, vuoi come scarti della produzione di manufatti in plastica, vuoi dallo smaltimento degli imballaggi usati.

In generale le plastiche sono prodotte sottoponendo a reazioni di polimerizzazione idrocarburi<sup>2</sup>, vale a dire composti del carbonio e dell'idrogeno, nella stragrande maggioranza dei casi derivati dal petrolio<sup>3</sup>. Le principali tipologie di materie plastiche presenti nei RU sono il polietilene<sup>4</sup>, altre poliolefine<sup>5</sup> tra cui in particolare il

---

<sup>2</sup> In generale un idrocarburo è una molecola costituita esclusivamente da atomi di carbonio (C) e idrogeno (H), aventi quindi formula generale  $C_nH_m$ . Poiché gli atomi di carbonio hanno un'estrema flessibilità per quanto riguarda i legami chimici (possono cioè legarsi in modo estremamente variegato ad altri atomi, in particolare di carbonio), di idrocarburi esiste una varietà praticamente infinita, non solo per quanto riguarda la dimensione delle molecole (in altri termini  $n$  e  $m$  possono variare entro intervalli molto ampi, sempre con  $m \geq n$ ), ma anche per quanto riguarda la loro natura chimica. Nel seguito si darà qualche cenno alle principali classi di idrocarburi.

<sup>3</sup> Come noto, il petrolio, detto anche petrolio greggio, è una miscela estremamente complessa di milioni di composti avente origine biologica, reperita in giacimenti sotterranei. Si ritiene che il petrolio derivi da processi di degradazione anaerobica a carico di microrganismi di varia natura, avviatisi diversi milioni di anni fa e, a causa delle caratteristiche delle sostanze biologiche di partenza, gli elementi di gran lunga prevalenti nel petrolio sono carbonio (C) e idrogeno (H), con piccole quantità di zolfo (S), ossigeno (O), azoto (N), cloro (Cl) ecc.. Tali elementi sono organizzati in molecole aventi dimensioni estremamente variegata (da pochi atomi a svariate centinaia di atomi), tra le quali prevalgono nettamente gli *idrocarburi*. Il petrolio greggio (al quale oggi si affiancano "greggi sintetici" derivanti da scisti bituminosi, carbone ecc.) è privo di utilizzi commerciali diretti, se si eccettua l'alimentazione alle *raffinerie*. Queste sono impianti industriali nei quali la miscela di partenza viene trattata (*raffinata*) per ottenere prodotti utili, tra i quali principalmente miscele di idrocarburi utilizzati come combustibili (*gas di petrolio liquefatto, benzine, gasoli* ecc.) o lubrificanti, ma anche idrocarburi puri e sostanze derivate dagli idrocarburi tra cui, appunto, i processi di polimerizzazione per la produzione di plastiche.

<sup>4</sup> Il *polietilene* è un polimero ottenuto dalla polimerizzazione dell'etilene, idrocarburo avente formula  $CH_2=CH_2$ . La formula chimica del polietilene è  $(-CH_2CH_2-)_n$ , con  $n$  compreso tra qualche migliaio e le centinaia di migliaia, e la sua struttura è quella di lunghissime catene di atomi di carbonio, più o meno ramificate, in cui ciascun atomo di carbonio è legato a due atomi di carbonio (membri della catena) e a due atomi di idrogeno. Il polietilene è tra i polimeri più diffusi in commercio, ed è il principale membro della classe delle poliolefine (cfr. la nota seguente). In commercio esistono numerose tipologie di polietilene, che si differenziano l'una dalle altre per il peso molecolare (vale a dire, la lunghezza delle catene) e il grado di ramificazione delle catene. Un'importante distinzione è quella tra polietilene "ad alta densità" (*HDPE, High Density Polyethylene*) e polietilene "a bassa densità" (*LDPE, Low Density Polyethylene*).

<sup>5</sup> Le *poliolefine* sono polimeri derivanti alla polimerizzazione o copolimerizzazione di *olefine*, ovvero idrocarburi caratterizzati da un numero ridotto di atomi di carbonio e dalla presenza di un legame doppio tra due degli atomi di carbonio che costituiscono la molecola. Le principali poliolefine, oltre il già citato polietilene, sono il *polipropilene*, polimero derivante dalla polimerizzazione del *propilene* ( $CH_2=CHCH_3$ ), il *polimetilpentene*, derivante dal *metilepentene* [ $CH_3=C(CH_3)CH_2CH_2CH_3$ ], il



polipropilene, il polivinilcloruro (PVC)<sup>6</sup>, il polistirolo (anche noto come polistirene)<sup>7</sup>, e il polietilentereftalato (PET)<sup>8</sup>.

I principi generali ai quali informare la gestione dei rifiuti nell'Unione Europea sono sanciti dalla Dir. 2008/98/CE, che all'art. 4 ha individuato la cosiddetta "gerarchia europea dei rifiuti", successivamente recepita nel Testo Unico Ambientale tramite il D.Lgs. 125/2010. Tale gerarchia tra le tecniche di gestione privilegia innanzitutto la preparazione per il riutilizzo, successivamente il riciclaggio, quindi il recupero diverso dal riciclaggio, p.es. sotto forma di energia, e infine lo smaltimento, p.es. in discarica. Applicando i principi della "gerarchia" ai rifiuti a base di materie plastiche, si rileva innanzitutto come la preparazione per il riutilizzo sia una strategia raramente perseguibile, in quanto tali rifiuti, per lo più costituiti da imballaggi usati, sono caratterizzati da un valore commerciale relativamente basso, e tale da non giustificare il costo connesso alle operazioni di smontaggio, pulizia ecc. in cui si sostanzia tale operazione<sup>9</sup>. Per quanto riguarda le altre tecniche di trattamento, all'estremo opposto della gerarchia lo smaltimento in discarica appare sicuramente la tecnica di gestione maggiormente impattante sull'ambiente, e quindi da evitare laddove possibile.

---

*polibutene-1*, che deriva dall'*1-butene* ( $\text{CH}_2=\text{CHCH}_2\text{CH}_3$ ), il *poliisobutilene*, copolimero di *isobutilene*,  $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)$ , ed *isoprene*,  $\text{CH}_2=\text{CHC}(\text{CH}_3)=\text{CH}_2$ , la *gomma etilene-propilene*, copolimero di etilene e propilene e il polivinilcloruro, o PVC, descritto nella nota seguente.

<sup>6</sup> Il *polivinilcloruro*, o *PVC*, è il polimero del *cloruro di vinile* ( $\text{CHCl}=\text{CH}_2$ ). La formula chimica del PVC è  $(-\text{CHClCH}_2-)_n$ , e la molecola di PVC è in un certo senso simile al polietilene, perché il cloruro di vinile può essere considerato un derivato dell'etilene in cui uno degli atomi di idrogeno sia stato sostituito da un atomo di cloro; ciò detto, le proprietà del PVC sono però parecchio differenti da quelle del polietilene.

<sup>7</sup> Il *polistirene*, o *polistirolo*, è un polimero dello *stirene*, idrocarburo appartenente alla famiglia degli idrocarburi *aromatici* e avente formula  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2$ .

<sup>8</sup> Il *polietilentereftalato*, o *PET*, è un polimero del *bis-2-idrossietiltereftalato*. Il PET non è una poliolefina, e appartiene invece alla classe dei *poliesteri*, polimeri molto utilizzati in campo tessile. I poliesteri sono ottenuti, a differenza dei polimeri menzionati finora, per *policondensazione* invece che per addizione: la loro sintesi non procede quindi aggiungendo molecole alle catene inizialmente formatesi, ma per *condensazione*, vale a dire con una reazione chimica che ad ogni aggiunta di una molecola di monomero al polimero in formazione fa corrispondere l'allontanamento di una molecola di basso peso molecolare.

<sup>9</sup> In realtà esistono alcune eccezioni a tale affermazione, nel senso che alcuni rifiuti a base di plastica sono dotati di un valore commerciale tale da giustificarne la preparazione per il riutilizzo: un esempio tipico in questo senso è rappresentato dai paraurti e dai cruscotti delle autovetture avviate alla demolizione, i quali, se in buono stato, sono comunemente riutilizzati nel mercato dell'usato.

Analisi generali dello stato dell'arte sul recupero dei rifiuti a base di plastiche sono state recentemente presentate da Al-Salem *et al.* (2015) e da Singh *et al.* (2017). Come evidenziato dagli autori, i quattro approcci al recupero dei rifiuti a base di plastica possono essere classificati come recupero *primario*, ovvero la re-estrazione<sup>10</sup> della plastica a valle del processo di produzione, recupero *secondario*, ovvero il recupero della plastica mediante trattamenti meccanici con successiva estrusione e produzione di nuovi manufatti, recupero *terziario*, ovvero recupero della plastica mediante reazioni chimiche, e recupero *quaternario* ovvero recupero della plastica sotto forma di energia.

Tra gli approcci ora elencati il recupero primario è di fatto utilizzabile solo nel contesto di un impianto che produca manufatti costituiti da materie plastiche, all'interno del quale i prodotti fuori specifica, gli scarti di produzione ecc. sono disponibili in condizioni di purezza tali da poterli reimmettere nel ciclo produttivo senza particolari pretrattamenti. Condizioni simili di purezza possono essere riscontrate in alcuni casi anche con rifiuti speciali prodotti in particolari processi produttivi; viceversa, i rifiuti a base di plastica presenti nei rifiuti urbani non sono mai tanto puri da poter essere reimmessi nei cicli produttivi direttamente e senza pretrattamenti.

Il recupero secondario, che in concreto consiste nel riciclaggio delle plastiche contenute in determinate correnti di rifiuto, è largamente utilizzato per specifiche frazioni di materiali presenti nei rifiuti urbani, oltre che, in taluni casi, anche per le plastiche miste. In linea di massima esso viene realizzato recuperando le frazioni di interesse mediante tecniche di differenziazione della raccolta e successiva separazione (meccanica, ottica, densimetrica ecc.), e avviando le frazioni recuperate in tal modo a trattamenti meccanici di lavaggio, riduzione volumetrica e rilavorazione. Un esempio tipico in tal senso è costituito dal riciclaggio del PET, che viene realizzato separando

---

<sup>10</sup> L'estrazione è il processo più utilizzato per la produzione di manufatti in plastica (e peraltro è anche molto utilizzato nella produzione di manufatti metallici). In tale processo i granuli (*pellet*) di plastica vergine o derivante da recupero vengono riscaldati, portati allo stato pastoso e quindi forzati a passare attraverso una *testa di estrusione* costituita da una piastra metallica dotata di fori sagomati in modo da generare le forme dei manufatti che, dopo il raffreddamento, si desidera ottenere. L'apparecchiatura utilizzata per il processo di riscaldamento, fusione ed estrusione è detta *estrusore*, e solitamente ha una forma cilindrica allungata, con all'interno una vite senza fine o un pistone.

tale materiale dal flusso di plastiche provenienti dalla raccolta differenziata (ovvero ricorrendo a sistemi di raccolta specifici, ad esempio localizzati presso supermercati e altri punti vendita), e reimmettendolo –previa pulizia- nei cicli produttivi tradizionali. Sebbene in generale una qualità soddisfacente nei prodotti recuperati possa essere ottenuta solo avviando alla re-estrusione plastiche di buona purezza, numerose applicazioni sono anche condotte sulle plastiche “miste” provenienti dalla raccolta differenziata di rifiuti urbani, solitamente costituite da miscele di poliolefine, ma contenenti significative frazioni di impurezze. I prodotti ottenuti in questo caso possono essere utilizzati per la produzione di manufatti in plastica a basso valore aggiunto (p.es. arredi per parchi e giardini), o per la produzione di “sabbie sintetiche”, proposte come sostituti del polistirolo nella produzione di massetti e solai alleggeriti e con buone proprietà termoisolanti.

Come evidenziato da Scott (2000) questo tipo di approccio, seppur applicato più volte già a partire dagli anni '70 dello scorso secolo, spesso porta a risultati insoddisfacenti, in particolare quando si ha a che fare con miscele di plastiche o, peggio ancora, con rifiuti nei quali le plastiche sono mescolate ad altre sostanze di natura differente (come è ovviamente il caso dei rifiuti urbani, anche se provenienti da raccolte differenziate): oltre al già citato peggioramento delle caratteristiche di resistenza meccanica, i manufatti prodotti con plastiche “rigenerate” mostrano una notevole diminuzione della vita utile rispetto agli analoghi manufatti prodotti a partire da polimeri “vergini”.

Il recupero terziario, nel quale si iscrive il processo analizzato nella presente relazione, consiste nel sottoporre le plastiche presenti nei rifiuti ad opportune reazioni chimiche volte ad ottenere prodotti utili. Poiché la quasi totalità delle plastiche è costituita, come evidenziato *supra*, da polimeri di idrocarburi o sostanze simili agli idrocarburi, il riciclaggio chimico consiste nella *depolimerizzazione* delle plastiche

mediante processi di *cracking*<sup>11</sup> o *pirolisi* delle molecole che le costituiscono volti ad ottenere o i monomeri di partenza da cui erano state sintetizzate le plastiche o –più spesso– miscele complesse di idrocarburi di vario peso molecolare, utilizzabili come combustibili o come additivi per combustibili.

Infine, il recupero quaternario consiste nel recupero diretto di energia dai rifiuti a base di plastica, e sfrutta il fatto che i poteri calorifici delle plastiche hanno valori prossimi a quelli dell’olio combustibile. La combustione delle plastiche di rifiuto può essere condotta o utilizzando impianti di incenerimento/termovalorizzazione ai quali vengono tipicamente alimentate le plastiche contenute nella corrente di rifiuto urbano indifferenziato, o sottoposto a trattamenti relativamente blandi di purificazione, ovvero utilizzando rifiuti a base di plastica per produrre, mediante opportuni trattamenti di riduzione volumetrica, purificazione ecc., *Combustibile Solido Secondario*, o CSS (secondo la definizione data dalla lett. cc) del c. 1 dell’art. 183 del TUA e il riferimento in essa contenuto alla norma UNI CEN/TS 15359<sup>12</sup>), tipicamente utilizzato come combustibile alternativo in forni per la produzione di clinker di cemento o in centrali termoelettriche. Va peraltro notato che la presenza, anche in concentrazioni relativamente piccole, di plastiche clorurate (in pratica: PVC) nei rifiuti avviati ad incenerimento comporta un aumento significativo del rischio di al rilascio in atmosfera di inquinanti altamente tossici quali dibenzo–para–diossine policlorurate (PCDD), dibenzo–furani policlorurati (PCDF) ecc., e quindi un aspetto importante della produzione del CSS è l’allontanamento del PVC. Ancora, una interessante alternativa

---

<sup>11</sup> Il termine *cracking*, che deriva dal verbo inglese che significa «rompere, spaccare» consiste nella rottura delle molecole, in questo caso polimeriche, allo scopo di ottenere molecole a più basso peso molecolare. Il *cracking* è molto utilizzato nelle raffinerie per ottenere idrocarburi a basso peso molecolare, in particolare utilizzabili nella formulazione delle benzine e dei gasoli leggeri (prodotti a più alto valore commerciale) partendo da idrocarburi ad alto peso molecolare, utilizzabili solo per produrre oli combustibili (prodotti a più basso valore commerciale).

<sup>12</sup> La lett. cc) del c. 1 dell’art. 183 del D.Lgs. 152/2006 testualmente definisce il Combustibile Solido Secondario (CSS) come «il combustibile solido prodotto da rifiuti che rispetta le caratteristiche di classificazione e di specificazione individuate dalle norme tecniche UNI CEN/TS 15359 e successive modifiche ed integrazioni; fatta salva l’applicazione dell’articolo 184-ter, il combustibile solido secondario, è classificato come rifiuto speciale.» La classificazione del CSS ai sensi del Catalogo Europeo dei Rifiuti (all. D alla parte IV del TUA) è 191210, ovvero “rifiuti combustibili prodotti dal trattamento meccanico dei rifiuti”



all'incenerimento *tout court* è poi costituita dai processi di ossidazione parziale (in sostanza una sorta di combustione in difetto di ossigeno), che tipicamente danno origine a miscele gassose di idrocarburi a basso peso molecolare e *syngas* (CO ed H<sub>2</sub>), in quantità e "qualità" (intesa come rapporto tra i vari costituenti la miscela) fortemente dipendenti sia dalla natura delle plastiche assoggettate al processo che dalla tipologia del processo stesso.

Per quanto in particolare riguarda il recupero terziario, o chimico, in generale l'obiettivo è quello di invertire le reazioni di polimerizzazione mediante le quali le plastiche sono state sintetizzate, allo scopo o di ottenere i monomeri di partenza o, quanto meno, miscele di idrocarburi aventi proprietà tecnologiche appropriate, e quindi adeguato valore commerciale. La depolimerizzazione con produzione di monomero garantirebbe, almeno in linea teorica, la possibilità di riutilizzare *ad libitum* una plastica sottoponendo la stessa ad una serie ciclica di reazioni di sintesi diretta e inversa, reversibili. La prima di queste (reazione di sintesi diretta) sarebbe quindi quella che dai monomeri di partenza porta alla formazione della plastica polimerica vera e propria; successivamente, terminato il proprio ciclo di vita del manufatto in plastica e recuperatolo sotto forma di rifiuto in opportune condizioni di purezza, mediante una reazione di sintesi inversa questo potrebbe essere depolimerizzato, ossia scomposto nuovamente nei monomeri di partenza, e quindi il ciclo potrebbe essere riavviato, senza che la plastica prodotta presenti alcuna degradazione né in termini di resistenza meccanica né di durata temporale. La produzione di monomeri è però un obiettivo assai difficile da perseguire. In primo luogo infatti occorre tenere presente che la depolimerizzazione è un processo tutt'altro che banale dal punto di vista chimico: come evidenziato da Panda *et al.* (2010), mentre le plastiche ottenute per policondensazione (principalmente poliammidi, poliesteri, nylon e PET) possono facilmente essere assoggettate a reazioni di sintesi inversa con un buon recupero finale dei monomeri di partenza, le plastiche ottenute per addizione, tra cui le poliolefine (che costituiscono da sole circa il 60% delle plastiche presenti negli RU) sono depolimerizzabili con una difficoltà molto maggiore. In aggiunta, è facilmente intuibile come il processo richieda l'alimentazione di una plastica "mono-monomero" e priva di impurezze, il che è in

pratica possibile solo quando si trattino alcune specifiche categorie di rifiuti di origine industriale, e viceversa non accade praticamente mai con i RU.

Più realistico –almeno in linea di principio- è invece l’obiettivo di utilizzare rifiuti a base di plastica per la produzione di combustibili di interesse commerciale (processi *Plastic to Fuel*, o *PTF*, nell’acronimo anglosassone). Poiché, come indicato sopra, la maggior parte dei polimeri (e in particolare le poliolefine) possono essere considerati come degli idrocarburi ad altissimo peso molecolare, la rottura delle molecole polimeriche (*cracking*, cfr. *supra*) se condotta opportunamente, può portare alla formazione di miscele di idrocarburi e composti analoghi che, almeno in condizioni ottimali, possono avere caratteristiche analoghe a quelle dei combustibili commerciali (benzina, gasolio, olio pesante ecc.), o possono comunque essere utilizzate, da sole o in miscela, in processi di combustione per la produzione di energia.

Il tema del *cracking* termico in assenza di ossigeno (pirolisi) delle plastiche di scarto è stato ampiamente trattato nella letteratura scientifica, e attualmente sono disponibili diverse *review* che analizzano lo stato dell’arte (Panda *et al.*, 2010; Wong *et al.*, 2015; Kunwar *et al.*, 2016; Miandad *et al.*, 2016; Sharuddin *et al.*, 2016; Al-Salem *et al.*, 2017). Tali *review* indicano che il principale prodotto dei processi di *cracking* di plastiche è un vapore che poi a temperatura ambiente condensa, formando un olio a base di idrocarburi. L’olio di pirolisi è una miscela di idrocarburi aventi peso molecolare assai vario, dai più volatili, aventi molecole con 4–5 atomi di carbonio, a quelli più pesanti, con molecole aventi diverse decine di atomi di carbonio (Sorum *et al.*, 2001; Faravelli *et al.*, 2001; Demirbas, 2004; Panda *et al.*, 2010). In tale miscela sono poi presenti quantità più o meno elevate di “idrocarburi sostituiti”, nei quali cioè uno o più atomi di idrogeno sono rimpiazzati da *eteroatomi* come ossigeno, azoto, zolfo, cloro ecc.: tali composti si formano sia a causa del fatto che alcune plastiche contengono eteroatomi nella loro struttura di partenza (si pensi al PVC, che contiene cloro, o al Teflon®, nome commerciale del politetrafluoroetilene, che contiene fluoro), sia a causa delle reazioni incontrollate tra tronconi di molecole di idrocarburi e altre sostanze presenti nei rifiuti.

Accanto all'olio, la cui utilizzabilità pratica e il cui valore commerciale dipendono dalla composizione e dalla tipologia degli idrocarburi e delle altre molecole che lo costituiscono, nonché dagli eventuali processi di purificazione e distillazione condotti prima di avviarlo allo sfruttamento commerciale (Kunwar *et al.*, 2016), il processo di pirolisi dà origine ad un sottoprodotto solido e uno gassoso. Il solido, spesso denominato *coke di pirolisi*, è a base carboniosa, e fondamentalemente deriva dal fatto che parte delle reazioni di cracking, invece che portare alla formazione di idrocarburi con molecole di dimensione medio-piccola, portano alla formazione di un residuo solido a base carboniosa. In tale residuo peraltro tendono a concentrarsi parte degli eteroatomi presenti nelle plastiche (ad esempio il cloro contenuto nel PVC eventualmente presente nell'alimentazione), oltre che, inevitabilmente, gli inerti presenti nell'alimentazione (metallo, vetro, pietrisco ecc.), che ovviamente non possono partecipare alle reazioni di pirolisi. Il gas di pirolisi è invece costituito dalla frazione di vapore che non condensa quando dalla temperatura alla quale viene condotto il processo si passa alla temperatura ambiente, ed è ricco in idrocarburi leggeri (molecole con 1-5 atomi di carbonio), ma contiene anche quantità apprezzabili di composti del carbonio (CO, CO<sub>2</sub>), di azoto, ecc.

I processi di pirolisi PTF tipicamente sono condotti a temperature comprese tra 300° e 700°C, e la prima fondamentale distinzione che va fatta nel loro ambito è quella tra i processi puramente termici e i processi catalitici. Mentre nei primi la rottura delle molecole di plastica viene realizzata sfruttando solo l'energia termica, nei secondi l'azione del calore si accompagna a quella di un catalizzatore, solitamente solido che, messo in contatto con la plastica fusa o pastosa, facilita e/o orienta le reazioni di cracking. L'uso del catalizzatore quindi consente di ottenere vantaggi in termini di resa in prodotti utili (rapporto tra massa di idrocarburi liquidi e massa di plastica alimentata), o selettività in idrocarburi desiderati rispetto a quelli indesiderati (ad esempio, frazione di componenti "leggeri" rispetto al totale degli idrocarburi liquidi), o ancora in termini di riduzione della temperatura operativa e quindi dei consumi energetici del processo.

Altre distinzioni riguardano poi la tipologia di processo (continuo, semicontinuo, discontinuo), la tipologia di reattore utilizzato (reattore tubolare, reattore tubolare catalitico “a letto fisso” o “a letto fluidizzato”<sup>13</sup>, reattori tubolari assistiti da microonde ecc.) e, infine, la scelta delle condizioni operative (temperatura, pressione, tempo di permanenza nel reattore). La sintesi dei risultati riportati complessivamente sembra indicare che:

- 1) Sebbene i dati disponibili in letteratura siano molto ampi, nella stragrande maggioranza dei casi i materiali studiati sono state plastiche “pure”, vale a dire miscele monocomponente, o –in alcuni casi limitati- miscele bicomponente (ad esempio polietilene + polipropilene), con composizioni (e livelli di problematicità) quindi lontanissime da quelle che si possono incontrare nei rifiuti reali (cfr. l’analisi sul tema condotta da Singh e Ruj, 2016).
- 2) I processi catalitici (tipicamente condotti utilizzando zeoliti acide, analoghe a quelle che si utilizzano per il cracking catalitico nelle raffinerie) sembrano offrire una serie di vantaggi rispetto ai processi puramente termici, sia in termini di una notevole riduzione di tempi e temperature richieste dal processo, che di ottenimento di una frazione volatile più ricca in idrocarburi condensabili, in particolare aromatici (Anders *et al.*, 1990; Ohkita *et al.*, 1993; Ding *et al.*, 1997; Park *et al.*, 1999; Lee, 2001); tali vantaggi spesso

---

<sup>13</sup> Nei reattori tubolari contenenti particelle solide (quali tipicamente sono i reattori catalitici, visto che nella maggior parte dei casi il catalizzatore è appunto costituito da materiali solidi in piccola pezzatura aventi opportune caratteristiche) si distingue tra le situazioni nelle quali le particelle sono ferme (tipicamente in quanto all’uscita del reattore è posta una griglia che le trattiene e il reattore è riempito, senza quindi lasciare spazi di movimento al solido), nelle quali si parla di *letto fisso* (*fixed bed*) e quelle nelle quali le particelle sono libere di muoversi sotto l’effetto combinato del trascinamento operato dal fluido (che in questi casi di solito fluisce dal basso verso l’alto) e della gravità, nelle quali si parla di *letto fluidizzato* (*fluidized bed*). Entrambe le soluzioni reattoristiche hanno i loro pregi e i loro difetti (ad esempio nei reattori a letto fluidizzato il rimescolamento delle particelle garantisce un contatto più efficace tra queste e il fluido da trattare, ma d’altra parte la gestione è più complessa, con significativi rischi di perdite sgretolamento delle particelle), e di volta in volta viene preferita una o l’altra soluzione. Ancora, è opportuno segnalare che esistono soluzioni intermedie tra il letto fisso e quello fluidizzato, costituite dai reattori *a letto mobile* (*moving bed*).



però non compensano i maggiori costi, soprattutto connessi al consumo dei catalizzatori.

- 3) Tra le varie tipologie reattoristiche, i letti fluidizzati, sebbene potenzialmente interessanti dal punto di vista dell'intensità del mescolamento interno, e quindi della qualità dei prodotti, presentano seri rischi connessi all'agglomerazione dell'inerte utilizzato per la fluidizzazione, e quindi a al collasso irreversibile del processo.
- 4) Rischi simili non si incontrano invece nei processi condotti in reattori tubolari, dove però le forti disomogeneità di temperatura possono portare a disomogeneità nella distribuzione dei prodotti, oltre che alla formazione di punti caldi localizzati, con conseguenti rischi per la stabilità del processo e la sicurezza dell'operazione.
- 5) Un ulteriore problema significativo, soprattutto nel caso dei processi condotti in reattori tubolari è quello della formazione di *cere*, ovvero di idrocarburi ad elevato peso molecolare, solidi o semisolidi alle temperature tipiche dei processi di pirolisi, che aderiscono alle strutture interne del reattore in cui viene realizzato il processo e ostacolano il flusso dei polimeri nel reattore.

Sebbene i processi di *cracking* termico e catalitico siano stati studiati ormai da decenni, e impianti pilota siano stati realizzati a partire dall'inizio degli anni '90 (Scheirs *et al.*, 2006), la loro applicazione industriale è molto più recente, e significativamente problematica. Le prime notizie su impianti a scala industriale risalgono al 2001, e riguardano un impianto sviluppato nella provincia cinese dell'Hunan (Zhang *et al.*, 2007). Successivamente, impianti analoghi sono stati menzionati in Gran Bretagna nel 2003, in India nel 2005, a Singapore nel 2009 e in Irlanda nel 2012 (Panda *et al.*, 2010; Murphy *et al.*, 2013). In complesso però, sebbene non manchino report più o meno entusiastici sullo sviluppo di impianti industriali PTF, la loro effettiva realizzazione appare piuttosto elusiva, e non esistono di fatto impianti commercializzati: significativamente per nessuno degli impianti ora elencati esistono notizie che vadano oltre il lancio e la presentazione alla stampa, e men che meno

esistono informazioni su resa e produttività su periodi di tempo più o meno lunghi, costi economici ecc.

Nel contesto ora delineato, l'impianto sul cui sviluppo la PRT ha deciso di puntare deriva dall'adattamento al trattamento di rifiuti a base di plastiche di un processo già disponibile commercialmente per la conversione pirolitica di pneumatici fuori uso in combustibile liquido. L'obiettivo di tale processo è realizzare la pirolisi termica di rifiuti a base di plastica (in particolare caratterizzati dal codice CER 191210, "rifiuti combustibili prodotti dal trattamento meccanico dei rifiuti") in un reattore tubolare continuo operante ad una temperatura di 350°–400°C, e produrre un olio e un gas direttamente combustibili in un motore stazionario per la produzione di energia elettrica.

Più specificamente, in un'installazione che la PRT ha recentemente acquisito a Sarno (SA) verrà realizzato un impianto pilota basato su tale processo, avente capacità di trattamento di ca. 30 kg/h, nel quale verrà completata l'ingegnerizzazione del processo stesso, peraltro già testato autonomamente dalla Get Energy Prime Italia srl di Roma (nel seguito: Get Energy). Nel seguito di questa relazione quindi verrà innanzitutto descritto il processo di pirolisi che PRT ha deciso di utilizzare, anche evidenziando sia le caratteristiche del rifiuto si intende alimentare, sia quelle dei prodotti e dei sottoprodotti che ci si aspetta di ottenere. Successivamente si esaminerà in dettaglio l'impianto pilota in corso di realizzazione a Sarno. Verrà quindi presentata la sperimentazione che si intende condurre e i principali obiettivi che questa ha, e infine verranno presentate alcune considerazioni sui possibili utilizzi dei prodotti del processo.

E' infine opportuno precisare che al termine della sperimentazione verrà redatta una relazione conclusiva nella quale i risultati sperimentali saranno esaminati criticamente, in particolare in vista dell'auspicata realizzazione di un impianto industriale a scala reale.

## 2. Descrizione del processo di pirolisi termica di rifiuti speciali non pericolosi di natura plastica

### 2.1. Descrizione di massima del processo

Il processo che la PRT intende condurre nell'impianto di Sarno (SA) consiste nel *cracking* termico, o pirolisi, della frazione poliolefinica del Combustibile Solido Secondario (CSS: cfr. *supra*). Tale processo è stato sviluppato dal proponente l'iniziativa in collaborazione con la Get Energy, e deriva dall'adattamento di un processo originariamente concepito da quest'ultima per la conversione pirolitica di granulato di gomma derivante da pneumatici fuori uso in combustibile liquido, attualmente commercializzato con il nome di *Pneus Gino*<sup>14</sup>. L'obiettivo del processo è la produzione di un olio combustibile a base di idrocarburi, principalmente in vista di un suo utilizzo per la produzione di energia in motori stazionari. Oltre l'olio combustibile come sottoprodotti verranno ottenuti un gas, principalmente costituito da idrocarburi, e anch'esso combustibile, e un solido, a base carboniosa (denominato *coke di pirolisi*), che verrà caratterizzato e, se del caso, smaltito come rifiuto.

Sebbene la capacità di trattamento del processo commerciale che si intende sviluppare sarà di 500–700 kg/h di rifiuti a base di plastica, corrispondenti ad una potenzialità attesa in termini di energia elettrica prodotta di ca. 1 MW<sub>el</sub>, il proponente l'iniziativa ha deciso di sviluppare in una prima fase un impianto pilota di dimensioni ridotte. E' infatti del tutto evidente come in un impianto di dimensioni ridotte (ancorché

---

<sup>14</sup> <http://www.getenergyprimeitalia.com/pneus-gineo/>

significative) sarà più agevole condurre la sperimentazione oggetto della presente relazione, e i rischi connessi allo sviluppo del processo (sia in termini di sicurezza per gli operatori, sia di rischi dovuti ad eventuali ancorché improbabili emissioni nocive) saranno di molto ridotti.

L'impianto pilota che si sta sviluppando avrà una potenzialità di ca. 30 kg/h di rifiuti, corrispondenti a ca. 50 kW<sub>el</sub>. Tale impianto opererà in modalità continua (come peraltro si prevede di fare con l'impianto "industriale" da 1 MW<sub>el</sub>), e il suo cuore sarà un reattore tubolare cilindrico nel quale verrà introdotto il rifiuto finemente triturato. Il sistema di alimentazione del rifiuto al reattore sarà dotato di un sistema di valvole a ghigliottina operanti in mono da limitare l'ingresso di aria "parassita" e quindi da minimizzare il rischio di reazioni di ossidazione/combustione (peraltro il reattore sarà dotato di un sistema di sicurezza che provvederà all'insufflaggio di azoto qualora la concentrazione di ossigeno dovesse sperare il 4% su base volumetrica). Il reattore internamente sarà dotato di un sistema elettrico di riscaldamento, la cui potenza -modulabile- consentirà il raggiungimento di temperature fino a 350°-400°C (la temperatura indicata come ottimale dalla Get Energy è 380°C). Sempre all'interno del reattore sarà presente una coclea, che provvederà all'avanzamento del rifiuto da trattare.

Il riscaldamento del materiale trattato provocherà a carico della frazione di plastiche, e in particolare delle poliolefine, una serie di reazioni chimiche che principalmente romperanno le lunghe catene idrocarburiche che costituiscono i polimeri presenti nel rifiuto trattato. La maggior parte del rifiuto verrà quindi convertita in una miscela di idrocarburi a medio/basso peso molecolare che, alle temperature alle quali avvengono le reazioni di cracking, sarà in fase vapore. Una frazione di minore entità resterà invece in fase solida, andando a costituire lo scarto del processo. La corrente di vapore prodotta nel reattore di *cracking* verrà successivamente raffreddata, così da determinare la condensazione della sua frazione più pesante, che formerà un liquido prevalentemente costituito da idrocarburi aventi temperature di ebollizione (e quindi pesi molecolari) orientativamente comprese tra il taglio della benzina e quello del gasolio pesante. Viceversa, la frazione a minor peso molecolare resterà in fase gassosa

anche a valle del raffreddamento, e costituirà quindi un ulteriore prodotto, distinto dal liquido sopra citato, composto in parte da prodotti leggeri derivanti dalle reazioni di *cracking*, come idrogeno molecolare ( $H_2$ ), idrocarburi leggeri (metano,  $CH_4$ , etano,  $C_2H_6$ , propano,  $C_3H_8$  ecc.), e in parte da gas incondensabili derivanti dall'aria che inevitabilmente entra nell'impianto durante la fase di carico (e quindi fondamentalmente da azoto molecolare,  $N_2$ , ossido di carbonio,  $CO$ , e anidride carbonica,  $CO_2$ ), oltre che, almeno in linea di principio, tracce di composti volatili derivanti dalle impurezze eventualmente presenti nell'alimentazione (acido cloridrico,  $HCl$ , ammoniaca,  $NH_3$  ecc.).

Vale la pena di sottolineare esplicitamente che, nella misura in cui il processo in questione converte un rifiuto a base di plastiche in un olio combustibile<sup>15</sup> (oltre ad uno scarto solido e una corrente gassosa che, se bruciata in torcia o in caldaia, produce un'emissione in atmosfera), tale processo può essere inquadrato nella tipologia **R3** (*Riciclo/recupero delle sostanze organiche non utilizzate come solventi, comprese le operazioni di compostaggio e altre trasformazioni biologiche*) dell'All. C alla parte IV del D.Lgs. 152/2006. In linea di massima per tale olio combustibile, una volta definitene con chiarezza la classificazione nell'ambito delle specifiche fissate nella tabella menzionata nella nota precedente, e sancita quindi la cessazione della qualifica di rifiuto (cfr. l'analisi sul punto presentata nella sezione 5 della presente relazione), si prevede l'utilizzo come combustibile in un motore stazionario per la produzione di energia elettrica.

---

<sup>15</sup> Cfr. la definizione e le specifiche fissate per l'"olio combustibile ed altri distillati pesanti del petrolio" nella tabella riportata al punto 1 della sez. I ("Combustibili liquidi") della parte II ("Caratteristiche merceologiche dei combustibili e metodi di misura") dell'all. X ("Disciplina dei combustibili") alla parte V del TUA.



## 2.2. Caratteristiche dei rifiuti alimentabili al processo

Un aspetto cruciale del processo è rappresentato dalla qualità dei rifiuti da utilizzare come alimentazione. E' infatti necessario che il tenore di plastiche poliolefiniche sia, per quanto possibile, elevato, visto che il processo di *cracking* è orientato principalmente alla demolizione di tali tipologie di molecole. In particolare l'obiettivo dell'impianto progettuale che si intende testare nell'installazione di Sarno è quello di trattare in modo efficiente e continuativo un Combustibile Solido Secondario (CSS) di classe non inferiore alla 3/3/3 secondo quanto indicato dalla norma UNI 9903, inerente "Combustibili solidi secondari (CSS) – Specifiche e classificazioni" ovvero dalla norma europea di settore UNI CEN/TS 15359 relativa ai *Solid Recovered Fuels (SRF)*<sup>16</sup>.

Fermo restando che la definizione delle effettive caratteristiche dei rifiuti utilizzabili nell'impianto sarà proprio uno degli aspetti che si intende chiarire tramite la sperimentazione, secondo quanto preliminarmente indicato dalla Get Energy le ulteriori specifiche alle quali occorrerà assoggettare il CSS da alimentare all'impianto sono quelle di una umidità non superiore al 5%, una pezzatura inferiore a 50 mm, evitando inoltre la presenza di metalli, pietrisco o altri corpi duri che possano danneggiare il reattore e gli altri elementi dell'impianto.

---

<sup>16</sup> Le norme UNI 9903 e UNI CEN/TS 15359 classificano il CSS sulla base di tre parametri, che sono il potere calorifico inferiore (espresso in MJ/kg di materiale tal quale), il contenuto di cloro (espresso in percentuale ponderale su base secca) e il contenuto di mercurio (espresso, con riferimento al potere calorifico, in mg/MJ di materiale tal quale), naturalmente nell'ambito di procedure di campionamento e di misurazione specificate dalle norme stesse. Per ciascuna di questi parametri vengono individuate cinque classi, così che rispetto a tale classificazione sono teoricamente possibili  $5^3=125$  tipologie differenti di CSS. Nello specifico il CSS di classe "non inferiore alla 3/3/3" ha potere calorifico maggiore o uguale a 15 MJ/kg, contenuto di cloro minore o uguale all'1% su base secca e contenuto di mercurio minore o uguale sia a 0.08 mg/MJ nella mediana dei campioni analizzati, sia a 0.16 mg/MJ nell'80° percentile dei campioni analizzati.

### **2.3. Caratteristiche attese per il prodotto liquido**

Il prodotto liquido che ci si attende di produrre sarà una miscela prevalentemente costituita da idrocarburi a basso e medio peso molecolare (orientativamente molecole composte da 5–30 atomi di carbonio) e, secondo le informazioni preliminari fornite dalla Get Energy, il suo ammontare dovrebbe essere nell'ordine dell'80% del rifiuto alimentato su base ponderale (ma ovviamente anche tale valore andrà verificato sperimentalmente). Tale prodotto verosimilmente conterrà anche una certa quantità di composti contenenti eteroatomi (ad esempio aldeidi, chetoni, idrocarburi alogenati ecc.), derivanti dalla inevitabile presenza nella miscela trattata di ossigeno e di composti clorurati, fluorurati ecc.

Per quanto riguarda le caratteristiche merceologiche, è ragionevole attendersi che il prodotto liquido sia assimilabile ad un olio combustibile rientrante in una delle 10 categorie elencate nella già citata tabella riportata al punto 1 della sez. 1 della parte II dell'all. X alla parte V del TUA, che è appunto dedicato alla disciplina dei combustibili consentiti (cfr. l'art. 293 del TUA).

Occorre però sottolineare che tutte le considerazioni ora svolte sono di carattere ipotetico, e basate in parte sulle indicazioni trasmesse dalla Get Energy e in parte sull'analogia tra il processo in esame e altri processi presentati in letteratura. L'effettiva caratterizzazione quantitativa e qualitativa dell'olio prodotto potrà avvenire solo nell'ambito della sperimentazione che ci si accinge ad effettuare.

### **2.4. Caratteristiche del prodotto gassoso**

Come indicato sopra, il prodotto gassoso conterrà principalmente i prodotti leggeri e incondensabili della pirolisi, nonché dei composti derivanti dalle reazioni tra il rifiuto e l'aria "parassita" che in piccola quantità inevitabilmente entrerà nel reattore di pirolisi. E' quindi ragionevole ritenere che tale gas conterrà idrogeno, idrocarburi a 1–4

atomi di carbonio (metano, etano, etilene, propano ecc.), idrogeno, anidride carbonica ossido di carbonio e azoto. Non è però possibile escludere *a priori* la presenza di composti del cloro (in pratica: acido cloridrico, HCl), derivanti da plastiche clorurate: sebbene infatti, come indicato sopra, il tenore di cloro nel CSS alimentato sia inferiore all'1%, e sebbene sia prevedibile che la maggior parte del cloro presente nell'alimentazione resti inglobato nel coke di pirolisi, non è da escludere la possibilità che una certa frazione finisca nel gas. Analogamente non è da escludere (per quanto non sia neppure da ritenere probabile) la possibile presenza nel gas di una certa quantità di zolfo, sotto forma di H<sub>2</sub>S.

Come già osservato a proposito del prodotto liquido, le considerazioni ora svolte sono ipotetiche, e andranno validate sulla base dei risultati della sperimentazione.

### 2.5. Caratteristiche del sottoprodotto solido

Il sottoprodotto solido del processo sarà essenzialmente un residuo solido carbonioso. La sua presenza deriva sia dal fatto che non tutte le sostanze alimentate al processo sono assoggettabili alle reazioni di *cracking* (in particolare, non tutte le sostanze sono plastiche poliolefiniche), sia dal fatto che le reazioni di *cracking* non hanno selettività pari al 100%, e quindi una certa frazione del carbonio che costituisce le plastiche trattate invece che a formare idrocarburi più o meno pesanti andrà a formare, appunto, una sostanza carboniosa solida. Peraltro lo scarto agglomererà al suo interno anche gli inerti presenti nell'alimentazione (*filler* dei polimeri, vetro, metalli ecc.).

Per tale sostanza si prevede di condurre un'appropriata caratterizzazione chimica, allo scopo di verificarne o la riutilizzabilità come sottoprodotto, o la necessità di uno smaltimento come rifiuto. In questo secondo caso, in funzione della sua composizione chimica gli si attribuirà uno tra i codici CER "a specchio" **190111\*** ("ceneri pesanti e scorie da incenerimento o pirolisi di rifiuti, contenenti sostanze pericolose") o **190112** ("ceneri pesanti e scorie da incenerimento o pirolisi di rifiuti, diverse da quelle di cui

alla voce 190111”). Peraltro, in vista di un suo possibile recupero (a valle della classificazione come rifiuto) nella formulazione di CSS, un elemento importante della sua caratterizzazione sarà la determinazione del potere calorifico.

## **2.6. Considerazioni riassuntive sul processo**

Come indicato sopra, l’impianto pilota descritto nella presente relazione avrà una capacità di trattamento pari a 30 kg/h. A fronte di questo, l’impianto a scala industriale che si intende realizzare a valle delle indicazioni derivanti dalla sperimentazione avrà una capacità di trattamento pari a 500–700 kg/h corrispondenti, per 6500–8000 ore/anno di funzionamento, a ad approssimativamente  $4\,000 \pm 1\,000$  t/anno.

La resa prevista in prodotto liquido (ovviamente da verificare sulla base degli esperimenti che ci si accinge a compiere) è stata stimata dalla Get Energy Prime Italia nel 70% su base ponderale, con il restante 30% equamente diviso tra il prodotto gassoso e lo scarto solido. I valori ora visti suggerirebbero quindi una produzione annua di olio nell’ordine di 2 000–3 500 t/anno, ai quali andrebbero aggiunte altre 500–600 t/anno di gas combustibile. Supponendo che il potere calorifico dell’olio sia di 40 MJ/kg, trascurando in prima istanza il contributo energetico eventualmente ottenibile dalla combustione del gas e ipotizzando un’efficienza della conversione dell’energia chimica in energia elettrica del 30% si arriverebbe ad una produzione di energia elettrica di ca. 7–11 GWh<sub>el</sub>/anno, i quali –considerando un autoconsumo nell’ordine del 20–25% portano in definitiva ad una produzione netta di energia elettrica di 5–9 GWh<sub>el</sub>/anno

Nella Tabella 2.1 seguente è riportata una sintesi dei valori assunti dalle principali variabili operative per il processo sia per l’impianto pilota esaminato nella presente relazione sia per l’impianto industriale che verrà sviluppato se la sperimentazione confermerà i risultati attesi.

**Tabella 2.1. Sintesi delle principali grandezze operative relative all'impianto pilota e all'ipotetico impianto a scala industriale (fonte: comunicazioni di Get Energy Prime Italia srl e stime derivate da queste).**

Descrizione	Impianto pilota	Impianto industriale
Portata di alimentazione	30 kg/h	500–700 kg/h
Temperatura di esercizio		350°–400°C
Resa in olio combustibile		ca. 70%
Resa in gas combustibile		ca. 15%
“Resa” in coke di pirolisi		ca. 15%
Ore annue di funzionamento	<300	>6500, (attese: 8000)
Consumo anno di rifiuti (191210)	<1 t/anno	3 500–5 600 t/anno
Produzione annua di sottoprodotto (eventualmente rifiuto 190111*/190112)	<150 kg/anno	500–800 t/anno
Produzione annua lorda di energia elettrica	n/a	7–11 GWh <sub>el</sub>
Produzione annua netta di energia elettrica utilizzabile o cedibile	n/a	5–9 GWh <sub>el</sub>



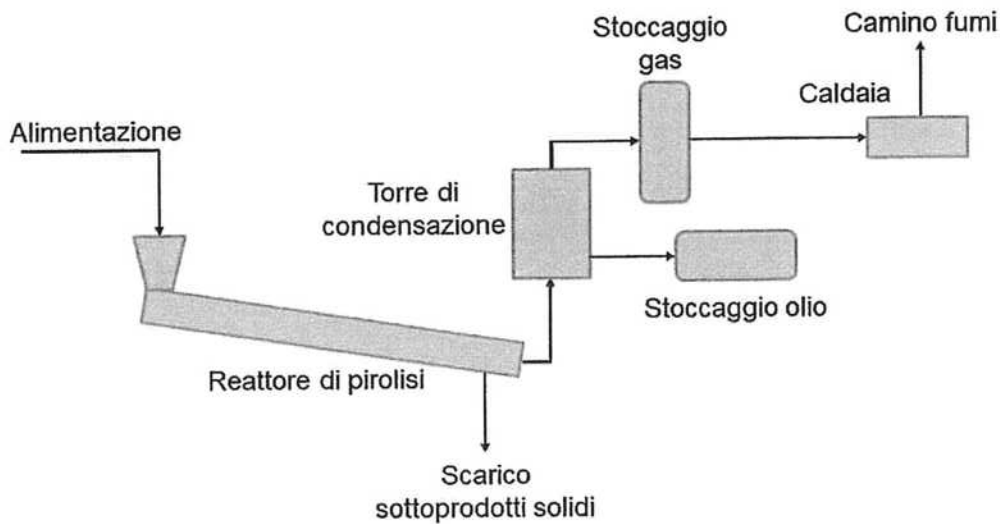
### 3. Descrizione dell'impianto pilota

Secondo quanto riferito dalla Get Energy, l'impianto pilota che si intende installare a Sarno, all'interno di un capannone che occupa un lotto della locale zona industriale, sarà costituito dai seguenti elementi principali, che nel seguito saranno analizzati in maggiore dettaglio (cfr. la Fig. 3.1 per un schema concettuale del processo):

- sistema di alimentazione del rifiuto;
- reattore di pirolisi;
- sistema di scarico del solido;
- torre di raffreddamento/condensazione dei vapori prodotti;
- gruppi di filtraggio;
- unità di stoccaggio del gas e del liquido;
- caldaia per la combustione del gas<sup>17</sup>;
- pulpito di comando con sistema computerizzato di gestione e controllo dell'impianto e quadri di rilevazione delle principali variabili operative;
- quadri elettrici;
- sistema antincendio con bombole di CO<sub>2</sub>.

---

<sup>17</sup> Sebbene, come sopra indicato, nell'impianto industriale si prevede di utilizzare il calore sviluppato dalla combustione del gas di pirolisi per la conduzione del processo stesso, nell'impianto pilota le dimensioni delle apparecchiature e le quantità di calore in gioco non sono tali da consentire questo recupero energetico, e pertanto si è deciso di bruciare il gas in una caldaia senza però recuperare il calore sviluppato.



**Figura 3.1. Schema concettuale del processo di pirolisi di plastiche per la produzione di olio combustibile.**

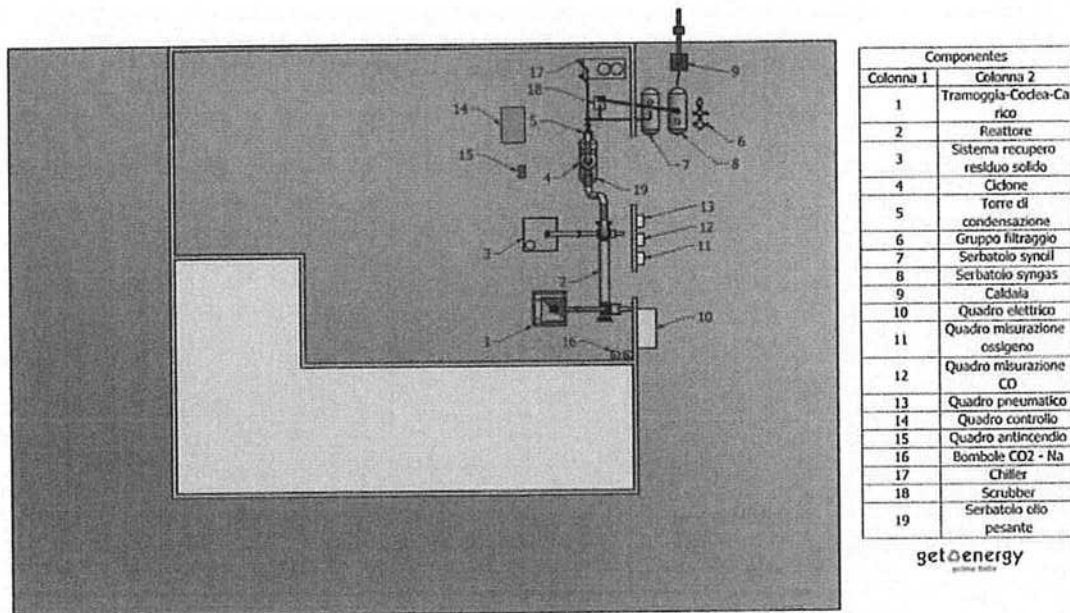
L'impianto avrà dimensioni relativamente modeste (ca. 15×15 m, anche considerando le unità ausiliarie) e, come indicato sopra, verrà ospitato in un capannone coperto. Allo scopo di minimizzare problemi di corrosione e di aumentarne la vita utile, tutto l'impianto sarà costruito in acciaio AISI 316 e AISI 316L<sup>18</sup>. Inoltre, vista la natura dei materiali trattati, esso sarà dotato di certificazione ATEX<sup>19</sup>.

Una planimetria di progetto dell'impianto (con i vari sistemi ausiliari) posizionato all'interno del capannone è riportata in Fig. 3.2, mentre in Fig. 3.3 è riportata una vista assonometrica complessiva. Il capannone della PRT ha dimensioni di ca. 54×22 m ed è

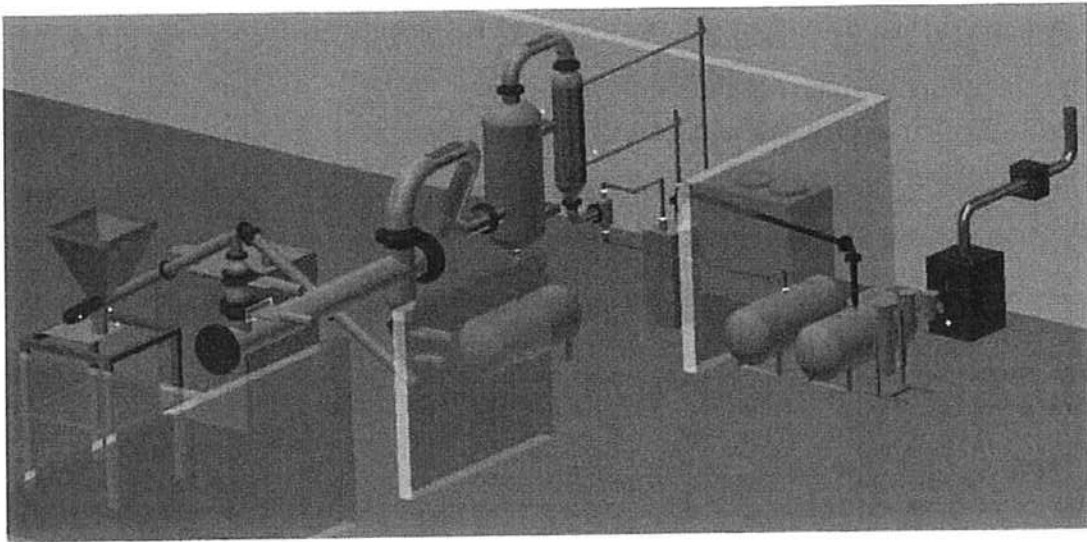
<sup>18</sup> L'acciaio *AISI 316* (acciaio 18/8/3) è una lega di acciaio inox austenitica composta da un tenore di cromo tra il 16% ed il 18%, di nichel tra l'11% e il 14% e di molibdeno tra il 2% ed il 3%. In particolare la presenza di molibdeno la rende adatto all'esercizio in ambienti interessati da acqua di mare e nelle applicazioni navali. La versione "L", per "low carbon" (acciaio *AISI 316L*), cioè con tenore di carbonio inferiore allo 0.035% (il 316 ne ammette fino a 0.080%), è più resistente alla corrosione perché il ridotto tenore di carbonio è utile a impedire la precipitazione dei carburi di cromo (fonte: <http://www.gruppoinox.it/it/utilita/acciai/316>).

<sup>19</sup> L'acronimo *ATEX* deriva dal francese *ATmospheres EXplosibles* (atmosfera esplosive), e fa riferimento alla certificazione prevista dalle Dirr. 2014/34/UE "per la regolamentazione di apparecchiature destinate all'impiego in zone a rischio di esplosione" (che ha sostituito e abrogato la Dir. 94/9/CE) e 99/92/CE "per la sicurezza e la salute dei lavoratori in atmosfera esplosive".

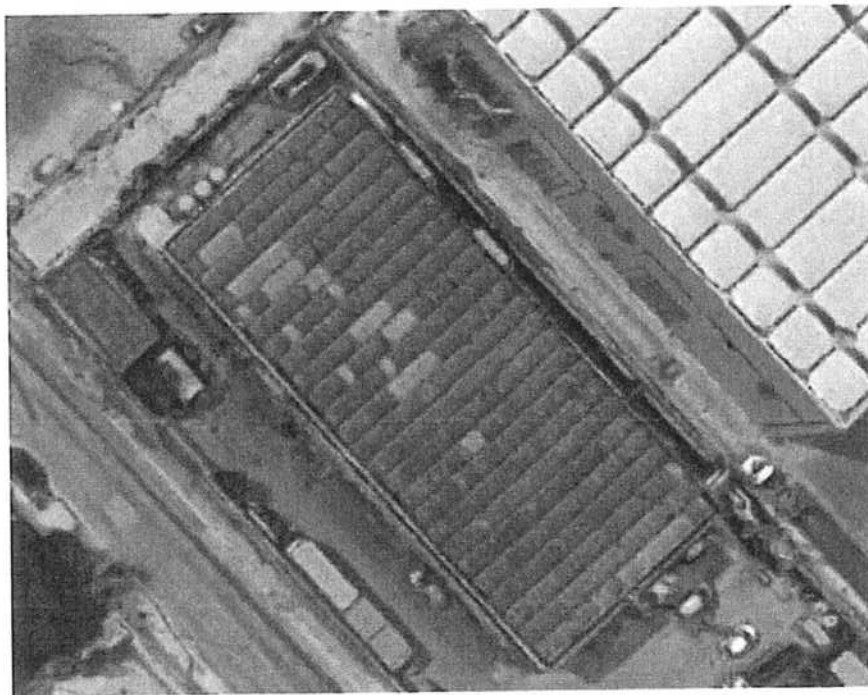
posto all'interno di un lotto di forma rettangolare, avente dimensioni approssimative di 90×36 m, localizzato lungo la via Ingegno (cfr. Fig. 3.3). In particolare l'impianto e i suoi elementi ausiliari occuperanno un'area di ca. 400 m<sup>2</sup> al di sotto del capannone, ed impegneranno inoltre anche una frazione del piazzale esterno, avente area di ca. 550 m<sup>2</sup>. Le aree ora menzionate, a cui si accede da una traversa di Via Ingegno tramite un cancello, sono delimitate in parte dal muretto sormontato da ringhiera metallica che racchiude l'intero lotto, e in altra parte (il lato nord-est confinante con la restante parte del lotto) da una recinzione metallica avente altezza di ca. 2 m. All'interno della frazione di capannone interessata dall'impianto sperimentale, saranno peraltro individuate due aree destinate rispettivamente alla messa in riserva dei rifiuti da utilizzare nella sperimentazione ed al deposito temporaneo dei rifiuti prodotti.



*Figura 3.2. Planimetria del capannone con vista dell'impianto.*



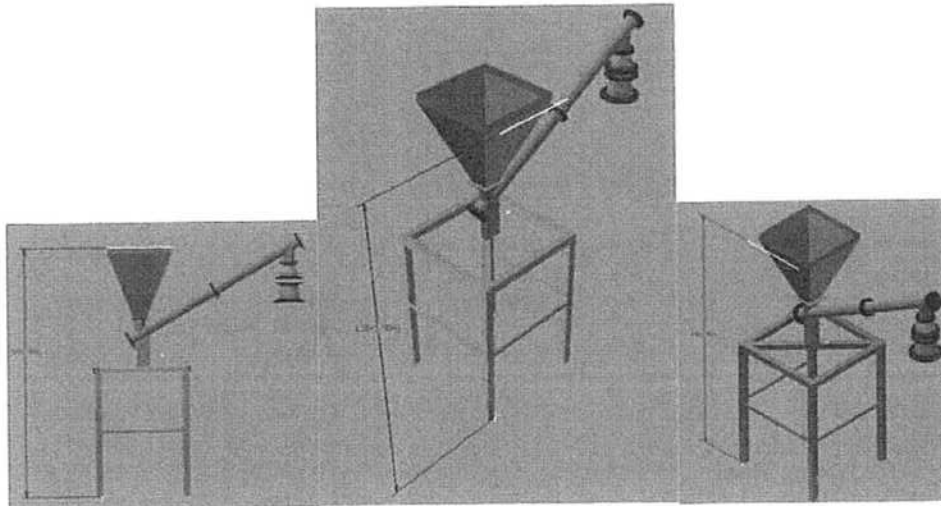
*Figura 3.3. Vista assonometrica d'assieme dell'impianto.*



*Figura 3.4. Vista aerea del capannone occupato dall'impianto.*

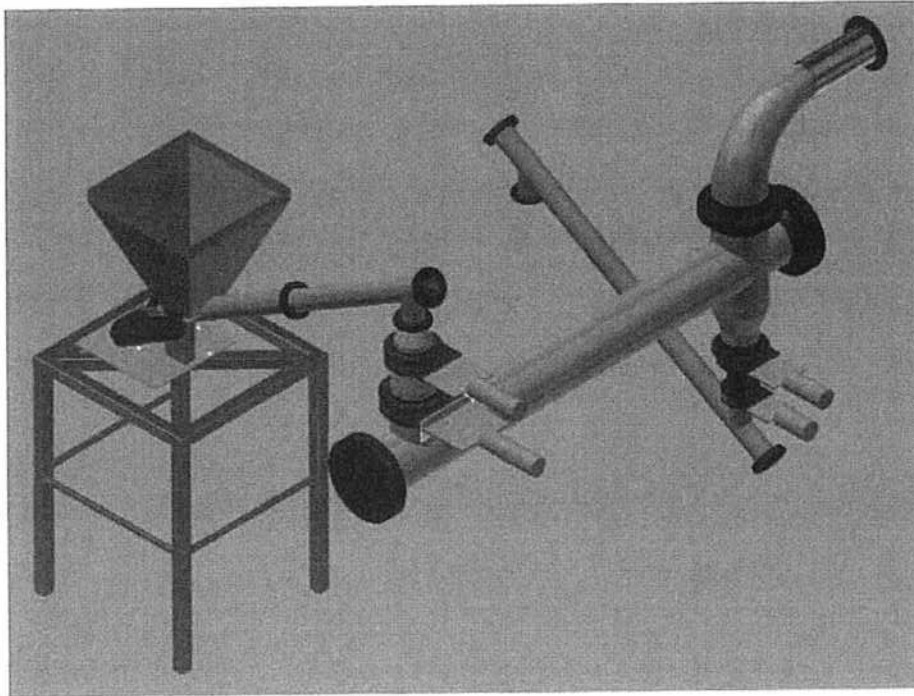
### 3.1. Sistema di alimentazione del rifiuto

Il sistema di alimentazione avrà la funzione di convogliare all'interno del reattore il rifiuto triturato (CSS di categoria 3/3/3 o superiore, codice CER 191210), facendo anche in modo di aumentarne la densità e di impedire, o comunque minimizzare, l'ingresso di aria nel reattore, visto che la reazione tra l'ossigeno e i vapori prodotti nel processo potrebbe avere effetti catastrofici. Il sistema di alimentazione sarà in particolare costituito da una tramoggia di carico e da un condotto di alimentazione all'interno del quale sarà una coclea a passo variabile, che trasporterà il CSS caricato nella tramoggia fino all'ingresso del reattore. La protezione del reattore dall'ingresso di aria parassita sarà garantita da un sistema di due valvole a ghigliottina, disposte tra il sistema a coclea e il reattore, in particolare predisposte in modo tale da funzionare in contrapposizione (aperta-chiusa/chiusa-aperta). Una visione schematica di tale sistema è riportata in Fig. 3.5, mentre in Fig. 3.6 è riportata una visione di assieme dell'impianto in cui sono bene evidenziate le valvole a ghigliottina.



*Figura 3.5. Rappresentazione tridimensionale del sistema di alimentazione del rifiuto al reattore di cracking.*





*Figura 3.6. Assonometria del sistema di alimentazione del rifiuto (a sinistra) con il reattore di cracking e il sistema di scarico del vapore e del solido (a destra).*

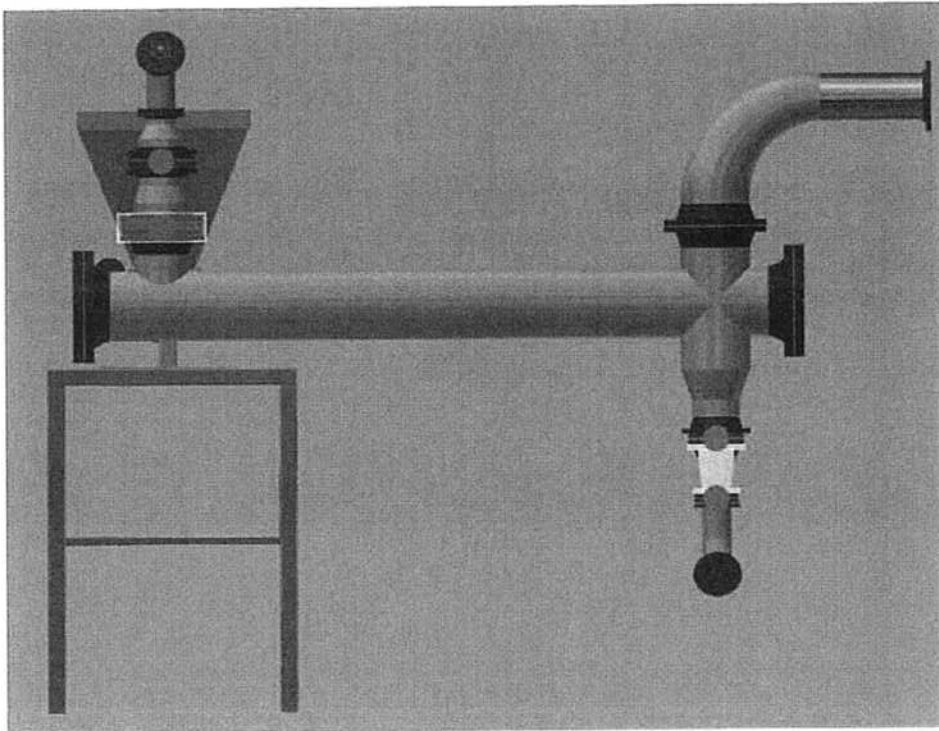
### 3.2. Reattore

Il reattore sarà costruito in acciaio al carbonio, avrà forma cilindrica, con lunghezza utile di 3 300 mm (lunghezza totale di 4 100 mm) e diametro interno di 410 mm, per un volume utile di ca. 450 l. Vista la temperatura operativa, il reattore sarà opportunamente coibentato al suo esterno. Esso sarà inoltre disposto in leggera pendenza (inclinazione di  $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$ ) per favorire il flusso delle plastiche in decomposizione. Il reattore sarà montato su una struttura metallica ad un'altezza dal suolo di 1600 mm, e come d'obbligo sarà dotato di un sistema di messa a terra. Internamente al reattore sarà presente una resistenza elettrica opportunamente corazzata avente potenza di 40 kW (in realtà tale resistenza è stata dimensionata ampiamente per eccesso, essendo una potenza di 10 kW probabilmente sufficiente alle esigenze del reattore). Tale resistenza riuscirà a far raggiungere al materiale trattato la temperatura

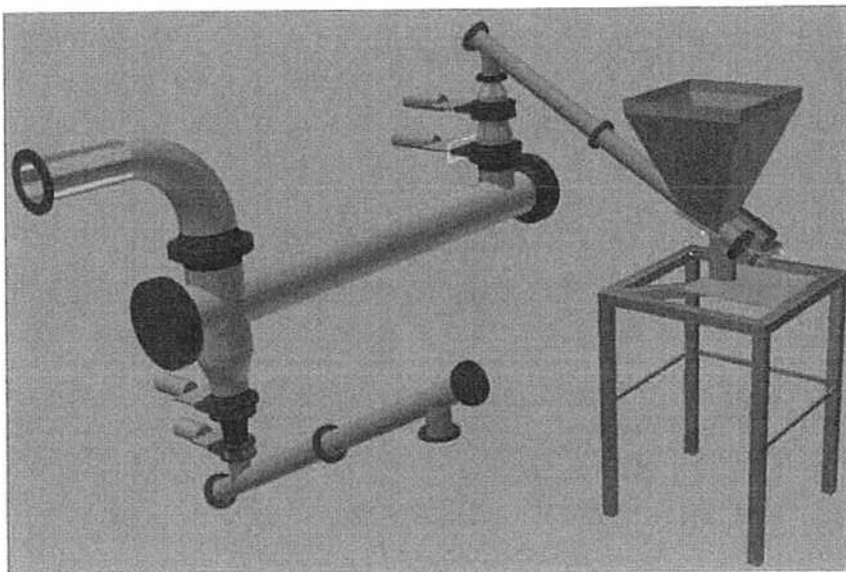
desiderata (350°–400°C, come indicato in precedenza) in un tempo stimato in ca. 20 min. Un opportuno numero di termocoppie e un sistema di gestione della potenza elettrica consentiranno la misura il controllo della temperatura operativa.

Esternamente alla resistenza (ma ovviamente all'interno del reattore) sarà poi presente una coclea a passo variabile che provvederà all'avanzamento del rifiuto da trattare. Vale la pena di osservare a tal proposito che il rifiuto entrerà nel reattore a temperatura ambiente, e quindi in forma solida; successivamente a causa del riscaldamento assumerà una consistenza pastosa, e poi per effetto delle reazioni di cracking progressivamente si farà via via più liquido e sarà convertito in vapore, mentre una parte, contenente gli inerti, andrà a formare il sottoprodotto solido (coke di pirolisi). La velocità di avanzamento della coclea di fatto regolerà sia il tempo di permanenza nel reattore del materiale trattato, sia il consumo di rifiuto. Premesso che il tempo di permanenza ottimale andrà determinato nell'ambito della sperimentazione, stime preliminari di Get Energy indicano che tale tempo sarà nell'ordine di 40–50 min.

Internamente al reattore saranno anche presenti delle sonde per la misura della concentrazione di ossigeno libero, nonché un sistema di insufflaggio di azoto che si attiverà in caso di concentrazione di ossigeno superiore al 4% su base volumetrica. Infine, nella zona terminale la tenuta della connessione con il sistema di scarico del coke sarà garantita da guarnizioni spirometalliche. Una vista di assieme del reattore, del sistema di alimentazione dei rifiuti descritto nella sezione precedente e del sistema di scarico del solido descritto nella sezione successiva è riportata nelle Figg. 3.7 e 3.8 seguenti.



*Figura 3.7. Vista laterale del reattore di cracking (al centro), del sistema di alimentazione del rifiuto (a sinistra) e del sistema di scarico del vapore e del solido (a destra).*



*Figura 3.8. Vista assonometrica del reattore di cracking (al centro), del sistema di alimentazione del rifiuto (a destra) e del sistema di scarico del vapore e del solido (a sinistra).*

### **3.3. Sistema di scarico del solido**

A valle dell'estremità inferiore del reattore è previsto un sistema di separazione e scarico del vapore a base di idrocarburi, che verrà poi avviato alla condensazione, e delle scorie solide (principalmente *coke* di pirolisi). L'uscita delle scorie verrà gestita da un'ulteriore coppia di valvole a ghigliottina operanti in modalità contrapposta (aperta-chiusa/chiusa-aperta). A valle di tale sistema le scorie saranno dapprima allontanate dal reattore (e quindi anche raffreddate) in un condotto metallico inclinato verso l'alto e dotato internamente di una coclea in acciaio (cfr. la Fig. 3.5), e quindi scaricate in un "big bag", inserito in una struttura metallica e dotato di un opportuno sistema a tenuta, oltre che di un sistema di controllo in continuo del peso scaricato. Esternamente al "big bag" una cappa aspiratrice provvederà ad evitare la dispersione nell'ambiente di vapori e polveri.

### **3.4. Torre di raffreddamento/condensazione**

I vapori provenienti dal reattore verranno inviati ad una torre di raffreddamento, denominata anche "dissipatore di energia", costituita da un serbatoio verticale in acciaio al carbonio a doppia parete, avente volume di  $1 \text{ m}^3$  (diametro di 800 mm e altezza di 2193 mm). Nell'intercapedine tra le due pareti passerà acqua proveniente da un chiller, la quale determinerà la condensazione della frazione a più elevato peso molecolare del vapore: dal fondo del reattore uscirà quindi l'olio di pirolisi, e dal "cielo" il gas.

La temperatura di esercizio di tale apparecchiatura sarà un elemento critico del processo, in quanto da un lato una sua riduzione determinerà la condensazione di una frazione più elevata di vapori, e quindi un aumento della resa in prodotto liquido, ma dall'altro un suo eccessivo abbassamento potrà portare alla solidificazione di alcune delle componenti dell'olio. Secondo quanto indicato dalla Get Energy, il valore orientativo della temperatura di esercizio della torre sarà di  $50^\circ\text{C}$ . A valle della torre

sono poi previste due unità di filtraggio per la rimozione di particelle solide grossolane (principalmente catrame); tali gruppi, ciascuno costituito da 8 cartucce “usa e getta” da sostituire periodicamente<sup>20</sup>, consentiranno la rimozione delle particelle aventi dimensioni superiori a 4  $\mu\text{m}$ .

### **3.5. Scrubber per il gas e unità di stoccaggio del gas e del liquido**

Il liquido verrà avviato ad un serbatoio cilindrico disposto orizzontalmente avente volume di 1 m<sup>3</sup> (diametro 800 mm e lunghezza 1993 mm), che verrà posizionato con opportuni comprensivo di piedi di sostegno e sarà dotato di una vasca di contenimento. Il gas verrà dapprima inviato prima inviato ad uno scrubber ad acqua per la rimozione di particelle grossolane, tar ecc. (lo scrubber sarà cilindrico e avrà diametro di 800 mm altezza di 2000 mm, per un volume di 1 m<sup>3</sup>), e quindi a due serbatoi verticali (anche questi cilindrici, con diametro di 800 mm e altezza di 1993 mm, per un volume di 1 m<sup>3</sup> ciascuno).

Periodicamente si prevede di analizzare l’acqua usata nello scrubber, anche allo scopo di poter meglio definire il più opportuno sistema di trattamento.

### **3.6. Pulpito di comando**

L’intero impianto sarà dotato di un sistema informatico di automazione, che sarà gestito da un pulpito di comando, posto ad opportuna distanza dall’impianto (cfr. la Fig. 3.2). A tale pulpito perverranno le informazioni provenienti dai vari sensori (di

---

<sup>20</sup> I filtri costituiranno rifiuti pericolosi, ai quali verrà attribuito il codice CER 150202\* (“assorbenti, materiali filtranti (inclusi filtri dell’olio non specificati altrimenti), stracci e indumenti protettivi, contaminati da sostanze pericolose”).

temperatura, di concentrazione di ossigeno, ecc.), e saranno resi disponibili i comandi per una gestione efficiente e sicura del processo. In particolare sarà presente un rilevatore di O<sub>2</sub> interno al reattore che comanderà l'immissione di N<sub>2</sub>, due regolatori di pressione per modificare le pressioni tra dissipatore, condotte e serbatoi, un sistema di registrazione in continuo delle pressioni, e flussostati termici e meccanici per misurare e controllare la produzione di gas e olio.

### **3.7. Punti di emissione in atmosfera**

L'impianto pilota sarà dotato di due punti di emissione in atmosfera, entrambi di modestissima rilevanza, uno derivante dalla caldaia dove verrà bruciato il gas prodotto dal processo e l'altro dalla cappa aspirante posta sopra il "big bag".

Per quanto riguarda il primo punto di emissione, visti i valori riportati da Get Energy (potenzialità dell'impianto pari a 30–40 kg/h e "resa" in gas combustibile nell'ordine del 15% su base ponderale) la produzione di gas combustibile è stimabile in ca. 5 kg/h, e la portata generata dalla sua combustione non raggiungerà i 100 Nm<sup>3</sup>/h. Per avere un'idea del volume delle emissioni associate alla combustione di tale quantità di gas, sarà sufficiente considerare che un'ordinaria caldaia domestica di quelle scelte per soddisfare le esigenze di un'abitazione avente superficie di 100 m<sup>2</sup> ha una potenza di ca. 25 kW<sub>t</sub>=21 000 kcal/h, e consuma ca. 1.6 kg/h di metano: in altri termini, la quantità di gas che verrà bruciata nella caldaia è circa il triplo di quella che viene ordinariamente bruciata in una caldaia domestica (fermo restando che la natura delle emissioni associate a tale combustione potrà essere stimata solo quando sarà effettivamente nota la composizione di tale gas).

Per quanto riguarda il secondo punto di emissione, anche in questo caso le portate saranno minime, e si prevede di dotare il condotto che dalla cappa porta al camino di un filtro a cartucce "usa e getta" per la rimozione dei composti organici volatili e del particolato eventualmente presenti nelle emissioni.



### **3.8. Dispositivi di sicurezza**

Secondo quanto indicato dalla Get Energy, l'impianto sarà dotato una torcia di sicurezza «a fiamma nascosta» per la combustione del gas prodotto, la quale verrà attivata in caso di malfunzionamento della caldaia, e inoltre di un impianto antincendio a CO<sub>2</sub>. Un altro presidio di sicurezza già menzionato sopra è costituito da un "pacco" di bombole di azoto il cui contenuto verrà utilizzato per inertizzare l'atmosfera interna al reattore nel caso in cui si dovesse superare il limite di concentrazione del 4% di ossigeno.

#### 4. Descrizione dell'attività sperimentale prevista

Visto il carattere fortemente innovativo del processo in esame, è parso opportuno condurre una campagna sperimentale, da inquadrare sotto le disposizioni dell'art. 211 del D.Lgs. 152/2006 citato nella Premessa alla presente relazione. La campagna sperimentale avrà presumibilmente la durata di tre mesi. Tale durata è però, come indicato, una durata presumibile: mentre è infatti interesse del proponente chiudere la sperimentazione in un tempo quanto più è possibile breve onde passare alla realizzazione e all'installazione dell'impianto industriale, occorre tenere presente che l'attività sperimentale è inerentemente caratterizzata da significativi elementi di incertezza, sia per quanto riguarda i risultati che deriveranno dalla sperimentazione sia per quanto riguarda la tempistica necessaria all'ottenimento di tali risultati; pertanto, è esplicitamente non esclusa la possibilità di avvalersi dell'intero periodo di tempo (due anni, eventualmente prorogabili di ulteriori due anni) menzionato al c. 2 dell'art. 211 del TUA<sup>21</sup>.

La sperimentazione avrà le seguenti finalità principali:

- individuare le condizioni operative ottimali per la gestione del processo in termini di temperatura di esercizio, portata di rifiuto (CSS con codice CER 191210) alimentabile, granulometria e umidità del rifiuto, ecc.;
- valutare le relazioni tra condizioni operative menzionate al punto precedente, caratteristiche del rifiuto alimentato, e caratteristiche del prodotto (olio

---

<sup>21</sup> «La durata dell'autorizzazione di cui al comma 1 è di due anni, salvo proroga che può essere concessa previa verifica annuale dei risultati raggiunti e non può comunque superare altri due anni.»

combustibile): in particolare per quanto riguarda l'olio le variabili di maggiore interesse saranno la resa (espressa come kg di olio prodotti per kg di rifiuto trattato), il potere calorifico e, in particolare in vista della cessazione della qualifica di rifiuto, la possibilità di caratterizzarlo nell'ambito delle categorie di oli combustibili descritte al già citato punto 1 della sez. 1 della parte II dell'all. X alla parte V del TUA (cfr. anche *infra* la sezione 5 della presente relazione);

- valutare il modo puntuale le caratteristiche degli impatti sull'ambiente del processo, sia per quanto riguarda gli impatti "diretti" (emissioni in atmosfera e produzione di rifiuti), sia per quanto riguarda gli impatti "indiretti", vale a dire quelli derivanti dall'utilizzo dei prodotti del processo (olio combustibile e, laddove utilizzabile, gas di pirolisi).

#### **4.1. Verifiche preliminari dell'impianto**

La prima fase della sperimentazione riguarderà la verifica della corretta costruzione dell'impianto pilotam e quindi il suo collaudo operativo. Verrà quindi controllato il corretto funzionamento dei vari organi mobili (valvole, motori, coclee ecc.), successivamente verranno condotte alcune prove di tenuta, dapprima "a freddo" e poi "a caldo" per verificare la funzionalità delle valvole e delle guarnizioni, e infine verranno condotte alcune prove "a perdere", nelle quali si tratterà CSS (o, se ritenuto opportuno, plastica vergine) per verificare che i vari elementi dell'impianto e l'impianto nel suo complesso funzionino correttamente.

Naturalmente non si esclude che, all'esito delle prove preliminari, potrà insorgere la necessità di apportare piccole modifiche all'impianto, delle quali ovviamente si darà prontamente conto all'U.O.D. Autorizzazioni Ambientali e Rifiuti.

#### **4.2. Modalità di esecuzione delle prove**

Un primo aspetto che occorre affrontare nella definizione della campagna sperimentale riguarda la modalità di esecuzione delle prove, e quindi la loro durata temporale. Come indicato sopra, l'impianto pilota ha dimensioni complessivamente modeste, e quindi le fasi di accensione e spegnimento saranno relativamente rapide. A causa di ciò è previsto che ciascuna prova sperimentale duri tra le quattro e le cinque ore. In particolare la sequenza di operazioni che andrà condotta in ciascuna prova sarà la seguente:

- avvio dell'impianto freddo, con verifica delle principali unità e del sistema computerizzato di controllo e gestione del processo, e riscaldamento del reattore fino alla temperatura di esercizio di 350°–400°C (durata prevista: 1 h);
- esecuzione della prova vera e propria, con avvio del caricamento del rifiuto, attesa del raggiungimento delle condizioni di regime, stoccaggio dei prodotti ottenuti "a regime" (e avvio allo smaltimento dei prodotti ottenuti "fuori regime") ed esecuzione dei campionamenti per olio combustibile, gas di pirolisi e coke di pirolisi (durata prevista: 2–3 h);
- completamento della prova, con arresto dell'alimentazione del rifiuto, svuotamento e pulizia del reattore, arresto dell'alimentazione elettrica alla resistenza interna e esecuzione delle operazioni di pulizia necessarie a riportare l'impianto pilota nelle condizioni ottimali per l'effettuazione di una nuova prova (durata prevista: 1 h).

Orientativamente quindi ciascuna prova impegnerà l'impianto per un'intera giornata lavorativa (sebbene non sia da escludere del tutto la possibilità di condurre due prove distinte in una singola giornata), e comporterà il consumo di ca. 150–200 kg di

rifiuto<sup>22</sup>. Resta peraltro inteso che non è da escludere che tra una prova ed un'altra siano necessari interventi di manutenzione tali da tenere fuori servizio l'impianto per alcuni giorni.

#### **4.3. Individuazione delle condizioni operative ottimali per il processo**

Come sopra riferito, la resa e l'efficienza del processo dipendono prevalentemente dalla qualità del materiale in entrata (tipologie di plastiche, temperature di fusione di tali plastiche, tenore di umidità e di impurezze), dalla temperatura di esercizio, e dal tempo di permanenza del materiale all'interno del reattore (regolabile agendo sulla velocità di rotazione della coclea interna al reattore e sulla portata di rifiuti in ingresso). Il primo aspetto che dovrà essere chiarito nel corso dell'attività sperimentale riguarderà quindi la "taratura" del processo (vale a dire, l'individuazione delle condizioni ottimali di temperatura e tempo di permanenza del materiale nel reattore) con un CSS quanto più è possibile "standard". Tale messa a punto potrà essere condotta mediante prove di durata sufficientemente ampia da annullare la rilevanza di eventuali transitori, e andrà ripetuta utilizzando diverse tipologie di alimentazione.

In particolare, allo scopo di massimizzare l'efficacia delle prove sperimentali e ottenere informazioni quanto più è possibile utili e spendibili in vista di un esercizio "ordinario" del processo, sarà opportuno predisporre le operazioni in modo tale che in ciascuna prova venga alimentato materiale omogeneo per origine e composizione, e però conducendo diverse prove, nelle quali siano trattati materiali differenti.

---

<sup>22</sup> E' opportuno ricordare che la lett. b) del c. 1 dell'art. 211 del TUA stabilisce, tra le condizioni per il rilascio dell'autorizzazione, che «*gli impianti abbiano una potenzialità non superiore a 5 tonnellate al giorno, salvo deroghe...*».

#### **4.4. Procedura per il campionamento e la caratterizzazione dei prodotti del processo.**

Appare opportuno che in ciascuna prova siano prelevati, in condizioni di regime (e quindi decorso un tempo sufficientemente ampio dall'avvio della prova stessa) campioni dei prodotti liquidi, gassosi e solidi derivanti dal processo, per sottoporli successivamente ad analisi. Per il campionamento del liquido occorre che il serbatoio di stoccaggio del liquido sia dotato di un rubinetto di prelievo. Per il campionamento del gas occorre che o nel serbatoio di stoccaggio del gas o nel condotto in uscita dal serbatoio sia inserita una valvola di spillamento; infine per il solido (coke di pirolisi) si procederà semplicemente ad un prelievo dal *big bag* di raccolta.

Per quanto riguarda il prodotto liquido, la caratterizzazione dovrà innanzitutto riguardare la composizione elementare, mirando ad individuare la eventuale presenza di elementi “problematici” (quali, ad esempio, cloro, zolfo, azoto, metalli ecc.) che potrebbero creare emissioni indesiderate in fase di combustione. In vista dell'individuazione della modalità economicamente più vantaggiosa di utilizzo dei prodotti del processo, appare comunque opportuno realizzare, almeno per alcuni campioni, una caratterizzazione per quanto possibile completa (potere calorifico, contenuto di acqua e sedimenti, curva di ebollizione, acidità, distinzione tra idrocarburi aromatici e alifatici ecc.). Tale caratterizzazione verrà affidata o ad un laboratorio di analisi accreditato o a Innovhub – Divisione Combustibili<sup>23</sup>.

Anche per il gas occorrerà valutare, oltre la composizione elementare, il potere calorifico e la composizione chimica dettagliata, in particolare allo scopo di verificare l'eventuale presenza di composti chimici indesiderati dal punto di vista delle emissioni in atmosfera a valle della combustione.

---

<sup>23</sup> *Innovhub – Stazioni sperimentali per l'Industria* è un'azienda speciale della Azienda Speciale della Camera di Commercio di Milano che svolge attività di ricerca applicata, consulenza tecnico-scientifica e testing industriale, e dal 2011 ha assorbito la *Stazione sperimentale per i Combustibili*, a sua volta azienda speciale della Camera di Commercio di Milano storicamente dotata di forti competenze e *know-how* in materia di caratterizzazione dei combustibili.



Infine, per quanto riguarda il sottoprodotto solido, l'analisi dovrà, almeno in prima istanza, riguardare la sua composizione chimica, al fine di valutarne le possibilità di reimpiego ovvero, in caso di necessità di smaltimento come rifiuto, la caratterizzazione con i codici "a specchio" 190111\* ("ceneri pesanti e scorie da incenerimento o pirolisi di rifiuti, contenenti sostanze pericolose") o 190112 ("ceneri pesanti e scorie da incenerimento o pirolisi di rifiuti, diverse da quelle di cui alla voce 190111").

#### **4.5. Valutazione previsionale delle emissioni dal processo (e indicazioni sugli approcci per la misura di tali emissioni)**

Secondo quanto indicato dalla Get Energy, le emissioni in atmosfera del processo principalmente deriveranno dallo scarico in atmosfera dei prodotti della combustione del gas di pirolisi in una caldaia da realizzare appositamente. Vista la prevedibile composizione del gas (cfr. *supra*, sezione 2.4), tali emissioni non dovrebbero contenere inquinanti degni di nota oltre concentrazioni trascurabili di ossido di carbonio, ossidi di azoto e, possibilmente, acido cloridrico e ossidi di zolfo.

E' comunque importante tenere presente che, trattandosi di un processo di combustione in fase gas, anche l'eventuale (e inattesa) presenza di concentrazioni significative di HCl non determinerà un rischio significativo di rilascio in atmosfera di composti pericolosi del cloro (diossine, furani, policlorobifenili ecc.): tali composti infatti sono inerentemente composti "di cattiva combustione", ovvero di combustione condotta a temperature relativamente basse e in presenza di quantitativi insufficienti di ossigeno, e tali condizioni possono sì, essere talora raggiunte nei processi di combustione di combustibili solidi di cattiva qualità, come i rifiuti solidi, ma certo non possono essere raggiunte durante la combustione di un gas avente le caratteristiche di quello qui in esame, tanto più se tale combustione viene condotta in una moderna caldaia dotata di fiamma pilota ecc. Analogamente sono da escludersi processi di formazione *de novo* (a valle, cioè, della camera di combustione) dei composti ora

menzionati, visto che tali processi richiedono la presenza nei fumi di particolato solido, ovviamente da escludere nel caso della combustione di un gas “leggero” come quello qui in esame.

Altre emissioni di minore importanza saranno quelle captate dalle cappe che verranno utilizzate per “proteggere” l’impianto pilota, e in particolare la sezione di scarico del coke. Come indicato sopra, tali emissioni, che potranno ipoteticamente contenere concentrazioni non trascurabili di composti organici volatili e di particolato, verranno trattate mediante un filtro a cartucce, e si prevede l’esecuzione di campionamenti al camino posto a valle del filtro.

Le emissioni gassose saranno soggette a caratterizzazione secondo le norme vigenti in materia di emissioni in atmosfera, e in particolare in sede di Conferenza dei Servizi per il rilascio dell’autorizzazione *ex art. 211 TUA* verrà individuato un laboratorio adeguatamente accreditato<sup>24</sup> al quale affidare le operazioni prelievo ed analisi di tali emissioni.

---

<sup>24</sup> L’accreditamento dei laboratori di analisi è regolamentato nel nostro Paese dalla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2005 e da altre norme analoghe.

## 5. Considerazioni sui possibili utilizzi dei prodotti del trattamento

### 5.1. Caratterizzazione e valorizzazione energetica del prodotto liquido

Come sopra indicato, Il prodotto principale del processo di pirolisi in esame sarà un olio prevalentemente composto da idrocarburi a basso e medio peso molecolare. Le effettive possibilità di utilizzo di tale prodotto dipenderanno, ovviamente, dalla sua composizione, e potranno quindi essere concretamente discusse quando sarà nota la relazione tra composizione dei rifiuti alimentati all'impianto, valori assunti dai parametri operativi per il funzionamento dell'impianto e caratteristiche dell'olio. Ciò premesso, è però possibile svolgere alcune considerazioni preliminari, da verificare poi a sperimentazione effettuata.

Secondo quanto indicato dalla PRT e dalla Get Energy l'utilizzo al quale si intende destinare l'olio di pirolisi sarà la combustione in motore endotermico stazionario per la produzione di energia elettrica. Da un punto di vista normativo l'utilizzo di un dato combustibile per una data applicazione è regolamentato *in primis* dal Titolo III ("Combustibili", art. 292–298) della Parte V ("Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera") del TUA. In tale Titolo in particolare il c. I dell'art. 293 ("Combustibili consentiti") recita: «*Negli impianti disciplinati dal Titolo I e dal Titolo II<sup>25</sup> della Parte V del presente Decreto [...] possono*

---

<sup>25</sup> Il Titolo I della Parte V (artt. 267–281) è dedicato alla "Prevenzione e limitazione delle emissioni in atmosfera di impianti e attività"; il Titolo II (artt. 282-290) agli "Impianti termici civili".

*essere utilizzati esclusivamente i combustibili previsti per tali categorie di impianti dall'All. X alla Parte V del presente Decreto, alle condizioni ivi previste. I materiali e le sostanze elencati nell'All. X alla Parte V del presente Decreto non possono essere utilizzati come combustibili ai sensi del presente titolo se costituiscono rifiuti ai sensi della parte quarta del presente decreto. E' soggetta alla normativa vigente in materia di rifiuti la combustione di materiali e sostanze che non sono conformi all'All. X alla Parte V del presente Decreto o che comunque costituiscono rifiuti ai sensi della Parte IV del presente Decreto. [...]».*

E' quindi evidente come la combustione "ordinaria" (cioè soggetta solo alle norme della Parte V del TUA, relativa al controllo delle emissioni in atmosfera) sia possibile solo nel caso in cui si utilizzino combustibili elencati nell'all. X alla stessa parte V, ed inoltre tali combustibili non siano rifiuti. In tutti gli altri casi (combustibili non elencati all. X e/o combustibili che, indipendentemente dall'essere o meno elencati nell'all. X, siano rifiuti) vigono le norme relative alla combustione di rifiuti (incenerimento), fissate nel Titolo III-bis (artt. da 237-bis a 237-duovicies) del TUA.

Nel caso in questione è interesse del proponente l'iniziativa **non** far rientrare la combustione dell'olio di pirolisi finalizzata alla produzione di energia elettrica nelle norme relative all'incenerimento dei rifiuti. Tale esclusione dovrà avvenire attraverso un duplice passaggio:

- innanzitutto occorrerà mostrare come l'olio di pirolisi, nonostante provenga dal trattamento di un rifiuto, possa perdere la qualifica di rifiuto ai sensi dell'art. 184-ter del TUA<sup>26</sup> e possa quindi essere considerato una materia

---

<sup>26</sup> Art. 184-ter ("Cessazione della qualifica di rifiuto") del TUA: «[1]. Un rifiuto cessa di essere tale, quando è stato sottoposto a un'operazione di recupero, incluso il riciclaggio e la preparazione per il riutilizzo, e soddisfatti i criteri specifici, da adottare nel rispetto delle seguenti condizioni: a) la sostanza o l'oggetto è comunemente utilizzato per scopi specifici; b) esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto; c) la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti; d) l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana. [2] L'operazione di recupero può consistere semplicemente nel controllare i rifiuti per verificare se soddisfano i criteri elaborati conformemente alle predette condizioni. I criteri di cui al c. 1 sono

ordinaria “End of waste” (“EoW” o “materia prima secondaria”, secondo una dicitura ora in disuso);

- in secondo luogo (ma, come si vedrà, i due passaggi di fatto saranno simultanei) occorrerà mostrare come l’olio possa essere assimilato ad una delle categorie di combustibili ammessi elencate nel citato all. X alla Parte V del TUA.

## **5.2. Cessazione della qualifica di rifiuto**

Per quanto riguarda il primo dei due aspetti ora menzionati, e cioè la perdita della qualifica di rifiuto, il c. 1 dell’art. 184-*ter* del TUA fissa alle lettere a)–d) i criteri per la cessazione della qualifica di rifiuto. Tali criteri sono che:

- a) l’olio prodotto sia comunemente utilizzato per scopi specifici, e questo è certamente vero per un olio combustibile utilizzabile in processi di combustione stazionaria;
- b) che esista un mercato o una domanda per l’olio, e questo è vero nella misura in cui si riuscirà a verificare e dimostrare che l’olio di pirolisi che sarà prodotto è assimilabile ad un olio combustibile commerciale;

---

*adottati in conformità a quanto stabilito dalla disciplina comunitaria ovvero, in mancanza di criteri comunitari, caso per caso per specifiche tipologie di rifiuto attraverso uno o più decreti del Ministro dell’ambiente e della tutela del territorio e del mare, ai sensi dell’art. 17, c. 3, della L. 23 agosto 1988, n. 400. I criteri includono, se necessario, valori limite per le sostanze inquinanti e tengono conto di tutti i possibili effetti negativi sull’ambiente della sostanza o dell’oggetto. [3]. Nelle more dell’adozione di uno o più decreti di cui al c. 2, continuano ad applicarsi le disposizioni di cui ai decreti del Ministro dell’Ambiente e della Tutela del Territorio in data 5/2/1998, 12/6/2002, n. 161, e 17/11/2005, n. 269 e l’art. 9-bis, lett. a) e b), del decreto-legge 6/11/2008, n. 172, convertito, con modificazioni, dalla legge 30/11/2008, n. 210. La circolare del Ministero dell’Ambiente 28/6/1999, prot. n. 3402/V/MIN si applica fino a sei mesi dall’entrata in vigore della presente disposizione. [4]. Un rifiuto che cessa di essere tale ai sensi e per gli effetti del presente articolo è da computarsi ai fini del calcolo del raggiungimento degli obiettivi di recupero e riciclaggio stabiliti dal presente decreto, dal decreto legislativo 24/6/2003, n. 209, dal decreto legislativo 25/7/2005, n. 151, e dal decreto legislativo 120/11/2008, n. 188, ovvero dagli atti di recepimento di ulteriori normative comunitarie, qualora e a condizione che siano soddisfatti i requisiti in materia di riciclaggio o recupero in essi stabiliti. [5]. La disciplina in materia di gestione dei rifiuti si applica fino alla cessazione della qualifica di rifiuto.»*

- c) che l'olio soddisfi i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetti la normativa e gli standard esistenti applicabili alla categoria di prodotti alla quale appartiene, e questo, ancora una volta, sarà verificato se si dimostrerà che l'olio rispetta le norme per la classificazione degli oli combustibili;
- d) che l'utilizzo dell'olio non porti a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana, e questo sarà verificato se si mostrerà che, in ragione della sua composizione, la combustione dell'olio non avrà impatti più significativi di quelli derivanti dalla combustione di un olio "da raffinazione".

Appare quindi che per la cessazione della qualifica di rifiuto occorrerà verificare, mediante un'opportuna caratterizzazione, sia che l'olio di pirolisi prodotto rispetti le norme tecniche esistenti in materia di oli combustibili (alle quali sarà dedicata la sottosezione 5.3 seguente), sia che la sua composizione non sia tale da generare, per effetto della combustione, emissioni maggiormente impattanti di quelle che sarebbero prodotte dalla combustione di un olio combustibile reperibile sul mercato.

Per quanto, infine, riguarda il riconoscimento pratico della cessazione della qualifica di rifiuto, le condizioni fissate ai cc. 2 e 3 rinviano a criteri comunitari o, in subordine, a decreti ministeriali che fissino, gli uni o gli altri, criteri per la cessazione. In considerazione del fatto che tali criteri esistono per un numero complessivamente limitato di tipologie di rifiuti, il Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha recentemente diramato una nota (prot. 10045 dell'1/7/2016) in cui, tra l'altro<sup>27</sup>, si precisa che, laddove per la tipologia di rifiuti che si intende recuperare non

---

<sup>27</sup> La nota prot. 10045 dell'1/7/2016 recita tra l'altro: «...sono individuate tre modalità di definizione dei criteri di EoW, gerarchicamente ordinate. I criteri di cui ai regolamenti europei prevalgono, nell'ambito del loro rispettivo campo di applicazione, sui criteri definiti con i decreti ministeriali, laddove abbiano ad oggetto le stesse tipologie di rifiuti. A loro volta, i criteri definiti con i decreti ministeriali prevalgono, salvo uno specifico regime transitorio stabilito dal rispettivo decreto ministeriale, sui criteri che le Regioni -o gli Enti da queste delegati- definiscono in fase di autorizzazione ordinaria di impianti di recupero dei rifiuti, sempre che i rispettivi decreti ministeriali abbiano ad oggetto le medesime tipologie di rifiuti. In via residuale, le Regioni -o gli enti da queste individuati- possono, in sede di rilascio dell'autorizzazione prevista agli artt. 208, 209 e 211, e quindi



esistono né disposizioni comunitarie né decreti ministeriali, è facoltà della Regione competente per territorio rilasciare (ovviamente a valle delle caratterizzazioni ora menzionate) in sede di autorizzazione il provvedimento di riconoscimento della cessazione della qualifica di rifiuto.

### **5.3. Caratterizzazione dell'olio di pirolisi e assimilazione all'olio combustibile commerciale**

Per quanto riguarda l'altro aspetto sopra menzionato, e cioè l'assimilazione dell'olio di pirolisi ad una alle tipologie di combustibili consentite, in primo luogo occorre osservare che tra i combustibili ammessi elencati al par. 1 della sez. 1 dell'all. X ("Elenco dei combustibili di cui è consentito l'utilizzo negli impianti di cui al titolo I")<sup>28</sup>, alla lett. h) è menzionato «*l'olio combustibile ed altri distillati pesanti di petrolio con contenuto di zolfo non superiore all'1% in massa e rispondenti alle caratteristiche*

---

*anche in regime di Autorizzazione Integrata Ambientale, definire criteri EoW previo riscontro della sussistenza delle condizioni indicate al c. 1 dell'art. 184-ter, rispetto a rifiuti che non sono stati oggetto di regolamentazione dei succitati regolamenti comunitari o decreti ministeriali.»*

<sup>28</sup> «Negli impianti disciplinati dal titolo I è consentito l'utilizzo dei seguenti combustibili: a) gas naturale; b) gas di petrolio liquefatto; c) gas di raffineria e petrolchimici; d) gas d'altoforno, di cokeria, e d'acciaieria; e) gasolio, kerosene ed altri distillati leggeri e medi di petrolio rispondenti alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 1, par. 1, fatto salvo quanto previsto nella sez. 3; f) emulsioni acqua-gasolio, acqua-kerosene e acqua-altri distillati leggeri e medi di petrolio di cui alla precedente lettera e), rispondenti alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 3, par. 1; g) biodiesel rispondente alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 1, par. 3; h) olio combustibile ed altri distillati pesanti di petrolio con contenuto di zolfo non superiore all'1% in massa e rispondenti alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 1, par. 1, colonne 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 e 10, fatto salvo quanto previsto nella sez. 3; i) emulsioni acqua-olio combustibile o acqua-altri distillati pesanti di petrolio, di cui alla precedente lettera h), e rispondenti alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 3, par. 2; l) legna da ardere alle condizioni previste nella parte II, sez. 4; m) carbone di legna; n) biomasse combustibili individuate nella parte II, sez. 4, alle condizioni ivi previste; o) carbone da vapore con contenuto di zolfo non superiore all'1% in massa e rispondente alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 2, par. 1; p) coke metallurgico e da gas con contenuto di zolfo non superiore all'1% in massa e rispondente alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 2, par. 1; q) antracite, prodotti antracitosi e loro miscele con contenuto di zolfo non superiore all'1% in massa e rispondenti alle caratteristiche indicate nella parte II, sez. 2, par. 1; r) biogas individuato nella parte II, sez. 6, alle condizioni ivi previste; s) gas di sintesi proveniente dalla gassificazione di combustibili consentiti, limitatamente allo stesso comprensorio industriale nel quale tale gas è prodotto.»

indicate nella parte II, sez. 1, par. 1, colonne 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 e 10, fatto salvo quanto previsto nella sez. 3», nel quale le caratteristiche sopra menzionate sono quelle riportate nella tabella riportata in Fig. 5.1, tratta dal testo della norma.

Tipi di combustibile liquido		Gasolio/Kerosene/ distillati leggeri e medi di petrolio	Olio combustibile ed altri distillati pesanti di petrolio										Metodi di analisi
			Fluidissimo BTZ		Fluido BTZ		Semifluido BTZ		Denso ATZ		Denso BTZ		
Caratteristica	Unità		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Viscosità													
a 50 C	mm <sup>2</sup> /s		<21,2		da 21,2 a 37,4		da 37,5 a 91,0		>di 91		>di 91		EN ISO 3104
a 50 C	°E		<3		da 3,0 a 5,0		da 5,1 a 12,0		>di 12		>di 12		EN ISO 3104
a 40 C	mm <sup>2</sup> /s	Da 2,0 a 7,4 <sup>1)</sup>											EN ISO 3104
Acqua e sedimenti	% (V/V)	≤0,05	≤0,05		≤1,0		≤1,0						UNI 20058
Acqua	% (V/V)								≤1,5	≤1,5			ISO 3733
Sedimenti	% (V/V)								≤0,5	≤0,5			ISO 3735

**Figura 5.1. Tabella tratta dalla Sezione 1 (“Combustibili liquidi”) della Parte II (“Caratteristiche merceologiche dei combustibili e metodi di misura”) dell’All. X alla parte V del TUA.**

A sua volta, per “olio combustibile pesante” è data nella lett. a) del c. 2 dell’art. 292 (“Definizioni”) del TUA la seguente definizione: «*qualsiasi combustibile liquido derivato dal petrolio del codice NC 2710 1951–2710 1969<sup>29</sup> ovvero qualsiasi combustibile liquido derivato dal petrolio, escluso il gasolio di cui alle lettere b) e d), che, per i suoi limiti di distillazione, rientra nella categoria di oli pesanti destinati ad essere usati come combustibile e di cui meno del 65% in volume, comprese le perdite,*

<sup>29</sup> La sigla “NC” sta per Nomenclatura Combinata, così come definita a livello comunitario dal Reg. (UE) n. 2015/1574 del 6/10/2015 “che modifica l’all. I del Reg. (CEE) n. 2658/87 del Consiglio relativo alla nomenclatura tariffaria e statistica ed alla tariffa doganale comune”; in tale regolamento la voce 2710 si riferisce a “oli di petrolio o di minerali bituminosi”, con la precisazione (cruciale per il discorso qui svolto) che tali termini «*non si riferiscono soltanto agli oli di petrolio o di minerali bituminosi, ma anche agli oli analoghi e a quelli costituiti principalmente da idrocarburi non saturi miscelati, nei quali i costituenti non aromatici predominano in peso rispetto ai costituenti aromatici, qualunque sia il procedimento per ottenerli.*» Le voci da 2710 19 51 a 2710 19 69, infine, si riferiscono agli “oli combustibili”.



*distilla a 250°C secondo il metodo ASTM D86, anche se la percentuale del distillato a 250°C non può essere determinata secondo il predetto metodo».*

L'analisi delle norme ora citate indica quindi che, allo scopo di poter considerare l'olio di pirolisi equivalente all'olio combustibile "convenzionale", e quindi di sancirne l'*End of Waste* e l'utilizzabilità ai sensi delle norme vigenti (tra cui quelle relative alle accise) in un motore stazionario per la generazione di energia elettrica occorrerà caratterizzarlo:

- dal punto di vista del rapporto tra costituenti non aromatici e costituenti aromatici allo scopo di verificare che i primi predominino sui secondi (cfr. la definizione data dal Reg. (UE) n. 2015/1574 per la voce 2710);
- dal punto di vista della volatilità allo scopo di verificare che meno del 65% in volume, comprese le perdite, distilli a 250°C (cfr. la definizione data dalla lett. *a* del c. 2 dell'art. 292 del TUA);
- dal punto di vista del tenore di zolfo allo scopo di verificare che sia inferiore all'1% (cfr. la definizione data dalla lett. *h*) del par. 1 della sez. 1 dell'all. X alla parte V del TUA);
- dal punto di vista del contenuto di acqua e dei sedimenti, nonché della viscosità, allo scopo di verificare in quale delle categorie elencate nel par. 1 della sez. 1 della parte II dell'all. X alla parte V del TUA (cfr. anche la Fig. 5.1) l'olio andrà inserito.

#### **5.4. Valorizzazione energetica del prodotto gassoso**

Come sopra indicato, nell'impianto industriale la combustione della frazione incondensabile originata dal processo di pirolisi verrà sfruttata per produrre calore a servizio delle stesse reazioni di pirolisi. D'altra parte le dimensioni dell'impianto pilota non consentono di installare un sistema di recupero dell'energia sviluppata dalla

combustione, che verrà quindi condotta in una caldaia “a perdere” (nella quale però si valuterà la quantità di energia prodotta allo scopo di acquisire informazioni utili al recupero che si intende condurre nell’impianto industriale).

Peraltro, all’esito della caratterizzazione del gas, il proponente si riserva, nell’ambito del meccanismo *End of Waste* sopra descritto, di proporre la valorizzazione del gas in co-combustione con l’olio per la produzione di energia elettrica.

### **5.5. Possibili utilizzi del sottoprodotto solido**

Il solido carbonioso di scarto potrà costituire o un sottoprodotto riutilizzabile, o un rifiuto speciale al quale andrà attribuito, in funzione della composizione, uno tra i codici CER 120111\* e 190112. Una volta che saranno disponibili dati relativi all’effettiva composizione chimica del solido di scarto che si genererà nell’impianto di Sarno, sarà possibile valutare possibili utilizzi per tale solido, ovvero –in caso di necessità di smaltimento- la possibilità (qualora risulterà un rifiuto non pericoloso con codice CER 190112) di utilizzarlo nella produzione di CSS.

## 6. Conclusioni

Il processo di pirolisi termica delle plastiche in idrocarburi liquidi proposto da Polyurethan Recycling Technology (PRT) srl in collaborazione Get Energy Prime Italia srl è stato analizzato, in particolare con riferimento alla prospettiva di realizzare a Sarno (SA) un impianto pilota per il processo. In considerazione del fatto che come alimentazione a tale processo verrà utilizzato un combustibile solido secondario (CSS, secondo la norma UNI 9903) a base di poliolefine, caratterizzato dal codice CER 191210 e derivante dal trattamento di rifiuti a base di plastiche, tale analisi è stata condotta alla luce di quanto disposto dall'art. 211 del D.Lgs. 152/2006, che regola le autorizzazioni per impianti di ricerca e di sperimentazione nel settore del trattamento dei rifiuti.

Le conclusioni a cui è pervenuta l'analisi condotta sono le seguenti:

- Il processo di pirolisi proposto è un processo continuo, condotto a temperatura moderata (350°–400°C), principalmente rivolto alle materie plastiche poliolefiniche, che comporta la produzione di un olio a base di idrocarburi, di una miscela gassosa combustibile e di uno scarto solido carbonioso.
- L'olio a base di idrocarburi sopra indicato, presumibilmente (e salve le caratterizzazioni da eseguire durante la campagna sperimentale) sarà assimilabile ad un olio combustibile pesante da utilizzare in motori stazionari per la produzione di energia elettrica.
- La corrente gassosa incondensabile verrà bruciata in una caldaia; in prospettiva, e all'esito della sua caratterizzazione, verrà però valutata la

possibilità di sfruttare il calore prodotto dalla sua combustione per il processo di pirolisi ovvero la possibilità di utilizzarla, in co-combustione con l'olio, per la generazione di energia elettrica.

- Il solido carbonioso andrà caratterizzato e costituirà un sottoprodotto o un rifiuto speciale; in questo caso, in funzione della composizione chimica, gli andrà attribuito uno tra i codici CER 190111\* e 190112, e occorrerà gestirlo secondo le vigenti norme.
- Allo scopo di verificare le prestazioni del processo, sia in termini di resa e qualità dei prodotti ottenuti sia, soprattutto, in termini di impatto ambientale derivante dalle emissioni del processo stesso e dalle emissioni "secondarie" generate dall'utilizzo dei prodotti originati nel processo, andrà condotta una adeguata campagna di sperimentazione.
- Tale campagna andrà inquadrata sotto le previsioni del citato art. 211 del D.Lgs. 152/2006, e dovrà avere l'obiettivo di verificare le prestazioni dell'impianto in funzione delle caratteristiche del rifiuto che verrà alimentato, nonché di individuare le condizioni operative ottimali, principalmente in termini di temperatura di esercizio e tempi di permanenza della miscela nel reattore.
- A valle della campagna di prove, secondo quanto già pattuito tra Dipartimento di Ingegneria e PRT, verrà prodotta una nuova relazione nella quale i risultati della sperimentazione verranno criticamente esaminati, in particolare in vista dell'auspicata realizzazione di un impianto a scala industriale per la pirolisi termica di rifiuti a base di plastiche e la produzione di idrocarburi liquidi.

## Bibliografia

Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J. (2015), "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review", *Waste Manage.* **29**, 2625.

Al-Salem S.M., Antelava A., Constantinou A., Manos G., Dutta A. (2017). "A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)", *J. Env. Manage.* **197**, 177.

Anders G., Burkhardt I., Illgen U., Schultz I.W., Scheve J. (1990). "The influence of HZSM-5 zeolite on the product composition after cracking of high boiling hydrocarbon fractions". *Appl. Catal. A*, **62**, 271.

Demirbas A. (2004). "Pyrolysis of municipal plastic waste for recovery of gasoline range hydrocarbons". *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **72**, 97.

Ding W.B., Liang J., Anderson L.L. (1997). "Thermal and catalytic degradation of high density polyethylene and commingled post-consumer plastic waste". *Fuel Proc. Technol.* **51**, 47.

Faravelli T., Pinciroli M., Pisano F., Bozzano G., Dente M., Ranzi E. (2001). "Thermal degradation of polystyrene". *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **60**, 103.

Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste - A Global Review of Solid Waste Management*, Urban Development Series, World Bank, Washington, USA (2012).

ISPRA (2016). *Rapporto rifiuti 2016*, ISPRA, Roma.



- Kunwar B., Cheng H.N., Chandrashekar S.R., Sharma B.K. (2016). "Plastics to fuel: A review", *Ren. Sust. Energy Rev.* **54**, 421.
- Lee S.Y. (2001). "Catalytic degradation of polystyrene over natural clinoptilolite zeolite". *Pol. Degrad. Stabil.* **74**, 297–305.
- Miandad R., Barakat M.A., Aburiazaiza A.S., Rehan, M., Nizami A.S. (2016). "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review", *Proc. Safety Environ Protection* **102**, 822.
- Murphy F., Devlin G., McDonnell K. (2013). "The Evaluation of flash point and cold filter plugging point with blends of diesel and Cyn–Diesel pyrolysis fuel for automotive engines". *The Open Fuels & Energy Sci. J.*, **6**, 1.
- Ohkita H., Nishiyama R., Tochihara Y., Mizushima T., Kakuta N., Morioka Y. (1993). "Acid properties of silica-alumina catalysts and catalytic degradation of polyethylene". *Ind, Eng. Che. Res.*, **32**, 3112.
- Panda A.K., Singh R.K., Mishra D.K. (2010). "Thermolysis of waste plastics to liquid fuel. A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products: A world prospective". *Ren. Sust. Energy Rev.* **14**, 233.
- Park D.W., Hwang E.Y., Kim J.R., Choi J.K., Kim Y.A., Woo H.C. (1999). "Catalytic degradation of polyethylene over solid acid catalysts". *Pol. Degrad. Stabil.* **65**, 193.
- PlasticEurope, *Plastics: the Facts 2015*, PlasticEurope, Bruxelles, Belgio (2015).
- Scheirs J, Kaminsky W. (2006). *Feedstock recycling of waste plastics*. John Wiley & Sons, New York (USA).
- Scott G. (2000). "Green polymers", *Polym. Degradation and Stability*, **68**, 1.
- Sharuddin S.D.A., Abnisa F., Daud W.M.A.W., Aroua M.K. (2016). "A review on pyrolysis of plastic wastes", *Energy Conv. Manage.* **115**, 308.

- Singh R.K., Ruj B. (2016). "Time and temperature depended fuel gas generation from pyrolysis of real world municipal plastic waste", *Fuel* **174**, 164.
- Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I.P.S., Feo, L., Fraternali, F. (2017), "Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications", *Composites B* **115**, 409.
- Sorum L., Gronli M.G., Hustad J.E. (2001). "Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes" *Fuel* **80**, 1217.
- Wong S.L., Ngadi N., Abdullah T.A.T., Inuwa I.M. (2015). "Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A review", *Ren. Sust. Energy Rev.* **50**, 1167.
- Zhang G.H., Zhu J.F., Okuwaki A. (2007). "Prospect and current status of recycling waste plastics and technology for converting them into oil in China". *Res. Cons. Recycling* **50**, 231.